
بسم الله الرحمن الرحيم

سومین کنفرانس ملی
آب و هواشناسی ایران

با محوریت تغییر اقلیم و دریاچه ارومیه

The 3rd National Conference on Climatology of Iran

Focusing on Climate Change & Lake Urmia

دانشگاه ارومیه

۱۶ مهرماه ۱۴۰۴

ISC کد اختصاصی: ۰۴۲۵۰-۶۱۷۷۷



محورهای کنفرانس:

- پیامدهای اقلیمی خشک شدن دریاچه ارومیه
- تغییر اقلیم و پیامدهای آن در ایران
- شاخص‌های حدی و مخاطرات آب و هوایی
- آب و هواشناسی سینوپتیک و دینامیک
- مدلسازی اقلیمی
- آب و هواشناسی کاربردی (کشاورزی، گردشگری، شهری، نظامی و ...)
- فناوریهای نوین و سنجش از دور در آب و هواشناسی
- کاربرد هوش مصنوعی در مطالعات اقلیمی

ncci3.urmia.ac.ir

ارومیه، بلوار والفجر، خیابان صدا و سیما، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، گروه جغرافیا، دبیرخانه سومین کنفرانس ملی آب و هواشناسی ایران

ncci3@urmia.ac.ir ۰۴۴۳۳۶۹۷۱۶ ۰۴۴۳۳۶۲۰۱۱

دبیر علمی کنفرانس: دکتر خدیجه جوان

دبیر اجرایی کنفرانس: دکتر علیرضا موقری

اعضای کمیته علمی:

دکتر مرتضی اسماعیل نژاد	دانشیار	دانشگاه بیرجند
دکتر مرضیه اسمعیل پور	دانشیار	دانشگاه مراغه
دکتر طیبه اکبری	استادیار	دانشگاه شهید بهشتی تهران
دکتر کمال امیدوار	استاد	دانشگاه یزد
دکتر روح اله اوجی	دانشیار	دانشگاه گیلان
دکتر ایمان بابائیان	دانشیار	پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو
دکتر محمد باعقیده	دانشیار	دانشگاه حکیم سبزواری
دکتر علی اکبر تقیلو	استاد	دانشگاه ارومیه
دکتر مجید جاوری	دانشیار	دانشگاه پیام نور
دکتر مسعود جلالی	دانشیار	دانشگاه زنجان
دکتر علیرضا جمشیدی	استادیار	دانشگاه ارومیه
دکتر خدیجه جوان	دانشیار	دانشگاه ارومیه
دکتر سعید جهانبخش	استاد	دانشگاه تبریز
دکتر محسن حمیدیان پور	دانشیار	دانشگاه سیستان و بلوچستان
دکتر حسن حیدری	استادیار	دانشگاه ارومیه
دکتر محمود خسروی	استاد	دانشگاه سیستان و بلوچستان
دکتر علی‌محمد خورشید دوست	استاد	دانشگاه تبریز
دکتر فرامرز خوش اخلاق	دانشیار	دانشگاه تهران
دکتر محمد دارند	استاد	دانشگاه کردستان
دکتر حسن ذوالفقاری	دانشیار	دانشگاه رازی کرمانشاه
دکتر علی اکبر رسولی	استاد	دانشگاه مک کواری استرالیا
دکتر مجید رضایی بنفشه	استاد	دانشگاه تبریز
دکتر غلامرضا روشن	دانشیار	دانشگاه گرگان
دکتر آذر زرین	دانشیار	دانشگاه فردوسی مشهد
دکتر بتول زینالی	استاد	دانشگاه محقق اردبیلی
دکتر بهروز ساری صراف	استاد	دانشگاه تبریز

دکتر ناصر سلطانی	دانشیار	دانشگاه ارومیه
دکتر محمد سلیقه	استاد	دانشگاه خوارزمی
دکتر علی اکبر شمسی پور	دانشیار	دانشگاه تهران
دکتر طاهر صفرراد	دانشیار	دانشگاه مازندران
دکتر برومند صلاحی	استاد	دانشگاه محقق اردبیلی
دکتر تقی طاووسی	استاد	دانشگاه سیستان و بلوچستان
دکتر محمدرضا عزیززاده	استادیار	دانشگاه پیام نور
دکتر قاسم عزیزی	استاد	دانشگاه تهران
دکتر حسین عساکره	استاد	دانشگاه زنجان
دکتر بهلول علیجانی	استاد	دانشگاه خوارزمی
دکتر منوچهر فرج زاده	استاد	دانشگاه تربیت مدرس
دکتر ابراهیم فتاحی	استاد	پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو
دکتر یوسف قویدل رحیمی	استاد	دانشگاه تربیت مدرس
دکتر علیرضا کربلایی	استادیار	دانشگاه خوارزمی
دکتر امیر گندمکار	دانشیار	دانشگاه آزاد واحد نجف آباد
دکتر حسن لشکری	استاد	دانشگاه شهید بهشتی تهران
دکتر فیروز مجرد	دانشیار	دانشگاه رازی کرمانشاه
دکتر وحید محمدنژاد	دانشیار	دانشگاه ارومیه
دکتر حسین محمدی	استاد	دانشگاه تهران
دکتر پیمان محمودی	دانشیار	دانشگاه سیستان و بلوچستان
دکتر ابوالفضل مسعودیان	استاد	دانشگاه اصفهان
دکتر غلامعلی مظفری	استاد	دانشگاه یزد
دکتر جعفر معصوم پور	دانشیار	دانشگاه رازی کرمانشاه
دکتر عباس مفیدی	دانشیار	دانشگاه فردوسی مشهد
دکتر ایوب منوچهری	استادیار	دانشگاه ارومیه
دکتر میرنجف موسوی	استاد	دانشگاه ارومیه
دکتر علیرضا موقری	استادیار	دانشگاه ارومیه
دکتر حمید نظری پور	دانشیار	دانشگاه سیستان و بلوچستان
دکتر محمود هوشیار	استادیار	دانشگاه پیام نور
دکتر داریوش یاراحمدی	دانشیار	دانشگاه لرستان

فهرست مطالب

1. Underestanding Tipping Points Caused by Climate Change in Iran: A review
۲. پیش‌نگری بارش در حوضه دریاچه ارومیه در استان آذربایجان شرقی با استفاده از مقیاس کاهی برونداد مدل‌های CMIP6
۳. پیش‌نگری و تحلیل الگوهای مکانی–زمانی خشکسالی‌های ایران تحت سناریوی اقلیمی SSP3-7.0
۴. مهاجرت اقلیمی: جنبه‌های کمتر بررسی‌شده و چالش‌های پژوهشی آینده
۵. ارزیابی شدت خشکسالی ناشی از تغییراقلیم در سرشاخه های دز
۶. تحلیل روند روز های همراه با گرد و غبار در غرب کشور
۷. تاثیر مدیریت آبیاری بر تبخیر و تعرق و شاخص های آبی در کشت گوجه‌فرنگی
۸. طراحی و پیاده‌سازی سامانه وبGIS تعاملی برای نمایش و تحلیل داده‌های اقلیمی و هواشناسی
۹. شبیه سازی جریان در حوزه کسیلیان با استفاده از الگوریتمهای مختلف
10. Predicting Plant Disease Incidence Using Machine Learning Models with Climate Variables: A Comparative Study
۱۱. ارزیابی تغییر اقلیم و تاثیر آن بر خشکسالی در دشت ارومیه با استفاده مدل‌های جفت شده فاز ششم (CMIP6)
۱۲. ارزیابی اثرات تغییر اقلیم و تغببرکاربری اراضی بر رواناب سطحی با استفاده از مدل SWAT مطالعه موردی حوضه آبریز هامون جازموریان
۱۳. تحلیل آماری و مکانی پارامترهای تغییر اقلیم در ایران بر مبنای داده‌های ماهواره‌ای و خروجی مدل Noah
۱۴. تاثیر اصلاح خاک بر مقادیر تبخیر و تعرق گوجه‌فرنگی و شاخص‌های آبی
۱۵. تحلیلی بر روند تغییرات بارش و دما و پیش‌بینی سناریوهای محتمل مدل SDSM مطالعه موردی (ایستگاه سینوپتیک تبریز)
۱۶. پایش خشکسالی کشاورزی و هواشناسی در حوضهٔ دریاچهٔ ارومیه با استفاده از شاخص های VCI و SPI
۱۷. بررسی تغییرات زمانی-مکانی تبخیر-تعرق مرجع در بازه بلندمدت (مورد مطالعه: استان مازندران)
۱۸. تحلیل روند بارش، دما و شاخص خشکسالی و اثرات آن بر تولید گندم دیم در لرستان
۱۹. اثرات تغییرات اقلیمی بر اکوسیستم، امنیت غذایی و تولیدات کشاورزی
۲۰. بررسی میزان تبخیر از دریاچه سدهای خوزستان و راهکارهای کاهش آن
۲۱. ارزیابی کیفیت آب قنات در آبخوان ارومیه با استفاده از شاخص کیفیت آب زیرزمینی (GQI)
۲۲. کاربرد روش AHP در پهنه‌بندی اقلیم کشاورزی کشت گندم (مطالعه موردی: استان البرز)
۲۳. پیش‌نگری تغییرات نمایه حداکثر بارش ۵ روزه (Rx5day) با استفاده از سناریوهای مختلفSSPs در شمال غرب ایران
۲۴. تحلیل تأثیرات تغییرات اقلیمی بر تغییرپذیری بارش در حوضه‌های آبریز دریاچه‌های ارومیه و وان تحت سناریوهای مختلف

۲۵. ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر شاخص‌های خشکسالی و ارتباط آن با منابع آب زیرزمینی با رویکرد یادگیری ماشین در دشت کرمانشاه
۲۶. تحلیل قوانین تغییرات اقلیم با رویکرد مقایسه ای المان و سوئد
۲۷. پیامدهای سناریوی تغییر آب‌وهوا برکشت گندم در منطقه اردبیل با استفاده از مدل‌های LARS-WG و CROPWAT
۲۸. اعتبار سنجی آزمون من –کندال براساس دامنه تغییرات داده‌های هواشناسی
۲۹. تبیین اقدامات سازشی کشاورزان گندم‌کار دشت مغان نسبت به پیامدهای تغییر اقلیم
۳۰. پیش‌نگری تغییرات اقلیمی با مدل‌های CMIP6 تحت سناریوهای SSPs : مطالعه موردی حوزه دریاچه ارومیه
۳۱. شناسایی روند تغییرات و الگوی فضایی شدیدترین خشکسالی و ترسالی ها در ایران
۳۲. آشکار سازی روند تغییرات شاخص دومارتن و بارش موثر در واکاوی تغییر اقلیم
۳۳. وردایی طول فصول ایران در اثر گرمایش جهانی
۳۴. پدیده تغییر اقلیم و روند تشدید سیل در کلان حوزه آبخیز خزری (هیرکانی)
۳۵. تحلیل روند تغییرات بلندمدت دمای هوا و پیامدهای اقلیمی آن در استان گلستان
۳۶. بررسی مدل SALTMED در برآورد عملکرد خیار گلخانه‌ای در شرایط تنش رطوبتی در تیمارهای اختلاط خاکاره
۳۷. بررسی کارایی مدل‌های تجربی در برآورد تبخیر تعرق مرجع ماهانه در اقلیم سرد و خشک (مطالعه موردی: ایستگاه سینوپتیک بافت)
۳۸. چشم اندازی از آینده تغییرات اقلیمی در ایران
۳۹. مقایسه کارآیی الگوریتم‌های آموزشی شبکه عصبی مصنوعی در برآورد تبخیر-تعرق پتانسیل
۴۰. مدل‌سازی تغییرات اقلیمی در مناطق خشک با هوش مصنوعی: مروری بر چالش‌ها، فرصت‌ها و مطالعات موردی در ایران
۴۱. واکاوی سری زمانی دمای روزهنگام کویر درانجیر طی دو دهه اخیر
۴۲. واکاوی الگوی های دور پیوندی اقیانوس اطلس با بارش های شرق استان اصفهان (منطقه مورد مطالعه: کوهپایه، ورزنه و هرند)
۴۳. کاربرد الگوریتم‌های هوش مصنوعی در پیش‌بینی و مدیریت مخاطرات اقلیمی با تاکید بر امواج گرما در غرب ایران
۴۴. پایش تغییرات غلظت گاز متان در ایستگاه‌های منتخب حوضه دریاچه ارومیه با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور
۴۵. آشکارسازی روند تغییرات اقلیمی در حوضه آبخیز دریاچه زریبار
۴۶. نقش برنامه‌ریزی آب مجازی و الگوهای کشت کم‌مصرف در کاهش فشار هیدرولوژیکی حوضه بر دریاچه ارومیه در بحبوحه تغییرات اقلیمی
۴۷. ارزیابی تغییر اقلیم بارش با استفاده از آنومالی و میانگین متحرک مطالعه موردی: شهرهای بلوچستان
۴۸. تأثیر تغییرات اقلیمی بر تولید خرما در جنوب استان سیستان و بلوچستان: تحلیل روند و راهکارهای سازگاری
۴۹. تعیین عوامل هواشناسی مؤثر بر عمق برف در شمال غرب ایران

۵۰. پیامدهای آبشاری خشک‌شدن دریاچه ارومیه بر امنیت غذایی در شمال‌غرب ایران: ارزیابی میان‌بخشی مبتنی‌بر رویکرد سیستمی
۵۱. ارزیابی نقش متغیرهای اقلیمی و الگوی کشت در تغییرات تبخیر–تعرق و طراحی هیدرومدول آبیاری (مطالعه موردی: دشت رزن)
۵۲. تحلیل روند تغییرات بارش با رویکرد تغییر اقلیم مطالعه مورد: مناطق شهری بلوچستان
۵۳. روندها و پیامدهای افزایش اثرات تجمعی تغییر اقلیم بر اکوسیستم‌های دریایی جهانی و جایگاه منطقه ای ایران
۵۴. تحلیل روند زمانی NDVI در جنگل‌های بلوط زاگرس مرکزی
۵۵. تاثیر تغییر اقلیم بر نیازهای سرمایشی و گرمایشی در شهر خوی
۵۶. تحلیل دینامیکی توفان برف با استفاده از تاوایی پتانسیلی هوای مرطوب
57. Analysis of the variability of global teleconnection indices and their impact on the temperature of Yasuj as an indicator of climate change
۵۸. بررسی اثرات تغییر اقلیم بر پارامترهای اقلیمی شهر سقز با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG بر مبنای گزارش ششم IPCC
۵۹. بررسی تغییرات بارش‌های فرین در حوضه دریاچه ارومیه در بازه زمانی ۲۰۲۴-۱۹۹۵
۶۰. اثرات تغییرات اقلیم بر سلامت در ایران
۶۱. پهنه‌بندی و پیش‌بینی پتانسیل سیل‌خیزی در حوضهٔ لیقوان‌چای تبریز با استفاده از داده‌های اقلیمی و نرم‌افزار GrADS
۶۲. بررسی نمادین غبار و مه در رمان جین ایر اثر شارلوت برونته
۶۳. ارتباط الگوی اقلیمی بزرگ‌مقیاس ENSO با تغییرپذیری خشکسالی در برخی ایستگاه های ایران با استفاده از تحلیل Wavelet coherence
۶۴. تحلیل تغییرپذیری خشکسالی هیدرولوژیکی در رودخانه مردق چای
۶۵. پیش بینی میزان تغییرات متغییرهای اقلیمی در محدوده مطالعاتی حاجی عرب
۶۶. واکاوی پدیده گردوغبار در غرب و جنوب غرب کشور
۶۷. بررسی شرایط اقلیمی وبیوکلیمای گردشگری شهر تبریز
۶۸. تأثیر تغییرات اقلیمی بر الگوهای بارش و دما در ایران
۶۹. نقش سیستم‌های اگری‌ولتائیک در توسعه پایدار مناطق خشک و نیمه‌خشک
۷۰. بررسی اثرپذیری بارشهای ترسالی و خشکسالی از متغیرهای جغرافیایی (مطالعه موردی: حوضه دریاچه ارومیه
۷۱. تغییرات اقلیمی و واژگونی تمدن‌ها
۷۲. بررسی تاثیر ادبیات در آگاهی بخشی نسبت به معضلات زیست محیطی در رمان خدای چیزهای کوچک اثر آروناتی روی
۷۳. تحلیل روند، پراکنش و ترکیبات غالب پدیده گردوغباردر استان لرستان
۷۴. بررسی اثرات تغییر اقلیم بر ذرات گردوغبار استان قم و ارزیابی تغییرات مکانی-زمانی آن با کمک تصاویر ماهواره ای
۷۵. چالش‌های پیش‌بینی زیرفصلی تا چند سالانه بارش (با تاکید بر ایران)

۷۶. تاثیر تغییرات اقلیمی با تاکید بر خشکسالی بر امنیت غذایی در مناطق روستایی ایران
۷۷. بررسی پیامدهای اجتماعی و اقتصادی خشک شدن دریاچه ارومیه: چالش‌ها و راهکارها
۷۸. تغییرات اقلیمی و چالش های شهرهای ایران
۷۹. ردیابی و تحلیل همدیدی سرمای شدید شهرستان ورزقان (مطالعه موردی :۱۸ ژانویه۲۰۲۳)
۸۰. مراحل جامع مدیریت خشکسالی
۸۱. تحلیل نوسانات هیدرولوژیکی حوضه آبریز دریاچه ارومیه بر اساس داده‌های سنجش از دوری
82. Analysis of Temporal and Structural Trends of Greenhouse Gas Emissions in the Persian Gulf Countries in Recently 20 years
۸۳. شبیه‌سازی بارش ماهانه ایستگاه سینوپتیک نمین با استفاده از مدل‌های هوشمند
۸۴. تحلیل دینامیکی – همدیدی تشکیل، تداوم و تکامل رخدادهای شاخص گرد و غبار برون مرزی و درون مرزی در نیمه غربی ایران
۸۵. تحلیل همبستگی مکانی تغییرات دما و بارش با خشکسالی طبقه‌بندی شده از شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI) در استان فارس
۸۶. تحلیل همدیدی بارش سنگین ۲۱دی ماه ۱۳۹۸ (مطالعه موردی:جنوب و جنوب غرب کشور)
۸۷. کاربرد مدل‌های داده-مبنا در شبیه‌سازی بارش ماهانه (مطالعه موردی: ایستگاه سینوپتیک سرعین)
۸۸. تحلیل روند نیاز های گرمایشی و سرمایشی مطالعه موردی : ایستگاه ارومیه
۸۹. پیامدهای اقلیمی خشکیدگی دریاچه ارومیه و دریاچه آرال: درس‌هایی برای مدیریت بحران‌های زیست‌محیطی آینده و حکمرانی تطبیقی
۹۰. بررسی کاربست فناوری بلاکچین به‌منظور توسعه بانکداری اجتماعیِ آب در ایران: مزایا و چالش‌ها
۹۱. واکاوی بلندمدت تغییرات تاریخی غلظت دی‌اکسید گوگرد و منواکسید کربن در پنج کلان‌شهر ایران طی دوره ۱۹۸۰–۲۰۲۵
۹۲. بررسی اثرگذاری عوامل کلان مقیاس اقلیمی بر تغییرات ماهانه مساحت پوشش گیاهی ناحیه زاگرس
۹۳. نقش چینش باد ترازپایین در مخاطرات هوانوردی در منطقهٔ ایران
۹۴. تحلیل عوامل مؤثر بر تاب‌آوری اجتماعی در مناطق متأثر از خشک شدن دریاچه ارومیه: بررسی نقش سیاست‌های آمایش سرزمین
۹۵. ارزیابی دقت پایگاه داده TerraClimate در برآورد بارش ماهانه ایستگاه‌های سینوپتیک ارومیه و تبریز(حوضه آبریز دریاچه ارومیه)
۹۶. پهنه‌بندی شاخص‌های آماری یخبندان‌های زودرس پاییزه و دیررس بهاره ایران
۹۷. تحلیل اثرات خشک شدن دریاچه ارومیه و تغییر اقلیم بر پایداری سکونتگاه های انسانی از منظر آمایش سرزمین
۹۸. چالش‌های نظارت بر رودخانه‌ها با فناوری اینترنت اشیاء (IoT) در ایران و مقایسه آن با سایر نقاط جهان
۹۹. پایش تغییرات دمای سطح زمین (LST) در حوضه دریاچه ارومیه طی دو دهه اخیر با استفاده از داده‌های MODIS و تحلیل ارتباط آن با شاخص‌های حدی اقلیمی
۱۰۰. تحلیل عوامل مؤثر بر آموزش تغییر اقلیم درآینده

۱۰۱. بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر ساخت های شهری و رقابت پذیری شهرها (مطالعه موردی: استان آذربایجان غربی)
۱۰۲. تحلیل همبستگی و رگرسیون بین الگوهای پیوند از دور و بارش ایستگاه‌های منتخب استان اصفهان با استفاده از نقشه‌های ماهواره‌ای CHIRPS در محیط Google Earth Engine
۱۰۳. پایش تغییرات شاخص‌های گیاهی (NDVI/EVI) حوضه دریاچه ارومیه تحت تاثیر تغییر اقلیم با داده‌های MODIS در GEE
۱۰۴. ارزیابی نقش عملکردی بهره برداران در مدیریت منابع سرزمینی
۱۰۵. ارزیابی دقت داده‌های بارش TRMM و GPCC در ایستگاه‌های سینوپتیک حوضه دریاچه ارومیه
۱۰۶. مروری بر مطالعات مرتبط با تأثیر تغییرات اقلیمی بر صنعت گردشگری در ایران
۱۰۷. ارزیابی تغییرپذیری اقلیمی گذشته و آینده ایران با استفاده از داده‌های تاریخی و سناریوهای SSP
۱۰۸. ارزیابی ریسک تغییر اقلیم بر جاذبه های طبیعی گردشگری شهری (مطالعه موردی: کلانشهر ارومیه)
۱۰۹. آشکارسازی تغییرات و روند اقلیمی آخرین یخبندان بهاره جهت برنامه ریزی کشاورزی در شهرستان کرمانشاه
۱۱۰. خشکسالی و ارزیابی شاخص‌های پوشش گیاهی با استفاده از S&R (مطالعه موردی: شهرستان ارومیه)
۱۱۱. بررسی نقش مشارکت مردمی در احیای دریاچه ارومیه و کاهش اثرات اقلیمی
۱۱۲. پایش متغیرهای اقلیمی با پوشش گیاهی در استان آذربایجان شرقی
۱۱۳. اثر تغییرات اقلیمی بر امنیتی غذایی با تاکید بر ایران
۱۱۴. تحلیل تاب‌آوری اقتصادی در روستاهای حاشیه ۵ کیلومتری ارومیه متاثر از تغییرات اقلیمی آینده منطقه
۱۱۵. تغییرات اقلیمی (خشکسالی) و مشکلات پیش‌روی سکونتگاه‌های روستایی ایران
۱۱۶. بررسی روند تغییرات تبخیر روزانه در استان لرستان
۱۱۷. واکاوی تغییرات متغیرهای اقلیمی در شهر تبریز
۱۱۸. بررسی تاثیر تغییرات اقلیمی بر الگوهای گسترش شهری چالش ها و راهکارها مطالعه موردی : کلانشهر ارومیه
۱۱۹. تحلیل سینوپتیکی بارش سنگین حوضه ی آبریز کیوی چای شهرستان خلخال روز ۲۳ اوت ۲۰۲۰
۱۲۰. بررسی آمایش اقلیم گردشگری راهکاری برای توسعه پایدار شهری مطالعه موردی: کلانشهر ارومیه
۱۲۱. ترکیب اثر تغییرات اقلیمی و جزایر حرارتی بر آب و هوای شهرهای ایران
۱۲۲. شبیه‌سازی شار تابشی طول‌موج کوتاه با کاربست مدل RRTMG بر بستر دریاچه ارومیه
۱۲۳. تأثیر دو دهه خشکسالی بر پوشش گیاهی ایران(موردی:آذربایجان شرقی)
۱۲۴. نحوه اجرای اصل پنجاه قانون اساسی در ارتباط با دریاچه ارومیه
۱۲۵. شناسایی نقش الگوهای پیوند از دور بر وقوع سیل ۱۴۰۱ مورد مطالعه شهرستان چادگان اصفهان
۱۲۶. تحلیل زمانی و مکانی مناطق آسیب پذیر محصولات کشاورزی در اثر بارش تگرگ در استان آذربایجان شرقی
۱۲۷. بررسی نقش خشکسالی و تغییر اقلیم برتغییرات کاربری اراضی در ایران
۱۲۸. تحلیل همدیدی بارش سنگین تابستان ۱۴۰۱ استان یزد (مطالعه موردی: ۷ مرداد ۱۴۰۱)
۱۲۹. تاثیر تغییرات اقلیمی بر امنیت ملی در ایران؛ ابعاد و نتایج

۱۳۰. تحلیل تطبیقی شاخص‌های SPEI و SPEIbase به عنوان ابزارهای ارزیابی خشکسالی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه
۱۳۱. تحلیل روند فراوانی و مشخصه‌های رودخانه‌های جوی وارد شده به حوضه آبریز دریاچه ارومیه
۱۳۲. مروری بر ادغام علوم داده و سنجش‌ازدور در هیدرولوژی: کاربردهای یادگیری ماشین و تلفیق داده‌ها
۱۳۳. نقش استراتژیکی نهادهای مدنی در تقویت ظرفیت‌های سازگاری جوامع با تغییر اقلیم
۱۳۴. تغییرات اقلیم وپیامدهای آن درایران
۱۳۵. تحلیل برخی از شاخص های اقلیم آسایش در شهر تبریز
۱۳۶. تحلیل سینوپتیک یخبندان استان اردبیل
۱۳۷. مروری بر زمینه زمینه‌های کاربست هوش مصنوعی در مدیریت آب مجازی
۱۳۸. شاخص های حدی و مخاطرات آب و هوایی
۱۳۹. ناحیه بندی منطقه ای و محلی بارش های استان آذربایجان غربی
۱۴۰. تاثیر تغییرات آب و هوایی و اکولوژیکی بر اقتصاد در ایران
۱۴۱. ردپای تغییر اقلیم بر اساس شاخص‌های حدی بارش و دما: مطالعه موردی شهرستان ارومیه، استان آذربایجان غربی
۱۴۲. بررسی عوامل شکل گیری و راهبردهای کاهش پدیده جزیره حرارتی شهری
۱۴۳. تحلیل نوسانات هیدرولوژیکی حوضه آبریز دریاچه ارومیه بر اساس داده‌های سنجش از دوری
144. Multivariate Geospatial Analysis of Climate Impacts on Air pollution Using Sentinel-5p and Google Earth Engine
۱۴۵. تحلیل روند تغییرات بارش با رویکرد تغییر اقلیم مطالعه مورد: مناطق شهری بلوچستان
۱۴۶ تأثیر پارامترهای اقلیمی بر طراحی واحدهای آموزشی
۱۴۷. پیش‌بینی تغییر اقلیم در شمال ایران تحت سناریوهای CMIP6
۱۴۸. ترازمندی آب و هواشناختی حوضه اورمیه
۱۴۹. ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی با مدل سازی و تحلیل پارامترهای pH وEC
150. Implementing climate risk management and water saving strategy to optimize maize yields potential in a changing climate

Underestanding Tipping Points Caused by Climate Change in Iran: A review

Iman Babaeian, Raheleh Modirian, Maryam Karimian, Leili Khazanedari

Research Institute for Meteorology and Atmospheric Sciences, Climate Research Institute, Mashhad

Corresponding author's email: i.babaeian@gmail.com

Abstract

Climate tipping points are caused by global warming and refer to critical thresholds in the climate system, crossing which leads to irreversible changes in climate conditions, ecosystems, and even socio-economic structures. These changes may occur over long time scales, ranging from several decades to hundreds of years, and their effects are often negative and threatening, although some positive consequences may also exist. Given the intensity and extent of the impacts of these points, studying and identifying them is essential for better prediction of climate changes and adopting effective adaptation and damage reduction policies. In Iran, multiple negative tipping points due to climate change and global warming have been observed and projected, including the shift of about 90% of the country's cities to a drier climatic zone under the high greenhouse gas emission scenario of SSP5-8.5, the reduction of snow's share in total precipitation, the increase in the duration of heatwaves from the current 5 days to about two weeks under the low emission scenario of SSP1-2.6 and one season under the high emission scenario of SSP5-8.5, doubling drought vulnerability by the end of the 21st century according to the high emission scenario, the displacement of one-third of Iran's population over the next 25 years (by 2050) to the northern third of the country, weakening of Caspian Sea precipitation and parts of the northeast due to weakening migratory high-pressure weather systems, making agriculture unprofitable in some provinces including saffron farming, and increasing flood-prone areas and peak discharge of the Shandiz river up to fivefold. On the other hand, positive tipping points have also been observed, such as the increase of tropical cyclones in the northern Indian Ocean and the Arabian Sea and increased extreme precipitation in the southern strip of the country, as well as the replacement of fossil fuels with renewable energy sources. These developments call for special attention to climate risk management and the development of sustainable adaptation policies.

Keywords: Climate Tipping Points, Climate Change, Iran, Heatwaves, Climate zones

Introduction

Climate tipping points represent critical thresholds in the Earth's climate system, beyond which small perturbations can cause large, often irreversible changes in climate conditions, ecosystems, and socio-economic structures. These points act as pivotal markers in the complex climate network, demarcating where the system crosses from one state to another, often with disproportionate and cascading effects. The concept of tipping points encompasses not only physical climate components, such as ice sheets, ocean circulation, and biosphere feedbacks, but also the intertwined human and ecological systems influenced by these changes. This understanding has become central in climate science because crossing tipping points

could lock the planet into new, less hospitable climate regimes that are challenging or impossible to reverse with current technologies (Lenton et al., 2008; ESA, 2023).

The scientific consensus highlights that many climate tipping points are closely linked to the global rise in temperature caused by anthropogenic greenhouse gas emissions. The historic surpassing of the 1.5 °C warming threshold in 2024 underscores the urgency; this critical level dramatically increases the likelihood that several vulnerable components of the Earth system will pass their tipping points in the near future (Tandon, et. al., 2025; Earth.Org, 2023). Examples of global tipping elements include the accelerated melting of polar ice sheets leading to irreversible sea-level rise, the weakening or shutdown of major oceanic currents such as the Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC), wide-scale dieback of the Amazon rainforest, and rapid permafrost thaw releasing stored greenhouse gases. Each element has the potential to set off feedback loops that exacerbate climate change and disrupt associated ecosystems and human livelihoods (Lu et. al., 2025).

While much of the research and public focus has remained global, regional climates—such as that of Iran—are also facing identifiable tipping points with profound implications. Iran is situated in a climatically sensitive region with an already arid and semi-arid environment, making it especially vulnerable to climate change impacts. Observations show that Iran's warming rate is roughly twice the global average, with average temperatures increasing by about 0.4 °C per decade. This rapid warming amplifies the frequency and severity of climate extremes including prolonged heatwaves, intense droughts, and episodes of heavy precipitation and flooding. Such extremes are signs of tipping points where climatic patterns exceed their historical variability, threatening water resources, agriculture, human health, and ecosystems. One major tipping effect underway in Iran is the shifting of climatic zones. Approximately 90% of Iranian cities are projected to transition towards drier climatic zones under high emission scenarios, reflecting a substantial decrease in precipitation coupled with higher temperatures causing increased evaporation rates. These shifts threaten to destabilize local agriculture systems, particularly traditional crops such as saffron, and increase vulnerability to desertification. Furthermore, snowpack, which constitutes a critical water storage, is progressively diminishing, shrinking the fraction of snowfall in total precipitation. This transformation reduces spring and summer runoff critical for agricultural irrigation and drinking water supply. Heatwaves in Iran are also becoming longer and more intense. Under low emission scenarios, the typical duration of heatwaves is expected to extend from about five days to two weeks, and under higher emission scenarios, heatwaves could persist for an entire season in parts of the country. This not only impacts human health and labor productivity but exacerbates drought conditions, increasing desertification and dust storm activities. The drought vulnerability index for Iran is projected to double by the late 21st century under high emission scenarios, signaling a dramatic rise in both frequency and intensity of drought episodes (Babaeian et. a., 2019; Kouzegaran et. al., 2020; Shahsavan et. al., 2024).

The social impacts of these tipping points are equally alarming. It is estimated that within the next 25 years (around 1430 in the Iranian calendar), a third of Iran's population may be displaced internally due to climate-induced stresses, relocating predominantly to the northern provinces such as Razavi and North Khorasan. This population movement imposes significant challenges on urban planning, infrastructure, and social services, potentially triggering socioeconomic instability (Jahangirpour et al., 2020; Zare, M., 2024).

Hydrologically, Iran faces a weakening of Caspian Sea precipitation and parts of the northeast attributed to the degradation of migratory high-pressure systems that sustain regional rainfall patterns. Some rivers like are experiencing increase in peak flood discharge, expanding flood-prone areas and raising risks to

settlements and agricultural lands. Such hydrological tipping points necessitate urgent improvements in water resource management and disaster preparedness(Samant and Prange, 2023; Mashari et al., 2018).

Conversely, some positive tipping points are emerging. Increased frequency of tropical cyclones in the northern Indian Ocean and Arabian Sea has been noted, contributing to localized increases in extreme precipitation events in southern Iran, which if properly managed, could partially offset water deficits. Additionally, a shift towards renewable energy sources is occurring, replacing fossil fuels and offering a pathway to reduce Iran's carbon footprint, potentially mitigating future warming and its associated tipping risks (ESA, 2023).

Collectively, these physical and social tipping points in Iran underscore the critical importance of advancing climate adaptation policies grounded in robust scientific understanding. Integrated approaches combining mitigation, adaptation, and socio-economic planning are essential for enhancing resilience and sustainable development in the face of accelerating climate change impacts. Such strategies must include monitoring of early warning indicators, improving water resource efficiency, diversifying energy portfolios, strengthening agricultural practices, and preparing urban centers for population shifts (Armstrong et al., 2020).

In summary, climate tipping points driven by global warming are not abstract future possibilities but present realities with observable effects in vulnerable regions like Iran. Their complexity and interconnection demand holistic and urgent responses to avoid crossing further irreversible thresholds that would compromise the wellbeing of current and future generations (Steffen et al., 2025; Lenton et. al., 2023). Accordingly, in this article, we review the most important findings regarding the observed and projected tipping points due to climate change.

Climate Tiping Points and Mechanism

Climate tipping points represent critical thresholds in the Earth's climate system where small changes in global temperatures or environmental conditions can lead to large, often irreversible, shifts in climate behavior and associated ecosystems. Crossing these thresholds results in abrupt transitions to new states that differ markedly from the previous stable climate regime, potentially triggering severe consequences for natural and human systems. Tipping points are a fundamental concept to understanding the nonlinear and systemic risks posed by climate change (Fig. 1). Mechanistically, tipping points are often driven by positive feedback loops and self-reinforcing processes within the climate system. For example, the melting of polar ice reduces the Earth's albedo (reflectivity), causing more solar energy to be absorbed and accelerating further warming and ice melt. Similarly, thawing permafrost releases methane and carbon dioxide, potent greenhouse gases that enhance atmospheric warming, which in turn promotes additional permafrost degradation. These feedbacks amplify the initial forcing and push the system beyond the threshold into a new equilibrium state (Igini, 2023; Lenton et. al., 2012). Tipping behavior can vary in speed and scale. Some tipping points manifest abruptly over short time spans—such as rapid shifts in ocean circulation patterns—while others unfold more gradually yet remain effectively irreversible on human timescales, like the slow collapse of large ice sheets. Importantly, the critical thresholds themselves may depend on both the magnitude and the rate of climatic changes, meaning rapid warming can prompt tipping even before more gradual warming would produce the same effect (Tandon, et. al., 2025).

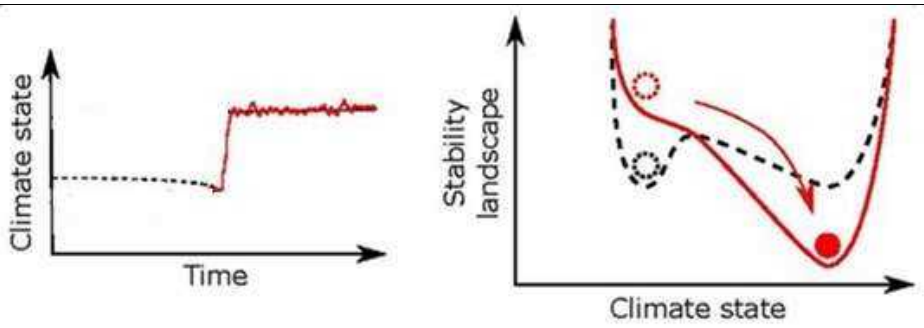


Figure 1- Illustration of a tipping point (TP): When a climate forcing, such as 1.5°C of global warming, is reached, a previously stable climate system undergoes a transition to a new climate state (Lenton et al., 2012).

Climate system components identified as tipping elements fall broadly into categories including cryosphere, ocean circulation, and terrestrial ecosystems. Key cryosphere tipping points include the disintegration of the Greenland and West Antarctic ice sheets, loss of Arctic sea ice, and mountain glacier retreat. Ocean circulation tipping points center notably on the Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC), whose weakening or collapse would profoundly alter global climate patterns. Terrestrial ecosystem tipping points involve phenomena such as Amazon rainforest dieback and boreal forest biome shifts (ESA, 2023). Current scientific evidence indicates that some tipping points may be close to or already crossed, especially given observed warming surpassing 1°C above pre-industrial levels, with greater risks projected at 1.5°C to 2°C warming thresholds. As the global community continues to debate the safest limits for temperature rise, understanding tipping points and their underlying mechanisms remains crucial to informing urgent climate action and guiding policy to avoid irreversible, catastrophic changes to the Earth system (Tandon, et. al., 2025; Lenton et. al., 2023).

Climate tipping points characterize the nonlinear nature of climate risks, governed by complex feedback dynamics and threshold responses. Their identification and mechanistic understanding are essential for future projection of climate trajectories, assessing risks to ecosystems and humans, and framing adaptive strategies necessary to sustain planetary stability under ongoing anthropogenic warming.

Current and future Tipping Points in Iran

Iran is currently experiencing complex manifestations of climate-related tipping points driven primarily by anthropogenic global warming. Over the past five decades, Iran's average temperature has increased by approximately 2 to 2.5oC, with some central plateau regions experiencing rises up to 3 oC. This warming is significantly higher than the global average and has been accompanied by decreased annual rainfall (from about 255 mm to approximately 200 mm), increased evapotranspiration rates, and more irregular precipitation patterns. Extended summers, lasting up to 4 to 5 months, exacerbate drought stress and water scarcity across much of the country (Masoodian, 204; A;izadeh and Najafi, 2017; Babaeian et. al., 2019; Khorsandi et al., 2023). Such climatic trends have pushed Iran closer to several critical tipping points, with projections indicating that if warming continues unabated, major urban centers bordering desert regions (e.g., Yazd, Kerman, Isfahan) risk becoming increasingly uninhabitable by the late 21st century. Tipping points at the regional scale involve shifts in climate regimes, where approximately 90% of cities could transition to significantly drier climatic zones(Shahsavan et al., 2024). Additionally, desertification, reduced

snowpack, and longer, more intense heatwaves are expected to increase vulnerability to drought and water resource collapse (Fig. 2). Samples of prolonged heatwave duration as a negative tippimg point have ben shown ib figure 2. In the figure, single heatwave events lasting even three months are projected at the 22nd century, although such extended durations cannot be considered normal climate behavior of 22nd century. Positive tipping points, although less documented, also emerge as pathways for sustainable transition, notably in the increasing adoption of renewable energy technologies, which may facilitate a structural shift away from fossil fuel dependence. Effective policy interventions could leverage such positive tipping dynamics to mitigate climate risks, promote societal resilience, and trigger technological innovation in Iran's energy and agricultural systems. Understanding these projected tipping points enables better preparation to manage negative impacts while fostering opportunities for adaptive, climate-resilient development. Table 1 summarize some occurred and future projected negative and positive tipping points.

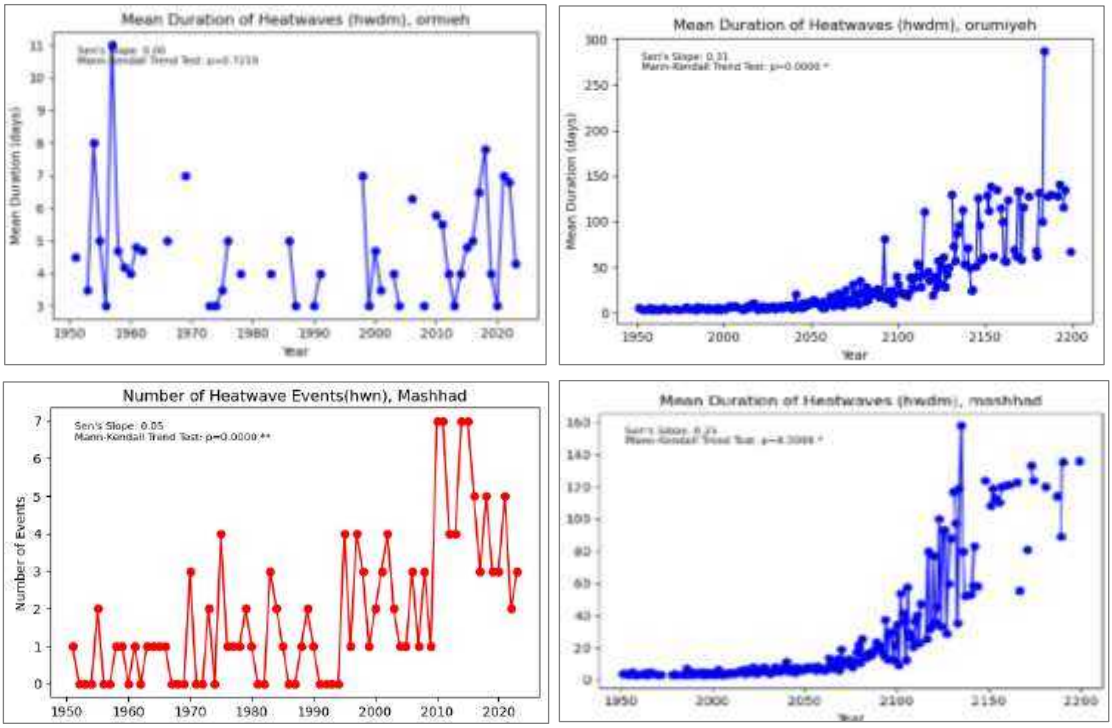


Figure 2- Observed and future projection of heatwave duration (in days) under SSP5-8.5 scenario over Orumieh and Mashhad(Babaeian et al., 2024)

Table 1- Key negative and positive Tipping Points in Iran and their impacts

Tipping Points	Type	Impact Description	Expected Consequences
Shift of ~90% of cities to drier climate zones	Negative	Transition to significantly drier conditions	Increased drought, water scarcity
Decline in snowpack contribution to precipitation	Negative	Reduced snow storage and spring runoff	Water supply stress

Prolonged heatwaves (from ~5 days to weeks/seasons)	Negative	Longer, more intense heatwaves	Health risks, crop failures
Doubling drought vulnerability by end of 21st century	Negative	Increased drought frequency and severity	Agricultural and ecosystem damage
Internal displacement of ~1/3 population by 2050	Negative	Climate-induced migration to northern regions	Social and infrastructure pressures
Weakening of Caspian and Northeast rainfall	Negative	Reduced regional precipitation	Ecosystem stress, water shortage
Undermining agriculture viability (e.g., saffron)	Negative	Loss of viable farming conditions	Economic hardship
Increase in flood-prone areas and river peak flows	Negative	Expanded flood risk	Infrastructure damage
Increased tropical cyclones in Indian Ocean	Positive	More extreme rainfall events in southern Iran	Potential water resource boost
Transition from fossil fuels to renewable energy	Positive	Shift to sustainable energy systems	Emission reductions, enhanced climate resilience

Conclusion

Climate tipping points represent critical thresholds in the Earth's climate system where small changes in forcing, such as rising greenhouse gas levels, can trigger abrupt and often irreversible shifts in climate states. In the context of Iran, these tipping points are no longer hypothetical but emerging realities under current and projected warming trends. Observations show that Iran's rapid warming, nearly double the global average, combined with decreasing precipitation and increasing evaporation, is pushing many natural and socio-economic systems toward critical thresholds. Key negative tipping points include the transition of nearly 90% of weather stations to drier climate zones, reduced snowpack and spring runoff, prolonged heatwaves, doubling drought vulnerability, and extensive internal climate migration due to water scarcity and agricultural instability.

These changes threaten fragile ecosystems and traditional livelihoods, making large regions of Iran increasingly vulnerable to desertification, reduced agricultural productivity (notably for high-value crops like saffron), and increased risks from floods and heat-related health impacts. Further complicating the picture are hydrological tipping points linked to weakened precipitation over the Caspian Sea basin and increased flood frequency in some basins, which demand urgent improvements in water management and disaster preparedness. Conversely, positive tipping points offer pathways for resilience and sustainability. The increasing frequency of tropical cyclones may improve localized water availability in southeastern Iran, while the country's ongoing shift from fossil fuels to renewable energy could mitigate future warming and reduce climate risks. These emerging opportunities stress the importance of policies promoting technological innovation, climate adaptation, and socio-economic transformation.

Given the intertwined nature of climate, ecological, and social tipping points, it is imperative that Iranian climate policy adopts integrated risk management approaches. This includes monitoring early warning indicators, investing in sustainable water and energy systems, enhancing agricultural resilience, and preparing urban centers for demographic shifts caused by climate migration. Understanding and responding to Iran's climate tipping points is vital to avert irreversible impacts and to seize opportunities for building a sustainable and resilient future under changing climate realities.

References

Tandon, A., McSweeney, R., Keating, C. (2025). Tipping points: Window to avoid irreversible climate impacts is rapidly closing. Carbon Brief.

Igini, M. (2023). Tipping points of climate change. Earth.Org. https://earth.org/tipping-points-of-climate-change/

European Space Agency. (2023). Understanding climate tipping points. ESA. https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Space_for_our_climate/Understanding_climate_tipping_points

Lenton , T. M., et. Al. (2023). Global Tipping Points Report 2023: 'Summary Report' in [T. M. Lenton, D.I. Armstrong McKay, S. Loriani, J.F. Abrams, S.J. Lade, J.F. Donges, M. Milkoreit, T. Powell, S.R. Smith, C. Zimm, J.E. Buxton, L. Laybourn, A. Ghadiali, J.G. Dyke (eds), 2023, The Global Tipping Points Report 2023.]University of Exeter, Exeter, UK.

Lenton, T. M., Held, H., Kriegler, E., Hall, J. W., Lucht, W., Rahmstorf, S., & Schellnhuber, H. J. (2008). Tipping elements in the Earth's climate system. Proceedings of the National Academy of Sciences, 105(6), 1786–1793. https://en.wikipedia.org/wiki/Tipping_points_in_the_climate_system

Lu, F., Lu, H., Gu, Y. et al. (2025). Tipping point-induced abrupt shifts in East Asian hydroclimate since the Last Glacial Maximum. Nat Commun 16, 477 . https://doi.org/10.1038/s41467-025-55888-w

Armstrong D., et al. (2020). Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points.Science377,eabn7950(2022).DOI:10.1126/science.abn7950

Steffen, W., Crutzen, P., & McNeill, J. (2025). Earth system dynamics and tipping points. Springer. https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-031-50762-5

UNICEF. (2023). Over the tipping point: Climate change and children. UNICEF. https://www.unicef.org/eap/over-tipping-point

Babaeian, I. , Karimian, M. , Modirian, R. and Mirzaei, E. (2019). Future Climate Change Projection Over Iran Using CMIP5 Data During 2020-2100. Nivar, 43(104-105), 67-77. doi: 10.30467/nivar.2019.142745.1103

Shahsavan Gharehghouni, M. , doostan, R. and babaeian, I. (2024). Observed changes in the climate zones of Iran from mid 20th century onwards (1961-2022). Physical Geography Research, 56(1), 123-138. doi: 10.22059/jphgr.2024.371399.1007805

Kouzegaran, S., Mousavi Baygi, M., Babaeian, I. et al. Modeling of the saffron yield in Central Khorasan region based on meteorological extreme events. Theor Appl Climatol 139, 1207–1217 (2020). https://doi.org/10.1007/s00704-019-03028-y

Jahangirpour, D. and Bakhshoodeh, M. (2020). The Impact of Climate Change on Rural Migration in Iran: Application of Panel VAR Approach. Environmental Researches, 11(21), 133-142.

Zare M. (2023). Climate crisis and migration: Over 50 to 70 million Iranians displaced. AsrIran. asriran.com/004Tbs

Samant, R., Prange, M. Climate-driven 21st century Caspian Sea level decline estimated from CMIP6 projections. Commun Earth Environ 4, 357 (2023). https://doi.org/10.1038/s43247-023-01017-8

Meshari Eshq Abad, S., Babaeian, I., Nohahgar, A., & Arshadi, S. (2018). Projection of flood-prone areas in the Shandiz sub-basin for the 2030s under global warming using climate-hydrological modeling. In Proceedings of the 2nd National Conference on Iranian Meteorology and Hydrology (pp. 1-6).

Lenton, T. M., Held, H., Kriegler, E., Hall, J. W., Lucht, W., Rahmstorf, S., & Schellnhuber, H. J. (2012). Tipping elements in the Earth's climate system. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 370(1962), 1166–1184. https://doi.org/10.1098/rsta.2011.0306

Alizadeh-Choobari, O. and Najafi, M. S. (2017). Trends and changes in air temperature and precipitation over different regions of Iran. Journal of the Earth and Space Physics, 43(3), 569-584. doi: 10.22059/jesphys.2017.60300

Khorsandi, M. , Ghalkhani, H. and Bateni, M. M. (2023). Trend Analysis of Precipitation and Air Temperature in water basins of Iran. Journal of Agricultural Meteorology, 11(2), 51-69. doi: 10.22125/agmj.2023.368274.1142

Masoodian, S. A. (2004). Temperature Trends in Iran during the Last Half Century. Geography and Development, 2(3), 89-106. doi: 10.22111/gdij.2004.3831

سومین کنفرانس ملی آب و هواشناسی ایران (با محوریت تغییر اقلیم)
The 3rd National Conference on Climatology of Iran (Focusing on Climate Change)
ارومیه ۱۶ مهر ۱۴۰۴

پیش‌نگری بارش در حوضه دریاچه ارومیه در استان آذربایجان شرقی با استفاده از مقیاس کاهی برونداد مدل‌های CMIP6

فرناز پوراصغر*[۱]، مهدی اصلاحی[۲]

۱-اداره کل هواشناسی استان آذربایجان شرقی، تبریز، ایران

۲-مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی آذربایجان شرقی، تبریز، ایران

* Farnaz_pourasghar@yahoo.com

چکیده

در این مطالعه، از پنج مدل گردش عمومی جو (GCM)، شامل GFDL، MRI، MPI، BCC و CMCC، برای بررسی پیش‌بینی‌های بارش در حوضه شرقی دریاچه ارومیه (آذربایجان شرقی) تحت سناریوهای اقلیمی استفاده شده است. خروجی بارش مدل‌های مذکور با استفاده از نرم‌افزار CMHyd از نظر آماری مقیاس کاهی شده است. در فرآیند مقیاس کاهی، از داده‌های سه ایستگاه سینوپتیک استفاده شد. دوره پایه مشاهداتی ۲۰۱۴-۱۹۸۵ و دوره‌های آینده، ۲۰۵۰-۲۰۲۶ به عنوان آینده نزدیک، ۲۰۷۵-۲۰۵۱ به عنوان آینده میانه و ۲۰۹۹-۲۰۷۶ به عنوان آینده دور در نظر گرفته شده‌اند. همچنین، بارش آینده تحت سه سناریو به ترتیب SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 پیش‌بینی شد. در سناریوی خوش‌بینانه، اکثر مدل‌ها برای دوره‌های ۲۰۵۰-۲۰۲۶ و ۲۰۷۵-۲۰۵۱، به جز ایستگاه تبریز، نشان‌دهنده کاهش بارش سالانه هستند و در دوره ۲۰۹۹-۲۰۷۶، دیگر ایستگاه‌ها افزایش بارش را تجربه می‌کنند که معنادار نیست. در سناریوی بدبینانه، مدل‌های BCC، GFDL و CMCC کاهش بارندگی سالانه را نشان می‌دهند که در مدل BCC برای دوره ۲۰۹۹-۲۰۷۶ قابل توجه و معنی دار است. در سناریوی میانی، به جز مدل‌های GFDL و MRI که افزایش بارندگی را نشان می‌دهند، سایر مدل‌ها کاهش بارندگی را برای هر سه دوره و در اکثر ایستگاه‌ها نشان می‌دهند.

کلید واژه‌ها: دریاچه ارومیه، تغییر اقلیم، بارش، CMIP6، CMHyd.

مقدمه

تغییر اقلیم یکی از چالش‌های اساسی قرن بیست و یکم است که تأثیرات گسترده‌ای بر منابع آب، کشاورزی، سلامت عمومی و زیرساخت‌ها دارد. افزایش دمای جهانی، تغییر الگوهای بارش، و بروز پدیده‌های حدی مانند خشکسالی و سیلاب، نیاز به تحلیل دقیق و پیش‌بینی بلندمدت را بیش از پیش برجسته کرده است. در این میان، بارش به‌عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترهای اقلیمی، نقش کلیدی در مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی‌های زیست محیطی ایفا می‌کند. (Mahadevan, 2024) . دانگ و همکاران عملکرد ۲۳ مدل CMIP6 را در شبیه‌سازی شاخص‌های بارش‌های حدی در آسیا بررسی کرده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل‌های CMIP6 در بازنمایی الگوهای مکانی بارش‌های شدید عملکرد بهتری نسبت به CMIP5 دارند، به‌ویژه در مناطق جنوب چین، هند و تبت. همچنین بهبودهایی در شبیه‌سازی شار رطوبت و همگرایی آن مشاهده شده است که به دقت بیشتر مدل‌ها کمک کرده‌اند(DonaT and DongW.,2021). دونات و همکاران بررسی کردند که مدل‌های CMIP6 تا چه حد توانسته‌اند تغییرات تاریخی بارش‌های متوسط و حدی را در اروپا و آسیا بازسازی کنند. نتایج نشان می‌دهد که در بسیاری از مناطق اروپا و آسیا، مدل‌ها عملکرد قابل قبولی دارند، اما در برخی مناطق با روندهای منفی بارش، دقت مدل‌ها کمتر است. استفاده از ensembleهای بزرگ در این مناطق می‌تواند به بهبود شبیه‌سازی کمک کند (Donat etal.,2023). زرین و داداشی رودباری (۲۰۲۱) به بررسی تغییرات شدت بارش‌های حدی در ایران با استفاده از پنج مدل اصلاح‌شده CMIP6 پرداخته است. این مدل‌ها تحت سه سناریوی اجتماعی-اقتصادی SSP1-2.6، SSP3-7.0 و SSP5-8.5 اجرا شده‌اند و شاخص‌هایی مانند SDII (Simple Daily Intensity Index) و RX1day (Maximum 1-day Precipitation) برای ارزیابی شدت بارش‌ها به کار رفته‌اند. نتایج نشان داد که در اکثر مناطق ایران، به‌ویژه در نواحی گرم و خشک (مانند اقلیم BWh)، روند افزایشی در شدت بارش‌های حدی مشاهده می‌شود. مدل MPI-ESM1-2-HR بهترین عملکرد را در شبیه‌سازی داده‌های بارش داشته و مدل IPSL-CM6A-LR بیشترین میزان خطا را نشان داده است (Zarrin and Dadashi., 2021). همچنین در مناطق تحت تأثیر موسمی آسیایی، میزان خطای مدل‌ها در پیش‌بینی بارش‌های تابستانی بالا بوده است. دریاچه ارومیه، یکی از بزرگترین دریاچه‌های آب شور جهان، در دهه‌های اخیر کاهش قابل توجهی در سطح آب خود تجربه کرده است. لذا هدف از این مطالعه پیش نگری بارش در حوزه دریاچه ارومیه می باشد که برای مدیریت منابع آب و مقابله با خشکسالی حیاتی است. این اطلاعات به کشاورزی منطقه و حفظ اکوسیستم دریاچه کمک می‌کند. همچنین پایه‌ای برای تصمیم‌گیری‌های کلان در طرح‌های احیای دریاچه محسوب می‌شود.

روش تحقیق

در این مطالعه، از پنج مدل گردش عمومی جو (GCM)، شامل GFDL، MRI، MPI، BCC و CMCC، برای بررسی پیش‌بینی‌های بارش در حوضه شرقی دریاچه ارومیه تحت سناریوهای اقلیمی استفاده شده است. برای تعیین توانمندی مدل و غربالگری از نمودار تیلور و ترسیم آن برای متغیر بارش به صورت سالانه استفاده شد. خروجی بارش مدل‌های مذکور با استفاده از نرم‌افزار CMHyd از نظر آماری مقیاس کاهی شده است. در فرآیند مقیاس کاهی، از داده‌های سه ایستگاه سینوپتیک تبریز، مراغه و سراب که داده های بلند مدت آماری دارند استفاده گردید. دوره پایه مشاهداتی ۲۰۱۴-۱۹۸۵ و دوره‌های آینده، ۲۰۵۰-۲۰۲۶ به عنوان آینده نزدیک، ۲۰۷۵-۲۰۵۱ به عنوان آینده میانه و ۲۰۹۹-۲۰۷۶ به عنوان آینده دور در نظر گرفته شده‌اند. همچنین، بارش آینده تحت سه سناریوی خوش‌بینانه، میانه و بدبینانه به ترتیب SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 پیش‌بینی شد. بارش سالانه بررسی شد و تغییرات بارش در هر یک از سه دوره بعدی نسبت به دوره پایه مشاهدات و سپس معناداری آنها در سطح اطمینان ۵٪ بررسی گردید.

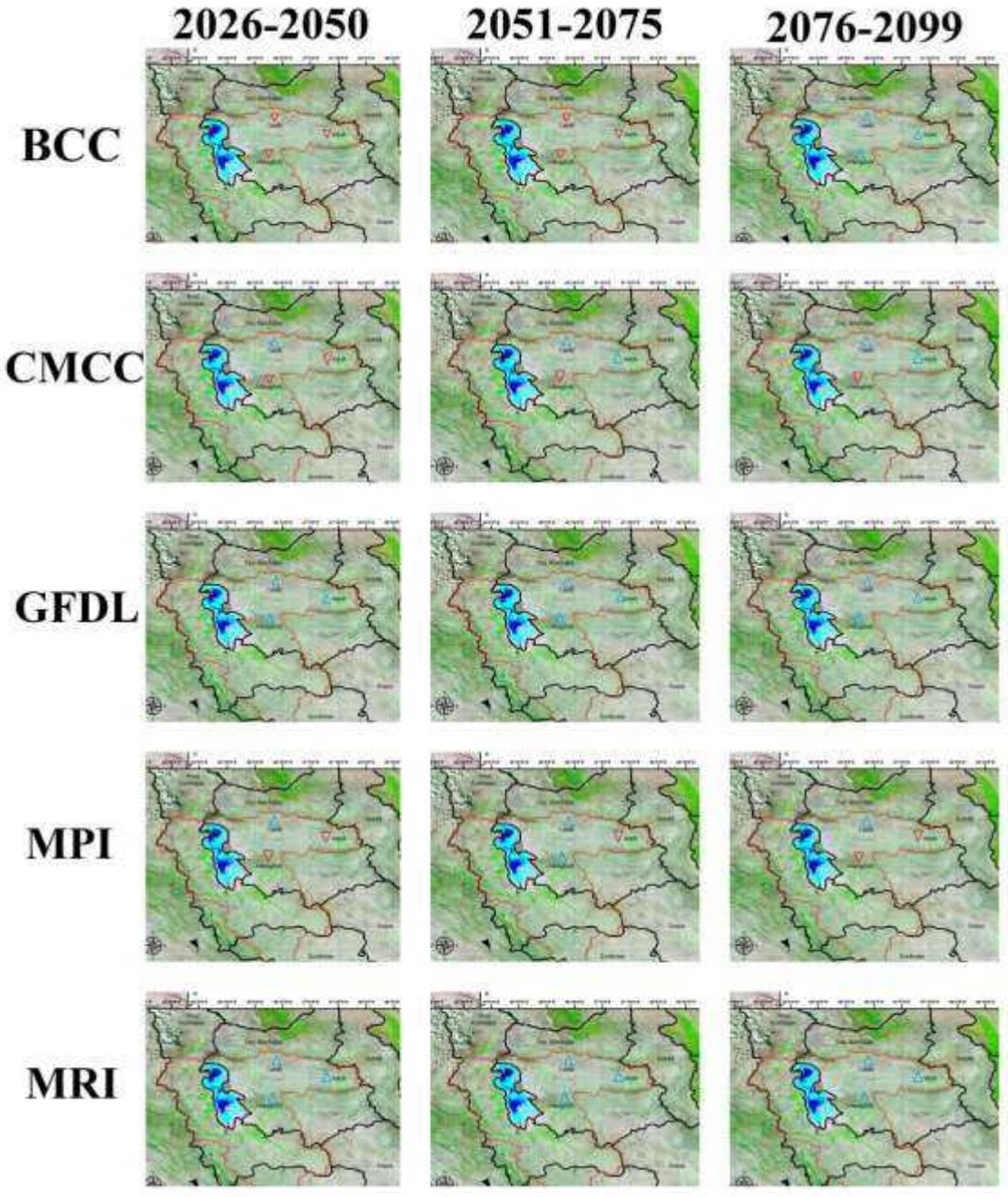
نتایج

پیش نگری بارش شرق دریاچه شرق دریاچه ارومیه (آذربایجان شرقی) بر مبنای معنی داری (افزایش یا کاهش) یا عدم معنی داری در مقیاس سالانه با استفاده از برونداد مدلهای منتخب GFDL، MRI، MPI، BCC و CMCC برای سه دوره آینده نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۶)، میانه (۲۰۷۵-۲۰۵۱) و دور (۲۰۹۹-۲۰۷۶) تحت سه سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به ترتیب در شکلهای ۱ تا ۳ نشان داده شده است. مطابق شکل۱ در آینده نزدیک تحت سناریوی خوشبینانه به جزء مدل BCC برای دوره آینده نزدیک و میانه کاهش بارش در ایستگاه های مورد مطالعه مشاهده می شود. برای ایستگاه سراب و مراغه در دوره نزدیک و آینده در مدل CMCC و آینده دور مدل MPL و آینده میانه ایستگاه مراغه در مدل CMCC و سراب در مدل MPL کاهش بارش و بقیه ایستگاه ها افزایش بارش را نشان می دهند که این تغییرات بارش معنی دار نیست.

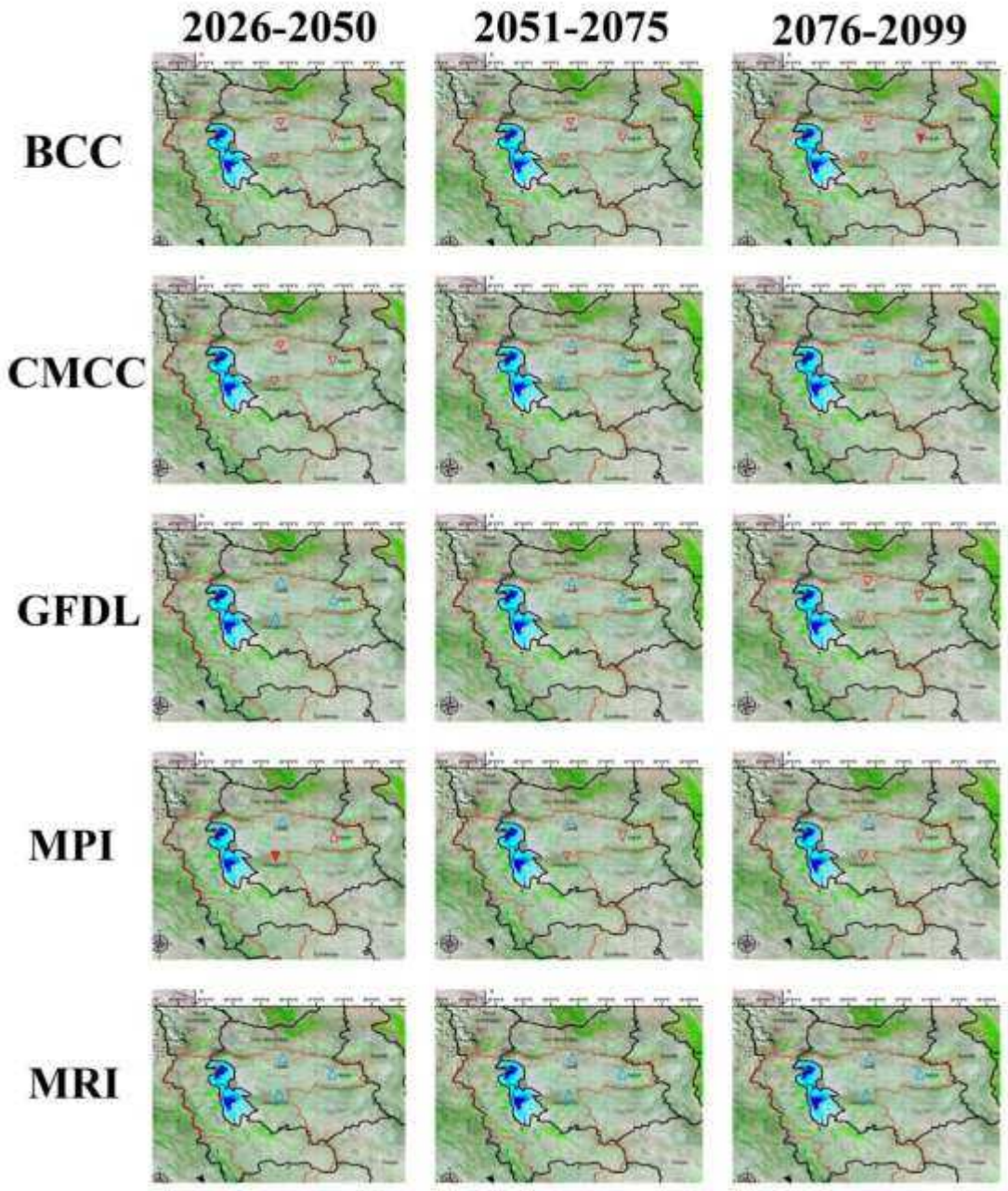
در سناریوی میانه مدل BCC برای سه دوره آینده کاهش بارش را نشان می دهد که در آینده دور برای ایستگاه سراب این کاهش بارش معنی دار است. مدل CMCC نیز کاهش بارش را برای آینده نزدیک و GFDL کاهش بارش را برای آینده دور پیش بینی می نماید. در مدل MPI دو ایستگاه سراب و مراغه در سه دوره کاهش بارش را پیش بینی می نماند که کاهش بارش در ایستگاه مراغه معنی دار است. در حالی که مدل MRI برای هر سه دوره و مدل GFDL برای آینده نزدیک و میانه افزایش بارش را نشان می دهند که هیچ کدام معنی دار نیست.

در سناروی بدبینانه مدل BCC کاهش بارش را برای سه دوره آینده پیش بینی می نماید که در آینده دور این کاهش برای هر سه ایستگاه معنی دار است. در مدل CMCCو GFDL برای آینده نزدیک هر سه ایستگاه مورد مطالعه و همچنین در آینده میانه ایستگاه مراغه در مدل CMCC و ایستگاه سراب و مراغه در مدل MRI کاهش بارش را نشان می دهند که معنی دار نیستند. در آینده دور هر سه ایستگاه در مدل GFDL و دو ایستگاه سراب و مراغه در مدل CMCC و تبریز و

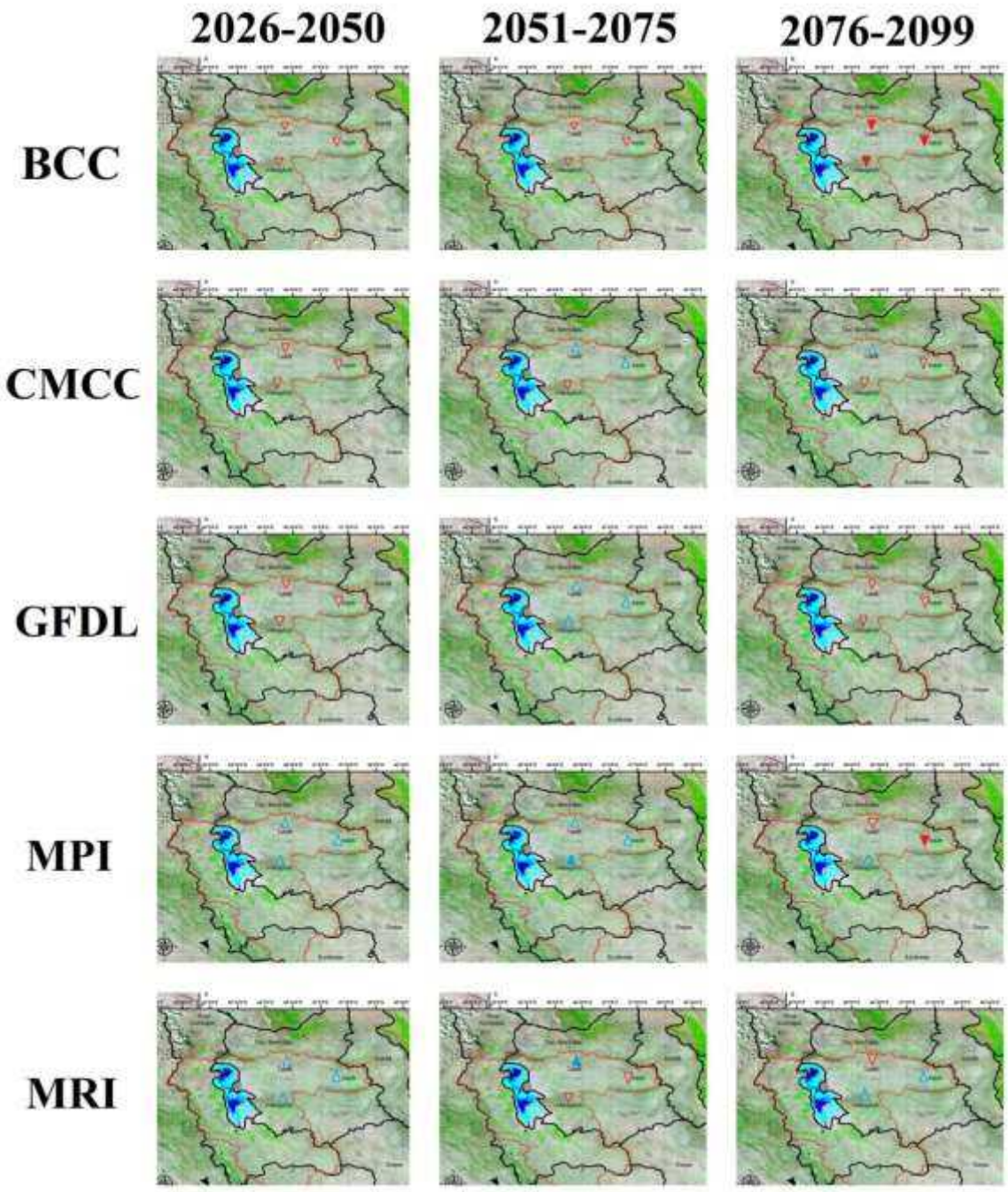
سراب در مدل MPI کاهش بارش را نشان می دهند که معنی دار نیستند. در بقیه موارد تغییرات بارش افزایشی بوده و همانطور که مشاهده می گردد معنی دار نیست.



شکل ۱ – پیش نگری بارش در مقیاس سالانه با استفاده از برونداد مدل CMIP6 برای سناریوی خوشبینانه SSP1-2.6



شکل ۲ – پیش نگری بارش در مقیاس سالانه با استفاده از برونداد مدل CMIP6 برای سناریوی میانه SSP2-4.5



شکل ۳ – پیش نگری بارش در مقیاس سالانه با استفاده از برونداد مدل CMIP6 برای سناریوی بدبینانه SSP5-8.5

نتیجه‌گیری

در سناریوی خوش‌بینانه، اکثر مدل‌ها برای دوره‌های ۲۰۵۰-۲۰۲۶ و ۲۰۷۵-۲۰۵۱، به جز ایستگاه تبریز، نشان‌دهنده کاهش بارش سالانه هستند و در دوره ۲۰۷۶-۲۰۹۹، همه ایستگاه‌ها افزایش بارش را تجربه می‌کنند که معنادار نیست. در سناریوی بدبینانه، مدل‌های BCC، GFDL و CMCC کاهش بارندگی سالانه را نشان می‌دهند که در مدل BCC برای دوره ۲۰۷۶-۲۰۹۹ قابل توجه و معنی دار است. در سناریوی میانی، به جز مدل‌های GFDL و MRI که افزایش بارندگی را نشان می‌دهند، سایر مدل‌ها کاهش بارندگی را برای هر سه دوره و در تمام ایستگاه‌ها نشان می‌دهند. بر اساس کاهش مورد انتظار بارندگی در سال‌های آینده و برای جلوگیری از خشک شدن بیشتر دریاچه ارومیه، باید یک برنامه ملی مدیریت آب برای مقابله با تغییرات اقلیمی تدوین شود.

منابع

Donat, M. G., Delgado-Torres, C., De Luca, P., Mahmood, R., Ortega, P., & Doblas-Reyes, F. J. (2023). How credibly do CMIP6 simulations capture historical mean and extreme precipitation changes? Geophysical Research Letters, 50, e2022GL102466. https://doi.org/10.1029/2022GL102466

Dong, T., Dong, W. Evaluation of extreme precipitation over Asia in CMIP6 models. Clim Dyn 57, 1751–1769 (2021). https://doi.org/10.1007/s00382-021-05773-1

Mahadevan, M., Noel, J. K., Umesh, M., Santhosh, A. S., & Suresh, S. (2024). Climate Change Impact on Water Resources, Food Production and Agricultural Practices. In The Climate-Health-Sustainability Nexus (pp. 207–229). Springer.

Zarrin, A., Dadashi-Roudbari, A. Projection of future extreme precipitation in Iran based on CMIP6 multi-model ensemble. Theor Appl Climatol 144, 643–660 (2021). https://doi.org/10.1007/s00704-021-03568-2

Precipitation Projection in Lake Urmia Basin in East Azerbaijan Using Downscaling of CMIP6 Models

Farnaz Pourasghar*[1], Mahdi Eslahi[2]

East Azerbaijan Bureau of Meteorology, IRIMO, Tabriz, Iran

East Azerbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Training Center, Tabriz, Iran

* Farnaz _pourasghar@yahoo.com

Abstract

In this study, five General Circulation Models (GCMs) have been used, including GFDL, MRI, MPI, BCC, and CMCC, to examine precipitation projections in the eastern basin of Lake Urmia under climate scenarios. The precipitation output of the mentioned models has been statistically downscaled using CMHyd software. The selection of GCM models was based on access to their data and their ability to simulate the stations observed precipitation. In the downscaling process, data from three synoptic stations have been used. The observational base period of 1985-2014 and future periods are considered 2026-2050 as near future, 2051-2075 as medium future and 2076-2099 as far future. Also, the future precipitation was predicted under three scenarios: SSP1-2.6, SSP2-4.5 and SSP5-8.5, respectively. In the optimistic scenario, most models for the periods 2026-2050 and 2051-2075, except for the Tabriz station, indicate a decrease in annual precipitation, and in the period 2076-2099, all stations experience an increase in precipitation which is not significant. In the pessimistic scenario, the BCC, GFDL and CMCC models reveal a decrease in annual precipitation, which in the BCC model is significant for the period 2076-2099. In the middle scenario, except for the GFDL and MRI models which present an increase in precipitation, other models exhibit a decrease in precipitation for all three periods and across all stations.

Keywords: Urmia Lake, Climate change, Precipitation, CMIP6, CMHyd.

سومین کنفرانس ملی آب و هواشناسی ایران (با محوریت تغییر اقلیم)
The 3rd National Conference on Climatology of Iran (Focusing on Climate Change)
ارومیه ۱۶ مهر ۱۴۰۴

پیش‌نگری و تحلیل الگوهای مکانی–زمانی خشکسالی‌های ایران تحت سناریوی اقلیمی SSP3-7.0

محمد کمانگر[۱*]، عالیه کشاورز[۲]، زینب حزباوی[۳]، سعیده اشرفی[۴]

[۱] دکتری، گروه آب و هوا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران رایانامه
mohamad.kamangar63@gmail.com
[۲] دانشجوی دکتری علوم مرتع، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران رایانامه
a.keshavarz@na.iut.ac.ir
[۳] دانشیار، گروه مرتع و آبخیز، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران رایانامه
z.hazbavi@uma.ac.ir
[۴] دکتری، گروه آب و هوا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران رایانامه
ashrafi.climate1984@gmail.com

چکیده

خشکسالی، به‌عنوان یکی از برجسته‌ترین چالش‌های محیطی در ایران، عواقب قابل توجهی بر امنیت غذایی، مدیریت منابع آب و پایداری بخش کشاورزی تحمیل می‌نماید. بر همین اساس، پژوهش حاضر بر پیش‌بینی و بررسی الگوهای فضایی-زمانی خشکسالی در ایران، تحت سناریوی مشترک اجتماعی-اقتصادی SSP3-7.0 تمرکز دارد. به این‌منظور، داده‌های ثبت‌شده از ۹۵ ایستگاه سینوپتیک در بازه زمانی پایه ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۴ به کار گرفته شد. پیش‌بینی الگوهای بارشی با بهره‌گیری از خروجی‌های پنج مدل گردش عمومی جو (GCM) شامل GFDL-ESM4، IPSL-CM6A-LR، MPI-ESM1-2-HR و UKESM1-0-LL انجام پذیرفت. داده‌های مربوطه، پس از پردازش مقدماتی، از طریق روش کریجینگ همگن‌سازی شد و سوگیری آن‌ها تصحیح شد. به‌منظور کاستن از عدم قطعیت‌های ناشی از تفاوت عملکرد مدل‌ها، رویکرد میانگین‌گیری چندمدلی (Ensemble) اتخاذ شد. یافته‌ها حاکی از آن است که داده‌های میانگین‌گیری‌شده با مشاهدات واقعی همبستگی معناداری نشان می‌دهند و روش Ensemble کارایی برتری نسبت به مدل‌های انفرادی ارائه می‌دهد. تحلیل فضایی-زمانی بیان‌گر وقوع خشکسالی‌های شدید و بسیار شدید در پهنه مرکزی فلات، جنوب شرقی و برخی نواحی کم‌ارتفاع جنوب غربی کشور است، در حالی‌که مناطق شمال غربی و ارتفاعات غربی کشور سطوح رطوبتی متوسط تا شدید بیش‌تری را تجربه می‌کنند. پیش‌بینی‌ها برای دوره ۲۰۲۱ تا ۲۰۴۰ نشان‌دهنده افزایش شیوع خشکسالی در بخش‌های شرقی، مرکزی و جنوبی و کاهش سطوح رطوبتی شدید در نواحی غربی و شمال غربی هستند. این تحولات، تهدیدی جدی برای بخش کشاورزی، منابع آبی و اکوسیستم‌ها به شمار می‌آیند و بر ضرورت تدوین و اجرای راهبردهای مدیریتی و پیشگیرانه به‌منظور کاهش آسیب‌پذیری ناشی از خشکسالی تأکید می‌کنند.

کلمات کلیدی: خشکسالی، ایران، سناریوی اقلیمی، الگو مکانی زمانی، همادی

۱-مقدمه

تغییر اقلیم ناشی از گرمایش جهانی، یک نگرانی عمومی در سراسر جهان است. در سال‌های اخیر، تغییر اقلیم در بسیاری از نقاط جهان ثبت شده است (Masoudi and Afrough 2011). بررسی تغییرات دما و بارش در سال‌های آینده می‌تواند راهگشای معضلاتی چون خشکسالی، سیلاب‌های ناگهانی، تبخیر زیاد و تخریب‌های محیطی باشد. استفاده از داده‌های الگوهای گردش کلی جو (GCM) در حال حاضر قوی‌ترین ابزار به‌منظور تولید سناریوهای اقلیمی است. همچنین این الگوها واکنش اقلیم جهانی به غلظت گازهای گلخانه‌ای و نیز سناریوهای اقلیمی آینده را برای سراسر کره زمین شبیه‌سازی می‌کنند (رضایی و همکاران ۱۴۰۳). پیش‌نگری‌های اقلیمی به دلیل ماهیت پیچیده سامانه اقلیم، عدم قطعیت زیادی دارند که همین موضوع درک درستی از واقعیت سامانه اقلیم و درستی مدل‌سازی آن به‌ویژه در سطوح منطقه‌ای و مناطقی با اقلیم‌های متنوع همچون ایران فراهم نمی‌کند، بنابراین یک روش برای کاستن از عدم قطعیت مدل‌های اقلیمی، مقیاس‌کاهی آن‌هاست (زرین و داداشی رودباری ۱۴۰۱). مدل پیش‌بینی همادی (Ensemble) به کاهش عدم قطعیت در پیش‌بینی‌ها کمک می‌کند (نجفی و همکاران ۱۴۰۲).

آمادگی و برنامه‌ریزی برای مقابله با اثرات نامطلوب خشکسالی به اطلاعات مربوط به وسعت، شدت و مدت خشکسالی بستگی دارد. این اطلاعات را می‌توان از طریق شاخص‌های خشکسالی که اطلاعات کمی در مورد ویژگی‌های خشکسالی در اختیار تصمیم‌گیرندگان قرار می‌دهند، به دست آورد. چنین اطلاعات کمی در پایش خشکسالی بسیار مفید هستند (Mahmoudi et al 2019). شاخص‌های متعددی برای ارزیابی شدت خشکسالی وجود دارد، با این حال، روش‌های شاخص بارش استاندارد شده (SPI) و تبخیر و تعرق استاندارد شده بارش (SPEI) به‌طور گسترده توسط محققان برای تعیین ویژگی‌های مختلف خشکسالی در مناطق جغرافیایی مختلف استفاده می‌شوند (Mistry et al 2023).

اهمیت مطالعات خشکسالی و روند تغییرات آن به‌خصوص در آینده باعث شده است تا طیف گسترده‌ای از پژوهشگران به مطالعه تغییرات دما، بارش و خشکسالی و روند آن در آینده بپردازند. برای مثال، مطالعات زرین و داداشی رودباری (۱۴۰۱) با بهره‌گیری از مدل‌های هیدرولوژیک و داده‌های ماهواره‌ای، از جمله WSIM-GLDAS و GRACE، وضعیت امنیت آب را در ایران مورد ارزیابی قرار داده‌اند و پیش‌بینی تغییرات آتی با مدل‌های اقلیمی CMIP6 و سناریوی SSP5-8.5 نشان می‌دهد که مدیریت پایدار منابع آب برای مقابله با خشکسالی و افزایش تقاضای آب ضروری است. بر اساس یافته‌های رضایی و همکاران (۱۴۰۳)، استفاده از داده‌های ایستگاهی در کنار خروجی مدل‌های اقلیمی نسل ششم (CMIP6) تحت سناریوهای مختلف (SSP1-2.6، SSP3-7.0 وSSP5-8.5) می‌تواند در پیش‌بینی آینده اقلیم کشور مؤثر باشد. همچنین ارزیابی‌ها با روش مقیاس‌بندی آماری (LSBC) و شاخص‌های خطا نشان داده است که برخی مدل‌ها از جملهMPI-ESM1-2LR و MRI-ESM2-0عملکرد دقیق‌تری در شبیه‌سازی شرایط ایران دارند. نتایج کلی این پژوهش بیانگر آن است که در آینده میانگین دما افزایش و میزان بارش کاهش خواهد یافت، به‌ویژه در مناطق شرقی و مرکزی کشور که بیشترین تغییرات پیش‌بینی شده‌اند. مطالعات اقلیمی حسینی وردنجانی و همکاران (۱۴۰۴) در بروجن و لردگان با استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو (GCM) و پروژه CMIP6 نشان داده‌اند که در سناریوهای مختلف (SSP1-2.6، SSP2-4.5 وSSP5-8.5)،

میانگین دما در ایران طی دوره‌های آینده نزدیک و دور بین ۱/۳ تا ۲/۶ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت، در حالی‌که میزان بارش با کاهش ۷ تا ۱۴ درصدی همراه است. این نتایج بیانگر تشدید چالش‌های مرتبط با منابع آب و لزوم برنامه‌ریزی سازگارانه در مدیریت اقلیم آینده کشور است.

هدف اصلی این پژوهش، پیش‌بینی و تحلیل الگوهای مکانی–زمانی خشکسالی در ایران تحت سناریوی اقلیمی SSP3-7.0 است. برای دستیابی به این هدف، از خروجی مدل‌های نسل ششم گردش عمومی جو و اقیانوس (CMIP6) استفاده شده که به‌عنوان به‌روزترین مجموعه داده‌های اقلیمی جهان شناخته می‌شوند و قابلیت بهتری در شبیه‌سازی شرایط آینده دارند. در این مطالعه، یک شاخص معتبر خشکسالی به‌کار گرفته شده است تا پویایی‌های خشکسالی در ابعاد شدت، تداوم و گستره مکانی با دقت بیشتری ارزیابی شود. تمایز اصلی این پژوهش نسبت به مطالعات پیشین، تمرکز بر تحلیل جامع در مقیاس ملی و استفاده از سناریوی بدبینانه SSP3-7.0 است که نمایانگر شرایطی با انتشار بالای گازهای گلخانه‌ای و فشارهای اجتماعی–اقتصادی گسترده می‌باشد. این رویکرد، امکان ترسیم چشم‌اندازی واقع‌گرایانه‌تر از وضعیت آینده خشکسالی‌های ایران را فراهم می‌کند و می‌تواند مبنای مهمی برای برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب، سازگاری با تغییر اقلیم و ارتقای امنیت غذایی کشور قرار گیرد.

۲-مواد و روش‌ها

۲-۱ داده‌های ایستگاهی

در این تحقیق، داده‌های مشاهده‌ای مربوط به ۹۵ ایستگاه همدیدی کشور طی بازه زمانی ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۴ به‌عنوان دوره مبنا گردآوری و پردازش شدند. در فرایند انتخاب ایستگاه‌ها تلاش شد تا پوشش مناسبی از شرایط اقلیمی متنوع ایران لحاظ شوند. همچنین ایستگاه‌هایی برگزیده شدند که ضمن برخورداری از کمترین خلأ آماری، کیفیت داده‌های آن‌ها نیز در آزمون‌های ارزیابی کمی تأیید شده باشد.

۲-۲ داده‌های مدل‌های اقلیمی (CMIP6)

برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی در دوره‌های آتی، از داده‌های مدل‌های گردش عمومی جو و اقیانوس متعلق به فاز ششم پروژه مقایسه‌ای مدل‌های جفت‌شده (CMIP6) بهره گرفته شد. این پروژه که مبنای گزارش ششم هیئت بین‌الدولی تغییر اقلیم (IPCC AR6) است، از سناریوهای جدید موسوم به مسیرهای اجتماعی–اقتصادی مشترک (SSPs) استفاده می‌کند. این سناریوها با خطوط سیر غلظت گازهای گلخانه‌ای (RCPs) پروژه پنجم IPCC تلفیق شده‌اند (Eyring et al., 2016). در میان آن‌ها، سناریوهای تازه‌ای همچون SSP1-1.9، SSP4-3.4 و SSP3-7.0 معرفی شده و چهار مسیر دیگر شامل SSP1-2.6، SSP2-4.5، SSP4-6.0 و SSP5-8.5 نیز نسخه‌های به‌روزشده RCPهای موجود در CMIP5 محسوب می‌شوند (Gupta et al., 2020). در این پژوهش سناریوی SSP3-7.0 مبنای تحلیل قرار گرفت.

مدل‌های اقلیمی CMIP6 نسبت به نسل‌های پیشین توانایی بالاتری در بازتولید الگوهای بزرگ‌مقیاس جوی و اقلیمی دارند و پیشرفت‌های قابل توجهی در این زمینه نشان داده‌اند (Chen et al., 2020; Akinsanola et al., 2020; Zhai et al., 2020; Wang et al., 2020). در تحقیق حاضر، خروجی پنج مدل منتخب شامل MRI-ESM2، IPSL-CM6A-LR،

UKESM1-0-LL، MPI-ESM1-2-HR و GFDL-ESM4 برای دوره تاریخی (۱۹۸۵–۲۰۱۴) و همچنین برای بازه آینده نزدیک (۲۰۲۱–۲۰۴۰) از پایگاه داده CMIP6 به نشانی https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/ استخراج شد. انتخاب این مدل‌ها بر اساس رویکردی چندمعیاره صورت گرفت. معیارهایی نظیر دسترس‌پذیری کامل داده‌ها برای دوره‌های گذشته و آینده، عملکرد مطلوب در شبیه‌سازی اقلیم ایران طبق مطالعات پیشین و پوشش طیف وسیعی از حساسیت‌های اقلیمی در نظر گرفته شدند تا عدم قطعیت‌های محتمل در پیش‌بینی‌ها به حداقل برسد. همچنین تأکید ویژه‌ای بر انتخاب مدل‌های سیستم زمین (ESMs) وجود داشت، چراکه این مدل‌ها با شبیه‌سازی چرخه‌های زیست‌ژئوشیمیایی حیاتی از جمله چرخه کربن، تصویری جامع‌تر و یکپارچه‌تر از سامانه اقلیم فراهم می‌کنند. حساسیت اقلیمی معمولاً به‌عنوان میزان افزایش دمای جهانی در اثر دو برابر شدن غلظت دی‌اکسیدکربن نسبت به سطوح پیشاصنعتی تعریف می‌شود. با توجه به این‌که غلظت CO_2 پیش از انقلاب صنعتی حدود ۲۶۰ ppm بوده است، دو برابر آن در حدود ۵۲۰ ppm خواهد بود.

جدول (۱)- مدل‌های مورد استفاده جهت همادی و پیش‌نگری خشکسالی

مدل	نام موسسه	قدرت تفکیک مکانی تقریبی	کشور	واریانت
MRI-ESM2	Meteorological Research Institute (MRI) |	۱/۲۵ *۱/۲۵	ژاپن	r1i1p1
IPSL-CM6A-LR	institut pierre-simon laplace	۲/۵ *۱/۲۶	فرانسه	r1i1p1
UKESM1-0-LL	Met Office Hadley Center	۲/۲۵ *۲/۲۵	انگلیس	r1i1p1
MPI-ESM1-2-HR	Max Planck Institute	۰/۹۴ *۰/۹۴	آلمان	r1i1p1
GFDL-ESM4	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	۱/۲۵ *۱/۰	امریکا	r1i1p1

۳-۲ استخراج، باز شبکه‌بندی و تصحیح اریبی داده‌ها

در گام نخست، داده‌های مدل‌های مورد استفاده در نزدیک‌ترین نقاط به ایستگاه‌های همدیدی استخراج شدند. سپس، برای یکسان‌سازی ابعاد پیکسل‌های نقشه‌های حاصل از مدل‌ها و داده‌های زمینی اقدام به شبکه‌بندی داده‌های زمینی و نیز داده‌های مستخرج از مدل‌ها شد. برای باز شبکه‌بندی داده‌ها از روش کریجینگ استفاده شد. با بررسی‌های انجام‌شده قدرت تفکیک مکانی ۱۹ کیلومتری برای ابعاد پیکسل‌ها مناسب تشخیص داده شد؛ بنابراین با انجام شبکه‌بندی، پیکسل‌هایی با ابعاد ۱۹ کیلومتر در ۱۹ کیلومتر به دست آمد. سپس با استفاده از داده‌های بارش مدل‌های مورد استفاده ریزمقیاس‌سازی با روش تغییر عامل دلتا (DCF) برای پیکسل‌های مذکور، به شرح زیر انجام شد. جهت تصحیح اریبی مدل‌ها از روش تغییر عامل دلتا (DCF) استفاده شد. شرح محاسباتی روش DCF در رابطه (۱) آمده است (حمیدیان‌پور و شجاع ۱۴۰۱).

$$T_{frc}^{BC}(t) = P_{obs}(t), \left[\frac{\mu_m P_{frc}(t)}{\mu_m P_{conter}(t)} \right] \qquad (۱)$$

در رابطه فوق، T (متغیر مورد نظر) است؛ contr تعداد سری‌های شبیه‌سازی‌شده CMIP6-DCCP در طول دوره کنترل است، obs دوره زمانی مشاهداتی؛ f سری زمانی پیش‌بینی‌شده آینده که باید اریبی آن تصحیح شود؛ BC سری زمانی پیش‌نگری شده آینده که اریبی آن تصحیح‌شده است، t گام زمانی و μ_m میانگین بلندمدت ماهانه است (Mendez et al 2020). پس از مرحله ریزمقیاس نمایی، خطای مدل‌ها با استفاده از روش‌های متعددی نظیر RMSE، MAE، MBE و R^2

محاسبه و مورد بررسی قرار گرفت. تمام مراحل ذکرشده در بالا در محیط برنامه‌نویسی MATLAB R2024b کدنویسی شده است.

۲-۴ روش همادی چندمدلی (Multi-Model Ensemble)

خروجی GCMs به‌طور ذاتی با سوگیری‌ها (Biases) و عدم قطعیت‌های ساختاری همراه است. به‌منظور کاهش این عدم قطعیت‌ها و دستیابی به یک برآورد پایدارتر و قابل اعتمادتر از شرایط اقلیمی آینده، در این پژوهش از رویکرد همادی چندمدلی مبتنی بر روش میانگین وزنی استفاده شد. منطق اصلی این روش، تخصیص وزن بیش‌تر به مدل‌هایی است که توانایی بالاتری در بازتولید شرایط اقلیمی دوره تاریخی (دوره مشاهداتی) از خود نشان داده‌اند و در مقابل، کاهش سهم مدل‌های با عملکرد ضعیف‌تر در برآورد نهایی است. بر این اساس، برونداد نهایی سامانه همادی از طریق محاسبه میانگین وزنی خروجی تمام مدل‌ها، مطابق با رابطه (۲) به دست آمد:

$$w^T x^j = \sum_{k=1}^{K} w_k x_k^i \qquad (۲)$$

که در آن w_k وزن داده‌های هرکدام از مدل‌ها و x_k داده برآورد شده از مدل است (Bai et al., 2020). در ادامه، به‌منظور تعیین وزن داده‌های حاصل از هر مدل از روش همبستگی پیرسون بهره گرفته شد. زیرا توانایی مدل در شبیه‌سازی الگوی نوسانات زمانی متغیر اقلیمی را به خوبی ارزیابی می‌کند. برای نرمال‌سازی این ضرایب و تبدیل آن‌ها به وزن‌های استاندارد که مجموعشان برابر با یک باشد، از رابطه (۳) استفاده شد (Kamangar et al 2025):

$$w_k = \frac{r_k}{\sum_{k=1}^{K} r_k} \qquad (۳)$$

در این رابطه r_k ضریب همبستگی پیرسون برای هر مدل است.

این فرایند تضمین می‌کند که سهم هر مدل در برآورد نهایی، متناسب با عملکرد نسبی آن در مقایسه با سایر مدل‌های عضو سامانه همادی باشد و در نتیجه، برونداد نهایی به سمت واقع‌بینانه‌ترین پیش‌بینی سوق داده شود.

۲-۵ شاخص خشکسالی هواشناسی (SPEI)

شاخص بارش- تبخیر و تعرق پتانسیل استاندارد (SPEI)، توسط Vicente-Serrano et al (2010) ارائه شد و به‌عنوان یک شاخص خشکسالی اقلیمی معرفی شد. این شاخص مبتنی بر محاسبه ترازمندی آب اقلیمی است و برای محاسبه به داده‌های ماهانه بارندگی و دمای هوا نیاز دارد. SPEI علاوه بر بارش (P)، اثر دما را از طریق متغیر تبخیر و تعرق پتانسیل (PET) لحاظ می‌کند که آن را برای تحلیل اثرات تغییر اقلیم مناسب‌تر می‌سازد. مراحل محاسبه شاخص به شرح زیر است:

شاخص SPEI در مقیاس‌های زمانی مختلف از معادله ساده بیلان آب یعنی تفاوت بین بارندگی و تبخیر و تعرق پتانسیل براساس رویکرد تورنت وایت به دست می‌آید. با در نظر گرفتن تبخیر و تعرق پتانسیل (PET)، تفاوت بین بارندگی (P) و تبخیر و تعرق پتانسیل برای ماه (i) مطابق رابطه (۴) محاسبه می‌شوند:

$$D_i = P_i - PET_i \qquad \text{رابطه (۴)}$$

مقادیر D در مقیاس‌های زمانی مختلف نیز از رابطه (۵) به دست می‌آید:

رابطه (۵)

$$D_n^k = \sum_{n=0}^{k-1} F_{n-1} - PET_{n-i}$$

در رابطه بالا، k (ماه‌ها) مقیاس زمانی مورد نظر و n ماه مورد نظر در محاسبه است. یک توزیع سه پارامتری برای محاسبه شاخص خشکسالی نیاز است تا بتواند مقادیر منفی در داده‌های D را پوشش دهد. نتایج انتخاب مناسب‌ترین تابع توزیع نشان داده است که تابع لجستیک لگاریتمی برازش خوبی بر سری زمانی داده‌ها در مقیاس‌های زمانی مختلف دارد. فرم کلی تابع چگالی احتمال این تابع به‌صورت رابطه ۶ است (Vicente-Serrano et al., 2010):

رابطه (۶)

$$F(X) = \frac{\beta}{\alpha}\left(\frac{X-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta-1}\left[1+\left(\frac{X-\gamma}{\alpha}\right)^{\beta}\right]^{-2}$$

که در آن α، β و γ به ترتیب پارامترهای مقیاس، شکل و اصلی برای مقادیر Di در دامنه $\gamma > D < \infty$ هستند.

بدین‌ترتیب پس از محاسبه تابع توزیع تجمعی و تبدیل آن به مقادیر نرمال مقادیر شاخص SPEI استخراج می‌شوند. شاخص SPEIمی‌تواند در مقیاس‌های زمانی مختلف مانند ۱، ۳، ۶، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماه محاسبه شوند. مقادیر مثبت SPEI بیانگر مثبت بودن بیلان آب و مقادیر منفی آن بیانگر منفی بودن بیلان آب است. این شاخص می‌تواند برای پایش دوره‌های خشک و مرطوب مورد استفاده قرار گیرد. خشکسالی هنگامی شروع می‌شود که مقادیر شاخص به منفی یک برسد و با مثبت شدن آن خاتمه می‌یابد. در جدول (۲) طبقات مختلف شاخص SPEI ارائه شده است.

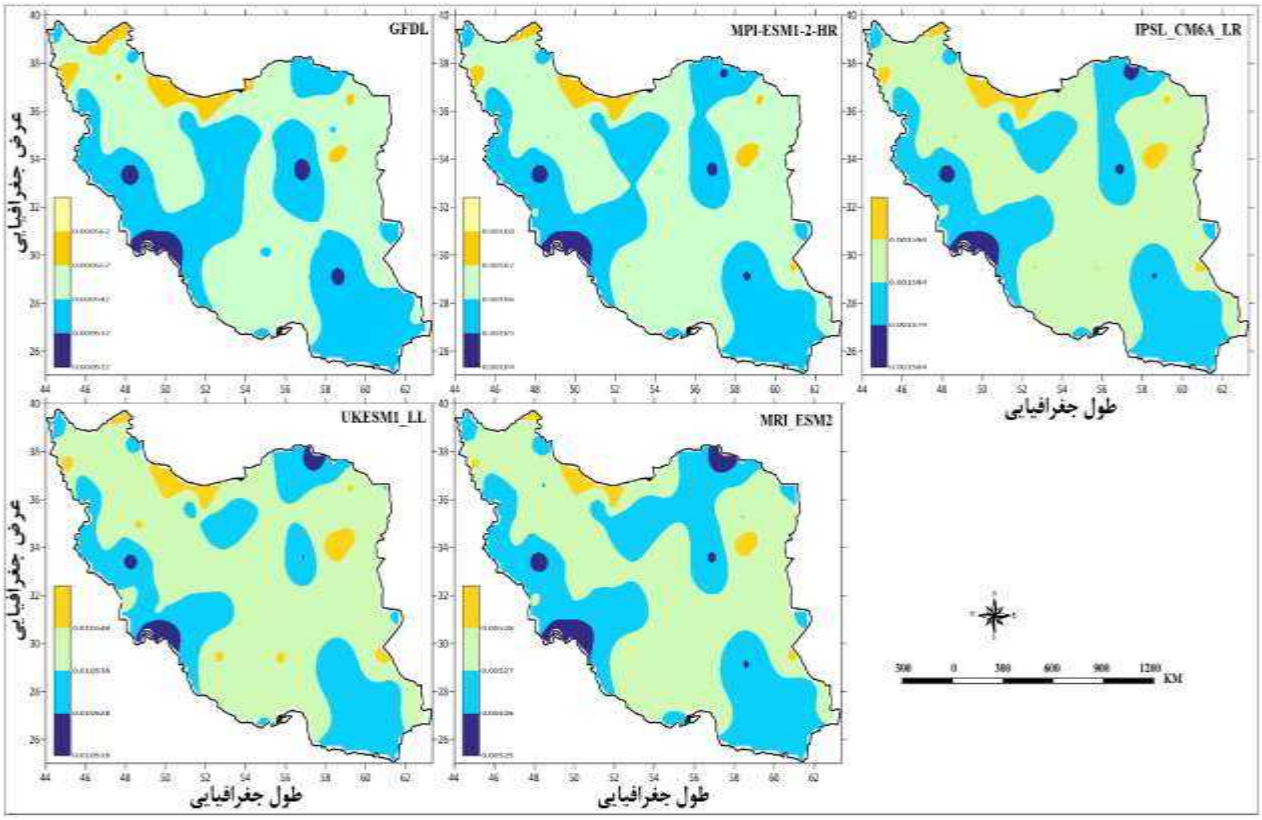
جدول (۲)- طبقات مختلف شاخص خشکسالی SPEI

طبقات شاخص	طبقه خشکسالی
≥۲	ترسالی بسیار شدید
۱/۵ تا ۱/۹۹	رطوبت شدید
۱ تا ۱/۴۹	رطوبت متوسط
۰/۹۹- تا ۰/۹۹	نرمال
-۱ تا -۱/۴۹	خشکسالی متوسط
-۱/۵ تا -۱/۹۹	خشکسالی شدید
≤-۲	خشکسالی بسیار شدید

۳- نتایج و بحث

شکل (۱) میزان خطای محاسبه‌شده برای بارش شبیه‌سازی‌شده توسط مدل‌های مختلف در دوره پایه را نمایش می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که خطاهای به‌دست‌آمده در برآورد بارش نسبتاً ناچیز و در بسیاری موارد قابل صرف‌نظر کردن هستند. دامنه مقادیر محاسبه‌شده برای ایستگاه‌های مورد استفاده بین ۰/۵ تا ۱/۰ متغیر بوده است. پس از اعمال همادی بر داده‌های برآوردی بارش، میزان خطاها کاهش یافته و دقت مدل‌ها به‌طور محسوسی بهبود یافته است. باید توجه داشت که مقدار کم

یا زیاد خطا می‌تواند ناشی از عوامل مختلفی نظیر تفکیک افقی مدل‌ها، اثرات متقابل خشکی و دریا و یا ضعف مدل‌ها در بازنمایی صحیح فرآیند بارش باشد. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که روش Ensemble عملکرد بهتری در مقایسه با تک‌مدل‌ها ارائه کرده است. با این وجود، لازم است در نظر داشت که شاخص RMSE (شکل ۱) به‌شدت تحت تأثیر مقدار واقعی متغیر قرار می‌گیرد و به‌تنهایی نمی‌تواند معیاری جامع برای ارزیابی صحت نتایج باشد. به‌طور کلی، مدل‌های مورد بررسی بین ۲۸/۷ درصد کمتر تا ۷۸/۷ درصد بیشتر از مقادیر واقعی دما در ایران را برآورد کرده‌اند. این اختلاف در داده‌های همادی‌شده به‌ترتیب به حدود ۱ درصد کمتر و ۱/۹ درصد بیشتر کاهش یافته است، که بیانگر کارایی بالای روش همادی در بهبود نتایج و کاهش چشمگیر میزان خطاهاست.



شکل (۱)- خطای ***RMSE*** بارش برآورد شده از طریق مدل‌های مختلف

شکل (۲) فراوانی رخداد هر یک از طبقات برای سناریوی SSP3-7.0 را نشان می‌دهد. از سطح فراوانی‌های بیشینه در جنوب شرق کاسته شده و مساحت فراوانی‌های بالاتر در قسمت‌های مختلف کشور افزوده شده است. در این سناریو نیز فراوانی صفر تا ۲–۰ ماه بالاترین سطح از کشور را به خود اختصاص داده است. در رطوبت شدید، نواحی بیشینه رخداد به‌صورت پراکنده در نواحی بیشتری اتفاق خواهد افتاد. همچنین مساحت این قسمت‌ها نسبت به سناریوی SSP1-2.6 افزایش خواهد داشت. فراوانی ۱۴–۱۰ ماه بالاترین سطح را در میان فراوانی‌ها دارد. بخشی از ناحیه خزری، شمال شرق، جنوب غرب و

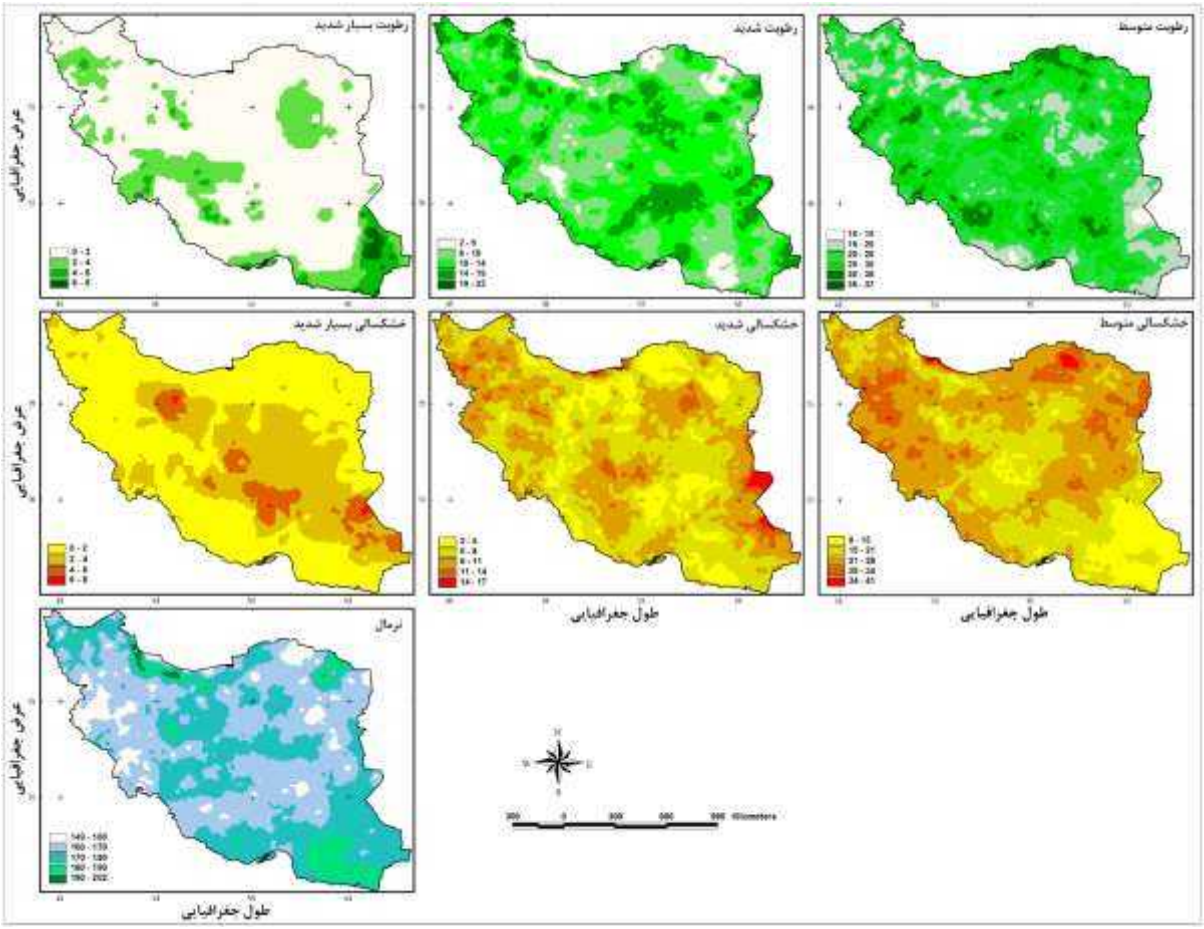
جنوب شرق کمترین فراوانی را به خود اختصاص داده‌اند. در وضعیت رطوبت متوسط فراوانی رخداد نسبت به سناریوی SSP1-2.6 کاهش ۳ ماه خواهد داشت. نواحی بیشینه نسبت به سناریوی مذکور تغییر موقعیت داده و به‌صورت پراکنده و لکه‌های کوچک در شمال شرق، غرب و نیمه جنوبی به چشم می‌خورند. بخش کوچکی در شمال شرق سیستان و بلوچستان و سواحل خلیج‌فارس کمترین فراوانی را خواهند داشت. بالاترین سطح کشور نیز فراوانی ۲۵–۲۰ ماه را تجربه می‌کند. توزیع فراوانی در خشکسالی بسیار شدید با سناریوی SSP1-2.6 تفاوت بالایی دارد. به‌طوری‌که محل رخداد بیشینه فراوانی از جنوب شرق کشور به قسمت مرکزی کشور نیز کشیده شده است. بالاترین فراوانی در جنوب البرز، جنوب شرق و بخشی از یزد به چشم می‌خورد. بخش وسیعی از کشور مانند سناریوی پیشین فراوانی ۲–۰ ماه را تجربه می‌کند و فراوانی ۴–۲ ماه از نظر مساحت در رتبه بعدی واقع می‌شود. در خشکسالی شدید نیز وضعیت تفاوت بسیاری با سناریوی SSP1-2.6 دارد. فراوانی‌های بیشینه از نیمه شمالی کشور تغییر موقعیت داده و به‌صورت لکه‌هایی کم مساحت به شرق ناحیه خزری و شمال غرب محدود شده‌اند. فراوانی ۸–۵ ماه بالاترین مساحت را خواهد داشت. در قسمت‌های مختلف کشور به‌صورت پراکنده و سطوح نسبتاً وسیع فراوانی ۱۱–۸ و ۱۴–۱۱ ماه نیز به چشم می‌خورد. در خشکسالی متوسط نیز وضعیت متفاوت از سناریوی SSP1-2.6 خواهد بود. سطح وسیعی از کشور فراوانی ۲۸–۲۱ و سپس ۲۱–۱۵ ماه را تجربه می‌کند. جنوب شرق و بخش‌های پراکنده و کوچکی در مرکز و شمال کشور فراوانی کمینه را تجربه خواهند کرد. فراوانی‌های بیشینه نیز به شمال شرق، ناحیه خزری و لکه‌های پراکنده‌ای در غرب محدود شده‌اند. وضعیت نرمال نیز نسبت به سناریوی SSP1-2.6 تفاوت داشته است. نواحی بیشینه تنها در ناحیه خزری به چشم می‌خورد و قسمت بیشینه جنوب شرقی در سناریوی SSP1-2.6 به رتبه دوم از نظر فراوانی تبدیل شده است. نواحی کمینه نیز در غرب و شرق کشور به‌صورت پراکنده دیده می‌شوند. فراوانی ۱۷۰–۱۶۰ و ۱۸۰–۱۷۰ ماه نیز به‌ترتیب بالاترین مساحت از کشور را به خود اختصاص داده‌اند.

تحلیل نقشه (۱) از شکل ۲: رطوبت بسیار شدید

این نقشه پراکندگی مناطق دارای رطوبت بسیار شدید در ایران را نمایش می‌دهد. رنگ‌بندی غالب از سفید تا سبز روشن است و لکه‌های سبز تیره نشان‌دهنده مقادیر بالاتر رطوبت هستند. مناطق مرکزی، شرقی و جنوبی کشور، از جمله دشت کویر و حوضه سیستان، مقادیر پایینی دارند و رطوبت بسیار شدید در آن‌ها محدود است. این الگو ناشی از رطوبت پایین، تابش خورشیدی زیاد و نفوذ محدود هوای سرد در زمستان است. در مقابل، بخش‌هایی از جنوب غرب کشور (نزدیک خوزستان) و نقاط ایزوله در شمال غرب (اطراف آذربایجان غربی و شرقی) مقادیر بالاتری از رطوبت شدید را نشان می‌دهند. این افزایش به دلیل هدایت توده‌های هوای قطبی از مسیر کوه‌های زاگرس و دریای سیاه رخ می‌دهد. بر اساس سناریوی SSP3-7.0، انتظار می‌رود گرم شدن جهانی فراوانی رطوبت بسیار شدید را ۲۰–۴۰ درصد کاهش دهد، اما مقادیر باقی‌مانده در مناطق غربی کوهستانی می‌تواند ناشی از تغییرات نامنظم جریان جت باشد و خسارت بالقوه به محصولات کشاورزی را افزایش دهد. رطوبت بسیار شدید می‌تواند با کاهش رشد گیاهان و افزایش خطر خشکسالی کشاورزی مرتبط باشد.

تحلیل نقشه (۲) از شکل ۲: رطوبت شدید

در این نقشه، رنگ غالب سبز متوسط تا تیره است و مقیاس مقادیر رطوبت تقریباً ۲–۱۹ است. گرادیان رطوبت از جنوب شرق به شمال غرب کشور افزایش می‌یابد. مناطقی با مقادیر پایین، شامل جنوب شرق و بخش‌های مرکزی ایران مانند بلوچستان و کرمان هستند، جایی‌که خشکی زمین و بارش کم باعث محدود شدن رواناب و در نتیجه کاهش رطوبت شدید می‌شود. مقادیر بالاتر در شمال غرب، غرب و نواحی ساحلی شمالی (نزدیک دریای خزر) مشاهده می‌شود. این افزایش ناشی از اثرات اوروگرافیک، ذوب برف در کوه‌ها و وزش بادهای غربی است. تشدید چرخه‌های هیدرولوژیکی می‌تواند فراوانی رطوبت شدید را در مناطق پربارش ۱۵–۳۰ درصد افزایش دهد، که موجب سیل‌های ناگهانی، فرسایش خاک و آسیب به زیرساخت‌ها می‌شود. وقوع رطوبت شدید پس از دوره‌های خشک می‌تواند خشکسالی‌های بعدی را تشدید کند.



شکل (۲)- فراوانی رخداد انواع وضعیت خشک‌سالی طی دوره ۲۰۴۰ – ۲۰۲۱ بر اساس سناریوی ***SSP3-7.0***

تحلیل نقشه (۳) از شکل ۲: رطوبت متوسط

نواحی سبز تیره در این نقشه نمایانگر مقادیر بالای رطوبت متوسط هستند، با مقیاس تقریبی ۱۰–۳۵. مناطق با رطوبت پایین شامل جنوب شرق (نزدیک کویر لوت) و برخی مناطق مرکزی هستند که به دلیل خشکی پایه افراطی حساسیت

کمی به تغییرات بیشتر دارند. مناطق با رطوبت متوسط بالا در غرب و شمال غرب، به‌ویژه دامنه‌های زاگرس و حوضه دریاچه ارومیه، متمرکز هستند و گسترش به ارتفاعات شمالی نیز دیده می‌شود. این الگو با بارش‌های غربی متغیر و افزایش تبخیر ناشی از گرم شدن ۲–۴ درجه سانتی‌گراد مرتبط است. پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهند که افزایش مکرر رطوبت متوسط در شمال غرب، مشابه روند مشاهده‌شده در حوضه دریاچه ارومیه، ممکن است باعث خشک شدن رودخانه‌ها و تشدید طوفان‌های گرد و غبار شود.

تحلیل نقشه (۴) از شکل ۲: خشکسالی بسیار شدید

رنگ غالب در این نقشه زرد با لکه‌های نارنجی و قرمز است و مقیاس تقریباً ۲–۸ را نشان می‌دهد. مناطق کم‌خطر شامل مرزهای شمالی و غربی، مانند کوه‌های البرز و سواحل دریای خزر هستند، جایی که ثبات هوا و کاهش ناپایداری همرفتی مانع شکل‌گیری خشکسالی بسیار شدید می‌شود. مناطق با خشکسالی بالا در فلات مرکزی، به‌ویژه اطراف تهران و اصفهان و نیز در نواحی کم‌ارتفاع جنوب غرب مشاهده می‌شوند. تحت SSP3-7.0، افزایش دما می‌تواند فراوانی خشکسالی‌های بسیار شدید را ۱۰–۲۰ درصد افزایش دهد، که موجب خسارت به محصولات کشاورزی و مناطق شهری می‌شود. همچنین، خشکسالی بسیار شدید می‌تواند خشکسالی بوم‌شناختی را با آسیب به پوشش گیاهی تشدید کند.

تحلیل نقشه (۵) از شکل ۲: خشکسالی شدید

این نقشه دارای گرادیان زرد تا نارنجی با مقیاس تقریبی ۲–۱۴ با تمرکز بیشتر در جنوب و شرق کشور است. مناطق کوهستانی شمالی مانند گیلان و مازندران مقادیر پایینی دارند، زیرا پوشش گیاهی و رطوبت خاک مانع شکل‌گیری گرد و غبار می‌شود. مقادیر بالاتر در کویرهای جنوب شرق و مرکزی، از جمله سیستان و بلوچستان و نواحی نزدیک مرز عراق، دیده می‌شود، جایی‌که بادهای شَمَل گرد و غبار را جابجا می‌کنند. تحت SSP3-7.0، تشدید خشکسالی می‌تواند فراوانی طوفان‌های گرد و غبار را در مناطق پرخطر ۳۰–۵۰ درصد افزایش دهد، که پیامدهای بهداشتی و کاهش عملکرد کشاورزی را به همراه دارد.

تحلیل نقشه (۶) از شکل ۲: خشکسالی متوسط

رنگ‌های نارنجی تا قرمز این نقشه مقیاس ۸–۴۱، با تمرکز نقاط داغ در جنوب شرقی را نشان می‌دهند. مناطق با خشکسالی کم شامل ارتفاعات شمال غرب و مرکزی هستند، در حالی‌که مناطق با خشکسالی متوسط بالا در جنوب شرقی، به‌ویژه هرمزگان و نواحی نزدیک خلیج فارس مشاهده می‌شوند. خشکسالی متوسط تحت تأثیر هوای رطوبت و ناپایدار، موسمی و نسیم دریایی شکل می‌گیرد. گرم شدن اقیانوس‌ها تحت SSP3-7.0 می‌تواند این رویدادها را ۲۰–۴۰ درصد تشدید کرده و خشکسالی متوسط را در مناطق ساحلی پرخطر افزایش دهد. طوفان‌های تندری می‌توانند بارش موضعی ایجاد کنند، اما غالباً باعث فرسایش خاک و تشدید خشکسالی هیدرولوژیکی می‌شوند.

تحلیل نقشه (۷) از شکل ۲: وضعیت نرمال

رنگ غالب در این نقشه از آبی تا سبز است و مقیاس ۱۴۰–۲۰۲ روز، با تمرکز در شمال و غرب کشور را نشان می‌دهد. مناطق با وضعیت نرمال شامل سواحل جنوبی مانند بوشهر و بندرعباس هستند که تحت تأثیر آب‌های گرم خلیج فارس قرار دارند. بیشترین تعداد روزهای نرمال در کوه‌های شمال غربی (اردبیل، زنجان) و فلات مرکزی مشاهده می‌شود.

تحت SSP3-7.0، افزایش دما منجر به کاهش ۱۰–۳۰ روزه تعداد روزهای یخبندان در سراسر کشور می‌شود که فصل رشد را طولانی‌تر می‌کند، اما فشار بر منابع آب و آفات کشاورزی را افزایش می‌دهد. وضعیت نرمال نیز می‌تواند تبخیر را افزایش داده و خشکسالی هیدرولوژیکی را تشدید کند.

۴- نتیجه‌گیری

تحلیل‌های مکانی–زمانی خشکسالی و رطوبت شدید در ایران تحت سناریوی اقلیمی SSP3-7.0 نشان داد که تغییر اقلیم آینده موجب بازترکیب قابل‌توجه الگوهای رطوبت و خشکسالی در کشور می‌شود. یافته‌ها نشان می‌دهد که مناطق مرکزی، شرقی و جنوب شرقی ایران به دلیل خشکی پایه و تابش خورشیدی بالا، بیشترین آسیب‌پذیری را نسبت به خشکسالی شدید و بسیار شدید دارند، در حالی‌که نواحی شمال غرب و غرب با اثرات اوروگرافیک و بارش‌های غربی، رطوبت متوسط و شدید بیشتری را تجربه می‌کنند. پیش‌بینی‌ها حاکی از کاهش فراوانی رطوبت بسیار شدید ۲۰–۴۰ درصد در برخی مناطق غربی و همزمان افزایش ۱۵–۳۰ درصد رطوبت شدید در شمال غرب و مناطق پربارش است. فلات مرکزی و جنوب شرق کشور به‌شدت در معرض خشکسالی شدید و بسیار شدید قرار دارند و گرم شدن جهانی می‌تواند فراوانی این رویدادها را ۱۰–۵۰ درصد افزایش دهد. این تغییرات نه تنها تهدیدی برای کشاورزی و منابع آب زیرزمینی محسوب می‌شوند، بلکه می‌توانند خشکسالی بوم‌شناختی و وقوع طوفان‌های گرد و غبار را تشدید کنند. علاوه بر این، افزایش دما و تغییر در الگوهای بارش موجب کاهش روزهای یخبندان و تغییرات در فصل رشد گیاهان خواهد شد که اثرات اقتصادی و محیط زیستی قابل‌توجهی به همراه دارد. تحلیل مکانی–زمانی این مطالعه نشان داد که خشکسالی و رطوبت شدید در ایران به‌صورت غیر یکنواخت و وابسته به ویژگی‌های توپوگرافی، بارش، دما و جریان‌های جوی رخ می‌دهد و اقدامات مدیریت منابع آب و کشاورزی باید با توجه به این الگوهای مکانی–زمانی و سناریوی SSP3-7.0 برنامه‌ریزی شود. در مجموع، این مطالعه بر اهمیت پیش‌بینی دقیق خشکسالی و رطوبت شدید برای مدیریت پایدار منابع آب، کاهش خسارت‌های کشاورزی و تقویت تاب‌آوری بوم‌شناختی در ایران تأکید می‌کند و چارچوبی برای سیاست‌گذاری مبتنی بر داده و مدل‌سازی اقلیمی فراهم می‌آورد.

۵-منابع

۱- حسینی وردنجانی، س م ر.، خوش‌روش، م.، فتاحی نافچی، ر.، نوروز ولادشی، ر.، و پورمحمد، ی. (۱۴۰۴). اثر تغییر اقلیم بر دما و بارش در دو اقلیم مختلف با استفاده از مدل‌های CMIP6 و سناریوهای حدی SSP. *مهندسی آبیاری و آب ایران*، ۱۵(۵۹)، ۲۱۲-۲۲۸.

۲- حمیدیان‌پور، م.، و شجاع، ف. (۱۴۰۱). *مقدمه‌ای بر روش‌ها و فنون مدل‌سازی اقلیم و تغییر اقلیم* .زاهدان: انتشارات زاهدان.

۳- رضایی، ح.، پاشاپور، ح.، و صادقی، ف. (۱۴۰۳). ارزیابی عملکرد مدل‌های CMIP6 و پیش‌بینی تغییرات دما و بارش تحت سناریوهای خط سیر اجتماعی-اقتصادی مشترک (SSP) در ایران. *آینده پژوهی راهبردی*، ۳(۱۰)، ۳۰–۷.

۴- زرین، آ.، و داداشی رودباری، ع. (۱۴۰۱). پیش‌نگری شدت بارش در ایران با به‌کارگیری رویکرد همادی چندمدلی با استفاده از داده‌های مقیاس‌کاهی‌شده NEX-GDDP. *ژئوفیزیک ایران*، ۱۶(۱)، ۶۸-۴۷.

۵- نجفی، م س.، دهبان، ح.، و فرخ‌نیا، ا. (۱۴۰۲). پیش‌بینی بارش ماهانه در ایران بر اساس رویکرد همادی با استفاده از مدل WRF/CFSv.2 مطالعه موردی: (دوره اکتبر ۲۰۱۹ تا آوریل ۲۰۲۰) . *ژئوفیزیک ایران*، ۱۷(۱)، ۱۴۵-۱۲۹.

6- Akinsanola, A. A., Kooperman, G. J., Pendergrass, A. G., Hannah, W. M., & Reed, K. A. (2020). Seasonal representation of extreme precipitation indices over the United States in CMIP6 present-day simulations. *Environmental Research Letters*, 15(9), 1-12.

7- Bai, H., Xiao, D., Wang, B., Liu, D. L., Feng, P., & Tang, J. (2020). Multi-model ensemble of CMIP6 projections for future extreme climate stress on wheat in the North China Plain. *International Journal of Climatology*, 40: 21-39.

8- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. Geoscientific Model Development, 9(5), 1937-1958.

9- Gupta, V., Singh, V., & Jain, M. K. (2020). Assessment of precipitation extremes in India during the 21st century under SSP1-1.9 mitigation scenarios of CMIP6 GCMs. *Journal of Hydrology*, *590*, 125422.

10- Kamangar, M., Ahmadi, M., Rabiei-Dastjerdi, H., & Hazbavi, Z. (2025). Ensemble modeling of extreme seasonal temperature trends in Iran under socio-economic scenarios. *Natural Hazards*, *121*(2), 1265-1288

11- Mahmoudi, P., Rigi, A., & Miri Kamak, M. (2019). A comparative study of precipitation-based drought indices with the aim of selecting the best index for drought monitoring in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, *137*(3), 3123-3138.

12- Masoudi, M., & Afrough, E. (2011). Analyzing trends of precipitation for humid, normal and drought classes using Standardized Precipitation Index (SPI), a case of study: Fars Province, Iran. *International Journal of AgriScience*, *1*(2), 85-96.

13- Mendez, M., Maathuis, B., Hein-Griggs, D., & Alvarado-Gamboa, L. F. (2020). Performance evaluation of bias correction methods for climate change monthly precipitation projections over Costa Rica. *Water*, *12*(2), 482.

14- Mistry, K., Salvi, G., & Kakadiya, M. (2023). Assessment of drought using SPI and SPEI methods-A state-of-art review.

15- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. Journal of climate, 23(7), 1696-1718.

16- Wang, B., Jin, C., & Liu, J. (2020). Understanding future change of global monsoons projected by CMIP6 models. Journal of Climate, 33(15), 6471-6489.

17- Zhai, J., Mondal, S. K., Fischer, T., Wang, Y., Su, B., Huang, J., ... Uddin, M. J. (2020). Future drought characteristics through a multi-model ensemble from CMIP6 over South Asia. Atmospheric Research, doi: 10.1016/j.atmosres.2020.105111.

Prediction and analysis of spatio-temporal patterns of droughts in Iran under climatic scenario SSP3-7.0

Mohammad Kamangar[1]*, Aliyeh Keshavarz[2], Zeinab Hazbavi[3], Saeideh Ashrafi[4]

[1] Ph.D., Department of Climatology, Faculty of Humanities, University of Zanjan, Zanjan, Iran
mohamad.kamangar63@gmail.com

[2] Ph.D. Student, Faculty of Natural Resources, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran Email**:**
a.keshavarz@na.iut.ac.ir

3Associate Professor, Department of Range and Watershed, Faculty of Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran Email: z.hazbavi@uma.ac.ir
[4]Ph.D., Department of Climatology, Faculty of Humanities, University of Zanjan, Zanjan, Iran
ashrafi.climate1984@gmail.com

Abstract

Drought, as one of the most prominent environmental challenges in Iran, imposes significant consequences on food security, water resources management, and sustainability of the agricultural sector. The present study therefore focuses on predicting and investigating the spatiotemporal patterns of drought in Iran under the common socio-economic scenario SSP3-7.0. To this end, data recorded from 95 synoptic stations during the base period of 1985 to 2014 were used. Precipitation patterns were predicted using the outputs of five atmospheric general circulation (GCM) models including GFDL-ESM4, IPSL-CM6A-LR, MPI-ESM1-2-HR, and UKESM1-0-LL. The relevant data, after preliminary processing, were homogenized through kriging method and their biases were corrected. To reduce the uncertainties caused by the difference in the performance of the models, a multimodal averaging approach (Ensemble) was adopted. The findings indicate that the averaged data show a significant correlation with the actual observations, and the Ensemble method provides superior efficiency compared to individual models. Spatial-t emporal analysis indicates the occurrence of severe and very severe droughts in the central zone of the plateau, southeast and some low-lying areas of the southwest of the country, while the northwestern regions and western highlands of the country experience more moderate to severe moisture levels. Projections for the period 2021 to 2040 show an increase in drought prevalence in the eastern, central and southern regions, and a decrease in extreme humidity levels in the western and northwestern regions. These developments can pose a serious threat to the agricultural sector, water resources, and ecosystems and emphasize the need to develop and implement management and preventive strategies to reduce the vulnerability caused by drought.

Keywords: Drought, Iran, Climatic Scenario, Spatiotemporal Pattern, Ensemble

مهاجرت اقلیمی: جنبه‌های کمتر بررسی‌شده و چالش‌های پژوهشی آینده

مریم عدالت مقدم[۱]، مصطفی کریمی [۲*]

۱- دانشجوی دکترای آب و هواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران
۲- دانشیار اقلیم شناسی گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران
*آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول (Mostafakarimi.a@ut.ac.ir)

چکیده

مهاجرت ناشی از شرایط نامساعد و مخاطرات اقلیمی به‌عنوان یکی از چالش‌های اساسی در پیوند میان شرایط محیطی، تحرک انسانی و حکمرانی جهانی مطرح شده است. با توجه به ابر مخاطره اقلیمی حال حاظر جهان یا همان تغییر اقلیم، بحث جابجایی و تحرک جمعیت انسانی ناشی از رخداد مخاطرات اقلیمی و همچنین اثرات محیطی تغییر اقلیم مورد توجه ویژه قرار گرفته است. اگرچه بخش قابل‌توجهی از ادبیات علمی موجود بر موثربودن عوامل اقلیمی در جابه‌جایی و جریان‌های مهاجرت متمرکز بوده اما بسیاری از این پژوهش‌ها همچنان با رویکردی جبرگرایانه به موضوع پرداخته و زمینه‌های تاریخی، اجتماعی و سیاسی را به‌طور کافی منعکس نکرده‌اند. این مقاله با مرور پژوهش‌های موجود، شکاف‌های مفهومی، نظری و سیاستی از جمله فقدان اجماع بر سر تعریف مهاجر و مهاجرت اقلیمی، ابهام در جایگاه حقوقی مهاجران، کم‌توجهی به ابعاد انسانی و عدالت اقلیمی و چالش‌های پژوهشی آینده را در این حوزه برجسته می‌سازد. بر این اساس، آینده پژوهش در این حوزه نیازمند رویکردی میان‌رشته‌ای، ترکیبی و انتقادی است که ضمن پرهیز از روایت‌های صرفاً تهدیدمحور، مهاجرت را با توجه به ویژگی‌های هر مکان به‌عنوان فرصت یا تهدیدی برای سازگاری و توسعه پایدار بازتعریف کند. ادغام دانش بومی، ارتقای ظرفیت‌های انطباقی و توجه به ابعاد عدالت و انسجام اجتماعی می‌تواند زمینه‌ساز تدوین چارچوب‌های علمی و سیاستی کارآمدتر در مواجهه با پیامدهای اقلیمی باشد.

کلید واژه‌ها: تحرک جمعیت، تغییراقلیم، مهاجر اقلیمی، عدالت اقلیمی.

مقدمه

مهاجرت به‌عنوان یکی از پدیده‌های بنیادین اجتماعی، اشکال مختلفی از جابه‌جایی درون‌مرزی و فرامرزی را در بر می‌گیرد (Bauer and Zimmermann, 2018). اگرچه در طول تاریخ دلایل گوناگونی نظیر دستیابی به فرصت‌های اقتصادی، بهبود شرایط معیشتی و ارتقای موقعیت آموزشی از محرک‌های اصلی مهاجرت بوده‌اند (Achieng et al., 2020; Prosper and Khan, 2018)اما در دهه‌های اخیر، نقش محیط و شرایط نامساعد و مخاطرات اقلیمی بیش از پیش در کانون توجه ادبیات علمی و مباحث سیاستی در سطح جهانی قرار گرفته است (Carling and Collins, 2020; Hunter et al., 2015). فشارهای محیطی و اقلیمی از جمله کاهش بازده کشاورزی، کمبود منابع آبی و رخداد مکرر مخاطرات اقلیمی، خانوارها و جوامع را ناگزیر می‌سازد که در جست‌وجوی معیشتی پایدارتر اقدام به جابه‌جایی کنند (Ayeb-Karlsson, 2018; Banu and Fazal, 2025).

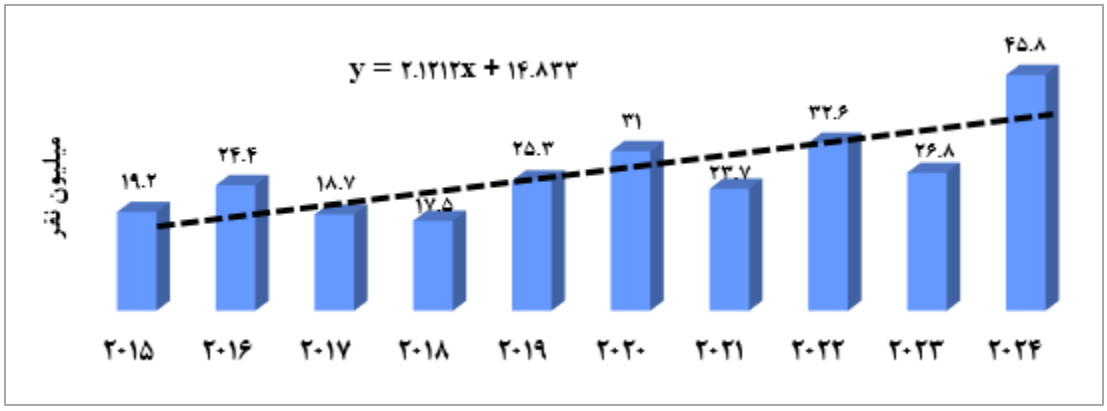
در این چارچوب مفهوم مهاجرت ناشی از مخاطرات اقلیمی مطرح می‌شود که به جابه‌جایی جمعیت‌ها در اثر تغییرات ناگهانی یا تدریجی در شرایط جوی و اقلیمی اطلاق می‌شود (Prosper and Khan, 2018; Mustak, 2022; Okolie et al., 2024). مخاطرات اقلیمی نه تنها با افزایش فراوانی و تشدید سیل‌ها، خشکسالی‌های مکرر و افزایش سطح آب دریاها موجب آوارگی جمعیت‌ها می‌شود، بلکه با تحت فشار قرار دادن نظام‌های اجتماعی–اقتصادی، تشدید فقر و ناامنی غذایی، افزایش رقابت بر سر منابع محدود طبیعی (شکل ۱) را نیز فراهم می‌آورد (Stavi et al., 2021; Bedasa and Deksisa, 2024). این شرایط به‌ویژه در جوامع آسیب‌پذیر به بروز شکنندگی نهادی، ناپایداری اجتماعی و حتی افزایش تعارضات منجر می‌شود (Sikorsky et al., 2023). با این حال، شدت و گستره مخاطرات اقلیمی در عصر حاضر موجب شده است که جابه‌جایی‌ها در مقیاس جهانی به سطحی بی‌سابقه برسند و الگوهای اسکان را دگرگون سازند (Schewel and Debray, 2023). هیئت بین‌الدولی تغییر اقلیم (IPCC) نیز مهاجرت را به‌عنوان یکی از پیامدهای اصلی تغییر اقلیم به رسمیت شناخته و تأکید می‌کند که مخاطرات اقلیمی جابه‌جایی انسان‌ها را به پدیده‌ای دائمی و اجتناب‌ناپذیر تبدیل می‌کند (Javed et al., 2024; Williams et al., 2020).



شکل ۱- پیامدهای مخاطرات اقلیمی مکرر و شدید

منبع: Simpson et al., 2024

شواهد تاریخی نشان می‌دهند که پیوند میان مخاطرات اقلیمی و جابه‌جایی جمعیت قدمتی طولانی دارد و همواره الگوهای پراکنش انسان را تغییر داده‌اند. گزارش‌های سازمان‌های بین‌المللی ابعاد کمی و کیفی این روند را به‌خوبی آشکار می‌سازند. کمیساریای عالی پناهندگان سازمان ملل (UNHCR) اعلام کرده است که حدود ۴۰ درصد از بحران‌های اقلیمی که به عملیات امدادی این سازمان منجر می‌شوند، ناشی از سیل‌های ویرانگر بوده است. در حالی که زمین‌لرزه‌ها حدود یک‌چهارم از این بحران‌ها را شامل می‌شوند. بر اساس گزارش بانک جهانی (Groundswell, 2018) شرایط نامساعد و مخاطرات اقلیمی تا سال ۲۰۵۰ می‌تواند حدود ۲۱۶ میلیون نفر را در سراسر جهان مجبور به آوارگی داخلی کند. همچنین، آمارهای اخیر نشان می‌دهد که از سال ۲۰۲۰ روند جابه‌جایی‌های ناشی از بلایای طبیعی و مخاطرات اقلیمی شدت یافته (شکل ۲) و افزایش ۴۱ درصدی در شمار سالانه آوارگان نسبت به دهه‌های پیشین مشاهده شده است (IDMC, 2024). تنها در سال ۲۰۲۳، بیش از ۷.۷ میلیون جابه‌جایی داخلی ناشی از بلایای طبیعی در ۸۲ کشور و منطقه ثبت شده که مرتبط با سیل‌ها و طوفان‌ها مربوط بوده است (IDMC, 2024). افزون بر این، پیش‌بینی‌ها حاکی از آن است که کانون‌های اصلی جابه‌جایی های اقلیمی از اوایل دهه ۲۰۳۰ آشکار خواهند شد و تا سال ۲۰۵۰ ابعاد گسترده‌تری خواهند یافت (Rigaud et al., 2018). در افق بلندمدت، انتظار می‌رود که تا پایان قرن حاضر شمار آوارگان ناشی از مخاطرات اقلیمی و طبیعی به حدود ۶۳۰ میلیون نفر برسد (Yang et al., 2023).



شکل ۲- جابه‌جایی‌های داخلی ناشی از بلایای طبیعی و مخاطرات اقلیمی

منبع: IDMC: 2025

تحرک جمعیت ناشی از مخاطرات اقلیمی پدیده‌ای چندبعدی، پویا و پیچیده است که در تعامل با زمینه‌های اقتصادی، اجتماعی و سیاسی شکل می‌گیرد. با افزایش فراوانی و شدت رخدادهای حدی اقلیمی، الگوهای مهاجرت برجسته‌تر شده و

ضرورت طراحی سیاست‌گذاری‌های جامع، یکپارچه و میان‌رشته‌ای بیش از پیش احساس می‌شود. با وجود رشد توجه جامعه علمی و انتشار گزارش‌های معتبر از سوی نهادهای بین‌المللی همچون هیئت بین‌الدولی تغییر اقلیم و کنوانسیون چارچوب سازمان ملل متحد در مورد تغییر اقلیم (UNFCCC) ابعاد متعددی از مهاجرت اقلیمی همچنان کمتر بررسی شده‌اند. از جمله این حوزه‌های مغفول می‌توان به فقدان تعاریف دقیق مفهومی، چالش‌های حقوقی و سیاستی، چارچوب نظری منسجم و ابعاد انسانی و نهادی مهاجرت اقلیمی نظیر آسیب‌پذیری اجتماعی، تبعیض جنسیتی و عدالت اقلیمی و مهاجرت سالمندان و گروه‌های آسیب‌پذیر اشاره کرد. پرداختن به این خلأهای پژوهشی می‌تواند مسیرهای آینده تحقیقات را روشن ساخته و بنیانی علمی برای سیاست‌گذاری‌های مؤثر در حوزه مهاجرت اقلیمی فراهم آورد.

مفاهیم و تعاریف

در ادبیات علمی مرتبط با مخاطرات اقلیمی و مهاجرت طیف وسیعی از مفاهیم و اصطلاحات از جمله مهاجرت اقلیمی، مهاجرت محیطی، تحرک اقلیمی، پناهندگان اقلیمی، مهاجرت تحمیلی یا القاشده محیطی و حتی پناهندگان بوم‌شناختی به کار گرفته شده است. هر یک از این اصطلاح‌ها دارای دامنه معنایی و بار مفهومی خاص خود هستند. برای نمونه، مهاجرت اقلیمی بیشتر به جابه‌جایی‌های ناشی از مخاطرات اقلیمی مانند خشکسالی، سیل یا طوفان‌های گردوغبار اشاره دارد؛ در حالی‌که مهاجرت محیطی گستره وسیع‌تری از عوامل از جمله بلایای طبیعی مانند زلزله یا حتی پیامد فعالیت‌های انسانی همچون آلودگی و تخریب سرزمین را دربرمی‌گیرد. در سال‌های اخیر مفهوم تحرک اقلیمی به‌عنوان مفهومی جامع‌تر مطرح شده است که نه‌تنها مهاجرت، آوارگی و جابه‌جایی برنامه‌ریزی‌شده را شامل می‌شود، بلکه وضعیت بی‌تحرکی در برابر تهدیدهای اقلیمی را نیز شامل می‌شود. این دیدگاه منعطف در سطح بین‌المللی، از سوی نهادهایی چون سازمان بین‌المللی مهاجرت (IOM) کمیساریای عالی پناهندگان سازمان ملل و هیئت بین‌الدولی تغییر اقلیم مورد پذیرش قرار گرفته است (Boas et al., 2022; Szaboova et al., 2023).

با وجود این تلاش‌ها، فقدان تعریف دقیق و اجماع نظر جهانی در خصوص مفاهیم فوق، موجب بروز پیچیدگی‌های قابل‌توجهی در تحلیل‌های علمی، تفسیر نتایج پژوهش‌ها و همچنین تدوین سیاست‌های کارآمد شده است. در واقع، گفتمان محدود اما پرمحتوایی درباره تبیین معنای مهاجرت اقلیمی وجود دارد(Berchin et al. 2017) ، اما تعاریف موجود اغلب هم‌پوشانی داشته و یا در بسترهای مختلف به‌گونه‌ای متفاوت تعبیر شده‌اند. بخش عمده‌ای از این تعاریف بر جابه‌جایی ناشی از رویدادهای اقلیمی شدید، تخریب تدریجی محیط‌زیست (مانند خشکسالی یا شوری خاک) یا آسیب‌های گسترده به زیرساخت‌ها متمرکز هستند (Adamo 2010 ; Detraz and Windsor, 2014 ; Durand-Delacre et al, 2021).

چالش‌های حقوقی و سیاستی

یکی از مباحث چالش‌برانگیز در حوزه مهاجرت اقلیمی نحوه تعریف مهاجر اقلیمی به‌عنوان یک مفهوم و یک اصطلاح است. از منظر حقوق بین‌الملل نیز، همچنان تعریف واحد و مورد توافقی برای مهاجران اقلیمی وجود ندارد. اصطلاح پناهجویان محیطی نخستین بار در اواخر دهه ۱۹۸۰ توسط برنامه محیط‌زیست سازمان ملل متحد(UNEP) مطرح شد که به افرادی اطلاق می‌شد که سرزمین‌شان دیگر توان تأمین معیشت ان‌ها را نداشت و ناگزیر به ترک محل سکونت خود می‌شدند. با این حال، بسیاری از صاحب‌نظران با کاربرد اصطلاح پناهجو مخالفت کرده و استفاده از واژه‌هایی نظیر افراد جابه‌جا شده

اقلیمی یا مهاجران اقلیمی را ترجیح داده‌اند. واژه مهاجر نیز خالی از اشکال نیست، چراکه دلالت بر انتخاب و ترجیح فردی دارد، در حالی‌که در بیشتر موارد مهاجرت اقلیمی ناشی از اجبار است.

تمایز میان مهاجر اقلیمی و پناهنده نیز اهمیت اساسی دارد. بر اساس کنوانسیون ۱۹۵۱ ژنو و پروتکل ۱۹۶۷، پناهنده کسی است که به دلیل ترس موجه از آزار و تعقیب بر مبنای نژاد، مذهب، ملیت، عضویت در گروهی اجتماعی یا عقاید سیاسی کشور خود را ترک کرده است. این تعریف، شامل افرادی که صرفاً در اثر عوامل اقلیمی و محیطی جابه‌جا شده‌اند نمی‌شود. بنابراین، میلیون‌ها نفر که در نتیجه مخاطرات اقلیمی ناگزیر از ترک محل سکونت خود می‌شوند، از حمایت‌های حقوقی و قانونی بی‌بهره مانده‌اند. ابهام مفهومی در این حوزه عمدتاً ناشی از دو عامل است: نخست، دشواری در تفکیک محرک‌های اقلیمی از سایر عوامل اقتصادی، سیاسی و اجتماعی مؤثر بر مهاجرت؛ و دوم، پیامدهای نهادی و حقوقی تعریف رسمی این نوع مهاجرت که به‌طور مستقیم بر مسئولیت دولت‌ها و سازمان‌های بین‌المللی اثرگذار است. در مجموع، تمایزگذاری دقیق میان مهاجرت اقلیمی و مهاجرت محیطی و نیز شناسایی جایگاه حقوقی مستقل برای افرادی که به دلیل تغییرات اقلیمی جابه‌جا می‌شوند، ضرورتی انکارناپذیر است. چنین کاری مستلزم همکاری‌های بین‌المللی، بازنگری نظری و تدوین چارچوبی جامع برای پاسخگویی به ابعاد پیچیده و فزاینده این پدیده خواهد بود (McKanders, 2024).

چارچوب نظری

پژوهش‌ها مهاجرت از دیدگاه‌های نظری و رویکردهای چندرشته‌ای بهره گرفته است و حوزه‌هایی مانند جغرافیا، اقتصاد، جامعه‌شناسی و علوم سیاسی را در خود ادغام کرده است (Boas et al., 2019). در سال‌های اخیر نظریه‌های مرتبط با مهاجرت اقلیمی به دلیل افزایش آگاهی از تأثیر تغییرات محیطی بر تحرک انسانی پدیدار شده اند. چنین چارچوب‌هایی تلاش دارند تعامل پیچیده میان عوامل اقتصادی، محیطی و اجتماعی را توضیح دهند. پژوهش‌ها مهاجرت یکی از حوزه‌های پژوهشی میان‌رشته‌ای است که با بهره‌گیری از دیدگاه‌های نظری متنوع، تلاش می‌کند به پرسش‌های پیچیده درباره تحرک انسانی پاسخ دهد. مهاجرت اقلیمی به عنوان یکی از زیرشاخه‌های پژوهش‌ها مهاجرت، در تلاش است تا ارتباطات و تعاملات میان تغییرات محیطی و فرایندهای اجتماعی، اقتصادی و سیاسی را مورد بررسی قرار دهد. این چارچوب مفهومی، بر مبنای نظریه‌های متعددی استوار است که هر کدام از زاویه‌ای خاص به موضوع مهاجرت اقلیمی می‌نگرند. نظریه‌های اقتصادی بر اهمیت انگیزه‌های مالی و معیشتی در تصمیم‌گیری‌های مهاجرتی تأکید دارند (Stark and Bloom,2021) در حالی که نظریه‌های جغرافیایی به مکان‌محوری و تأثیر تغییرات فیزیکی محیط بر تحرک جمعیت می‌پردازند. از سوی دیگر، جامعه‌شناسی به تحلیل روابط اجتماعی، شبکه‌های انسانی و نابرابری‌های ساختاری در فرآیند مهاجرت توجه دارد (Tacoli, 2009). علوم سیاسی نیز به بررسی نقش سیاست‌ها، قوانین و روابط بین‌المللی در مدیریت یا تشدید مهاجرت ناشی از بحران‌های اقلیمی می‌پردازد. در سال‌های اخیر، ظهور نظریه‌های نوینی که به طور خاص بر مهاجرت اقلیمی تمرکز دارند، نشان‌دهنده افزایش آگاهی جهانی از تأثیر تغییرات محیطی بر الگوهای مهاجرت است. این نظریه‌ها سعی دارند تا پیچیدگی‌های میان عوامل محیطی، اقتصادی و اجتماعی را توضیح داده و روابط متقابل آن‌ها را در بسترهای محلی و جهانی بررسی کنند. از این رو، چارچوب‌های مفهومی در پژوهش‌ها مهاجرت اقلیمی به محققان کمک می‌کنند تا نه تنها دلایل و عوامل مهاجرت را بهتر درک کنند، بلکه پیامدها و راهبردهای مدیریت آن را نیز پیشنهاد دهند. این چارچوب‌های نظری نقش مهمی در طراحی مدل‌های سیاست‌گذاری و توسعه راه‌حل‌های پایدار برای مواجهه با چالش‌های ناشی از مهاجرت

اقلیمی ایفا می‌کنند. توجه به چندبعدی بودن این پدیده و بهره‌گیری از دیدگاه‌های میان‌رشته‌ای، به پژوهشگران این امکان را می‌دهد که به شکلی جامع‌تر و دقیق‌تر به تحلیل و پیش‌بینی الگوهای مهاجرت بپردازند. در مجموع، بازاندیشی در نظریه‌های مهاجرت با درنظر گرفتن پیچیدگی و چندعلّتی بودن پدیده‌های اقلیمی، امروزه ضرورتی انکارناپذیر برای علوم اجتماعی، پژوهش‌ها اقلیمی و سیاست‌گذاری‌های بین‌المللی به شمار می‌آید. عبور از تقلیل‌گرایی مفهومی و توجه به زمینه‌های تاریخی، اجتماعی، فرهنگی و نهادی در تحلیل مهاجرت‌های محیطی، پیش‌شرطی اساسی برای نظریه‌پردازی منسجم و تولید دانش کاربردی در این حوزه است.

جنبه‌های انسانی و اجتماعی مهاجرت اقلیمی

با وجود رشد پژوهش‌ها در حوزه مهاجرت اقلیمی، ابعاد انسانی و اجتماعی این پدیده به اندازه کافی مورد توجه قرار نگرفته‌اند. بخش عمده ادبیات موجود عمدتاً بر جابه‌جایی و پیامدهای اقتصادی تمرکز دارد و مسائل مرتبط با سلامت جسمی و روانی مهاجران، آسیب‌پذیری جمعیت‌ها، تبعیض جنسیتی و پاسخ‌های جوامع محلی کمتر بررسی شده‌اند. پژوهش‌ها نشان می‌دهند که کارگران مهاجر در شهرهای آلوده به‌ویژه پس از جابه‌جایی ناشی از مخاطرات اقلیمی با افزایش بیماری‌های تنفسی و مشکلات بهداشتی مواجه هستند و فشارهای روانی ناشی از دست دادن خانه و زمین می‌تواند اضطراب، افسردگی و آسیب‌های روانی را تشدید کند. همچنین کمبود خدمات بهداشتی در کمپ‌های موقت مهاجران، به‌ویژه، خطر شیوع بیماری‌های واگیردار را افزایش می‌دهد (Sneddon, 2025).

خانوارهایی که منابع محدود و ظرفیت تطبیق پایینی دارند، به‌طور خاص در معرض پیامدهای مخاطرات اقلیمی و بلایای طبیعی قرار دارند و تصمیمات مربوط به مهاجرت عمدتاً تحت تأثیر نابرابری‌های اقتصادی، ناامنی اجتماعی و عدم‌قطعیت‌های اقلیمی اتخاذ می‌شوند(Majeed, 2023; Ullah et al., 2019; Habiba, 2023; Ullah et al., 2024). اثرات مخاطرات اقلیمی نیز از نظر جنسیتی بی‌طرف نیست و گروه‌های فقیر، حاشیه‌نشین و به‌ویژه زنان به دلیل ظرفیت پایین انطباق و نقش اجتماعی-فرهنگی ویژه خود، بیش از سایرین آسیب می‌بینند. زنان عموماً دسترسی محدودی به منابع طبیعی و درآمد پایدار دارند و از وضعیت سلامت و آموزش پایین‌تری برخوردارند. بنابراین در مواجهه با مخاطرات اقلیمی آسیب‌پذیرتر هستند. پیامدهای خاص برای زنان شامل ناامنی‌های اجتماعی و اختلالات روانی نظیر اضطراب و استرس پس از مخاطره است (Devi, 2022; Abbasi et al., 2021; Ullah et al., 2024) .

علاوه بر این، جوامع بومی که به منابع طبیعی برای معیشت وابستگی مستقیم دارند، به‌ویژه آسیب‌پذیر هستند و نیازمند توجه ویژه سیاست‌گذاران برای تضمین حق تعیین سرنوشت، حفاظت از زمین و منابع طبیعی و حفظ دانش و شیوه‌های سنتی خود می‌باشند. پژوهش‌ها نشان می‌دهند که مشارکت فعال این جوامع و ادغام نظام‌های دانش بومی در طراحی و اجرای سیاست‌ها و راهبردهای انطباق اقلیمی رویکرد کاهش آسیب‌پذیری و ارائه راهکارهای متناسب با فرهنگ محلی است (Cajete, 2020; Shafie and Islam, 2017).

بنابراین، تقویت توجه به جنبه‌های انسانی و اجتماعی مهاجرت اقلیمی، از جمله سلامت جسمی و روانی، عدالت جنسیتی، حقوق و هویت جوامع بومی و بهره‌گیری از دانش محلی، برای تدوین سیاست‌ها و برنامه‌های مؤثر انطباق اقلیمی امری

ضروری است. توجه به این رویکرد میان‌رشته‌ای در پژوهش‌ها می‌تواند به تولید دانش جامع‌تر، کاهش آسیب‌ها و بهبود ظرفیت‌های انطباق در سطح خانوار و جامعه منجر شود.

عدالت اقلیمی

عدالت اقلیمی به‌مثابه یک پارادایم تحول‌آفرین، ابعاد اخلاقی، اجتماعی و سیاسی بحران جهانی تغییر اقلیم را در هم می‌آمیزد و آن را از سطح یک مسئله صرفاً محیطی به ضرورتی اخلاقی و سیاسی ارتقا می‌دهد (Fosado Centeno, 2020 ؛ Dolšak and Prakash, 2021).این رویکرد بر این مبنا استوار است که پیامدهای مخاطرات اقلیمی به‌طور یکنواخت توزیع نمی‌شوند، بلکه به‌گونه‌ای نامتناسب جمعیت‌های حاشیه‌ای و آسیب‌پذیر را تحت فشار قرار داده و بدین ترتیب نابرابری‌ها و بی‌عدالتی‌های تاریخی و ساختاری را تشدید می‌کنند(Alatorre et., 2024 ؛Pearson et al., 2021.).

در بنیان نظری ، عدالت اقلیمی خواستار توزیع عادلانه منافع مرتبط با سیاست‌ها و اقدامات اقلیمی است. تحقق این امر مستلزم به‌رسمیت شناختن مسئولیت‌های تاریخی در قبال انتشار گازهای گلخانه‌ای، توجه به آسیب‌پذیری‌های کنونی و در نظر گرفتن منافع نسل‌های آینده است(Buendía and Ortega, 2018) . Pardo) از این منظر، بررسی مخاطرات اقلیمی و تغییر اقلیم در چارچوب عدالت اقلیمی نه‌تنها نقدی بنیادین بر ساختارهای قدرت، نظام‌های اقتصادی و هنجارهای اجتماعی تداوم‌بخش تخریب محیط و بازتولیدکننده نابرابری‌های اجتماعی ارائه می‌دهد، بلکه با اتکا بر مبانی فلسفی جهان‌وطنی ــ که عدالت را به همه افراد در سطح جهانی متعلق می‌داند ــ بنیانی نظری برای دفاع از اقدام اقلیمی به‌عنوان ضرورتی در راستای عدالت بین‌المللی فراهم می‌آورد (Resnik, 2022 ; Svarstad, 2021 ; Almeida, 2019 ;Moellendorf , 2015).

عدالت اقلیمی به‌ویژه در دو سطح اهمیت دارد: نخست، به‌عنوان ابزاری تحلیلی برای ارزیابی سیاست‌های اقلیمی با هدف جلوگیری از بازتولید یا ایجاد نابرابری‌های جدید (Ding et al., 2020) دوم، به‌عنوان چارچوبی عملی برای تقویت نظام‌های حقوقی- محیطی، اصلاح روابط حقوقی محیطی و ارتقای اجرای مؤثر حقوق بین‌الملل محیط.

از منظر پژوهشی، این امر نیازمند رویکردی میان‌رشته‌ای است که بتواند پیوندهای پیچیده میان مخاطرات اقلیمی، نابرابری اجتماعی و ساختارهای قدرت را آشکار سازد (Kaijser and Kronsell, 2013 ; Dolšak and Prakash, 2021; Zimm et al, 2024).

در دو دهه گذشته تعداد پژوهش‌های علمی درباره تغییر اقلیم به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. بنا بر گزارش هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم از سال ۲۰۲۲ تاکنون بیش از ۹۰ هزار سند علمی در این حوزه منتشر شده است که بیشتر این اسناد بر پیامدهای گازهای گلخانه‌ای و شیوه‌ها و تکنیک‌های کاهش و سازگاری با تغییر اقلیم تأکید دارند (Ogle, 2014 ; Karamidehkordi et al, 2023; Pathak, 2023). چارچوب عدالت اقلیمی موضوعاتی همچون تخصیص نابرابر منابع، توزیع مسئولیت‌ها، تقسیم هزینه‌ها، مزایای سیاست‌ها و حل مسائل مربوط به پیامدهای مخاطرات اقلیمی را دربرمی‌گیرد (Alves and Mariano, 2018; Özyavuz, 2023). از این رو، بازشکل‌دهی اولویت‌های عدالت اقلیمی ضرورتی انکارناپذیر است. توجه

به بی‌عدالتی‌های تاریخی، اولویت‌بخشی به دانش بومی، به پر کردن خلأهای موجود در ادبیات کنونی یاری رساند و مسیر دستیابی به جهانی عادلانه‌تر و پایدارتر را هموار کند (Guevara, 2025).

چالش‌های پژوهشی آینده

بخش عمده‌ای از پژوهش‌های موجود در زمینه مهاجرت اقلیمی بر این موضوع متمرکز بوده‌اند که مخاطرات اقلیمی چگونه باعث شکل‌گیری جریان‌های مهاجرت و جابه‌جایی جمعیت می شود. بااین‌حال، بخش قابل‌توجهی از این پژوهش‌ها با رویکردی جبرگرایانه به پدیده نگریسته و زمینه‌های تاریخی و اجتماعی را به‌طور کامل بازتاب نداده‌اند (Simpson et al., 2024). ترکیب اهمیت روزافزون تحرک اقلیمی با چارچوب‌های پژوهشی و سیاستی که بعضاً به‌صورت ناآگاهانه در حال شکل‌دهی به گفتمان‌های موجود هستند، ضرورت بازاندیشی مفهومی، توسعه پژوهش‌های تجربی عمیق‌تر و بازنگری انتقادی را برجسته می‌سازد. فراتر از این ملاحظات، بررسی مهاجرت اقلیمی نشان می‌دهد که طیفی از شکاف‌های دانشی و چالش‌های بالقوه آینده نیازمند توجه دقیق‌تر هستند. از تحولات کلیدی دهه اخیر تغییر رویکرد از تلقی تحرک به‌عنوان یک تهدید به شناسایی آن به‌عنوان یک فرصت سازگاری بوده است. در این راستا، تحقیقات بیشتری باید به چگونگی ارتقای ظرفیت‌های سازگاری از طریق مهاجرت و نیز به نقش تحرک در ایجاد پیوندهای تقویت‌شده میان مناطق روستایی و شهری بپردازند. چنین بینش‌هایی می‌تواند به تدوین سیاست‌های یکپارچه‌تری منجر شود که حوزه‌هایی همچون برنامه‌ریزی فضایی، خدمات اجتماعی انعطاف‌پذیر، شبکه‌های ایمنی و همکاری‌های میان‌بخشی در سیستم‌های غذایی و امنیت غذایی در مناطق روستایی و شهری را پوشش دهند (Karlsson, 2021).

از سوی دیگر، تشدید پیامدهای مخاطرات اقلیمی بر جابه‌جایی و ماندگاری اجباری یا داوطلبانه جمعیت‌ها، همراه با گسترش روایت‌های بعضاً نادرست اما اثرگذار پیرامون تحرک، اهمیت پژوهش‌های ترکیبی، چندسطحی و انتقادی در این حوزه را بیش‌ازپیش آشکار می‌سازد. مرور گزارش ششم هیئت بین‌الدولی تغییر اقلیم نیز تأکید دارد که یکی از اولویت‌های اصلی آینده، روشن‌سازی شرایطی است که در آن تحرک انسانی می‌تواند به‌مثابه یک گزینه مؤثر برای سازگاری عمل کند، در عین حال که پیامدهای چندبعدی آن ــ شامل هم‌زمانی آسیب‌ها، خسارت‌ها و منافع ــ به‌طور جامع‌تر درک شود (Simpson et al., 2024).

افزون براین پژوهش‌های آینده باید بر این مسئله تمرکز کنند که حمایت‌های سازگاری مرتبط با تحرک اقلیمی چگونه می‌تواند به ارتقای اهداف توسعه پایدار به‌ویژه هدف شانزدهم (جوامع صلح‌آمیز، عادلانه و فراگیر) یاری رساند. ارتباط تحرک با فرآیندهای صلح‌سازی، تقویت انسجام اجتماعی و پیشگیری از منازعات از جمله ابعاد کلیدی است که تاکنون کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در این میان، چارچوب‌بندی‌های سیاستی و برداشت‌های عمومی در جوامع و کشورهای میزبان به‌عنوان تعیین‌کننده‌های اصلی موفقیت مهاجرت اقلیمی در قالب یک استراتژی سازگارانه عمل می‌کنند. در نهایت، به‌عنوان یک حوزه میان‌رشته‌ای، پژوهش در زمینه مهاجرت اقلیمی با خطر نادیده‌گرفتن تخصص‌های رشته‌ای مواجه است. غلبه بر چالش‌های ایدئولوژیک، رشته‌ای و جغرافیایی که بر تولید دانش در این حوزه سایه می‌اندازند، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر است. بدین ترتیب، انسجام‌بخشی میان پژوهش، سیاست و عمل و ایجاد رویکردهای ترکیبی و میان‌رشته‌ای می‌تواند مسیر توسعه یک ادبیات منسجم‌تر و سیاست‌گذاری مؤثرتر در زمینه مهاجرت اقلیمی را هموار سازد.

نتیجه‌گیری

نتیجه مرور ادبیات و مباحث مطرح‌شده نشان می‌دهد که مهاجرت اقلیمی پدیده‌ای چندبعدی، پیچیده و پویاست که نه‌تنها از مخاطرات محیطی و اقلیمی متأثر می‌شود، بلکه با عوامل اجتماعی، اقتصادی، نهادی و سیاسی نیز در هم تنیده است. در حالی‌که پژوهش‌های موجود توانسته‌اند بخش‌هایی از این پدیده را روشن سازند اما همچنان خلأهای مفهومی، نظری و سیاستی گسترده‌ای از جمله فقدان اجماع بر سر تعریف دقیق، ابهام در جایگاه حقوقی مهاجران اقلیمی، کم‌توجهی به ابعاد انسانی مانند سلامت روان، جنسیت، عدالت اقلیمی و حقوق جوامع بومی و نیز چالش‌های روش‌شناختی در ثبت و تحلیل داده‌ها وجود دارد. در چنین شرایطی، آینده این حوزه پژوهشی نیازمند رویکردی انتقادی، میان‌رشته‌ای و ترکیبی است که از یک‌سو بتواند ابعاد اجتماعی،انسانی، حقوقی و اخلاقی مهاجرت اقلیمی را پررنگ‌تر سازد و از سوی دیگر، نقش آن را به‌عنوان فرصت یا تهدیدی برای سازگاری و توسعه پایدار بازتعریف کند. توجه به ظرفیت‌های انطباقی مهاجران، ادغام دانش بومی در سیاست‌ها، ارتقای عدالت اقلیمی و پیوند زدن تحرک جمعیت با فرآیندهای صلح و انسجام اجتماعی، مسیرهایی کلیدی برای پژوهش‌ها و سیاست‌گذاری‌های آینده محسوب می‌شوند. از این رهگذر، می‌توان چارچوبی علمی و عملی فراهم آورد که نه‌تنها پاسخگوی نیازهای جوامع آسیب‌پذیر باشد، بلکه بستری برای تحقق توسعه‌ای عادلانه و تاب‌آور در برابر بحران اقلیمی جهانی فراهم آورد.

منابع

Abbasi, M. S., Zahid, R. J., Ansari, D. H., & Naeem, K. (2021). Climate induced migration among women: stories from Muzaffargarh and Tharparkar districts Pakistan.

Abid, M. (2016). *Climate Change Impacts and Adaptation in the Agricultural Sector of Pakistan-Socioeconomic and Geographical Dimensions* (Doctoral dissertation, Staats-und Universitätsbibliothek Hamburg Carl von Ossietzky).

Achieng, M., El Fadil, A., & Righa, E. (2020). What is wrong with the narrative on African migration. *Africa migration report: Challenging the narrative*, 1-14.

Adamo, S. B. (2010). Environmental migration and cities in the context of global environmental change. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, *2*(3), 161-165.

Alatorre, J. E., Rezza, L., Lorenzo, S., & Gramkow, C. (2024). Distributional implications of climate change and policy recommendations for an inclusive, just and sustainable transition. *Libros y Documentos Institucionales*.

Almeida, P. (2022). Climate justice and sustained transnational mobilization. In *Economics and Climate Emergency* (pp. 329-335). Routledge.

Alves, M. W. F. M., & Mariano, E. B. (2018). Climate justice and human development: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, *202*, 360-375.

Ayeb-Karlsson, S. (2018). *When the disaster strikes:(Im) mobility decision-making in the context of environmental shocks and climate change impacts* (Doctoral dissertation, University of Sussex).

Banu, N., & Fazal, S. (2025). Climate change, livelihood crisis and resilience: an introduction. In *Livelihoods and Well-Being in the era of climate change: risk to resilience across India* (pp. 3-18). Cham: Springer Nature Switzerland.

Bauer, T., & Zimmermann, K. (2018). Causes of international migration: A survey. In *Crossing borders* (pp. 111-144). Routledge.

Bedasa, Y., & Deksisa, K. (2024). Food insecurity in East Africa: An integrated strategy to address climate change impact and violence conflict. *Journal of Agriculture and Food Research*, *15*, 100978.

Berchin, I. I., Valduga, I. B., Garcia, J., & De Andrade, J. B. S. O. (2017). Climate change and forced migrations: An effort towards recognizing climate refugees. *Geoforum*, *84*, 147-150.

Bhattacharyya, G. (2018). *Rethinking racial capitalism: Questions of reproduction and survival*. Rowman & Littlefield.

Boas, I., Wiegel, H., Farbotko, C., Warner, J., & Sheller, M. (2022). Climate mobilities: Migration, im/mobilities and mobility regimes in a changing climate. *Journal of Ethnic and Migration Studies*, *48*(14), 3365-3379.

Cajete, G. A. (2020). Indigenous science, climate change, and indigenous community building: A framework of foundational perspectives for indigenous community resilience and revitalization. *Sustainability*, *12*(22), 9569.

Carling, J., & Collins, F. (2020). Introduction: Aspiration, desire and drivers of migration. In *Aspiration, desire and the drivers of migration* (pp. 1-18). Routledge.

Detraz, N., & Windsor, L. (2014). Evaluating climate migration: Population movement, insecurity and gender. *International Feminist Journal of Politics*, *16*(1), 127-146.

Devi, S. (2022). Pakistan floods: impact on food security and health systems. *The Lancet*, *400*(10355), 799-800.

Ding, G., Liu, G., & Chen, Y. (2020). A study on the theory of climate justice in international environmental law. *Scholars International Journal of Law, Crime and Justice". Dubai: Scholars Middle East Publisher*, *3*(1), 8.

Dolšak, N., & Prakash, A. (2022). Three faces of climate justice. *Annual Review of Political Science*, *25*(1), 283-301.

Durand-Delacre, D., Bettini, G., Nash, S. L., Sterly, H., Gioli, G., Hut, E., ... & Hulme, M. (2021). Climate migration is about people, not numbers.

Fosado Centeno, E. (2020). The socio-political construction of climate change: Looking for paths to sustainability and gender justice. *Sustainability*, *12*(8), 3382.

Guevara-Cue, G. (2025). Climate justice: A view from the Latin American context. *Environmental Science & Policy*, *171*, 104156.

Guevara-Cue, G. (2025). Climate justice: A view from the Latin American context. *Environmental Science & Policy*, *171*, 104156.

Habib, N., Alauddin, M., & Cramb, R. (2022). What defines livelihood vulnerability to climate change in rain-fed, rural regions? A qualitative study of men's and women's vulnerability to climate change in Pakistan's Punjab. *Cogent Social Sciences*, *8*(1), 2054152.

Habiba, U. (2023). *Climate Change-Induced Migration and Social Injustice among Women in the coastal zones of Bangladesh* (Master's thesis).

Hunter, L. M., Luna, J. K., & Norton, R. M. (2015). Environmental dimensions of migration. *Annual review of sociology*, *41*(1), 377-397

IDMC (2024). Global Report on Internal Displacemen. Available at: https://www.internal – displacement.org/global-report/grid2024/.

IDMC (2025). Global Report on Internal Displacemen. Available at: https://www.internal-displacement.org/global-report/grid2025/

IPCC Climate Change 2023: impacts, adaptation and vulnerability Intergov. Panel Clim. Change (2023)

Iqbal, M., Rabbani, A., Haq, F., & Bhimani, S. (2022). The floods of 2022: Economic and health crisis hits Pakistan. *Annals of Medicine and Surgery*, *84*, 104800.

Javed, M. S., Nisar, U., Warsi, S. H., Billah, M. M., & Karkkulainen, E. A. (2024). Mapping The Disparities Between Urban And Rural Areas In The Global Attainment Of Sustainable Development Goals, Economic And Social Aspects Of Global Rural-Urban Migration. *Educational Administration: Theory And Practice*, *30*(6), 2052-2064.

Kaijser, A., & Kronsell, A. (2014). Climate change through the lens of intersectionality. *Environmental politics*, *23*(3), 417-433.

Karamidehkordi, E., Sadati, S. A. H., Tajvar, Y., & Mirmousavi, S. H. (2023). Climate change vulnerability and resilience strategies for citrus farmers. *Environmental and Sustainability Indicators*, *20*, 100317.

Majeed, G. (2023). Good governance, institutional capacity and challenges: Case study of floods in Pakistan. *Orient Research Journal of Social Sciences*, *8*(1), 01-08.

McKanders, K. (2024). Climate Migration. *Human Rights*, *50*(1/2).

Moellendorf, D. (2015). Climate change justice. *Philosophy Compass*, *10*(3), 173-186.

Mustak, S. (2022). Climate change and disaster-induced displacement in the global south: A review. *Climate change, disaster and adaptations: Contextualising human responses to ecological change*, 107-120.

Ogle, S. M., Olander, L., Wollenberg, L., Rosenstock, T., Tubiello, F., Paustian, K., ... & Smith, P. (2014). Reducing greenhouse gas emissions and adapting agricultural management for climate change in developing countries: providing the basis for action. *Global change biology*, *20*(1), 1-6.

Okolie, A. M., Prince, O. C., & Okechukwu, G. P. U. (2024). GLOBAL SECURITY CHALLENGES AND SUSTAINABLE DEVELOPMENT IN AFRICA: AN ANALYSIS OF CLIMATE-CHANGE-AS-A-NEW SECURITY-THREAT PARADIGM. *ESCET Journal of Educational Research and Policy Studies*, *1*(1).

Özyavuz, M. (2023). *Sustainability, Conservation and Ecology in Spatial Planning and Design*.

Pardo Buendía, M., & Ortega, J. (2018). Justicia ambiental y justicia climática: el camino lento pero sin retorno, hacia el desarrollo sostenible justo.

Pathak, H. (2023). Impact, adaptation, and mitigation of climate change in Indian agriculture. *Environmental Monitoring and Assessment*, *195*(1), 52.

Pearson, A. R., Tsai, C. G., & Clayton, S. (2021). Ethics, morality, and the psychology of climate justice. *Current Opinion in Psychology*, *42*, 36-42.

Prosper, A., & Khan, A. (2018). Migration in climate change hotspots: opportunities and challenges for adaptation.

Resnik, D. B. (2022). Environmental justice and climate change policies. *Bioethics*, *36*(7), 735-741.

Rigaud, K. K., De Sherbinin, A., Jones, B., Bergmann, J., Clement, V., Ober, K. ... & Midgley, A. (2018). Groundswell: Preparing for internal climate migration.

Shafie, H., Islam, Z., & Mahmood, R. (2017). Anthropology, Adaptation and Resilience: Reinventing Cultural Perspective in Climate Change Regime. *CULTURE, ADAPTATION AND RESILIENCE*, 1.

Sikorsky, E., Femia, F., & Hugh, B. (2023). Climate change and fragility: improving early warning and climate-proofing development and conflict interventions. In *Handbook of Fragile States* (pp. 206-221). Edward Elgar Publishing.

Simpson, N. P., Mach, K. J., Tebboth, M. G., Gilmore, E. A., Siders, A. R., Holden, P., ... & Trisos, C. H. (2024). Research priorities for climate mobility. *One Earth*, *7*(4), 589-607.
Sneddon, S. (2025). Breathing Problems: The Unequal Impact of Air Pollution on Migrant Workers during the COVID-19 Pandemic in India. *Global Perspectives*, *6*(1), 143501.
Stavi, I., Paschalidou, A., Kyriazopoulos, A. P., Halbac-Cotoara-Zamfir, R., Siad, S. M., Suska-Malawska, M., ... & Ficko, A. (2021). Multidimensional food security nexus in drylands under the slow onset effects of climate change. *Land*, *10*(12), 1350.
Szaboova, L., Adger, W. N., de Campos, R. S., Maharjan, A., Sakdapolrak, P., Sterly, H., ... & Abu, M. (2023). Evaluating migration as successful adaptation to climate change: Trade-offs in well-being, equity, and sustainability. *One Earth*, *6*(6), 620-631.
Ullah, W., Dong, H., Shah, A. A., Alotaibi, B. A., Khursid, M., & Nihei, T. (2024). Unseen suffering: Social injustice among women during climate-induced migration in Pakistan. *Climate Risk Management*, *46*, 100663.
Ullah, W., Nafees, M., Khurshid, M., & Nihei, T. (2019). Assessing farmers' perspectives on climate change for effective farm-level adaptation measures in Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan. *Environmental monitoring and assessment*, *191*(9), 547.
Williams, A. P., Cook, E. R., Smerdon, J. E., Cook, B. I., Abatzoglou, J. T., Bolles, K., ... & Livneh, B. (2020). Large contribution from anthropogenic warming to an emerging North American megadrought. *Science*, *368*(6488), 314-318.
Yang, H., Krantzberg, G., Dong, X., & Hu, X. (2023). Environmental outcomes of climate migration and local governance: an empirical study of Ontario. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, *15*(3), 371-390.
Zimm, C., Mintz-Woo, K., Brutschin, E., Hanger-Kopp, S., Hoffmann, R., Kikstra, J. S., ... & Schinko, T. (2024). Justice considerations in climate research. *Nature Climate Change*, *14*(1), 22-30.

Climate Migration: Underexplored Dimensions and Future Research Challenges

Maryam Edalat Moghadam[1], Mostafa Karimi[2]

PhD Student of Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran
Associate Professor of Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran
* Corresponding author: Mostafakarimi.a@ut.ac.ir

Abstract
Climate-induced migration has emerged as a critical challenge at the nexus of climatic hazards, human mobility, and global governance. With climate change as today's overarching global hazard, increasing attention is directed toward population displacement triggered by climatic hazards and their broader

environmental consequences. While much of the existing scholarship highlights the influence of climatic factors on migration flows, many studies adopt a deterministic lens and fail to adequately account for historical, social, and political contexts. This article reviews current research and identifies key conceptual, theoretical, and policy gaps, including the absence of consensus on the definition of "climate migrant," uncertainties surrounding legal recognition, limited attention to human dimensions and climate justice, and persisting methodological challenges. It argues that future research should adopt interdisciplinary, integrative, and critical perspectives that move beyond threat-based narratives, recognizing migration as both a potential risk and an adaptive opportunity depending on local contexts. Incorporating indigenous knowledge, strengthening adaptive capacities, and addressing justice and social cohesion are essential steps toward developing more effective scientific and policy frameworks to address the impacts of climate change

Keywords: Population mobility, Climate change, Climate migrants, Climate justice.

سومین کنفرانس ملی آب و هواشناسی ایران (با محوریت تغییر اقلیم)
The 3rd National Conference on Climatology of Iran (Focusing on Climate Change)
ارومیه ۱۶ مهر ۱۴۰۴

آشکارسازی روند تغییرات اقلیمی در حوضه آبخیز دریاچه زریبار

سیداسعد حسینی[۱]، محمود هوشیار[۲]* ، ابراهیم مسگری[۳]

۱- دکتری اقلیم‌شناسی و کارشناس هواشناسی اداره کل هواشناسی استان کردستان
۲- استادیار گروه جغرافیا، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.
۳- دکتری آب و هواشناسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان

آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول (hooshyar@pnu.ac.ir)

چکیده

تغییرات در پارامترهای اقلیمی می‌تواند فرایندهای هیدرولوژیکی، کشاورزی، محیط زیست، بهداشت، صنعت و اقتصاد را تحت تاثیر قرار دهد و ارزیابی این تغییرات در حوضه‌های آبخیز، کمک فراوانی به چالش‌های مدیران و برنامه‌ریزان منابع آب خواهد کرد. لذا در این پژوهش به آشکارسازی روند تغییرات اقلیمی در حوضه آبخیز دریاچه زریبار در استان کردستان پرداخته شد. بدین منظور از داده‌های دما (کمینه، متوسط و بیشینه)، بارش، رطوبت نسبی و سرعت باد در دوره (۲۰۲۳-۱۹۹۲) و آزمون‌های من-کندال اصلاح شده و تخمینگر شیب سن بصورت آماری و گرافیکی استفاده شد. نتایج حاصل نشان داد که بارش در حوضه مورد مطالعه کاهش داشته است ولی این تغییرات کاهشی معنی‌دار نشده و از نوع نوسانات کوتاه مدت آب و هوایی در منطقه است. بررسی دما نیز نشان داد که مولفه‌های دمای کمینه، متوسط دما و دمای بیشینه دارای تغییرات افزایشی است که این تغییرات افزایشی در متوسط دما و دمای بیشینه در سطح ۰/۰۱ معنی‌دار شده است و تغییرات مذکور از نوع روند تغییرات اقلیمی در منطقه است. تغییرات سرعت باد و رطوبت نسبی نیز افزایشی است ولی این تغییرات همچون بارش و دمای کمینه از نوع نوسانات کوتاه مدت آب و هوایی در منطقه است.

کلید واژه‌ها : تغییر اقلیم، شیب سن، روند، دریاچه زریبار، من کندال

مقدمه

افزایش گازهای گلخانه‌ای در دوره‌های آتی و در نتیجه تشدید تغییرات پارامترهای اقلیمی، می‌تواند تأثیرات منفی زیادی را بر سیستم‌های مختلف از جمله منابع آب، محیط‌زیست، صنعت، بهداشت، کشاورزی و کلیه سیستم‌هایی که در کنش با سیستم اقلیم می‌باشند، بگذارد (IPCC, 2017). تبعات منفی این پدیده برای بشر تا آنجا می‌تواند مخرب باشد که در بین ده عامل تهدیدآمیز بشر در قرن بیست و یکم، مانند فقر، سلاح‌های هسته‌ای، کمبود غذا و غیره پدیده تغییر اقلیم مقام اول را به خود اختصاص داده است (IPCC, 2021). از طرفی با توجه به آن که منابع آب و شاخص‌های مختلف زیست محیطی در معرض خطرات ناشی از تغییرات اقلیم قرار دارند، بررسی تغییرات دما و بارش در سال‌های آینده می‌تواند راهگشای معضلاتی چون خشک‌سالی، سیلاب‌های ناگهانی، تبخیر زیاد و تخریب‌های زیست‌محیطی باشد (شائمی و حبیبی‌نوخندان، ۱۳۸۸). بنابراین بررسی روند و پیش‌نگری تغییرات اقلیمی می‌تواند زمینه‌ساز اتخاذ سیاست‌های راهبردی آینده مدیریت منابع مختلف زیست محیطی باشد، بدون توجه به این واقعیت که اقلیم در حال تغییر است، نمی‌توان برنامه‌ریزی واقع‌بینانه‌ای را در زمینه‌ی بهره‌برداری از منابع مختلف انجام داد (Hardy,2003). چرا که با تغییر تدریجی پارامترهای اقلیمی، شاخص‌های کشاورزی، زیست محیطی و همچنین منابع آب به دلیل وابستگی شدید به عوامل اقلیمی تحت تاثیر قرار می‌گیرند (Heydari et al., 2020).

تحقیقات متعددی در ارتباط با آشکارسازی روند تغییرات اقلیمی در سراسر دنیا صورت گرفته است که تقریباً قریب به اتفاق آنها معتقد به ظهور ناهنجاری‌ها و تغییرات در پارامترهای اقلیمی هستند. در این راستا حجازی زاده و همکاران (۲۰۲۲) به بررسی تغییرات زمانی و مکانی بارش‌های حدی با استفاده از آزمون من کندال در خاورمیانه و شمال آفریقا پرداختند. بر اساس نتایج با حرکت از شمال به جنوب و از غرب به شرق منطقه مورد مطالعه تمامی شاخص‌های حدی مورد بررسی دارای روند افزایشی هستند. بودا و همکاران (۲۰۲۴) به بررسی روند بارندگی‌های حدی فصل بهار در طول ۵۵ سال گذشته در پنسیلوانیا پرداختند. نتایج نشان داد نسبت شدت‌های بارش ۱۵ دقیقه‌ای به مجموع بارش روزانه مربوطه افزایش یافته است. حسینی و همکاران (۱۳۹۴) به بررسی روند تغییرات دما و بارش سالانه در یک دوره ۵۰ ساله (۲۰۱۴-۱۹۶۵) در حوضه آبخیز دریاچه ارومیه با استفاده از آزمون‌های من کندال و تخمین‌گر شیب سن[1] پرداختند. نتایج نشان داد که در حوضه مورد بررسی در طول دوره آماری مورد مطالعه، دما دارای روند افزایشی و بارش دارای روند کاهشی بوده است. جمالی و همکاران (۱۴۰۳) به ارزیابی روند شاخص‌های حدی دما و بارش در ایران در دوره ۱۹۵۱ تا ۲۰۲۰ پرداختند. نتایج نشان داد که در اکثر ایستگاه‌های کشور بارش کاهش و دما افزایش داشته است.

حوضه آبخیز دریاچه زریبار یکی از مناطق حساس و آسیب‌پذیر در مقابل تغییرات آب‌وهوایی می‌باشد. چرا که این منطقه دارای محیطی پر بارش و کاملاً سازگار با وضعیت موجود می‌باشد و از لحاظ منابع آبی و زیست محیطی نسبتاً غنی می‌باشد و هرگونه تغییرات اقلیمی که در این منطقه به وقوع بپیوندد اگر بدون پیش‌آگاهی و آینده‌پژوهی در این زمینه باشد می‌تواند بحران‌های زیست‌محیطی و امنیتی را در منطقه به وجود بیاورد. چراکه تغییرات آب‌وهوایی، در دسترس بودن آب

1 Sen's Slope Estimator

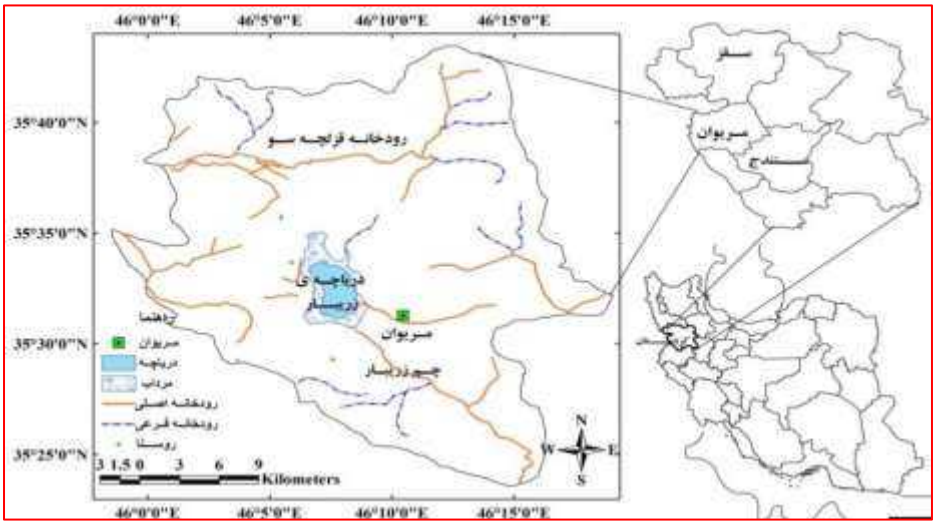
و غذا، مهاجرت انسان‌ها و حیوانات و رقابت برای منابع طبیعی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین کاهش سطح آب دریاچه زریبار یکی از معضلات اساسی و پیچیده سال‌های اخیر در کردستان است که با تداوم خشکسالی‌ها نیز همراه بوده است (حسینی و همکاران، ۱۴۰۴). لذا در این پژوهش به آشکارسازی روند تغییرات اقلیمی در حوضه آبخیز دریاچه زریبار با استفاده از آزمون‌های آماری پرداخته می‌شود.

روش‌شناسی

موقعیت جغرافیایی حوضه مورد مطالعه

حوضه آبخیز دریاچه زریبار با مساحت ۱۵۸۲۷ هکتار در موقعیت جغرافیایی ۴۶ درجه و ۴ دقیقه و ۵۱ ثانیه تا ۴۶ درجه و ۱۵ دقیقه و ۳۰ ثانیه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۲۸ دقیقه و ۲۳ ثانیه تا ۳۵ درجه و ۳۶ دقیقه و ۳۰ ثانیه عرض شمالی و در استان کردستان قرار گرفته است. حداکثر ارتفاع حوضه ۲۱۲۰ متر و حداقل ارتفاع آن در محل خروجی تالاب زریبار ۱۲۸۳ متر از سطح دریا می‌باشد. شیب متوسط حوضه نیز ۱۸/۲درصد است و دریاچه زریبار کانون تمرکز رواناب های سطحی ۸ واحد هیدورلوژیکی حوضه زریبار است. این دریاچه بزرگ‌ترین دریاچه آب شیرین ایران است و از معروف‌ترین و زیباترین جاذبه‌های طبیعی غرب کشور محسوب می‌شود که هیچ رودخانه دائمی در تأمین آب آن نقش ندارد و عمدتاً از طریق چشمه های متعددی که در بخش غربی و کف دریاچه وجود دارند، تغذیه می‌شود (زهرائی و حسینی، ۱۳۹۹).

موقعیت جغرافیایی حوضه مورد مطالعه در شکل (۱) آورده شده است. پژوهش حاضر بر روی ایستگاه همدید مریوان واقع در سطح این حوضه به عنوان ایستگاه منتخب حوضه و همچنین تنها ایستگاه دارای پارامترهای اقلیمی مورد بررسی و دارای دوره آماری بلندمدت انجام شده است. مشخصات جغرافیایی ایستگاه هواشناسی مورد بررسی نیز در جدول (۱) آورده شده است



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز زریبار در استان کردستان

جدول ۱- مشخصات جغرافیایی ایستگاه هواشناسی موردبررسی

نام ایستگاه	نوع ایستگاه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ارتفاع
مریوان	همدید	۳۵/۵۰	۴۶/۱۵	۱۲۸۷

این تحقیق از نظر ماهیت، اسنادی ـ آماری است و از نظر نوع تحقیق، یک تحقیق کاربردی محسوب می‌شود. در این تحقیق از دیدگاه آماری روند تغییرات اقلیمی در حوضه آبخیز دریاچه زریبار بررسی می‌شود. زیر بنای این تحقیق، استفاده از آمار و اطلاعات ایستگاه همدید مریوان با دوره آماری بلندمدت (۲۰۲۳-۱۹۹۲) به صورت سالانه است. داده‌های مورد نیاز شامل آمار سالانه پارامترهای دما (کمینه، متوسط و بیشینه)، بارش، رطوبت نسبی و سرعت باد در طول دوره آماری ۳۲ ساله (۱۹۹۲ تا ۲۰۲۳) است که از سازمان هواشناسی کشور دریافت گردید. برای آشکارسازی روند تغییرات پارامترهای مذکور از آزمون‌های آماری من کندال و تخمینگر شیب سن استفاده شد که در ادامه به تشریح آنها پرداخته می‌شود.

آزمون ناپارامتری من-کندال

آزمون ناپارامتری من- کندال که توسط من در سال ۱۹۴۵ ارائه و سپس توسط کندال در سال ۱۹۷۵ تکمیل گردید، بر پایه‌ی مرتبه داده‌ها در یک سری زمانی استوار است. این آزمون برای بررسی تصادفی بودن داده‌ها (عدم وجود روند) در مقابل وجود روند در سری‌های زمانی هیدرولوژیکی و هواشناسی مورد استفاده قرار می‌گیرد (ژانگ و همکاران، ۲۰۰۰). مزیت این آزمون نسبت به سایر آزمون‌های تعیین روند، استفاده از مرتبه داده‌ها در سری زمانی بدون در نظر داشتن مقدار متغیرها می‌باشد که به دلیل وجود چنین خاصیتی، می‌توان از این آزمون برای داده‌های دارای چولگی نیز استفاده‌کرد و نیازی نیست که داده‌ها در قالب توزیع خاصی درآیند.

فرض مورد بررسی در این آزمون به صورت زیر می‌باشد:

H0 : داده‌ها به صورت تصادفی توزیع شده‌اند (روند ندارند).

H1 : داده‌ها دارای روند هستند.در این آزمون، اگر x1,x2,…,xn مشاهدات مورد نظر باشند، آنگاه داریم:

$$S=\sum_{k=1}^{n-1}\sum_{j=k+1}^{n}\operatorname{sgn}\left(x_j-x_k\right)$$

که در آن x_j مقدار داده j ام و sgn تابع علامت می‌باشد که به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\mathrm{sgn}(x)=\begin{cases}+1 & if \quad (x_j-x_k)>0\\ 0 & if \quad (x_j-x_k)=0\\ -1 & if \quad (x_j-x_k)<0\end{cases}$$

در واقع در این آزمون هر داده با تمامی داده‌های پس از خود مقایسه می‌شود؛ در این مرحله می‌توان بجای استفاده از مقادیر اصلی داده‌ها، از مرتبه داده‌ها در مجموعه مورد نظر (سری زمانی) استفاده کرده و مرتبه‌ها را به همین روش مقایسه نمود. به این دلیل، این آزمون یک آزمون برپایه مرتبه داده‌ها (Rank base) می‌باشد.

با فرض این‌که داده‌ها مستقل بوده و توزیع یکنواخت دارند، میانگین و واریانس S از روابط زیر بدست می‌آید:

$$E(S)=0$$

$$Var(S)=\frac{n(n-1)(2n+5)-\sum_{i=1}^{m}t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18}$$

در رابطه بالا: n : تعداد داده ها، m : تعداد گره ها و t : تعداد داده در هر گره می‌باشد.

منظور از گره این است که اگر از یک مقدار داده، بیشتر از یکی وجود داشته باشد، این مقادیر مساوی، تشکیل یک گره را می‌دهند و تعداد این مقادیر مساوی در گره m ام برابر t می‌باشد.

آماره این آزمون (Z) دارای توزیع نرمال بوده و از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$Z=\begin{cases}\dfrac{S-1}{\sqrt{Var(S)}} & if \quad S>0\\ 0 & if \quad S=0\\ \dfrac{S+1}{\sqrt{Var(S)}} & if \quad S<0\end{cases}$$

این آزمون، یک آزمون دو طرفه است. بنابراین در صورتی که $|Z|\le Z_{\alpha/2}$ باشد، در سطح اطمینان α فرض صفر پذیرفته می‌شود و در غیر این صورت، فرض صفر رد خواهد شد. در حالت رد فرض صفر (یعنی وجود روند)، در صورتی که S>0 باشد، سری زمانی دارای روند مثبت (صعودی) و در صورتی که S<0 باشد، سری زمانی دارای روند منفی (نزولی) خواهد بود. اگر $|Z|>1.64$ در سطح معنی‌داری ۱۰ درصد، اگر $|Z|>1.96$ در سطح معنی‌داری ۵ درصد و اگر $|Z|>2.57$ در سطح معنی‌داری ۱ درصد فرض صفر (عدم وجود روند) رد می‌شود (کندال، ۱۹۷۵).

تخمین‌گر شیب سن

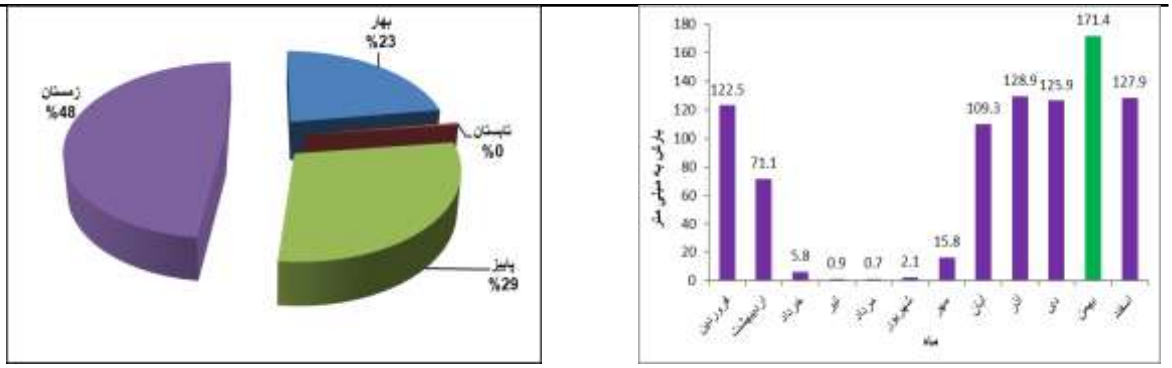
تخمین شیب خط روند توسط سن (۱۹۶۸) برای تشخیص بزرگی تغییرات روند در یک سری زمانی داده‌ها ارایه شد. این روش یک روش ناپارامتری است که با استفاده از تحلیل تفاوت بین مشاهده‌ای یک سری زمانی، یک شیب میانه را برای سری زمانی داده‌ها از رابطه زیر محاسبه می‌کند. در روش سن برای هر دو جفت داده متوالی یک شیب محاسبه می‌شود. شیب‌های محاسبه شده تشکیل یک سری زمانی می‌دهند که میانه آن‌ها شیب خط روند را نشان می‌دهد. در آزمون من-کندال شیب خط روند سری داده‌ها با روش تخمین‌گر سن از رابطه ناپارامتری زیر محاسبه می‌گردد.

$$\beta = \text{Median}\left[\frac{X_j - X_i}{j - i}\right](\forall j > i)$$

که در آن β برآوردگر شیب خط روند، X_i و X_j به ترتیب مقادیر مشاهداتی i ام j ام می‌باشند و j یک واحد زمانی بعد از i می‌باشد مقادیر مثبت و منفیβ نشان دهنده روند افزایشی و کاهشی در سری داده‌هاست (سن، ۱۹۶۸: ۱۳۸۹).

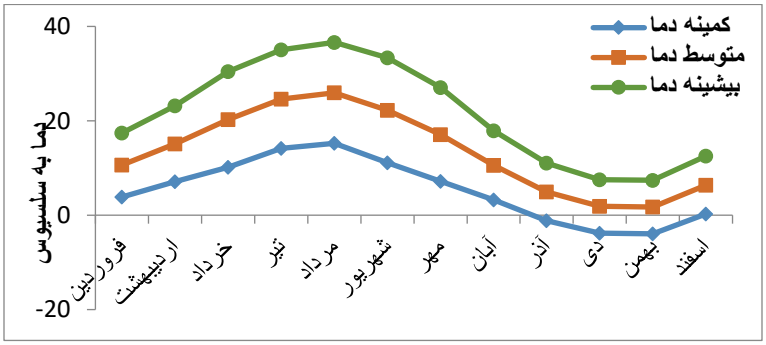
نتایج و بحث

یکی از اساسی‌ترین مطالعات حوضه‌های آبخیز، شناخت جامع و کامل آب و هوایی است که حوضه در آن واقع شده است به همین منظور ابتدا به بررسی وضعیت متغیرهای مورد بررسی در طول دوره آماری مورد مطالعه پرداخته شد. تحلیل توصیفی بارش نشان می‌دهد که متوسط بارندگی در طول دوره آماری مورد بررسی (۱۹۹۲-۲۰۲۳) بر اساس ایستگاه منتخب حوضه (ایستگاه همدید مریوان) برابر با ۸۸۲/۲ میلی‌متر در سال است. حداکثر و حداقل بارش ماهانه در سطح حوضه به ترتیب مربوط به بهمن ماه با ۱۷۱/۴ میلی‌متر و مرداد ماه با ۰/۷ میلی‌متر می‌باشد. بر این اساس هیچکدام از ماه‌های سال در این حوضه بدون بارش نیست (شکل ۲). توزیع فصلی بارش نیز نشان می‌دهد که فصل زمستان با ۴۸ درصد، بیشترین بارش فصلی را به خود اختصاص می‌دهد و فصول پاییز، بهار و تابستان به ترتیب با ۲۹، ۲۳ و ۰/۰۱ درصد، در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند (شکل ۲). همان‌طور که پیداست بیشترین بارش مربوط به فصول سرد سال است که منطقه تحت تأثیر توده هواهای مدیترانه‌ای و سیبری قرار دارد ولی در تابستان به علت نفوذ پرفشار جنب حاره به عرض‌های بالاتر و عقب‌نشینی توده‌هوای سیبری و مدیترانه شاهد بارش‌های کمتری است.



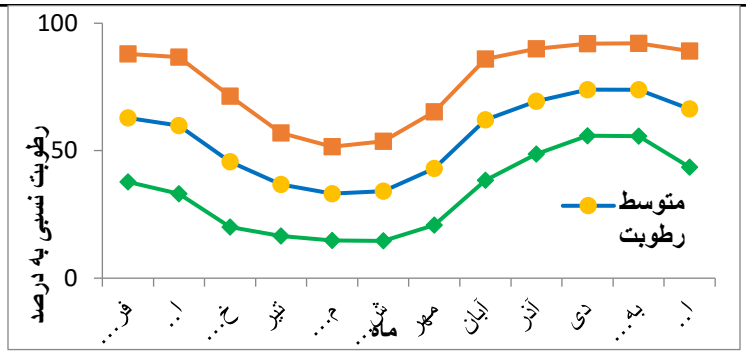
شکل ۲- پراکنش ماهانه و فصلی بارش در حوضه آبخیز زریبار

متوسط حداقل و حداکثر دمای سالانه حوضه آبخیز زریبار بر اساس آمار ایستگاه همدید مریوان در دوره آماری مورد بررسی به ترتیب برابر با ۵/۳ و ۲۱/۶ درجه سلسیوس است. توزیع ماهانه دما نیز نشان می‌دهد حداکثر دمای ماهانه مربوط به مرداد ماه با ۳۶/۶ درجه سلسیوس و حداقل آن نیز مربوط بهمن ماه با ۳/۹- درجه سلسیوس است متوسط دمای سالانه حوضه آبخیز زریبار نیز در طول دوره آماری مورد بررسی برابر با ۱۳/۵ درجه سلسیوس است (شکل ۳).



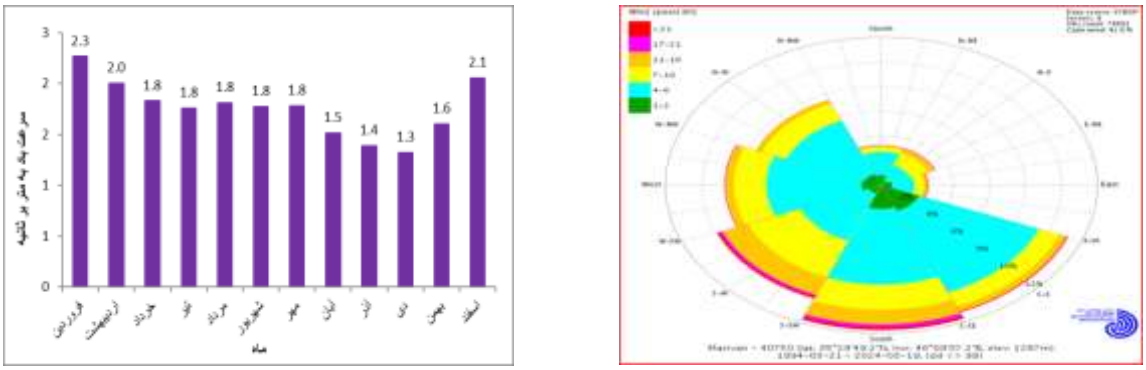
شکل ۳- رژیم حرارتی حوضه آبخیز زریبار

بررسی رژیم رطوبتی حوضه نیز نشان می‌دهد که متوسط رطوبت نسبی در این حوضه برابر با ۵۵ درصد است متوسط حداقل و حداکثر رطوبت نسبی نیز به ترتیب برابر با ۳۳ و ۷۷ درصد است. از نظر توزیع ماهانه کمترین و بیشترین میزان رطوبت نسبی به ترتیب مربوط به ماه‌های مرداد و شهریور با ۱۵ درصد و ماه‌های دی و بهمن با ۹۲ درصد است (شکل ۴). به‌طورکلی بررسی آماری رطوبت نسبی نشان می‌دهد که مقدار رطوبت هوا در حد متعادلی قرار دارد و این مسئله سبب شده است که این حوضه معمولاً با کمبود بحران رطوبت مواجه نباشد.



شکل ۴- رژیم رطوبتی حوضه آبخیز زریبار

یکی دیگر از عناصر اقلیمی مؤثر در حوضه‌های آبخیز، سرعت باد است. تحلیل توصیفی از سرعت باد در دوره آماری مورد مطالعه در حوضه آبخیز زریبار نشان داد که متوسط سرعت باد ماهانه در منطقه برابر با ۱/۸ متر در ثانیه با متوسط حداکثر ۲/۳ متر در ثانیه در فروردین ماه و متوسط حداقل ۱/۳ متر در ثانیه در دی ماه است. بررسی گلباد حوضه نیز نشان می‌دهد که باد غالب این حوضه بر اساس ایستگاه هواشناسی منتخب حوضه، باد جنوبی با حداکثر سرعت ۲۱ متر بر ثانیه است. باد نائب غالب حوضه نیز، باد جنوب شرقی بوده و بادهای جنوب غربی و غربی از نظر فراوانی و مداومت وزش در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند (شکل ۵).



شکل ۵- گلباد و متوسط ماهانه سرعت باد در حوضه آبخیز زریبار

جهت آشکارسازی روند سالانه در سری‌های زمانی موردبررسی شامل دما، رطوبت، سرعت باد و بارش از آزمون من- کندال و تخمینگر شیب سن استفاده گردید. این آزمون برای سری‌های زمانی مورد بررسی در دوره مشاهداتی (۲۰۲۳-۱۹۹۲) در مقیاس سالانه برای ایستگاه هواشناسی منتخب در حوضه آبخیز زریبار (ایستگاه همدید مریوان) صورت گرفت، به شکلی که به‌صورت آماری تغییرات پارامترهای ذکر شده بررسی شود که نتایج حاصل از آن در جدول (۲) آورده شده است. بر اساس نتایج، بارش در حوضه آبخیز مورد بررسی روند کاهشی داشته است که با آماره برابر با ۱/۶- معنی‌داری آن توسط

آزمون من کندال مورد تأیید قرار نگرفته است؛ به عبارت بهتر، تغییرات کاهشی در بارش حوضه آبخیز زریبار، از نوع نوسانات کوتاه‌مدت آب و هوایی در منطقه می‌باشد. نتایج حاصل از آزمون تخمین‌گر شیب سن نیز حاکی از تغییرات کاهشی بارش با شیب سن برابر با ۸/۳- در طول دوره آماری مورد بررسی است. روند دما نیز نشان می‌دهد که هم دمای کمینه و هم دمای بیشینه و همچنین متوسط دما دارای تغییرات افزایشی است که این تغییرات افزایشی در متغیرهای متوسط دما و دمای بیشینه در سطح ۱ درصد معنی‌دار شده است و تغییرات مذکور از نوع روند افزایشی در منطقه است اما دمای کمینه فاقد روند و تغییرات افزایشی مذکور از نوع نوسانات کوتاه مدت آب و هوایی در منطقه است. میزان شیب تغییرات نیز بر اساس تخمین‌گر شیب سن برای متغیرهای متوسط دما، دمای کمینه و دمای بیشینه به ترتیب برابر با ۰/۰۷، ۰/۰۳ و ۰/۱۱ است که بیانگر تغییرات شدیدتر دمای بیشینه نسبت به دمای کمینه در طول دوره مورد مطالعه است. در مجموع بر اساس نتایج حاصل از آشکارسازی روند تغییرات دما و بارش در سطح حوضه آبخیز زریبار می‌توان بیان کرد که در این حوضه بارش دارای تغییرات کاهشی و دما دارای تغییرات افزایشی است. همچنین بر اساس روش تخمین‌گر شیب سن نیز تغییرات دما در حوضه مورد مطالعه شدیدتر و مشخص‌تر از تغییرات بارشی است. بر اساس نتایج متوسط رطوبت نسبی نیز با آماره من کندال برابر با ۱/۹ دارای تغییرات افزایشی است که این تغییرات افزایشی نیز معنی‌دار نشده و از نوع نوسانات کوتاه مدت آب و هوایی در منطقه است. تغییرات سرعت باد نیز در حوضه مورد مطالعه افزایشی است اما تغییرات افزایشی مذکور با آماره من کندال برابر با ۰/۲ معنی‌دار نشده و همچون متغیرهای بارش، دمای کمینه و رطوبت نسبی از نوع نوسانات کوتاه مدت آب و هوایی در منطقه است (جدول ۲).

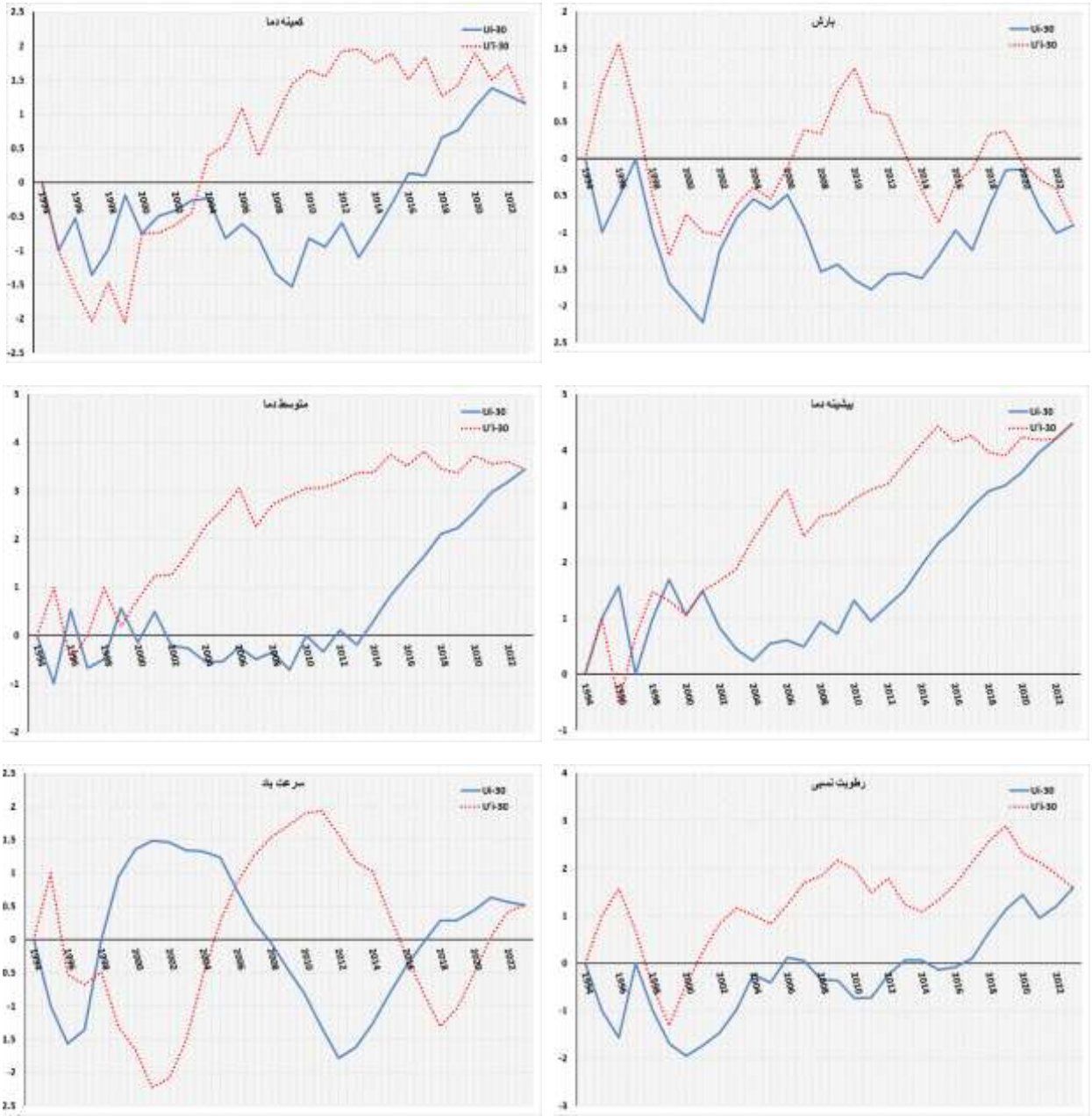
جدول۲- روند تغییرات پارامترهای اقلیمی مورد بررسی در حوضه آبخیز دریاچه زریبار

ردیف	پارامتر	من کندال	شیب سن	نوع تغییرات
۱	بارش	-۱/۶	-۸/۳	کاهشی
۲	دمای کمینه	۱/۸	۰/۰۳	افزایشی
۳	دمای بیشینه	۵/۱**	۰/۱۱	افزایشی
۴	متوسط دما	۴/۱**	۰/۰۷	افزایشی
	رطوبت نسبی	۱/۹	۰/۱۴	افزایشی
۵	سرعت باد	۰/۲	۰/۰۱	افزایشی

**معنی‌داری در سطح ۱درصد *معنی‌داری در سطح ۵ درصد

بررسی روند تغییرات متغیرهای مورد بررسی در دوره ۳۲ ساله مورد مطالعه (۲۰۲۳-۱۹۹۲) با استفاده از آزمون گرافیکی من کندال جهت تعیین نقاط جهش نشان داد که با توجه به خصوصیات آزمون ناپارامتری من کندال، روند متغیرهای دارای

روند معنی‌دار (بیشینه و متوسط دما) از سال ۱۹۹۸ شروع و با وجود نوسان و کاهش در برخی سال‌ها، این روند افزایشی تا پایان دوره آماری مورد مطالعه ادامه داشته است و نشان دهنده آن است که متغیرهای مذکور دارای روند افزایشی معنی‌دار است (شکل ۶).



شکل ۶- روند تغییرات متغیرهای مورد بررسی بر اساس آزمون گرافیکی من کندال در حوضه آبخیز زریبار

نتیجه‌گیری

با آشکارسازی تغییرات متغیرهای دما، بارش، رطوبت نسبی و سرعت باد سالانه در حوضه آلخیز زریبار در طول ۳۲ سال اخیر (۱۹۹۲-۲۰۲۳) ، مشخص شد که این متغیرها در طول دوره آماری مورد بررسی تغییر کرده اند. این تغییر در برخی از سری های زمانی از نوع نوسانات کوتاه مدت و در برخی دیگر، از نوع تغییرات دارای روند معنی‌دار می‌باشد. نوع تغییرات در سری بارشی حوضه از نوع کاهشی و جزو نوسانات کوتاه مدت آب و هوایی در منطقه می‌باشد. در سطح حوضه مورد مطالعه نیز پارامترهای دمایی دارای تغییرات افزایشی هستند که این افزایش برای دمای بیشینه و متوسط دما در سطح ۰/۰۱ معنی‌دار شده است و برای کمینه دما از نوع نوسانات کوتاه مدت آب و هوایی می‌باشد. سرعت باد و رطوبت نسبی نیز بر اساس آماره آزمون من کندال دارای تغییرات افزایشی است که هیچکدام از این تغییرات معنی‌دار نشده است و جزو نوسانات کوتاه مدت آب و هوایی در منطقه است بیشترین شیب تغییرات متغیرهای مورد بررسی در سطح حوضه نیز مربوط به بارش با شیب سن (۸/۳-) و کمترین تغییرات نیز مربوط به سرعت باد با شیب سن برابر با ۰/۰۱ است طور کلی بر اساس روش تخمین‌گر شیب سن تغییرات بارش سالانه شدیدتر و مشخص‌تر از تغییرات دمایی در سطح حوضه است در مجموع بر اساس نتایج حاصل از آشکارسازی تغییرات اقلیمی در سطح حوضه آبحیز زریبار مشخص شد که در طول دوره آماری مورد بررسی در این حوضه میزان بارش کاهش و متغیرهای دما، رطوبت نسبی و سرعت باد دارای تغییرات افزایشی است. نتایج حاصل با مطالعات حجازی زاده و همکاران (۲۰۲۲)، حسینی و همکاران (۱۳۹۴) و جمالی و همکاران (۱۴۰۳) در بررسی تغییرات دما و بارش در ایران و خاورمیانه مطابقت دارد. از نتایج حاصل از این پژوهش می‌توان در سیاست گذاری‌ها و برنامه‌ریزی‌های بخش‌های مختلف در محدوده دریاچه زریبار به ویژه مدیریت منابع آب و کشاورزی استفاده نمود

منابع

جمالی، محمد.، گوهری، سید علیرضا و اخوان صراف، غزل . (۱۴۰۳). ارزیابی مکانی و زمانی روند شاخص‌های حدی دما و بارش ایران تحت تأثیر تغییر اقلیم، مدیریت آب و آبیاری. ۱۴ (۳)، ۷۵۲-۷۴۳.

حسینی، سید اسعد.، رهنما، مهدی.، باقری، حمید.، پناهی، علی.، چاره خواه، بهرام.، قمری، خه بات.، خدام، نوشین.، نوری، فائزه.، صحت، ساویز. ۱۴۰۴. واکاوی همدیدی و ماهواره‌ای گردوخاک در استان کردستان. جغرافیا و مخاطرات محیطی، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، دوره ۱۴، ش ۲ (۵۴)، صص ۶۷-۴۵.

حسینی، سید اسعد.، صلاحی، برومند.، گودرزی، مسعود. ۱۳۹۴. بررسی روند تغییرات دما و بارش سالانه در نیم قرن اخیر در حوضه آبریز دریاچه ارومیه. اولین کنگره بین‌المللی زمین، فضا و انرژی پاک، دانشگاه محقق اردبیلی، ۹ ص.

زهرائی، اکبر.، حسینی، سید اسعد. ۱۳۹۹. تغییر اقلیم و اثرات آن بر منابع آب، چاپ اول، انتشارات هاوار، ایلام.

شائمی، اکبر.، حبیبی‌نوخندان، مجید. ۱۳۸۸. گرمایش جهانی و پیامدهای زیستی اکولوژیکی، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد.

Buda, A.R., Millar, D.J., Kennedy, C.D. Welsh, M.K., Wiegman, A.R.H. 2024. Trends in extreme rainfall over the past 55 years suggest springtime subhourly rainfall extremes have intensified in Mahantango Creek, Pennsylvania. Sci Rep 14, 2783.

Hardy, J.T. 2003. Climate Change: Causes, Effects, and Solutions. John Wiley & Sons, Ltd. 247 P.

Hejazizadeh, Z., Hosseini, S.A., Karbalaee, A., Poorkarim, R., Mousavi, S.M. 2022. Spatiotemporal variations in precipitation extremes based on CMIP6 models and Shared Socioeconomic Pathway (SSP) scenarios over MENA. Arab J Geosci 15, 1601.

Heydari, Sh., Hosseini, S.A., Heydari, A. (2020). Investigating the effects of climate change on stream flows of Urmia Lake basin in Iran, Modeling Earth Systems and Environment, 1: 329-339.

IPCC (2017) Chapter outline of the working group I contributions to the IPCC sixth assessment report (AR6).

IPCC (2021). Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu & B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

Kendall, M.G. 1975. Rank Correlation Measures, Charles Griffin, London, 272p.

Sen, P. K. (1968), Estimates of the regression coefficient based on Kendall's Tau. Journal of the American Statistical Association. 63. Pp 1379-1389.

Sen, P.K. (1968), Asymptotically efficient tests by the method of n rankings. J. Roy. Statist. Soc. Ser. B. 30.

ارزیابی شدت خشکسالی ناشی از تغییراقلیم در سرشاخه های دز

مسعود گودرزی(مسئول)، نوید دهقانی، مهشید کریمی

چکیده

در این تحقیق تاثیر تغییراقلیم بر نمایه‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی SDI و SWSI در سرشاخه‌های دز در سه دوره زمانی، کوتاه مدت (شاخص۲۰۳۰)، میان مدت (شاخص ۲۰۵۰) و بلند مدت (شاخص ۲۰۷۰) از طریق مولد آب و هواشناسی لارس بررسی شد. نتایج ارزیابی داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده با استفاده از آزمون‌های کلموگروف - اسمیرنف و آزمونT و شاخصهای عملکرد مختلف شامل RMSE، MAE، ضریب کارآئی نش ساتکلیف و خطای انحراف متوسط بیانگر آن است که عملکرد مدل در شبیه‌سازی دمای حداقل، دمای حداکثر و بارش در تطابق بسیار خوبی با داده‌های مشاهداتی است. نتایج حاصل از مدل اقلیمی نشان می‌دهد که دمای متوسط حوضه در سه دوره آتی به ترتیب ۰/۴۰۵، ۱/۷۳۵ و ۳/۲۵۵ درجه سانتیگراد نسبت به دوره پایه افزایش و میزان بارش حدود ۸/۱۱ درصد کاهش می‌یابد. با بررسی نتایج حاصل از شاخص‌های خشکسالی انتظار می‌رود که در دوره‌های آتی (سه گانه فوق‌الذکر) میانگین شدت شاخص خشکسالی ماهانه SPI به ترتیب به میزان ۱/۲ ، ۲/۷ و ۸/۲ درصد، شاخص خشکسالی SDI ماهانه به ترتیب به میزان ۱/۷ ، ۳/۳ و ۱۱/۲ درصد و میانگین شدت شاخص خشکسالی SWSI ماهانه به ترتیب به میزان ۰/۵، ۲ و ۸/۶ درصد نسبت به دوره پایه افزایش یابد.

کلید واژه‌ها: مدل‌های AOGCM، تغییراقلیم، نمایه‌های خشکسالی هواشناسی، SWSI.

مقدمه

در بیش‌تر نقاط دنیا تغییراقلیم باعث افزایش دما، کاهش بارندگی و افزایش وقایع حدی و آنتروپی می‌شود. مقدار رواناب، آبدهی رودخانه‌ها، شدت سیلاب و خشکسالی همگی متاثر از دما و بارش‌اند که از مهمترین عناصر اقلیمی هستند، از این رو با توجه به تغییرات اقلیمی و تاثیر آن بر فرآیندهای هیدرولوژیکی، بررسی مطالعات منطقه‌ای تاثیر تغییراتاقلیم بر پارامترهای هواشناسی و هیدرولوژیکی و تاثیر آن بر شاخص های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در دسترس، ضروری می‌نماید. مدل‌های مولد مصنوعی داده‌های هواشناسی دارای دو رویکرد آماری هستند: مدل‌های زنجیره مارکف در ابتدا تر یا خشک بودن روز بررسی می‌گردد و سپس میزان بارش روز تر بر اساس بارش روزهای قبل و بعد محاسبه می‌گردد. خشکسالی یکی از پدیده های محیطی و بخش جدایی ناپذیر تغییرات اقلیمی می‌باشد. ویژگی‌ها و اثرات آن در رژیم‌های مختلف آب و هوایی با یکدیگر متفاوت است هرچه شدت و گستره خشکسالی‌ها بیشتر باشد تاثیرات آن عمیق‌تر بوده و موجب ایجاد بحران می‌گردد. شدت خشکسالی معمولا توسط شاخص‌های خشکسالی اندازه‌گیری و به صورت کمی بیان

می‌شود و این شاخص‌ها می‌توانند کاربردی کلی یا عمومی داشته باشند و یا به صورت خاص برای اهداف مخصوص ارائه شوند.

نمایه بارش استاندارد موسوم به SPI به صورت گسترده در بررسی اثر تغییراقلیم بر خشکسالی استفاده شده است از جمله Deihimfard et al., 2016، Salehpour Jam et al.,2015، Nikbakht Shahbazi, 2015، Parvaneh et al., 2015، Zare Abyaneh et al., 2015، Moafi Madani et al., 2012، Golmohammadi and Massah Bavani, 2011 استفاده شده است. خسروی و همکاران (۱۳۸۹) به بررسی اثرات تغییراقلیم براساس سناریوهای IPCC بر منابع‌آب خاورمیانه پرداختند و به این نتیجه رسیدند که تا سال ۲۰۲۰، درجه حرارت در این منطقه، ۱ تا ۲ درجه سانتیگراد افزایش و از میزان بارش تا ۲۰ درصد کاسته خواهد شد. فوجیهارا و همکاران (۲۰۰۸) پتانسیل اثرات تغییراقلیم را بر هیدرولوژی و منابع‌آب حوضه رودخانه سیهان در جنوب ترکیه بررسی کرده و نشان دادند که در مقایسه با وضعیت موجود، بارش و دبی در آینده کاهش پیدا کرده و پیک جریان ماهانه زودتر اتفاق می‌افتد. میلر و همکاران (۲۰۰۴) به بررسی اثر تغییراقلیم به حوضه های ایالت کالیفرنیای آمریکا پرداختند و به این نتیجه رسیدند که تا پایان قرن ۲۱ ذوب برف حاصل زودتر آغاز می‌شود و ذخایر برف زمستانه ۵۰ درصد کاهش خواهد یافت. جعفر زاده و همکاران (۱۳۹۵) در تحقیقی به ارزیابی دو روش ریزمقیاس نمایی آماری LARS-WG و SDSM در برآورد تغییرات مولفه‌های اقلیمی در دشت بیرجند پرداختند که نتایج نشان داد به طور کلی روش LARS-WG در مقایسه با روش SDSM-DC دقت بیشتری دارد. هاشمی و همکاران (۲۰۱۱) به مقایسه دو مدل تغییراقلیم LARS-WG و SDSM برای شبیه‌سازی بارش‌های شدید در حوضه کلوتا در نیوزیلند پرداختند نتایج نشان داد که هر دو مدل توانایی‌های مشابه و خوبی در شبیه‌سازی بارش‌های شدید دارند و برای پیش‌بینی‌های اقلیمی می‌توان از آنها استفاده کرد. آذری و همکاران (۱۳۹۲) در بررسی اثرات تغییراقلیم بر شرایط هیدرولوژیکی حوضه گرگانرود با استفاده خروجی‌های سه مدل گردش عمومی جو به این نتیجه رسیدند، که برای دوره آتی ۲۰۷۰-۲۰۹۹ مقدار بارندگی سالانه حوضه، رواناب‌سطحی و آب خاک به ترتیب به میزان ۳/۲ تا ۶/۷ درصد، ۰/۴ تا ۷/۷ درصد و ۵/۲ تا ۱۳ درصد کاهش و میزان آبدهی حوضه و تبخیروتعرق به ترتیب به میزان ۵/۳ تا ۱۰/۲ درصد و ۱/۶ تا ۳/۶ درصد افزایش می‌یابد.

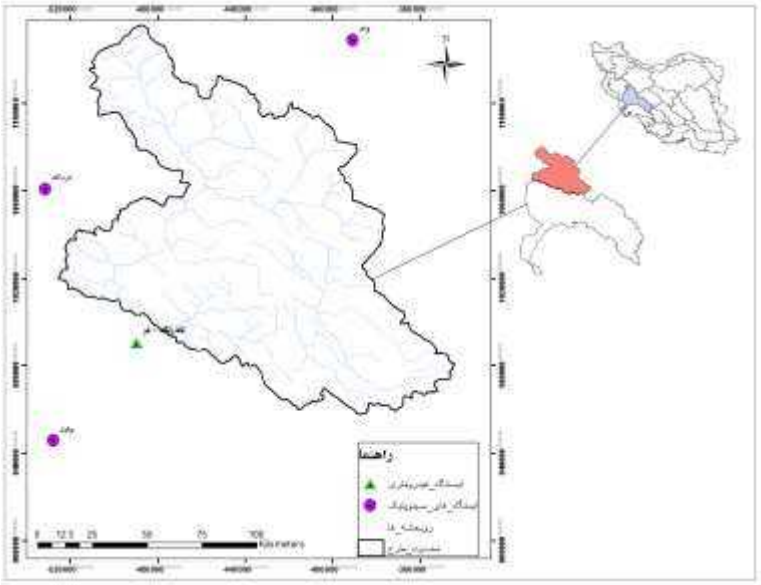
گودرزی و همکاران (۱۳۹۴) در بررسی اثر تغییراقلیم بر تغییرات رواناب سطحی حوضه آبریز دریاچه ارومیه تحت سه سناریوی A1B، A2و B1، مدل گردش عمومی HadCm3، مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری LARS-WG و مدل بارش رواناب IHACRES در سه دوره زمانی (۲۰۳۰-۲۰۱۱، ۲۰۶۵-۲۰۴۶و ۲۰۸۰-۲۰۹۹) به این نتیجه رسیدند که متوسط رواناب سالانه بلند مدت در دوره‌های زمانی فوق نسبت به دوره پایه به ترتیب ۵/۴، ۲۲/۳۵ و ۶۵/۴ درصد کاهش می‌یابد. رامک و همکاران (۱۳۹۵) در تحقیقی تاثیر پدیده تغییراقلیم را با استفاده از مدل HadCM3 با استفاده از مدل بارش رواناب SRM در حوضه آبریز کارون بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که تغییراقلیم باعث تغییر در رژیم رودخانه خواهد شد و در آینده دبی رودخانه¬ها در ماه‌های خشک و کم آب، کمتر و در ماه‌های با جریان سیلابی، بیشتر خواهد شد و بیشترین کاهش دبی رودخانه در ماه سپتامبر خواهد بود. حجازی‌زاده و همکاران (۱۳۹۴) به بررسی اثر تغییراقلیم با استفاده از مدل HadCM3 در بازه‌ی زمانی آینده (۲۰۴۰-۲۰۱۱) تحت سناریوی A2 با استفاده از مدل بارش رواناب IHACRES پرداختند.

آنها با مقایسه رواناب دوره آتی نسبت به دوره مشاهداتی به این نتیجه رسیدند که رواناب سالانه حوضه در حدود ۹/۴۳ درصد کاهش می‌یابد و در برخی ماه‌ها (ژانویه، فوریه، می و ژوئن) افزایش را نشان می‌دهد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز رودخانه دز از مهمترین شاخه‌های کارون بوده و بخشی از ارتفاعات زاگرس میانی را شامل میشود. محدوده این حوضه در مختصات جغرافیایی ۱۰-۴۸ تا ۲۰-۵۰ طول شرقی و ۳۵-۳۱ تا ۰۵-۳۴ عرض شمالی واقع شده و مساحتی در حدود ۱۷۲۸۴ کیلومتر مربع دارد. ارتفاع حوضه حداکثر ۴۱۲۴ و حداقل ۱۹۰ متر متغیر می‌باشد. محدوده حوضه آبریز دز، رودخانه‌ها، موقعیت ایستگاه‌های سینوتیک و هیدرومتری موجود در شکل شماره ۱ نشان داده شده‌است.



شکل ۱ - محدوده مورد مطالعه همراه با موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک و هیدرومتری

مدل لارس یکی از مشهورترین مدل‌های داده‌های تصادفی وضع هواست که برای تولید دمای حداقل، حداکثر، بارش و تابش به صورت روزانه تحت شرایط اقلیم کنونی و آینده به کار می‌رود. راسکو و همکاران در ابتدا این مدل را معرفی و سپس سمنوف و همکاران آن را بازنگری نمودند. علت اصلی تولید این مدل، غلبه بر ضعف‌های زنجیره مارکف بود. این مدل به عنوان یک مدل ریزمقیاس‌نمایی، درعین پیچیدگی کمتر فرایند شبیه‌سازی و داده‌های ورودی و خروجی، توانایی بسیار زیادی در پیش‌بینی تغییراقلیم دارد. در این پژوهش برای ریزمقیاس نمایی مدل جهانی HadCM3، استفاده شد. برای اجرای مدل از داده‌های روزانه دمای حداقل، دمای حداکثر و بارش روزانه در دوره آماری ۳۰ ساله ۲۰۰۰-۱۹۷۱ (سه ایستگاه سینوپتیک خرم‌آباد، اراک و دزفول که دارای آمار بلند مدت می باشد) به عنوان مبنای تغییراقلیم گذشته و

شبیه‌سازی اقلیم آینده استفاده شده‌است. ابتدا مدل برای دوره آماری پایه اجرا شد تا یکسری داده‌های مصنوعی در دوره پایه مجددا تولید شود و سپس این خروجی‌ها با داده‌های مشاهداتی ایستگاهی مقایسه می‌شوند. تطابق مشخصات آماری داده‌های مشاهداتی و تولید شده نشان از توانایی مدل برای پیش‌بینی داده‌های آماری می‌باشد در تحقیق حاضر از سه سناریوی خوش بینانه، حدواسط و بدبینانه استفاده شد. از پرکابردترین شاخص‌های خشکسالی هواشناسی می‌توان به شاخص بارش استاندارد شده می توان به SPI اشاره کرد. شاخص SPI در دوره مبنای k به صورت زیر محاسبه می شود.

$$SPI = \frac{R_{i.k} - \bar{R}_K}{S_{R.k}} \quad (۱)$$

$R_{i.k}$, $\bar{R}_K$ و $S_{R.k}$ به ترتیب ارتفاع بارش تجمعی برای دوره مبنای k ، میانگین مجموع بارش و انحراف معیار بارش برای دوره مبنا در یک مدت طولانی می باشد. یک خشکسالی زمانی اتفاق می افتد که شاخص بارش استاندارد منفی، تداوم داشته باشد و همچنین وقوع یک خشکسالی زمانی شدید است که شاخص بارش استاندارد ۱- یا کمتر باشد و در صورتی که SPI مثبت شود رخداد خشکسالی به پایان خواهد رسید. طبق بندی مقادیر SPI در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱- طبقه‌بندی شدت خشکسالی شاخص هواشناسی SPI

درجه خشکسالی	ارزش SPI	درجه خشکسالی	ارزش SPI
ترسالی بسیار شدید	+2 < SPI	خشکسالی ضعیف	-1 < SPI ≤ 0
ترسالی شدید	+1.5 < SPI ≤ +2	خشکسالی متوسط	-1.5 < SPI ≤ -1
ترسالی متوسط	+1 < SPI ≤ +1.5	خشکسالی شدید	-2 < SPI ≤ -1.5
ترسالی ضعیف	0 < SPI ≤ +1	خشکسالی خیلی شدید	SPI ≤ -2

شاخص خشکسالی جریانات رودخانه ای (SDI) براساس حجم تجمعی جریانات رودخانه ای، برای دوره مبنای k مربوط به سال i هیدرولوژیکی به صورت زیر محاسبه می شود.

$$SDI_{i.k} = \frac{V_{i.k} - \bar{v}_k}{S_k} \quad (۲)$$

$V_{i.k}\bar{V}_k$ و S_k به ترتیب حجم تجمعی جریانات رودخانه ای، میانگین مجموع حجم دبی و انحراف معیار حجم جریانات تجمعی برای دوره مبنا در یک مدت طولانی می باشد. جدول ۲ حدود خشکسالی مختلف را در نمایه SDI نشان می دهد.

جدول ۲- طبقه‌بندی شدت خشکسالی شاخص هیدرولوژیکی SDI

درجه خشکسالی	ارزش SDI	درجه خشکسالی	ارزش SDI
ترسالی بسیار شدید	+2 < SDI	خشکسالی ضعیف	0 ≥ SDI > -1
ترسالی شدید	+1.5 < SDI ≤ +2	خشکسالی متوسط	-1 ≥ SDI > -1.5
ترسالی متوسط	+1 < SDI ≤ +1.5	خشکسالی شدید	-1.5 ≥ SDI > -2
ترسالی ضعیف	0 < SDI ≤ +1	خشکسالی خیلی شدید	SDI ≤ -2

SWSI یکی دیگر از نمایه های مورد استفاده در خشکسالیهاست. برای انجام پیش‌بینی به کمک SWSI، کافی است به جای هرکدام از متغیرهای به کار رفته در رابطه، مقادیر پیش‌بینی آن پارامتر را در نظر گرفت. مقدار شاخص SWSI با استفاده از رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$SWSI = \frac{a\times Psnow+b\times Ppre+c\times Pstrm+d\times Presv-50}{12} \quad (۳)$$

در رابطه فوق a، b، c و d وزن هریک از اجزا در نظر گرفته شده در محاسبه SWSI می باشد و مجموع آنها برابر یک است.PSnow : احتمال عدم تجاوز برای متغیر برف، PPre : احتمال عدم تجاوز برای متغیر باران، PStrm: احتمال عدم تجاوز برای متغیر رواناب، PResv: احتمال عدم تجاوز برای متغیر حجم مخزن می باشد. بر اساس مقادیر SWSI هرگاه مقدار شاخص کمتر از ۱- باشد، خشکسالی شروع و تا هنگامی که این شاخص به ۱+ تبدیل نشود، خشکسالی ادامه خواهد یافت. جدول ۳ حدود خشکسالی مختلف را در شاخص SWSI نشان می دهد.

جدول ۳- طبقه‌بندی شدت خشکسالی شاخص هیدرولوژیکی SWSI

درجه خشکسالی	ارزش SWSI	درجه خشکسالی	ارزش SWSI
ترسالی بسیار شدید	+3 < SWSI	خشکسالی ضعیف	0 ≥ SWSI > -1

ترسالی شدید	$+2 < SWSI \leq +3$	خشکسالی متوسط	$-1 \geq SWSI > -2$
ترسالی متوسط	$+1 < SWSI \leq +2$	خشکسالی شدید	$-2 \geq SWSI > -3$
ترسالی ضعیف	$0 < SWSI \leq +1$	خشکسالی خیلی شدید	$SWSI \leq -3$

نتیجه‌گیری

واسنجی مدل لارس در دوره پایه ۳۰ ساله (۱۹۷۱-۲۰۰۰) و ارزیابی عملکرد مدل در دوره ۱۰ ساله (۲۰۰۱-۲۰۱۰) صورت پذیرفت و نتایج آزمون‌های کلموگروف اسمیرنوف و آزمون T-test نشان داد که اختلاف معنی‌داری بین داده‌های مشاهداتی و تولید شده به وسیله‌ی مدل در تمامی ماه‌ها وجود ندارد و مقادیر همبستگی در سطح یک درصد قابل قبول می‌باشد. بنابراین نتایج عملکرد مدل نشان می‌دهد که شبیه‌سازی دمای حداقل، دمای حداکثر و بارش در تطابق بسیار خوبی با داده‌های مشاهداتی است. جهت صحت‌سنجی مدل از آماره‌های ضریب همبستگی (R2)، و شاخص‌های خطاسنجی RMSE، MAE، NSEو MBE اقدام به ارزیابی داده‌های تولید شده توسط مدل و داده‌های مشاهداتی در دوره پایه در سه ایستگاه سینوپتیک خرم‌آباد، دزفول و اراک شد که بالا بودن ضریب همبستگی و پایین بودن شاخص‌های خطاسنجی نشان داد که این مدل جهت ریزمقیاس‌نمایی آماری داده‌های مدل گردش عمومی جو HadCM3 و تولید داده‌های مصنوعی برای دوره آتی مناسب می‌باشد. که نتایج در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴ - عملکرد مدل LARS_WG با استفاده از شاخص های مختلف

ایستگاه سینوپتیک	عوامل خطاسنجی	RMSE	MAE	MBE	NSE	ضریب R^2
خرم آباد	متوسط دمای کمینه ماهانه	0.200	0.151	0.051	0.999	0.9991
	متوسط دمای بیشینه ماهانه	0.295	0.213	0.082	0.999	0.999
	متوسط بارش ماهانه	3.146	2.176	-0.334	0.993	0.995
	متوسط دمای کمینه ماهانه	0.179	0.143	0.113	0.994	0.9996

دزفول	متوسط دمای بیشینه ماهانه	0.235	0.188	0.089	0.9995	0.9995
	متوسط بارش ماهانه	5.137	3.584	1.431	0.978	0.9759
	متوسط دمای کمینه ماهانه	0.287	0.237	0.080	0.999	0.999
اراک	متوسط دمای بیشینه ماهانه	0.218	0.159	0.089	0.999	0.9997
	متوسط بارش ماهانه	6.356	4.099	2.161	0.883	0.9248

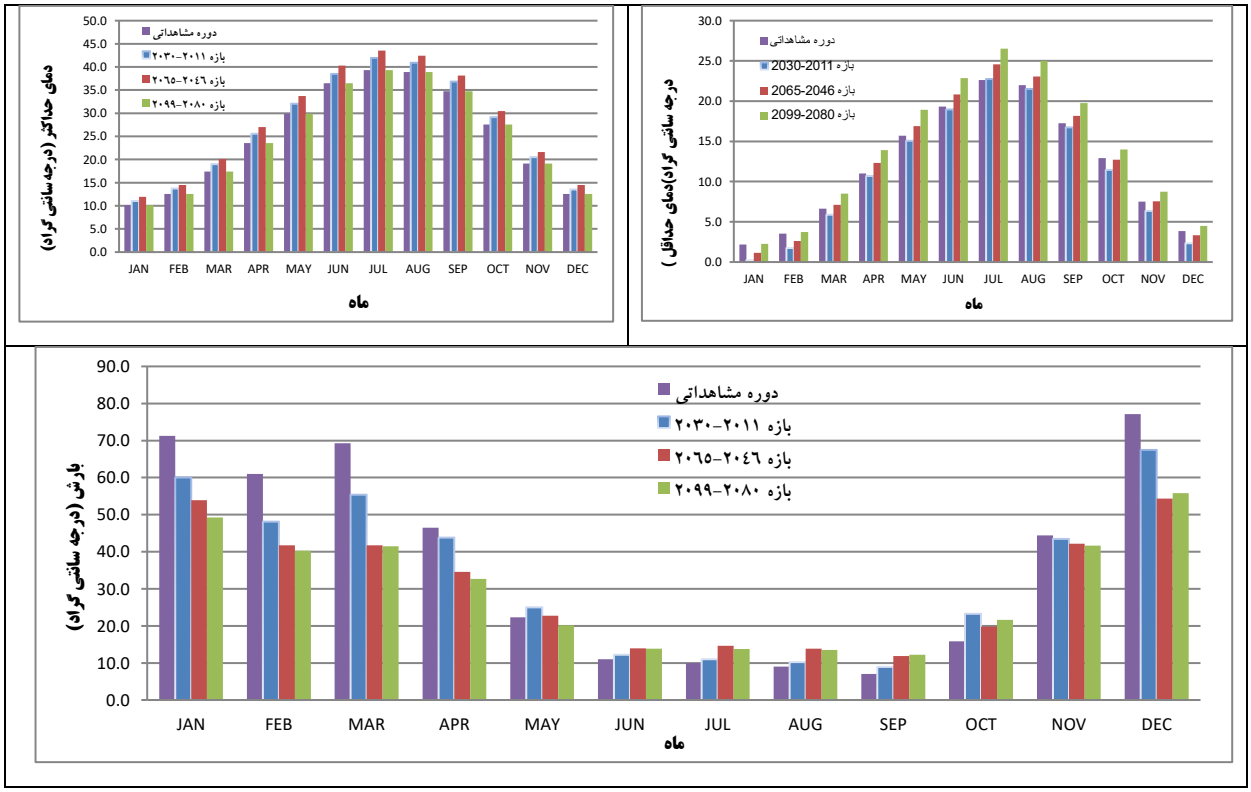
نتایج حاصل از مدل LARS-WG براساس متوسط سناریوی مورد بررسی و همچنین براساس متوسط پارامترهای اقلیمی در سطح حوزه‌آبخیز دز طی دوره آماری ۲۰۱۱-۲۰۹۹ و سه دوره زمانی مختلف (۲۰۱۱-۲۰۳۰و ۲۰۴۶-۲۰۶۵و ۲۰۸۰-۲۰۹۹) در جدول شماره ۵ آورده شده است.

جدول ۵- نتایج حاصل از مدل LARS_WG به طور متوسط سالانه بلند مدت

پارامتر	دمای حداقل	دمای حداکثر	بارش
میانگین دوره پایه	12.03	25.20	410.04
بازه ۲۰۱۱-۲۰۳۰	11.14	26.90	408.87
بازه ۲۰۶۵- ۲۰۴۶	12.52	28.18	365.38
بازه ۲۰۹۹-۲۰۸۰	14.05	29.69	356.09
میانگین دوره های آتی	12.57	28.25	376.78

همانطور که ملاحظه می شود دمای حداقل و حداکثر افزایش و میزان بارش نیز در تمام بازه‌ها کاهش یافته‌است. به گونه‌ای که متوسط بارش سطح حوضه از۴۱۰/۰۴ میلیمتر در دوره پایه به میانگین ۳۷۶/۷۸ میلیمتر در دوره‌های آتی رسیده و مقدار بارش به طور متوسط بلند مدت ۳۳/۲۶ میلیمتر (۸/۱۱ درصد) در دوره‌های آتی نسبت به دوره پایه کاهش پیدا کرده است، این مقدار کاهش در سطح حوضه در انتهای بازه پیش‌بینی شده (۲۰۸۰-۲۰۹۹) به ۳۵۶/۰۹ میلیمتر (۱۳/۱۵ درصد) رسیده است. در مورد پارامترهای دمایی نیز نتایج حاکی از افزایش دما در سطح حوضه است. این افزایش برای پارامترهای دمای حداقل و حداکثر به ترتیب ۰/۵۴ و۳/۰۵ درجه سلسیوس به طور متوسط در دوره های آتی است. همان طور که

ملاحظه می شود دمای متوسط دوره در سه دوره آتی به ترتیب ۰/۴۰۵، ۱/۷۳۵ و ۳/۲۵۵ درجه سلسیوس نسبت به دوره پایه افزایش می یابد. متوسط ماهانه بلند مدت دمای حداقل، دمای حداکثر و بارش سطح حوضه در دوره‌های آتی نسبت به دوره پایه نیز در شکل ۲ آورده شده است. همانطور که مشاهده می شود مقدار بارش در سطح حوضه در تمام دوره‌ها در ماه‌های جون، ژانویه، سپتامبر، آگوست و اکتبر و دوره های (۲۰۱۱-۲۰۳۰)و (۲۰۴۶-۲۰۶۵) در ماه می نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت. و در مورد دمای حداقل و حداکثر حوضه، به جز دمای حداقل دوره (۲۰۱۱-۲۰۳۰) که کاهش داشته است در بقیه دوره ها افزایشی بوده است.



شکل ۲- متوسط بلند مدت ماهانه دما و بارش سطح حوضه در دوره های آتی نسبت به دوره مشاهداتی (پایه)

جهت واسنجی پارامترهای مدل بارش رواناب از سال آبی (۲۰۰۲-۲۰۰۱) و جهت ارزیابی پارامترهای مدل نیز از سال آبی (۲۰۰۳-۲۰۰۲) استفاده شد، از آمار دبی ایستگاه هیدرومتری تله زنگ و دما و بارش ایستگاه سینوپتیک خرم آباد جهت شبیه‌سازی رواناب حاصل از بارش با استفاده از مدل بارش رواناب استفاده گردید. براساس نتایج حاصل میزان درصد اختلاف حجمی به خوبی توانسته است الگوی تغییرات رواناب در حوضه مورد مطالعه را شبیه‌سازی کند. مقایسه ظاهری هیدروگراف های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی شده امکان ارزیابی کلی و سریع دقت مدل را فراهم می‌کند به همین منظور، به مقایسه گرافیکی مقادیر جریان مشاهداتی وشبیه‌سازی شده پرداخته‌شد.

منابع

آذری م.، مرادی ح. ر.، ثقفیان ب.، فرامرزی م. ۱۳۹۲. ارزیابی اثرات هیدرولوژیکی تغییراقلیم در حوضه آبریز گرگانرود، نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی). ۲۷(۳): ۵۳۷-۵۴۷.

پرهمت ج.، ثقفیان ب.، صدقی ح. ۱۳۸۴. بررسی کاربرد مدل SRM در شبیه سازی رواناب حاصل از ذوب برف با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در حوضه‌های بدون آمار برف (مطالعه موردی

حوضه خرسان در کارون). مجله تحقیقات منابع آب ایران، ۱ (۱) : ۱-۱۱.

حجازی‌زاده ز.، حسینی س. م.، کربلایی‌درئی ع. ر. ۱۳۹۴. شبیه‌سازی متغیرهای اقلیمی استان سمنان با سناریوهای مدل گردش عمومی جو (HadCM3). مجله جغرافیا و مخاطرات محیطی. ۱۵: ۲۴-۱.

خسروانیان، ج.، اونق، م.، گودرزی، م.، حجازی، ا.، ۱۳۹۴، پیش بینی تغییرات پارامترهای آب و هواشناسی با استفاده از مدل LARS-WG در حوزه قره سو نشریه جغرافیا و برنامه ریزی دانشگاه تبریز، شماره ۵۳ جلد ۱۶ صص: ۱۱۶-۹۳.

رامک ز.، پرهمت ج.، صدقی ح.، فتاحی ا.، لشنی‌زند م. ۱۳۹۵. بررسی تغییرات رواناب حوضه آبریز تحت شرایط تغییراقلیم (مطالعه موردی حوضه آبریز کارون در محل پلشالو). دو فصلنامه تخصصی علوم‌ومهندسی آب-دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهواز. ۶(۱۳): ۷۹-۹۳.

شاهرخ وندی، منصور. مهران لشنی زند و معصومه خاکپور. ۱۳۸۸ .بررسی خشکسالی هیدرولوژیک و ارتباط آن با بارش در حوضه رودخانه خرم آباد. آمایش محیط، شماره ششم، تهران.

فتاحی ا.، دلاور م.، قاسمی الف. ۱۳۹۰. شبیه‌سازی رواناب ناشی از ذوب برف در حوضه‌های کوهستانی با استفاده از مدل SRM مطالعه موردی حوضه آبریز بازفت. نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی. ۲۰(۲۳): ۱۲۹-۱۴۱.

قاسمی الف.، فتاحی ا.، بابائی ا. ۱۳۹۲. بررسی نوسانات رواناب حاصل از ذوب برف تحت تاثیر پدیده تغییراقلیم در دهه‌های آینده. نشریه پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، ۴(۱۳،۱۴): ۱۱۱-۱۲۲.

گودرزی م.، صلاحی ب.، حسینی س. ا. ۱۳۹۴. بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر تغییرات رواناب سطحی (مطالعه موردی: حوضه آبریز دریاچه ارومیه). مجله اکوهیدرولوژی. ۲(۲): ۱۷۵-۱۸۹.

گودرزی م.، حسینی س. ا. ، مسگری،ا.، ۱۳۹۵، مدلهای آب و هواشناسی، انتشارات آذر کلک، زنجان، ایران.

Beecham, S., Rashid, M., and Chowdhury R.K., 2014. Statistical downscaling of multi-site daily rainfall in a South Australian catchment using a Generalized Linear Model. International Journal of Climatology. 34(14): 3654–3670.

Jones, R.N., and Page. C.M. 2001. Assessing the risk of climate change on the water resources of the Macquare river catchment. International Congress on modelling and simulation. Modelling and simulation society of Australia and New Zealand. Canberra: 673-678.

Hashmi, M.Z., Shamseldin, A.Y., and Melville, B.W. 2011. Comparison of SDSM and LARS-WG for simulation and downscaling of extreme precipitation events in a watershed. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment. 25(4): 475–484.

HAYES M., 2000 "Drought Indices" National Drought Mitigation Center, University of NebraskaLinclon.

Shukla S and Wood AW, 2008. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. Geophysics Research Letter 35: 1-8.

Nalbantis N and Tsakiris G, 2009. Assessment of hydrological drought revisited. Water Resources Management 23: 881-897.

Nalbantis, G. Tsakiris(2008). Assessment of Hydrological Drought Revisited. Springer Science + Business Media B.V. 2008.

Shafer, B.A. and Dezman, L.E.1982. Development of a Surface Water Supply Index (SWSI) to assess the severity of drought condition in snowpack runoff area, Proc. Western Snow Conf., pp 164-175.

Climate Change Impacts on the Intensity of Droughts in Dez Basin

Mahshid Karimi3 Massoud Goodarzi1, Navid dehghani2,

* Corresponding author, Associate Professor, SCWMRI, AREEO, Tehran, Iran.
massoudgoodarzy@gmail.com

Associate Professor, SCWMRI, AREEO, Tehran, Iran.

PhD, Department of Soil conservation & Watershed Management, Kermanshah Center for Aricultural research, AREEO, Iran.

Abstract

Studying climate change and its impact on future droughts can help water resource management planning. In this study, the impact of climate change on the SPI and hydrological meteorological indices of SDI and SWSI in the Dez catchment under A1B scenario using HadCM3 general circulation model and SRM rainfall-runoff model over three short-term periods (20-20 2011), between Long-term (2065-2046) and long-term (2099-2080) were investigated using the exponential LARS-WG model. The results of observational and simulated LARS-WG simulation results using K-S and T-tests and RMSE, MAE, NSE and MBE calculations show that the model performs well in simulating minimum temperature, maximum temperature, and precipitation. With observational data. The results of climate model show that the average

temperature of the basin in the next three periods is 0.405, 1.735 and 3.255 degrees Celsius respectively. Based on the results of the drought indices, it is expected that in future periods (2030-2011, 2065-2065 and 2080-2080) the average monthly SPI drought intensity will be 1.2, 2.7 and 8.2%, respectively. The monthly SDI drought index increased by 1.7, 3.3 and 11.2 percent, respectively, and the average monthly SWSI drought index increased by 0.5, 2, and 8.6 percent, respectively, compared to the baseline period.

Keywords: General Circulation Models, Climate Change, SPI, SDI , SWSI.

تحلیل روند روز های همراه با گرد و غبار در غرب کشور

شکیلا غلامی[۱]، بیتا نقی زاده[۲] محمد دارند [۳]

۱- کارشناسی ارشدآب و هوای کاربردی ،دبیر جغرافیا ناحیه یک سنندج
۲- کارشناسی ارشد تاریخ اسلامی ،دبیر تاریخ صومای برادوست ارومیه
۳- استاد تمام آب و هواشناسی دانشکده منابع طبیعی دانشگاه کردستان

آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول (shakilagholami396@gmail.com

چکیده

هدف از انجام این پژوهش تحلیل و شناخت روند روز های همراه با گرد و غبار در نیمه غربی کشور است .برای نیل به این هدف داده های روزانه ۱۳۹ ایستگاه همدید هواشناسی را در نیمه‌ی غربی کشور در هفت استان مورد واکاوی مربوط به حداقل قدرت دید(vvmin) و گزارش روز های همراه با گردوغبار (ndu) طی بازه زمانی ۱۹۵۵/۱/۱ تا ۲۰۲۴/۱۲/۳۱ به مدت ۲۵۶۲۰ روز بهره گرفته شده است .سپس روند فراوانی روز های همراه با گرد و غبار و قدرت دید در مقیاس سالانه و ماهانه در ایستگاه های همدید مورد واکاوی با روش ناپارامتریک من کندال اصلاح شده و تخمین گر شیب سن در سطح اطمینان ۹۰ درصد محاسبه گردید.نتایج نشان می دهد در برخی از ایستگاه ها در نیمه غربی کشور روند افزایشی و در برخی دیگر از ایستگاه ها کاهشی است ، به نظر می رسد افزایش روند تعداد روزهای گردو غبار در برخی از ایستگاه ها با عوامل محلی ارتباط دارد که بیشترین بسامد و فراوانی روزهای همراه با گرد و غبار در ماه های خرداد و تیر واردیبهشت مشاهده می شود . قدرت دید در ماه های سرد سال روند کاهشی بودهاست..

.

کلید واژه‌ها :گردوغبار،قدرت دید،ناپارامتریک من کندال اصلاح شده

مقدمه

گرد و غبار پدیده ای طبیعی و انسانی است که تاثیر شگرفی بر سلامت انسان ، اکوسیستم های طبیعی و اقتصاد دارد در دهه های اخیر گرد و غبار به عنوان یکی از چالش برانگیز ترین پدیده زیست محیطی است که روند و شدت آن افزایشی بوده است . در این زمینه پژوهش های بسیاری در مناطق مختلف ایران و جهان انجام شده است . برای نمونه امینی و همکاران (۱۳۹۸)در پژوهش خود با آنالیز آمار جمع آوری شده در شهرهای استان کردستان در تمام ماه های سال و در بازه ی زمانی سال ۱۳۶۶ تا ۱۳۹۵ تغییرات وضعیت گردو غبار در سطوح مختف را بررسی کردند. نتایج نشان داد که تعداد روزهای همراه باگرد و غبار در کردستان روند افزایشی داشته است بیشترین میزان گرد و غبار در شهر سنندج اتفاق افتاده است در بین ماه های سال، خرداد ماه بیشترین فراوانی روزهای همراه با گرد و غبار به خصوص در سال ۱۳۸۸ به همراه داشته است نتایج این تحقیق می تواند تشخیص و بررسی عوامل موثر بر شکل گیری این پدیده در غرب کشور را آسان تر نماید. گودرزی و همکاران (۱۳۹۶) توزیع زمانی و مکانی روزهای همراه با گردوغبار در غرب و جنوب غرب ایران و در سطح ایستگاه‌های هواشناسی واقع در سه استان ایلام، خوزستان و کرمانشاه مورد بررسی قرار دادند. بدین منظور آمار روزهای همراه با گردوغبار از سازمان هواشناسی کشور برای دوره ۱۹۸۶ تا ۲۰۰۸ اخذ گردید. در ابتدا مجموعه داده های لازم از نظر نرمال بودن بررسی گردید، سپس توزیع زمانی این پدیده در سطح ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه به صورت نمودار مشخص گردید و در ادامه براساس سامانه اطلاعات جغرافیایی و در محیط GIS توزیع مکانی سالانه و ماهانه روزهای همراه با گردوغبار در منطقه غرب و جنوب غرب کشور براساس روش‌های درون یابی مختلف مشخص گردید. نتایج حاصل نشان داد که تعداد روزهای همراه با گردوغبار در ایستگاه‌های دهلران، اهواز و دزفول در بالاترین سطح قرار دارد و در جنوب استان‌های ایلام و خوزستان بحرانی‌ترین شرایط مشاهده شده است و از شمال به جنوب منطقه تعداد روزهای گرد و¬غباری افزایش می‌یابد. همچنین نتایج حاصل نشان داد که توزیع رخداد این پدیده، تحت تأثیر سیستم‌های اقلیمی منطقه‌ای به دلیل شرایط ناهمواری‌ها و سطح ارتفاعی غرب کشور یکسان نیست و بیشترین روزهای همراه با گردوغبار در جنوب غرب برای استان خوزستان مشاهده می‌شود. در مناطق غرب در اواسط فصل بهار، اردیبشهت ماه از فراوانی رخداد بالایی برخوردار می باشد.

داده ها و روش تحقیق

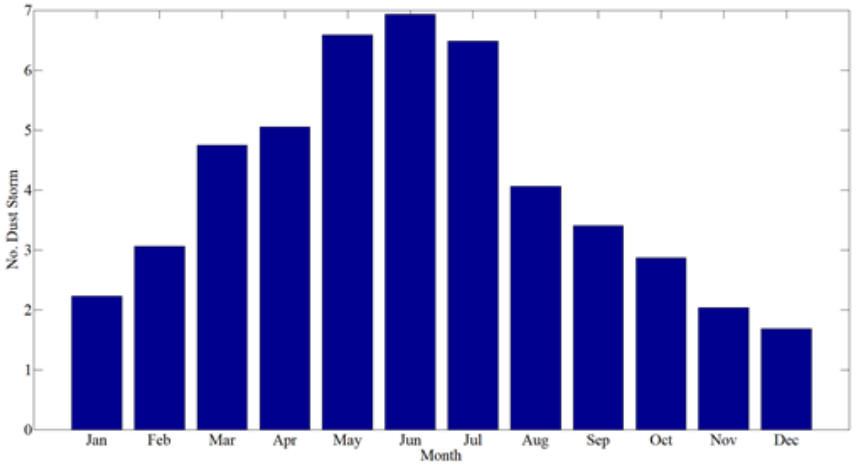
هدف از انجام این پژوهش تحلیل روند زمانی و مکانی روز های همراه با گرد و غبار در نیمه غربی کشور است .در شناخت روند روزهای همراه با گرد و غبار در نیمه غربی برای آنکه ارزیابی صحیحی از دادها های آماری داشته باشیم . داده های روزانه ایستگاه همدید هواشناسی از منطقه مورد واکاوی قرار گرفته که شامل استان های کردستان ، کرمانشاه ، آذربایجان غربی ، همدان ، ایلام ، لرستان و خوزستان است .برای انجام این پژوهش از داده های روزانه ۱۳۹ ایستگاه همدید هواشناسی در نیمه‌ی غربی کشور مورد واکاوی مربوط به حداقل قدرت دید(vvmin) و گزارش گردوغبار (ndu) طی بازه زمانی ۱۹۵۵/۱/۱ تا ۲۰۲۴/۱۲/۳۱ به مدت ۲۵۶۲۰ روز استفاده شده است. برای شناخت روند روزهای همراه با گردوغبار در

نیمه‌ی غربی کشور در ابتدا برای شناخت کلی رفتار زمانی و مکانی پدیده، متوسط بلندمدت فراوانی روزهای همراه با گردوغبار طی ماههای مختلف سال و سالانه حساب شد. نقشه های مربوط به میانگین بلند مدت فراوانی روزهای مربوط به گردوغبار در مقیاس ماهانه و سالانه برای هر ایستگاه ترسیم شد. برای شناخت روز همراه با گردوغبار شرط اساسی آن بود که در آن روز گزارش رخداد پدیده گردوغبار (ndu) در ایستگاه ثبت شده باشد و عدد آن غیر صفر بوده باشد. سپس در همان روز، حداقل قدرت دید نیز در نظر گرفته شد. دلیل آن این بود که ممکن است حداقل قدرت دید دلیلی غیر از گردوغبار داشته باشد و ناشی از سرما و ناپایداری هوا باشد که پدیده شایعی در فصول سرد سال به حساب می‌آید.

سپس روند فراوانی روزهای همراه با گردوغبار و قدرت دید برای هر ماه از سال و در مقیاس سالانه در ایستگاه‌های مورد واکاوی به کمک روش ناپارامتریک من کندال اصلاح شده در سطح اطمینان ۹۰ درصد محاسبه شد. جهت برآورد نرخ تغییرات از تخمینگر شیب سن بهره گرفته شد. شرط محاسبه روند و نرخ تغییرات بر روی سری زمانی هر ایستگاه بدین قرار بود که دست کم ۱۰ سال ایستگاه مورد واکاوی داده ها ثبت کرده باشد. در غیر اینصورت روند و نرخ روند برای آن محاسبه نشد. از بین ۱۳۹ ایستگاه، ۹۰ ایستگاه دارای داده های بیش از ۱۰ سال بودند که به لحاظ مکانی پوشش مناسبی را بر روی گستره مورد واکاوی نشان می دهند. فراوانی روز های همراه با گرد و غبار با استفاده از نرم افزار متلب انجام گردیده است.

نتایج

یافته های حاصل از شناخت روند روزهای همراه باگرد و غبار که در نمودار نمودار توزیع ماهانه روزهای همراه با پدیده گردوغبار را طی دوره آماری مورد واکاوی برای ایستگاه‌های مورد مطالعه در شکل۱ ارائه شده است. بر اساس نتایج ارائه شده، بیشترین فراوانی گردوغبار در ماه‌های گرم سال (عموماً می تا جولای) مشاهده می‌شود. این الگو نشان‌دهنده تأثیرپذیری وقوع پدیده گردوغبار از فاکتورهای اقلیمی نظیر دمای بالا، خشکی سطح زمین و افزایش سرعت بادهای سطحی در این دوره است. کاهش رطوبت، سبب خشک‌شدن بسترهای زمین‌های سست و مستعد فرسایش می‌شود. همچنین مطابق نمودار شکل ۱، فراوانی تعداد روزهای همراه با گردوغبار در ماه‌های سرد سال به کمترین مقدار خود می‌رسد. بدین ترتیب در ماه‌های نوامبر، دسامبر و ژانویه سال وقوع گردوغبار به کمترین میزان خود می‌رسد. از دلایل این کاهش می توان به افزایش رطوبت نسبی هوا و خاک و پایداری جوی اشاره نمود.

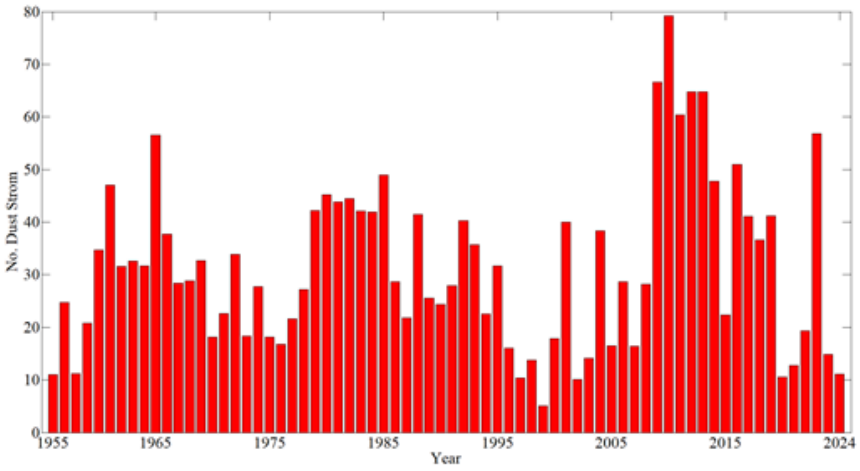


شکل ۱ فراوانی روزهای همراه باپدیده گرد و غبار در ماه های مختلف سال

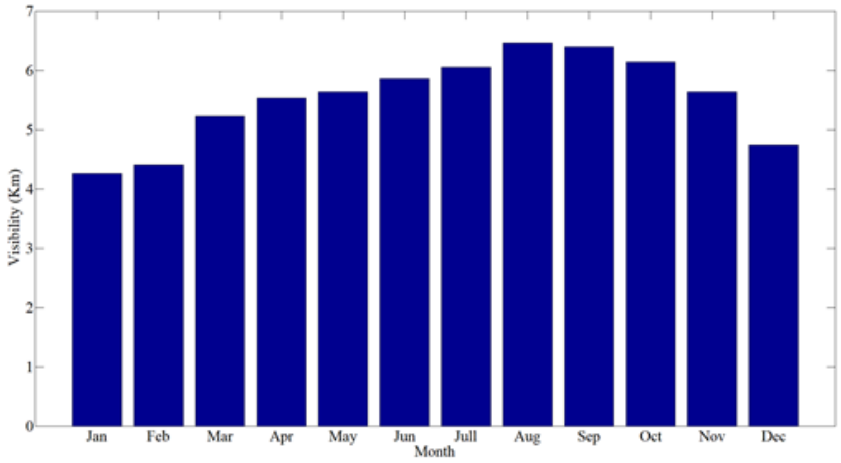
روند زمانی تعداد روزهای گردوغبار ایستگاه‌های مورد مطالعه در طی دوره آماری ۱۹۵۵-۲۰۲۴ در شکل ۲ ارائه شده است. این نمودار، بیانگر فراز و فرودهای پدیده گردوغبار در مقیاس سالانه می‌باشد. مطابق نمودار روند افزایشی در برخی بازه‌های زمانی از جمله ۱۹۵۵-۱۹۶۵، ۱۹۹۸-۲۰۰۰، ۲۰۰۴-۲۰۰۹، ۲۰۱۹-۲۰۲۲، ممکن است ناشی از ترکیبی از عوامل انسانی و طبیعی شامل گسترش خشکسالی‌های اقلیمی و افزایش طوفان‌های محلی، تغییرات در کاربری اراضی و کاهش پوشش گیاهی باشد.

از سوی دیگر، کاهش در تعداد روزهای گردوغباری در برخی سال‌ها مانند ۱۹۶۴-۱۹۶۹، ۱۹۹۱-۱۹۹۸، ۲۰۱۸-۲۰۲۰ می‌تواند بیانگر تأثیر مثبت مجموعه‌ای از عوامل کنترلی یا طبیعی ازجمله تثبیت خاک در منابع گردوغبار از طریق پروژه‌های بیولوژیک و مکانیکی و احیای احیای منابع آبی خشک‌شده باشد. بدین ترتیب می‌توان بیان نمود که بیشترین فراوانی تعداد روزهای همراه با گرد و غبار در ماه ژوئن و کمترین آن در ماه دسامبر بوده است. همچنین در مقیاس سالانه نیز

بیشترین فراوانی تعداد روزهای همراه با گرد و غبار در سال۲۰۰۹ (۱۳۸۷-۱۳۸۶) و کمترین آن در سال ۱۹۹۸ (۱۳۷۶-۱۳۷۷) بوده است.



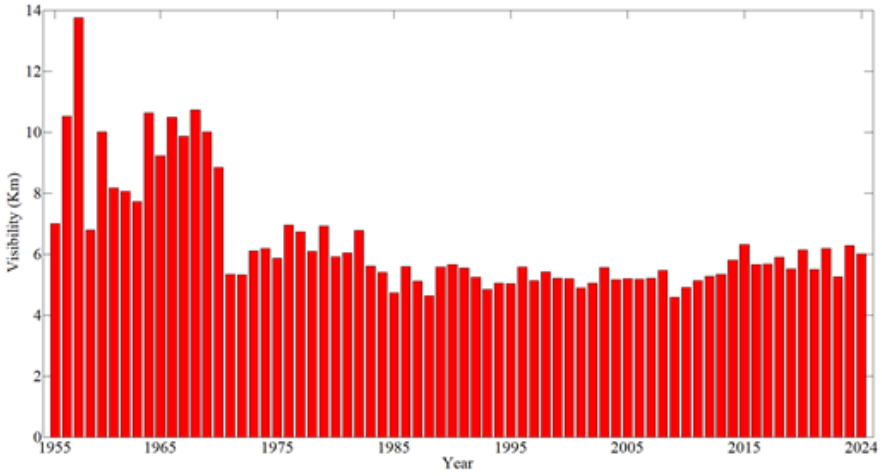
شکل۲ سری زمانی بسامد رخداد روزهای همراه با گردوغبار طی دوره مورد واکاوی (۱۹۵۵-۲۰۲۴)



شکل ۳ حداقل قدرت دید در روزهای همراه با گردوغبار در ماه‌های مختلف سال

توزیع زمانی قدرت دید افقی ایستگاه‌های مورد مطالعه در ماه‌های مختلف را نشان می‌دهد. این متغیر، از شاخص‌های کلیدی شدت پدیده گردوغبار به‌شمار می‌رود، چرا که رابطه مستقیم با غلظت ذرات معلق در جو دارد. تحلیل این نمودار نشان می‌دهد که کاهش شدید قدرت دید در ماه‌های مختلف، از نظر زمانی الگوهای متفاوتی دارد که مرتبط با عوامل اقلیمی، فیزیکی و دینامیکی متعددی می‌باشد. در ماه‌های سرد سال نظیر آذر، دی و بهمن، هرچند کاهش دید افقی مشاهده می‌شود، اما منشأ این کاهش الزاماً به گردوغبار باز نمی‌گردد. در این ماه‌ها، عواملی چون وارونگی دمایی، بخار و رطوبت اشباع نقش اصلی در کاهش قدرت دید دارند. به‌ویژه در شب‌های صاف و سرد، پدیده مه تابشی شکل می‌گیرد که می‌تواند دید را به‌طور موقتی و محدود کاهش دهد. همچنین، در اثر پایداری‌های زمستانه، لایه‌های سرد و سنگین هوا در نزدیکی

سطح زمین حبس می‌شوند و امکان تهویه عمودی جو کاهش می‌یابد؛ پدیده‌ای که منجر به تجمع آلاینده‌ها و بخارات سطحی شده و در نهایت باعث کاهش قدرت دید می‌گردد. بنابراین، کاهش دید افقی در فصل سرد، برخلاف تابستان، لزوماً بیانگر شدت گرفتن گردوغبار نیست.



شکل ۴ سری زمانی حداقل قدرت دید در روزهای همراه با گردوغبار طی دوره مورد واکاوی (۱۹۵۵-۲۰۲۴)

حداقل قدرت دید ایستگاه های مورد مطالعه در روزهای همراه با گردوغباردر طی دوره ۱۹۵۵-۲۰۲۴ در شکل ۴-۴ ارائه شده است. بررسی دقیق نمودار نشان می‌دهد که در سال ۲۰۰۹، حداقل قدرت دید افقی به پایین‌ترین مقداررسیده است لازم به ذکر است مطابق نتایج شکل ۲ این سال بیشترین بسامد رخداد روزهای همراه با گردوغبار را داشته است. چنین ارقامی بیانگر وقوع طوفان‌های گردوغبار شدید و بحرانی هستند. در مقابل، سال ۱۹۵۷ حداقل قدرت دید بیشتری را در طول دوره واکاوی داشته است، از این‌رو می‌توان گفت که گردوغبار در آن سال‌شدت کمتری داشته است. همچنین در برخی سال‌ها ممکن است تنها یک یا دو رخداد گردوغبار شدید رخ داده باشد اما همین رخدادها از نظر قدرت تخریب و پیامدهای بهداشتی، سال را به یک دوره بحرانی از منظر شدت تبدیل کرده‌اند. در مقابل، ممکن است سالی با تعداد بیشتری از روزهای گردوغبار وجود داشته باشد اما همگی با شدت‌های خفیف یا متوسط، که اثرات آن نسبتاً محدود بوده است. از این رو، تحلیل شدت (شکل ۴-۴) و تحلیل بسامد (شکل ۴-۲) باید در کنار یکدیگر و مکمل هم به کار گرفته شوند تا تصویری جامع از رفتار گردوغبار در منطقه به‌دست آید.

از نظر اقلیمی، شدت رخدادهای گردوغبار با کاهش دید افقی می‌تواند تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله خشکسالی‌های شدید، کاهش پوشش گیاهی، فعالیت منابع گردوغبار داخلی و برون‌مرزی، و شرایط خاص گردش عمومی جو باشد. به‌ویژه در سال‌هایی که توده‌های گردوغبار از کانون‌های خارجی مانند بیابان‌های عراق و سوریه وارد کشور شده‌اند، کاهش‌های شدیدی در قدرت دید ثبت شده است.

بحث و نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش در زمینه بررسی روند زمانی و مکانی روزهای همراه با گردوغبار در غرب ایران طی بازه زمانی ۱۹۵۵ تا ۲۰۲۴، حاکی از روندی افزایشی در فراوانی و شدت وقوع این پدیده به‌ویژه در ماه‌های گرم سال است. در عین حال، کاهش قدرت دید در بسیاری از ایستگاه‌ها به کمتر از ۴ کیلومتر نیز مؤید وقوع طوفان‌های گردوغبار شدید در برخی سال‌ها و ماه‌ها بوده است.در این پژوهش دو فرضیه را بررسی نموده ایم.۱) بیشترین افزایش بسامد روزهای همراه با گردوغبار در خرداد ماه است. مطالعات انجام‌شده در بخش تحلیل ماهانه و بررسی روندها نشان داد که ماه‌های خرداد و تیر از بیشترین تعداد روزهای همراه با گردوغبار در کل منطقه برخوردار بوده‌اند. در ماه خرداد، بیشینه بسامد در استان‌هایی چون ایلام، کرمانشاه و دشت خوزستان ثبت شده است در چارچوب تحلیل‌های فصل حاضر، نوآوری اساسی این پژوهش در به‌کارگیری رویکردی تلفیقی برای سنجش و ارزیابی روند گردوغبار در غرب ایران نهفته است.یکی دیگر از فرضیه ها این است که روند بسامد روزهای همراه با گردوغبار در غرب کشور افزایشی است اما.در حالی که اغلب مطالعات پیشین صرفاً یکی از شاخص‌های ارزیابی گردوغبار نظیر تعداد روزهای همراه با گردوغبار (NDU) یا داده‌های سنجش‌ازدور مانند AOD را مدنظر قرار داده‌اند، این تحقیق با استفاده همزمان از دو شاخص کلیدی NDU و قدرت دید افقی ثبت‌شده در ایستگاه‌های سینوپتیک، امکان بررسی همزمان فراوانی وقوع و شدت پدیده را در یک بازه زمانی بلندمدت فراهم ساخته است. این رویکرد، نه تنها دقت تحلیل را افزایش داده بلکه قابلیت شناسایی تغییرات هم‌زمان در جنبه‌های کمی و کیفی گردوغبار را نیز تقویت کرده است. افزون بر این، پیوند دادن تغییرات این دو شاخص با شرایط همدیدی، اقلیمی و مکانی، چارچوب تحلیلی جامعی ایجاد نموده که قادر است علل و پیامدهای روند افزایشی گردوغبار را با وضوح بیشتری آشکار سازد. در مجموع، همسویی نتایج تحقیق حاضر با مطالعات یادشده، اعتبار علمی یافته‌ها را تقویت کرده و نشان می‌دهد که روند افزایشی وقوع گردوغبار در غرب ایران نه یک پدیده محلی، بلکه بخشی از روندی منطقه‌ای و جهانی است که تحت تأثیر عوامل اقلیمی، همدیدی و انسانی قرار دارد. ۲) روند بسامد روزهای همراه با گردوغبار در غرب کشور افزایشی است. مطابق نتایج حاصل از آزمون روند، بخش‌هایی از منطقه غرب کشور به‌ویژه استان‌های ایلام، خوزستان و کرمانشاه طی دهه‌های اخیر با روند افزایشی معناداری در تعداد روزهای گردوغبار مواجه بوده‌اند. این روند در ماه‌های گرم سال آشکارتر است، به‌ویژه در ماه‌های آوریل تا جولای که تلفیقی از عوامل اقلیمی نظیر دمای بالا، کاهش رطوبت خاک، تشدید تبخیر و وزش بادهای غربی–جنوب‌غربی زمینه خیزش و انتقال گردوغبار را فراهم کرده‌اند. همچنین روند سالانه در برخی از ایستگاه‌ها در استان‌های خوزستان، لرستان و ایلام نیز افزایش معنی‌دار را نشان داده‌اند، که احتمالاً بازتابی از اثرات تشدید تغییرات اقلیمی، خشک‌سالی‌های فراگیر، کاهش پوشش گیاهی و تغییر در کاربری اراضی در نواحی غربی ایران و نیز تاثیرپذیری از منابع فرامرزی مانند بیابان‌های عراق و سوریه است. بنابراین، فرضیه نخست پژوهش مبنی بر روند افزایشی بسامد روزهای همراه با گردوغبار در غرب کشور، در بخش قابل توجهی از منطقه مورد مطالعه تأیید می‌شود، هرچند که این روند به‌صورت یکنواخت در تمامی ایستگاه‌ها مشاهده نشده و در برخی نواحی نظیر جنوب خوزستان و غرب لرستان، کاهش‌هایی نیز گزارش شده است.

منابع

ابراهیمی خوسفی، زهره . (۱۴۰۱). تحلیل اثر سرعت باد و رطوبت خاک بر تغییرات دید افقی ناشی از رخداد گردوغبار در مناطق خشک (منطقهٔ مطالعاتی: جنوب شرق ایران)، مهندسی اکوسیستم بیابان، ۸ (۲۴): ۱۲۱-۱۰۹.

احمدیان، محمدعلی، و اصغری، سمیرا. (۱۳۹۲). عواقب زیست محیطی کاهش سطح آب دریاچه ارومیه و راهکارهای نجات آن. جغرافیایی سرزمین، ۱۰(۴۰): ۸۱-۹۶.

اسدی‌لطفی، ر؛ علی‌اصغر آل‌شیخ، سعید بهزادی. (۱۳۹۷). مروری بر مدل‌های پیش‌بینی پدیده گردوغبار و تکنیک‌های جمع‌آوری داده‌ها. نشریه علمی ترویجی مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی، دوره نهم، شماره ۴، آذرماه ۱۳۹۷.

امینی، عطا و خالدیان، حسین و محمودی، پروانه و خالدی، والا، (۱۳۹۸)، بررسی تعداد روزهای همراه با آلودگی گرد و غبار در استان کردستان،چهاردهمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران،ارومیه.

انصافی مقدم، ط. (۱۳۹۹). بررسی شاخص عمق اُپتیکی آئروسل (AOD) در رویدادهای گردوغبار در جنوب غربی ایران. طبیعت ایران، ۵(۶), ۵۵-۶۷ .

رفیعی مجومرد ز، یزدانی م، رحیمی م. (۱۳۹۵)، تحلیل روند تعداد روزهای همراه با گرد و غبار در ایران. خشک بوم, ۶(۲), ۱۱-۲۳ .

رفیعی مجومرد، ز و یزدانی، م و پاکدین، م، (۱۳۹۳)، تجزیه و تحلیل روند تعداد روزهای همراه با گرد و غبار در دوره آماری ۲۰۰۵-۱۳۶۵ در ایران بااستفاده از آزمون های آماری ناپارامتری من -کندال، دومین همایش ملی بیابان با رویکرد مدیریت مناطق خشک و کویری، سمنان

Analysis of the Trend of Dusty Days in the Western Half of the Country

Shakila gholami [1],bita naghizadeh[2],mohammad darand

MASTER OF APPLIED METEORLOGY,GEOGRAPHY DEPARTMENT,SANANDAJ.

BROADUST URMIA 2-MASTER OFISLAMIC HISTORY,HISTORY DEPARTMENT,SOMA

3-FULL PROFESSOR OF CLIMATOLOGY AT THE FACULTYOF NATURAL RESOURCES,UNIVERSITY KURDISTAN

* Corresponding author: Email

shakilagholami396@gmail.com

Abstract

Dust is one of the most important climatic and environmental hazards in the western regions of Iran, which has increased in recent decades and has had widespread consequences on human health, natural resources, agriculture, and air quality. The aim of this study was to analyze the temporal and spatial trends of dusty days in the western regions of the country during the long-term statistical period from 1955 to 2024. For this purpose, daily data from meteorological stations were used to study dust and horizontal visibility. The nonparametric Mann-Kendall test and the age slope estimator were used to examine the trend of changes at monthly and annual levels. The results showed that in most of the studied stations, especially in the provinces of Ilam, Kermanshah, Khuzestan, and Lorestan, the trend of the frequency of dusty days was significantly increasing. The highest rate of increase was observed in the warm months of the year, especially June and July. In some stations, visibility on dusty days has decreased to less than 4 km, which confirms the high intensity of the events. Also, a comparison between stations showed that this phenomenon does not follow a uniform temporal and spatial pattern and significant differences in trends, intensity and frequency are observed between different locations. In some areas, decreasing trends have also been recorded, which are probably due to the effects of human interventions such as soil stabilization projects, vegetation restoration and reduction of wind erosion hotspots. These findings, while confirming the research hypotheses, indicate an intensification of dust activities in the western regions of the country in recent decades. From a practical point of view, the results of this study can be used as a basis for policy-making in the areas of environmental monitoring, designing early warning systems, natural resource management and reducing the vulnerability of affected areas.

Keywords: Dust, Climate Trend, Mann-Kendall Test, Visibility, Western Regions of Iran, Spatial Analysis

تاثیر مدیریت آبیاری بر تبخیر و تعرق و شاخص های آبی در کشت گوجه‌فرنگی

جواد رمضانی مقدم[۱]*، متینه اعتمادی‌نیا[۲]، یاسر حسینی[۳]، علی رسول‌زاده[۴]، مجید رئوف[۵]

۱*- دانشیار دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی (نویسنده مسئول)

۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشگاه محقق اردبیلی

۳، ۴ و ۵- استاد دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی ، دانشگاه محقق اردبیلی

آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول J_ramezani@uma.ac.ir

چکیده

متاسفانه در دهه‌های اخیر خشک‌سالی‌های پیاپی و کاهش منابع آب (از نظر کمی و کیفی) موجب نگرانی‌های زیادی از بابت تولید محصولات کشاورزی شده است. مدیریت آبیاری در کشاورزی از راهکارهای کاهش اثرات خشکسالی در سال‌های اخیر بوده است. بدین منظور در این تحقیق تاثیر مدیریت آبیاری بر پارامترها و شاخص‌های آبی در کشت گوجه‌فرنگی (در خاک اصلاح شده با خاک‌اره) مورد بررسی قرار گرفته است. این تحقیق به صورت فاکتوریل و در قالب طرح بلوک‌های کاملا تصادفی با چهارتکرار انجام شده است. تیمارهای این آزمایش شامل مدیریت آبیاری در چهار سطح آبیاری (با مقادیر تخلیه مجاز رطوبتی ۲۰، ۵۰، ۶۵ و ۸۰ درصد) و اختلاط خاک اره با خاک در پنج سطح (صفر، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد حجمی) بودند. بر اساس نتایج این پژوهش، مدیریت آبیاری بر تبخیر و تعرق کل، میزان زه‌آب خروجی، عمق آب آبیاری، شاخص کارآیی مصرف آب و بهره‌وری مصرف آب در سطح یک‌درصد معنی‌دار بود. به طور نمونه با افزایش تخلیه مجاز رطوبتی از ۲۰ به ۸۰ درصد، مقادیر تبخیر و تعرق کل، میزان زه‌آب خروجی، عمق آب آبیاری، شاخص کارآیی مصرف آب و بهره‌وری مصرف آب به‌ترتیب ۱۲/۶، ۲۲/۳۲، ۱۳/۶، ۷۵/۳۳ و ۷۵/۰۳ درصد کاهش یافتند.

کلید واژه‌ها : آب مصرفی، تخلیه مجاز رطوبتی، خاک‌اره، کم‌آبیاری، گوجه‌فرنگی.

مقدمه

در سال‌های اخیر، خشکسالی در اکثر مناطق جهان به‌خصوص مناطق خشک و دارای آب و هوای گرم و خشک اثرات مخرب زیادی در کشاورزی ایجاد کرده است. کشور ایران نیز جزو کشورهای دارای آب و هوای خشک و نیمه‌خشک (میانگین بارش کمتر از ۲۵۰ میلی‌متر در سال) است. این مقدار حدود یک سوم میانگین بارش جهانی می‌باشد. کاهش کیفی و کمی منابع آب (زیرزمینی و سطحی) و عدم مصرف صحیح آب در بخش‌های مختلف سبب شده است که مدیریت آب در ایران با مشکلات و چالش‌هایی مواجه شود (Castillo et al., 2021؛ رسول‌زاده و رئوف، ۱۴۰۲). از دیگر عوامل کاهش تولید محصولات کشاورزی علاوه بر بارندگی کم و پراکنش نامتعادل آن، می‌توان افت سطح آب زیرزمینی و نقصان آب رودخانه‌ها اشاره کرد. البته باید در نظر داشت سهم مصارف آب ایران در بخش‌های مختلف متفاوت است، به‌طوری که سهم بخش‌های کشاورزی، شرب و صنعت از کل آب‌مصرفی به‌ترتیب برابر ۹۰/۹، ۶/۸ و ۲/۳ درصد است (یوسفی و همکاران، ۱۳۹۰ و رسولی قادی و بلورچی، ۱۳۹۴). مدیریت آب مصرفی در کشاورزی از مهمترین روش های صرفه‌جویی و استفاده بهینه از آب است که رد شرایط خشکسالی می‌تواند بسیار کارگشا باشد.کم‌آبیاری، یکی از راهکارهای بهینه‌سازی مصرف آب در مدیریت آبیاری است. امروزه در اکثر مناطق ایران، اعمال کم‌آبیاری (البته معمولا در مقادیر کم ۱۰ تا ۲۰ درصد) معمول است. در این حالت اگر چه به گیاه اندکی تنش وارد می‌شود اما آب ذخیره شده می‌تواند برای سایر بخش‌های مزرعه که آب ندارند استفاده شود. روش دیگر افزایش دور آبیاری یا تأخیر در زمان آبیاری هست (خیرابی و همکاران، ۱۳۷۵؛ مهرابی گوهری و اسدی، ۱۳۹۶؛ اعتمادی‌نیا، ۱۴۰۰؛ Abdelraouf et al., 2020). در ادامه برخی تحقیقات انجام شده در این زمینه ارایه شده است.

دهقان و همکاران (۱۳۹۴) تأثیر کم‌آبیاری را بر رشد ریشه، عملکرد و اجزای عملکرد گوجه‌فرنگی بررسی کردند. چهار سطح تیمار آبیاری در این تحقیق شامل۱۰۰، ۸۰، ۶۰ و ۴۰ درصد تأمین نیاز آبی گیاه بود. نتایج این تحقیق نشان داد که تیمار آبیاری دارای اثر معنی‌دار (در سطح یک‌درصد) بر عملکرد و اجزای عملکرد گوجه‌فرنگی است. همچنین بیشترین میانگین وزن میوه (۶۰۲/۵۳ گرم) ، حجم ریشه (۰/۳۸ لیتر) و طول ریشه (۲۱۷۶۱ سانتی‌متر) مربوط به تیمار آبیاری کامل بود.

کم‌آبیاری و مدیریت آب مصرفی علاوه بر تاثیر بر عملکرد، می‌تواند بر میزان تبخیرو تعرق گیاه، شاخص‌های آبی مانند کارآیی مصرف آب و بهره‌وری مصرف آب نیر تاثیر گذار باشد. فروتن (۱۴۰۱) در تحقیقی اثر مدیریت آبیاری بر میزان تبخیر و تعرق، زه آب خروجی و عمق آب آبیاری گوجه‌فرنگی و شاخص‌های آبی مانند بهره‌وری آب مصرفی و کارآیی مصرف آب را مورد بررسی قرار داد. نتایج این تحقیق نشان داد کم‌آبیاری بر روی عمق آب آبیاری، زه آب خروجی و تبخیر و تعرق دارای تاثیر معنی‌دار در سطح یک‌درصد بود. اما اثر کم‌آبیاری بر روی شاخص‌های آبی معنی‌دار نبود. بر اساس نتایج این پژوهش، افزایش میزان تخلیه مجاز رطوبتی از ۲۰ به ۸۰ درصد، عمق آب مصرفی آبیاری را تا حدود ۱۳ درصد کاهش داد.

همچنین با اعمال کم‌آبیاری، میزان زه‌آب خروجی حداکثر تا ۱۳/۵ درصد و میزان تبخیر و تعرق از ۵ تا ۸ درصد کاهش یافت.

نتایج مطالعات زارع حمل‌آباد (۱۴۰۲) نشان داد که کم‌آبیاری گوجه‌فرنگی گلخانه‌ای بر میزان ارتفاع آب‌آبیاری، حجم زه‌آب خروجی، کارآیی مصرف آب و تبخیر و تعرق دارای تاثیر معنی‌دار در سطح یک‌درصد است. همچنین با افزایش میزان کم‌آبیاری، بیشینه کاهش مقادیر ارتفاع آب‌آبیاری، حجم زه‌آب خروجی، کارآیی مصرف آب و تبخیر و تعرق به‌ترتیب برابر ۲۶، ۵۷، ۲۶/۱ و ۲۵/۷ درصد مشاهده شد. از طرفی نتایج این پژوهش نشان داد بیشترین ارتفاع آب آبیاری (۵۳۴/۵ میلی‌متر) مربوط به آبیاری کامل بوده است که با افزایش میزان کم‌آبیاری، میزان آب مصرفی به ۳۹۶/۸ میلی‌متر رسیده است که در نهایت موجب کاهش کارآیی مصرف آب از ۶۸/۷۴ به ۵۰/۸۲ کیلوگرم در هکتار گوجه‌فرنگی به‌ازای هر میلی‌متر آب مصرفی شده است.

با توجه به تاثیر خشکسالی بر کاهش منابع آبی، لزوم مصرف بهینه آب و اهمیت موارد بیان شده در بالا، در این تحقیق تاثیر مدیریت آب آبیاری بر تبخیر و تعرق و شاخص‌های آبی گوجه‌فرنگی گلخانه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در گلخانه دانشکده کشاورزی دانشگاه محقق اردبیلی در بازه زمانی مهر ماه ۱۳۹۹ تا تیرماه ۱۴۰۰ انجام شده است. گیاه مورد بررسی گوجه فرنگی بود که به صورت گلخانه‌ای کشت شد. همچنین نحوه کشت کوجه‌فرنگی از طریق نشا و انتقال آن به گلدان بود. جهت تهیه خاک مورد نظر، ابتدا دو سوم خاک مزرعه (از مزارع روستای کلخوران از توابع شهرستان اردبیل) را از الک دو میلیمتری عبور داده و با یک سوم شن ترکیب کرده و خاک سبک (با بافت لومی شنی) تهیه شد. برخی خصوصیات خاک مورد آزمایش در جدول ۱ ارایه شده است.

جدول ۱- برخی مشخصات خاک مورد آزمایش

شن (٪)	سیلت (٪)	رس (٪)	بافت خاک	pb (g/cm3)	pp (g/cm3)	n	ϴfc	ϴpwp
۶۱/۲۸	۱۴	۲۴/۷۳	لومی‌شنی	۱/۴۳	۲/۶۲	۰/۴۵	۲۸	۱۷

گلدان‌های مورد استفاده در این تحقیق به شکل مخروط ناقص با ارتفاع ۲۷ سانتی‌متر، قطر دهانه ۲۶ سانتی‌متر و قطر قاعده ۱۹ سانتی‌متر بودند. برای پر کردن گلدان‌ها ابتدا مقدار ۱/۵ کیلوگرم شن دانه‌بندی شده در کف گلدان (برای زهکشی

بهتر) سپس مقدار ۱۰ کیلوگرم خاک الک شده در یک مرحله و در نهایت مقدار ۱/۵ کیلوگرم شن بر روی سطح خاک برای کاهش تبخیر از سطح خاک ریخته شد (عبدلی و همکاران، ۱۴۰۰).

در این آزمایش برای اندازه‌گیری رطوبت خاک گلدان‌ها از دستگاه رطوبت‌سنج دیجیتال TDR مدل PMS-714 استفاده شد (البته قبل از شروع کار واسنجی شد). همچنین میزان آب آبیاری هر گلدان بر اساس اختلاف بین رطوبت فعلی و رطوبت نقطه ظرفیت زراعی محاسبه و سپس بر اساس مساحت هر گلدان تبدیل به حجم (برحسب لیتر) شده و به هر گلدان، آب بر اساس تعداد لیتر مشخص شده، داده شد.

تیمارهای مدیریت آبیاری شامل چهار سطح بودند. سطوح مدیریت زمان آبیاری شامل I1، I2، I3 و I4 به‌ترتیب آبیاری در زمان تخلیه ۲۰، ۵۰، ۶۵ و ۸۰ درصد آب قابل نگهداری خاک بودند. درصدهای مختلف اختلاط خاک‌اره با خاک گلدان (در پنج سطح شامل صفر، پنج، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد حجمی) بودند. این آزمایش به‌صورت طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار اجرا شد. با توجه به حساسیت اکثر گیاهان در مراحل ابتدایی رشد و جوانه‌زنی، اعمال تیمار آبیاری از حدود یک ماه بعد از شروع رشد گوجه‌فرنگی انجام شد.

در این تحقیق آب قابل استفاده گیاه از رابطه (۱) به دست آمد.

$$AW=\frac{\theta_{fc}-\theta_{wp}}{100}\times d_{rz} \qquad (۱)$$

در این رابطه، AW: آب قابل استفاده گیاه (سانتی‌متر)، drz: عمق توسعه ریشه گیاه ، Θfc: درصد رطوبت حجمی در نقطه ظرفیت زراعی و Θwp: درصد رطوبت حجمی در نقطه پژمردگی بودند (رسول زاده و رئوف؛ ۱۴۰۲).

همچنین مقدار آب آبیاری با استفاده از رابطه بیلان آبی به دست آمد (رابطه ۲).

$$I=(D_d+R_O+ET_a)\pm\Delta S \qquad (۲)$$

که در رابطه (۲)، I: مقدار آب آبیاری، Dd: مقدار زه آب خروجی، RO: مقدار رواناب خروجی، ETa : تبخیر و تعرق واقعی گیاه و ΔS: تغییرات ذخیره رطوبتی خاک می باشند. خاک مورد استفاده در این تحقیق، لوم شنی بود که جزو خاک‌های سبک محسوب می‌شود. همچنین به منظور بررسی و آنالیز آماری از نرم افزار MSTATC استفاده شد. آزمون مقایسه میانگین نیز با کمک آزمون دانکن انجام شد.

در این تحقیق به بررسی اثر مدیریت آبیاری بر تبخیر و تعرق کل، میزان زه‌آب خروجی، عمق آب آبیاری، شاخص کارآیی مصرف آب و بهره‌وری مصرف آب گوجه‌فرنگی پرداخته شده است.

نتایج وبحث

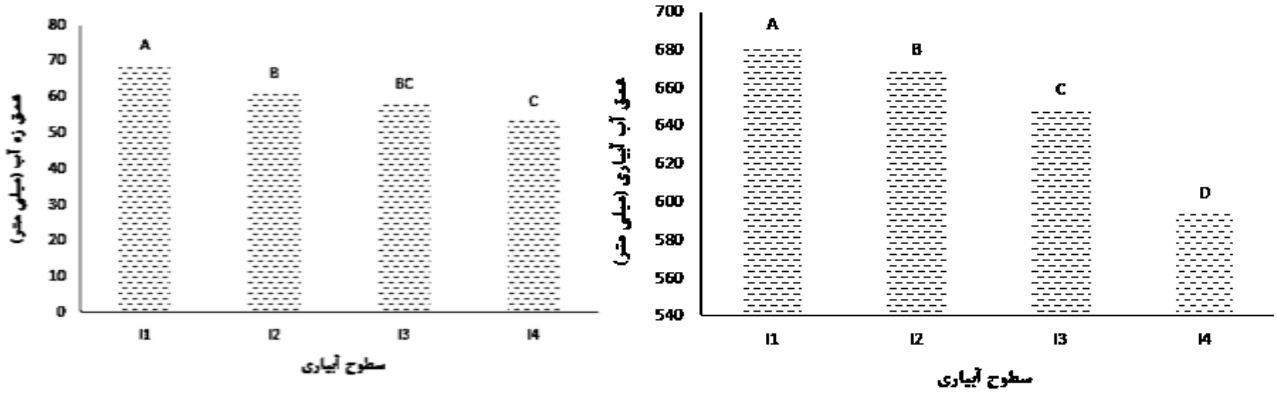
همانطور که در جدول(۲) مشخص است مدیریت‌های مختلف آب آبیاری بر میزان عمق آب آبیاری، عمق زه‌آب، تبخیر و تعرق گوجه‌فرنگی و شاخص‌های کارآیی مصرف آب و بهره‌وری مصرف آب در سطح یک‌درصد معنی‌دار بوده است. یادآوری می‌شود در این مقاله صرفا اثرات مدیریت آبیاری مورد نظر می‌باشد و تاثیر خاک‌اره بر شاخص‌های آبی در سایر مقالات (در آینده) بحث خواهد شد.

جدول ۲- آنالیز میانگین صفات تحت اثرسطوح مختلف آبیاری و خاک اره

منابع تغییرات	درجه آزادی	عمق آب آبیاری	عمق زه‌آب	تبخیر و تعرق	WUE	WP
تکرار	۳	ns۱۳۲/۶	ns۹۴/۱	ns۵۰۲/۲	ns۵۴۸/۵	ns۴۸۹/۴
آبیاری	۳	۳۲۹۱۵ **	۸۳۹/۸ **	۲۴۰۴۳ **	۱۱۶۳۲۸ **	۹۴۶۷۰ **
خاک اره	۴	۵۷۹۹۸ **	۳۹۸۱/۵ **	۳۳۶۰۷ **	۱۴۱۱۹ **	۱۳۲۴۸ **
آبیاری*خاک اره	۱۲	۸۳۲/۶ **	ns۶۸/۰	۹۴۰/۷ **	۵۲۳۴ **	۴۴۵۵ **

ns ، **و * به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی دار در سطح یک و پنج درصد.

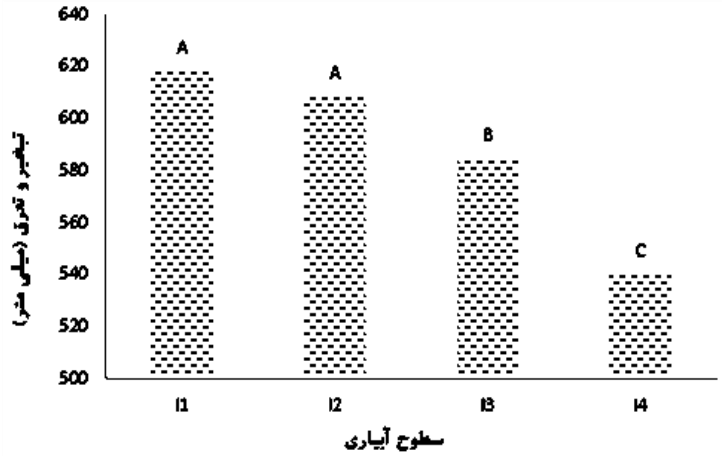
همانطور که در شکل‌های ۱ و ۲ مشاهده می‌شود اثر تیمار آبیاری بر میزان عمق آب آبیاری و عمق زه‌آب در سطح یک درصد معنی‌دار بودند. همچنین بیشترین عمق آب آبیاری و زه‌آب خروجی مربوط به تیمار I1 به‌ترتیب برابر با ۶۸۷/۷ و ۶۹ میلی‌متر و کمترین مقدار نیز مربوط به تیمار I4 به‌ترتیب برابر با ۵۹۴/۲ و ۵۳/۶ میلی‌متر بود. بر اساس نتایج این تحقیق، با افزایش میزان حداکثر تخلیه مجاز رطوبتی از I1 به I4، عمق آب آبیاری و عمق زه‌آب به‌طور معنی‌داری کاهش یافت (شکل های ۱ و ۲).



شکل ۱- مقایسه عمق آب آبیاری در سطوح مختلف کم‌آبیاری

شکل ۲- مقایسه عمق زه‌آب در سطوح مختلف کم‌آبیاری

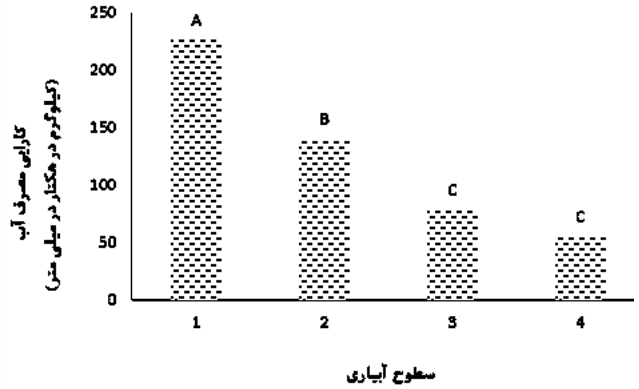
دلیل کاهش عمق آب آبیاری در اثر کم‌آبیاری، احتمالاً مربوط به کاهش آبی است که در اختیار گیاه قرار می‌گیرد و به تبع آن عمق آب خروجی کاهش یافت. میزان این کاهش در مقادیر پایین آبیاری بیشتر مشهود بود، به‌طوری که با کاهش آبیاری از I1 به I4 به‌ترتیب حدود ۱۳/۵۹ و ۲۲/۳۱ درصد کاهش عمق آب آبیاری و زه‌آب خروجی مشاهده شد. نکته قابل توجه اینکه تفاوت معنی‌داری بر میزان عمق آب آبیاری مشاهده شد. درحالیکه تفاوت معنی‌داری بین اثر I3 و I4 بر میزان زه‌آب خروجی مشاهده نشد. به‌طورکلی براساس نتایج تحقیق حاضر، در شرایط کمبود آب و خشکسالی می‌توان با استفاده از تیمار آبیاری I4 در زه‌آب خروجی ضمن صرفه‌جویی در مقدار آب مصرفی، میزان محصول مشابه را انتظار داشت.



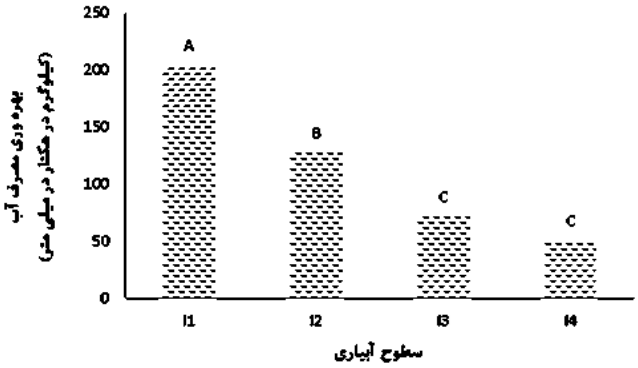
شکل ۳- مقایسه تبخیر و تعرق در سطوح مختلف کم‌ابیاری

مطابق جدول۲، اثرتیمار آبیاری بر تبخیر و تعرق در سطح یک درصد معنی‌دار بود. مقایسه میانگین صفات با کمک آزمون دانکن انجام شد نتایج نشان داد بیشترین تبخیر و تعرق برابر ۶۱۸/۴ میلی‌متر مربوط به تیمار I1 و کمترین مقدار آن ۵۴۰/۵ میلی‌متر مربوط به تیمار I4 بود. همچنین بر مشاهدات شکل (۳) مقادیر تیمار آبیاری I1 و I2 اثر مشابه بر روی تبخیر و تعرق داشته و اختلاف مقادیر تبخیر و تعرق معنی‌دار نبود. بنابراین توصیه می‌شود درصورتی که انتخاب بین دو تیمار I1 و I2 باشد از مقدار آب آبیاری کمتر استفاده شود. با استفاده از تیمار I2 ضمن صرفه‌جویی در مصرف آبیاری،

میزان محصول مشابه حاصل می‌گردد. از طرفی کاهش آب آبیاری باعث کاهش معنی‌دار تبخیر و تعرق در سطح یک درصد شد. البته مطابق جدول (۴-۹) میزان این کاهش در مقادیر پایین آب آبیاری بیشتر مشهود بود به‌طوری که با کاهش آب آبیاری از I1 به I4 حدود ۱۲/۵۹ درصد کاهش تبخیر و تعرق مشاهده شد. دلیل کاهش تبخیر و تعرق در اثر کم‌آبیاری، احتمالاً مربوط به کاهش آبی است که در اختیار گیاه قرار می‌گیرد و در نتیجه تبخیر و تعرق کاهش می‌یابد. نتایج تحقیق زارع‌ابیانه و همکاران (۱۳۹۷) نشان داد که با محدودشدن آبیاری، تبخیر و تعرق کاهش یافت. همچنین از تیمار آبیاری کامل (شاهد) تا بیشترین تنش آبی، حدود ۲۷/۷۰ درصد کاهش تبخیر و تعرق مشاهده شد.



شکل ۴- مقایسه بهره‌وری مصرف آب در سطوح مختلف کم‌آبیاری



شکل ۵- مقایسه کارایی مصرف آب در سطوح مختلف کم‌آبیاری

از طرفی، مطابق جدول ۲، اثر تیمار آبیاری بر بهره‌وری و کارایی مصرف آب در سطح یک درصد معنی‌دار بود. مقایسه میانگین صفات با کمک آزمون دانکن انجام شد. بر اساس مشاهدات شکل ۴ و ۵ بیشترین بهره‌وری آب (۲۰۵/۳ کیلوگرم بر هکتار بر میلی‌متر) در تیمار I1 و کمترین بهره‌وری (۵۱/۲ کیلوگرم بر هکتار بر میلی‌متر) در تیمار I4 مشاهده شد.

همچنین بیشترین و کمترین کارایی آب آبیاری به‌ترتیب برابر با ۲۲۶/۹ و ۵۶/۰۳ (کیلوگرم بر هکتار بر میلی‌متر) مربوط به تیمار I1 و I4 بود. همانطور که در شکل ۴ و ۵ قابل مشاهده است بین تیمار I3 و I4 تفاوت معنی‌داری از نظر کارایی آب آبیاری و بهره‌وری مصرف آب مشاهده نشد. از طرفی با کاهش مقدار آب مصرفی، بهره‌وری و کارای مصرف آب کاهش یافت. دلیل کاهش در اثر کم‌آبیاری، احتمالاً مربوط به کاهش آبی است که در اختیار گیاه قرار می‌گیرد و در نتیجه عملکرد کاهش یافته و تنش آبی به گیاه اعمال شد. بنابراین میزان کارایی مصرف آب و بهره‌وری آب کاهش یافت. به‌طوریکه با کاهش آب آبیاری از I1 به I4 حدود ۷۵/۳۰ درصد کاهش کارایی آب آبیاری و حدود ۷۵/۰۶ درصد کاهش بهره‌وری مصرف آب مشاهده شد. نتایج تحقیق حقایقی مقدم و فرازمنیا (۱۳۹۷) نشان داد که انجام آبیاری برنامه‌ریزی شده سبب ۲۶ درصد کاهش مقدار آبیاری در مقایسه با شرایط رایج کشاورزان گردیده و مقدار بهره‌وری آب را به میزان ۸/۳ کیلوگرم بر متر مکعب برای گوجه‌فرنگی افزایش داد. ازطرفی نتایج تحقیق مهرابی‌گوهری و رسول اسدی (۱۳۹۶) نشان داد که بیشترین

میزان کارایی مصرف آب، متعلق به سطح ۷۵ درصد اعمال شده در آبیاری ناقص ریشه نسبت به آبیاری کامل بود. بنابراین سطح ۷۵ درصد اعمال‌شده در آبیاری ناقص ریشه و صرفه‌جویی ۲۵ درصدی آب، افزایش ۱۴ درصدی کارایی مصرف آب را به همراه داشت.

سپاسگزاری

این مقاله با حمایت معاونت محترم پژوهشی دانشگاه محقق اردبیلی، تهیه شده است و از ایشان تشکر و قدردانی می‌گردد.

منابع

اعتمادی‌نیا، م. (۱۴۰۰). اثر اختلاط خاک‌اره بر عملکرد و اجزای عملکرد گیاه گوجه‌فرنگی در بافت سبک تحت مدیریت زمان آبیاری. پایان نامه کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکده علوم و فناوری کشاورزی، دانشگاه محقق اردبیلی.

حقایقی‌مقدم، س.ا.، م. فرزام‌نیا، ۱۳۹۱. تأثیر برنامه‌ریزی آبیاری بر شاخص‌های بهره‌وری آب، مطالعه موردی: دشت نیشابور. مجله پژوهش آب در کشاورزی، ۲۶(۲):۱۳۰-۱۴۲.

خیرابی، ج.، توکلی. ع. ر.، توکلی.، انتصاری، م. ر.، سلامت، ع. ر. (۱۳۷۵). دستورالعمل‌های کم‌آبیاری. گروه کار زهکشی، انتشارات کمیته ملی آبیاری و زهکشی ایران. ۲۳۲ ص.

دهقان، ه.، ا. علیزاده، ک. اسماعیلی، س.ح.، نعمتی، ۱۳۹۴. رشد ریشه، عملکرد و اجزای عملکرد گوجه فرنگی در تنش خشکی. نشریه پژوهش آب در کشاورزی، ۲۹(۲):۱۷۹-۱۷۰.

رسول‌زاده، ع.، رئوف، م. (۱۴۰۲). مبانی و روش‌های آبیاری. چاپ دوم، انتشارات عمیدی. ۲۸۵ ص.

رسولی‌قادی، پ.، م.ج.، بلوچی، ۱۳۹۴. مدیریت و قوانین منابع آب در ایران – چالش‌ها و راهکارها. کنگره بین المللی تخصصی علوم و زمین، ۳-۵(۳۴):۱۵-۱.

زارع‌ابیانه، ح.، ا. چشمه‌قصابانی، ح. باب‌الحوائجی، ع. افروزی، ۱۳۹۷. اثر کم‌آبیاری بر تبخیر و تعرق، کارایی مصرف آب، عملکرد و رشد گیاه فلفل همدانی در کشت گلخانه‌ای. ۹علوم و فنون کشت‌های گلخانه‌ای، ۹(۲): ۳۰-۱۸.

زارع حمل‌آباد، س. (۱۴۰۲). تاثیر کمپوست خاک‌اره در خاک سبک بر عملکرد گوجه‌فرنگی در شرایط تنش رطوبتی. پایان نامه کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکده علوم و فناوری کشاورزی، دانشگاه محقق اردبیلی.

عبدلی، ع.، رمضانی‌مقدم، ج.، حسینی، ی.، نیک‌پور، م. ر.، دهقان، ه. (۱۴۰۰). اثر تنش آبی بر خصوصیات ریشه گوجه‌فرنگی (Saint Pierre) و عملکرد آن تحت مدیریت زمان آبیاری. نشریه علوم باغبانی(علوم و صنایع کشاورزی)، ۳۵(۲): ۲۳۴-۲۲۳.

فروتن، م. (۱۴۰۱). اثر خاک اره بر عملکرد و اجزای عملکرد گوجه‌فرنگی (Solanum lycopersicum) در شرایط تنش رطوبتی. پایان نامه کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکده علوم و فناوری کشاورزی، دانشگاه محقق اردبیلی.

مهرابی گوهری، ا.، ر. اسدی، ۱۳۹۶. بررسی عملکرد گوجه فرنگی تحت تأثیر کم آبیاری تنظیم شده و آبیاری ناقص ریشه. مدیریت آب و آبیاری، ۷(۲): ۲۷۱-۲۵۷.

یوسفی، ع.، ص. خلیلیان، ح. بلالی، ۱۳۹۰. بررسی اهمیت راهبردی منابع آب در اقتصاد ایران با استفاده از الگوی تعادل عمومی. نشریه اقتصاد و توسعه کشاورزی (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۵(۱):۱۲۰-۱۰۹.

Abdelraouf, R. E., Ghanem, H. G., Bukhari, N.A., & El-Zaidy. M. (2020). Field and modeling study on manual and automatic irrigation scheduling under deficit irrigation of greenhouse cucumber. Sustainability, 12(23), 98-109.

Castillo, G. M. L., Engler, A., Wollni, M. (2021). Planned behavior and social capital: Understanding farmers' behavior toward pressurized irrigation technologies. Agricultural Water Management, 243, 106524.

The effect of irrigation management on evapotranspiration and water indices in tomato cultivation

***[1] Javad Ramazani Moghadam, [2] Matine Etemadi nia, [3] Yaser Hoseini, [4] Ali Rasoulzadeh, [5] Majid Raoof**

1-Associate Professor, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili

2- M. Sc. graduated, Department of Water Engineering, University of Mohaghegh Ardabili

3 , 4, 5-Professor, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili

* Corresponding author: j_ramezani@uma.ac.ir

Abstract

Unfortunately, in recent decades, successive droughts and reduction of water resources (in terms of quantity and quality) have caused great concerns about the production of agricultural products. Irrigation management in agriculture has been one of the solutions to reduce the effects of drought in recent years. For this purpose, in this study, the effect of irrigation management on water parameters and indices in tomato cultivation (in soil amended with sawdust) was investigated. This study was conducted as a factorial and completely randomized block design with four replications. The treatments of this experiment included irrigation management at four irrigation levels (with permissible moisture discharge values of 20, 50, 65 and 80 percent) and mixing sawdust with soil at five levels (zero, 5, 10, 15 and 20 percent by volume). Based on the results of this study, irrigation management was significant on total evaporation and transpiration, outlet drainage rate, irrigation water depth, water use efficiency index and water use productivity at the one percent level. For example, by increasing the allowable moisture discharge from 20 to 80 percent, the total evapotranspiration values, the amount of outlet drainage, the depth of irrigation water, the water use efficiency index, and the water use productivity decreased by 12.6, 22.32, 13.6, 75.33, and 75.03 percent, respectively.

Keywords: Water consumption, Permissible moisture discharge, Sawdust, Deficit irrigation, Tomatoes.

طراحی و پیاده‌سازی سامانه وبGIS تعاملی برای نمایش و تحلیل داده‌های اقلیمی و هواشناسی

[۱]وحید محمدنژاد آروق*

[۲]علیرضا موقری

۱- دانشیار گروه جغرافیا، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۲- استادیار گروه جغرافیا، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

*آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول (v.mohammadnejad@urmia.ac.ir)

چکیده

در دهه‌های اخیر توسعه فناوری‌های متن‌باز و سامانه‌های تحت وب، فرصت‌های جدیدی برای پایش و تحلیل داده‌های اقلیمی فراهم کرده است. هدف پژوهش حاضر طراحی و پیاده‌سازی یک سامانه وب GIS تعاملی برای نمایش و تحلیل داده‌های اقلیمی و هواشناسی است. این سامانه با استفاده از OpenLayers در سمت کاربر و GeoServer در سمت سرور توسعه داده شد و قابلیت بهره‌گیری از استانداردهای OGC نظیر WMS و WFS را دارا است. محیط توسعه کدنویسی در Visual Studio Codeپیاده‌سازی شد. سامانه طراحی‌شده امکان نمایش لایه‌های متنوع اقلیمی از جمله دما، بارش، فشار سطحی، شاخص‌های آلودگی هوا و پوشش ابری را فراهم نموده و با ایجاد یک پنل لایه‌های ساختاریافته، دسترسی آسان کاربران به داده‌ها را تسهیل کرده است. همچنین قابلیت افزودن سرویس‌های خارجی WMS/WFS توسط کاربران و مشاهده اطلاعات توصیفی لایه‌ها از دیگر ویژگی‌های کلیدی سامانه می‌باشد. نتایج نشان داد که سامانه حاضر ضمن دارا بودن رابط کاربری ساده و کاربرپسند، می‌تواند به عنوان ابزاری مؤثر در پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، مدیریت منابع طبیعی، پایش مخاطرات اقلیمی و آموزش دانشگاهی مورد استفاده قرار گیرد. توسعه آینده این سامانه می‌تواند شامل یکپارچه‌سازی داده‌های زمان‌واقعی، افزودن ماژول‌های تحلیلی پیشرفته و بهره‌گیری از الگوریتم‌های هوش مصنوعی باشد.

کلیدواژه‌ها: وب GIS ، اقلیم‌شناسی، OpenLayers، GeoServer، داده‌های هواشناسی، WMS، WFS

مقدمه

در دهه‌های اخیر، با گسترش فناوری‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) و توسعه سامانه‌های وب‌محور، تحلیل و نمایش داده‌های هواشناسی و اقلیمی به شکل پویا، تعاملی و در زمان واقعی، امری کاملاً ممکن و قابل دسترس شده است (Goodchild, 2007). پیوند میان داده‌های اقلیمی/ هواشناسی و سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) توانسته است توانمندی‌های

پژوهش، مانیتورینگ و تصمیم‌گیری در مواجهه با مخاطرات جوی و تغییر اقلیم را به‌طور چشمگیری افزایش دهد. سامانه‌های وب GIS به‌عنوان لایه میانی بین منبع داده (ماهواره‌ای، مدل‌های بازتحلیل، ایستگاه‌های زمینی) و کاربر نهایی این امکان را فراهم می‌آورند که داده‌های حجیم زمانی و مکانی را به صورت پویا، تعاملی و در فرمت‌های استاندارد (نقشه‌ها، سرویس‌های برداری و زمان‌محور) مشاهده و تحلیل کنند(Vinueza-Martínez, 2024).

استفاده از استانداردهای باز و پروتکل‌های OGC مانند WMS برای نقشه‌های رستری و WFS برای سرویس‌دهی به داده‌های برداری، پایه بین‌عمل‌پذیری در سامانه‌های تحت وب است؛ این رویکرد امکان بهره‌گیری هم‌زمان از سرویس‌های توزیع‌شده، کاتالوگ‌دهی متادیتا و یکپارچه‌سازی منابع مختلف (مثلاً لایه‌های رادار، پیش‌بینی مدل عددی و سنجش از دور) را فراهم می‌کند(OGC WMS standard, 2006).

فناوری‌های متن‌باز سطح کلاینت مانند OpenLayers در کنار سرورهای سازگار با استاندارد مانند GeoServer، بستری سبک و مقیاس‌پذیر برای ساخت داشبوردهای تعاملی اقلیمی فراهم می‌کنند. این پشته فناورانه به ویژه برای نمایش داده‌های زمان‌متغیر، کاوش مکانی ـ زمانی و یکپارچه‌سازی سرویس‌های REST/SOS مفید است؛ مطالعات اخیر نشان داده‌اند که ترکیب WebGIS با روش‌های پردازش سمت سرور (مثلاً پیش‌نمونه‌سازی زمان ـ سری‌ها، کاشینگ تایل‌ها و استفاده از D-tiles برای داده‌های حجیم راداری) می‌تواند همزمان قابلیت واکنش‌پذیری و ظرفیت پردازشی را بهبود بخشد(Lu et al., 2021). طراحی سامانه‌های وب GIS برای کاربردهای هواشناسی نیازمند توجه ویژه به کیفیت داده‌ها، اعتبارسنجی ایستگاهی و مقایسه با بازتحلیل/ماهواره، مدیریت سری‌های زمانی بزرگ، و رابط‌های کاربری که نشان‌دهنده عدم قطعیت و تغییرپذیری زمانی باشد، است. پژوهش‌ها بر ضرورت پیاده‌سازی روش‌هایی مانند استانداردسازی متادیتا، پیاده‌سازی سطح سرویس برای داده‌های زمان‌حقیقی (Sensor web) و استفاده از معماری‌های میکروسرویس برای انعطاف‌پذیری و نگهداری‌پذیری تاکید کرده‌اند(Research on web-based climate services, 2023–2024) .

علاوه بر جنبه فنی، اثربخشی چنین سامانه‌هایی در کاربردهای میدانی و تصمیم‌پذیری بستگی به قابلیت‌های بصری‌سازی مناسب (نقشه‌های پویا، نمودارهای سری زمانی وابسته به مکان، لایه‌بندی اولویت‌دار) و امکانات تحلیل (فیلترسازی زمانی، استخراج آماری منطقه‌ای و هشداردهی خودکار) دارد؛ پژوهش‌های مروری اخیر نشان می‌دهد که پیوند قوی بین رابط کاربری تعاملی و پردازش‌های سرور ـ محور می‌تواند توانمندی‌های عملیاتی را برای پیش‌بینی حوادث، مدیریت منابع آب و تصمیم‌سازی بهبود بخشد(Remote sensing & GIS applications review, 2024). در نتیجه، توسعه یک سامانه وب GIS مبتنی بر OpenLayers و GeoServer که لایه‌های اقلیمی و هواشناسی را به‌صورت آنلاین نمایش می‌دهد، هم افزایشی از استانداردهای بین‌المللی، روش‌های پردازش داده‌های حجیم و طراحی کاربرمحور است.

کاربرد وب GIS در حوزه اقلیم و هواشناسی طی دو دهه اخیر رشد چشمگیری داشته است. نیاز به پایش تغییر اقلیم، افزایش فراوانی رخدادهای حدی (سیل، خشکسالی، امواج گرما) و ضرورت اطلاع‌رسانی سریع و کاربرپسند، پژوهشگران را به سمت استفاده از پلتفرم‌های تحت وب سوق داده است(IPCC, 2021).

بررسی‌های اخیر نشان می‌دهند که وب GIS توانسته در حوزه‌های زیر نقشی کلیدی ایفا کند:

نمایش داده‌های سنجش‌ازدور: لایه‌های ماهواره‌ای مانندLandsat، Sentinel و MODIS برای تحلیل تغییرپذیری اقلیم به‌طور گسترده در سامانه‌های وب GIS به‌کار رفته‌اند(Kumar et al., 2022) .

پیش‌بینی جوی: داده‌های حاصل از مدل‌های عددی هواشناسی مانند ECMWF و GFS با کمک WMS/WFS در داشبوردهای آنلاین ارائه می‌شوند(Chen et al., 2020) .

مدیریت مخاطرات اقلیمی: سامانه‌هایی برای هشدار سریع سیل، خشکسالی و آتش‌سوزی با استفاده از ترکیب داده‌های ایستگاهی، مدل و سنجش‌ازدور توسعه یافته‌اند(Ali et al., 2023) .

در این مقاله، معماری پیشنهادی، انتخاب داده‌ها (ماهواره‌ای، بازتحلیل و ایستگاهی)، پیاده‌سازی سرویس‌های WMS/WFS و راهکارهای بهینه‌سازی عملکرد و مقیاس‌پذیری بر اساس تجربیات و استانداردهای جاری بررسی و ارزیابی می‌شوند (OGC best practices; case studies 2021–2024).

مواد و روشها

محیط توسعه و ابزارهای نرم‌افزاری

توسعه سامانه وب GIS در محیط Visual Studio Code (VSC) به‌عنوان محیط یکپارچه برنامه‌نویسی (IDE) انجام شد. برای طراحی رابط کاربری و پیاده‌سازی قابلیت‌های نقشه‌ای، از زبان‌های HTML، CSS و JavaScript استفاده گردید. در سطح کاربر، کتابخانه OpenLayers نسخه ۶ برای نمایش، مدیریت و تعامل با لایه‌های مکانی به‌کار گرفته شد. در سمت سرور، نرم‌افزار GeoServer (نسخه ۲.۲۱+) جهت انتشار داده‌های مکانی و سرویس‌دهی با استانداردهای OGC نظیر WMS (Web Map Service) و WFS (Web Feature Service) به کار گرفته شد.

داده‌های مورد استفاده

داده‌های اقلیمی و هواشناسی

داده‌های اقلیمی و هواشناسی از منابع معتبر بین‌المللی و آزاد دریافت شدند. مهم‌ترین مجموعه داده‌ها شامل:

مدل‌های بازتحلیل و پیش‌بینی عددی :مانند ECMWF و GFS برای دما، بارش، فشار سطحی و باد.

داده‌های سنجش‌ازدور: از ماهواره‌هایی مانند Sentinel-5P برای شاخص‌های آلودگی هوا نظیر NO_2 ، SO_2 و آئروسل و MODIS برای پوشش ابر و دمای سطح زمین.

داده‌های ایستگاهی: شامل اطلاعات بارش، دما و رطوبت که در صورت دسترسی برای ارزیابی صحت داده‌های سنجش‌ازدور استفاده شدند.

فرمت و استاندارد داده

داده‌ها عموماً در قالب‌های NetCDF، GeoTIFF و shapefile دریافت شده و با استفاده از ابزارهای پردازش QGIS و GDALبه فرمت‌های سازگار با GeoServer مانند GeoTIFF برای رستر و shapefile/GeoJSON برای بردار تبدیل شدند.

طراحی و پیاده‌سازی سامانه

فرایند طراحی و توسعه سامانه شامل چند مرحله اصلی بود:

راه‌اندازی سرور مکانی: نصب و پیکربندی GeoServer بر روی محیط محلی و انتشار لایه‌های اقلیمی در قالب سرویس‌های WMSو WFS

ایجاد کلاینت تحت وب: توسعه صفحات HTML و CSS در محیط VSC برای ایجاد رابط کاربری.

یکپارچه‌سازی سرویس‌ها با OpenLayers و نوشتن کدهای JavaScript برای فراخوانی لایه‌های منتشرشده در GeoServer و نمایش آن‌ها روی نقشه تحت وب.

طراحی پنل لایه‌ها: دسته‌بندی لایه‌ها در سه گروه اصلی (نقشه‌های پایه، لایه‌های اقلیمی، و لایه‌های سفارشی).

ابزارهای تحلیلی و تعاملی: افزودن قابلیت‌های عملیاتی مانند زوم، اندازه‌گیری فاصله و مساحت، جست‌وجوی مکانی، و نمایش مختصات جغرافیایی در زمان حرکت ماوس و همچنین نمایش مقادیر متغیرهای اقلیمی با حرکت و جابجایی ماوس

بهینه‌سازی عملکرد: استفاده از روش‌هایی مانند Tile Caching برای افزایش سرعت بارگذاری نقشه‌ها و مدیریت داده‌های حجیم.

بحث و نتایج

پیاده‌سازی سامانه وب GISحاضر نشان داد که استفاده از فناوری‌های متن‌باز OpenLayers و GeoServer همراه با استانداردهای WMS و WFS بستری انعطاف‌پذیر و کارآمد برای نمایش و تحلیل داده‌های اقلیمی و هواشناسی فراهم می‌سازد. نتایج به‌دست‌آمده از توسعه این سامانه را می‌توان در چند محور اصلی دسته‌بندی کرد:

طراحی رابط کاربری و دسترسی به لایه‌ها

نمای کلی سامانه (شکل ۱) نشان می‌دهد که طراحی پنل لایه‌ها به‌صورت ساختاریافته و دسته‌بندی‌شده توانسته سهولت استفاده کاربران را افزایش دهد. دسته‌بندی لایه‌ها به نقشه‌های پایه، لایه‌های اقلیمی و لایه‌های سفارشی باعث شد کاربران

بتوانند به‌سرعت به داده‌های مورد نظر دسترسی پیدا کنند. این ویژگی در مقایسه با سامانه‌های مشابه، از نظر کاربرپسندی (Usability)و سرعت دسترسی مزیت قابل‌توجهی دارد. در بخش مدیریت لایه‌ها، علاوه بر امکان انتخاب سه نوع لایه پایه، شامل تصاویر ماهواره‌ای، توپوگرافی و OSM لایه‌های اقلیمی و کیفی هوا نیز وجود دارد که کاربر می‌تواند آنها را انتخاب و به سامانه اضافه کند. همچنین در این بخش امکان بارگزاری انواع فرمت‌های محلی مثل SHP، GPX، KML و WFA/WMS/WMTS وجود دارد که کاربر را قادر میسازد ان داده های را از منابع محلی و اینترنتی به سامانه اضافه کند.



شکل ۱: رابط کاربری سامانه توسعه یافته شامل ابزارها و بخش مدیریت لایه‌ها

نمایش داده‌های اقلیمی پویا

اضافه شدن لایه دما به سامانه (شکل ۲) نمونه‌ای از توانمندی آن در نمایش پویا و برخط داده‌های اقلیمی است. بررسی کاربران اولیه نشان داد که امکان مشاهده تغییرات دما در بستر نقشه تعاملی، درک بهتری از توزیع مکانی و الگوهای اقلیمی فراهم می‌کند. این قابلیت می‌تواند در مطالعات کاربردی مانند کشاورزی، مدیریت منابع آب و پایش تغییر اقلیم به‌طور مستقیم مورد استفاده قرار گیرد. به طور کلی شاخص‌هایی از قبیل ابرناکی، دما، باد، باران، برف، فشار هوا، شاخص اشعه بنفش، NO2، PM2.5، CO و ذرات معلق قابلیت نمایش برخط در سامانه را دارند. همچنین این امکان وجود دارد تا با جابجایی ماوس در روی لایه اقلیمی اضافه شده، مقادیر عددی آن متغیر نمایش داده شود.



شکل ۲: لایه دما در سامانه

قابلیت ورود سرویس‌های خارجی(WMS/WFS)

یکی از نتایج مهم سامانه، امکان ورود سرویس‌های بیرونی WMS و WFS توسط کاربر است (شکل ۳). این ویژگی انعطاف‌پذیری بالایی در افزودن داده‌های جدید به سامانه فراهم می‌آورد، به‌گونه‌ای که پژوهشگران می‌توانند بدون نیاز به تغییر در ساختار اصلی، داده‌های سازمانی یا بین‌المللی را در محیط سامانه نمایش دهند. این قابلیت از نظر بین‌عمل‌پذیری (Interoperability)یک نقطه قوت کلیدی محسوب می‌شود و هم‌راستا با رویکردهای جهانی در به‌اشتراک‌گذاری داده‌های مکانی است.



شکل ۳: پنجره مربوط به افزودن سرویس‌های WMS/WFS/WMTS از سرورهای محلی و آنلاین

نمایش اطلاعات توصیفی و تهیه نمودار از آنها

قابلیت نمایش جدول اطلاعاتی لایه‌ها (شکل ۴)، که از طریق سرویس WFS در GeoServer و با استفاده از قابلیت‌های تعاملی OpenLayers پیاده‌سازی شده است، نشان‌دهنده پیاده‌سازی یک رابط تحلیلی ساده اما مؤثر فراتر از یک سامانه نمایش صرف می‌باشد. این قابلیت به کاربران امکان می‌دهد تا علاوه بر مشاهده داده‌های مکانی، به طور مستقیم و در بستر همان رابط کاربری به داده‌های توصیفی وابسته (Attribute Data) هر المان مکانی نیز دسترسی داشته باشند.

چنین قابلیتی برای پژوهش‌های اقلیمی که نیازمند ترکیب و تحلیل همزمان داده‌های مکانی و آماری هستند، بسیار ضروری است. برای مثال، یک محقق می‌تواند تنها با کلیک بر روی یک ایستگاه هواشناسی خاص روی نقشه، نه تنها موقعیت آن، بلکه مقادیر مربوط به دما، رطوبت، سرعت باد، و فشار هوا را در یک جدول ساختاریافته مشاهده کند. این یکپارچگی، فرآیند تحلیل را تسریع کرده و از نیاز به جابجایی بین چندین نرم‌افزار یا پلتفرم جداگانه جلوگیری می‌کند.



شکل ۴: جدول اطلاعاتی لایه‌های اضافه شده

برای غلبه بر محدودیت تحلیل جدولی صرف و فراهم آوردن امکان درک بصری‌تر و سریع‌تر از روندها و الگوها، این سامانه مجهز به قابلیت تهیه نمودار از داده‌های توصیفی نیز شده است. این ویژگی به کاربر اجازه می‌دهد تا داده‌های جدولی استخراج شده را به صورت گرافیکی، در قالب‌های مختلف نموداری (مانند خطی، میله‌ای، یا دایره‌ای) تجسم نماید.

این قابلیت به ویژه در تحلیل‌های اقلیمی کاربرد دارد:

تغییرات زمانی: یک کاربر می‌تواند برای یک ایستگاه خاص، نموداری از تغییرات دمای حداقل و حداکثر در یک بازه زمانی مشخص تهیه کند تا روند فصلی یا سالانه دما را تحلیل نماید.

مقایسه مکانی: می‌توان مقادیر بارش چندین ایستگاه را در یک تاریخ مشخص در قالب یک نمودار میله‌ای مقایسه کرد تا پراکنش مکانی بارش را به وضوح مشاهده نمود.

روابط بین متغیرها: به عنوان مثال، نمودار پراکندگی برای بررسی رابطه احتمالی بین رطوبت و دما در یک منطقه.

بحث و مقایسه با پژوهش‌های مشابه

نتایج نشان داد که سامانه توسعه‌یافته از نظر ساختار فنی مشابه برخی مطالعات پیشین (Lu et al., 2021; Vinueza-Martínez, 2024) عمل می‌کند، اما افزودن امکان ورود سرویس‌های WMS/WFS توسط کاربر و طراحی رابط کاربری بومی‌سازی‌شده نقطه تمایز اصلی آن محسوب می‌شود. همچنین استفاده از محیط توسعه سبک (VSC) و پشته کاملاً متن‌باز باعث شد پیاده‌سازی با هزینه کم و قابلیت شخصی‌سازی بالا انجام شود.

محدودیت‌ها و مسیرهای آینده

با وجود موفقیت‌های سامانه، چند محدودیت نیز شناسایی شد:

بارگذاری داده‌های حجیم مانند مدل‌های ساعتی ECMWF نیازمند بهینه‌سازی بیشتر و استفاده از روش‌های Caching یا پردازش سمت سرور است.

نمایش عدم قطعیت داده‌های اقلیمی (Uncertainty Visualization) در سامانه هنوز پیاده‌سازی نشده و می‌تواند در آینده گسترش یابد.

توسعه ماژول‌های تحلیلی پیشرفته (مانند محاسبه شاخص‌های اقلیمی یا تولید نمودارهای سری زمانی) نیازمند افزودن کتابخانه‌های تکمیلی است.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف طراحی و پیاده‌سازی یک سامانه وب GIS برای نمایش و تحلیل داده‌های اقلیمی و هواشناسی در بستر فناوری‌های متن‌باز انجام شد. این سامانه با استفاده از OpenLayers در سمت کاربر و GeoServer در سمت سرور، همراه با پیاده‌سازی استانداردهای OGC (WMS/WFS)، توانست بستری پویا، تعاملی و انعطاف‌پذیر برای ارائه داده‌های مکانی ـ زمانی فراهم آورد.

از مهم‌ترین دستاوردهای این سامانه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

یکپارچه‌سازی داده‌های متنوع :سامانه توانست داده‌های مختلف اقلیمی شامل دما، بارش، فشار سطحی، شاخص‌های آلودگی هوا NO_2، SO_2، PM2.5 و غیره و پوشش ابری را از منابع سنجش‌ازدور، مدل‌های بازتحلیل و سرویس‌های آنلاین گردآوری کرده و در یک محیط واحد نمایش دهد.

افزودن سرویس‌های خارجی توسط کاربر :امکان ورود سرویس‌های WMS/WFS بیرونی به سامانه، انعطاف‌پذیری بالایی در توسعه داده‌ها ایجاد کرده و موجب شد که این سامانه نه‌تنها یک پایگاه داده ایستا، بلکه بستری پویا برای تعامل با منابع داده‌ای جهانی باشد.

دسترس‌پذیری و کاربرپسندی :طراحی پنل لایه‌ها به‌صورت ساختاریافته (نقشه‌های پایه، لایه‌های اقلیمی و لایه‌های سفارشی) و قابلیت مشاهده اطلاعات توصیفی لایه‌ها، به کاربران غیرمتخصص نیز امکان بهره‌گیری آسان از داده‌های پیچیده اقلیمی را داد.

کاربردپذیری در حوزه‌های مختلف :نتایج نشان داد که سامانه می‌تواند در پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، مدیریت منابع آب، پایش کشاورزی، ارزیابی ریسک مخاطرات جوی و حتی آموزش دانشگاهی به‌طور مؤثر مورد استفاده قرار گیرد.

از منظر علمی، این سامانه نمونه‌ای عملی از پیاده‌سازی استانداردهای باز و فناوری‌های متن‌باز در خدمت علوم اقلیم و هواشناسی است. پژوهش‌های مشابه (Lu et al., 2021; Vinueza-Martínez, 2024) نیز بر اهمیت توسعه چنین سامانه‌هایی تأکید کرده‌اند، اما سامانه حاضر با ترکیب انعطاف‌پذیری در ورود سرویس‌های خارجی، طراحی رابط کاربری بومی‌سازی‌شده و استفاده از محیط توسعه سبک(VSC) ، رویکردی کاربردی و قابل توسعه ارائه می‌دهد.

مسیرهای توسعه آینده

با وجود دستاوردهای قابل‌توجه، سامانه محدودیت‌هایی نیز دارد که در تحقیقات آینده می‌توان به آن‌ها پرداخت:

بهینه‌سازی داده‌های حجیم: بارگذاری داده‌های سنگین مانند مدل‌های ساعتی ECMWF و داده‌های ماهواره‌ای با قدرت تفکیک بالا نیازمند راهکارهای فنی مانند Tile Caching، پردازش سمت سرور و استفاده از معماری‌های میکروسرویس است.

افزودن ابزارهای تحلیلی پیشرفته: توسعه ماژول‌های آماری و تحلیلی (مانند محاسبه شاخص‌های خشکسالی، شاخص‌های دمای سطح زمین، و نمودارهای مکانی ـ زمانی) می‌تواند ارزش علمی سامانه را افزایش دهد.

نمایش عدم قطعیت داده‌ها: پیاده‌سازی ابزارهای بصری‌سازی عدم قطعیت (Uncertainty Visualization) به کاربران امکان می‌دهد تا میزان اعتمادپذیری داده‌ها و مدل‌های اقلیمی را بهتر درک کنند.

یکپارچه‌سازی با سامانه‌های هشدار سریع: اتصال سامانه به داده‌های پیش‌بینی عددی و شبکه‌های حسگر در زمان واقعی می‌تواند آن را به ابزاری عملیاتی برای مدیریت بلایای طبیعی نظیر سیل، خشکسالی و آتش‌سوزی تبدیل کند.

گسترش دسترس‌پذیری :طراحی نسخهٔ موبایلی و واکنش‌گرا، توسعه رابط کاربری چندزبانه، و افزودن قابلیت‌های دسترس‌پذیری (accessibility) برای گروه‌های مختلف کاربران می‌تواند دامنه استفاده از سامانه را گسترده‌تر کند.

ترکیب با هوش مصنوعی و یادگیری ماشین: ادغام الگوریتم‌های هوش مصنوعی برای تحلیل الگوهای مکانی ـ زمانی و پیش‌بینی روندهای اقلیمی، گام مهمی در ارتقای سطح علمی و کاربردی سامانه خواهد بود.

به‌طور کلی، پژوهش حاضر نشان داد که استفاده از فناوری‌های متن‌باز و استانداردهای بین‌المللی می‌تواند بستری کارآمد برای توسعه سامانه‌های وب‌محور در حوزه اقلیم و هواشناسی فراهم کند. سامانه ارائه‌شده نمونه‌ای موفق از یک پلتفرم تعاملی، مقیاس‌پذیر و کاربرپسند است که توانسته داده‌های پیچیده اقلیمی را در قالبی ساده و قابل درک برای پژوهشگران و تصمیم‌گیران عرضه کند.

این سامانه می‌تواند پایه‌ای برای توسعه زیرساخت‌های اقلیمی ملی و منطقه‌ای باشد و در آینده با افزودن قابلیت‌های تحلیلی و هوشمندسازی، به ابزاری مؤثر برای پژوهش‌های علمی، مدیریت منابع، و تصمیم‌سازی‌های مرتبط با تغییر اقلیم و مخاطرات جوی تبدیل گردد.

منابع و مآخذ:

Boulos, M. N. K., Resch, B., Crowley, D. N., Breslin, J. G., Sohn, G., Burtner, R., ... & Chuang, K. Y. S. (2011). Crowdsourcing, citizen sensing and sensor web technologies for public and environmental health surveillance and crisis management: trends, OGC standards and application examples. International Journal of Health Geographics, 10(1), 67. https://doi.org/10.1186/1476-072X-10-67

Fu, P., & Sun, J. (2011). Web GIS: Principles and applications. Esri Press.

Goodchild, M. F. (2007). Citizens as sensors: The world of volunteered geography. GeoJournal, 69(4), 211–221. https://doi.org/10.1007/s10708-007-9111-y

Huang, H., Gartner, G., & Krisp, J. M. (2018). Location based services: ongoing evolution and research agenda. Journal of Location Based Services, 12(2), 63–93. https://doi.org/10.1080/17489725.2018.1508763

Lu, Y., Yang, C., Yu, M., & Wu, H. (2021). A survey of WebGIS: technologies, applications and future development. ISPRS International Journal of Geo-Information, 10(2), 95. https://doi.org/10.3390/ijgi10020095

Vinueza-Martínez, G. A. (2024). Web-based GIS platforms for climate change analysis and decision making. Environmental Modelling & Software, 172, 106871. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2023.106871

Wang, S., & Armstrong, M. P. (2009). A theoretical approach to the use of cyberinfrastructure in geographical analysis. International Journal of Geographical Information Science, 23(2), 169–193. https://doi.org/10.1080/13658810802010438

Zhang, L., & Goodchild, M. F. (2002). Uncertainty in geographical information. CRC Press.

Zunino, A., Velázquez, G., Celemín, J. P., Mateos, C., Hirsch, M., & Rodriguez, J. M. (2020). Evaluating the Performance of Three Popular Web Mapping Libraries: A Case Study Using Argentina's Life Quality Index. ISPRS International Journal of Geo-Information, 9(10), 563. https://doi.org/10.3390/ijgi9100563

Kshetri, T. B., Chaksan, A., & Sharma, S. (2021). The role of open-source Python package geoserver-rest in Web-GIS development. ISPRS Archives XLVI-4/W2, 91–96. https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-4-W2-2021-91-2021

Farkas, G. (2018). Applicability of open-source web mapping libraries for building massive Web GIS clients. Journal of Geographical Systems. https://doi.org/10.1007/s10109-018-0286-0
Ryoo, H. G. (2017). Development of an extension of GeoServer for handling 3D spatial data. ScholarWorks UMass. https://scholarworks.umass.edu/items/ce710747-a900-4bd1-823c-d539a90373df
OpenLayers. (2018). Journal of Geographic Information System, 10(5). https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2359984
Open Geospatial Software and Data: A Review of the Current State. (2020). ISPRS International Journal of Geo-Information, 9(2), 90. https://doi.org/10.3390/ijgi9020090

Design and Implementation of an Interactive Web GIS Platform for Visualization and Analysis of Climatic and Meteorological Data

vahid mohammadnejad

Associated Professor, Department of Geography, Urmia University, Urmia, Iran

Alireza Movaqari

Assistant Professor, Department of Geography, Urmia University, Urmia, Iran

(v.mohammadnejad@urmia.ac.ir) Corresponding author: Email

Abstract

In recent decades, the advancement of open-source technologies and web-based systems has created new opportunities for monitoring and analyzing climate data. The aim of this study was to design and implement an interactive Web GIS platform for the visualization and analysis of climatic and meteorological datasets. The system was developed using OpenLayers on the client side and GeoServer on the server side, fully supporting OGC standards (e.g., WMS and WFS). Coding and customization were carried out within the Visual Studio Code environment. The platform enables the visualization of multiple climate-related layers, including temperature, precipitation, surface pressure, air pollution indices, and cloud cover, while providing a structured layer panel to enhance user accessibility. Additional functionalities include the integration of external WMS/WFS services and the display of attribute tables. Results indicate that the system, with its simple and user-friendly interface, can serve as a practical tool for climate research, natural resource management, climate hazard monitoring, and academic education. Future improvements may include the integration of real-time datasets, advanced analytical modules, and the incorporation of artificial intelligence algorithms for predictive analysis.

Keywords: Web GIS, Climatology, OpenLayers, GeoServer, Meteorological Data, WMS, WFS

شبیه سازی جریان در حوزه کسیلیان با استفاده از الگوریتمهای مختلف

مسعود گودرزی ، نوید دهقانی(مسئول)، مهدی وفاخواه، عبدالرضا بهره مند

چکیده

هدف این تحقیق شبیه‌سازی جریان روزانه در حوزه آبخیز کسیلیان با مدل WetSpa و روشهای هوشمند مانند شبکه عصبی مصنوعی و شبکه فازی - عصبی تطبیقی است. این مدل پیوسته هیدرولوژیکی- فیزیکی که قابلیت پیش‌بینی سیلاب در مقیاس حوزه آبخیز با گام‌های زمانی مختلف را داراست و روشهای هوشمندی هم که جزء مدل‌های جعبه سیاه می‌باشند، امروزه مورد توجه زیادی قرار گرفته‌اند. نتایج شبیه‌سازی با مدل WetSpa نشان داد که این مدل به خوبی توانسته جریان پایه رودخانه را با معیار ناش ساتکلیف ۶۴/۳۵ در مرحله صحت‌سنجی شبیه‌سازی نماید ولی در شبیه‌سازی جریان-های سیلابی با خطا همراه است. این مدل به خوبی توانسته بیلان آب حوزه آبخیز کسیلیان را شبیه‌سازی کند. همچنین آنالیز حساسیت پارامترهای مدل نشان داد که ضریب افت آب زیر زمینی از بیشترین حساسیت و ضریب روز درجه بارش از کمترین حساسیت برخوردار است. همچنین نتایج حاصل از شبکه‌های مختلف نشان داد که مدل شبکه عصبی مصنوعی و شبکه فازی - عصبی تطبیقی از لحاظ معیارهای آماری پاسخ‌های قابل قبول‌تری نسبت به مدل WetSpa داشته‌اند. همچنین نتایج نشان داد از میان ورودی‌های مختلف، ورودی باران با یک روز تأخیر و تبخیر با یک روز تأخیر نتایج بهتری از خود ارائه داده است. در بین روش‌های هوشمند هم مدل شبکه فازی - عصبی تطبیقی نتایج بهتری از خود ارائه داده است.

کلید واژه‌ها: رواناب، مدل WetSpa، شبکه عصبی مصنوعی، روش فازی- عصبی.

مقدمه

در مدل‌سازی فرایند بارش- رواناب و پیش‌بینی دبی رودخانه یک اقدام مهم در مدیریت و مهار سیلاب‌ها، طراحی سازه‌های آبی در حوزه‌های آبخیز، مدیریت خشک‌سالی و مسائلی از این گونه است. درک و پیش‌بینی فرآیندهای تولید رواناب و انتقال آن به نقطه خروجی حوزه آبخیز یکی از اساسی‌ترین مباحث علم هیدرولوژی محسوب می شود. به دلیل برهم کنش عوامل مختلف، رفتار سیکل هیدرولوژی آبخیز به فرآیند نسبتاً پیچیده‌ای تبدیل می شود، لذا برای ارزیابی آن اغلب ازمدل-های هیدرولوژیکی استفاده می‌گردد. محدودیت‌های مختلف نظیر کافی نبودن ایستگاه‌های هیدرومتری در آبراهه‌های رتبه پایین و هزینه‌بر بودن جمع‌آوری و اطلاعات مشاهده‌ای، استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی در برآورد هیدروگراف سیل را ایجاب می‌نماید(صادقی و همکاران، ۱۳۸۴). با توجه به ناهمگنی و عدم یکنواختی در توپوگرافی، خاک، پوشش، کاربری

اراضی و عوامل زمین شناسی و تغییر اقلیم در زمان و مکان در آبخیز و برآورد واقعی‌تر از سیستم فیزیکی، استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی

نسبت به مدل‌های یک‌پارچه ارجحیت دارد (Nurmohamed و همکاران، ۲۰۰۶). امروزه استفاده از روش‌های هوشمند از قبیل شبکه عصبی مصنوعی، فازی و نروفازی برای شبیه‌سازی مسائل مختلف هیدرولوژیکی مورد توجه قرار گرفته‌اند. از مزایای روش‌های هوشمند این است که می‌توان از آنها برای شبیه‌سازی مسائل غیرخطی و پیچیده استفاده کرد. امروزه روش‌های هوشمند در شبیه‌سازی بارش- رواناب بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند (کارآموز و عراقی نژاد، ۱۳۸۴). این تحقیق مقایسه ای بین مدل هیدرولوژیکی توزیعی WetSpa و روش‌های هوشمند برای شبیه‌سازی فرآیند بارش- رواناب در حوزه آبخیز معرف کسیلیان انجام می دهد. بهره‌مند و همکاران (۱۳۸۹)، به معرفی قابلیت‌های مدل WetSpa (انتقال آب و انرژی بین خاک، گیاه و اتمسفر) پرداختند. آنها بیان نمودند که، مدل WetSpa قادر به استفاده از تکنولوژی GIS و اطلاعات سنجش از دور می‌باشد، بعلاوه قابلیت شبیه‌سازی توزیع مکانی فرآیندهای هیدرولوژیکی در حوزه از قبیل رواناب، تغذیه آب‌زیرزمینی، جریان سطحی را دارد. با توجه به مطالعات صورت گرفته در داخل و خارج از کشور بر می‌آید که مدل WetSpaاغلب در حوزه‌های آبخیز بزرگ مورد استفاده قرار گرفته است (Bahremand و همکاران، ۲۰۰۵؛ Nurmohamed و همکاران ، ۲۰۰۶؛ Kabir و همکاران، ۲۰۱۱) به همین منظور هدف از مطالعه حاضر آزمایش توانایی مدل در حوزه‌های آبخیز کوچک برای شبیه‌سازی بارش- رواناب و همچنین استفاده از روش‌های هوشمند در حوزه آبخیز کسیلیان و ارزیابی نتایج آن با مدل هیدرولوژیکی توزیعی WetSpa و ارزیابی دقت و توانایی‌ها و مزایا و معایب هر یک از این مدل‌ها در پیش‌بینی رواناب می‌باشد. یعقوبی و همکاران (۱۳۸۹) در حوزه آبخیز چهل‌چای گلستان نقشه ضریب رواناب را با استفاده از مدل به‌دست آوردند و به این نتیجه رسیدند که با اصلاح و بهبود کاربری اراضی در این مناطق می‌توان تولید رواناب را کاهش داد. مرادی پور و همکاران (۱۳۹۰) در حوزه آبخیز طالقان توانایی مدل در شبیه‌سازی توزیعی مکانی سیل را بررسی کردند و نمایه ارزیابی ناش-ساتکلیف برای برآورد رواناب ۸۴/۸۵ درصد برآورد کردند. کبیر و همکاران (۲۰۱۱) در حوزه آبخیز گرگان‌رود، توانایی شبیه‌سازی جریان رودخانه با مدل WetSpa را پیش‌بینی کردند و نمایه ارزیابی ناش-ساتکلیف را برای برآورد دبی روزانه ۷۱ تا ۷۶ درصد به دست آوردند. نتایج، بیانگر قابلیت بالای مدل در برآورد مولفه‌های هیدرولوژیکی و به تبع آن شبیه‌سازی دقیق‌تر بیلان آبی بود. Kurtulus و Razack (۲۰۱۰) دو روش شبکه عصبی مصنوعی و نروفازی (ANFIS) را برای پیش‌بینی دبی روزانه در رودخانه کارستی La Rochefoucauld در جنوب شرقی فرانسه به کار بردند و نتیجه گرفتند که نروفازی به طور کلی جواب مناسب‌تری نسبت به شبکه عصبی مصنوعی ارائه می‌نماید. Kisi (۲۰۱۰) به منظور پیش‌بینی رواناب روزانه در دو ایستگاه Karabuk و Derecikviran روی رودخانه Filyos واقع در کشور ترکیه از رگرسیون موجکی۲ استفاده نمود و نتایج آن را با شبکه عصبی مصنوعی و سری زمانی مقایسه کرد. نتایج نشان داد که رگرسیون موجکی با دقت بالاتری نسبت به سری زمانی و شبکه عصبی مصنوعی رواناب را پیش‌بینی نمود. با توجه به

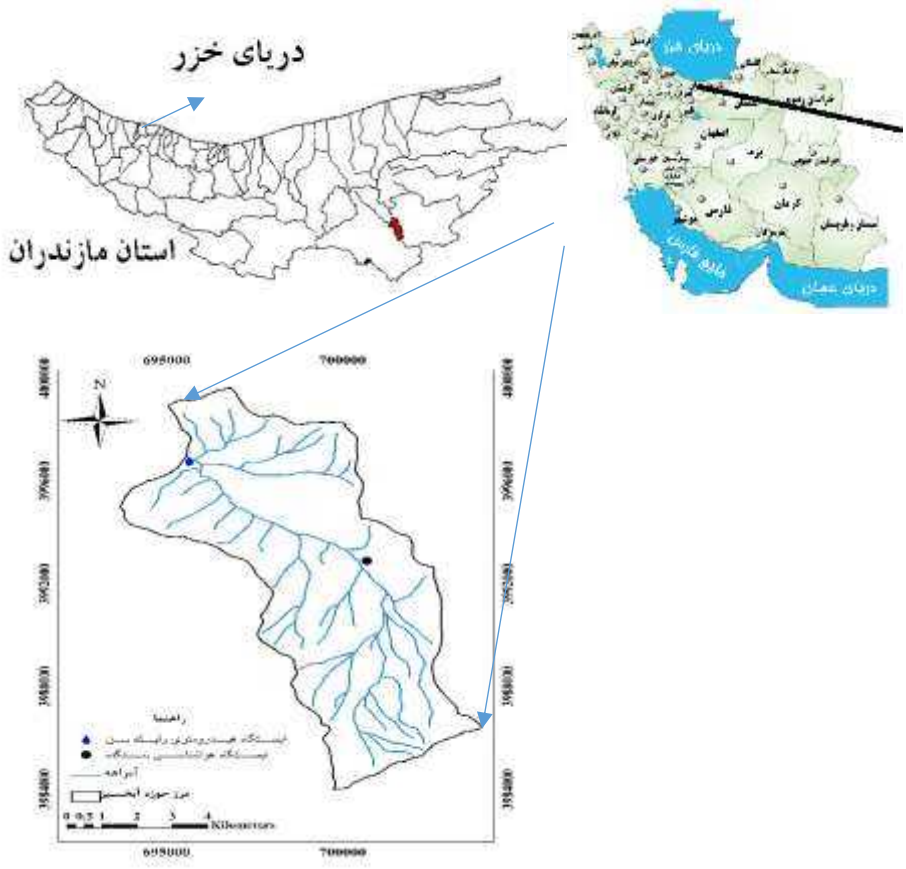
2 Wavelet rregression

مطالعات صورت گرفته در داخل و خارج از کشور بر می‌آید که مدل WetSpa اغلب در حوزه‌های آبخیز بزرگ مورد استفاده قرار گرفته است (Bahremand و همکاران، ۲۰۰۵؛ Nurmohamed و همکاران ، ۲۰۰۶؛ Kabir و همکاران، ۲۰۱۱) به همین منظور هدف از مطالعه حاضر آزمایش توانایی مدل در حوزه‌های آبخیز کوچک برای شبیه‌سازی بارش- رواناب و همچنین استفاده از روش‌های هوشمند در حوزه آبخیز کسیلیان و ارزیابی نتایج آن با مدل هیدرولوژیکی توزیعی WetSpa و ارزیابی دقت و توانایی‌ها و مزایا و معایب هر یک از این مدل‌ها در پیش‌بینی رواناب می‌باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوزه آبخیز کسیلیان در بین طول‌های جغرافیایی ´۱۸ °۵۳ تا ´۳۰ °۵۳ شرقی و عرض جغرافیایی ´۵۸ °۳۵ تا ´۰۷ °۳۶ شمالی در ارتفاعات زون مرکزی سلسله جبال البرز، در استان مازندران قرار دارد. این حوزه آبخیز از ۶ زیرحوزه آبخیز اصلی تشکیل شده است که از ارتفاعات مراتع بندبن شروع شده و بعد از ارتفاعات میانی حوزه که کاربری جنگل دارد، به دره آبرفتی- مسکونی ختم می‌شود در ارتفاعات پایین مناطق سنگده، اوریمکیک، درزیکلا، سوت‌کلا، وزملا، ولیک‌جال و داروکلا قرارداد. این حوزه آبخیز براساس روش آمبرژه دارای اقلیم ارتفاعات، اقلیم سرد و مرطوب و سرد نیمه مرطوب می‌باشد. بیشترین و کمترین دمای مشاهده شده در این حوزه آبخیز به ترتیب ۳۷/۵ و ۱۸- درجه سانتی‌گراد و دارای متوسط بارندگی سالانه حدود ۸۰۰ میلی‌متر می‌باشد. حداکثر بارندگی ماهانه در شهریور ماه و حداقل بارندگی ماهانه در اسفند ماه رخ می‌دهد. در این حوزه آبخیز دو رودخانه به نام تالار سر بند و تیله سیاه از جنوب به شمال جریان دارند. این دو رودخانه در روستای سنگده به هم محلق شده و یک رودخانه جدیدی را به وجود می‌آورند که این رودخانه جدید از روستای سنگده تا روستای ولیک بن به نام تالار سربند و از آنجا تا منطقه شیرگاه به نام کسیلیان معروف است. طول رودخانه اصلی تالار سربند ۱۶/۵ کیلومتر است که متوسط شیبی برابر ۱۳/۳درصد را به خود اختصاص می‌دهد این رودخانه در حواالی شیرگاه به رودخانه تالار پیوسته و رودخانه تالار نیز به دریای خزر می‌ریزد. رژیم رودخانه اصلی حوزه آبخیز بارانی برفی می‌باشد در این حوزه آبخیز خشک‌ترین ماه برای رودخانه اصلی مرداد ماه با دبی ۰/۲۴متر مکعب در ثانیه و مرطوب‌ترین ماه فروردین ماه با دبی ۱/۲۴ متر مکعب در ثانیه می‌باشد در رودخانه تالار سر بند دبی مشخصه حداکثر، حداقل و متوسط به ترتیب ۱/۴۶، ۰/۱۷ و ۰/۳۷۱ متر مکعب در ثانیه می‌باشد. برف‌های ذخیره شده در ارتفاعات این حوزه آبخیز هنگامی که فصل گرم و رویش گیاهان شروع می‌شود با عمل ذوب، سفره‌های منطقه را تغذیه می‌کنند. زهکش آب‌های زیرزمینی در این حوزه آبخیز توسط دو چشمه دائمی به نام‌های تالار سربند و کله‌بست انجام می‌گیرد. موقعیت حوزه آبخیز مورد مطالعه نسبت به ایران و استان مازندران در شکل (۱) آورده شده است.

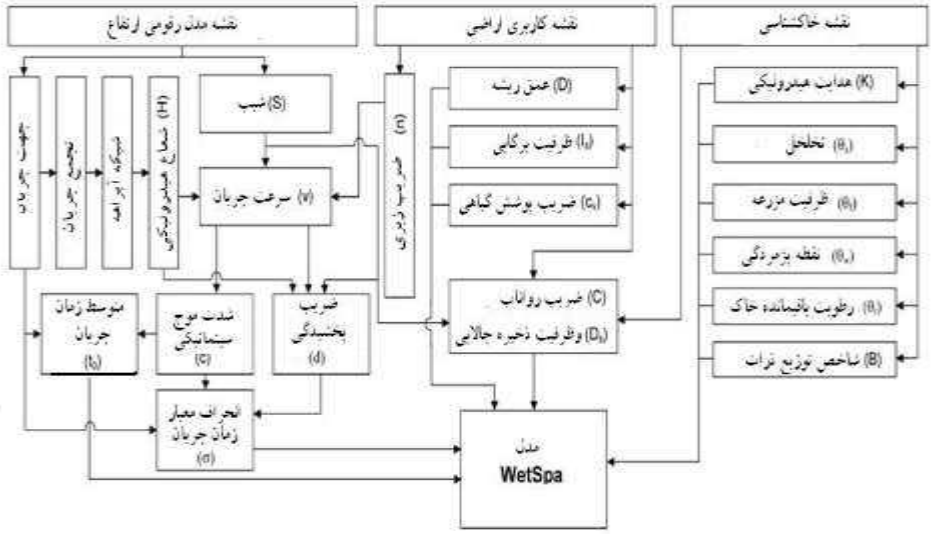


شکل ۱، موقعیت حوزه آبخیز کسیلیان در استان مازندران و ایران

روش تحقیق

مدل WetSpa، با سری داده‌های پیوسته اجرا می‌گردد، بنابراین در مرحله آماده‌سازی داده‌ها بایستی پیوستگی و قابلیت اطمینان داده‌ها کنترل گردد. رواناب سطحی در مدل WetSpa، با استفاده از روش ضریب رواناب اصلاح شده (روش استدلالی) که یک روش تجربی می‌باشد محاسبه می‌گردد (به‌جای این‌که از سایر معادلات که فرایندهای فیزیکی را بهتر ارائه می‌نماید استفاده شود) اما با وجود این محدودیت، استفاده از این روش مزایایی چون ارتباط نزدیک رواناب با خصوصیات مختلف سلول مثل شیب، کاربری اراضی ، نوع خاک و محتوای رطوبتی را داشته و دارای پتانسیل بالایی در پیش‌بینی تأثیر تغییر کاربری اراضی بر رفتار هیدرولوژیکی آبخیز می‌باشد. جریان آب زیرزمینی در مقیاس زیرحوزه آبخیز شبیه‌سازی می‌گردد. در این مدل جریان آب زیرزمینی و ذخیره آب زیرزمینی در هر گام زمانی برای زیرحوزه‌های آبخیز کوچک تعیین می‌گردد.

ورودی‌های اصلی مورد نیاز در مدل WetSpa ، شامل نقشه‌های رستری (توپوگرافی، کاربری اراضی و بافت خاک) و آمار هواشناسی- هیدرولوژیکی منطقه می‌باشد. شکل ۲ نمودار جریانی روش تحقیق را نشان می دهد.



شکل ۲، تهیه نقشه‌های توزیعی مدل بر اساس سه نقشه پایه

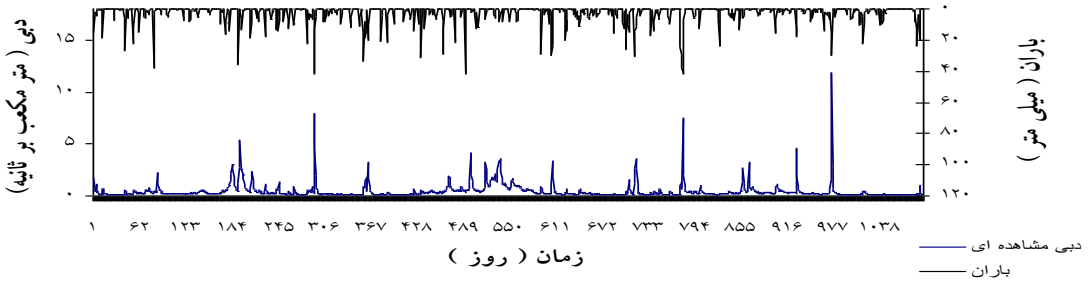
نتیجه‌گیری

خصوصیات آمار توصیفی داده‌های مورد استفاده در این تحقیق در جدول ۱ آمده است. همچنین شکل‌های ۳ و ۴ نیز آب‌نمود و باران‌نمود مشاهده‌ای در حوزه آبخیز کسیلیان در طی دوره‌های واسنجی و آزمون را نشان می‌دهند.

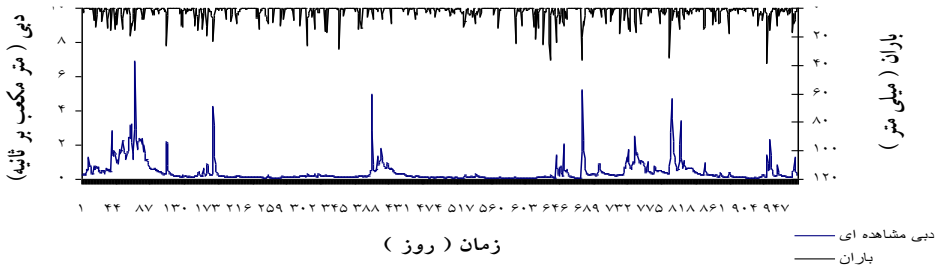
جدول ۱، خصوصیات آمار توصیفی داده‌های مورد استفاده در تحقیق

متغیر	دبی جریان (m3/s)		باران(mm)		تبخیر(mm)		دما(˚C)	
دوره	واسنجی	آزمون	واسنجی	آزمون	واسنجی	آزمون	واسنجی	آزمون
میانگین	0.44	0.42	2.41	2.28	1.90	1.91	11.48	11.45
حداقل	0.056	0.059	0	0	0.02	0.01	-5.5	-9.5
حداکثر	11.9	6.91	42	38.5	8	7.2	26.25	24.25
انحراف-معیار	0.73	0.62	5.59	4.82	1.78	1.71	6.64	7.16

شکل ۳، آب‌نمود و باران‌نمود مشاهداتی دوره واسنجی



شکل ۴، آب‌نمود و باران‌نمود مشاهداتی دوره آزمون



در بررسی آنالیز حساسیت پارامترهای مدل مشاهده گردید که ضریب افت آب زیر زمینی بیشترین حساسیت و ضریب روز درجه بارش از کمترین حساسیت برخوردار است. پس از تعیین ساختار ریاضی مدل‌ها، ورودی‌های مختلف به نرم افزار Statictica Neural Networkوارد شد. سپس داده‌ها به ۳ دسته آموزش، صحت سنجی و آزمون تقسیم‌بندی گردید. نسبت یادگیری و تعداد تکرار برای هر کدام از ورودی‌های شبکه مشخص شد. پس از انجام مراحل فوق و سعی و خطا، تعداد نرون لایه مخفی، بهترین تابع انتقال، الگوریتم یادگیری شبکه و مقادیر شبیه‌سازی شده را تعیین کرد. برای به دست آوردن بهترین ساختار ورودی نمایه‌های آماری ریشه میانگین مربعات خطا و ضریب ناش ساتکلیف برای تمام مدل‌ها تعیین گردید(جدول ۲).

جدول۲، نمایه‌های ریشه میانگین مربعات خطا و نش-ساتکلیف برای آرایش‌های مختلف ANN

شماره مدل	آرایش شبکه	الگوریتم یادگیری	تابع انتقال	آموزش		صحت‌سنجی		آزمون	
				RMSE	CR3	RMSE	CR3	RMSE	CR3
۴-۱	۱-۶-۱	لونبرگ - مارکارت	سیگموئید	۰/۰۵۵	۰/۲۷	۰/۰۵۳	۰/۲۴	۰/۰۵۰	۰/۲۲
۴-۲	۱-۸-۲	لونبرگ - مارکارت	تانژانت هیپربولیک	۰/۰۵۰	۰/۳۹	۰/۰۴۶	۰/۳۵	۰/۰۴۹	۰/۳۱

۴-۳	۱-۷-۲	کاهش گرادیان مزدوج	سیگموئید	۰/۰۴۹	۰/۲۹	۰/۰۴۵	۰/۲۲	۰/۰۵۲	۰/۱۸
۴-۴	۱-۱۰-۳	کاهش گرادیان مزدوج	سیگموئید	۰/۰۴۳	۰/۳۲	۰/۰۳۸	۰/۲۴	۰/۰۵۲	۰/۲۳
۴-۵	۱-۱۵-۴	لونبرگ - مارکارت	تانژانت هیپربولیک	۰/۰۳۸	۰/۵۹	۰/۰۳۹	۰/۵۴	۰/۵۴	۰/۴۲
۴-۶	۱-۱۲-۴	کاهش گرادیان مزدوج	تانژانت هیپربولیک	۰/۰۳۹	۰/۴۷	۰/۰۳۲	۰/۴۴	۰/۰۶۲	۰/۳۲
۴-۷	۱-۱۸-۵	کاهش گرادیان مزدوج	سیگموئید	۰/۰۳۱	۰/۵۲	۰/۰۲۷	۰/۵۴	۰/۰۶۵	۰/۳۹
۴-۸	۱-۲۲-۶	کاهش گرادیان مزدوج	سیگموئید	۰/۰۲۳	۰/۵۱	۰/۰۲۵	۰/۵۳	۰/۱۱۲	۰/۳۶
۴-۹	۱-۹-۲	لونبرگ - مارکارت	سیگموئید	۰/۰۴۷	۰/۴۶	۰/۰۴۷	۰/۴۱	۰/۰۵۰	۰/۲۱
۴-۱۰	۱-۱۰-۳	کاهش گرادیان مزدوج	سیگموئید	۰/۰۵۰	۰/۵۲	۰/۰۴۳	۰/۴۶	۰/۰۴۹	۰/۴۱
۴-۱۱	۱-۱۱-۳	کاهش گرادیان مزدوج	تانژانت هیپربولیک	۰/۰۴۵	۰/۵۳	۰/۰۴۱	۰/۴۹	۰/۰۵۰	۰/۳۷
۴-۱۲	۱-۱۴-۴	لونبرگ - مارکارت	سیگموئید	۰/۰۳۸	۰/۶۵	۰/۰۳۶	۰/۶۴	۰/۰۵۶	۰/۵۴
۴-۱۳	۱-۱۶-۵	لونبرگ - مارکارت	سیگموئید	۰/۰۳۴	۰/۶۳	۰/۰۳۴	۰/۶۳	۰/۰۷۶	۰/۵۱
۴-۱۴	۱-۲۰-۶	لونبرگ - مارکارت	تانژانت هیپربولیک	۰/۰۳۰	۰/۶۱	۰/۰۳۲	۰/۶۰	۰/۸۰	۰/۵۰

منابع

بهره‌مند، ع.، یعقوبی، ف.، و کبیر، آ. ۱۳۸۹. معرفی مدل WetSpa (مدل توزیعی انتقال آب و انرژی بین خاک، گیاه و اتمسفر). مجموعه مقالات ششمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری، گروه مهندسی آبخیزداری دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی دانشگاه تربیت مدرس. ص۱۰۸.

زارع زاده مهریزی، م.، بزرگ حداد، ا.، ۱۳۹۰: شبیه سازی و پیشبینی آبدهی با استفاده از الگوریتم ترکیبی ANN-GA، نشریه آب و خاک، ۲۴(۵):۹۴۲-۹۵۴

گودرزی م.، صلاحی ب.، حسینی س. ا. ۱۳۹۴. بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر تغییرات رواناب سطحی (مطالعه موردی: حوضه آبریز دریاچه ارومیه). مجله اکوهیدرولوژی. ۲(۲): ۱۷۵-۱۸۹.

Kisi, O. 2010: Wavelet regression model for short-term streamflow forecasting, Journal of Hydrology, 389: 344–353.

Melchiorre, C., Matteucci, M. and Azzoni, A. 2008. Artificial neural networks and cluster analysis in landslide susceptibility zonation, Geomorphology, vol. 94,no. (3-4), pp. 379 – 400.

Rwetabula, J., De Smedt, F., Rebhun, M. 2007: Prediction of runoff and discharge in the Simiyu River(tributary of Lake Victoria, Tanzania) using the WetSpa model. Hydrology and Earth System Sciences,12(4): 881–908.

Toker, A. S. and Markus, M., 2000. Precipitation-Runoff Modeling using Artificial Neural Network and Conceptual Models, Journal of Hydrologic Engineering, 5(2):156-161.

Wang, W.C., Chau, K.W., Cheng, Ch.T. Qiu, L. 2009: A comparison of performance of several artificial intelligence methods for forecasting monthly discharge time series, Journal of Hydrology, 374(3-4):294-306

Zeinivand. H. 2009. Development of spatially distributed hydrological WetSpa modules for snowmelt, soil erosion, and sediment transport. PhD Thesis, Department of Hydrology and Hydraulic Engineering, Vrije Universiteit Brussel (VUB), Brussels, Belgium. 208 pp.

Flow simulation in the Kassilian Basin Using Different Algorithms

Abstract

The main goal of this study is simulating the daily discharge of Kasilian watershed by using WetSpa model and intelligent models such as artificial neural network (ANN) and adaptive neural fuzzy inference system (ANFIS).The WetSpa model is a distributed hydrological and physically based which able to predict flood in watershed scale with various time intervals and intelligent model is black box model which is attracted by many researchers. The digital maps of topography, land use and soil type are 3 base maps used in the model for prediction of flood hydrographs. while intelligent model use available hydrometry and meteorological stations. The results of WetSpa model show that this model can simulate the river base flow with 64.35 percent Nash- Sutcliff coefficient in validation data respectively, but in error with flooding discharge. This model can simulate the water balance in kasilian watershed as well. The sensitivity analysis also shows that groundwater flow recession and rainfall degree-day coefficients are highest and lowest effect on results respectively. The results also show that ANN and ANFIS give more acceptable results with regard to statistical criteria in compare with WetSpa model. The results also show that using the rainfall and evaporation with on lag time give more reasonable results. ANFIS is also gives better results among the intelligent model.

Keywords: Runoff, WetSpa Model, Intelligent methods, ANN, ANFIS.

Predicting Plant Disease Incidence Using Machine Learning Models with Climate Variables: A Comparative Study

Samaneh Salimi[1], Seyed Mahdi Mousavi[2]

1- PhD in agricultural Entomology, Plant Protection Department, Urmia University, Iran
2- Msc student of Plant Patholog, Plant Protection Department, Urmia University, Iran

Smanhslymy085@gmail.com

Abstract

Plant diseases are major constraints to agricultural productivity worldwide, with incidence often influenced by complex interactions between climatic factors and host-pathogen dynamics. This study evaluates the predictive performance of four machine learning models—Support Vector Machine (SVM), Random Forest (RF), XGBoost, and Linear Regression—to forecast plant disease incidence based on climatic and environmental variables in diverse agroecological zones. Using a comprehensive dataset comprising meteorological variables such as temperature, humidity, precipitation, and soil moisture collected from multiple regions, models were trained and tested with rigorous cross-validation. The SVM model outperformed others, achieving the highest coefficient of determination ($R^2 = 0.375$), and lowest root mean squared error (RMSE = 1.020) and mean absolute error (MAE = 0.819). Results indicate the potential of machine learning algorithms for early disease prediction and management strategies in agriculture. Limitations related to dataset size, feature complexity, and model tuning are discussed, with recommendations for future integration of biological and management factors to enhance prediction accuracy.

Keywords: Climate variables, Machine learning, Plant disease prediction, Support Vector Machine, XGBoost

Introduction

Plant diseases represent a significant threat to global food security by reducing crop yields and quality. Accurate and timely prediction of disease incidence is critical for implementing effective management practices. Climatic variables, including temperature, humidity, precipitation, and soil moisture, substantially influence pathogen development and disease spread (Jones et al., 2019; Smith and Wang, 2021). Traditional epidemiological models often struggle to capture nonlinear and complex interactions inherent in agroecosystems (Brown and Hovmøller, 2002).

Recent advances in machine learning (ML) have offered promising alternatives for modeling such complexity by learning patterns directly from data without explicit assumptions about underlying processes (Rehman et al., 2020). Among ML algorithms, Support Vector Machines (SVM), Random Forests (RF), and gradient boosting methods like XGBoost have demonstrated strong predictive capabilities in various agricultural applications (Kumar et al., 2018; Lee et al., 2022).

This study aims to systematically compare the performance of these models in predicting plant disease incidence using climatic predictors across multiple geographic locations. The outcomes will provide insights into the suitability of different ML techniques for plant pathology forecasting and assist decision-makers in selecting appropriate tools for early warning systems.

Materials and Methods

Data were compiled from meteorological stations across five agroecological regions, capturing variables known to affect plant disease epidemiology: daily mean temperature (°C), relative humidity (%), precipitation (mm), and soil moisture content (%). Disease incidence (%) data were obtained from field surveys conducted simultaneously in the same locations over three growing seasons (2019-2021). The final dataset contained 600 observations, ensuring adequate variability in both predictors and response.

The dataset underwent standard preprocessing steps including handling missing values via multiple imputation, normalization of continuous variables, and removal of multicollinear features through variance inflation factor (VIF) analysis (Kutner et al., 2005). The data were randomly split into training (80%) and testing (20%) sets to evaluate model generalization.

Four algorithms were selected for comparison:

Support Vector Machine (SVM): Utilizes kernel functions to model complex, nonlinear relationships.

Random Forest (RF): An ensemble of decision trees built using bootstrap aggregation to reduce overfitting.

XGBoost: A gradient boosting framework optimizing weighted trees for enhanced performance.

Linear Regression: A baseline linear approach modeling direct relationships between predictors and disease incidence.

Hyperparameters were tuned using grid search combined with 5-fold cross-validation to avoid overfitting and identify optimal model configurations (Bergstra and Bengio, 2012).

Models were assessed using three metrics:

Root Mean Squared Error (RMSE): Measures the average magnitude of prediction errors.

Mean Absolute Error (MAE): Reflects average absolute difference between observed and predicted values.

Coefficient of Determination (R^2): Indicates the proportion of variance explained by the model.

The best model was selected based on highest R^2 and lowest error metrics on the test set.

Results

The comparative evaluation of models is summarized in Table 1.

Table 1: Model performance comparison based on RMSE, MAE, and R^2.

Model	RMSE	MAE	R^2

Support Vector Machine	1.020	0.819	0.375
Linear Regression	1.035	0.823	0.357
Random Forest	1.035	0.822	0.356
XGBoost	1.113	0.873	0.255

The SVM model achieved the highest predictive accuracy, explaining 37.5% of the variance in disease incidence and producing the lowest RMSE and MAE values. Figure 1 illustrates the R^2 values for each model, emphasizing the SVM's superior performance.

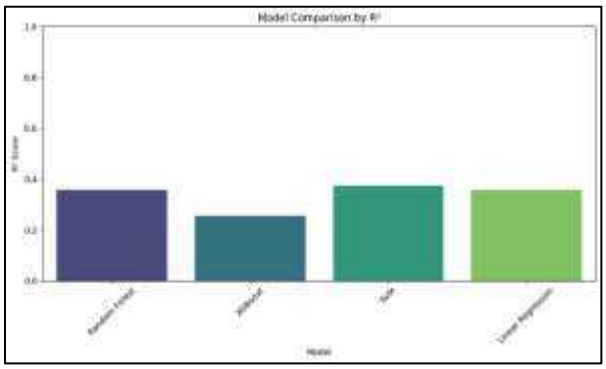


Figure 1: Bar chart comparing R^2 values for SVM, Random Forest, Linear Regression, and XGBoost models.

Scatter plots comparing observed vs. predicted values for the SVM model (Figure 2) show a strong linear relationship closely aligned with the ideal 45° line, indicating precise predictive capacity across different incidence levels.

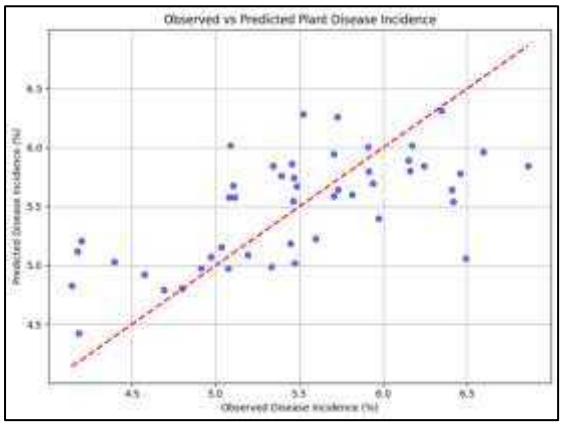


Figure 2: Scatter plot of observed versus predicted disease incidence for the SVM model.

While Linear Regression and Random Forest models showed similar results, their slightly inferior performance suggests that nonlinear relationships captured by SVM kernels contribute significantly to model success. The comparatively lower performance of XGBoost may result from insufficient hyperparameter optimization or model complexity misalignment with dataset characteristics.

Discussion

This study demonstrates the applicability of machine learning algorithms, particularly SVM, in predicting plant disease incidence using climate variables. The SVM's superior performance aligns with previous findings that its kernel-based approach effectively models complex nonlinear interactions common in ecological datasets (Cortes and Vapnik, 1995; Pal, 2005).

The moderate R^2 values indicate that while climatic factors substantially influence disease occurrence, other determinants such as host resistance, pathogen virulence, and management practices also play crucial roles (Jeger and Pautasso, 2008). Incorporating additional biological and agronomic data in future models could enhance predictive accuracy and operational relevance.

The unexpected underperformance of XGBoost suggests the necessity for comprehensive hyperparameter tuning and possibly larger datasets to fully exploit boosting algorithms' advantages (Chen and Guestrin, 2016). Additionally, the comparable performance of Random Forest and Linear Regression underscores the importance of feature engineering and variable selection in modeling efforts. Limitations include reliance

on historical meteorological data, which may not fully capture microclimatic variations influencing disease dynamics. Furthermore, the dataset size, though substantial, may constrain model generalization, warranting further validation across different crops and regions.

Despite these challenges, the study provides valuable insights for developing robust early warning systems integrating climatic data and machine learning, contributing to sustainable disease management and food security.

Conclusion

This research confirms the efficacy of machine learning techniques, especially Support Vector Machines, in predicting plant disease incidence based on climatic variables. The findings underscore the potential for integrating these approaches into decision support systems for agriculture, enabling proactive disease control. Future work should focus on expanding datasets, including biological and management variables, and exploring advanced deep learning architectures to further improve prediction precision.

References

Bergstra, J., & Bengio, Y. (2012). Random search for hyper-parameter optimization. Journal of Machine Learning Research, 13, 281-305.
Brown, J.K.M., & Hovmøller, M.S. (2002). Epidemiology — A Bridge Between Molecular Biology and Plant Pathology. Trends in Plant Science, 7(6), 267-273.
Chen, T., & Guestrin, C. (2016). XGBoost: A Scalable Tree Boosting System. Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 785-794.
Cortes, C., & Vapnik, V. (1995). Support-vector networks. Machine Learning, 20, 273-297.
Jeger, M.J., & Pautasso, M. (2008). Plant disease and global change — The importance of long-term data sets. New Phytologist, 177(2), 271-274.
Jones, J.D.G., Vance, R.E., & Dangl, J.L. (2019). Intracellular innate immune surveillance devices in plants and animals. Science, 354(6316), aaf6395.
Kumar, S., Jain, A., & Singh, R. (2018). Machine learning approaches for plant disease detection: A review. International Journal of Computer Applications, 182(20), 10-15.
Kutner, M.H., Nachtsheim, C.J., & Neter, J. (2005). Applied Linear Regression Models. McGraw-Hill.
Lee, S., Lee, H., & Park, J. (2022). Comparative study of machine learning models for predicting plant disease using environmental data. Computers and Electronics in Agriculture, 192, 106574.
Pal, M. (2005). Random forest classifier for remote sensing classification. International Journal of Remote Sensing, 26(1), 217-222.
Rehman, A., Saleem, A., & Hussain, W. (2020). Applications of machine learning in plant disease detection and management. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 11(5), 591-598.
Smith, P., & Wang, X. (2021). The impact of climate variability on plant disease epidemiology. Agricultural and Forest Meteorology, 298, 108261.

ارزیابی تغییر اقلیم و تاثیر آن بر خشکسالی در دشت ارومیه با استفاده مدل‌های جفت شده فاز ششم (CMIP6)

فرزانه سعیدپور دله‌زی [۱]، علیرضا جمشیدی[۱]، خدیجه جوان[۲]

۱- گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
۲- گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران (نویسنده مسئول)

E-Mail: .kh.javan@urmia.ac.ir

چکیده

امروزه تغییر اقلیم به یکی از دغدغه‌های انسان و یکی از چالش‌های قرن جاری تبدیل‌شده است. چراکه تغییرات اقلیمی باعث افزایش رخدادهای اقلیمی شده و پیامدهای اجتماعی، اقتصادی، زیست محیطی زیادی را به دنبال دارد. اما از مهم‌ترین پیامد تغییر اقلیم وقوع خشکسالی هست . خشکسالی پدیده جهانی و پرتکرار به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک است که طولانی شدن آن در این مناطق بر اکوسیستم‌ها، بوم‌های طبیعی و سیستم‌های اجتماعی و اقتصادی تأثیرگذار است، لذا شناسایی، پایش و پیش‌آگاهی خشکسالی در کشور ایران‌که جز مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان است از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هست. این پژوهش باهدف ارزیابی تغییر اقلیم و اثرات آن بر وقوع و افزایش خشکسالی صورت گرفته است. ابتدا از داده‌های اقلیمی (بارش) ایستگاه ارومیه استفاده شد و برای شبیه‌سازی بارش آتی (۲۰۳۵ـ۲۰۷۰) از مدل گردش عمومی جو، canESM6 تحت سناریوهای SSP4.8 و SSP8.5 استفاده شد و متغیر بارش توسط مدل SDSM ریزمقیاس نمایی گردید. سپس با استفاده از شاخص بارش استاندار شده (SPI) ، خشکسالی برای دوره پایه و دوره‌اینده با استفاده از داده‌های بارش ایستگاه ارومیه و خروجی سناریوهای SSP4.5 و SSP8.5 بررسی شد. نتایج نشان داد که بر اساس آزمون من کندال در بارش سال‌های ۱۹۷۹ تا ۲۰۱۴ روند کاهشی فاقد معناداری وجود دارد. همچنین نتایج نشان دادند که مدل SDSM در پیش‌بینی داده‌های بارش از کارایی خوبی برخوردار است. و بر اساس این مدل مجموع بارش سالانه تحت دو سناریوی SSP4.5 و SSP8.5 افزایش می‌یابد.

کلید واژه‌ها: تغییر اقلیم، خشکسالی، CMIP6، دشت ارومیه.

مقدمه

اقلیم از واژه‌ی یونانی کلیما (climate) گرفته‌شده، زمین در طول عمر خود اقلیم‌های متفاوتی را پشت سر گذاشته است چراکه اقلیم پدیده‌ای پویا و ناپایدار هست (قدم‌گاهی و نظام خیرآبادی، ۱۳۹۴). تغییر اقلیم هرگونه تغییر در وضعیت اقلیمی بوده که برای دوره‌ی زمانی معمولاً یک دهه یا بیشتر ادامه یافته و این شامل هر نوع تغییر اقلیم رخ‌داده در طول زمان چه به‌صورت طبیعی و چه با دخالت بشر است. اما با توجه به تعریف ارائه‌شده در مورد تغییر اقلیم توسط هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم ،این پدیده تنها دربرگیرنده تغییرات اقلیمی ناشی از فعالیت‌های مستقیم و غیرمستقیم بشر بوده که ترکیب اتمسفری جهان را برهم می‌زند (IPCC,2007). عامل اصلی این تغییرات آن دسته از فعالیت‌های انسانی‌اند که باعث انباشت گازهای گلخانه‌ای باقدرت ماندگاری طولانی‌مدت در جو می‌شوند (Solomon,2007). تغییر اقلیم درواقع تغییر برگشت‌ناپذیر در متوسط شرایط آب‌وهوایی بوده که در یک ناحیه رخ می‌دهد (زرعکانی و همکاران، ۱۳۹۳). شروع انقلاب صنعتی و استفاده گسترده از سوخت‌های فسیلی، جنگل‌زدایی، افزایش شهرنشینی و غیره سبب افزایش نقش بشر در تغییرات اقلیمی شده است (Cutforth et al…,1999). زیرا با استفاده گسترده سوخت‌های فسیلی، تغییرات کاربری اراضی، افزایش جمعیت جهان و به دنبال آن گسترش روزافزون فعالیت‌های صنعتی برای تأمین نیازهای روبه افزایش موجب شده‌اند تا پس از انقلاب صنعتی تغییرات مشهودی در اقلیم به وجود بیاید. بارزترین پیامدهای تغییر اقلیم عبارت¬اند از افزایش میانگین دمای کره‌ی زمین، افزایش پدیده¬های حدی اقلیم مانند سیل، توفان، تگرگ، ذوب شدن یخ‌های قطبی و افزایش شدت و طول دوره‌های خشک‌سالی است (علی بخشی و همکاران، ۱۳۹۸). از مهم ترین پیامدهای تغییر اقلیم افزایش شدت و طول دوره‌ی خشکسالی هست چراکه خشکسالی بخش جدایی‌ناپذیر تغییرات اقلیمی است . این امر به‌ویژه در کشورهای دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک به میزان بیشتری نمود می‌یابد (کرمی، ۱۳۹۵). کشور ایران به جهت قرار گرفتن در منطقه‌ی خشک و بیابانی و با بارش حدود یک‌سوم بارش جهانی و دور بودن از منابع رطوبتی ازجمله کشورهایی است که خسارت هنگفتی از این تهدید طبیعی در گستره‌های مختلف دریافت می‌کند (رحیمی و همکاران، ۱۳۸۸). لذا شناسایی، بررسی اثرات تغییر اقلیم بر خشک‌سالی ، پایش و پیش‌آگاهی خشکسالی در کشور ایرآن‌که جز مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان است از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هست (Touchan et al, 2005).

در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی در سطح ملی و بین‌المللی با استفاده از روش های مختلف به بررسی تغییرات اقلیم و تاثیرات مختلف این تغییرات پرداخته اند. در ایران شیراوند و هاشمی (۱۳۹۵) به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر امنیت پایدار پرداخته و نتیجه گرفته‌اند که تغییر اقلیم و گرمایش جهانی برتمامی موجودات زنده اثرمیگذارند. باعث افزایش تبخیر شده و بر کشاورزی که یکی از مهم‌ترین فعالیت‌های تولیدی کره‌ی زمین است اثرمیگذارند چراکه اثرات عمده تغییر اقلیم بر کشاورزی بستگی به ۲متغیر دما و بارندگی دارد و درنتیجه خشکسالی امنیت غذایی را به خطر انداخته و باعث ایجاد ناامنی برای دولت‌ها می‌شود. حجی زاده و همکاران (۱۳۹۸) به بررسی تأثیر اقلیم بر سلامت انسان پرداخته و نتیجه گرفتند که تغییر اقلیم با مسائل اجتماعی، سلامتی و تندرستی و روانی ارتباط داشته و تهدیدی برای تندرستی به‌ویژه در کشورهای

کم‌درآمد که ظرفیت پذیرش این پدیده ضعیف است حساب می‌شود اما چون اجرای استراتژی‌های تطابق به‌ویژه در کشورهای فقیر با مشکل روبرواند گزینه‌ی مقرون‌به‌صرفه تر استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر است که باعث کاهش آلودگی هوا و درنتیجه کنترل تغییر اقلیم می‌شود.

چن و توآلا (۲۰۱۸) به مطالعه اتر تغییر اقلیم بر بلایای طبیعی ناشی از آن در حوضه رودخانه لینبین واقع در جنوب تایوان پرداختند و نتیجه گرفتند که خطر فرونشست زمین‌بر اثر تغییر اقلیم افزایش‌یافته است. و ترکیب تغییر اقلیم و فرونشست زمین سبب افزایش عمق و مدت و فاصله طفیان رودخانه‌ای شده‌اند. شی و چن (۲۰۱۸) به بررسی تغییرات اقلیمی طی دوره ۱۹۶۱ـ۲۰۱۱ در استان یونان چین پرداختند و نتیجه گرفتند که ارتباط بین تغییرات پوشش زمین و دما قوی‌تر از ارتباط آن با بارش در این منطقه هست. استرژیک و همکاران (۲۰۱۰) در تحقیقی تحت عنوان مشخص کردن تغییرات خشکسالی ایالات‌متحده ناشی از تغییرات اقلیمی در ایالات‌متحده، نتیجه گرفتند که تجزیه‌وتحلیل شاخص spi نشان‌دهنده‌ی این است که فراوانی خشکسالی هواشناسی بر اساس تغییر الگوی بارش عموماً در برخی زیر حوضه‌ها افزایش و در برخی دیگر کاهش‌یافته اما برخلاف خشکسالی هواشناسی، خشکسالی هیدرولوژیکی اندازه‌گیری شده توسط PDSİ بیانگر افزایش فراوانی خشکسالی در تمامی زیر حوضه‌هاست زیرا این شاخص با شاخص SPİ متفاوت است، SPİ دما را در محاسبه در نظر می‌گیرد و افزایش دما باعث افزایش نرخ تبخیر و تعرق و درنتیجه کاهش رطوبت خاک می‌شود.

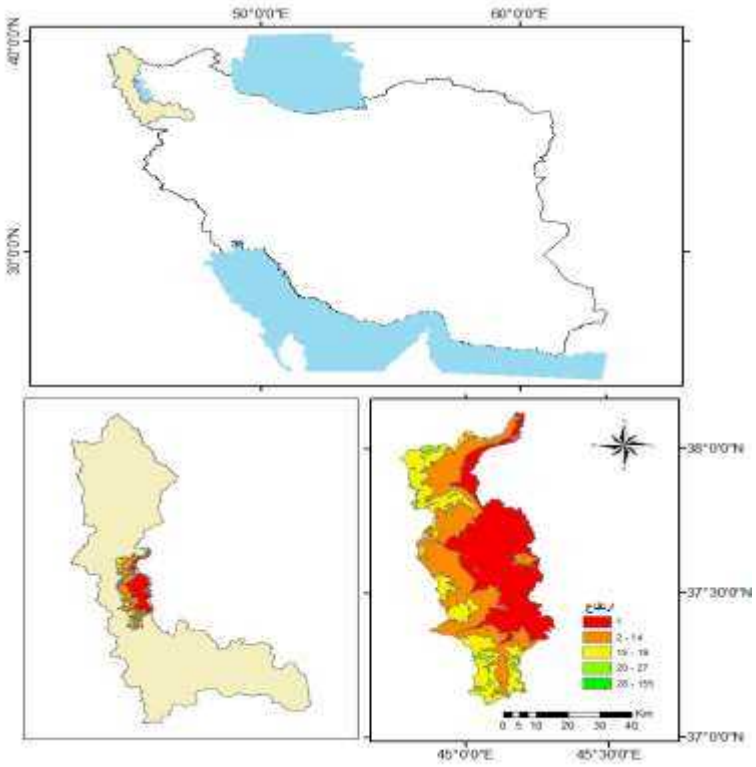
با این حال مطالعه‌ای که تغییرات اقلیمی و تاثیر ان بر خشکسالی را در دشت ارومیه مورد بررسی قرار دهد وجود ندارد بنابراین هدف مطالعه حاضر بررسی وضعیت تغییر اقلیم و اثرات آن بر خشکسالی با استفاده از مدل‌های جفت شده فاز ششم (CMIP6) مدل MPI-ESM1-2-HR و شاخص بارش استاندارد شده (SPI) در دشت ارومیه طی دوره ۱۹۷۹_ ۲۰۱۴ و برآورد داده ها برای آینده می‌باشد.

مواد و روش ها

منطقه مورد مطالعه

دشت ارومیه بین طول‌های ۴۴ درجه و ۲۰ دقیقه تا ۴۵ درجه و ۲۰ دقیقه شرقی و عرض‌های ۳۷ درجه و ۰۶ دقیقه تا ۳۸ درجه شمالی واقع‌شده است. از شمال به حوضه آبریز زولاچای و خرخره چای، از جنوب به حوضه آبریز گدارچای، از شرق به دریاچه ارومیه و از غرب به مرز ایران و ترکیه محدود می‌شود (کرم پور و همکاران،۱۳۹۸). متوسط بارندگی سالانه در دشت ارومیه حدود ۳۳۲ میلی‌متر بوده و دوره بارندگی آن از اواخر مهر و ابتدای آبان شروع‌شده تا خرداد ادامه دارد و به‌طور متوسط سالانه ۱۱۱ روز یخبندان دارد. متوسط تبخیر در آن حدود ۱۲۱۲ میلی‌متر در سال هست که حداکثر تبخیر در ماه‌های تیر و مرداد و حداقل آن در فصل زمستان است (سازمان آب منطقه‌ای آذربایجان غربی، ۱۳۷۱). منابع تأمین آب موردنیاز محدوده موردمطالعه شامل آب‌های سطحی و آب‌های زیرزمینی هست. آب‌های سطحی حاصل از جریان رودخانه‌ها و مسیل‌ها هست که در بعضی مواقع سال به‌صورت محدود مورداستفاده قرار می‌گیرد. مهم‌ترین رودخانه‌های دشت ارومیه،

نازلوچای، روضه چای، شهر چای و باراندوز چای می‌باشند که از ارتفاعات واقع در مرز ترکیه و ایران سرچشمه می‌گیرند (آرشیو سازمان آب منطقه آذربایجان غربی). متوسط ارتفاع دشت ارومیه ۱۳۴۰ متر از سطح دریا هست که بلندترین نقطه منطقه کوه بره رش با ارتفاع ۳۶۰۸ متر از سطح دریا و پست‌ترین نقطه آن حاشیه دریاچه ارومیه به ارتفاع ۱۲۸۵ متر هست (مهندسین مشاور کاو آب، ۱۳۸۸). موقعیت جغرافیای منطقه مورد مطالعه در استان آذربایجان غربی و ایران در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل۱: موقعیت منطقه موردمطالعه در تحقیق

داده و روش‌ها

در این مطالعه از اطلاعات ایستگاه سینوپتیک ارومیه و داده‌های میانگین بارش ماهانه این ایستگاه طی دوره ۱۹۷۹_ ۲۰۱۴ برای پایش خشکسالی و بررسی روند بارش در منطقه موردمطالعه استفاد شد. مشخصات ایستگاه موردمطالعه در جدول ۱ نشان داده‌شده است. همچنین، برای تشخیص روند بارش از آزمون غیر پارامتریک من_کندال، و برای برآورد داده‌های بارش آینده از مدل‌های جفت شده فاز ششم (CMIP6) مدل MPI-ESM1-2-HR (مدل مرکز ماکس-پلانک) تحت سناریوی انتخابی SSP4.5 ، SSP8.5 و از مدل ریزمقیاس نمایی آماری SDSM6 استفاده گردید(جدول 2). هم‌زمان با بررسی تغییرات بارش روند تغییرات خشکسالی نیز طی ۲۰۳۵_ ۲۰۷۰ به‌منظور ارزیابی تغییر اقلیم مورد ارزیابی و پیش‌بینی قرار

گرفت. برای پایش خشکسالی، از شاخص بارش استانداردشده (SPI) در مقیاس دوازده‌ماهه استفاده می‌شود. مشخصات طبقه بندی مقادیر خشکسالی در جدول۳ ارائه گردید .

درنهایت، برای آزمون کارایی مدل، از معیارهای ضریب تعیین، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین مطلق خطا (MAE) استفاده گردید.

جدول۱. مشخصات ایستگاه موردمطالعه

نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع	نوع ایستگاه
ارومیه	۴۴/۲۰	۳۷/۰۶	۱۳۴۰	سینوپتیک

جدول۲. مشخصات مدل MPI_ESM1

نام مدل	کشور توسعه‌دهنده	نام مرکز تحقیقاتی	دقت تفکیک(درجه)	تفکیک افقی km	سناریوهای انتشار	سال انتشار
MPI-ESM1-2-HR	آلمان	Max Plank Institute for Meteorology	۱/۸۷۵×۱/۸۶۸	۱۰۰	SSP2_4.5 SSP5_8.5	۲۰۱۷

جدول۳. طبقه‌بندی مقادیر شاخص SPI (McKee et al.,1993)

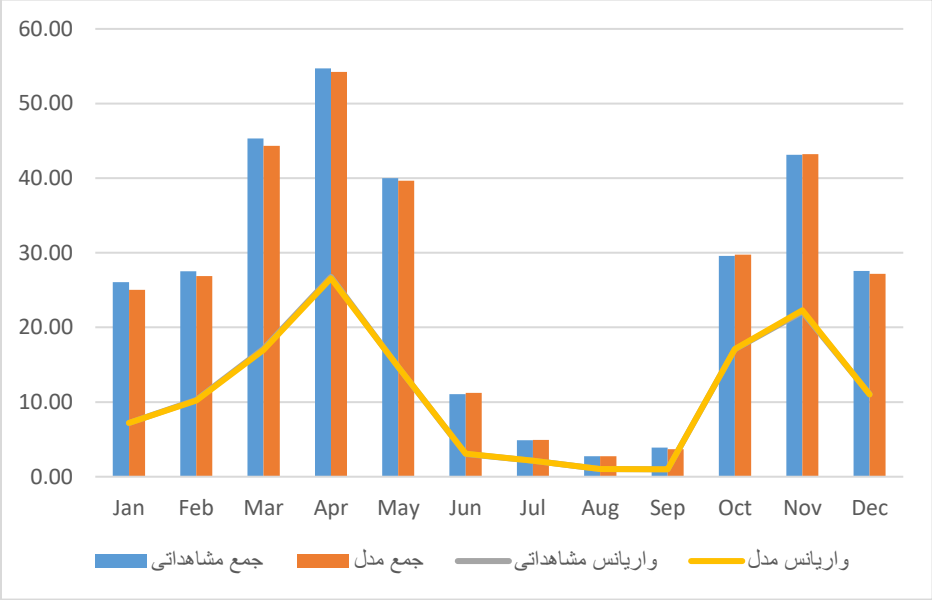
وضعیت خشکسالی	مقدار SPI
ترسالی خیلی شدید	۲ و بیشتر
ترسالی شدید	۱/۹۹ تا ۱/۵
ترسالی متوسط	۱/۴۹ تا ۱
نرمال	۰/۹۹ تا ۰/۹۹-
خشکسالی متوسط	۱-تا ۱/۴۹-
خشکسالی شدید	۱/۵- تا ۱/۹۹-
خشکسالی خیلی شدید	۲- و کمتر

بحث و نتایج

ابتدا داده‌های بارش ایستگاه موردنظر با استفاده از آزمون من_کندال در سطح معنی‌داری ٪۹۵ و ٪۹۹ بررسی شده و نتایج نشان دهنده فاقد معنی‌داری روند تغییرات بارش در هشت ماه از سال یعنی فوریه، مارس، آوریل، می، ژوئن، ژولای، نوامبر، دسامبر میباشد که نتایج حاصل از انجام محاسبات آزمون من کندال در جدول ۴ ارائه شده است. سپس میزان همبستگی متغیرهای پیش‌بینی شونده با متغیرهای پیش‌بینی کننده سنجیده شده و بهترین متغیرهای پیش‌بینی کننده از بین ۲۶ متغیرNCEP که بیشترین میزان همبستگی را با متغیرهای پیش‌بینی شونده دارند در سطح معنی‌داری ٪۵ انتخاب گردید. پس از تعیین متغیرهای بزرگ‌مقیاس پیش‌بینی کننده، این متغیرها برای واسنجی به مدل معرفی شدند. بعد از اتمام مراحل واسنجی، بارش روزانه ایستگاه ارومیه برای دوره پایه (۱۹۷۹ـ۲۰۱۴) شبیه‌سازی شد. . نتایج حاصل بیانگر آن است که اختلاف معناداری بین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده وجود ندارد و مقادیر همبستگی قابل‌قبول است (شکل۲). برای اطمینان از صحت سنجی مدل، از معیارهای آماری R^2 ،RMSE، MAE ، MSE در کنار روش ترسیمی استفاده شد. نتایج حاصل از این معیارهای آماری برای پارامتر بارش در جدول ۵ ارائه‌شده است که مدل از کارایی خوبی برای پیش‌بینی شاخص بارش برخوردار است.شاخص R^2 با مقدار ۰/۹۹۸ و ضریب MAE با مقدار ۰/۰۱۷ بیشترین میزان کارایی مدل در برآورد بارش در مقیاس ماهانه را نشان می‌دهند. که مقادیر این ضرایب توان و کارایی بالای مدل SDSM در شبه سازی پارامترهای اقلیمی به‌ویژه بارش را بیان می‌کنند. چراکه هرچه مقدار RMSE، MAE ، MSE کمتر و مقدار R^2 بیشتر باشد مدل از کارایی بیشتری برخوردار است.

جدول ۴. نتایج انجام محاسبات من ـ کندال برای ایستگاه ارومیه

نام ایستگاه	ارومیه												
ماه	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	ژولای	آگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر	سالانه
ـ	۰/۰۰	-۱/۸۷	-۰/۷۸	-۰/۳۱	-۰/۲۰	-۱/۰۸	-۰/۵۷	۰/۳۰	۰/۹۱	۰/۰۰	-۰/۲۳	-۱/۴۳	-۰/۸۰



شکل۲. . مقایسه داده‌های مشاهداتی و مدل شده جمع بارش و واریانس

جدول۵ ـ عملکرد مدل SDSM در دوره پایه(۱۹۷۹ـ۲۰۱۴) با استفاده از معیارهای مختلف

متغیر اقلیمی	شاخص آماری				
بارش	R^2	MSE	RMSE	MAE	
	۰/۹۹۸	۰/۲۵۲	۰/۵۰۲	۰/۰۱۷	

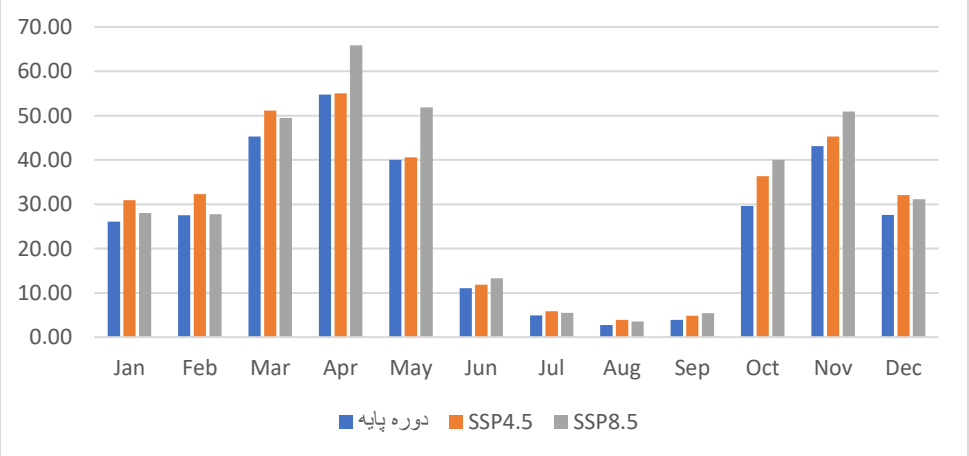
_ شبیه‌سازی بارش ایستگاه ارومیه برای دوره‌اینده (۲۰۳۵ـ۲۰۷۰ میلادی) و بررسی تغییرات بارش

با استفاده از مدل گردش عمومی جو MPI-ESM1-2-HR داده‌های بارش برای دوره زمانی آینده (۲۰۳۵ـ۲۰۷۰) تحت دو سناریوی SSP4.5 (حد وسط) و SSP8.5 (بدبینانه) برآورد گردید. و درنهایت به مقایسه آماری و ترسیمی داده‌های پایه مشاهداتی و محاسباتی برای آینده پرداخته شد (جدول ۶)، (شکل ۳و ۴). نتایج حاصل از ریزمقیاس نمایی داده‌های بارش در دوره‌اینده بر اساس هر دو سناریوی SSP4.5 و SSP8.5 افزایش بارش در ماه‌های مارس، اکتبر، نوامبر و دسامبر را نشان می‌دهد. بیشترین افزایش بارش در ماه می تحت سناریوی SSP8.4 ، ۱۱/۸۳ میلی‌متر پیش‌بینی‌شده است. بیشترین تفاوت بین داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی‌شده بر اساس سناریوی SSP4.5 در ماه‌های ژانویه، فوریه، مارس، اکتبر، نوامبر و دسامبر، زمانی که بارش به ترتیب ۴/۸۶، ۴/۷۳، ۵/۸۳، ۶/۷۲، ۲/۱۵ و ۴/۴۷ میلی‌متر بیشتر از داده‌های مشاهداتی است رخداده است. بیشترین تفاوت بر اساس سناریوی SSP8.5 بین داده‌های مشاهداتی و پیش‌بینی‌شده در ماه‌های مارس،

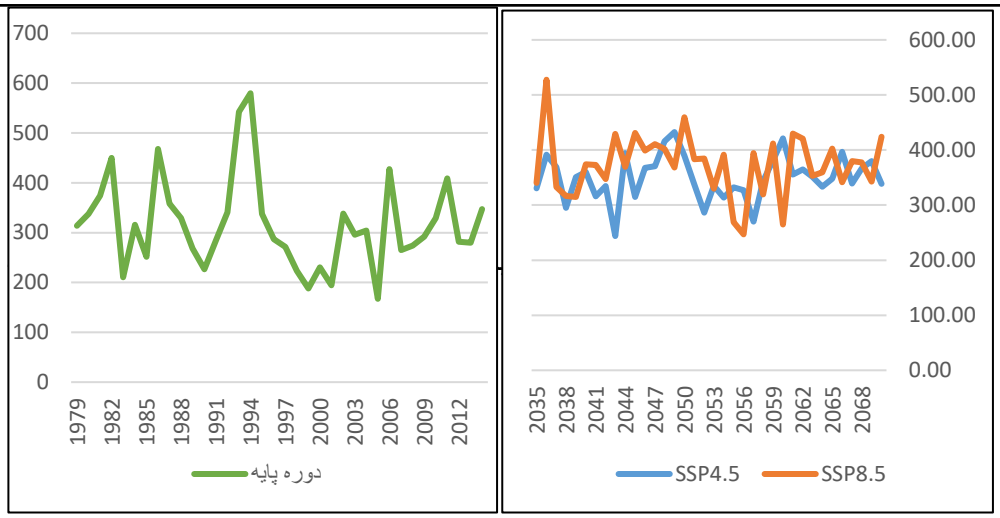
آوریل، می، ژوئن، اکتبر، نوامبر و دسامبر به ترتیب با افزایش ۴/۱۵، ۱۱/۱۵، ۱۱/۸۳، ۲/۲۲، ۱۰/۳۹، ۷/۸۱ و ۳/۵۷ میلی‌متر رخ‌داده است.

جدول ۶. تغییرات بارش دوره‌اینده(۲۰۳۵ـ۲۰۷۰) در مقایسه با دوره پایه(۱۹۷۹ـ۲۰۱۴) در دشت ارومیه

ماه	SSP4.5	SSP8.5
Jan	۴/۸۶	۱/۹۴
Feb	۴/۷۳	۰/۲۰
Mar	۵/۸۳	۴/۱۵
Apr	۰/۳۳	۱۱/۱۵
May	۰/۵۹	۱۱/۸۳
Jun	۰/۷۷	۲/۲۲
Jul	۰/۹۵	۰/۵۷
Aug	۱/۱۱	۰/۷۹
Sep	۰/۹۶	۰/۵۲
Oct	۶/۷۲	۱۰/۳۹
Nov	۲/۱۵	۷/۸۱
Dec	۴/۴۷	۳/۵۷

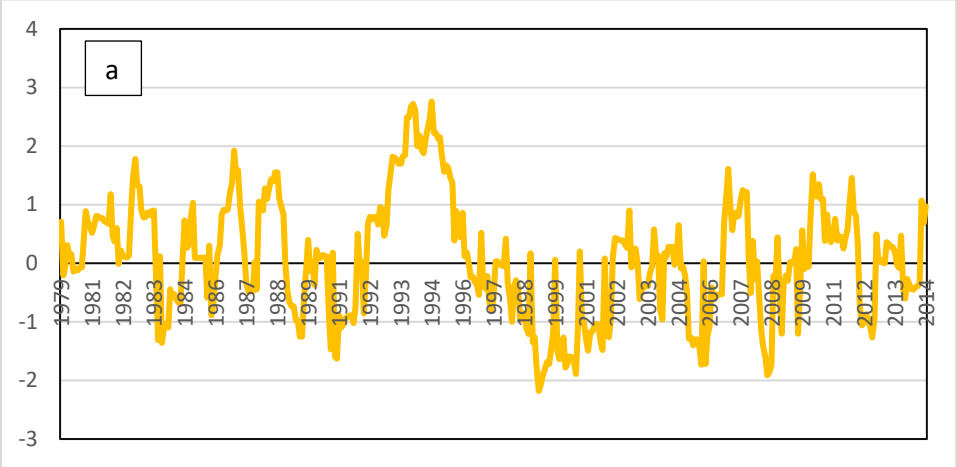


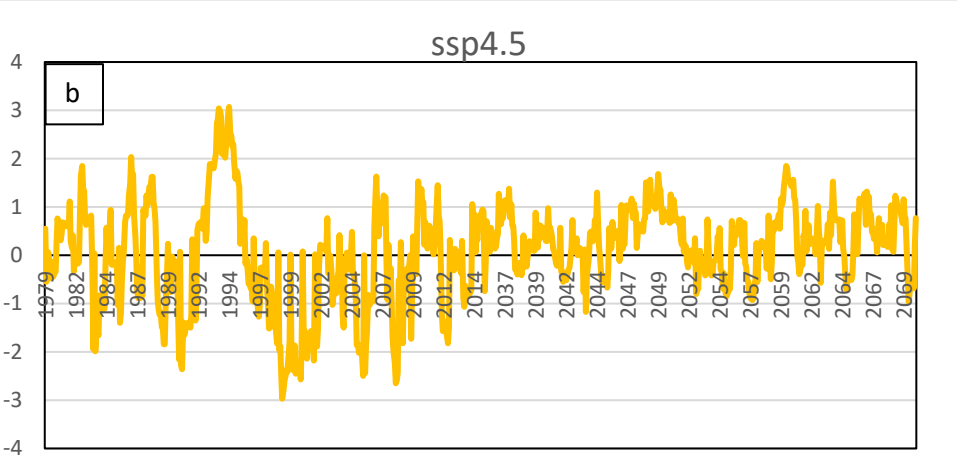
شکل ۳. مقایسه بارش در دوره‌اینده(۲۰۳۵ـ۲۰۷۰) با دوره پایه(۱۹۷۹ـ۲۰۱۴) در دشت ارومیه

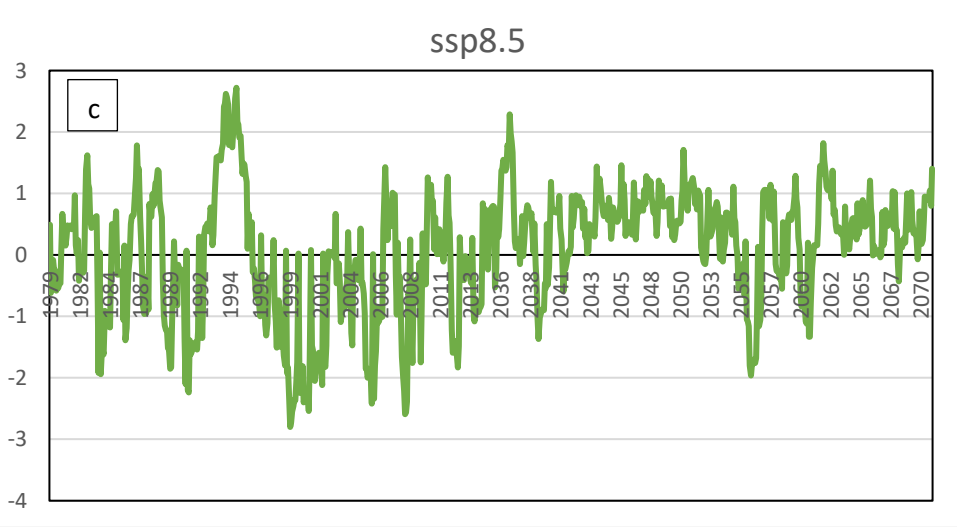


۴_ بررسی روند تغییرات خشکسالی با SPI

داده‌های بارش ماهانه طی دوره آماری ۱۹۷۹ـ۲۰۱۴، و سناریوهای ssp4.8 و ssp8.5 توسط شاخص بارش استانداردشده (SPI) در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه محاسبه گردید. نتایج حاصل از آن نشان دهنده آن است که در سال ۱۹۸۴ خشکسالی بین ۱/۰۱- تا ۱/۹۴- قرار دارد که بیانگر خشکسالی متوسط و شدید بر منطقه موردمطالعه هست . در سال ۲۰۰۰ خشکسالی بین ۱/۷۱- تا ۲/۵۷- قرار دارد که گویای چیرگی خشکسالی شدید و خیلی شدید (حاد) بر منطقه است. در سال ۲۰۱۴ افزایش در میانگین ۱۲ ماهه spi دیده می‌شود که بین ۰/۷۳- تا ۰۱/۰۷- قرار دارد و بیانگر خشکسالی متوسط و نرمال در منطقه هست. میزان spi در آینده برای سال ۲۰۵۰ (۲۰۳۰ـ۲۰۷۰) تحت دو سناریوی SSP4.5 و SSP8.5 در مقایسه با دوره پایه افزایش‌یافته که تحت سناریوی SSP8.5 بین ۰/۲۴ تا ۰/۸۹ قرار دارد و بیانگر حالت نرمال در منطقه هست. در سناریوی SSP4.5 بین ۰/۶۸ تا ۱/۳۹ قرارگرفته و گویای حالت نرمال تا ترسالی متوسط در دشت ارومیه هست (شکل ۵). نتایج محاسبات سالانه در جدول ۷ ارائه‌شده است. با توجه به جدول ۷، فراوانی خشکسالی های دشت ارومیه، از سال ۱۹۷۹ تا ۲۰۱۴ شش مورد خشکسالی رخداده است که ۳ مورد از آن خشکسالی متوسط و ۳ مورد دیگر خشکسالی شدید می‌باشند.


a
4
3
2
1
0
-1
-2
-3
1979 1981 1982 1983 1984 1986 1987 1988 1989 1991 1992 1993 1994 1996 1997 1998 1999 2001 2002 2003 2004 2006 2007 2008 2009 2011 2012 2013 2014


ssp4.5
b
4
3
2
1
0
-1
-2
-3
-4
1979 1982 1984 1987 1989 1992 1994 1997 1999 2002 2004 2007 2009 2012 2014 2037 2039 2042 2044 2047 2049 2052 2054 2057 2059 2062 2064 2067 2069


ssp8.5
c
3
2
1
0
-1
-2
-3
-4
1979 1982 1984 1987 1989 1992 1994 1996 1999 2001 2004 2006 2008 2011 2013 2036 2038 2041 2043 2045 2048 2050 2053 2055 2057 2060 2062 2065 2067 2070

شکل ۵. روند تغییرات شاخص spi در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه در طول دوره آماری ۱۹۹۷ـ۲۰۷۰ (a)، تحت دو سناریوی ssp4.5 (b)و ssp8.5 (c)در دشت ارومیه

جدول ۷. فراوانی خشکسالی های دشت ارومیه بر اساس شاخص SPI سالانه

ایستگاه	ترسالی خیلی شدید	ترسالی شدید	ترسالی متوسط	نرمال	خشکسالی متوسط	خشکسالی شدید	خشکسالی خیلی شدید	مجموع خشکسالی
ارومیه	۲	۱	۳	۲۳	۳	۳	۰	۶

نتیجه گیری

جهت بررسی روند بارش ایستگاه ارومیه به‌صورت ماهانه از آزمون من ـ کندال استفاده گردید. نتایج این آزمون نشان‌دهنده است که در روند داده‌های ماهانه بارش ایستگاه ارومیه در دوره آماری ۱۹۷۹ـ۲۰۱۴ تغییرات معناداری نداشته است. همچنین در داده‌های سالانه بارش این ایستگاه نیز روند معنی‌داری مشاهده نشده است. روش‌های مختلفی برای ریزمقیاس نمایی خروجی مدل‌های گردش عمومی جو وجود دارد که این روش‌ها نتایج مختلفی را می‌توانند به دنبال داشته باشند. ازجمله مهم‌ترین دلایل مؤثر بر متفاوت این نتایج عدم قطعیت هست. در این تحقیق برای شبیه‌سازی پارامتر بارش از مدل SDSM و از مدل‌های گردش عمومی جو از مدل MPI-ESM1-2-HR در دشت ارومیه استفاده شد. و از خروجی مدل MPI تحت سناریوهای SSP4.5 و SSP8.5 برای شبیه‌سازی دوره‌اینده استفاده گردید. نتایج حاصل از داده‌های NCEP نشان‌دهنده آن است که متغیرهای پیش‌بینی کننده انتخاب‌شده برای شبیه‌سازی داده‌های بارش برای دوره‌اینده از کارای قابل قبولی برخوردار است و داده‌های مدل شده بارش با داده‌های مشاهداتی همبستگی دارند. در هر دو سناریوی موردبررسی برای دوره ۲۰۳۵ـ۲۰۷۰ در دشت ارومیه به‌طورکلی بارش افزایشی هست. نتایج ریزمقیاس سازی بارش برای دوره‌اینده تحت هر دو سناریوی SSP (SSP4.5 و SSP8.5) نشان‌دهنده افزایش بارش در ماه‌های مارس، اکتبر، نوامبر و دسامبر هست. در بارش سالانه به‌طورکلی بارش تحت سناریوهای SSP نسبت به دوره پایه افزایش نشان می‌دهد. تغییر اقلیم و بلاهای طبیعی به‌ویژه خشکسالی باهم رابطه متقابلی داشته و بر یکدیگر به‌صورت منفی و مثبت تأثیر می‌گذارند بنابراین با استفاده از داده های پایه دوره ۱۹۷۹_۲۰۱۴ و نتایج سناریوهای SSP4.5 و SSP8.5 و با استفاده از شاخص SPI خشکسالی محاسبه گردید.

منابع

رحیمی،داریوش، موحدی،سعید و برقی، حمید (۱۳۸۸). بررسی شدت خشکسالی با شاخص نرمال بارش (مطالعه موردی استان سیستان و بلوچستان). جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، دوره ۲۰، شماره۴ (پیاپی ۳۶)، صص ۵۶ـ۴۳..

زرعکانی،فاطمه، کمالی،غلامعلی و چیذری،امیر حسین(۱۳۹۳). اثر تغییر اقلیم بر اقتصاد گندم دیم (مطالعه موردی خراسان شمالی). اقتصاد و توسعه منطقه‌ای،دوره۶، شماره۲، صص ۳۱۰ـ۳۰۱.

سازمان آب منطقه‌ای آذربایجان غربی، دفتر تلفیق و بیلان، ۱۳۸۴، گزارش هواشناسی محدوده مطالعاتی دشت ارومیه.

شیراوند هنگامه و هاشمی، محمد ناصر(۱۳۹۵). بررسی اثرات تغییر اقلیم بر امنیت ملی پایدار. کنفرانس پدافند غیرعامل و توسعه پایدار، دوره صفر، شماره ۱،صص ۶۹۱_۷۰۵.

علی بخشی،حسن، دوراندیش،آرش، صبوحی،محمود(۱۳۹۸). پیامدهای تغییر اقلیم بر بازار محصولات کشاورزی.اقتصاد کشاورزی،دوره۱۳، شماره۴، صص۸۶ـ۵۵.

قدمگاهی،سید مسعود و نظام خیرآبادی، سید مرتضی (۱۳۹۴). تغییر اقلیم و تأثیر بر تولید زراعی.کنگره پیشگامان پیشرفت،دوره صفر،شماره۸، ۵۹۶ـ۵۸۹.

کرم پور، مهدی، نوین پور، اسفندیار عباس، محمدحسین زاده، مهسا، (۱۳۹۸). بررسی روند تغییرات کمی سطح آب زیرزمینی دشت ارومیه، پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته آب شناسی، دانشگاه ارومیه، دانشکده علوم، گروه زمین‌شناسی.

مهندسین مشاور کاو آب، (۱۳۸۸). بازنگری مطالعات نیمه تفصیلی و بیلان محدوده مطالعاتی دشت ارومیه. گزارش زمین‌شناسی و ژئوفیزیک، شرکت سهامی آب منطقه ای استان آذربایجان غربی.

Cut Forth, H.W., Woodwin, B.G., Mc Cokey, R.J., Smith, D.G., Jefferson, P.G., and Akinremy, O.O. 1999. Climate Change in the Semiarid prairie of southwestern Saskatchewan: Late winter-early spring. Can. J. Plant. Sci. 79: 343-353.

Chen, Ching-Nuo .,Tfwala, Samkele S.2018.Impacts of Climate Change and Land Subsidence on Inundation Risk, Journal of Water,10, 157:1-21.

IPCC (2007). Climate change: climate change impacts, adaptation, and vulnerability. Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Glossary. London: Cambridge University Press. Solomon, S. (Ed.) (2007). Climate change 2007- the physical science basis: Working Group I, Contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC, 4. London: Cambridge University Press.

Shi,Haiyun ; Chen, Ji, (2018). Characteristics of climate change and its relationship with land use/cover change in Yunnan Province, China , International journal of climatology,Volume38, Issue5, pp: 2520- 2537.

Strzepek,K.,yohe,g.,neuman,j.,Boehlert,b.,(2010).characterizing change in drought risk for the united atates frome climate change .environ res lett5:1_9.

Touchan, R., Funkhouser, G., Hughes, M., & Erkan, N. (2005) "Standardized Precipitation Index Reconstructed From Turkish Tree-Ring Widths", Climatic Change, 72: 331–353.

سومین کنفرانس ملی آب و هواشناسی ایران (با محوریت تغییر اقلیم)
The 3rd National Conference on Climatology of Iran (Focusing on Climate Change)
ارومیه ۱۶ مهر ۱۴۰۴

Assessment of Climate Change Impacts on Drought in the Urmia Plain Using Phase 6 Coupled Climate

Farzaneh Saeidpour dalezi[1], Alireza Jamshidi1, Khadijeh Javan[2]

Department of geography, Faculty of Literature and Humanities, Urmia, Urmia University, Urmia. Iran

Department of geography, Faculty of Literature and Humanities, Urmia, Urmia University, Urmia. Iran

E_Mail: .kh.javan@urmia.ac.ir

Abstract

Nowadays, climate change has become one of humanity's major concerns and one of the key challenges of the current century, as it intensifies the occurrence of climatic events and entails numerous social, economic, and environmental consequences. Among the most significant impacts of climate change is the occurrence of drought. Drought is a global and recurrent phenomenon, particularly in arid and semi-arid regions, where its prolonged persistence exerts profound effects on ecosystems, natural environments, and socio-economic systems. Therefore, the identification, monitoring, and forecasting of drought in Iran—classified as one of the world's arid and semi-arid regions—holds particular importance. This study was conducted with the aim of assessing climate change and its effects on the occurrence and intensification of drought. First, climatic data (precipitation) from Urmia station were employed. To simulate future precipitation (2035–2070), the CanESM6 general circulation model under the SSP4.5 and SSP8.5 scenarios was applied, and the precipitation variable was downscaled using the SDSM model. Subsequently, drought was analyzed for both the baseline and future periods using the Standardized Precipitation Index (SPI), based on Urmia station precipitation data and the outputs of the SSP4.5 and SSP8.5 scenarios. The results indicated that, according to the Mann-Kendall test, precipitation during the years 1979–2014 exhibited a decreasing but statistically insignificant trend. Furthermore, findings revealed that the SDSM model demonstrates good performance in predicting precipitation data. Based on this model, the total annual precipitation is projected to increase under both SSP4.5 and SSP8.5 scenarios.

Keywords: Climate change, Drought, CMIP6, Urmia plain

ارزیابی اثرات تغییر اقلیم و تغببرکاربری اراضی بر رواناب سطحی با استفاده از مدل SWAT مطالعه موردی حوضه آبریز هامون جازموریان

فروزان عیسوندزیبایی، دانش آموخته دکتری آب و هواشناسی، دانشگاه تربیت مدرس

چکیده

حوضه آبریز هامون جازموریان به‌عنوان یکی از مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران، در سال‌های اخیر با اثرات شدید تغییرات اقلیمی و فشارهای انسانی مواجه بوده است. در این پژوهش با بهره‌گیری از مدلSWAT ، تغییرات رواناب در دوره پایه (۱۹۹۶–۲۰۱۲) و آینده (۲۰۲۱–۲۰۸۰) تحت سناریوهای مختلف اقلیمی بررسی شد. نتایج نشان داد که در دوره پایه، روند رواناب سالانه کاهشی بوده و افزایش دما، تبخیر و کاهش بارش اصلی‌ترین عوامل مؤثر بر این روند محسوب می‌شوند. بررسی سناریوهای آینده بیانگر کاهش چشمگیر جریان‌های سطحی در بلندمدت است، هرچند وقوع پیک‌های مقطعی و سیلاب‌های شدید در برخی سال‌ها نیز محتمل خواهد بود. این وضعیت بیانگر تشدید هم‌زمان دو پدیده خشکسالی و سیلاب در منطقه است. همچنین تحلیل حساسیت مدل نشان داد که پارامترهایی مانند هدایت هیدرولیکی اشباع، ظرفیت آب قابل استفاده خاک و ضریب آلفا جریان پایه بیشترین تأثیر را بر تغییرات رواناب دارند. این نتایج ضرورت توجه به راهبردهای سازگاری با تغییر اقلیم، مدیریت بهینه منابع آب و تقویت پوشش گیاهی در حوضه جازموریان را برجسته می‌سازد. چنین اقداماتی می‌تواند نقش مهمی در کاهش آسیب‌پذیری و افزایش تاب‌آوری منطقه ایفا کند.

کلیدواژه‌ها: تغییر اقلیم، SWAT، مدل‌سازی هیدرولوژیکی، منابع آب، هامون جازموریان

مقدمه:

تغییر اقلیم یکی از مهم‌ترین چالش‌های قرن حاضر است که اثرات گسترده‌ای بر چرخه هیدرولوژیکی و منابع آب در مقیاس‌های محلی، منطقه‌ای و جهانی برجای گذاشته .(استIPCC, 2021) تغییرات دما و الگوهای بارش می‌تواند موجب کاهش رواناب سطحی، تغییر در الگوهای جریان رودخانه‌ها، افزایش تبخیر و در نهایت تشدید بحران کم‌آبی شود .(Abbaspour et al., 2015; Gosling & Arnell, 2016) مناطق خشک و نیمه‌خشک، به دلیل محدودیت منابع آبی و حساسیت بالای اکوسیستم‌ها، به طور ویژه در معرض این اثرات قرار دارند.(Kundzewicz et al., 2008)

ایران با داشتن اقلیم خشک و نیمه‌خشک، در دهه‌های اخیر شاهد کاهش بارندگی، افزایش دما و تشدید پدیده‌های حدی اقلیمی بوده است که این امر فشار مضاعفی بر منابع آب کشور وارد کرده است (Madani, 2014; Alizadeh & Keshavarz,

.(2005 در این میان، حوضه‌های آبریز بسته و داخلی، بیشترین آسیب‌پذیری را در برابر تغییر اقلیم نشان می‌دهند. حوضه هامون جازموریان در جنوب‌شرقی ایران یکی از این مناطق است که به دلیل موقعیت جغرافیایی، محدودیت منابع آب سطحی و زیرزمینی، و اتکای معیشتی جمعیت محلی به کشاورزی و دامداری، اهمیت ویژه‌ای در مطالعات منابع آب دارد .(Masih et al., 2011) برای ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب، مدل‌سازی هیدرولوژیکی ابزاری کارآمد به شمار می‌رود. در این میان، مدل SWAT (Soil and Water Assessment Tool) به دلیل توانایی در شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی در مقیاس حوضه، انعطاف‌پذیری بالا و قابلیت بررسی سناریوهای مختلف اقلیمی و مدیریتی، کاربرد گسترده‌ای یافته است .(Arnold et al., 2012; Gassman et al., 2007)مطالعات متعددی نشان داده‌اند که این مدل می‌تواند نتایج ارزشمندی در زمینه تأثیر تغییر اقلیم و تغییر کاربری اراضی بر منابع آب سطحی ارائه دهد (Tavakoli et al., 2020; Ficklin et al., 2014).

با توجه به حساسیت بالای حوضه هامون جازموریان نسبت به تغییر اقلیم و اهمیت منابع آب آن در پایداری معیشت جوامع محلی، بررسی تغییرات احتمالی در شرایط هیدرولوژیکی این حوضه تحت سناریوهای اقلیمی آینده، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر به شمار می‌رود.

منطقه ی مورد مطالعه و داده های تحقیق

حوضه آبریز هامون جازموریان با وسعتی حدود ۶۹ هزار کیلومتر مربع در جنوب‌شرق ایران و در محدوده استان‌های کرمان و سیستان و بلوچستان واقع شده است. اقلیم منطقه عمدتاً خشک و نیمه‌خشک است. بارش سالانه کمتر از ۲۰۰ میلی‌متر و تبخیر–تعرق پتانسیل بیش از ۲۵۰۰ میلی‌متر است. رودخانه‌های اصلی شامل هلیل‌رود و بم‌پور می‌باشند. انتخاب این حوضه به دلیل اهمیت اکولوژیکی و اجتماعی و آسیب‌پذیری بالا در برابر تغییر اقلیم صورت گرفت.. در این پژوهش از مجموعه‌ای جامع از داده‌های هواشناسی، هیدرولوژیکی و مکانی جهت تحلیل اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب سطحی حوضه آبریز فلات مرکزی ایران استفاده شد. داده‌های اقلیمی شامل بارش روزانه، دمای حداقل و حداکثر و تبخیر-تعرق پتانسیل طی دوره مشاهداتی ۱۹۹۴ تا ۲۰۱۵ از ایستگاه‌های هواشناسی سازمان هواشناسی کشور و وزارت نیرو گردآوری گردید. به‌منظور بررسی تغییرات آینده، خروجی مدل‌های گردش عمومی جو (GCMs) تحت سناریوهای انتشار نماینده (RCP) و یا مسیرهای اجتماعی-اقتصادی مشترک (SSP) برای دوره پیش‌بینی ۲۰۲۰ تا ۲۰۸۰ مورد استفاده قرار گرفت. این داده‌ها پس از تصحیح خطای آماری (Bias Correction) و ریزمقیاس‌نمایی (Downscaling) به مقیاس حوضه انتقال داده شدند.

علاوه بر داده‌های اقلیمی، اطلاعات توپوگرافی منطقه شامل مدل ارتفاع رقومی (DEM) با دقت ۳۰ متر از داده‌های SRTM برای استخراج ویژگی‌های فیزیوگرافی حوضه، شبکه آبراهه‌ها و شیب زمین به‌کار گرفته شد. همچنین نقشه‌های کاربری اراضی و پوشش زمین از تصاویر ماهواره‌ای لندست (Landsat) و داده‌های مؤسسه منابع جهانی (GLCF) استخراج و برای سال‌های مختلف مورد تحلیل قرار گرفت. داده‌های خاک‌شناسی نیز از بانک اطلاعاتی جهانی FAO و مرکز ملی تحقیقات خاک و آب ایران به‌دست آمد و در محیط GIS یکپارچه گردید.

ترکیب داده‌های اقلیمی، هیدرولوژیکی، توپوگرافی، کاربری اراضی و خاک، امکان پیاده‌سازی مدل هیدرولوژیکی SWAT را فراهم ساخت. این داده‌ها نه‌تنها مبنای کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل در دوره پایه بودند، بلکه برای شبیه‌سازی تغییرات احتمالی رواناب سطحی، تغذیه آب زیرزمینی و سایر مؤلفه‌های چرخه هیدرولوژیکی در سناریوهای آینده نیز به کار گرفته شدند. تنوع و جامعیت این مجموعه داده‌ها موجب شد تصویر دقیق‌تری از تأثیر تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی بر منابع آب سطحی فلات مرکزی ایران ترسیم گردد.

.روش تحقیق:

روش تحقیق این مطالعه بر مبنای مدل‌سازی هیدرولوژیکی در محیط GIS و بهره‌گیری از داده‌های اقلیمی و مکانی متنوع برای شبیه‌سازی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب سطحی حوضه آبریز هامون جازموریان طراحی گردید. در این راستا، داده‌های هواشناسی شامل بارش روزانه، دمای حداقل و حداکثر و تبخیر-تعرق طی دوره آماری ۱۹۹۴ تا ۲۰۱۵ از ایستگاه‌های سازمان هواشناسی کشور گردآوری و با داده‌های مکانی شامل مدل ارتفاع رقومی (DEM) با دقت ۳۰ متر ازSRTM ، نقشه‌های کاربری اراضی استخراج‌شده از تصاویر ماهواره‌ای لندست و اطلاعات خاک از پایگاه داده FAO و منابع ملی تلفیق گردید. به منظور ارزیابی تغییرات آتی، خروجی مدل‌های گردش عمومی جو (GCMs) تحت سناریوهای انتشار (RCP/SSP) انتخاب و پس از انجام مراحل تصحیح خطا (Bias Correction) و ریزمقیاس‌نمایی (Downscaling) به مقیاس حوضه منتقل شد.

داده‌های اقلیمی و مکانی در محیط ArcSWATیکپارچه‌سازی و مرز حوضه و زیرحوضه‌ها به همراه شبکه آبراهه‌ها استخراج گردید. پایگاه داده هیدرولوژیکی شامل خصوصیات توپوگرافی، کاربری اراضی و خاک به مدل معرفی شد و مدل SWAT برای شبیه‌سازی مؤلفه‌های چرخه هیدرولوژیکی شامل رواناب سطحی، تبخیر-تعرق، نفوذ و تغذیه آب زیرزمینی به کار گرفته شد. دوره آماری ۱۹۹۴ تا ۲۰۱۵ به‌عنوان دوره پایه برای کالیبراسیون و صحت‌سنجی در نظر گرفته شد و داده‌های شبیه‌سازی‌شده برای دوره ۲۰۲۰ تا ۲۰۸۰ برای تحلیل تغییرات آینده استفاده گردید.

فرایند کالیبراسیون با بهره‌گیری از نرم‌افزار SWAT-CUPو روش SUFI-2 انجام شد. طی این فرایند، پارامترهای حساس شاملCN2، ESCO، SOL_Kو ALPHA_BF شناسایی و اصلاح گردیدند تا بیشترین تطابق میان داده‌های شبیه‌سازی‌شده و مشاهداتی حاصل شود. در نهایت، با استفاده از شاخص‌های آماریNSE ، R^2و RMSE عملکرد مدل ارزیابی شد و نتایج نشان داد که مدل از دقت و کارایی مناسبی در شبیه‌سازی رواناب حوضه هامون جازموریان برخوردار است.

کالیبراسیون و تحلیل حساسیت

به‌منظور افزایش دقت شبیه‌سازی مدل هیدرولوژیکی SWAT در حوضه آبریز فلات مرکزی ایران، فرآیند کالیبراسیون و صحت‌سنجی مدل با بهره‌گیری از داده‌های مشاهداتی و روش‌های آماری انجام شد. ابتدا مقادیر مشاهداتی رواناب در

ایستگاه‌های هیدرومتری منتخب طی دوره پایه (۱۹۹۴–۲۰۱۲) گردآوری گردید. سپس داده‌ها به دو بخش تقسیم شدند: دوره کالیبراسیون (۷۰ درصد داده‌ها) و دوره اعتبارسنجی (۳۰ درصد داده‌ها).

تحلیل حساسیت مدل با استفاده از روش تحلیل حساسیت پارامتریک (Global Sensitivity Analysis) در محیط نرم‌افزار SWAT-CUPو الگوریتم SUFI-2 صورت گرفت. در این مرحله، پارامترهای کلیدی تأثیرگذار بر رواناب سطحی شناسایی شدند. از میان آن‌ها می‌توان به ضریب جریان پایه(ALPHA_BF) ، ضریب رواناب منحنی شماره(CN2) ، ضریب انتقال رسوب(SPCON) ، ظرفیت ذخیره رطوبت خاک(SOL_AWC) ، و ضریب هدایت هیدرولیکی اشباع (SOL_K) اشاره کرد. این پارامترها بر اساس حساسیت نسبی رتبه‌بندی و در فرآیند کالیبراسیون مورد تنظیم قرار گرفتند.

کالیبراسیون مدل با بهینه‌سازی پارامترهای حساس از طریق الگوریتم SUFI-2 انجام شد تا بهترین تطابق بین رواناب شبیه‌سازی‌شده و مشاهداتی حاصل گردد. معیارهای ارزیابی عملکرد شامل ضریب نش–ساتکلیف (Nash–Sutcliffe Efficiency; NSE)، ضریب تبیین (R^2) و شاخص خطای میانگین نسبی (PBIAS) بودند. نتایج نشان داد که مدل در دوره کالیبراسیون دقت قابل‌قبولی داشته و مقادیر NSE و R^2 بیش از ۰٫۷۵ به دست آمدند، که نشان‌دهنده تطابق مناسب بین داده‌های شبیه‌سازی و مشاهداتی است. در دوره صحت‌سنجی نیز پایداری مدل حفظ شد و شاخص‌های آماری بیانگر توانایی مناسب مدل در بازتولید رواناب سطحی بودند.

به طور کلی، تحلیل حساسیت و کالیبراسیون مدل نشان دادند که پارامترهای مرتبط با ویژگی‌های هیدرولوژیکی خاک و بارش–رواناب بیشترین اثر را بر عملکرد مدل دارند. این یافته‌ها اهمیت توجه به داده‌های ورودی دقیق و به‌روزرسانی پایگاه‌های داده خاک و پوشش زمین را در بهبود نتایج مدل‌سازی هیدرولوژیکی تأیید می‌کنند.

نتایج و بحث

نتایج جدول۱ نشان می‌دهد که متغیرهای اقلیمی در حوضه مورد مطالعه روندهای متفاوتی را طی کرده‌اند. دما و تبخیر–تعرق دارای روند افزایشی بوده‌اند، در حالی که رطوبت روند کاهشی را نشان می‌دهد. همچنین، بارش فاقد روند مشخص است و تغییر معناداری در طول دوره مشاهده نشده است.

بررسی حساسیت جریان دبی به این تغییرات نشان می‌دهد که افزایش۵ تا ۲۰ درصد دما می‌تواند منجر به کاهش ۱۲ تا ۳۳ درصدی جریان دبی و در برخی سناریوها حتی تا ۴۵ درصد کاهش شود. در مقابل، افزایش بارش باعث افزایش جریان دبی در محدوده ۱۱ تا ۴۴ درصد می‌شود که بیانگر تأثیر چشمگیر بارش بر تغییرات جریان سطحی در این حوضه است. کاهش رطوبت و افزایش تبخیر–تعرق نیز تأثیر منفی بر جریان دبی داشته و سبب کاهش میزان رواناب می‌شوند. نتایج نشان می‌دهد که بارش و دما مهم‌ترین عوامل اقلیمی مؤثر بر تغییرات جریان دی در حوضه آبریز هستند؛ به‌طوری‌که تغییرات در بارش اثر مستقیم و مثبت، و تغییرات در دما اثر منفی و کاهنده بر رواناب دارند. بنابراین، آسیب‌پذیری هیدرولوژیکی حوضه نسبت به تغییر اقلیم عمدتاً از طریق نوسانات بارش و افزایش دما شکل می‌گیرد.

شکل۱ نشان می‌دهد که روند تغییرات رواناب در حوضه آبریز هامون جازموریان در بازه‌ی زمانی مورد مطالعه به طور کلی کاهشی است. هم داده‌های مشاهداتی (خط آبی) و هم داده‌های شبیه‌سازی‌شده (خط قرمز) این روند نزولی را تأیید می‌کنند، اگرچه مقدار شیب کاهش در هر دو سری داده متفاوت است. یکی از ویژگی‌های برجسته نمودار، پیک بسیار شدید رواناب در سال ۱۹۹۸ است که با بیشینه‌ای حدود ۳۰ مترمکعب بر ثانیه ثبت شده است. این اوج رواناب احتمالاً ناشی از بارش‌های سیلابی یا رخدادهای شدید اقلیمی (مانند پدیده‌ی النینو) بوده است. پس از این سال، مقدار رواناب به طور قابل توجه ای کاهش یافته و در اکثر سال‌ها در محدوده‌ای کمتر از ۱۰ مترمکعب بر ثانیه قرار گرفته است. در سال‌های ۲۰۰۷–۲۰۰۸ مجدداً یک افزایش نسبی در رواناب مشاهده می‌شود، اما این افزایش در مقایسه با سال ۱۹۹۸ بسیار محدودتر است. خطوط روند خطی نشان‌دهنده کاهش معنادار رواناب در طول دوره هستند؛ به‌طوری‌که هم داده های مشاهداتی و هم شبیه‌سازی‌ها به وضوح افت منابع آب سطحی را تأیید می‌کنند. ضریب تعیین (R^2) نسبتاً پایین (حدود ۰.۱۵–۰.۱۸) نشان می‌دهد که تغییرات رواناب علاوه بر روند کلی، تحت تأثیر عوامل متعدد دیگری مانند تغییر کاربری اراضی، تبخیر–تعرق، و تغییرات اقلیمی نیز قرار داشته است. به طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که رواناب سالانه در حوضه آبریز هامون جازموریان در دو دهه اخیر با کاهش چشمگیر همراه بوده است. این کاهش به ویژه پس از سال ۱۹۹۸ شدت بیشتری گرفته و بیانگر آسیب‌پذیری بالای حوضه در برابر تغییرات اقلیمی و فشارهای انسانی است.

بررسی تغییرات رواناب سالانه در حوضه آبریز هامون جازموریان طی دوره آینده (۲۰۲۱–۲۰۸۰) تحت سناریوهای اقلیمی مختلف در شکل۲ نشان می‌دهد که الگوی جریان سطحی دستخوش تغییرات قابل توجهی خواهد شد. در سناریوی خوش‌بینانه، در سال‌های ابتدایی دوره چندین پیک رواناب مشاهده می‌شود که در برخی سال‌ها مقدار آن به بیش از ۷ مترمکعب بر ثانیه می‌رسد. با این حال، از میانه دوره به بعد روندی نزولی بر حوضه حاکم شده و در سال‌های پایانی تقریباً مقادیر رواناب به سمت صفر میل می‌کند. در سناریوی متوسط، رواناب رفتار متفاوتی نشان داده و با وجود کاهش میانگین جریان، اوج‌های شدیدی بین سال‌های ۲۰۴۰ تا ۲۰۵۵ رخ می‌دهد؛ به‌ویژه در حدود سال ۲۰۵۰ بیشترین مقدار رواناب در کل دوره (نزدیک به ۲۰ مترمکعب بر ثانیه) ثبت می‌شود که بیانگر احتمال وقوع سیلاب‌های شدید مقطعی است. در مقابل، سناریوی بدبینانه با مقادیر بسیار پایین رواناب همراه بوده و در اکثر سال‌ها جریان سالانه کمتر از ۲ مترمکعب بر ثانیه باقی می‌ماند. این الگو بیانگر کاهش شدید و پایدار منابع آب سطحی در شرایط اقلیمی نامطلوب است. در مجموع، تحلیل سه سناریو نشان می‌دهد که اگرچه شدت و الگوی تغییرات رواناب در هر سناریو متفاوت است، اما روند کلی در تمامی شرایط حاکی از کاهش منابع آب سطحی در بلندمدت می‌باشد. این موضوع بیانگر آسیب‌پذیری بالای حوضه جازموریان در برابر تغییرات اقلیمی است؛ به‌طوری‌که در سناریوی متوسط خطر سیلاب‌های ناگهانی و در سناریوی بدبینانه خشکسالی‌های طولانی‌مدت محتمل خواهد بود. بنابراین، مدیریت پایدار منابع آب، به‌ویژه در حوزه‌هایی مانند سازگاری با تغییر اقلیم، کنترل سیلاب و کاهش اثرات خشکسالی، برای این حوضه ضرورت اساسی دارد

نتایج شکل۳ نشان می‌دهد که تغییرات کاربری اراضی نقش مهمی در شدت و الگوی رواناب سالانه دارد. در سناریوی خوش‌بینانه (آبی) رواناب سالانه در سال‌های ابتدایی (۲۰۲۵–۲۰۳۵) با چندین پیک قابل توجه همراه است که در برخی

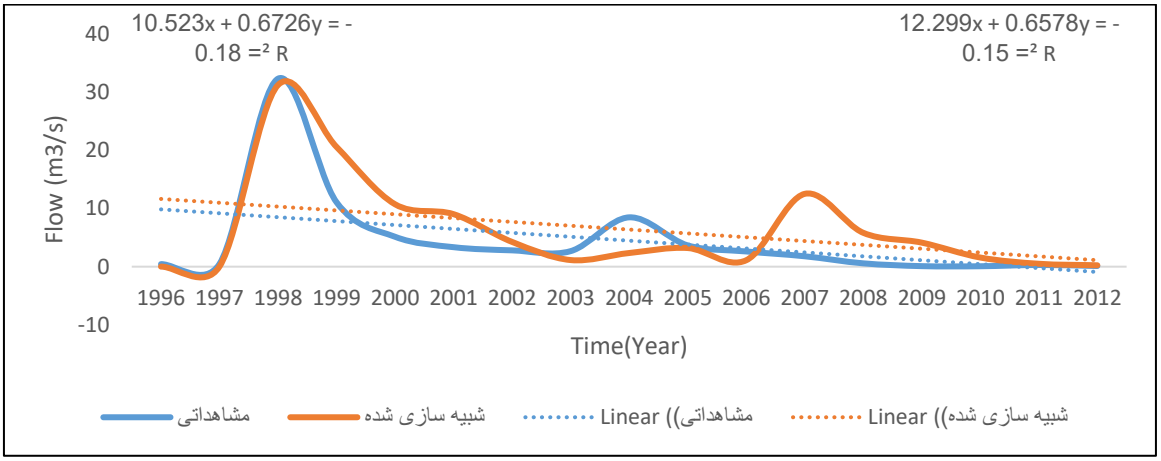
سال‌ها مقدار آن به بیش از ۱۰ مترمکعب بر ثانیه می‌رسد. با این حال، در ادامه دوره شدت رواناب کاهش یافته و روندی پایدارتر به خود می‌گیرد. در سناریوی متوسط (سیاه) رواناب نوسانات بیشتری دارد و در فاصله ۲۰۴۰ تا ۲۰۵۵ اوج‌های شدیدی رخ می‌دهد؛ بیشترین مقدار رواناب در این سناریو حدود ۱۸ مترمکعب بر ثانیه است که بیانگر افزایش خطر سیلاب‌های شدید مقطعی است. در مقابل، سناریوی بدبینانه (قرمز) با مقادیر بسیار پایین رواناب همراه بوده و در اکثر سال‌ها تغییرات چشمگیری مشاهده نمی‌شود. این نشان می‌دهد که در صورت ادامه روندهای نامطلوب کاربری اراضی، منابع آب سطحی به شدت محدود خواهد شد. به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات کاربری اراضی می‌تواند شدت و الگوی رواناب سالانه را به طور قابل توجهی تحت تأثیر قرار دهد. سناریوی متوسط بیشترین نوسانات و خطر وقوع سیلاب‌های شدید را به همراه دارد، در حالی‌که سناریوی بدبینانه منجر به کاهش چشمگیر و پایدار رواناب می‌شود. حتی در سناریوی خوش‌بینانه نیز گرچه در سال‌های ابتدایی افزایش رواناب مشاهده می‌شود، اما در بلندمدت روند کاهشی حاکم است. این نتایج نشان می‌دهد که مدیریت صحیح کاربری اراضی و برنامه‌ریزی یکپارچه منابع آب برای کاهش خطرات ناشی از تغییرات اقلیمی و انسانی در حوضه جازموریان ضروری است.

بر اساس جدول۲، پارامترهای متعددی در تعیین میزان رواناب و تغییرات جریان نقش دارند. مهم‌ترین آن‌ها شامل عمق آب انباشته در سفره کم‌عمق موردنیاز برای بازگشت جریان، منحنی شماره رواناب(SCS) ، و پارامترهای مربوط به ویژگی‌های هیدرولیکی خاک است. ظرفیت آب موجود در لایه خاک، هدایت هیدرولیکی اشباع‌شده، و چگالی ظاهری مرطوب نشان‌دهنده خصوصیات فیزیکی و هیدرولیکی خاک هستند که مستقیماً بر نفوذپذیری، ذخیره‌سازی و انتقال آب اثر می‌گذارند. از سوی دیگر، ضرایب تبخیر و تعرق، تأخیر آب زیرزمینی، و ضریب آلفا جریان پایه بیانگر پویایی تبادل آب بین سطوح خاکی و زیرزمینی و میزان پایداری جریان‌های پایه هستند. به‌ویژه ضریب آلفا جریان پایه و ضریب تجدید مجدد آب زیرزمینی نقش کلیدی در حفظ جریان دائمی رودخانه‌ها در شرایط خشک دارند. همچنین، پارامترهای کانال اصلی مانند مقادیر و هدایت هیدرولیکی مؤثر در آبرفت به شکل مستقیم در انتقال رواناب و کنترل دبی خروجی حوضه اثرگذار هستند. نتایج نشان می‌دهد که تغییرات رواناب در حوضه هامون جازموریان نه تنها تحت تأثیر بارش و تبخیر، بلکه وابسته به مجموعه‌ای از پارامترهای خاکی، هیدرولیکی و کانالی است. بنابراین، در مدل‌سازی و مدیریت منابع آب این حوضه باید به صورت هم‌زمان به خصوصیات فیزیکی خاک، پویایی آب زیرزمینی و ویژگی‌های کانالی توجه شود. این ترکیب پارامترها می‌تواند دقت پیش‌بینی تغییرات جریان را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد و مبنایی برای برنامه‌ریزی پایدار منابع آب در شرایط تغییر اقلیم فراهم کند.

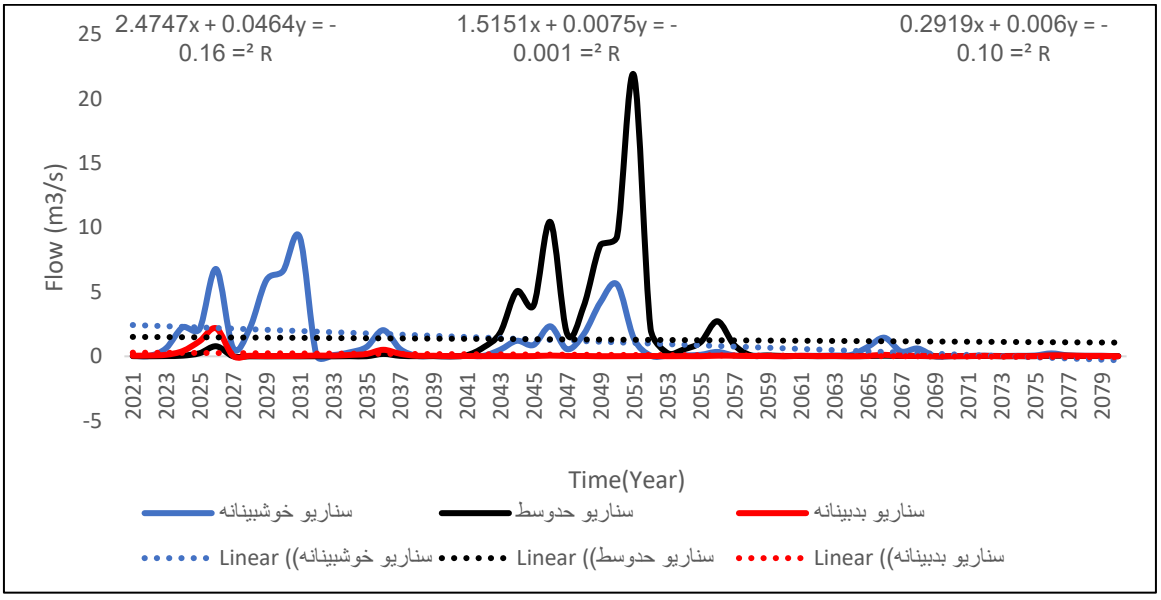
جدول۱. روند تغییرات متغیرهای اقلیمی و حساسیت دبی جریان به تغییرات آنها

بارش	دما و تبخیر تعرق	رطوبت	حساسیت دبی جریان به دبی به کاهش بارش	حساسیت دبی به دبی به افزایش

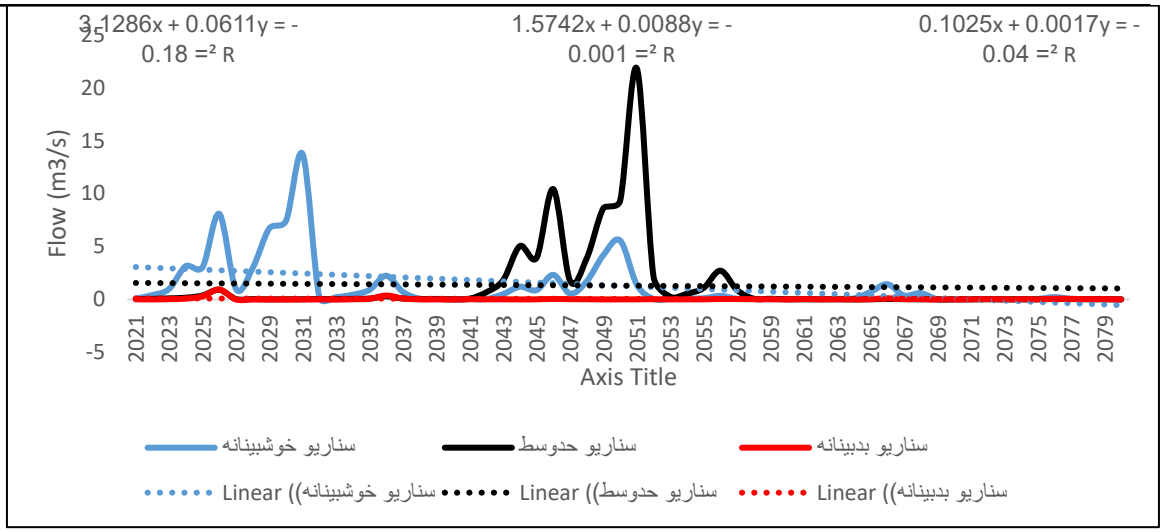
کاهش دما	افزایش دما	۵،۱۰،۱۵،۲۰ درصد	بارش ۵،۱۰،۱۵،۲۰ درصد						
افزایشی	کاهشی	۱۲-، ۲۳-، ۳۴- و ۴۵- درصد	۱۱، ۲۲، ۳۳ و ۴۴ درصد	کاهشی*	افزایشی*	کاهشی	افزایشی*	عدم روند	



شکل ۱. نتایج داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده رواناب سالانه در دوره پایه در حوضه آبریز هامون جازموریان در دوره ۱۹۹۶-۲۰۱۲



شکل ۲. نتایج داده‌های تغییرات اقلیمی تحت سناریو خوش‌بینانه، مطلوب و بدبینانه بر روی رواناب سالانه (۲۰۲۱-۲۰۸۰)



شکل۳. نتایج داده‌های تغییرات کاربری تحت سناریو خوش‌بینانه، مطلوب و بدبینانه بر روی رواناب سالانه (۲۰۲۱-۲۰۸۰)

جدول ۲ پارامترهای مؤثر بر تغییرات جریان در حوضه آبریز هامون جازموریان

منحنی رواناب SCS شماره f	عمق آستانه آب در سفره کم‌عمق موردنیاز برای جریان برگشت (mm).
ضریب جبران تبخیر خاک	هدایت هیدرولیکی اشباع شده
تأخیر آب زیرزمینی (روز)	چگالی ظاهری مرطوب
مقادیر کانال اصلی	ضریب آلفا جریان پایه (روز)
ظرفیت آب موجود لایه خاک	هدایت هیدرولیکی مؤثر در آبرفت کانال اصلی
ضریب آلفای جریان پایه برای ذخیره‌سازی	ضریب "تجدید مجدد" آب زیرزمینی

نتیجه گیری

نتایج حاصل از تحلیل داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده در حوضه آبریز هامون جازموریان نشان داد که این حوضه حساسیت بالایی نسبت به تغییرات اقلیمی و کاربری اراضی دارد. بررسی روندهای تاریخی (۱۹۹۶–۲۰۱۲) بیانگر کاهش معنی‌دار جریان‌های سطحی و رواناب سالانه بوده که به‌ویژه در سال‌های خشک بیشتر مشهود است. این کاهش جریان، در کنار افزایش دما و تبخیر و کاهش بارش، بیانگر تشدید شرایط خشکسالی هیدرولوژیکی در دوره پایه است.

شبیه‌سازی‌های آینده تحت سناریوهای مختلف اقلیمی (خوش‌بینانه، میانه و بدبینانه) برای دوره ۲۰۲۱–۲۰۸۰ نیز نشان داد که گرچه در برخی سال‌ها پیک‌های رواناب به دلیل بارش‌های شدید رخ می‌دهد، اما روند کلی جریان‌ها در همه سناریوها کاهشی است. این موضوع احتمال تشدید وقوع سیلاب‌های مقطعی همراه با کاهش منابع آب پایدار را تقویت می‌کند.

علاوه بر این، نتایج تحلیل حساسیت مدل SWAT حاکی از آن بود که پارامترهای مرتبط با خصوصیات هیدرولیکی خاک (مانند هدایت هیدرولیکی اشباع، ظرفیت آب قابل استفاده لایه خاک و ضریب آلفا جریان پایه) بیشترین تأثیر را بر تغییرات جریان داشته‌اند. این مسئله نشان می‌دهد که در کنار تغییرات اقلیمی، وضعیت خاک و کاربری اراضی نیز نقش اساسی در تعیین الگوی رواناب دارد.

در مجموع، یافته‌ها بیانگر آن است که حوضه آبریز هامون جازموریان در آینده با دو چالش هم‌زمان کاهش رواناب پایدار و افزایش خطر سیلاب‌های شدید روبه‌رو خواهد بود. بنابراین، ضرورت دارد که راهبردهای مدیریت منابع آب در این منطقه بر پایه سازگاری با تغییر اقلیم، بهبود بهره‌وری مصرف آب، و حفاظت از خاک و پوشش گیاهی طراحی و اجرا شود.

منابع

IPCC (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge University Press.
Abbaspour, K. C., et al. (2015). A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. Journal of Hydrology, 524, 733–752.
Gosling, S. N., & Arnell, N. W. (2016). A global assessment of the impact of climate change on water scarcity. Climatic Change, 134(3), 371–385.
Kundzewicz, Z. W., et al. (2008). The implications of projected climate change for freshwater resources and their management. Hydrological Sciences Journal, 53(1), 3–10.
Madani, K. (2014). Water management in Iran: what is causing the looming crisis? Journal of Environmental Studies and Sciences, 4(4), 315–328.
Alizadeh, A., & Keshavarz, A. (2005). Status of agricultural water use in Iran. Water Conservation, Reuse, and Recycling, National Academies Press.
Masih, I., et al. (2011). Characterizing droughts in the Jazmurian basin, southeast Iran. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 13(3), 337–349.
Arnold, J. G., et al. (2012). SWAT: Model use, calibration, and validation. Transactions of the ASABE, 55(4), 1491–1508.
Gassman, P. W., et al. (2007). The Soil and Water Assessment Tool: Historical development, applications, and future research directions. Transactions of the ASABE, 50(4), 1211–1250.
Tavakoli, A., et al. (2020). Assessing climate change impacts on water resources using SWAT model: A case study of Iran. Water Resources Management, 34(5), 1529–1546.
Ficklin, D. L., et al. (2014). Climate change impacts on streamflow and subbasin-scale hydrology in the upper Colorado River basin. PLoS ONE, 9(4), e93546.

تحلیل آماری و مکانی پارامترهای تغییر اقلیم در ایران بر مبنای داده‌های ماهواره‌ای و خروجی مدل Noah

بهنام خرّمی[۱]، کوثر خلیلی [۲]

۱- گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز
۲- دانشجوی کارشناسی‌ارشد سنجش از دور و GIS، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز

آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول(bekhorram@tabrizu.ac.ir)

چکیده

تغییر اقلیم به‌عنوان یکی از چالش‌های اصلی قرن حاضر، تأثیرات عمیقی بر اکوسیستم‌ها، منابع آب، کشاورزی و امنیت غذایی در مناطق مختلف جهان، از جمله ایران، داشته است. ایران به دلیل موقعیت جغرافیایی و تنوع اقلیمی خود، به‌شدت در برابر اثرات تغییر اقلیم مانند افزایش دما، کاهش بارش و تشدید پدیده‌های حدی اقلیمی آسیب‌پذیر است در این تحقیق تلاش شده است که روند بلندمدت پارامترهای مهم اقلیمی مانند؛ دما (T)، تبخیر و تعرق (ET)، بارش (P)، رطوبت خاک (SMS)، ذخایر کلی آب (TWS)، رطوبت نسبی هوا (H)، رواناب سطحی (R)، و آب معادل برف (SWE) برای ایران در بازه زمانی ۱۹۴۸ تا ۲۰۲۵ موردبررسی قرار گیرد که با استفاده از داده‌های ماهواره گریس و مدل Noah و روش‌های تعادل آب و آزمون من_کندال و تخمین شیب سن، تغییرات زمانی در عوامل تغییر اقلیم ایران موردبحث و نمایش قرار داده شد. نتایج این تحلیل نشان‌دهنده گرمایش اقلیم، افزایش تبخیر و تعرق، و پایداری نسبی بارش در ایران طی دهه‌های اخیر است. این روندها سازگار با گزارش‌های بین‌المللی مانند IPCC هستند و بیانگر افزایش آسیب‌پذیری اقلیم ایران در برابر تغییرات اقلیمی آینده می‌باشند. توجه به این روندها برای برنامه‌ریزی منابع آب، کشاورزی، و سیاست‌های اقلیمی امری ضروری است. تحلیل مکانی روندهای بلندمدت اقلیمی و ذخایر آبی در ایران طی دوره ۱۹۴۸ تا ۲۰۲۵ تغییرات معنادار و قابل توجهی را نشان می‌دهد که مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران بیشترین آسیب را از روندهای بلندمدت اقلیمی دیده‌اند، در حالی‌که مناطق مرطوب‌تر نیز از این روندها مصون نبوده‌اند. ادامه این روندها می‌تواند منجر به افزایش تنش آبی، کاهش منابع زیرزمینی، و تشدید فشار بر بخش‌های کشاورزی، صنعتی و شرب شود.

کلید واژه‌ها: تغییر اقلیم، ماهواره گریس، مدل Noah، ایران

مقدمه

تغییر اقلیم به تغییرات بلندمدت در الگوهای آب‌وهوایی اشاره دارد که شامل افزایش دما، کاهش بارش از جمله برف، و کاهش منابع آبی است و یکی از چالش‌های اصلی قرن حاضر بوده که تأثیرات عمیقی بر اکوسیستم‌ها، منابع آب، کشاورزی و امنیت غذایی در مناطق مختلف جهان، از جمله ایران، دارد(IPCC, 2021) . ایران به دلیل موقعیت جغرافیایی و تنوع آب‌وهوایی خود، به‌ویژه در برابر اثرات تغییرات آب‌وهوایی آسیب‌پذیر است. این کشور با چالش‌های مهمی مانند افزایش دما، کاهش بارندگی و تشدید رویدادهای شدید آب‌وهوایی مواجه است (علیزاده چوباری و نجفی، ۲۰۱۸). پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۵۰، ۶۴ درصد از جمعیت کشورهای درحال‌توسعه و ۸۶ درصد از جمعیت کشورهای توسعه‌یافته شهرنشین شوند. این روند حاکی از تغییر مستمر جهانی به‌سوی زندگی شهری است، به‌ویژه در مناطقی که به‌واسطهٔ رشد اقتصادی و مهاجرت از روستا به شهر، نرخ شهرنشینی به‌سرعت در حال افزایش است. این فرایند شهرنشینی با فرصت‌ها و چالش‌هایی همراه است، به‌ویژه در حوزه‌های زیرساخت، بهداشت و پایداری محیط‌زیست.(Cohen, 2006; Montgomery, 2003) روش‌های آماری نقش کلیدی در تحلیل پارامترهای مرتبط با تغییرات اقلیمی در ایران دارند، به‌گونه‌ای که حدود ۵۲ درصد از پژوهش‌های حوزه اقلیم از این روش‌ها برای بررسی خطرات آب‌وهوایی و تغییرات کاربری اراضی بهره می‌برند (اسفنده و همکاران، ۲۰۲۱). در این میان، متداول‌ترین تکنیک‌های آماری شامل تحلیل روند برای شناسایی پدیده‌هایی نظیر جزایر حرارتی شهری و تغییرپذیری زمانی اقلیم، تحلیل سری‌های زمانی به‌منظور ارزیابی الگوهای بلندمدت، و رویکردهای مقایسه‌ای برای بررسی روابط میان مؤلفه‌های مختلف اقلیمی است (اسفند و همکاران، ۲۰۲۱). این ابزارهای آماری برای تحلیل ارتباط میان تغییرات در کاربری یا پوشش اراضی و متغیرهای اقلیمی، مقایسه روش‌های مختلف بازیابی دمای سطح زمین، و شناسایی عوامل مؤثر بر تغییرات اقلیمی به کار گرفته می‌شوند (اسفنده و همکاران، ۲۰۲۱). پژوهشگران اغلب مدل‌سازی مکانی را با تحلیل‌های آماری تلفیق می‌کنند تا ارزیابی‌هایی جامع‌تر حاصل شود.



شکل ۱- حوضه های آبریز اصلی ایران

داده‌های مطالعه:

داده‌های ماهواره گریس (GRACE)

پروژۀ بازیابی گرانش و آزمایش اقلیمی (GRACE) یک پروژه پیش‌گام در سنجش از دور است که تحت نظارت سازمان ملی هوانوردی و مکانی ایالات متحده (NASA) و سازمان مکانی آلمان (DLR) اداره می‌شود. مأموریت GRACE شامل دو ماهواره هم‌مدار است که برای جمع‌آوری سیگنال‌های گرانشی زمین طراحی شده‌اند. این پروژه با پرتاب اولین مجموعه ماهواره‌ها در مارس ۲۰۰۲ آغاز شد. ماهواره GRACE-1 (که به آن GRACE گفته می‌شود) به مدت ۱۶ سال به ضبط میدان گرانشی ادامه داد و مأموریت خود را در ژوئن ۲۰۱۷ به پایان رساند. پس از یک تأخیر ۱۱ ماهه، مأموریت دوم با قرار دادن GRACE-Follow On (که به آن GRACE-FO گفته می‌شود) در مدار زمین در مه ۲۰۱۸ آغاز شد (خرمی و همکاران، ۲۰۲۱). این دو مأموریت به کاربران عمومی داده‌های رایگان درباره نوسانات ماهانه ذخیره آب زمین (TWSA) ارائه کرده‌اند. در این مطالعه، آخرین نسخه (RL-06) از برآوردهای GRACE/GRACE-FO بین سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۲۵ از مرکز پردازش داده‌های مرکز تحقیقات مکانی (CSR) استفاده شد.

مدل نوح (Noah)

سیستم تجزیه‌وتحلیل داده‌های جهانی زمین (GLDAS) یک مدل هیدرولوژیکی بزرگ‌مقیاس است که به طور گسترده‌ای توسط NASA و مراکز ملی پیش‌بینی محیط‌زیست (NCEP) مورد استفاده قرار می‌گیرد. GLDAS بر اساس رویکرد تجزیه و تحلیل داده‌های یکپارچه تخمین‌هایی ارائه می‌دهد. محصولات مأموریت GLDAS از پنج مدل سطح زمین (LSM) شامل مدل زمین جامعه (CLM)، مدل ظرفیت نفوذ متغیر (VIC)، مدل نوح (Noah)، مدل موزاییک و مدل سطح زمین حوضه (CLSM) در دسترس هستند (هو و همکاران، ۲۰۱۹). وضوح مکانی مدل‌های VIC، موزاییک و CLSM برابر با ۱ درجه است، درحالی‌که مدل‌های Noah و CLSM داده‌هایی با وضوح ۰.۲۵ درجه تولید می‌کنند.

روش‌ها

روش تعادل آب:

رویکرد تعادل آب (Water Balance) به‌طورکلی برای استخراج تغییرات ذخیره آب استفاده می‌شود و معمولاً به‌عنوان معیاری برای تحلیل‌های دیگر عمل می‌کند (Zhong et al., 2020). معادله تعادل آب (معادله ۱) به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\frac{ds}{dt} = P - ET - R \qquad (۱)$$

که در آن P، ET و R به ترتیب نشان‌دهنده بارش، تبخیر و تعرق و رواناب برای یک دوره خاص هستند. ds/dt تغییرات ذخیره آب را نشان می‌دهد و می‌توان از آن به‌عنوان نمایه‌ای برای تحلیل تأثیرات تغییرات اقلیمی استفاده کرد که نشان‌دهنده دسترسی به آب (WA) در یک منطقه مشخص است.

آزمون من - کندال و تخمین شیب سن

تکنیک من - کندال (MK) (Mann, 1945; Kendall, 1975) برای کشف روند سری‌های زمانی استفاده شد. MK یک آزمون آماری غیرپارامتریک است که برای آن نیازی به توزیع خاصی از متغیرهای ورودی نیست (الهاجی و همکاران، ۲۰۱۸). بنابراین، معمولاً برای تحلیل روند سری‌های زمانی متغیرهای هیدرو - مترولوژیکی استفاده می‌شود. آزمون روند MK از طریق معادلات زیر انجام می‌شود:

$$S = \sum_{i=1}^{SS-1} \sum_{j=i+1}^{SS} sgn(x_i - x_j) \dots for\ j > I \qquad (۲)$$

$$V(S) = \frac{SS(SS-1)(2SS+5) - \sum_{m=1}^{SS} t_i(m-1)(2m+5)m}{18} \qquad (۳)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{V(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{V(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

در اینجا، ss نشان‌دهنده اندازه نمونه، xi و xj داده‌های متوالی در سری زمانی، V(S)واریانس S، ti تعداد گره‌ها (تکرارهای برابر) با طول m، وZ مقدار استانداردشده S است (Blain, 2013).

تمایل روندها بر اساس مقدارZ تعیین می‌شود. مقدارZ مثبت نشان‌دهنده روند صعودی و مقدارZ منفی نشان‌دهنده روند نزولی است (Gocic and Trajkovic, 2013). در این مطالعه، اهمیت روند هر سری زمانی در سطح معناداری (α) ۰٫۰۵ ارزیابی شد. بزرگی روندها با استفاده از روش برآوردگر شیب سن (Sen, 1968) تعیین گردید. شیب روند از طریق مراحل زیر محاسبه می‌شود:

$$Q_i = \frac{X_j - X_k}{j - k} \quad for\ i = 1, \dots, N \quad (5)$$

که در آن، Xj و Xk به ترتیب نمایانگر مقادیر داده‌ها در زمان‌های j و k (j > k) هستند (Gocic and Trajkovic, 2013). شیب سن به‌عنوان میانه شیب محاسبه می‌شود:

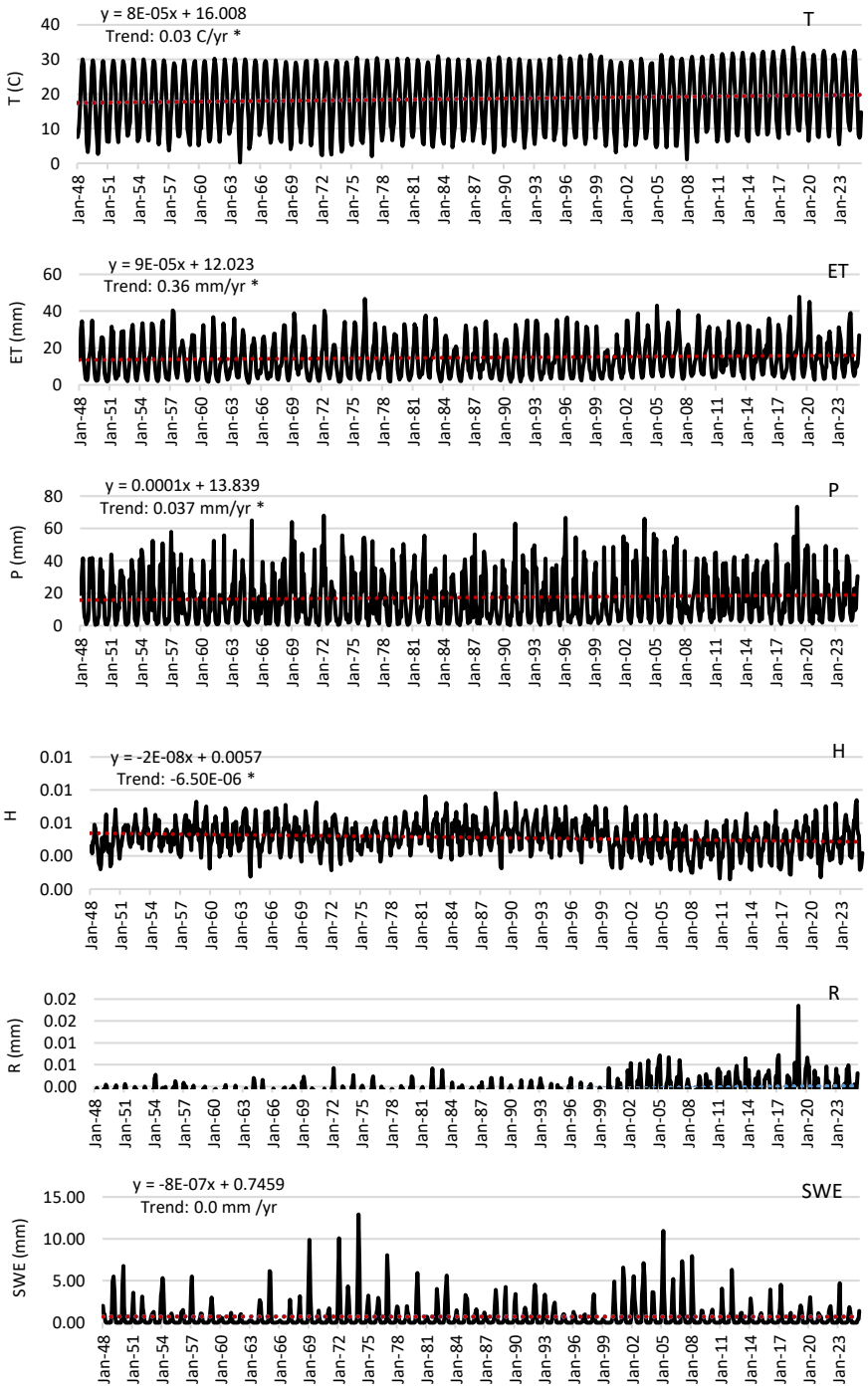
$$Q_{med} = \begin{cases} Q_{[(N+1)/2],} & for\ odd\ N \\ \frac{Q_{[N/2]} + Q_{[(N+2)/2]}}{2} & for\ even\ N \end{cases} \quad (6)$$

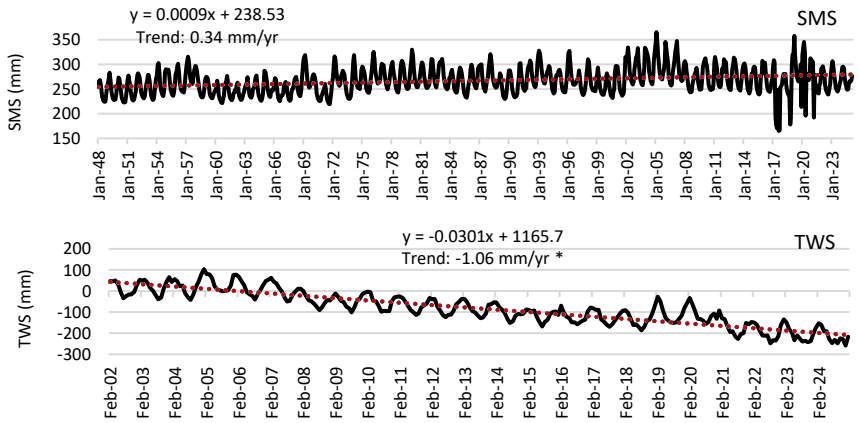
مقدار محاسبه‌شدهٔ Qmed از طریق علامت و مقدار خود، جهت و بزرگی روند موجود را نشان می‌دهد (Gocic and Trajkovic, 2013). روش شیب سن برای تعیین بزرگی روندها به کار گرفته شد.

نتایج و بحث

تغییرات زمانی بلندمدت پارامترهای اقلیمی

به‌منظور بررسی زمانی تغییر اقلیم در ایران، پارامترهای مرتبط از طریق داده‌های مورداستفاده در تحقیق، استخراج و به‌صورت سری‌های زمانی موردبررسی آماری قرار گرفتند (شکل ۲).


y = 8E-05x + 16.008
Trend: 0.03 C/yr *
T
T (C)
y = 9E-05x + 12.023
Trend: 0.36 mm/yr *
ET
ET (mm)
y = 0.0001x + 13.839
Trend: 0.037 mm/yr *
P
P (mm)
y = -2E-08x + 0.0057
Trend: -6.50E-06 *
H
H
R
R (mm)
y = -8E-07x + 0.7459
Trend: 0.0 mm /yr
SWE
SWE (mm)



شکل ۲- نوسانات بلند مدت پارامتر های اقلیمی ایران (**1948 – 2025**)

در شکل (۲)، روند بلندمدت پارامترهای اقلیمی مهم شامل دما (T)، تبخیر و تعرق واقعی (ET)، بارش (P)، رطوبت خاک (SMS)، ذخایر کل آب (TWS)، رطوبت نسبی هوا (H)، رواناب سطحی (R)، و آب معادل برف (SWE) برای ایران در بازه زمانی ۱۹۴۸ تا ۲۰۲۵ نمایش‌داده‌شده است. نمودار مربوط به دما نشان می‌دهد که میانگین سالانه دما در ایران به طور معناداری با نرخ حدود ۰.۰۳ درجه سلسیوس در سال افزایش‌یافته است. این روند افزایشی، نمایانگر گرمایش اقلیم در کشور بوده و می‌تواند پیامدهای گسترده‌ای بر منابع آبی، کشاورزی، و سلامت اکوسیستم‌ها داشته باشد. نوسانات فصلی به‌وضوح در داده‌ها دیده می‌شود، اما خط روند قرمز نشان‌دهنده افزایش تدریجی و مستمر دما در طی بیش از هفت دهه است. روند تبخیر و تعرق واقعی با نرخ ۰.۳۶ میلی‌متر در سال نیز افزایشی و معنادار است. افزایش دما به‌عنوان محرک اصلی این افزایش در نظر گرفته می‌شود، زیرا گرمایش بیشتر موجب افزایش تقاضای تبخیر از سطح زمین و پوشش گیاهی می‌شود. این پدیده به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران، موجب تشدید کم‌آبی، کاهش رطوبت خاک، و کاهش بازده محصولات کشاورزی خواهد شد. هرچند که نمودار بارش، یک افزایش جزئی و از نظر آماری معنادار با نرخ حدود ۰.۰۳۷ میلی‌متر در سال را نشان می‌دهد، اما این تغییر نسبت به نوسانات زیاد سالانه بسیار اندک است. در واقع، الگوی بارش در ایران در بلندمدت تغییر محسوسی نداشته و درحالی‌که تبخیر و تعرق افزایش‌یافته، بارش تقریباً ثابت باقی‌مانده است. این عدم توازن می‌تواند منجر به شرایط خشک‌تر و تشدید تنش آبی شود.

رطوبت خاک (SMS) بین سال‌های ۱۹۴۸ تا ۲۰۲۵ نوسانات سالانه نسبتاً پایداری را نشان می‌دهد و روند کلی آن افزایشی بسیار جزئی برابر با ۰.۳۴ میلی‌متر در سال است. در مقابل، ذخایر کل آب (TWS) روند نزولی مشخصی با نرخ ۱.۰۶- میلی‌متر در سال دارد که نشان‌دهنده کاهش چشمگیر منابع آبی کشور در این بازه زمانی است. این کاهش می‌تواند به دلیل برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی، کاهش بارش یا افزایش تبخیر باشد.

رطوبت نسبی هوا (H) طی بازه زمانی ۱۹۴۸ تا ۲۰۲۵، نوسانات فصلی و سالانه زیادی را نشان می‌دهد، اما روند کلی آن کاهشی بسیار جزئی با نرخ E-06۶.۵۰- در سال است. این کاهش، اگرچه بسیار ناچیز است، ولی در بلندمدت می‌تواند نشانه‌ای از خشکی بیشتر هوا و افزایش پتانسیل تبخیر در ایران باشد. این موضوع در کنار کاهش منابع آبی می‌تواند چالش‌های بیشتری برای کشاورزی و منابع طبیعی ایجاد کند. رواناب سطحی (R) نیز تغییرات شدیدی را در سال‌های مختلف نشان می‌دهد. به‌ویژه از اوایل دهه ۲۰۰۰ به بعد، نوسانات و افزایش‌های ناگهانی دیده می‌شود که می‌تواند نشان‌دهنده وقوع سیلاب‌ها یا بارش‌های غیرمعمول باشد. بااین‌حال، روند مشخصی برای افزایش یا کاهش رواناب در این نمودار دیده نمی‌شود. آب معادل برف (SWE) نیز با نوسانات شدید بین سال‌ها مواجه است. بیشترین مقادیر در دهه‌های ۶۰ و ۷۰ شمسی (دهه‌های ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰ میلادی) مشاهده شده و پس از آن روندی نسبتاً ثابت و در سطوح پایین‌تر دارد. خط روند نشان می‌دهد که تغییر قابل‌توجهی در میزان SWE به‌صورت سالانه وجود ندارد (روند صفر میلی‌متر در سال)، ولی کاهش نسبی قله‌های برفی طی دهه‌های اخیر می‌تواند ناشی از گرم‌شدن هوا در نتیجه تغییر اقلیم و کاهش بارش‌های برفی باشد. به‌طورکلی، نتایج این تحلیل نشان‌دهنده گرمایش اقلیم، افزایش تبخیر و تعرق، و پایداری نسبی بارش در ایران طی دهه‌های اخیر است. این روندها سازگار با گزارش‌های بین‌المللی مانند IPCC هستند و بیانگر افزایش آسیب‌پذیری اقلیم ایران در برابر تغییرات اقلیمی آینده می‌باشند. توجه به این روندها برای برنامه‌ریزی منابع آب، کشاورزی، و سیاست‌های اقلیمی امری ضروری است.

تغییرات مکانی - آماری بلندمدت پارامترهای اقلیمی

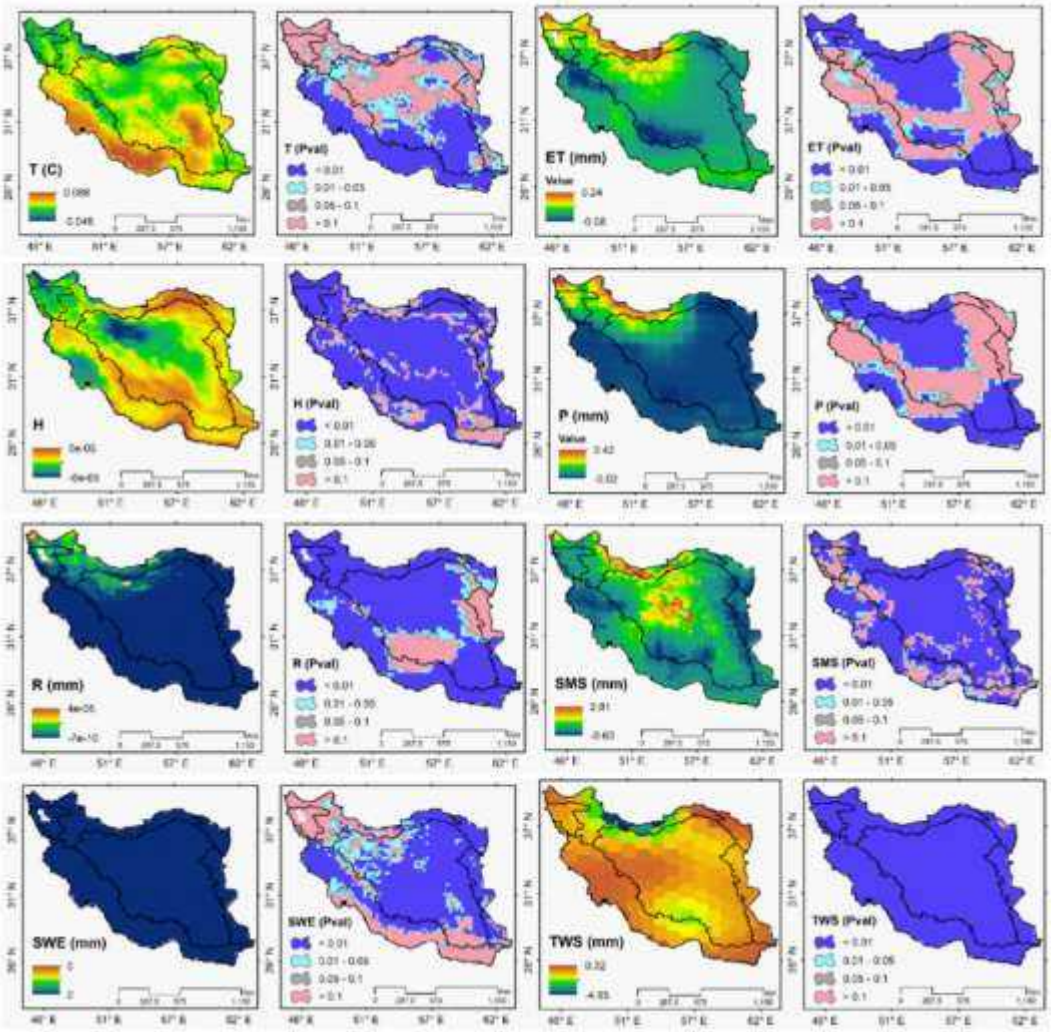
تحلیل مکانی روندهای بلندمدت اقلیمی و ذخایر آبی در ایران طی دوره ۱۹۴۸ تا ۲۰۲۵ تغییرات معنادار و قابل‌توجهی را نشان می‌دهد که با یافته‌های پیشین علمی در مورد تغییر اقلیم و منابع آب کشور هماهنگ است. روند دما (T) افزایش یکنواخت و قابل‌توجهی را در سراسر کشور نشان می‌دهد؛ بیشترین نرخ گرمایش تا حدود ۰٫۰۸۸ درجه سانتی‌گراد در سال، به‌ویژه در مناطق جنوبی و جنوب شرقی مشاهده می‌شود. این روندها در سطح اطمینان ۹۵ درصد ($P<0.05$) معنادار بوده و با مطالعات پیشین که از افزایش دمای قابل‌توجه از دهه ۱۳۵۰ شمسی (۱۹۷۰ میلادی) خبر می‌دهند، هم‌راستا هستند (عراقی و همکاران، ۲۰۱۸؛ طبری و طلایی، ۲۰۱۱).

تبخیر و تعرق (ET) نیز به‌ویژه در نواحی شمالی و شمال شرقی کشور افزایش معناداری نشان می‌دهد که با روند افزایش دما و افزایش تقاضای بخار آب از جو مطابقت دارد. این پدیده در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک مانند ایران به‌وضوح مشاهده می‌شود (رازیی و همکاران، ۲۰۱۵). در مقابل، روند رطوبت نسبی (Humidity) یکنواخت نبوده و عمدتاً فاقد معناداری آماری است که نشان‌دهنده تأثیرات محلی و توپوگرافیک است. روند بارش (P) کاهش معناداری را در مناطق مرکزی، شرقی و جنوب شرقی کشور نشان می‌دهد که تا حدود ۰٫۴۲- میلی‌متر در سال می‌رسد. این کاهش‌ها با $P<0.05$ در بسیاری از نواحی معنادار هستند و با مطالعات متعددی که افزایش خشکسالی و تغییر الگوی بارش در ایران را گزارش کرده‌اند، هم‌خوانی دارد (مدرس و سرحدی، ۲۰۰۹؛ کوثری و همکاران، ۲۰۱۳). این کاهش در بارش، با روند کاهشی رواناب (Runoff)

به‌ویژه در مناطق شمالی و غربی نیز هماهنگ است؛ کاهش‌هایی که در برخی حوضه‌ها معنادار ($P<0.05$) هستند و کاهش دسترسی به آب‌های سطحی را نشان می‌دهند.

روند ذخیره رطوبت خاک (SMS) الگوی پیچیده‌تری دارد؛ در بخش‌هایی از شمال غرب و مناطق مرکزی افزایش معناداری دیده می‌شود که ممکن است ناشی از آبیاری یا تغییرات موضعی بارندگی باشد. این نتایج با مطالعاتی که تغییرات مکانی و زمانی رطوبت خاک در ایران را بررسی کرده‌اند، مطابقت دارد (فتحیان و همکاران، ۲۰۲۰). روند آب معادل برف (SWE) کاهش معناداری را در ارتفاعات کشور، به‌ویژه در رشته‌کوه‌های البرز و زاگرس، نشان می‌دهد. این کاهش‌ها با $P<0.05$ در سطح وسیعی از کشور معنادار هستند و ناشی از گرمایش اقلیم و کاهش بارش برفی می‌باشند (جلیلی و همکاران، ۲۰۱۲؛ حسن‌زاده و همکاران، ۲۰۱۴).

نگران‌کننده‌ترین روند، مربوط به ذخیره کلی آب زمینی (TWS) است که کاهش شدید و معناداری ($P<0.01$) در سراسر کشور نشان می‌دهد. میزان این کاهش تا حدود ۴٫۹۵− میلی‌متر در سال می‌رسد و بیانگر بحران جدی در تخلیه منابع آب زیرزمینی کشور است. این یافته‌ها با نتایج ماهواره GRACE که برداشت بیش از حد از سفره‌های آب زیرزمینی، به‌ویژه در مناطق مرکزی و شرقی ایران را تأیید می‌کند، کاملاً هم‌راستا است (فروتن و همکاران،۲۰۱۹؛ Voss et al., 2013).



شکل ۳. نقشه روند تغییرات درازمدت پارامترهای مطالعه (۱۹۴۸-۲۰۲۵)

بررسی تغییرات درون حوضه‌ای پارامترهای موردمطالعه

جدول (۱) بیانگر روند بلندمدت تغییرات اقلیمی در حوزه های آبریز ایران در طول چند دهه گذشته تا زمان حال و آینده نزدیک است. مقادیر موجود در جدول نشان می‌دهند که در تمامی حوضه های ایران، روند کلی کاهش منابع آبی مشاهده می‌شود، اگرچه شدت این کاهش در حوزه های مختلف متفاوت است. برای مثال، در حوزه آبریز دریای خزر، که یکی از مرطوب‌ترین نواحی کشور به شمار می‌آید، روند تغییر در آب زمینی، ۱- میلیمتر ثبت شده است، که نشان‌دهنده کاهش قابل‌توجه اما محدود در مقایسه با سایر مناطق خشک‌تر کشور است. در مقابل، مناطق بیابانی، مرکزی و جنوب شرقی کشور، کاهش‌های شدیدتری را در آب زمینی تجربه کرده‌اند؛ به‌طور خاص در حوزه آبریز دریاچه ارومیه، روند کاهش منابع

آبی به حدود ۱.۸۰- میلیمتر رسیده است. این تغییرات به‌دلیل افزایش محسوس تبخیر و تعرق و کاهش یا ثبات نسبی بارش‌ها رخ داده است. این الگوی تغییر نشان می‌دهد که مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران بیشترین آسیب را از روندهای بلندمدت اقلیمی دیده‌اند، در حالی‌که مناطق مرطوب‌تر نیز از این روندها مصون نبوده‌اند. ادامه این روندها می‌تواند منجر به افزایش تنش آبی، کاهش منابع زیرزمینی، و تشدید فشار بر بخش‌های کشاورزی، صنعتی و شرب شود. بنابراین، تحلیل روندهای بلندمدت همانند آنچه در این جدول آمده است، برای طراحی سیاست‌های مقابله‌ای و سازگاری با تغییرات اقلیمی در سطح ملی و منطقه‌ای بسیار حیاتی است.

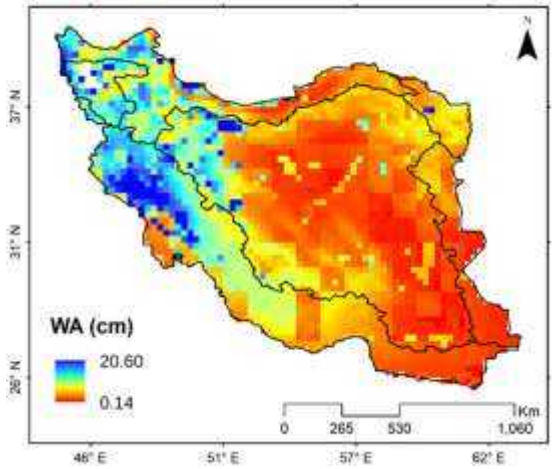
جدول ۱. روند تغییرات بلند مدت اقلیمی در حوزه های آبریز

پارامتر	روند سالیانه					
	سرخس	هامون	دریای خزر	دریاچه ارومیه	مرکزی	خلیج‌فارس
دما	0.041	0.026	0.009	0.010	0.022	0.022
بارش	0.007	0.020	0.113	0.146	0.003	0.000
تبخیر - تعرق	0.012	0.018	0.061	0.093	0.003	-0.005
رطوبت نسبی	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
رطوبت خاک	0.017	0.368	0.063	0.733	-0.213	-0.077
آب معادل برف	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
رواناب	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ذخیره آب سرزمینی	-0.750	-1.105	-1.030	-1.883	-0.882	-0.452

وضعیت دسترسی به آب در ایران

در شکل ۴، میانگین بلندمدت آب در دسترس ((Water Availability (WA)) در ایران را طی بازه زمانی ۱۹۴۸ تا ۲۰۲۵ نشان می‌دهد. معادله‌ی WA بیانگر رابطه بین میزان بارش (P)، تبخیر و تعرق (ET) و رواناب (R) است؛ به این معنا که آب در دسترس در هر منطقه از کشور برابر است با مقدار بارندگی آن منطقه، منهای تبخیر و تعرق و منهای رواناب سطحی. نقشه نشان می‌دهد که بخش‌های غربی، شمال‌غربی و بخشی از شمال ایران دارای بیشترین آب در دسترس هستند (نواحی آبی‌رنگ با مقدار WA تا ۲۰.۶۰ سانتی‌متر)، در حالی که مناطق مرکزی، شرقی و جنوب شرقی (نواحی قرمز و نارنجی با

WA نزدیک به ۰.۱۴ سانتی‌متر) کمترین میزان آب در دسترس را دارند. این الگو کاملاً منطبق با توزیع جغرافیایی بارش و تبخیر در ایران است؛ به‌طوری‌که مناطق کوهستانی و مرطوب شمال و غرب کشور دارای بارندگی بیشتر و تبخیر کمتر هستند، در حالی که نواحی خشک و بیابانی مرکز و شرق، با بارش ناچیز و تبخیر بالا مواجه‌اند. بر اساس مطالعات متعددی که در این زمینه انجام شده، از جمله پژوهش‌هایی مانند فرامرزی و همکاران (۲۰۰۹)، اشرف واقفی و همکاران (۲۰۱۴) و مسیح و همکاران (۲۰۱۱)، منابع آب تجدیدپذیر ایران به‌شدت تحت تأثیر تغییرات اقلیمی و بهره‌برداری بی‌رویه قرار گرفته‌اند. مدل‌های هیدرولوژیکی مانند SWAT نشان داده‌اند که نه‌تنها میزان بارندگی در بسیاری از مناطق ایران در حال کاهش است، بلکه افزایش دما و تبخیر موجب کاهش چشمگیر آب در دسترس نیز شده است. بنابراین، این نقشه نه‌تنها تصویری از وضعیت فعلی منابع آب ایران ارائه می‌دهد، بلکه زنگ خطری برای آینده مدیریت منابع آب در کشور نیز محسوب می‌شود. ادامه این روند می‌تواند بحران‌های جدی در زمینه کشاورزی، تأمین آب شرب و پایداری زیست‌محیطی ایجاد کند و نیازمند سیاست‌گذاری علمی و منطقه‌محور برای مدیریت پایدار منابع آب است.



شکل ۴. پراکنش میانگین بلند مدت (۱۹۴۸ - ۲۰۲۵) آب در دسترس ایران

نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش حاکی از آن است که تحلیل مکانی روندهای بلندمدت اقلیمی و ذخایر آبی در ایران طی بازه زمانی ۱۹۴۸ تا ۲۰۲۵، تغییرات معنادار و گسترده‌ای را آشکار می‌سازد. روند دما (T) افزایش یکنواخت و قابل‌توجهی را در سطح ملی نشان می‌دهد، درحالی‌که تبخیر و تعرق بالقوه (ET) به‌ویژه در نواحی شمالی و شمال شرقی کشور، افزایش آماری معناداری را تجربه کرده است که با الگوهای صعودی دما و افزایش تقاضای بخار آب اتمسفری همخوانی دارد. در حوضه آبریز دریای خزر - به‌عنوان یکی از مرطوب‌ترین مناطق ایران - روند تغییرات آب زیرزمینی با کاهش ۹ میلیمتر همراه بوده که بیانگر کاهشی قابل‌ملاحظه، هرچند محدودتر نسبت به نواحی خشک‌تر کشور، است. همچنین، در حوضه آبریز دریاچه ارومیه، کاهش منابع آبی به حدود ۲۲.۵۹- میلیمتر رسیده است. منابع آب تجدیدپذیر ایران تحت‌تأثیر هم‌زمان تغییرات

اقلیمی و بهره‌برداری ناپایدار قرار گرفته‌اند. تحلیل‌های هیدرولوژیکی مبتنی بر مدل‌هایی مانند SWAT نشان می‌دهد که کاهش بارندگی در بسیاری از مناطق، همراه با افزایش دما و نرخ تبخیر، منجر به افت چشمگیر دسترسی به منابع آبی شده است. این نتایج بر لزوم اجرای استراتژی‌های مدیریت یکپارچه منابع آب و سازگاری با تغییرات اقلیمی تأکید می‌ورزد و پیشنهاد می‌کند که برنامه‌ریزی‌های آتی بر بهینه‌سازی مصرف آب و بهره‌گیری از مدل‌های پیش‌بینی پیشرفته‌تر تمرکز یابد تا پیش‌بینی‌های دقیق‌تر و پایدارتری حاصل شود.

منابع

عراقی، ع.، موسوی بیگی، م.، آداموفسکی، ج. و رضایی، ع. ع. (۲۰۱۸). روندهای بلندمدت در تبخیر و تعرق مرجع و عوامل اقلیمی مؤثر در ایران. هواشناسی کشاورزی و جنگل، ۲۵۹، ۱–۱۵.

طبری، ح. و طلایی، پ. ح. (۲۰۱۱). تغییرپذیری زمانی بارش در ایران: ۱۹۶۶–۲۰۰۵. مجله هیدرولوژی، ۳۹۶(۳–۴)، ۳۱۳–۳۲۰.

راضعی، ت.، سقفیان، ب.، پائولو، ا. ا.، پریرا، ل. س. و بوردی، ا. (۲۰۱۵). الگوهای مکانی و تغییرپذیری زمانی خشکسالی در غرب ایران. آب و هواشناسی نظری و کاربردی، ۱۲۰، ۲۳۹–۲۵۱.

مدرس، ر. و سرحدی، ا. (۲۰۰۹). تحلیل روند بارش در ایران در نیمه دوم قرن بیستم. تحقیقات محیط زیست تصادفی و ارزیابی ریسک، ۲۳، ۱۲۹–۱۴۰.

کوثری، م. ر.، ناصری، م. و آهنی، ح. (۲۰۱۳). شناسایی روندهای زمانی و مکانی بارش‌های شدید در ایران در دوره ۱۹۶۰–۲۰۰۵. مجله بین‌المللی اقلیم‌شناسی، ۳۳(۳)، ۴۴۳–۴۵۵.

فتحیان، ف.، دهقان، ز. و صادقی، س. ح. ر. (۲۰۲۰). تحلیل روند رطوبت خاک تحت تأثیر تغییرات اقلیمی در غرب ایران. تحقیقات جوی، ۲۴۰، ۱۰۴۹۳۶.

جلیلی، ک. و همکاران (۲۰۱۲). بررسی روندهای پوشش برف و تأثیر آن‌ها بر منابع آب در ایران. تحقیقات منابع آب ایران، ۸(۴)، ۱۹–۲۸.

حسن‌زاده، ا.، الشورباجی، ا.، و ویتر، ه. س. (۲۰۱۴). مدیریت آب در حوزه زاینده‌رود ایران: مطالعه‌ای موردی در برنامه‌ریزی سطح حوضه با مدل WEAP. نشریه علوم هیدرولوژیک، ۵۹(۵)، ۱۰۶۴–۱۰۸۶.

فرامرزی، م و همکاران. (۲۰۰۹). مدل‌سازی دسترسی به منابع آب آبی و سبز در ایران. فرآیندهای هیدرولوژیکی، ۲۳. https://doi.org/10.1002/HYP.7160

علیزاده-چوباری، ا.، نجفی، م.س. رویدادهای آب و هوایی شدید در ایران تحت یک تغییر آب و هوایی. داینامیک‌های اقلیمی ۵۰، ۲۴۹–۲۶۰ (۲۰۱۸). https://doi.org/10.1007/s00382-017-3602-4

اسفنده، س.، دانه‌کار، ا.، سلمان‌مهینی، ا.، صادقی، س. م. م.، و مارکو، م. و. (۲۰۲۱). خطر تغییرات اقلیمی ناشی از رشد شهری و تبدیل کاربری زمین/پوشش زمین: بررسی عمیق تحقیقات اخیر در ایران. پایداری، ۱۴(۱)، ۳۳۸.

اشرف واقفی، س.، عباسپور، ک. س.، واقفی، م. ا.، سرینیواسان، ر.، و یانگ، ه. (۲۰۱۴). ارزیابی تأثیر تغییرات اقلیمی بر دسترسی به منابع آب در ایران با استفاده از مدل SWAT. مدیریت منابع آب، ۲۸(۱)، ۹۹–۱۱۵. DOI: 10.1007/s11269-013-0471-6

عباسپور، ک. س.، فرامرز، م.، قاسمی، س. س.، و یانگ، ه. (۲۰۰۹). ارزیابی تأثیر تغییرات اقلیمی بر منابع آب ایران. تحقیقات منابع آب، ۴۵(۱۰). DOI: 10.1029/2008WR007615

علیزاده، الف.، و کشاورز، الف. (۲۰۰۵). وضعیت استفاده از آب کشاورزی در ایران. در کارگاه بین‌المللی فناوری‌های حفاظت از آب برای کشاورزی پایدار در مناطق خشک جنوب صحرای آفریقا و خاورمیانه و شمال آفریقا.

فروتن، ع. و همکاران. (۲۰۱۹). کاهش قابل توجه منابع آب در منطقه مرزی ایران و عراق به دلیل خشکسالی و بهره‌برداری بیش از حد. سنجش از دور محیط زیست، ۲۱۶، ۱۶۳–۱۷۸.

اسفنده، س.، دانه‌کار، ا.، سلمان‌مهینی، ا.، صادقی، س.م.، و مارکو، م.و. (۲۰۲۱). خطر تغییرات اقلیمی ناشی از رشد شهری و تبدیل کاربری زمین/پوشش زمین: بررسی عمیق تحقیقات اخیر در ایران. پایداری.

Voss, K. A., et al. (2013). Groundwater depletion in the Middle East from GRACE with implications for transboundary water management in the Tigris–Euphrates–Western Iran region. Water Resources Research, 49(2), 904–914.

Masih, I., Maskey, S., Uhlenbrook, S., & Smakhtin, V. (2011). Analyzing water supply and demand in Iran for the future under climate change and policy scenarios. Journal of Water and Climate Change, 2(3), 173–187. DOI: 10.2166/wcc.2011.032

سومین کنفرانس ملی آب و هواشناسی ایران (با محوریت تغییر اقلیم)
The 3rd National Conference on Climatology of Iran (Focusing on Climate Change)
ارومیه ۱۶ مهر ۱۴۰۴

Spatio-Statistical Analysis of Climate Change Parameters in Iran Applying Satellite Data and Noah Model Outputs

Behnam Khorrami[1], Kosar Khalili[۲]

Department off Remote Sensing and GIS, Faculty of Planning and Environmnetal Sciences, University of Tabriz.

Graduate Student of Remote Sensing and GIS, Faculty of Planning and Environmnetal Sciences, University of Tabriz.

* Corresponding author: bekhorram@tabrizu.ac.ir

Abstract

Climate change, as one of the main challenges of the present century, has had profound impacts on ecosystems, water resources, agriculture, and food security in various regions of the world, including Iran. Due to its geographic location and climatic diversity, Iran is highly vulnerable to the effects of climate change such as rising temperatures, decreasing precipitation, and intensified extreme events. This research aims to examine the long-term trends of important climatic parameters such as temperature (T), actual evapotranspiration (ET), precipitation (P), soil moisture (SMS), total water storage (TWS), relative humidity (H), surface runoff (R), and snow water equivalent (SWE) across Iran over the period from 1948 to 2025. Using GRACE data, and the Noah model outputs and based on the water balance method, the Mann-Kendall test, and Sen's slope estimation technique, temporal changes in the study parameters were analyzed and discussed. The results of this analysis reveal that while temperature and evapotranspiration has increased, precipitation has been stable in Iran over recent decades. These trends are consistent with international reports such as those from the IPCC and indicate an increasing vulnerability of Iran's climate to future climatic changes. Considering these findings is essential for the planning of water resources, agriculture, and climate policies in the country. The spatial analysis of long-term trends in Iran shows significant and notable changes, with the arid and semi-arid basins experiencing the most damage from long-term climatic trends, while the wetter basins have not been immune to these variations. The continuation of these trends could lead to increased water stress, reduced groundwater resources, and intensified pressure on agricultural, industrial, and drinking water sectors.

Keywords: GRACE, Climate Change,Noah Model, Iran

پیش‌نگری تغییرات اقلیمی با مدل‌های CMIP6 تحت سناریوهای SSPs : مطالعه موردی حوزه دریاچه ارومیه

مسعود گودرزی(مسئول)، نوید دهقانی، مهشید کریمی

چکیده

هدف این پژوهش، پیش‌نگری تغییرات اقلیمی در دهه‌های آتی بر اساس مدل‌های CMIP6 تحت سناریوهای خط سیر اجتماعی- اقتصادی مشترک (SSP) و اثرات آن در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه است. لذا در این پژوهش عملکرد این دو مدل در مقیاس‌کاهی برونداد مدل‌های CMIP6 و شبیه‌سازی متغیرهای دما و بارش در حوضه آبخیز دریاچه ارومیه ارزیابی شد. ایستگاه‌های هواشناسی مورد بررسی شامل ۷ ایستگاه همدیدی با دوره آماری ۳۰ سال متناسب با دوره پایه مدل‌ها (۲۰۱۴-۱۹۸۵) می‌باشد. جهت ارزیابی عملکرد مدل‌ها نیز از سنجه‌های خطاسنجی MSE، RMSE، MAE و همچنین R2 بهره گرفته شد. نتایج نشان داد که هر دو مدل در شبیه‌سازی متغیرهای دما و بارش در حوضه مورد مطالعه از توانایی بالایی برخوردارند؛ اما در ایستگاه‌های مختلف و متغیرهای اقلیمی مختلف نتایج متفاوتی دارند. مقایسه سنجه‌های مختلف آماری و نمودارهای مقایسه‌ای نشان داد هر دو مدل در شبیه‌سازی دما از دقت بیشتری نسبت به بارش برخوردار بودند و در شبیه سازی بارش نیز مدل SDSM در بیشتر ایستگاه‌ها موفق‌تر عمل نموده و دارای عدم قطعیت کمتری است. اما دارای فرآیند شبیه‌سازی وقت‌گیر و پیچیده‌تری است در حالیکه مدل LARS-WG دارای سادگی و سرعت عملکرد بیشتری است. در مجموع هیچکدام از مدل‌ها برتری مطلق بر یکدیگر ندارند و علی‌رغم تفاوت‌هایی در شبیه‌سازی، می‌توانند در پیش‌نگری تغییرات اقلیمی مفید واقع شوند و جهت بررسی عدم قطعیت تغییرات اقلیمی لازم است از هر دو مدل و یا مدل‌های مختلف استفاده کرد.

کلید واژه‌ها: تغییراقلیم، حوزه دریاچه ارومیه، ریزمقیاس‌گردانی، LARS-WG، SDSM.

مقدمه

در بیش‌تر تغییرات اقلیمی در طول دهه‌های گذشته همواره موضوع بحث بوده است. دانشمندان یکی از مهم‌ترین اثرات آن را تحت عنوان تشدید چرخه هیدرولوژیکی نام می‌برند که موجب تغییر میزان تبخیر و تعرق و تغییر الگوی بارش می‌شود. تجزیه و تحلیل هیدرولوژیکی، سناریوهای محتمل تغییرات اقلیمی نشان می‌دهد که خشک‌سالی‌های شدید در برخی از مکان‌ها و سیل در مکان‌های دیگر رخ می‌دهد (Yimer et al, 2009). تبعات منفی این پدیده برای بشر تا آنجا می‌تواند مخرب باشد که در بین ده عامل تهدیدکننده بشر در قرن بیست و یکم، مانند فقر، سلاح‌های هسته‌ای، کمبود غذا و غیره پدیده تغییر اقلیم مقام اول را به خود اختصاص داده است (هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم، ۲۰۰۱). در بین عناصر اقلیمی، دما

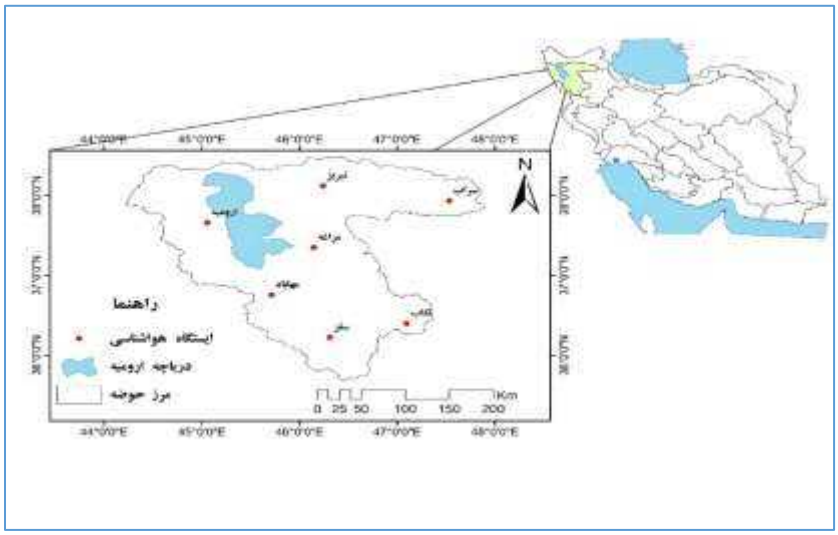
و بارش به دلیل تأثیر گسترده بر سایر عوامل و به خصوص تأثیراتی که بر فعالیت‌های انسانی دارند از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد به طوری‌که تقریباً بیشترین نمود تغییرات اقلیمی در سطح کره زمین بر روی این دو متغیر متمرکز شده است(مجدی و همکاران، ۲۰۲۲). بنابراین پیش‌بینی بلندمدت آن‌ها جهت اطلاع از میزان تغییرات و در نظر گرفتن تمهیدات لازم به منظور تعدیل اثرات سوء ناشی از تغییرات اقلیمی مورد توجه بسیاری از مجامع علمی جهانی قرار گرفته است. بر همین اساس مدل‌های گردش کلی جو (GCM) توسعه یافته‌اند (کین و همکاران، ۲۰۰۴). هر چند که این مدل‌ها در مقیاس فضایی اتمسفری و قاره‌ای نتایج معنی‌داری را به نمایش می‌گذارند و بخش بزرگی از پیچیدگی سیستم کره زمین را ترکیب می‌کنند، اما ذاتاً قادر نیستند که دینامیک و اشکال با شبکه ریزمقیاس‌تر محلی را به نمایش بگذارند (کارتر و همکاران، ۱۹۹۴؛ ایگلی و همکاران، ۱۹۹۰؛ شارما و همکاران، ۲۰۰۷). لذا ارزیابی تأثیر تغییرات اقلیم در مقیاس محلی نیازمند رویکردی است تا شکاف موقتی و فضایی بین متغیرهای اقلیمی بزرگ مقیاس و متغیرهای هواشناسی با مقیاس محلی را پر کند که در این مورد، رویکرد اساسی همان روش‌های مقیاس‌کاهی هستند (ویلبی و همکاران، ۲۰۰۲). یکی از مناسب‌ترین و معتبرترین ابزارها جهت مقیاس‌کاهی داده‌های GCM استفاده از روش‌های آماری است. در این راستا، سمنوف و همکاران (۱۹۹۸) به مقایسه دو مدل LARS-WG و WGEN بر روی ۱۸ ایستگاه واقع در ایالات متحده، اروپا و آسیا پرداختند نتایج نشان داد که مدل LARS-WG از توانایی خوبی در تولید داده‌های آب و هوایی برخوردار است. هاشمی و همکاران (۲۰۱۰) به مقایسه دو مدل LARS-WG و SDSM در شبیه‌سازی بارش‌های شدید در حوضه کلوتا در نیوزلند پرداختند. نتایج نشان داد که هر دو مدل توانایی‌های مشابه و خوبی دارند. سونیر و همکاران (۲۰۱۵) به مقایسه روش‌های مختلف مقیاس‌کاهی جهت بررسی بارش‌های فرین در اروپا پرداختند. نتایج نشان داد که مدل‌های مقیاس‌کاهی آماری از دقت بیشتری برخوردارند. باباسمایل و همکاران (۲۰۲۱) به ارزیابی عملکرد ۱۵مدل CMIP6 در تغییرات زمانی و مکانی بارش در شمال افریقا پرداختند. نتایج نشان داد که جهت بررسی تغیرات بارش بهتر است از چند مدل برتر استفاده کرد. مسگری و همکاران (۲۰۲۲) به ارزیابی عملکرد مدل‌های CMIP6 در پیش‌نگری تغییرات بارش در شمال آفریقا و خاورمیانه با استفاده از شاخص‌های مختلف خطاسنجی و نمودار تیلور پرداختند. نتایج بیانگر دقت بالای مدل‌های CMIP6 در شبیه سازی بارش در منطقه مورد مطالعه است. پنگ و همکاران (۲۰۲۳) به ارزیابی عملکرد مدل‌های CMIP6 در پیش‌بینی تغییرات دما و بارش در حوضه رودخانه Ishikari در ژاپن پرداختند. نتایج نشان داد که مدل‌های CMIP6 در شبیه‌سازی دما عملکرد بهتری نسبت به بارش به نمایش می‌گذارند. گودرزی و همکاران (۱۳۹۴) به ارزیابی عملکرد مدل‌های مقیاس کاهی SDSM و LARS-WG در حوضه آبخیز دریاچه ارومیه بر اساس داده‌های گزارش چهارم پرداختند. نتایج حاصل حاکی از عدم برتری مطلق مدل‌ها بر یکدیگر بود. سبحانی و همکاران (۱۳۹۶) به مقایسه سه مدل SDSM، ANN و LARS-WG در شبیه‌سازی تغییرات دما و بارش در شمال غرب ایران پرداختند. نتایج نشان داد که عملکرد مدل‌ها بسته به نوع اقلیم منطقه متفاوت است. زارعیان و همکاران (۱۴۰۱) به ارزیابی دقت مدل‌های CMIP6 در برآورد دما و بارش در ایران پرداختند. نتایج نشان داد که مدل‌های مختلف در ماه‌های متفاوت سال، دقت یکسانی در برآورد دما و بارش کشور ندارند و تغییرپذیری خطای مدل‌ها در برآورد بارش، بیش‌تر از دما است. حافظی مقدس و همکاران (۱۴۰۳) به ارزیابی

عملکرد مدل های CMIP6 در پیش‌نگری تغییرات دما و بارش در محدوده چاه نیمه های استان سیستان و بلوچستان پرداختند. نتایج نشان داد مدل‌های مورد بررسی توانایی بالایی در شبیه‌سازی دما و بارش در منطقه مورد مطالعه دارند. بررسی پیشینه پژوهش نشان داد که از میان مدل‌های مقیاس‌کاهی در بررسی تغییرات اقلیمی مدل‌های SDSM و LARS-WG از پرکاربردترین مدل‌های آماری هستند. لذا در این مقاله عملکرد این دو مدل در مقیاس‌کاهی برونداد آخرین نسل مدل‌های جهانی آب و هوا یعنی CMIP6 در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه این پژوهش، حوزه آبخیز دریاچه ارومیه در شمال غرب ایران است که در مختصات جغرافیایی ۴۴ درجه و ۷ دقیقه تا ۴۷ درجه و ۵۳ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۳۰ دقیقه عرض شمالی قرار گرفته است. وسعت این حوضه برابر با ۵۱۸۷۶ کیلومتر مربع است. این حوضه به دلیل موقعیت جغرافیایی و کوهستانی بودن، مرطوب ترین حوزه آبخیز داخلی ایران است (حسینی، ۱۳۹۴). متغیرهای هواشناسی مورد بررسی در این پژوهش نیز شامل بارش و دمای کمینه و بیشینه در طول دوره آماری (۲۰۱۴-۱۹۸۵) بصورت روزانه است دوره مذکور متناسب با دوره پایه مدل‌های CMIP6 انتخاب شده است. موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعاتی و ایستگاه‌های هواشناسی مورد بررسی در شکل (۱) آورده شده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و ایستگاه‌های هواشناسی مورد بررسی

بررسی وضعیت دما و بارش در دوره مورد مطالعه نشان داد که بیشترین میزان بارش با ۴۵۷/۵ میلی‌متر مربوط به ایستگاه سقز و کمترین میزان نیز با ۲۴۰/۶ میلی‌متر مربوط به ایستگاه سراب است. دامنه تغییرات متوسط دما در سطح حوزه نیز

بین ۸/۹ تا ۱۳/۴ درجه سلسیوس است که کمترین و بیشترین میزان آن به ترتیب مربوط به ایستگاه‌های سراب و تبریز است. ابتدا داده‌ها و منابع اطلاعاتی برای منطقه موردمطالعه جمع‌آوری گردید و پس از تفهیم مفاهیم نظری و ارائه فرضیات تحقیق از طریق روش‌های تجربی اقدام به تجزیه‌وتحلیل داده‌ها و آزمون فرضیات شد. در واقع در این پژوهش بیشتر از روش‌های آماری برای تحلیل داده‌های مورد نظر استفاده شده است. بدین صورت که تغییرات اقلیمی در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه در دوره آینده (۲۰۶۰-۲۰۳۱) با استفاده از خروجی مدل‌های CMIP6 تحت سناریوهای SSP پیش‌بینی می‌شود. همچنین ارزیابی عملکرد مدل‌های مختلف CMIP6 و روند تغییرات اقلیمی و هیدرلوژیکی حوضه مورد مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است. جامعه آماری این تحقیق شامل ایستگاه‌های همدیدی و هیدرومتری با توزیع مناسب در حوزه آبخیز دریاچه می‌باشد. سناریوهای SSPs بخشی از چارچوب جدیدی است که جامعه تحقیقاتی در مورد تغییرات آب و هوا اتخاذ کرده است تا بتواند تجزیه و تحلیل یکپارچه تأثیرات اقلیمی، آسیب پذیری‌ها، سازگاری و کاهش آتی آن را تسهیل کند. کمیت‌های SSP بر اساس تلاش مشترک بین انجمن‌های IAV و IAM بنا شده است که در یک سلسله جلسات برگزار شده و مجموعه محدودی از پنج خط داستان SSP را مشخص کرده‌اند. خط داستان‌ها ویژگی‌های اصلی مسیرهای توسعه آینده SSP را توصیف می‌کنند که می‌توان از ابزارهای مختلف مدل‌سازی برای توسعه کمیت‌های این داستان، از جمله عواملی مانند جمعیت، توسعه اقتصادی، کاربری اراضی و مصرف انرژی استفاده کرد. SSP ها داستان‌های جایگزینی را در مورد چگونگی توسعه جهان در قرن آینده در غیاب سیاست آب‌وهوا نشان می‌دهند. SSP ها روایات قابل قبولی از تحولات اجتماعی جهانی در آینده را بدون در نظر گرفتن تغییرات آب‌وهوا، یا واکنش‌های کاهش یا سازگاری توصیف می‌کنند. بنابراین درحالی‌که آن‌ها به‌تنهایی یک بعد انطباق یا کاهش راکمی سازی نمی‌کنند، اما منعکس‌کننده دشواری و موفقیت‌ها یا چالش‌های مرتبط با اجرای استراتژی‌های کاهش یا انطباق بر اساس ویژگی‌های اجتماعی مانند اندازه جمعیت، میزان همکاری منطقه‌ای، پیشرفت‌های فنّاورانه و غیره هستند. پنج SSP با مفروضات مختلف در مورد تحولات انسانی ازجمله: جمعیت، آموزش، شهرنشینی، تولید ناخالص داخلی (GDP)، رشد اقتصادی، نرخ پیشرفت‌های فنّاورانه، انتشار گازهای گلخانه‌ای (GHG) و آئروسل، عرضه و تقاضای انرژی، ایجاد شد. سناریوهای خط سیر اجتماعی-اقتصادی مشترک(SSP) ، برای کار در ترکیب با نسخه به‌روز شده سناریوهای واداشت تابشی (RCP) طراحی‌شده‌اند. واداشت‌های سناریوهای SSP و RCP بسیار نزدیک به همدیگر هستند، درنتیجه مقایسه نتایج پژوهش‌های انجام‌گرفته توسط مدل‌های CMIP5 با CMIP6 قابل‌مقایسه هستند. . آمار لازم برای بررسی تغییرات اقلیمی دوره ۳۰ ساله برای مدل‌های CMIP6 از سال ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۴ به عنوان دوره تاریخی از وب پایگاه ESGF و داده‌های مشاهداتی ایستگاه هواشناسی از سازمان هواشناسی کشور اخذ شد.

نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست‌آمده از اعمال آزمون من-کندال و تخمین‌گر شیب سن بر روی‌داده‌های بارش سالانه در دوره آماری پایه (۲۰۱۴-۱۹۸۵) در ایستگاه‌های موردمطالعه نشان می‌دهد که آماره من-کندال (Z) به جز در ایستگاه سراب در سایر ایستگاه‌ها کاهشی است و این تغییرات نیز به جز ایستگاه مراغه که با آماره ۲/۹- در سطح ۱ درصد معنی شده است و

حاکی از روند و تغییرات کاهشی زیاد بارش در این ایستگاه است در سایر ایستگاه‌های موردمطالعه دارای روند معنی‌داری نبوده و تغییرات مذکور از نوع نوسانات کوتاه‌مدت آب و هوایی در منطقه است. بیشترین شیب تغییرات نیز بر اساس تخمین‌گر شیب سن مربوط به ایستگاه مراغه با شیب سِن برابر با ۵/۸- میلی‌متر در سال است و کمترین شیب تغییرات نیز مربوط به ایستگاه تبریز با شیب سن برابر با ۰/۳- است. بر اساس نتایج حاصل به‌استثنای ایستگاه مراغه، بارش در دوره پایه در حوزه موردمطالعه فاقد روند معنی‌داری تشخیص داده شد (جدول ۱)

جدول ۱- روند تغییرات بارش در ایستگاه‌های هواشناسی موردمطالعه در دوره پایه

ردیف	ایستگاه	مَن-کندال	شیب سِن
۱	ارومیه	-۰/۳	-۰/۵
۲	تبریز	-۰/۲	-۰/۳
۳	سراب	۱/۴	۲/۱
۴	سقز	۱/۷-	-۴/۵
۵	تکاب	۱/۴-	۲/۹-
۶	مراغه	**۲/۹-	-۵/۸
۷	مهاباد	۰/۹-	-۲

**معنی‌داری در سطح ۱درصد *معنی‌داری در سطح ۵ درصد

نتایج حاصل از اعمال آزمون من-کندال بر روی داده‌های دمای کمینه و بیشینه در دوره آماری پایه (۲۰۱۴-۱۹۸۵) نشان داد که تغییرات دمای بیشینه در تمامی ایستگاه‌های موردمطالعه افزایشی بوده و این افزایش به‌جز ایستگاه سراب در سایر ایستگاه‌ها دارای روند معنی‌داری است و این روند معنی دار نیز به جز ایستگاه سقز که در سطح ۵ درصد معنی‌دار شده در سایر ایستگاه‌ها در سطح ۱ درصد معنی‌دار شده است. بیشترین شیب تغییرات دمای بیشینه نیز بر اساس تخمین‌گر شیب سن مربوط به ایستگاه‌های مراغه با ۰/۰۹ و کمترین شیب تغییرات نیز مربوط به ایستگاه سراب با شیب سن برابر با ۰/۰۲ است. بررسی روند تغییرات دمای کمینه نیز نشان داد که مقادیر آن به‌جز ایستگاه سقز در سایر ایستگاه‌ها افزایشی است. البته تغییرات کاهشی در ایستگاه سقز نیز مربوط به نوسانات کوتاه مدت آب و هوایی است و دارای روند معنی‌دار نیست. آماره افزایشی من-کندال نیز به جز ایستگاه سراب در سایر ایستگاه‌ها در سطح ۱ و ۵ درصد دارای روند معنی‌داری است.

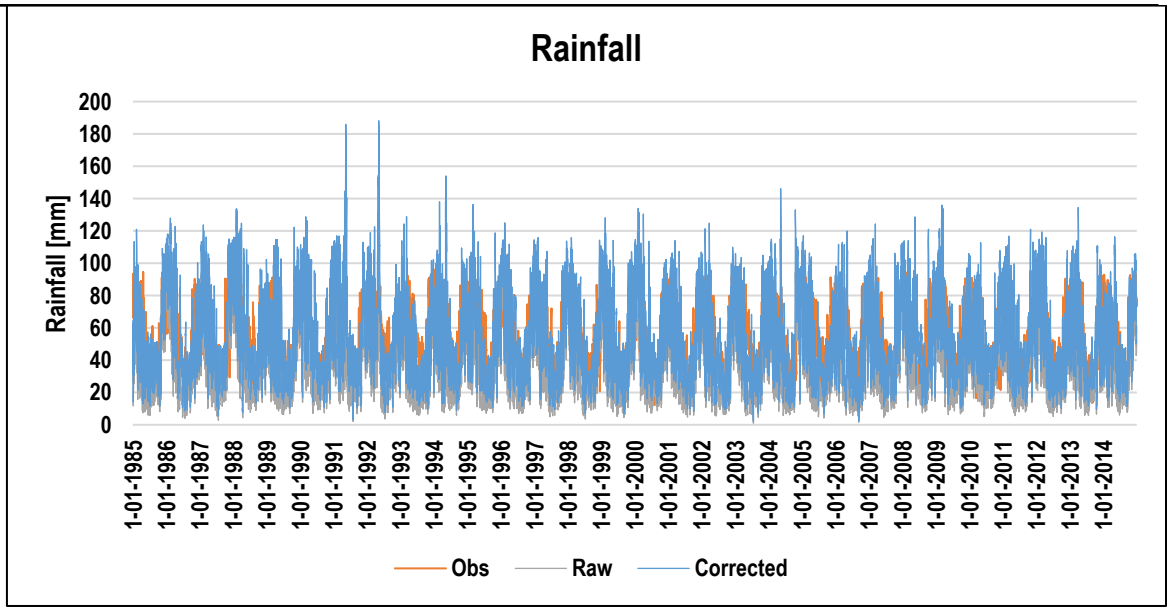
کمترین شیب تغییرات نیز برابر با ۰/۰۱- درجه مربوط به ایستگاه سقز در جنوب حوزه است و بیشترین شیب تغییرات نیز با ۰/۰۹ درجه، مربوط به ایستگاه تبریز در مرکز است (جدول ۲).

جدول ۲- روند تغییرات دمای کمینه و بیشینه در ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه در دوره پایه

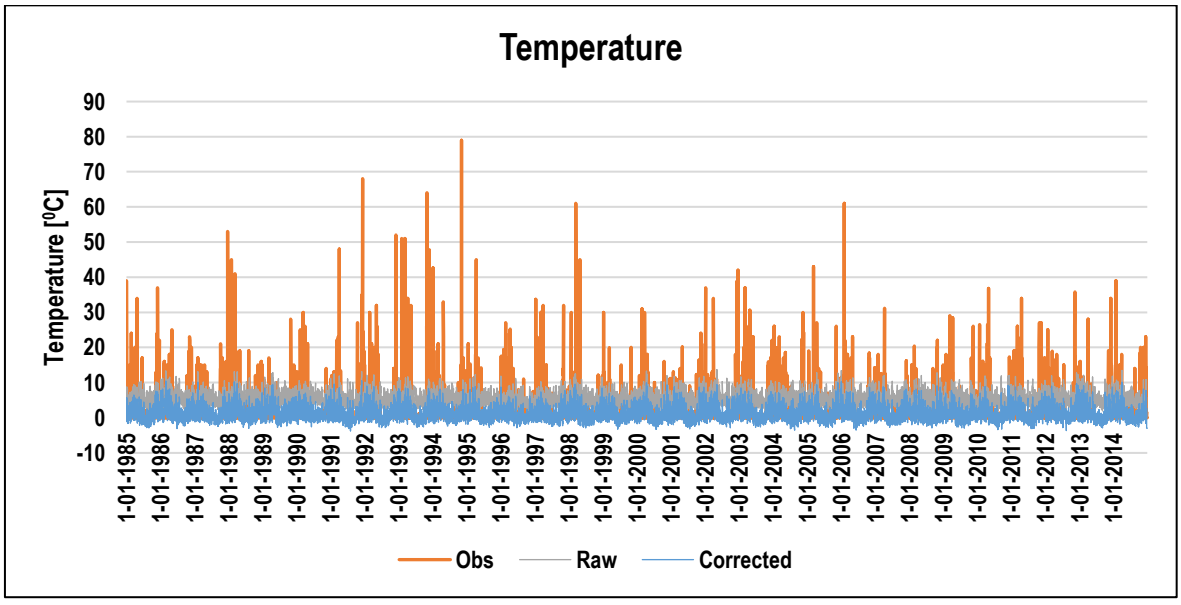
ردیف	ایستگاه	دمای بیشینه		دمای کمینه	
		مَن-کِندال	شیب سِن	مَن-کِندال	شیب سِن
۱	ارومیه	۴/۳**	۰/۰۷	۲/۵*	۰/۰۷
۲	تبریز	۳/۵**	۰/۰۵	۳/۱**	۰/۰۹
۳	سراب	۱/۳	۰/۰۲	۰/۴	۰/۰۱
۴	سقز	۲/۰۲*	۰/۰۴	-۰/۱	-/۰۱
۵	تکاب	۳/۳**	۰/۰۶	۲/۴*	۰/۰۷
۶	مراغه	۵/۱**	۰/۰۹	۲/۸**	۰/۰۷
۷	مهاباد	۳/۸**	۰/۰۶	۲/۶*	۰/۰۸

**معنی‌داری در سطح ۱درصد *معنی‌داری در سطح ۵ درصد

در این پژوهش، ۱۰ مدل GCMs از CMIP6 با توجه به کاربرد بیشتر و همچنین دقت بالا و داده‌های هواشناسی در دسترس آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت و پس از اصلاح اریبی به روش LSBC به ارزیابی عملکرد این مدل‌ها در شبیه‌سازی دما و بارش در دوره تاریخی این مدل‌ها (۲۰۱۴-۱۹۸۵) پرداخته شد. نمونه‌ای از اصلاح اریبی بر روی داده های دما و بارش ایستگاه سقز در شکل‌های (۲ و ۳) آورده شده است همانطور که مشاهده می‌شود داده‌های اصلاح شده به روش LSBC نسبت به داده‌های خام، بسیار نزدیکتر به داده‌های مشاهداتی ایستگاهی هستند و باعث دقت در شبیه‌سازی پارامترهای مذکور شده است.



شکل ۲- مقادیر مشاهداتی، خام و اصلاح شده بارش به روش LSBC برای ایستگاه سینوپتیک سقز در دوره پایه



شکل ۳- مقادیر مشاهداتی، خام و اصلاح شده دما به روش LSBC برای ایستگاه سینوپتیک سقز در دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۸۵)

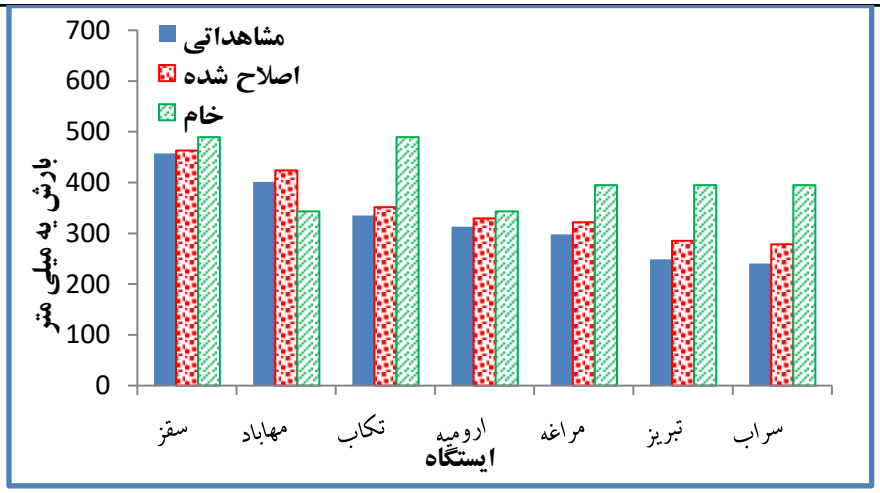
پس از اصلاح اریبی، به ارزیابی عملکرد و دقت مدل‌ها در شبیه‌سازی پارامترهای دما و بارش با استفاده از سنجه‌های مختلف در ایستگاه سینوپتیک تبریز به عنوان ایستگاه منتخب حوزه پرداخته شد که در ادامه به بررسی نتایج حاصل از آن پرداخته می‌شود. نتایج حاصل از ارزیابی داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده بارش توسط مقیاس کاهی خطی نشان می‌دهد که

دقت مدل‌های متفاوت است. بر اساس مقادیر RMSE مدل MRI-ESM2-0 و سپس MPI-ESM1-2-HR از دقت بالاتری نسبت به سایر مدل‌ها جهت شبیه‌سازی بارش در ایستگاه منتخب حوزه برخوردار است. میزان RMSE این مدل‌ها با داده‌های بارش مشاهداتی در منطقه مورد مطالعه برابر با ۴/۳ و ۴/۹ است. مدل GFDL-ESM4 نیز با R2 برابر ۰/۸۸ و RMSE برابر با ۱۲، ضعیف‌ترین عملکرد را در بین مدل‌های مورد بررسی جهت شبیه‌ساز بارش در حوزه مورد مطالعه داشته است. در مجموع بر اساس شاخص‌های مختلف دقت مدل MRI-ESM2-0 در شبیه‌سازی بارش در حوزه مورد مطالعه مناسب است بطوری که میزان ضریب تعیین آن برابر با ۰/۹۸ می‌باشد. نتایج عملکرد مدل‌های مورد بررسی در شبیه‌سازی بارش حوزه مورد مطالعه در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳- ارزیابی عملکرد مدل‌های CMIP6 بر اساس مقیاس کاهی LSBC در شبیه‌سازی بارش

ردیف	مدل	MSE	RMSE	MAE	R2
۱	MRI-ESM2-0	۱۸/۶	۴/۳	۳/۸	۰/۹۸
۲	MPI-ESM1-2-LR	۲۴/۲	۴/۹	۴/۲	۰/۹۷
۳	BCC_CSM2_MR	۶۴/۸	۸/۱	۶/۷	۰/۹۶
۴	MIROC6	۱۴۳/۷	۱۲	۷/۸	۰/۹۲
۵	FGOALS-g3	۹۸/۹	۹/۹	۸/۱	۰/۹۵
۶	CanESM5	۷۴/۴	۸/۶	۶/۸	۰/۹۴
۷	CESM2	۸۵/۴	۹/۲	۷/۵	۰/۹۷
۸	GFDL-ESM4	۱۴۴/۸	۱۲	۹/۲	۰/۸۸
۹	EC-Earth 3	۶۸/۹	۸/۳	۶/۴	۰/۹۵
۱۰	NorESM2-LM	۷۹/۲	۸/۹	۷/۱	۰/۹۶

مقایسه مقادیر بارش مشاهداتی و شبیه‌سازی در طول دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۸۵) بر اساس مدل منتخب یعنی MRI-ESM2-0 و اصلاح اریبی LSBC در ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه در شکل ۴ آورده است. نتایج حاکی از دقت مناسب مدل منتخب در شبیه‌سازی بارش حوزه آبخیز مورد مطالعه است.



شکل ۴- مقادیر مشاهداتی، خام و اصلاح شده بارش در ایستگاه‌های حوزه آبخیز دریاچه ارومیه در دوره آماری پایه

بر اساس شاخص RMSE مدل MPI-ESM1-2-LR با ۰/۰۹ بهترین عملکرد را در بین مدل‌های مورد بررسی جهت شبیه سازی دما دارد. همچنین مدل CanESM5 با RMSE برابر با ۰/۹۱ ضعیف‌ترین عملکرد را داشته است. نتایج حاصل از بررسی دقت مدل‌های CMIP6 در شبیه‌سازی دما با استفاده از شاخص‌های مختلف خطاسنجی نشان می‌دهد که روش LSBC در مقیاس کاهی دما از دقت بالایی برخوردار است. بطوری که ضریب تعیین در همه مدل‌های مورد بررسی بیشتر از ۰/۹۵ است.

منابع

اوجی، روح‌اله. ۱۳۹۷. مقایسهٔ ریزگردانی تک‌ایستگاهی و چندایستگاهی فرین‌های دما و بارش (مطالعهٔ موردی: سواحل جنوبی دریای خزر)، مجله فیزیک زمین و فضا، دوره ۴۴، ش ۲، صص ۴۱۰-۳۹۷.

حافظی مقدس، ناصر.، لشکری پور، غلامرضا.، پارسائی، رشید. ۱۴۰۳. ارزیابی عملکرد مدل های CMIP6 در پیش نگری تغییرات دما و بارش در محدوده چاه نیمه های استان سیستان و بلوچستان. پژوهش های اقلیم شناس، ۱۴ (۵۶): ۱۷۸-۱۶۵.

گودرزی م.، صلاحی ب.، حسینی س. ا. ۱۳۹۴. بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر تغییرات رواناب سطحی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز دریاچه ارومیه). مجله اکوهیدرولوژی. ۲(۲): ۱۷۵-۱۸۹.

گودرزی م.، حسینی س. ا. ، مسگری،ا.، ۱۳۹۵، مدلهای آب و هواشناسی، انتشارات آذر کِلک، زنجان، ایران.

Beecham, S., Rashid, M., and Chowdhury R.K., 2014. Statistical downscaling of multi-site daily rainfall in a South Australian catchment using a Generalized Linear Model. International Journal of Climatology. 34(14): 3654–3670.

Jones, R.N., and Page. C.M. 2001. Assessing the risk of climate change on the water resources of the Macquare river catchment. International Congress on modelling and simulation. Modelling and simulation society of Australia and New Zealand. Canberra: 673-678.

Hashmi, M.Z., Shamseldin, A.Y., and Melville, B.W. 2011. Comparison of SDSM and LARS-WG for simulation and downscaling of extreme precipitation events in a watershed. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment. 25(4): 475–484.
HAYES M., 2000 "Drought Indices" National Drought Mitigation Center, University of NebraskaLinclon.
Shukla S and Wood AW, 2008. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. Geophysics Research Letter 35: 1-8.
Nalbantis N and Tsakiris G, 2009. Assessment of hydrological drought revisited. Water Resources Management 23: 881-897.
Nalbantis, G. Tsakiris(2008). Assessment of Hydrological Drought Revisited. Springer Science + Business Media B.V. 2008.
Shafer, B.A. and Dezman, L.E.1982. Development of a Surface Water Supply Index (SWSI) to assess the severity of drought condition in snowpack runoff area, Proc. Western Snow Conf., pp 164-175.
Wigley, T.W. L., Jones, P. D., Briffa, K. R. and Smith, G. 1990. Obtaining sub-grid scale information from coarse resolution general circulation model output, J. Geophys. Res. 951: 1943–1953.
Wilby R.L., Dawson C.W, Barrow E.M. 2002. SDSM- a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts, Environmental Modeling & Software, 17: 147-159.
Climate Change Forecasting with CMIP6 Models under SSPs Scenarios:A Case Study of Lake Urmia Basin

Abstract

The aim of this study is to predict climate change in the coming decades based on CMIP6 models under the common socio-economic trajectory (SSP) scenarios and its impacts in the Lake Urmia watershed. Therefore, in this study, the performance of these two models in downscaling the output of CMIP6 models and simulating temperature and precipitation variables in the Lake Urmia watershed was evaluated. The meteorological stations in this research include 7 synoptic stations with a statistical period of 30 years corresponding to the base period of the models (1985-2014). To evaluate the performance of the models, the error metrics MSE, RMSE, MAE and R2 were used. The results showed that both models have high ability in simulating temperature and precipitation variables in the studied basin; however, they have different results at different stations and different climatic variables. Comparison of different statistical measures and comparative graphs showed that both models were more accurate in simulating temperature than precipitation, and in simulating precipitation, the SDSM model performed more successfully at most stations and had less uncertainty. But it has a more time-consuming and complex simulation process, while the LARS-WG model has greater simplicity and speed of operation. In general, none of the models has absolute superiority over each other, and despite differences in simulation, they can be useful in predicting climate change. In order to examine the uncertainty of climate change, it is necessary to use both models or different models.

Keywords: Climate change, Lake Urmia basin, down-scaling, LARS-WG, SDSM.

تاثیر اصلاح خاک بر مقادیر تبخیر و تعرق گوجه‌فرنگی و شاخص‌های آبی

جواد رمضانی مقدم[۱]*، متینه اعتمادی‌نیا[۲]، یاسر حسینی[۳]، علی رسول‌زاده[۴]، مجید رئوف[۵]

۱*- دانشیار دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی (نویسنده مسئول)

۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشگاه محقق اردبیلی

۳، ۴ و ۵- استاد دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی ، دانشگاه محقق اردبیلی

آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول J_ramezani@uma.ac.ir

چکیده

آب و خاک از عوامل اصلی کشاورزی می‌باشند که مدیریت آن‌ها در شرایط خشکسالی‌های اخیر می‌تواند بسیار کارگشا باشد. خاک به عنوانی محیط کشت و نگهدارنده آب و مواد غذایی نقش بسیار مهمی در عملکرد محصولات زراعی دارد. اصلاح و بهبود خاک در شرایط کمبود فعلی آب، در راستای افزایش عملکرد از مسایل بسیار مهم است که تحقیقات بسیاری در سطح ایران و جهان در این زمینه انجام شده است. بدین منظور در این تحقیق تاثیر اصلاح خاک با خاک‌اره بر بر پارامترها و شاخص‌های آبی در کشت گوجه‌فرنگی در مقادیر مختلف تنش آبی مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش به صورت فاکتوریل در قالب طرح بلوک‌های کاملا تصادفی با چهارتکرار انجام شد. تیمارها شامل مدیریت آبیاری در چهار سطح آبیاری (با مقادیر تخلیه مجاز رطوبتی ۲۰، ۵۰، ۶۵ و ۸۰ درصد) و اختلاط خاک اره با خاک در پنج سطح (صفر، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد حجمی) بودند. نتایج تحقیق نشان داد اصلاح خاک دارای تاثیر معنی‌دار در سطح یک‌درصد بر مقادیر ارتفاع آب‌آبیاری، میزان زه‌آب خروجی، تبخیر و تعرق و شاخص کارآیی مصرف می‌باشد. به طوری که با افزایش میزان خاک‌اره از صفر تا ۲۰ درصد مقدار زه‌آب خروجی و تبخیر و تعرق به ترتیب ۴۷/۳ و ۱۹/۳ درصد کاهش و کارآیی مصرف آب و بهره‌وری مصرف آب به ترتیب ۸۶/۲ و ۹۵/۵ درصد افزایش یافت.

کلید واژه‌ها : تنش آبی، خاک‌اره، کم‌آبیاری، گوجه‌فرنگی.

مقدمه

کاهش کمی و کیفی منابع آب در ایران و جهان در دهه‌های اخیر کاملا ملموس و غیرقابل انکار می‌باشد. این امر بخصوص در مناطق دارای آب و هوای گرم و خشک یا نیمه‌خشک تاثیر بیشتری گذاشته و خیلی از مناطق قابل کشت تبدیل به مناطق کویری یا نیمه‌کویری شده اند. کشور ایران نیز با آب و هوای گرم و نیمه خشک از مناطقی است که شدیدا تحت تاثیر این کم‌آبی و خشکسالی‌ها قرار گرفته و اثرات مخرب این خشکسالی ها در آن مشهود است، بخصوص در روستاهایی که درصد مهاجرت بالا می‌باشد. از طرفی با توجه به اینکه میزان بارندگی در ایران حدود یک‌سوم میانگین جهانی می‌باشد، مدیریت مناسب آب آبیاری در آن امری فوق‌العاده ضروری و قابل بحث و تحقیق می‌باشد. البته که سهم مصرف آب در بخش‌های مختلف مانند صنعت، کشاورزی و مصارف شهری در مناطق مختلف متفاوت است، اما سهم بخش‌های کشاورزی، شرب و صنعت در ایران به‌ترتیب حدود ۹۰/۹، ۶/۸ و ۲/۳ درصد برآورد شده است (یوسفی و همکاران، ۱۳۹۰؛ رسولی قادی و بلورچی، ۱۳۹۴؛ Castillo et al., 2021؛ رسول‌زاده و رئوف، ۱۴۰۲).

از طرفی یکی از عوامل بسیار مهم کشاورزی که هم بر میزان جذب و نگهداری آب، هم بر میزان عملکرد گیاه تاثیرگذار است خصوصات خاک اراضی کشت‌شده است. خصوصیات خاک (فیزیکی، شیمیایی و زیستی) بر میزان نفوذپذیری آب در خاک، میزان ذخیره آب در خاک، تهویه گیاه در خاک و رشد گیاه موثر هستند. از طرفی خاک نیاز به مراقبت و اصلاح مداوم دارد. زیرا برخی عملیات‌ها مانند آبیاری (به خصوص با آب دارای کیفیت پایین) و ورود انواع مواد آلی و سموم شیمیایی و...به مروز زمان باعث کاهش حاصلخیزی خاک، افزایش شوری خاک و کاهش نفوذپذیری آن می‌شوند (علیزاده، ۱۳۹۰).

De Vries et al. (2012) تأثیر اضافه‌شدن بقایای باغی را به خاک مورد بررسی قرار دادند. نتیجه‌ی تحقیق آن‌ها نشان داد که بقایای باغی سبب ایجاد خصوصیت بافری در خاک و کاهش تنش دمایی در آن می‌شود. همچنین بقایای باغی دارای اثرات مثبت (افزایشی) بر فعالیت‌های بیولوژیکی و عملکرد گیاه بودند. از طرفی Bernard et al. (2015) اثر بقایای باغی را بر رشد و عملکرد سورگوم و خصوصیات خاک بررسی کردند. نتایج تحقیق آن‌ها بیانگر کاهش مقادیر کربن خاک سطحی بود. همچنین بقایای باغی تأثیر معنی‌داری بر افزایش عملکرد سورگوم نداشت و تحرک پذیری فسفر و نیتروژن نیز در این خاک‌ها مشاهده نشد. Kaniszewski et al. (2019) اثر کوددهی نیتروژن را بر عملکرد و صفات کیفی دو رقم گوجه‌فرنگی در سال‌های ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵ بررسی نمودند. تیمارهای این تحقیق شامل دو رقم گوجه‌فرنگی (Clalista و Volna) و چهار سطح کود نیتروژن (صفر، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم بر هکتار) بود. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که در شرایط مطلوب ازنظر کشت و رشد، در هر دو رقم عملکرد بالایی وجود داشت. اما در سالی که شرایط آب و هوایی نامساعد بود کاهش عملکرد رقم Volna نسبت به رقم Calista مشاهده شد. پارامترهای شیمیایی و فیزیکی کیفیت گوجه‌فرنگی در هر سال تغییر کرد. به‌طوریکه برای سال‌های مطالعه و رقم‌های آزمایشی، افزایش مقدار کود نیتروژن بر محتوای لایکوپین و پلی‌فنل‌های محلول و نیز کل فلاونوئیدها و محتوای اسکربیک اسید اثر داشت. درحالیکه کود نیتروژن بر ماده‌خشک، مواد جامد محلول، سفتی

میوه و قرمزی میوه بی‌اثر بود. همچنین مقدار لایکوپین و نیز سفتی میوه در رقم Calista بیشتر از Volna مشاهده شد. Taromi Aliabadi et al. (2019) اثر خاکپوش را تحت شرایط کم‌آبیاری بررسی نمودند. تیمارهای این تحقیق شامل سه سطح آبیاری قطره‌ای (۵۰، ۷۰ و ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه) و چهار نوع خاکپوش‌های مختلف (بدون خاکپوش، خاکپوش تراشه چوب، خاکپوش تراشه چوب کمپوست شده و خاکپوش پلاستیکی) بود. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که سطوح مختلف آبیاری بر عملکرد و اجزای آن تأثیر معنی‌داری داشت. میزان عملکرد میوه گوجه‌فرنگی در خاکپوش‌های مختلف نسبت به بدون خاکپوش حدود ۱۲-۴۶ درصد افزایش یافت. بالاترین عملکرد بازارپسند (۵/۷۸ کیلوگرم در هر بوته) و عملکرد کل (۵/۷۷ کیلوگرم در هر بوته) به‌ترتیب مربوط خاکپوش پلاستیکی و تراشه چوب و در ۱۰۰ درصد نیاز آبی گیاه بود. همچنین بیشترین مقدار کارایی مصرف آب (۱۸/۲۷ کیلوگرم بر مترمکعب) در ۷۰ درصد نیاز آبی گیاه و همراه با خاکپوش تراشه چوب مشاهده شد. به‌طورکلی آبیاری قطره‌ای همراه خاکپوش با تراشه چوب مناسب‌ترین تیمار جهت افزایش عملکرد تولید گوجه‌فرنگی و صرفه‌جویی در آب آبیاری شناخته شد.

با توجه به اهمیت مطالب بیان شده در بالا، در این تحقیق به بررسی اثر اصلاح خاک با کمک خاک‌اره بر میزان تبخیر و تعرق و شاخص‌های آبی در کشت گوجه‌فرنگی گلخانه‌ای در شرایط تنش آبی پرداخته شده است.

مواد و روش‌ها

این مطالعه بر اساس کشت گلخانه‌ای گوجه‌فرنگی و در بازه زمانی مهر ماه ۱۳۹۹ تا تیرماه ۱۴۰۰ در شهرستان اردبیل (دانشگاه محقق اردبیلی) انجام شده است. گوجه‌فرنگی از طریق نشا و انتقال آن به گلدان کاشت شد. خاک مورد مطالعه به صورت ترکیبی تهیه شد. بدین طریق که ابتدا دو سوم خاک مزرعه (از مزارع روستای کلخوران از توابع شهرستان اردبیل) تهیه شده، سپس از الک دو میلیمتری عبور داده و با یک سوم شن ترکیب شد. در نهایت خاک سبک تهیه شده تعیین بافت شد که مطابق جدول ۱ بافت آن لومی شنی) تعیین شد.

جدول ۱- برخی مشخصات خاک مورد آزمایش

شن (٪)	سیلت (٪)	رس (٪)	بافت خاک	pb (g/cm3)	pp (g/cm3)	n	ϴfc	ϴpwp
۶۱/۲۸	۱۴	۲۴/۷۳	لومی‌شنی	۱/۴۳	۲/۶۲	۰/۴۵	۲۸	۱۷

گلدان‌های مورد استفاده در این تحقیق به شکل مخروط ناقص با ارتفاع ۲۷ سانتی‌متر، قطر دهانه ۲۶ سانتی‌متر و قطر قاعده ۱۹ سانتی‌متر بودند. برای پر کردن گلدان‌ها ابتدا مقدار ۱/۵ کیلوگرم شن دانه‌بندی شده در کف گلدان (برای زهکشی بهتر) سپس مقدار ۱۰ کیلوگرم خاک الک شده در یک مرحله و در نهایت مقدار ۱/۵ کیلوگرم شن بر روی سطح خاک برای کاهش تبخیر از سطح خاک ریخته شد (عبدلی و همکاران، ۱۴۰۰).

در این آزمایش برای اندازه‌گیری رطوبت خاک گلدان‌ها از دستگاه رطوبت‌سنج دیجیتال TDR مدل PMS-714 استفاده شد (البته قبل از شروع کار واسنجی شد). همچنین میزان آب آبیاری هر گلدان بر اساس اختلاف بین رطوبت فعلی و رطوبت نقطه ظرفیت زراعی محاسبه و سپس بر اساس مساحت هر گلدان تبدیل به حجم (برحسب لیتر) شده و به هر گلدان، آب بر اساس تعداد لیتر مشخص شده، داده شد.

تیمارهای مدیریت آبیاری شامل چهار سطح بودند. سطوح مدیریت زمان آبیاری شامل I1، I2، I3 و I4 به‌ترتیب آبیاری در زمان تخلیه ۲۰، ۵۰، ۶۵ و ۸۰ درصد آب قابل نگهداری خاک بودند. درصدهای مختلف اختلاط خاک‌اره با خاک گلدان (در پنج سطح شامل صفر، پنج، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد حجمی) بودند. این آزمایش به‌صورت طرح کاملاً تصادفی با چهار تکرار اجرا شد. با توجه به حساسیت اکثر گیاهان در مراحل ابتدایی رشد و جوانه‌زنی، اعمال تیمار آبیاری از حدود یک ماه بعد از شروع رشد گوجه‌فرنگی انجام شد.

خاک مورد استفاده در این تحقیق، لوم شنی بود که جزو خاک‌های سبک محسوب می‌شود. همچنین به منظور بررسی و آنالیز آماری از نرم افزار MSTATC استفاده شد. آزمون مقایسه میانگین نیز با کمک آزمون دانکن انجام شد.

در این تحقیق به بررسی اثر اصلاح خاک از طریق اختلاط با خاک‌اره بر پارامترها و شاخص‌های آبی گوجه‌فرنگی (کشت گلخانه‌ای) پرداخته شده است.

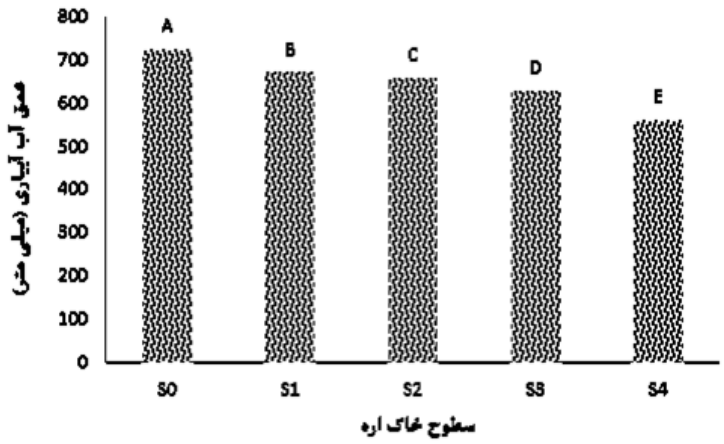
نتایج وبحث

نتایج آنالیز آماری این مطالعه نشان داد که اصلاح خاک با خاک‌اره دارای تاثیر معنی‌دار در سطح یک‌درصد بر پارامترها و شاخص های آبی شامل عمق آب آبیاری، تبخیر و تعرق کل، عمق زه‌آب خروجی، بهره‌وری مصرف آب و شاخص کارآیی مصرف آب می‌باشد (جدول ۲).

جدول ۲- آنالیز میانگین صفات تحت اثرسطوح مختلف خاک اره

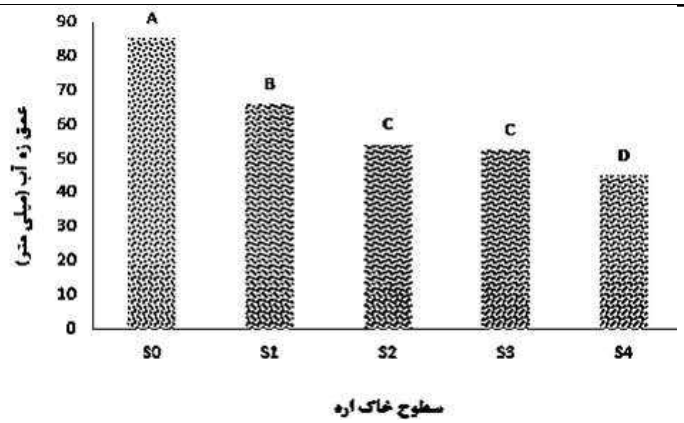
منابع تغییرات	درجه آزادی	عمق آب آبیاری	عمق زه‌آب	تبخیر و تعرق	WUE	WP
تکرار	۳	ns۱۳۲/۶	ns۹۴/۱	ns۵۰۲/۲	ns۵۴۸/۵	ns۴۸۹/۴
خاک اره	۴	۵۷۹۹۸ **	** ۳۹۸۱/۵	** ۳۳۶۰۷	۱۴۱۱۹ **	** ۱۳۲۴۸

ns ، **و * به ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی دار در سطح یک و پنج درصد.



شکل ۱- مقایسه عمق آب آبیاری در سطوح مختلف خاک‌اره

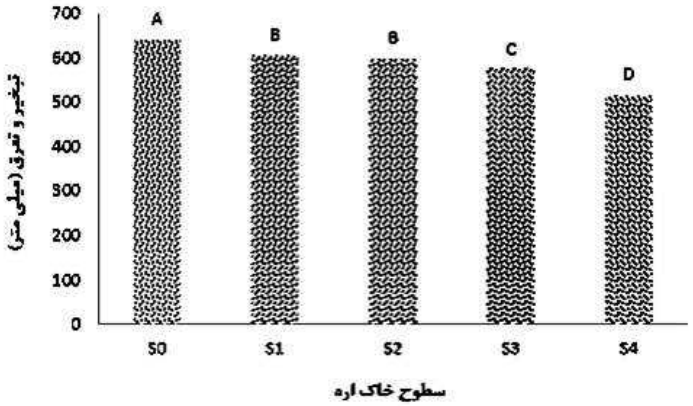
بر اساس نتایج این تحقیق، اثر تیمار خاک‌اره روی عمق آب آبیاری در سطح یک درصد معنی‌دار بود (جدول ۲). مقایسه میانگین صفات با کمک آزمون دانکن انجام شد. نتایج نشان داد کمترین مقدار عمق آب آبیاری مربوطبه S4 برابر با ۵۶۲/۷ میلی‌متر و بیشترین مقدار مربوطبه S0 برابر با ۷۲۶/۸ میلی‌متر بود (شکل ۱). همچنین مقایسه میانگین صفات نشان داد اختلاف معنی‌داری در عمق آب آبیاری در سطوح مختلف خاک‌اره وجود دارد. افزایش خاک‌اره باعث کاهش معنی‌دار عمق آب آبیاری در سطح یک درصد شد. البته مطابق شکل ۱، میزان این کاهش در مقادیر بالای خاک‌اره بیشتر مشهود بود. به‌طوری که با افزایش خاک‌اره از S0 به S1 حدود ۷/۵ درصد کاهش عمق آب آبیاری و با افزایش خاک‌اره از S3 به S4 حدود ۱۱/۹ درصد کاهش عمق آب آبیاری مشاهده شد. احتمالاً علت کاهش عمق آب آبیاری بر اثر افزایش خاک‌اره، خاصیت نفوذپذیری و قدرت نگهداری آب بالا در خاک‌اره بود که در نتیجه با افزایش خاک‌اره میزان عمق آبیاری کاهش یافت. نتایج تحقیق پوزش شیرازی و همکاران (۱۳۹۰) نشان داد که کاربرد کود دامی موجب کاهش مقدار آب مصرفی گردیده است.



شکل ۲- مقایسه عمق زه‌آب در سطوح مختلف خاک‌اره

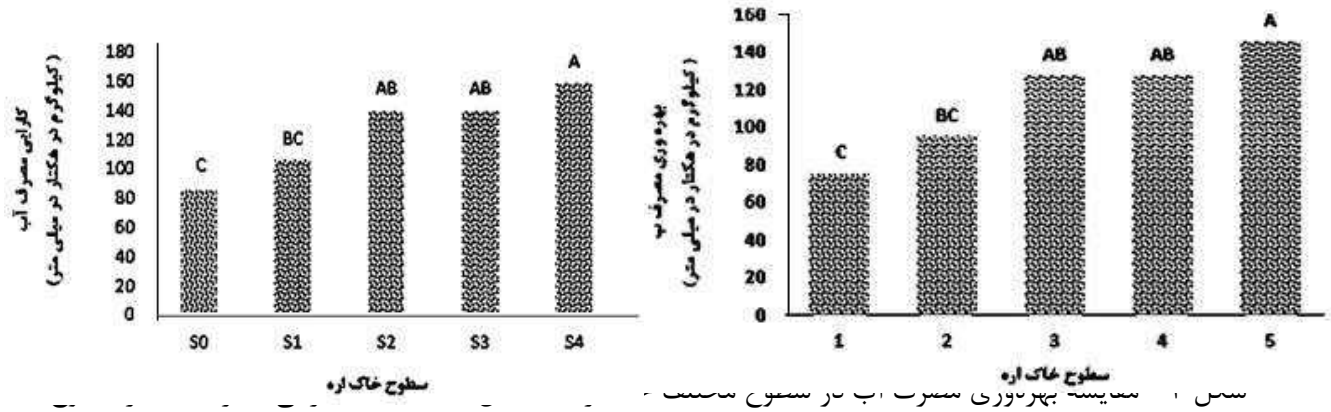
نتایج این پژوهش مطابق جدول ۲، بیانگر این بود که اثر تیمار خاک‌اره روی عمق زه‌آب در سطح یک درصد معنی‌دار است. مقایسه میانگین صفات با کمک آزمون دانکن نشان داد بیشترین مقدار عمق زه‌آب مربوط به S0 برابر با ۸۵/۳۷ و کمترین مقدار مربوط به S4 برابر با ۴۵/۰۴ بود (شکل ۲). از طرفی افزایش خاک‌اره سبب کاهش عمق زه‌آب در سطح یک درصد شد. به‌طوری که با افزایش مقدار خاک‌اره از S0 به S4، عمق زه‌آب حدود ۴۶/۱۶ درصد کاهش داشت. دلیل کاهش عمق زه‌آب در اثر افزایش خاک‌اره احتمالاً مربوط به تجمع خاک‌اره می‌باشد. خاک‌اره دارای قدرت نگهداری آب بالایی می‌باشد و رطوبت خاک را حفظ کرده و درنتیجه عمق آب آبیاری کاهش یافته بنابراین سبب کاهش عمق زه‌آب شد. همانطور که در شکل، قابل مشاهده است مقدار عمق زه‌آب در S2 و S3 در یک سطح آماری قرار دارد. به‌عبارتی دیگر اختلاف معنی‌داری

در عمق زه‌آب در این دو سطح وجود ندارد. بنابراین توصیه می‌شود درصورتی که انتخاب بین دو سطح باشد از مقدار خاک‌اره کمتر استفاده شود یعنی با استفاده از تیمار S2 ضمن صرفه‌جویی در مصرف خاک‌اره، میزان محصول مشابه حاصل گردد. نتایج تحقیق عبداللهی و همکاران (۱۳۸۶) نشان داد که افزودن مواد آلی در خاک‌های سنگین سبب افزایش نفوذ آب و در خاک‌های شنی موجب نگهداری بیشتر آب و کاهش نیاز آبیاری و در نتیجه کاهش زه‌آب گردید.



شکل ۳- مقایسه تبخیر و تعرق در سطوح مختلف خاک‌اره

مطابق جدول ۲، اثر تیمار خاک‌اره روی تبخیر و تعرق در سطح یک درصد معنی‌دار بود. مقایسه میانگین صفات با کمک آزمون دانکن نشان داد که بیشترین و کمترین مقدار تبخیر و تعرق برابر با ۶۴۱/۴ و ۵۱۷/۴ میلی‌متر مربوط به تیمار S0 و S4 بودند (شکل ۳). همچنین مقادیر خاک‌اره S1 و S2 اثر مشابه روی مقدار تبخیر و تعرق داشته و اختلاف مقادیر تبخیر و تعرق معنی‌دار نبود. بنابراین توصیه می‌شود از مقدار خاک‌اره کمتر استفاده شود تا ضمن صرفه‌جویی در مصرف خاک‌اره، میزان محصول مشابه حاصل آید. از طرفی افزایش خاک‌اره باعث کاهش معنی‌داری میزان تبخیر و تعرق در سطح یک درصد شد. علت این کاهش را می‌توان اینطور بیان کرد که خاک‌اره سبب افزایش نگهداری آب در خاک می‌گردد. درنتیجه مقدار آب آبیاری را کاهش داده و به تبع آن عمق زه‌آب هم کاهش یافت و درنتیجه تبخیر و تعرق کمتری مشاهده شد. نتایج تحقیق عبداللهی و همکاران (۱۳۸۶) نشان داد که اختلاط برخی مواد آلی نظیر پیت موجب کاهش تبخیر از خاک مرطوب شد. همچنین آن‌ها دریافتند که از پیت کاربردی به‌دلیل وزن مخصوص ظاهری کم و ظرفیت نگهداری بالای آب برای اصلاح اراضی نامطلوب می‌توان استفاده کرد.



شکل ۴- مقایسه بهره‌وری مصرف آب در سطوح مختلف خاک‌اره

بررسی نتایج این تحقیق (جدول ۲) بیانگر اثر معنی‌دار مقدار خاک‌اره روی بهره‌وری و کارایی مصرف آب بود (در سطح یک درصد). این دو شاخص با استفاده از آزمون دانکن مورد بررسی قرار گرفتند. بیشترین مقدار بهره‌وری و کارایی مصرف آب مربوط به تیمار S4 به ترتیب برابر با ۱۴۵/۹ و ۱۵۸/۶ و کمترین مقدار مربوط به تیمار S0 به ترتیب برابر با ۷۴/۶۴ و ۸۵/۲ بود. به‌طورکلی نتایج نشان داد که با افزایش خاک‌اره مقدار این دو شاخص افزایش یافت. احتمالا علت آن را می‌توان اینطور بیان کرد که با افزایش خاک‌اره میزان عملکرد افزایش و میزان تبخیر و تعرق و عمق آب آبیاری کاهش یافت پس طبق رابطه ریاضی مربوط به این دو شاخص، مقدار شاخص کارایی و بهره‌وری مصرف آب افزایش یافت، به‌طوریکه با افزایش خاک‌اره از S0 به S4 حدود ۴۶/۲۷ درصد افزایش کارایی مصرف آب و حدود ۴۸/۸۴ درصد افزایش بهره‌وری مشاهده شد. ازطرفی همانطور که در شکل‌های ۴ و ۵ قابل مشاهده است مقدار شاخص کارایی مصرف آب و بهره‌وری آب آبیاری در سه

تیمار S2، S3 و S4 در یک سطح آماری قرار دارد. بنابراین براساس نتایج تحقیق حاضر توصیه می‌شود در صورتی که انتخاب بین سه تیمار S2، S3 و S4 باشد از مقدار خاک‌اره کمتر استفاده شود. با استفاده از تیمار S2 ضمن صرفه‌جویی در مصرف خاک‌اره، میزان محصول مشابه حاصل گردد.

نتایج تحقیق واعظی و همکاران (۱۳۸۱) نشان داد که مصرف کود در آبیاری موجب افزایش کارایی مصرف آب گردید. همچنین مقدار کارایی مصرف آب از صفر تا ۱۰۰ درصد مقدار مصرف کود، حدود ۳۹/۹۵ درصد افزایش یافت. همچنین نتایج تحقیق نجف آبادی و همکاران (۱۳۹۶) نشان داد که برای افزایش کارایی مصرف آب گیاه ذرت می‌توان با کاربرد خاکپوش از شدت تبخیر سطحی کاست و شرایط برای حفظ رطوبت خاک را فراهم نمود. بطورکلی استفاده از خاکپوش (از نوع گونی سفید) موجب افزایش ۹۳ درصدی میزان کارایی مصرف آب نسبت به تیمار شاهد گردید.

سپاسگزاری

این مقاله با حمایت معاونت محترم پژوهشی دانشگاه محقق اردبیلی، تهیه شده است و از ایشان تشکر و قدردانی می‌گردد.

منابع

پوزش شیرازی، م.، س. سماوات، م. زلفی باوریانی، ف. فخری، ق. مرادی، ۱۳۹۰. بررسی تأثیر مواد آلی از منابع مختلف بر خواص فیزیکی و شیمیایی خاک و عملکرد گیاه در استان بوشهر. مجله پژوهش‌های خاک(علوم خاک و آب)، ۲۵(۴):۲۸۶-۲۹۳.

رسول‌زاده، ع.، رئوف، م. (۱۴۰۲). مبانی و روش‌های آبیاری. چاپ دوم، انتشارات عمیدی. ۲۸۵ ص.

رسولی‌قادی، پ.، م.ج.، بلوچی، ۱۳۹۴. مدیریت و قوانین منابع آب در ایران – چالش‌ها و راهکارها. کنگره بین المللی تخصصی علوم و زمین، ۳-۵(۳۴):۱۵-۱.

عبداللهی، ک.، س.ع. موحدی نائینی، ک. مشایخی، ۱۳۸۶. تأثیر مواد آلی موجود در تالاب آب‌بندان سرساری بر برخی از خواص فیزیکی محیط کشت و تبخیر در گلدان. مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۴(۴):۵۳-۶۳.

عبدلی، ع.، رمضانی‌مقدم، ج.، حسینی، ی.، نیک‌پور، م. ر.، دهقان، ه. (۱۴۰۰). اثر تنش آبی بر خصوصیات ریشه گوجه‌فرنگی (Saint Pierre) و عملکرد آن تحت مدیریت زمان آبیاری. نشریه علوم باغبانی (علوم و صنایع کشاورزی)، ۳۵(۲): ۲۳۴-۲۲۳.

علیزاده، ا. (۱۳۹۰). رابطه آب و خاک و گیاه. انتشارات دانشگاه امام رضا. ۲۸۵ ص.

نجف آبادی، ش.، م.ر.، نوری امامزاده‌ای، م. قبادی‌نیا، ع. دانش‌شهرکی، ۱۳۹۶. بررسی اثرات انواع خاکپوش بر کارایی مصرف آب و شاخص‌های رشد ذرت سینگل کراس ۷۰۴. نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۳۰(۳):۷۲۷-۷۳۷.

واعظی، ع.، م. همایی، م.ج. ملکوتی، ۱۳۸۱. اثر کود آبیاری بر کارآیی مصرف کود و آب در ذرت علوفه‌ای. مجله علوم خاک و آب. ۱۶(۲): ۱۵۲-۱۶۰.

تعادل الگوی از استفاده با ایران اقتصاد در آب منابع راهبردی اهمیت یوسفی، ع.، ص. خلیلیان، ح. بلالی، ۱۳۹۰. بررسی عمومی. نشریه اقتصاد و توسعه کشاورزی (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۵(۱):۱۲۰-۱۰۹.

Bernard, G. B., lien Penche, A., Hien, E., Deleporte, P., Clermont-Dauphin, C., Cournac, L., Manlay, R. J. 2015. Effect of ramial wood amendment on sorghum production and topsoil quality in a Sudano-Sahelian ecosystem (central Burkina Faso)- Agroforest Syst.89:81–93.

Castillo, G. M. L., Engler, A., Wollni, M. (2021). Planned behavior and social capital: Understanding farmers' behavior toward pressurized irrigation technologies. Agricultural Water Management, 243, 106524.

De Vries, F.T., Liiri, M.E., Bjørnlund, L., Bowker, M. A., Christensen, S., Seta¨la¨, H. M., Bardgett, R. D. 2012. Land use alters the resistance and resilience of soil food webs to drought. Nat Clim Change. 2:276–280.

Kaniszewski, S., Kosson1, M. Grzegorzewska1, A. Kowalski1, E. Badełek1, J. Szwejda-Grzybowskai, L.Tuccio2, and G. Agati, 2019. Yield and Quality Traits of Field Grown Tomato as Affected by Cultivar and Nitrogen Application Rate. J. Agr. Sci. Tech, 21(3): 683-697.

Taromi Aliabadi, B., M. R. Hassandokht, H. Etesami, H. A. Alikhani, and H. Dehghanisanij, 2019. Effect of Mulching on Some Characteristics of Tomato (Lycopersicon esculentum Mill.) under Deficit Irrigation. J. Agr. Sci. Tech, 21(4): 927-941.

The effect of soil amendment on Tomato evapotranspiration and water indices

***[1] Javad Ramazani Moghadam, [2] Matine Etemadi nia, [3] Yaser Hoseini, [4] Ali Rasoulzadeh, [5] Majid Raoof**

1-Associate Professor, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili

2- M. Sc. graduated, Department of Water Engineering, University of Mohaghegh Ardabili

3 , 4, 5-Professor, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili

ramezani@uma.ac.ir_* Corresponding author: j

Abstract

Water and soil are the main factors of agriculture, the management of which can be very useful in recent drought conditions. Soil, as a growing medium and a reservoir of water and nutrients, plays a very important role in the performance of crops. Soil amendment and improvement in the current water shortage conditions, in order to increase yield, are very important issues, and many studies have been conducted in Iran and the world in this field. For this purpose, in this study, the effect of soil amendment with sawdust on water parameters and indices in tomato cultivation under different levels of water stress was investigated. The experiment was conducted as a factorial in a completely randomized block design with four replications. The treatments included irrigation management at four irrigation levels (with permissible moisture discharge values of 20, 50, 65, and 80 percent) and mixing sawdust with soil at five levels (zero, 5, 10, 15, and 20

percent by volume). The results of the study showed that soil amendment had a significant effect at the 1% level on the values of irrigation water height, drainage rate, evapotranspiration, and water use efficiency index. So that by increasing the amount of sawdust from 0 to 20%, the amount of drainage rate and evapotranspiration decreased by 47.3 and 19.3 percent, respectively, and water use efficiency and water use productivity increased by 86.2 and 95.5 percent, respectively.

Keywords: Water stress, sawdust, deficit irrigation, tomato.

سومین کنفرانس ملی آب و هواشناسی ایران (با محوریت تغییر اقلیم)
The 3rd National Conference on Climatology of Iran (Focusing on Climate Change)
ارومیه ۱۶ مهر ۱۴۰۴

تحلیلی بر روند تغییرات بارش و دما و پیش‌بینی سناریوهای محتمل مدلSDSM

مطالعه موردی (ایستگاه سینوپتیک تبریز)

محمدحسن فرامرزی[۱]، بهروز ساری صراف[۲]

۱- دانشجوی دکترای تخصصی آب و هواشناسی دانشگاه تبریز
۲- استاد آب و هواشناسی دانشگاه تبریز

آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول (Hassan.Faramarzi@tabrizu.ac.ir)

چکیده

ایستگاه سینوپتیک تبریز، به‌سان نگینی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه و در مسیر سامانه‌های بارشی بادهای غربی و توده‌های هوای مهاجر سیبری و ... ، نقشی کلیدی در فهم الگوهای آب‌وهوایی منطقه‌ای ایفا می‌کند. موقعیت جغرافیایی خاص این ایستگاه و مکان‌گزینی خاص آن در مرکز سه استان شمالغربی ایران، انعکاسی از تغییرات مکانی-زمانی داده‌های بارش و دما را ارائه می‌دهد که می تواند به‌عنوان پلتفرمی، همبستگی‌های مکانی-زمانی، تأثیر تغییر اقلیم را در منطقه پوشش می‌دهد.

در این تحقیق به تحلیل روندهای بلندمدت بارش و دمای کمینه و بیشینه ایستگاه سینوپتیک تبریز مد نظر قرار گرفت تا روند تغییرات آن تبیین گردد. بدین منظور با بهره گیری از مدل SDSM و داده‌های ایستگاه، کیفیت‌سنجی و هموارسازی شد و با استفاده از داده های ECMWF-EA5 که وضوع بالایی را دارند نسبت به مدل سازی و انتخاب متغیرهای پیش بینی کننده اقدام شد و با کالیبراسیون و واسنجی بهینه آن و استفاده از داده های MPI-ESM1.2-HR تولید سناریوهای SSPs از طریق تأثیر عدم قطعیت‌های ناشی از انتخاب GCMها و فاکتورهای محلی ریز مقیاس نمایی مبادرت گردید.

نتایج تحقیق نشان می دهد که تغییرات دمای کمینه و بیشینه در ایستگاه تبریز، روند افزایشی دارند به طوریکه این افزایش در ماه های گرم سال محسوس تر است. به طوریکه میانگین دمای کمینه بر اساس سناریوهای SSP(1-2.6, 2-4.5, 3-7.0, 5-8.5) به ترتیب ۱/۱ ، ۱/۴ ، ۱/۹ و ۲/۳ درجه سانتیگراد و دماهای بیشینه نیز به ترتیب ۱/۴ ، ۲/۱ ، ۲/۵ و ۲/۸ افزایش خواهد داشت. با بررسی سری زمانی بارش های شبیه سازی شده، مشخص گردید که روند کلی بارش در سناریوهای SSP1-2.6 و SSP3-7.0 به ترتیب افزایش ۱ و ۸ درصدی نشان می دهند و در سنایوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به ترتیب

کاهش ۴/۳ و ۱/۸ درصدی نشان می دهد. روند تغییرات فصلی بارش نیز نشان داد بارش‌های زمستانه روند افزایشی و بارش های بهاره کاهشی خواهند بود و بارش‌های تابستانه و پائیزه در کاهشی تا حد نرمال نوسان خواهد داشت.

کلید واژه‌ها: تغییر اقلیم ، من کندال، مدل SDSM ، سناریوهای SSPs ، ریز مقیاس نمایی.

مقدمه

تأثیر افزایش گازهای گلخانه‌ای بر اقلیم و تغییر آن از دغدغه‌های محققین می‌باشد. چرا که تغییر اقلیم بر تمامی فرآیندهای منابع طبیعی به خصوص منابع آب و به تبع آن بر زندگی بشر تأثیرگذار است و غالباً منشأ انسانی دارند (رسولی ,.et al 2014) (سیارخلج et al., 2022). در این رخداد، طبیعت بازیگری قابلیت چشمگیر جهت مداخله در حیات انسان است(کاظمی et al., 2019). در این راستا، گزارش‌های IPCC حاکی از آن است که با توجه به روند انتشار گازهای گلخانه‌ای، تا پایان سدهٔ حاضر مقدار دما تغییرات چشمگیری داشته و بیشتر گرمای سطح زمین مربوط به فعالیت‌های انسانی بوده است(IPCC, 2001; IPCC, 2013) .

از اینرو پیش‌بینی روند تغییرات اقلیمی که در بستر گردش عمومی جو رخ می‌دهد، جهت پیشگیری از مخاطرات احتمالی آتی، برای هر جامعه حائز اهمیت می باشد. بدین منظور مدل‌های عددی متعددی مانند مدل‌های اقلیمی عمومی (GCMs) که نقش کلیدی در پیش‌بینی رفتار بلندمدت سیستم‌های اتمسفری در قالب مکان-زمان دارند، توسعه یافته است. از معتبرترین ابزارها، مدل‌های گردش عمومی جو جفت شده جوی- اقیانوسی۳ می‌باشد که قادرند پارامترهای جوی و اقیانوسی را برای یک دوره بلندمدت با استفاده از سناریوهای تایید شده IPCC2 مدل سازی نمایند(Lane et al., 1999; Mitchell, 2003). به دلیل اینکه مدل‌های اقلیمی جهانی به لحاظ وضوح مکانی و زمانی در مناطق کوچک یا حوضه‌های آبریز با توزیع محلی قادر به پیش‌بینی دقیق نیستند(فاطمه et al., ۲۰۱۲) از اینرو رویکردهای ریزمقیاس‌نمایی (downscaling) توسعه یافته‌اند تا خروجی‌هایGCM ها را به سطوح مکانی کوچکتر و با توزیع آماری/فیزیکی معتبر ترجمه کنند.

مدل SDSM یکی از مدل‌های ریز مقیاس نمایی آماری محسوب می شود که کارآیی آن در نقاط مختلف جهان و مقایسه با سایر مدل‌ها به وفور صورت گرفته است(Harpham & Wilby, 2005). همچنین شبیه‌سازی تغییرات اقلیمی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه، دقت مدل SDSM و عدم قطعیت کمتری آن را تأیید می‌نماید.(گودرزی et al., 2019) (Sobhani et al., 2015)(Helmi et al., 2024) . با توجه به اینکه الگوهای مکانی -زمانی متغیرهای آب و هوایی مانند بارش و دما اهمیت زیادی دارد(Khan et al., 2018) و از سوی دیگر، تغییرپذیری بارش، عمدتاً به دلیل تأثیر آن بر جامعه، فعالیتهای اقتصادی

3 Atmospheric- Ocean General Circulation Model

مانند تولید، کشاورزی و استفاده از زمین و منابع آب، نیز از اهمیت فراوانی برخوردار است(Trigo & Palutikof, 2001) لذا در این تحقیق، به منظور پیش بینی روند تغییرات عناصر بارش و دمای ایستگاه سینوپتیک تبریز ترجیحاً از مدلSDSM استفاده شده است که با ترکیب داده‌های مشاهداتی، فاکتورهای فیزیکی و فنی، و سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای : SSP1-2.6 (مسیر سازگار با توسعه پایدار)، SSP2-4.5 (میانه-مسیر توسعه جهانی)، SSP3-7.0 (جهان ناهمگون و محدودکننده) و SSP5-8.5 (رشد شدید اقتصادی و مصرف سوخت فسیلی) ، امکان ارزیابی تغییرات دما، بارش و دیگر متغیرهای اقلیمی را در دوره‌های زمانی مختلف فراهم می‌کند و با در نظرگرفتن عدم قطعیت‌های ناشی از انتخاب GCM و فاکتورهای محلی، سناریوهای SSPs را قادر می‌سازد تا اثرات آینده بر سیستم‌های آبی و کشاورزی را روشن کنند (Alexander et al.، ۲۰۱۴ ;. Kundzewicz et al.۲۰۱۴ ،۲۰۱۴).

مواد و روش‌ها

مدل های گردش عمومی جو به منظور شبیه‌سازی اقلیم آینده کره زمین توسعه داده شده‌اند. ورودی‌های مدل شامل دو سری داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌های زمینی شامل(بارش، دمای کمینه و بیشینه روزانه و ...) و نیز داده‌های گزارش ششم هیأت بین الدول تغییرات اقلیمی می‌باشد. (جدول شماره ۱)

جدول شماره (۱) : داده‌های گزارش ششم هیأت بین الدول تغییرات اقلیمی

Model	ECS (°K)	Pressure levels (hPa)	SSPs	Variant	Leap years
ECMWF ERA5	n/a	500 ،850 ،1000	n/a	n/a	Yes
NCEP-DOE Reanalysis2	n/a	500 ،850 ،1000	n/a	n/a	Yes
CanESM5	5.6	500 ،850 ،1000	SSP1-1.9 ،SSP1-2.6 ،SSP2-4.5، SSP3-7.0 ،SSP5-8.5	r1i1p1f1	No
NorESM2-MM	2.5	500 ،850 ،1000	SSP1-2.6 ،SSP2-4.5 ،SSP3-7.0 ،SSP5-8.5	r1i1p1f1	No
MPI-ESM1.2-HR	3	500 ،850 ،1000	SSP1-2.6 ،SSP2-4.5 ،SSP3-7.0 ،SSP5-8.5	r1i1p1f1	Yes

داده‌های گزارش ششم هیأت بین‌الدول تغییراقلیم، از پایگاه داده پیش‌بینی کننده Canada.Ca/En.Html5 دانلود شد. این داده شامل پوشه اصلی و استاندارد می‌باشند که در فایل اصلی،۲۶ پارامتر (جدول شماره ۲) و در پوشه استاندار شده، ۲۳ پارامتر وجود دارد و پارامترهای p1th، p5th و p8th که مربوط به مولفه جهت باد در ارتفاع ۱۰۰۰، ۸۵۰ و۵۰۰ هکتوپاسکال هستند به دلیل عدم قابلیت استانداردسازی، حذف شده است.

جدول شماره (۲) : لیستی پیش بینی کننده و نام متغیرهای مربوط به آنها۴

No	Predictor names or variables	FileName	نام متغیرهای پیش بینی بینی
1	Mean sea level pressure	mslp	فشار متوسط‌سطح دریا
2	1000 hPa Wind speed	p1_f	سرعت‌باد درارتفاع ۱۰۰۰هکتوپاسکال
3	1000 hPa Zonal wind component	p1_u	باد منطقه ای مؤلفه درارتفاع ۱۰۰۰هکتوپاسکال
4	1000 hPa Meridional wind component	p1_v	باد مداری درارتفاع ۱۰۰۰هکتوپاسکال مؤلفه
5	1000 hPa Relative vorticity of true wind	p1_z	چرخندگی باد درارتفاع ۱۰۰۰هکتوپاسکال
6	1000 hPa Wind direction	p1th	جهت باد درارتفاع ۱۰۰۰هکتوپاسکال
7	1000 hPa Divergence of true wind	p1zh	واگرایی باد درارتفاع ۱۰۰۰هکتوپاسکال
8	500 hPa Geopotential	p500	ژئوپتانسیل درارتفاع ۵۰۰هکتوپاسکال
9	500 hPa Wind speed	p5_f	سرعت باد در ارتفاع ۵۰۰ هکتوپاسکال
10	500 hPa Zonal wind component	p5_u	مولفه باد منطقه ای در ۵۰۰ هکتوپاسکال
11	500 hPa Meridional wind component	p5_v	مولفه باد نصف‌النهاری در ارتفاع ۵۰۰ هکتوپاسکال
12	500 hPa Relative vorticity of true wind	p5_z	چرخندگی نسبی‌باد حقیقی درارتفاع ۵۰۰هکتوپاسکال
13	500 hPa Wind direction	p5th	جهت باد در ارتفاع ۵۰۰هکتوپاسکال
14	500 hPa Divergence of true wind	p5zh	واگرایی باد حقیقی درارتفاع ۵۰۰هکتوپاسکال
15	850 hPa Geopotential	p850	ژئوپتانسیل در ارتفاع ۸۵۰هکتوپاسکال
16	850 hPa Wind speed	p8_f	سرعت باد در ارتفاع ۸۵۰هکتوپاسکال

4 https://climate-scenarios.canada.ca/. The ensemble of daily predictor variables developed from the CanESM2 CMIP5 experiments. https://climate-scenarios.canada.ca/?page=canesm2-predictor-notes

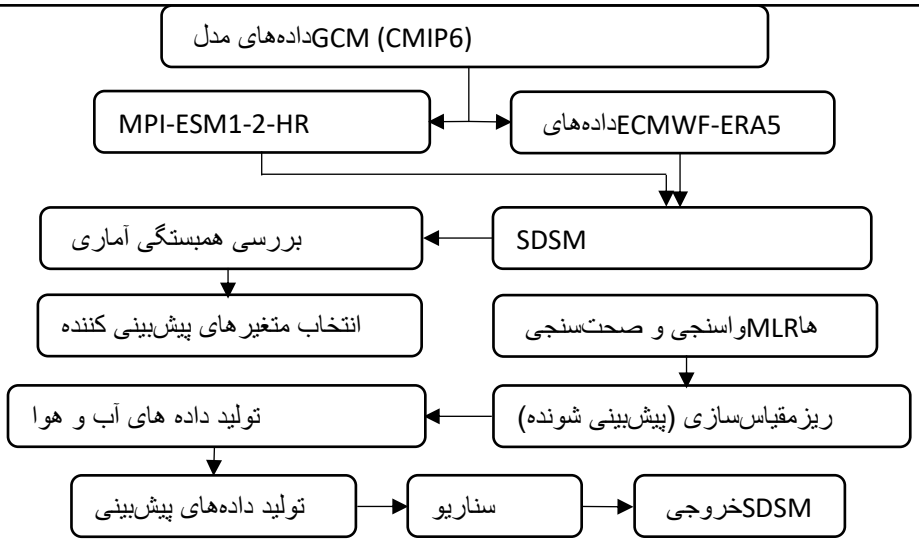
17	850 hPa Zonal wind component	p8_u	مولفه باد منطقه ای در ارتفاع ۸۵۰هکتوپاسکال
18	850 hPa Meridional wind component	p8_v	مولفه باد نصف النهاری در ارتفاع ۸۵۰هکتوپاسکال
19	850 hPa Relative vorticity of true wind	p8_z	چرخنگی نسبی باد حقیقی درارتفاع ۸۵۰هکتوپاسکال
20	850 hPa Wind direction	p8th	جهت باد در ارتفاع ۸۵۰هکتوپاسکال
21	850 hPa Divergence of true wind	p8zh	واگرایی بادحقیقی درارتفاع ۸۵۰هکتوپاسکال
22	Total precipitation	prcp	کل بارش
23	500 hPa Specific humidity	s500	رطوبت ویژه در ۸۵۰هکتوپاسکال
24	850 hPa Specific humidity	s850	رطوبت ویژه در ارتفاع ۸۵۰هکتوپاسکال
25	1000 hPa Specific humidity	shum	رطوبت ویژه درارتفاع ۱۰۰۰هکتوپاسکال
26	Air temperature at 2 m	temp	متوسط دما درارتفاع دو متری

مدل ریز مقیاس نمایی SDSM5:

SDSM یک مدل رگرسیونی چند متغیره است که با به کارگیری روش‌های ریزمقیاس‌سازی آماری، داده‌های آب و هوایی را تولید می‌کند (Wilby و همکاران، ۲۰۰۲). این ابزار به عنوان یک پشتیبان تصمیم‌گیری، برای ارزیابی اثرات تغییر اقلیم محلی با استفاده از تکنیک‌های کاهش مقیاس آماری مؤثر عمل می‌کند و امکان سریع ایجاد سناریوهای چندگانه، با هزینهٔ کمتر و پیکربندی متغیرهای آب و هوایی روزانه را فراهم می‌کند تا تحت شرایط آب و هوای منطقهٔ کنونی و آینده تحلیل شود. همچنین کارکردهای فرعی مانند غربالگری اولیهٔ متغیرهای پیش‌بینی کننده، کالیبراسیون، واسنجی و انجام تجزیه و تحلیل‌های آماری و نمودارسازی داده‌های آب و هوایی را ارائه می دهد۶(شکل شماره ۱).

5 Statistical Downscaling Model

6 Reference : https://www.sdsm.org.uk/



شکل شماره (۱) : فرایند ریزمقیاس نمایی

در راستای تامین ورودی‌های مدل با دقت مکانی بالا، از داده‌های ایستگاه سینوپتیک تبریز به عنوان یکی از ورودی‌های کلیدی استفاده شد و با داده‌هایECMWF-ERA5 ، وضوح مکانی بالا، ترکیب شد. با توجه به مقدار ضریب تعیین۷(R2) (رابطه۱) ، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE8)(رابطه۲) ، میانگین مربعات خطا، (MSE9)(رابطه۳) ، میانگین مطلق خطا (MAE10)(رابطه۴) و ضریب همبستگی (R11)(رابطه۵) استفاده شد و پارامترهای پیش‌بینی‌کننده انتخاب شدند، سپس کالیبره و واسنجی شدند تا همسویی بهینه بین داده‌های ورودی و خروجی‌های مدل حاصل گردد. معیارهای ارزیابی مدل به طور مختصر در ادامه توضیح داده می شود.

۱) ضریب تعیین: معیاری است بدون بعد، که بهترین مقدار آن برابر یک می باشد. ((Draper, 1998)

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{N} X_0 X_s}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N} {X_0}^2 {X_s}^2}} \qquad (۱)$$

7 R-squared

8 Root Mean Squared Error

9 Mean Squared Error

10 Mean Absolute Error (MAE)

11 Correlation coefficient

۲ - مجذور میانگین مربعات خطا و میانگین مطلق خطا: این شاخص ها نشان دهنده میزان خطای مدل می باشند که بهترین مقدار آنها برابر صفر است و از طریق روابط زیر محاسبه می شود.

$$RMSE = \frac{\sum_{i=1}^{N}(X_0\, X_s)^2}{N} \quad (۲)$$

۳ - میانگین مربعات خطا: دامنه این شاخص از صفر تا بی نهایت می باشد که از طریق رابطه شماره (۳) محاسبه می شود.

$$MSE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(X_0\, X_s)^2 \quad (۳)$$

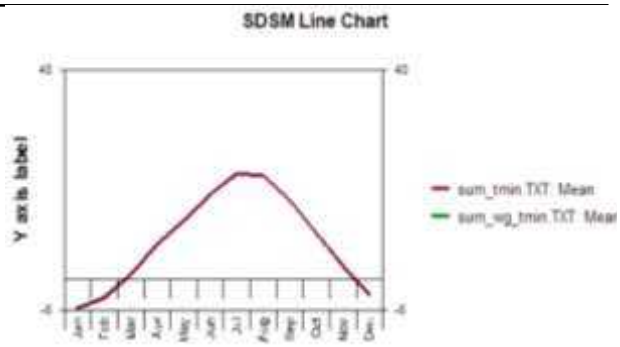
۴) میانگین مطلق خطا:

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{N} |X_0\, X_s|}{N} \quad (۴)$$

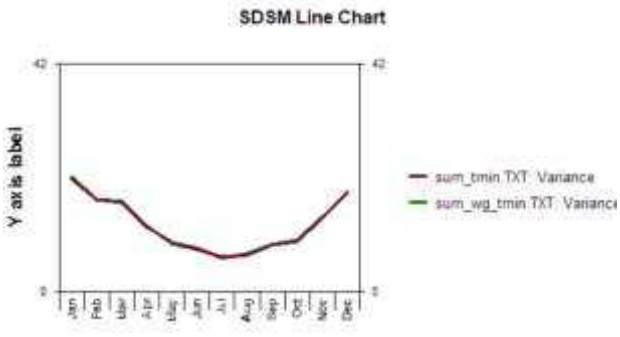
۵) ضریب همبستگی: بیان کننده میزان همبستگی بین نتایج برآورد شده مدل و داده‌های مشاهداتی است که مطابق (رابطه شماره ۵) محاسبه می شود. در واقع ضریب همبستگی ارتباط خطی بین دو متغیر را اندازه گیری می‌کند و یک های اقلیمی بسیار کاربرد دارد. ریزی تحلیل‌ابزار ریاضی است که در پایه

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{N}(X_0 - \bar{X}_0)(X_s - \bar{X}_s)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(X_0 - \bar{X}_0)^2 \sum(X_s - \bar{X}_s)^2}} \quad (۵)$$

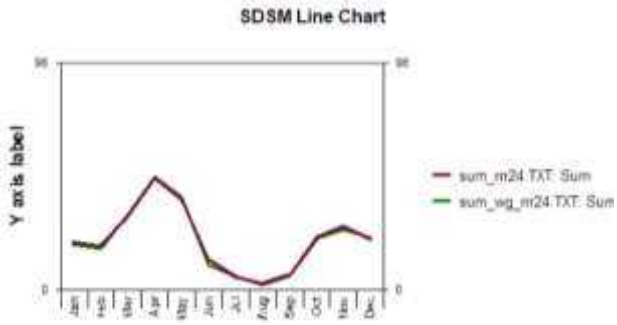
در روابط فوق $\boldsymbol{X_0}$ داده های مشاهداتی ، $\boldsymbol{X_S}$ داده های شبیه سازی شده ، $\overline{\boldsymbol{X_0}}$ میانگین داده‌های مشاهداتی، $\overline{\boldsymbol{X_S}}$ میانگین داده‌های شبیه سازی شده و N تعداد داده‌هاست. در ادامه، با استفاده از داده‌های پایگاه ماکس پلانکMPI-ESM1-2-HR شبیه‌سازی با دقت بالایی برای هریک از عناصر اقلیمی برای بازه سال‌های (۲۱۰۰-۲۰۱۵) تولید گردید و با ایجاد هریک از سناریوهای SSPs ، شرایط مقایسه فراهم شد که نتایج تحلیل هر یک از این سناریوها به شرح زیر ارائه می‌شود.



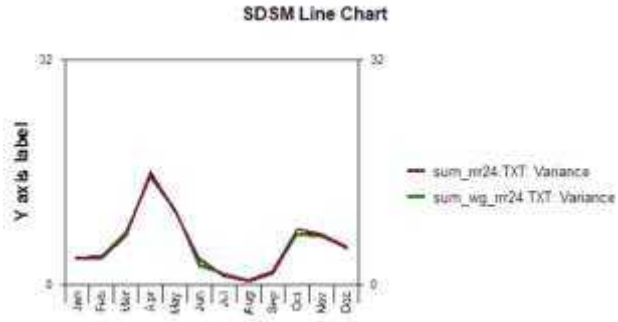
شکل شماره (۳) : برازش پارامتر دمای کمینه ایستگاه تبریز



شکل شماره (۴) : برازش واریانس پارامتر دمای کمینه ایستگاه تبریز



شکل شماره (۵) : برازش پارامتر بارش ایستگاه تبریز

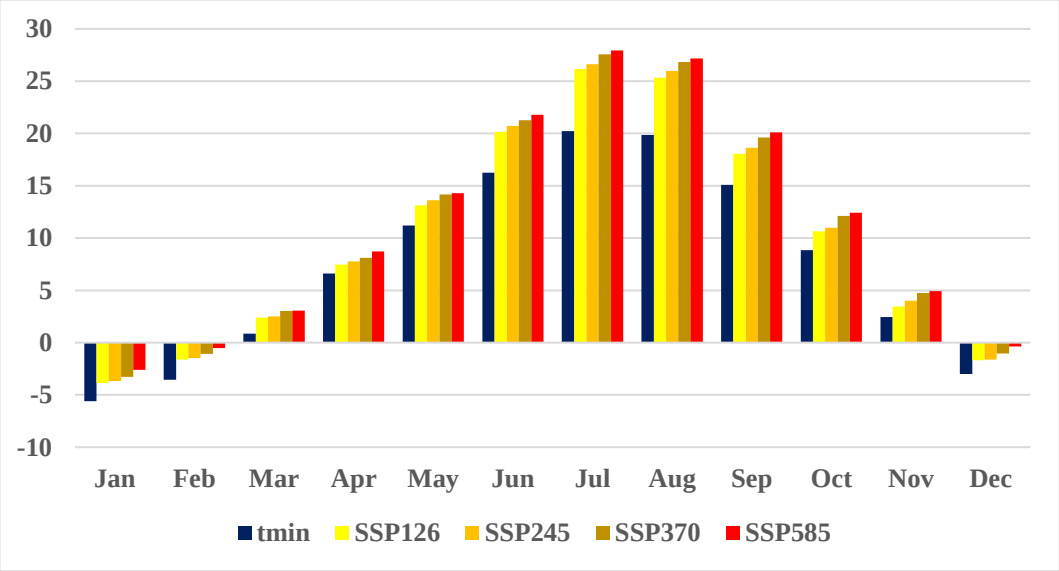


شکل شماره (۶) : برازش واریانس پارامتر بارش ایستگاه تبریز

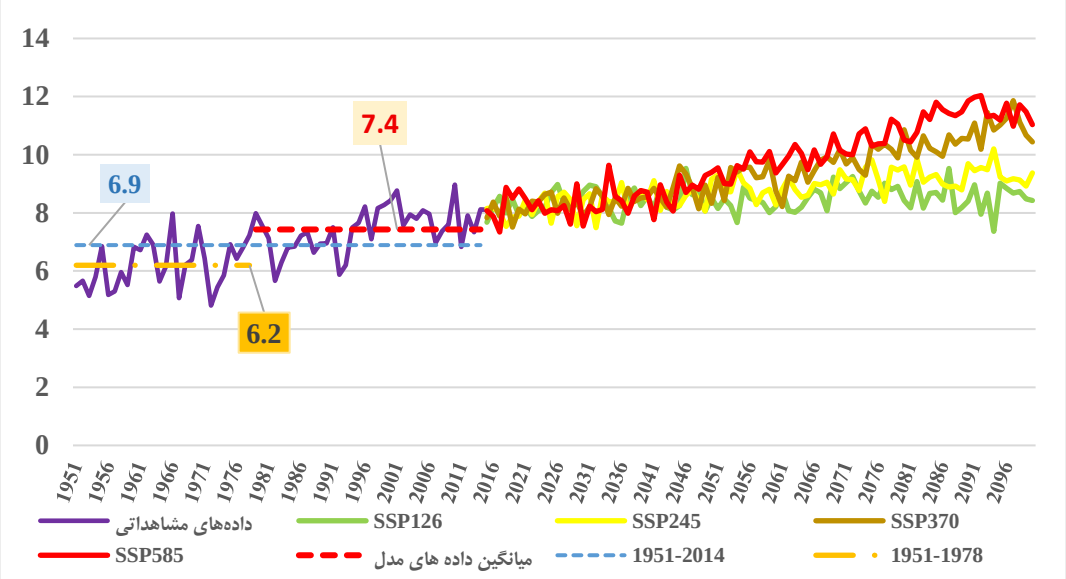
نتایج

تحلیل روند تغییرات میانگین دمای کمینه:

مطابق نمودار شماره ۱، میانگین کمینه دمای ایستگاه تبریز در تمامی سناریوها SSPs ، روند افزایش نشان می‌دهد. تغییرات دمای کمینه به گونه ای است که از سناریوی SSP1-2.6 که وضعیت مطلوب تغییرات گازهای گلخانه و توسعه پایدار را ترسیم می کند به سمت سناریوی SSP5-8.5 که گویای رشد شدید اقتصادی و مصرف سوخت فسیلی است، روند تغییرات دما افزایشی بوده و با تغییر سناریو بر میزان آن افزوده می شود.



نمودار شماره (۱) : مقایسه روند تغییرات دمای میانگین کمینه ایستگاه تبریز در سناریورهای مختلف



نمودار شماره (۲): مقایسه روند تغییرات دمای میانگین کمینه ایستگاه تبریز در سناریورهای مختلف

روند تغییرات میانگین سالانه کمینه دما نشان می‌دهد که میانگین دمای کمینه در دوره مشاهداتی (۲۰۱۴-۱۹۷۹) حدود ۷/۴ درجه سانتیگراد است. این در حالی است که میانگین دمای کمینه برای بازه (۲۰۱۴-۱۹۵۱) در حدود ۶/۲ درجه سانتی گراد می‌باشد و میانگین دمای کمینه برای دوره (۲۰۱۴-۱۹۵۱) در حدود ۶/۹ درجه سانتی گراد می باشد و میانگین دوره در دوبازه در بین این دو بازه حدود ۱/۲ درجه سانتیگراد افزایش داشته است(جدول شماره ۳).

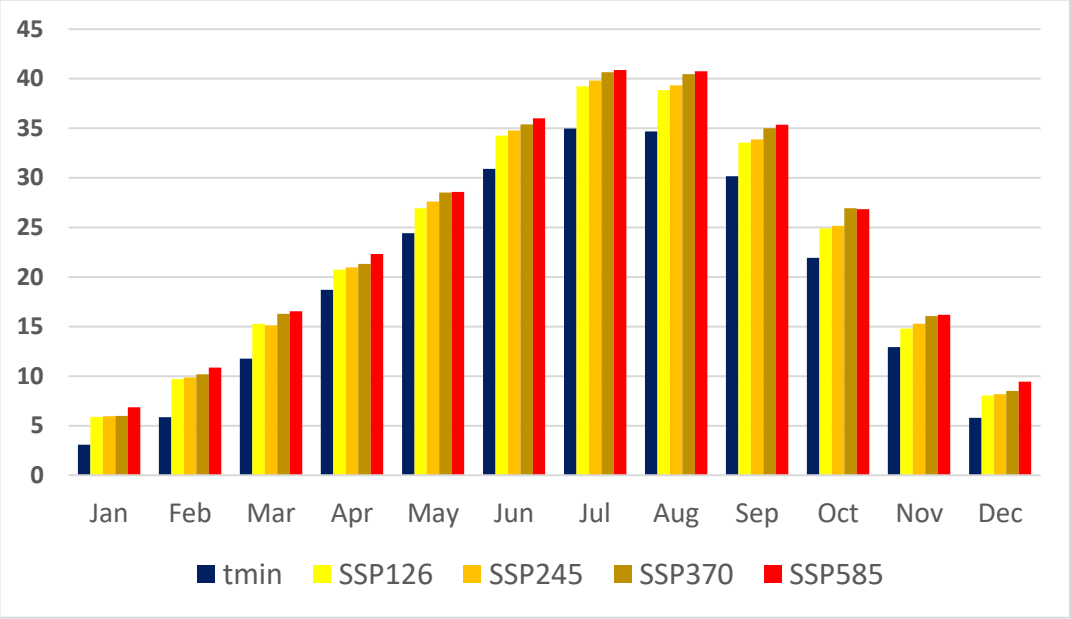
جدول شماره (۳) : میانگین دمای کمینه در دوره های مختلف مشاهداتی و سناریوهای پیش‌بینی شده

دراز مدت (۲۰۱۴-۱۹۵۱)	ماقبل دوره مشاهداتی (۱۹۷۸-۱۹۵۱)	دوره مشاهداتی (۲۰۱۴-۱۹۷۹)	دوره پیش بینی شده (۲۱۰۰-۲۰۱۵)			
			SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5
۶/۹	۶/۲	۷/۴	۸/۵	۸/۸	۹/۳	۹/۷

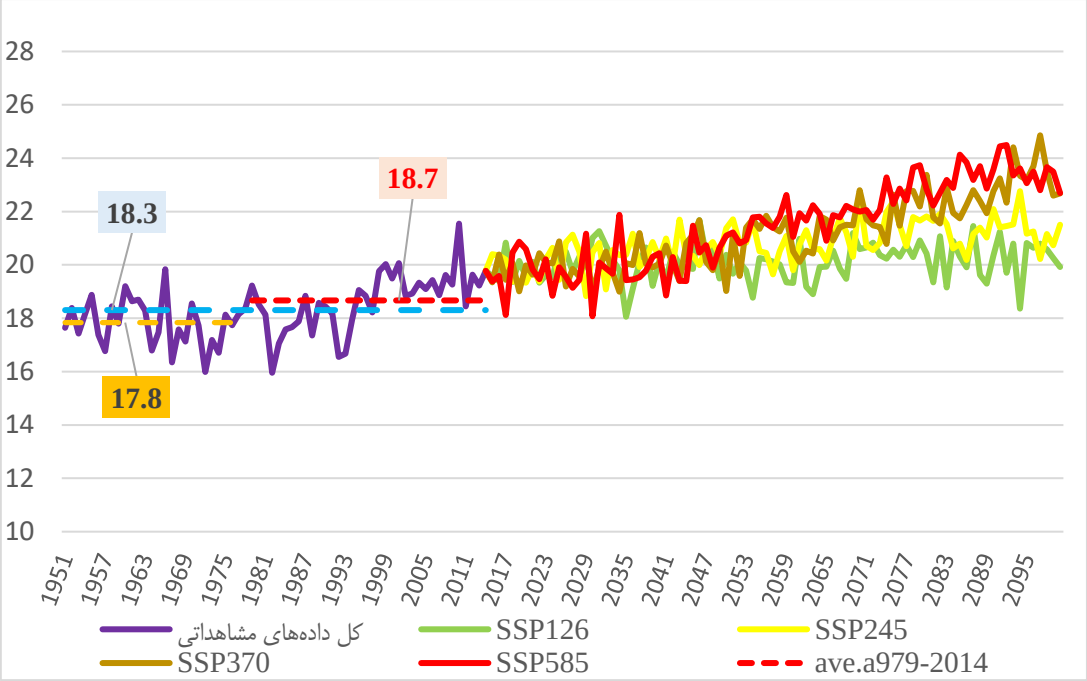
نمودار شماره (۲) و جدول شماره (۳)، روند تغییرات میانگین دمای کمینه را در سه بازه (۲۱۰۰-۲۰۱۵) ، (۲۰۱۴-۱۹۷۹) و (۱۹۷۸-۱۹۵۱) نشان می‌دهد. روند تغییرات دمایی در سناریوی SSP1-2.6، با کمینه تغییرات نسبت به سایر سناریوهای از ۷/۴ به ۸/۵ درجه سانتیگراد رسیده است. همچنین دما در سناریوی SSP2-4.5 به ۸/۸ درجه سانتیگراد، در سناریوی SSP3-7.0 به ۹/۳ درجه سانتیگراد و در سناریوی SSP5-8.5 به ۹/۷ درجه سانتیگراد افزایش خواهد یافت که میزان این تغییرات به ترتیب حدود ۱/۱ ، ۱/۴ ، ۱/۹ و ۲/۳ درجه سانتیگراد نسبت به دوره مشاهداتی برآورد می شود.

تحلیل روند تغییرات میانگین دمای بیشینه:

میانگین بیشینه دمای ایستگاه تبریز در تمامی سناریوها SSPs ، روند افزایش دارد (نمودار شماره ۳). تغییرات دمای بیشینه از سناریوی SSP1-2.6 به سمت سناریوی SSP5-8.5 روند افزایشی، به ویژه در ماه‌های گرم سال نشان می‌دهد. بجز در ماه اکتبر که طی سناریوی SSP5-8.5 نسبت به سناریو SSP3-7.0 کاهش نامحسوسی دارد. همچنین در ماه مارس سناریوی SSP2-4.5 نسبت به سناریوی SSP1-2.6 کاهش ناچیزی نشان می دهد و در مابقی سناریوها به فراخور گذشت زمان بر روند افزایشی میانگین دمای بیشینه افزوده می شود.



نمودار شماره (۳) : مقایسه روند تغییرات دمای میانگین بیشینه ایستگاه تبریز در سناریورهای مختلف



نمودار شماره (۴) : مقایسه روند تغییرات دمای میانگین کمینه ایستگاه تبریز در سناریورهای مختلف

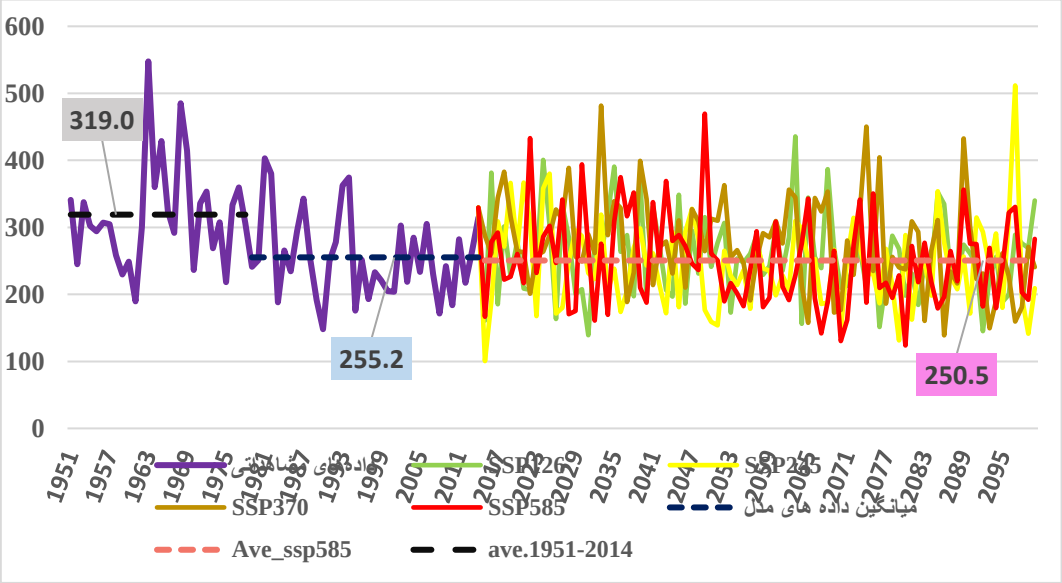
میانگین بیشینه دمای ایستگاه تبریز در بازه زمانی (۲۰۱۴-۱۹۷۹) حدود ۱۸/۷ درجه سانتیگراد است که در مقایسه با بازه زمانی (۱۹۷۸-۱۹۵۱) که حدود ۱۷/۸ درجه سانتیگراد است حدود ۰/۹ درجه سانتیگراد افزایش دما نشان می دهد. روند تغییرات میانگین دمای بیشینه در سه بازه (۲۱۰۰-۲۰۱۵) ، (۲۰۱۴-۱۹۷۹) و (۱۹۷۸-۱۹۵۱) حاکی از آنست که روند تغییرات طی سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5، SSP3-7.0 و SSP5-8.5 نسبت به دوره مشاهداتی مدل به ترتیب ۱/۴ ، ۲/۱ ، ۲/۵ و ۲/۸ درجه سانتیگراد نسبت به میانگین بیشینه بازه مشاهداتی مدل افزایش خواهد داشت(نمودار شماره۴ و جدول شماره ۴).

جدول شماره (۴) : میانگین دمای بیشینه در دوره های مختلف مشاهداتی و سناریوهای پیش‌بینی شده

دوره پیش بینی شده (۲۱۰۰-۲۰۱۵)				دوره مشاهداتی	ماقبل دوره مشاهداتی	دراز مدت
SSP5-8.5	SSP3-7.0	SSP2-4.5	SSP1-2.6	(۲۰۱۴-۱۹۷۹)	(۱۹۷۸-۱۹۵۱)	(۲۰۱۴-۱۹۵۱)
۲۱/۵	۲۱/۲	۲۰/۸	۲۰/۱	۱۸/۷	۱۷/۸	۱۸/۳

تحلیل روند تغییرات بارش:

بارش یکی از عناصر اقلیمی مهم است که پویایی هیدرولوژیک، الگوی فصلی و تبدیل سطح زمین به سیستم‌های زیستی را تعیین می‌کند. به طور معمول، اقلیم منطقه با تمرکز بر الگوهای بارش سالانه/فصلی، نوسانات دمایی، رطوبت و تابش خورشیدی و ... توصیف می‌شود. با بررسی نتایج خروجی از مدل SDSM شرایط برای دوره های آتی احراز گردیده است.



نمودار شماره (۵) : مقایسه روند تغییرات دمای میانگین کمینه ایستگاه تبریز در سناریورهای مختلف

میانگین بارش در فصول زمستان در حدود ۶۳ میلی متر می باشد که روند تغییرات آن در دوره‌های آتی SSP1-2.6 ، SSP2-4.5، SSP3-7.0 و SSP5-8.5 به ترتیب ۲۶/۷، ۲۰/۶، ۴۰/۶ و ۲۵/۴ درصد افزایش نشان می‌دهد. این شرایط برای فصول بهار که میانگین بارش آن ۱۲۲/۶ میلی متر است حدود تغییرات آن به ترتیب سناریو ۱۷/۶، ۲۲/۵، ۱۴/۳ و ۲۵/۹ درصد کاهشی خواهد بود. برای فصول تابستان که متوسط بارش آن ۲۲/۴ میلی متر است روند کاهشی به میزان ۱۴/۳، ۲۶/۸، ۹/۴ و ۳۰/۴ درصد می باشد. در فصول پاییز در دوه شبیه سازی شده با در نظر گرفتن متوسط بارش این فصل (۵۸/۹ میلی متر)، به ترتیب تغییرات ۲/۴- ، ۳/۶- ، ۳/۱ و ۸/۷ درصد پیش بینی می شود که تغییرات چشمگیری نبوده و در حدود وضعیت نرمال می باشد.

بررسی روند تغییرات سالانه نشان می دهد که میانگین دوره شبیه سازی شده برای بازه (۲۱۰۰-۲۰۱۵) نسبت به دوره مشاهداتی (۲۰۱۴-۱۹۷۹)، طی سناریوی SSP1-2.6 و SSP3-7.0 به ترتیب ۱ ، ۷/۹ درصد افزایشی و برای سناریوهای SSP2.4-5 و SSP5-8.5 به ترتیب ۴/۳- و ۱/۸- درصد کاهشی خواهد بود. این در حالی است که میانگین بارش دوره مشاهداتی حدود ۲۵۵/۲ میلی متر محاسبه شده است. بر اساس نمودار (شماره ۵)، در دو دوره تفکیک شده مشاهداتی (۲۰۱۴-۱۹۷۹) و ۲۰۷۸-۱۹۵۱ ، میانگین بارندگی از ۳۱۹ به ۲۵۵.۲ میلی متر کاهش داشته است و در حدود ۲۰ درصد کاهش دارد . با در نظر گرفتن این تغییرات، روند کاهشی بارش تبریز به طور وضوح مشاهده می شود.

بحث و نتیجه گیری

به طور کلی دقت مدل SDSM در شبیه سازی دمای بیشینه و کمینه ایستگاه تبریز از دقت بسیار خوبی برخوردار بود. دقت مدل در شبیه سازی بارش از دقت کمتری نسبت به دما برخوردار بود. مطابق یافته‌های این تحقیق دمای کمینه و

بیشینه دما در سناریوهای پیش بینی شده روند افزایشی دارند که افزایش دمای کمینه ایستگاه به طور محسوسی بر روی منابع آبی و اکوسیستم منطقه، به ویژه الگوی بارش، کاهش ذخایر برفی منطقه در فصول زمستان، افزایش نیاز آبی گیاهان، افزایش دوره های خشک و ... تأثیر گذار است. افزایش دمای بیشینه نیز منجر به تشدید اثرات گرمایش دوره‌ای و رویدادهای شدید حرارتی (دمای حدی) می‌شود که می‌تواند فشار بیشتری بر منابع آب، سلامت اکوسیستم‌ها و کارکرد زیرساخت‌ها وارد کند. این افزایش با افزایش میزان تبخیر و کاهش آب قابل دسترس از یک سو، و بالارفتن نیازهای کشاورزی و نیز تغییر در الگوی رواناب‌ها و ... بر چالش ها منطقه می افزاید و نقش منفی مخاطراتی را به دنبال دارد که خارج از مجال این تحقیق است. افزایش مصرف انرژی، تاب آوری تأسیسات زیرساختی، ماهش منابع آبی و سرانه آن، رشد آلودگی ها، از بین روفتن گونه های جانوری و گیاهی حساس، افزایش هزینه‌های تأمین آب و غذا و .... شود. بدین منظور توجه جدی به روند تغییرات پارامترهای اقلیمی باید در دستور کار قرار گرفته و رویکرد برنامه ریزی‌های صورت گرفته در راستای کاستن از چالش‌های آتی باشد.

REFRENCE

Draper, N. (1998). Applied regression analysis. McGraw-Hill. Inc .

Harpham, C., & Wilby, R. L. (2005). Multi-site downscaling of heavy daily precipitation occurrence and amounts. journal of hydrology, 312(1-4), 235-255 .

Helmi, M., Zeraati Neyshabouri ,S., Amirabadizadeh, M., & Yaghoobzadeh, M. (2024). Evaluation of SDSM, LARS-WG, and ANN Methods in Down scaling of Temperature and Precipitation for Two Different Climates. Journal of Drought and Climate change Research, 1(4), 105-118 .

https://climate-scenarios.canada.ca/. The ensemble of daily predictor variables developed from the CanESM2 CMIP5 experiments. https://climate-scenarios.canada.ca/?page=canesm2-predictor-notes

IPCC, C., Climate. (2001). Climate change. Synth. Rep .

IPCC, F. A. R. (2" .(۰۱۳Fifth Assessment Report (AR5): Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance
Climate Change Adaptation (SREX)". Cambridge University Press. http://www.ipcc.ch/report/ar5

Khan, N., Shahid, S., Ahmed, K., Ismail, T., Nawaz, N., & Son, M. (2018). Performance assessment of general circulation model in simulating daily precipitation and temperature using multiple gridded datasets. Water, 10(12), 1793 .

Lane, M. E., Kirshen, P. H., & Vogel, R. M. (1999). Indicators of impacts of global climate change on US water resources. Journal of Water Resources Planning and Management, 125(4), 194-204 .

Mitchell, T. D. (2003). Pattern scaling: an examination of the accuracy of the technique for describing future climates. Climatic change, 60(3 .۲۴۲-۲۱۷ ,(

Sobhani, B., Eslahi, M., & Babaeian, I. (2015). Efficiency of statistical downscaling models of SDSM and LARS-WG in the simulation of meteorological parameters in Lake Urmia basin. Physical Geography Research, 47(4), 499-516 .

Trigo, R. M & ,.Palutikof, J. P. (2001). Precipitation scenarios over Iberia: a comparison between direct GCM output and different downscaling techniques. Journal of Climate, 14(23), 4422-4446 .

رسولی, بنفشه, م. ر., بوانی, م., دوست, خ., قرمزچشمه, & باقر. (۲۰۱۴). بررسی اثر عوامل مرفو-اقلیمی بر دقت ریز مقیاس گردانی مدل LARS-WG. مجله علوم ومهندسی آبخیزداری ایران, ۸(۲۴), ۰-۰.

سیارخلج, فر, ه., صالحی, عبداللهی, & السادات, ع. (۲۰۲۲). ادراک کشاورزان از موانع و تسهیل کننده های اجتماعی سازگاری با تغییرات آب و هوا. جامعه شناسی اقتصادی و توسعه, ۱۱(۲), ۲۵-۵۵.

فاطمه, ع., ایمان, ب., شراره, م., مرتضی, ا., & گلی, م. ل. (۲۰۱۲). ارزیابی تغییر اقلیم ایران در دهه های آینده (۲۰۲۵ تا ۲۱۰۰ میلادی) با استفاده از ریز مقیاس نمایی داده‌های مدل گردش عمومی جو.

کاظمی, ا., حسینی, س., & پور, ب. (۲۰۱۹). واکاوی تاثیر تغییرات آب و هوایی بر امنیت بین المللی. فصلنامه مطالعات روابط بین الملل, ۱۲(۴۶), ۹-۳۹.

گودرزی, صلاحی, برومند, حسینی, & اسعد. (۲۰۱۹). چشم‌انداز آتی تغییرات دما و بارش با استفاده از مدل ریزگردانی SDSM در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه. فضای جغرافیایی, ۱۸(۶۴), ۴۱-۶۰.

Rainfall and Temperature Trend Analysis and SDSM-Based Scenario Projections: A Case Study from the Synoptic Station in Tabriz

Faramarzi Mohammad Hassan [1], Sari Sarraf Behrouz[2]

1- PhD Candidate in Department, University of Tabriz

2- Professor of Meteorology, University of Tabriz

* Corresponding author: Hassan.Faramarzi@tabrizu.ac.ir

Abstract

The Synoptic Station of Tabriz, like a gem within the Urmia basin and along the pathways of westerly weather systems and migrating Siberian air masses, plays a key role in understanding regional atmospheric patterns. The station’s unique geographic location and its placement at the center of three northwestern Iranian provinces reflect spatiotemporal variations in rainfall and temperature data, providing a platform to examine spatial–temporal correlations and climate-change impacts across the region.

In this study, long-term trends of precipitation and minimum and maximum temperatures at the Tabriz synoptic station were analyzed to elucidate their changes. We employed the SDSM model with station data,

applying quality control and smoothing, and used ECMWF-EA5 data, which offer high reliability, to drive model selection and predictor variables. Through calibration and bias correction, and by utilizing MPI-ESM1.2-HR outputs, we generated SSP scenario projections while accounting for uncertainties arising from GCM selection and localized downscaling factors.

Results indicate that both minimum and maximum temperatures at the Tabriz station exhibit upward trends, with more pronounced warming during the warm months. Specifically, the mean minimum temperature under SSP scenarios (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5) increases by 1.1°C, 1.4°C, 1.9°C, and 2.3°C respectively, while maximum temperatures rise by 1.4°C, 1.8°C, 2.5°C, and 2.8°C, respectively. Analysis of the simulated precipitation time series shows overall increasing trends under SSP1-2.6 and SSP3-7.0 (+1% and +8%), whereas SSP2-4.5 and SSP5-8.5 yield decreases of −0.74% and −8.1%, respectively. Seasonal precipitation trends indicate winter increases, spring decreases, and summer and autumn precipitation fluctuating toward normal ranges.

Keywords: Climate Change, Downscaling, SDSM, SSP Scenarios, Regional Climate Modelling

پایش خشکسالی کشاورزی و هواشناسی در حوضهٔ دریاچهٔ ارومیه با استفاده از شاخص‌های VCI و SPI

آمنه یحیوی دیزج[۱]، خدیجه جوان[۲]*

۱- دکترای آب‌وهواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
۲- دانشیار آب‌وهواشناسی، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم‌انسانی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول (kh.javan@urmia.ac.ir)

چکیده

خشکسالی یکی از مهم‌ترین چالش‌های جهان و ایران است که می‌تواند منجر به آسیب‌های طبیعی، انسانی و امنیت ملی در منطقه شود؛ از اینرو مطالعهٔ حاضر با هدف بررسی خشکسالی حوضه دریاچه ارومیه از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در محیط سامانه گوگل ارث انجین انجام شده است و ارزیابی شاخص شرایط پوشش گیاهی VCI از محصولات پوشش گیاهی (NDVI) سنجندهٔ مودیس ماهواره ترا حاصل شد. با استفاده از داده‌های بارش ایستگاه‌های ارومیه و تبریز در بازهٔ زمانی مذکور شاخص هواشناسی بارش استاندارد SPI در مقیاس‌های ماهانهٔ مختلف بدست آمد. طبق نتایج شاخص VCI خشکسالی شدیدی را در سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۰۲، ۲۰۰۷، ۲۰۰۹، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ در شمال‌غرب دریاچه، غرب، شرق و غرب حوضه نشان می‌دهد و در این سال‌ها خشکسالی بسیار شدید و شدید اطراف دریاچهٔ ارومیه، غرب، شرق و شمال حوضه را در برگرفته است. در نتیجه در دورهٔ مورد بررسی خشکسالی بسیار شدید افزایش قابل توجهی دارد که نشان می‌دهد میزان خشکی گیاهان در غرب، شرق و شمال‌شرقی حوضه افزایش داشته است. بر اساس نتایج حاصل از شاخص SPI در مقیاس‌های ۱، ۳، ۶ و ۱۲ ماهه، این شاخص در مقیاس‌های زمانی کوتاه‌مدت، بر خلاف مقیاس‌های زمانی بلندمدت نوسانات زیادی داشته و تداوم خشکسالی‌ها در مقیاس زمانی بلندمدت را افزایش می‌یابد. نتایج نشان داد شاخص VCI در مقایسه با شاخص SPI در مقیاس‌های ۱ و ۶ ماهه با SPI انطباق بیشتری دارند.

کلید واژه‌ها: خشکسالی، سامانه گوگل ارث انجین، شاخص VCI شاخصSPI، حوضهٔ دریاچهٔ ارومیه

مقدمه

خشکسالی یکی از مخاطرات جهانی است که می‌تواند منجر به آسیب‌های شدید اقتصادی، کشاورزی و اجتماعی شود (Shaw et al., 2017). در واقع خشکسالی‌ها به دلیل تأثیر مستقیم بر توسعه اقتصادی- اجتماعی و تخریب محیط‌زیست نقش برجسته‌تری دارند؛ بر همین مبنا درک خشکسالی برای برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آبی مهم است (Yilmaz, 2019) که به عنوان یک مخاطره طبیعی و یک فاجعه زیست‌محیطی شناخته شده است و در دهه‌های اخیر در سراسر جهان تأثیرات گسترده‌ای ایجاد کرده است (شمسی‌پور و رودگرصفاری، ۱۳۹۹).

مروری بر تحقیقات انجام گرفته در زمینهٔ خشکسالی در مناطق مختلف جهان، اهمیت و ضرورت این مخاطره را آشکار می‌سازد و بیانگر این است که این مخاطره از مهم‌ترین چالش‌های اخیر جهان و ایران به شمار رفته که شناخت نحوهٔ وقوع و پیامدهای آن در پایش و راه‌های بازسازی با این پدیده از اهمیت بالایی برخوردار است. همانطور که بیان شد مطالعات متعددی به اقتضاء اهمیت موضوع در نقاط مختلف دنیا و همچنین ایران صورت گرفته است و روش‌های مختلفی برای تحلیل خشکسالی و ارزیابی اثرات آن در فعالیت‌های مختلف انسانی و منابع طبیعی بکار گرفته می‌شود از جمله روش‌هایی که مورد توجه بسیاری قرار گرفته، روش‌های سنجش از دور می‌باشد؛ به عنوان مثال در چهار دههٔ اخیر سنجش از دور، ابزار پایش خشکسالی را به صورت وسیع و گسترده فراهم آورده و مدل‌های پایش خشکسالی زیادی را ارائه کرده است که عموماً بر پایه شاخص‌های گیاهی و بخصوص شاخص نرمال شده تغییرات پوشش گیاهی(NDVI)، امروزه به دلیل در دسترس قرار گرفتن تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مناسب، کمک فراوانی به تهیه انواع نقشه‌های موضوعی شده است. وجود این داده‌ها به همراه توسعهٔ استخراج و طبقه‌بندی اراضی موجب شده تا محققان مختلف بتوانند مطالعات مربوط به کاربری اراضی را انجام دهند (Zhang et al, 2018 ; Sun et al, 2019 ; Wu, 2019). در این میان یکی از بسترهای جدید استفاده از سامانه گوگل ارث انجین است که در تحقیق حاضر نیز به آن پرداخته شده است. تصاویر در محیط سامانه گوگل ارث انجین (GEE)، این سامانه تصاویر را به صورت بازتاب زمینی در اختیار قرار می‌دهد. این امر سبب بهبود ویژگی‌های تصویر و استخراج بهتر عوارض از آن‌ها می‌شود (Wahab and Shafri, 2020)، در نتیجه بسته به اهمیت موضوع روش‌های مختلفی برای پایش خشکسالی بکار گرفته می‌شود.

یکی از شاخص‌های پایش خشکسالی شاخص SPI است که در تحقیق حاضر نیز مورد استفاده قرار گرفته است. شاخص خشکسالی SPI به عنوان مناسبترین شاخص خشکسالی در کاهش میزان عدم‌قطعیت است. انتخاب مناسب شاخص خشکسالی در تحلیل احتمالات توأم خشکسالی می‌تواند از اهمیت بالایی برخوردار باشد (Montaseri and Amirataee, 2017)؛ برای مثال لین و همکاران در سال ۲۰۲۰ برای ارزیابی و مقایسه وضعیت خشکسالی در دوره‌های گذشته و آینده از سه مدل از سری مدل‌های CMIP5 و شاخص‌های SPI و شاخص رطوبت (HI) استفاده کردند. نتایج نشان داد که در دوره پایه هر دو شاخص، روند افزایشی یا کاهشی یکسانی را نشان می‌دهند؛ ولی در دورهٔ آینده، شاخص SPI افزایش رطوبت و شاخص HI افزایش خشکسالی را نشان می‌دهند (Lin, 2020).

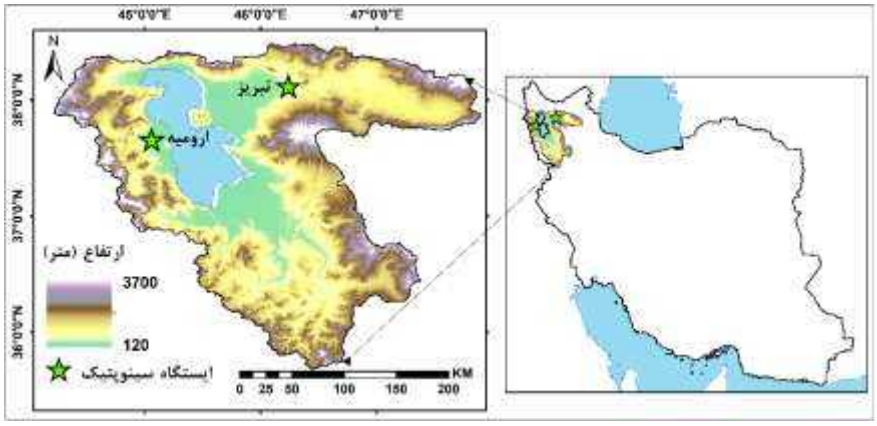
در ایران نیز محققان زیادی از شاخص‌های خشکسالی سنجش از دوری و هواشناسی برای ردیابی خشکسالی‌های مناطق مختلف کشور استفاده کرده‌اند؛ به عنوان نمونه می‌توان به مطالعات میرموسوی و کریمی (۱۳۹۲)، شمسی‌پور و رودگرصفاری (۱۳۹۹) استناد کرد. شرافتی و همکاران نیز در سال ۲۰۲۰ به بررسی خشکسالی در ایران با استفاده از شاخص‌های SPI و SPEI پرداختند و به این نتیجه رسیدند که خشکسالی‌های کوتاه‌مدت (۶ ماهه و کمتر) در شمال‌غربی و شمال ایران فراوان‌تر است، در حالی که خشکسالی‌های بلندمدت (بیشتر از ۶ ماه) در جنوب، جنوب‌غربی و جنوب‌شرقی بیشتر است. به طور کلی شمال‌غربی از نظر شدت، مدت و اوج، بیشتر در معرض خشکسالی قرار داد (Sharafati et al, 2020). از سویی دیگر آثار پدیدهٔ خشکسالی بر روی پوشش گیاهی به صورت تدریجی ظاهر می‌شود، بنابراین اگر با الگوریتمی بر میزان پوشش گیاهی از روی تصاویر ماهواره‌ای نظارت و پایش شود می‌توان با کاهش تدریجی پوشش گیاهی پدیدهٔ مخرب خشکسالی را شناسایی کرد (میرموسوی و کریمی، ۱۳۹۲). علاوه بر موارد فوق جوان (۱۳۹۹) به بررسی خشکسالی هواشناسی ایستگاه ارومیه با استفاده از شاخص SPI تحت سناریوی نغییر اقلیم (RCP) پرداخت و نتیجه‌ای که از مطالعه ایشان حاصل شد نشان داد که بر اساس نتایج شاخص SPI در بررسی شرایط خشکسالی دورهٔ ۲۰۰۵-۱۹۸۶، با افزایش مقیاس زمانی، از شدت خشکسالی‌ها کاسته شده و تداوم آنها افزایش می‌یابد (جوان، ۱۳۹۹).

گر چه خشکسالی پدیده‌ای است که در مناطق مختلف اقلیمی اتفاق می‌افتد، آثار آن در برخی مناطق زیان‌بارتر خواهد بود. در این رابطه کوگان در سال ۱۹۵۵ برای اولین‌بار شاخص VCI را پیشنهاد داد (Kogan, 1995). با توجه به موقعیت حوضهٔ دریاچه ارومیه و معضل کاهش تراز آب آن به طور پیاپی در سال‌های اخیر و با توجه به اینکه پهنه وسیع دریاچه ارومیه به تعدیل میکروکلیمای منطقه کمک کرده و آن را مناسب کشاورزی ساخته است. آب مورد نیاز دریاچه از طریق ۱۴ رودخانه دائمی تأمین می‌شود و برای حفظ تراز آبی دریاچه سالیانه حداقل حدود ۳/۱ میلیارد مکعب آب مورد نیاز خواهد بود. طی دو دههٔ گذشته فعالیت‌های انسانی غیرپایدار فشارهای فزاینده‌ای را بر منابع طبیعی حوضهٔ دریاچهٔ ارومیه اعمال نموده و دوره‌های خشکسالی اخیر باعث وخیم‌تر شدن اوضاع شده است (فنی، ۱۳۹۶). با توجه به اینکه جمعیت انسانی زیادی در حوضهٔ دریاچه ارومیه زندگی می‌کنند و معیشت سکونتگاه‌های استان‌های آذربایجان‌غربی و آذربایجان‌شرقی بیشتر بر کشاورزی استوار است، در صورت خشک شدن کامل دریاچه و وقوع بحران‌های زیست‌محیطی و اکولوژیکی اقتصاد این منطقه با مشکلات بزرگی روبه‌رو خواهد شد؛ علاوه‌براین کاهش آب‌های سطحی و زیرزمینی می‌توانند منبع و منشاء آسیب‌های طبیعی و انسانی باشند که این مسئله منجر به خطر افتادن حیات در منطقه و کاهش امنیت ملی خواهد شد (فنی، ۱۳۹۶). با توجه به ضرورت انجام تحقیق حاضر در این منطقه، هدف اصلی این مطالعه پایش خشکسالی‌های کشاورزی و هواشناسی حوضهٔ دریاچهٔ ارومیه با استفاده از شاخص‌های VCI و SPI می‌باشد.

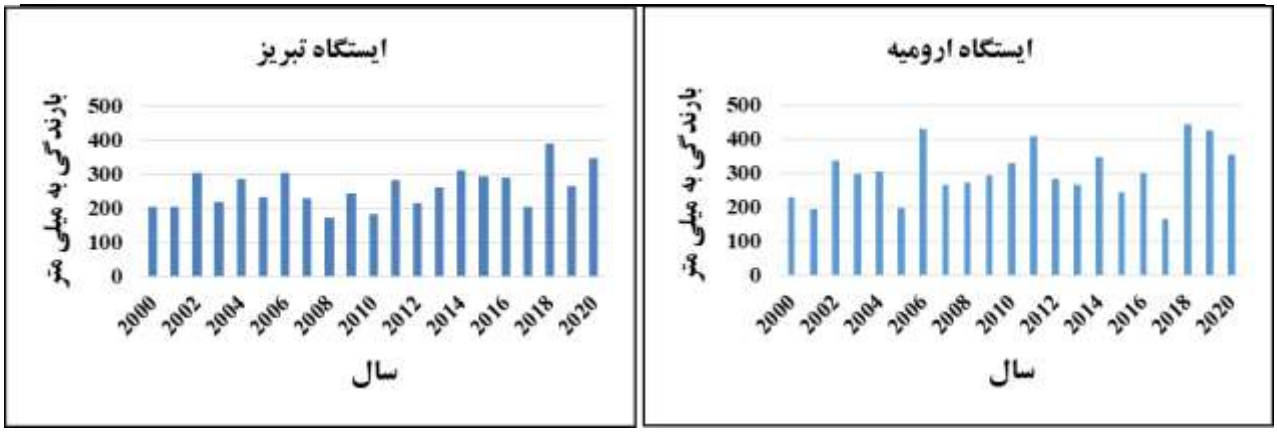
داده‌ها و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضهٔ آبریز دریاچهٔ ارومیه با وسعت حدود ۵۱۸۷۶ کیلومتر مربع بین مختصات ۳۵ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۳۸ درجه تا ۳۰ دقیقه عرض شمالی و ۴۴ درجه و ۱۴ دقیقه تا ۴۷ درجه و ۵۳ دقیقه طول شرقی و در شمال‌غربی ایران قرار گرفته است (شکل ۱). تغییرات بارندگی در حوضه ۲۲۰ تا ۴۵۰ میلی‌متر و متوسط بارش ۳۱۰ میلی‌متر است و از مناطق مرکزی حوضه به سمت مناطق مرتفع پیرامونی بر مقدار بارندگی افزوده می‌شود. در این حوضه مقدار بارندگی در طی چهار دهه (۲۰۰۵-۱۹۶۴) به طور میانگین ۹/۲٪ کاهش یافته است و متوسط دمای حداکثر حدود ۰/۸ درجه سلسیوس افزایش یافته است (دلجو، ۲۰۱۳). از مهم‌ترین عوارض توپوگرافی این منطقه می‌توان به وجود کوهستان سهند و امتداد رشته کوه زاگرس در غرب دریاچهٔ ارومیه اشاره کرد. جلگهٔ ارومیه و دشت‌های تبریز و سراب، مهم‌ترین مناطق پست این محدوده را تشکیل می‌دهند. حوضهٔ آبریز این دریاچه با داشتن دشت‌هایی مانند تبریز، ارومیه، بناب، مهاباد، میاندوآب، نقده، سلماس، پیرانشهر، آذرشهر و اشنویه، یکی از کانون‌های ارزشمند فعالیت کشاورزی و دامداری در ایران به شمار می‌رود. باتوجه به بارندگی‌هایی که در ایستگاه‌های ارومیه و تبریز ثبت شده است (شکل ۲)، در حال حاضر یکی از معضلات مهم این منطقه کاهش تراز آب دریاچهٔ ارومیه به‌طور پیاپی در سال‌های اخیر است که به نظر می‌رسد علاوه بر ساخت سدهای متعدد و گسترش باغات و کشاورزی، تغییر اقلیم نیز در آن مؤثر است (خزایی و همکاران، ۲۰۱۹). از این‌رو بررسی تغییرات اقلیمی و رخداد خشکسالی به ویژه در محدودهٔ مورد نظر که به یک بحران محیطی تبدیل شده (آقاکوچک و همکاران، ۲۰۱۵) ضرورت پیدا نموده است.



شکل ۱- موقعیت منطقهٔ مورد مطالعه



شکل ۲- نمودارهای بارندگی در ایستگاه‌های ارومیه و تبریز طی دوره زمانی مورد مطالعه

روش تحقیق

در تحقیق حاضر از داده‌های سنجندۀ مودیس، ماهوارۀ ترا به منظور پایش خشکسالی کشاورزی حوضۀ آبریز دریاچۀ ارومیه و داده‌های مشاهداتی هواشناسی مورد استفاده قرار گرفت. شاخص‌های شرایط پوشش گیاهی (VCI) با استفاده از داده‌های سنجندۀ مودیس قابل محاسبه است؛ به همین منظور در این تحقیق برای تهیۀ نقشۀ شاخص شرایط پوشش گیاهی (VCI) از یک روش نوین در پردازش تصاویر ماهواره‌ای از طریق سامانه گوگل ارث انجین استفاده شد. با توجه به اینکه یکی از اهداف پژوهش حاضر پایش پوشش گیاهی متأثر از تغییرات آب‌وهوایی و استرس حرارتی مربوط به دماست، موارد زیر مورد استفاده و بررسی قرار گرفت. در شاخص VCI مقادیر پیکسل‌ها مابین ۰ تا ۱۰۰ ارزش‌گذاری شده است، به طوری که اگر مقادیر این شاخص به صفر نزدیک شود نشان دهندۀ وقوع خشکسالی شدید است و وجود مقادیر نزدیک به ۵۰٪ بیانگر شرایط نرمال بوده و چنانچه این ارزش‌ها به ۱۰۰ درصد نزدیک شوند، نشان دهندۀ سلامت پوشش گیاهی و شرایط بدون خشکی است (Thenkabail., et al 2004). به طور کلی مقادیر بالاتر و نزدیک به ۱۰۰ بیانگر وجود رطوبت بیشتر در پوشش گیاهی و وضعیت بهتری بوده و ارزش‌های پایین‌تر بیانگر وضعیت نامطلوب است؛ به بیان دیگر شاخص VCI گویای تغییرات میزان رطوبت گیاه است که کاهش مقادیر این شاخص در زمین‌های زراعی طی بازۀ زمانی طولانی، نشان دهندۀ کاهش رطوبت گیاهان است. بر اساس این شاخص، اگر در بلندمدت میزان رطوبت گیاهان در زمین‌های زراعی کاهش یابد بدین معنی است که در آن منطقه خشکسالی رخ داده است (احراری، ۱۳۹۹).

شاخص VCI

فرآوردۀ مودیس مورد استفاده در این پژوهش برای VCI، MOD11A2 است که دربردارندۀ پوشش گیاهی با قدرت تفکیک مکانی ۲۵۰ متر و زمانی ۱۶ روزه است. از آنجایی که سامانه گوگل ارث انجین محصولات متنوعی از پوشش گیاهی سنجندۀ مودیس را پشتیبانی می‌کند، به منظور بررسی پوشش گیاهی، تصاویر سنجندۀ مودیس وارد گوگل ارث انجین شد و در

نهایت شاخص شرایط پوشش گیاهی از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ محاسبه و ضریب مقیاس، معادل ۰.۰۰۰۱ به محصولات پوشش گیاهی اعمال شد. با اعمال ضریب مذکور مقادیر واقعی انرژی گسیل شده از منطقه زمینی متناظر با پیکسل‌های تصویر (Wan, 2013) بدست آمد و بعد تصاویر مربوط به شاخص پوشش گیاهی سنجندۀ مودیس استخراج شده و مورد استفاده قرار گرفت و شاخص شرایط پوشش گیاهی محاسبه شد.شاخص VCI در رابطه (۱) قابل مشاهده است (Kogan, 2004).

$$\mathbf{VCI} = \mathbf{100} \times \frac{\boldsymbol{NDVI} - \boldsymbol{NDVI}\,\mathbf{min}}{\boldsymbol{NDVI\ max} - \boldsymbol{NDVI\ min}} \qquad (۱)$$

در رابطۀ (۱) شاخص VCI مبتنی بر سری‌های زمانی NDVI است که در آن NDVImax و NDVImin به ترتیب مقادیر حداکثر و حداقل NDVI هستند.

جدول ۱ رتبه‌بندی خشکسالی را با شاخص VCI نشان می‌دهد.

در این تحقیق از تصاویر سامانۀ گوگل ارث انجین استفاده شده است. تصاویری که سامانه گوگل ارث انجین از آن‌ها استفاده می‌کند، پیش‌پردازش‌ها و تصحیحات اولیه (هندسی، رادیومتریکی و غیره) نیازی ندارند و به صورت آماده برای پردازش عرضه شده‌اند. این سامانه مبتنی بر کدنویسی جاوا بوده و با دسترسی به اینترنت امکان استفاده از آن فراهم می‌شود و در اواخر سال ۲۰۱۰ تأسیس شده است (Gorelick et al., 2017).

جدول ۱- رتبه‌بندی خشکسالی بر اساس شاخص VCI

رتبه‌بندی خشکسالی	VCI
خشکسالی بسیار شدید	پایین‌تر از ۱۰
خشکسالی شدید	۱۰ تا ۱۹/۹
خشکسالی متوسط	۲۰ تا ۲۹/۹
خشکسالی خفیف	۳۰ تا ۳۹/۹
غیر خشکسالی	۴۰ و بالاتر

شاخص SPI

در تحقیق حاضر علاوه بر بررسی ارتباط شاخص سنجش از دوری (VCI) از شاخص استاندارد شده بارش (SPI) نیز استفاده شد. در این مطالعه ایستگاه سینوپتیک ارومیه و تبریز با داشتن داده‌های بارش روزانه از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ در حوضهٔ آبریز دریاچهٔ ارومیه مورد بررسی قرار گرفتند، سپس به بارش ماهانه تبدیل شدند و شاخص خشکسالی SPI در دوره‌های زمانی مورد مطالعه و در مقیاس‌های زمانی ۱، ۳، ۶ و ۱۲ ماهه بر آورد شد. شاخص SPI را در سال ۱۹۹۳ مرکز ملی کلرادو و مرکز ملی کاهش خشکسالی ایالات متحدهٔ آمریکا به منظور تعریف و پایش وضعیت فعلی خشکسالی معرفی کردند. این شاخص بر اساس استانداردسازی احتمال بارش‌های ثبت شده در ایستگاه‌های هواشناسی در دوره‌های زمانی متفاوت محاسبه می‌شود (McKee, 1993). این شاخص برای کمی کردن کمبود بارش یا میزان خشکسالی در بازه‌های زمانی چندگانه (۳، ۶، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه) طراحی شده است که از بین شاخص‌های کمی در تحلیل خشکسالی، شاخص SPI به علت سادگی محاسبات، استفاده از داده‌های قابل دسترس بارندگی، قابلیت محاسبه برای دوره‌های متفاوت زمانی و همچنین مقیاس‌های مکانی مختلف، به عنوان شاخص مناسب برای تحلیل خشکسالی مقبولیت جهانی یافته است. این شاخص بر اساس تفاوت بارش از میانگین برای یک مقیاس زمانی مشخص و سپس تقسیم آن بر انحراف معیار به دست می‌آید و تنها فاکتور مؤثر در محاسبه این شاخص، بارندگی می‌باشد (McKee., et al, 1993). مقادیر شاخص SPI از رابطه (۲) برآورد می‌شود.

$$SPI = \frac{P! - \overline{P}}{S} \qquad (۲)$$

در رابطهٔ (۲) P! مقدار بارش در دوره مدنظر، $\overline{P}$ میانگین بلندمدت بارش در دورهٔ مورد بررسی و S انحراف معیار مقادیر بارش در دورهٔ مورد مطالعه است. در مطالعهٔ حاضر از سری زمانی مجموعه داده‌های SPI با استفاده از داده‌های بارندگی ایستگاه ارومیه و تبریز واقع در حوضهٔ آبریز دریاچهٔ ارومیه در طول دورهٔ ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ استفاده شده است. در جدول ۲ رتبه‌بندی خشکسالی و ترسالی بر اساس شاخص SPI نشان داده شده است.

جدول ۲- رتبه‌بندی خشکسالی و ترسالی بر اساس شاخص SPI (مک کی و همکاران، ۱۹۹۵)

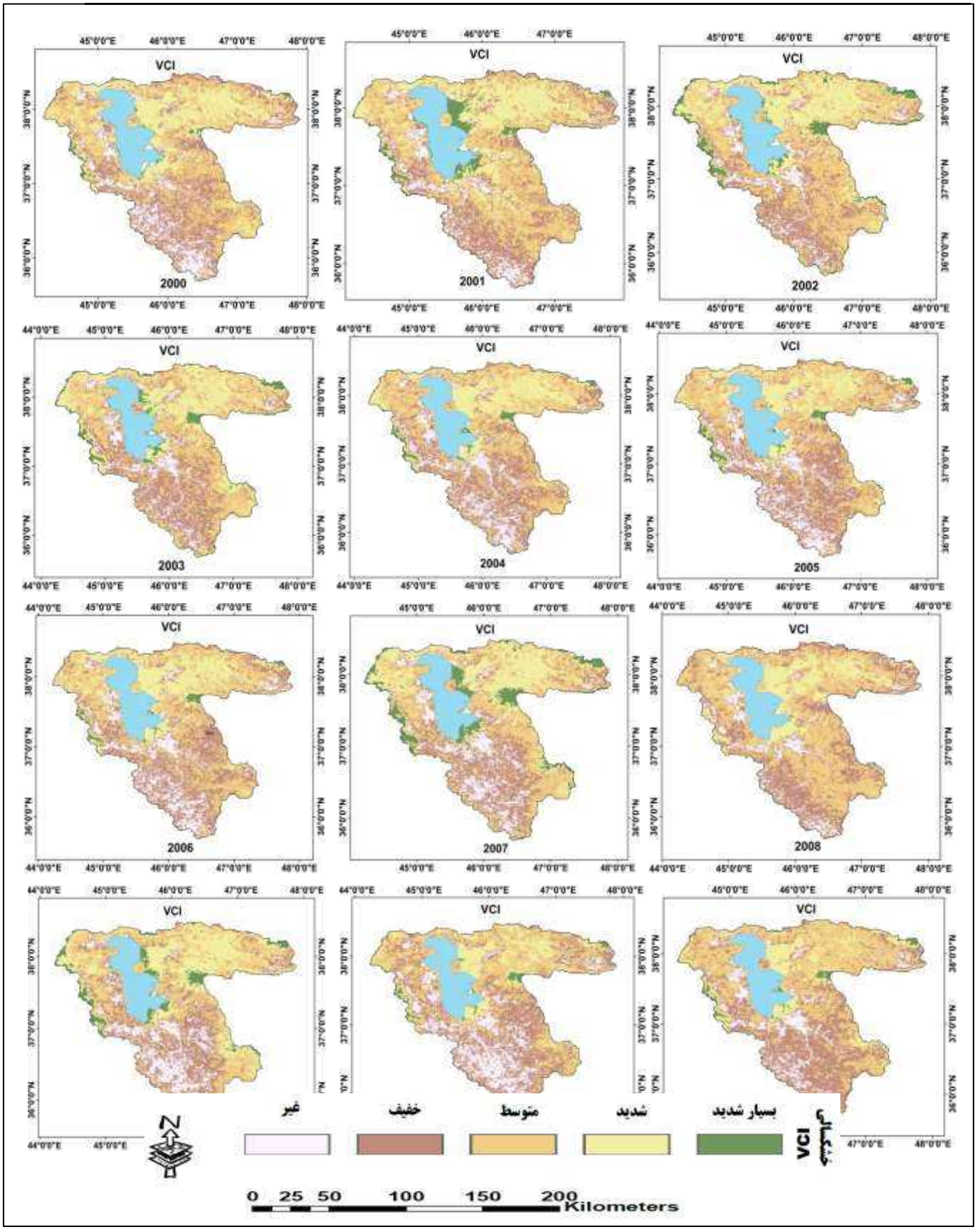
رتبه‌بندی خشکسالی	مقادیر شاخص SPI
ترسالی خیلی شدید	۲ و بالاتر
ترسالی شدید	۱/۵۰ تا ۱/۹۹
ترسالی خفیف	۱/۰۰ تا ۱/۴۹

نرمال	۰/۹۹ تا ۰/۹۹-
خشکسالی خفیف	۱/۰۰- تا ۱/۴۹-
خشکسالی شدید	۱/۵۰ - تا ۱/۹۹-
خشکسالی خیلی شدید	۲/۰۰- و پایین‌تر

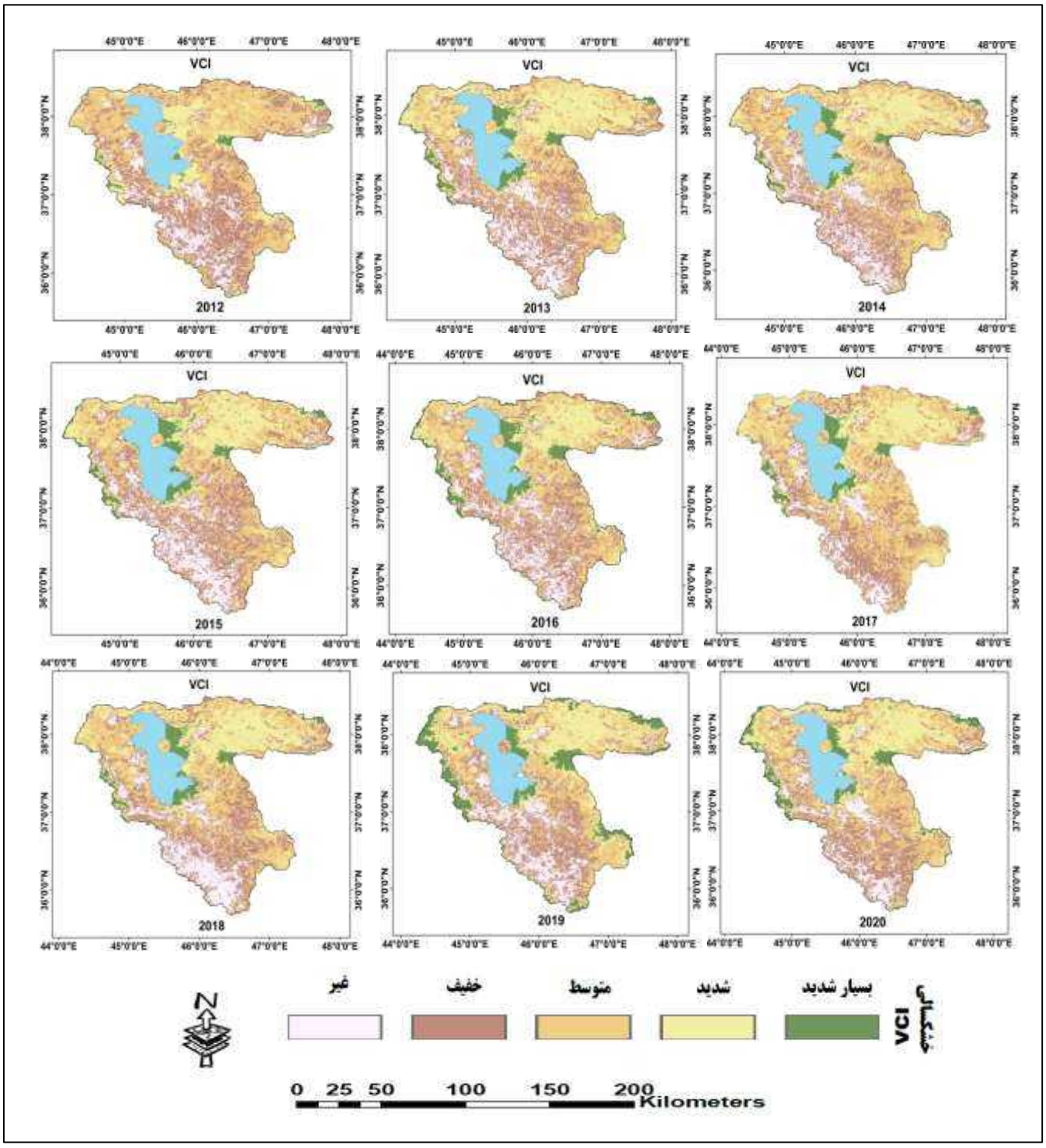
یافته‌ها و نتایج

پایش خشکسالی با شاخص VCI

یافته‌های تحقیق حاضر که با استفاده از کدنویسی در محیط سامانه گوگل ارث انجین و فراخوانی تصاویر ماهواره‌ای حاصل شده است، یکی از پرکاربردترین شاخص‌های خشکسالی (VCI) را در حوضهٔ دریاچهٔ ارومیه در دورهٔ آماری مورد بررسی نشان می‌دهد. با توجه به اینکه در این پژوهش شرایط پوشش گیاهی به کمک شاخص VCI بیان شده است، نقشه‌های خشکسالی حاصل از شاخص VCI به دست آمده از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۱ در شکل ۳ نشان داده شده است و نقشه‌های شاخص VCI مربوط به سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۰ نیز در شکل ۴ قابل مشاهده می‌باشد. با توجه به شکل ۳ می‌توان بیان کرد که طبقهٔ بحرانی یا خشکسالی شدید در سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۰۲، ۲۰۰۷ و ۲۰۰۹ به ترتیب در شمال‌غرب و غرب دریاچه، شرق و غرب حوضهٔ دریاچهٔ ارومیه را پوشش داده است و این وضعیت بیانگر کاهش رطوبت گیاهان و همچنین شرایط نامناسب وضعیت پوشش گیاهی و خشکسالی در این سال‌هاست. پس از آن در همین سال‌ها مناطق شمالی حوضهٔ دریاچه، خشکسالی شدید را نشان می‌دهد؛ در مقابل کمترین میزان خشکسالی در دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۱ در سال ۲۰۰۰ مشاهده می‌شود که دلایل آن را باید در بین عوامل مختلف تأثیرگذار جستجو کرد. علاوه بر سال‌های مذکور در سایر سال‌ها نیز کم و بیش شاهد خشکسالی شدید در منطقه هستیم با این تفاوت که نسبت به سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۰۲، ۲۰۰۷ و ۲۰۰۹ وسعت کمتری از منطقه را به خود اختصاص داده‌اند. شکل شمارهٔ ۴ که شاخص VCI را در سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۰ نشان می‌دهد حاکی از آن است که به طور کلی در این سال‌ها نسبت به سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۱ خشکسالی افزایش یافته است و در این بین بیش‌ترین میزان آن را سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ به خود اختصاص داده‌اند که به ترتیب در این سال‌ها خشکسالی بسیار شدید و خشکسالی شدید اطراف دریاچه ارومیه، غرب، شرق و شمال حوضهٔ دریاچه را در بر گرفته است و نشان دهندهٔ کمترین میزان رطوبت پوشش گیاهی هستند. از جمله دلایل آن می‌توان به عوامل انسانی تأثیرگذار در سال‌های متمادی و عوامل فرامنطقه‌ای مانند تغییرات اقلیم و غیره نیز نسبت داد. در دورهٔ نامبرده کمترین میزان خشکسالی مربوط به سال ۲۰۱۲ است. با این وجود بررسی خروجی‌های تصاویر ماهواره‌ای و همچنین شاخص‌های تولید شده حاکی از افزایش خشکسالی در این دوره آماری بصورت صعودی بویژه در سال‌های اخیر هستند.


VCI
2000
2001
2002
2003
2004
2005
2006
2007
2008
N
غیر
خفیف
متوسط
شدید
بسیار شدید
خشکسالی VCI
0 25 50 100 150 200
Kilometers

شکل ۳- وضعیت خشکسالی بر اساس شاخص Vegetation Condition Index 2000-2011 از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۱

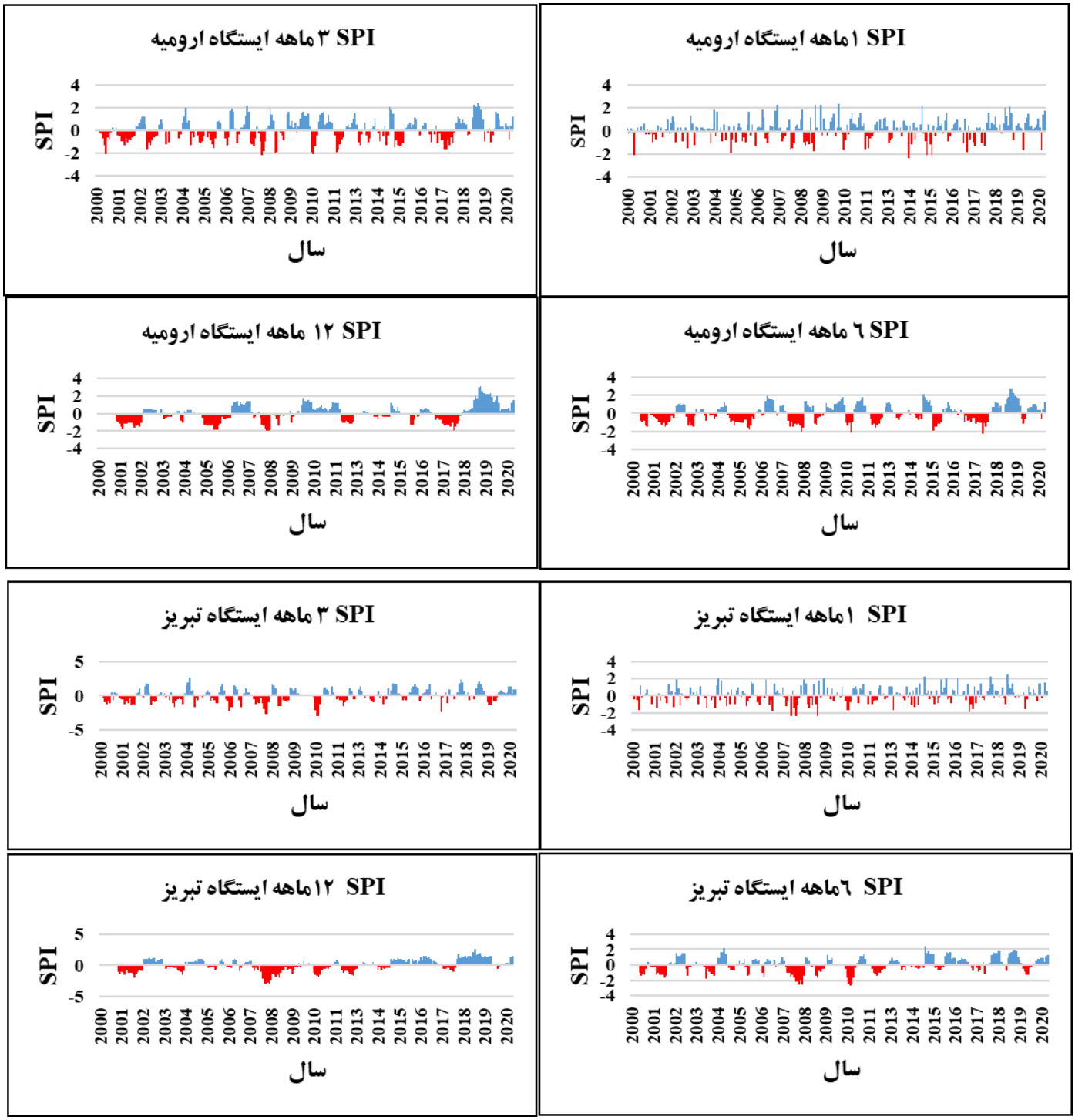


شکل ۴- وضعیت خشکسالی بر اساس شاخص Vegetation Condition Index 2000-2011 از سال ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۰

بررسی ارتباط شاخص VCI با شاخص بارش استاندارد SPI

نتایج حاصل از محاسبه شاخص SPI در ایستگاه‌های سینوپتیک ارومیه و تبریز در شکل ۵ ارائه شده است که می‌توان تغییرات زمانی شاخص بارش استاندارد را در این ایستگاه‌ها مشاهده کرد. بر اساس یافته‌های تحقیق، همانطور که در شکل ۵ قابل مشاهده است، مشخص شد که در مقیاس‌های ۱، ۳، ۶ و ۱۲ ماهه ایستگاه‌های مورد بررسی شدت‌های متفاوت خشکسالی را در دورهٔ آماری مورد نظر (۲۰۲۰-۲۰۰۰) تجربه کرده‌اند. بررسی SPI یک ماهه در دوره و ایستگاه‌های مورد نظر نشان می‌دهد که در هر دو ایستگاه در سال ۲۰۰۰ خشکسالی بسیار شدید بوده است و سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۰۲، ۲۰۰۴، ۲۰۰۵، ۲۰۰۶، ۲۰۰۷، ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹ هر دو ایستگاه، خشکسالی شدید داشته‌اند و ایستگاه‌های مذکور در سال ۲۰۱۴ نیز خشکسالی شدید داشته‌اند؛ همچنین در این ایستگاه‌ها در سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۱۹ خشکسالی شدید مشاهده شده است. یافته‌ها نشان می‌دهند که در SPI یک ماهه تغییرات بیشتری وجود دارد و نشانگر آن است که شاخص SPI در کوتاه‌مدت حساسیت بیشتری به تغییرات شرایط رطوبتی دارد. SPI سه ماهه شرایط رطوبتی کوتاه مدت را منعکس می‌کند و برای پایش خشکسالی‌های کوتاه‌مدت مورد استفاده قرار می‌گیرد. نتایج SPI سه ماهه در دورهٔ آماری موردنظر در ایستگاه‌های ارومیه و تبریز در سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۱، ۲۰۰۲، ۲۰۰۳، ۲۰۰۵، ۲۰۰۷، ۲۰۰۸، ۲۰۰۹ خشکسالی شدید است. در سال ۲۰۱۰ خشکسالی بسیار شدیدی را نشان می‌دهد. در سال‌های ۲۰۱۲، ۲۰۱۴، ۲۰۱۷ و ۲۰۱۹ خشکسالی شدیدی را تجربه کرده‌اند. SPI شش ماهه نیز تقریباً مانند SPI سه ماهه عمل می‌کند و برای پایش خشکسالی‌های کوتاه‌مدت استفاده می‌شود. نتایج SPI شش ماهه تحقیق حاضر در ایستگاه‌های مورد بررسی نشان داد که سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۱، ۲۰۰۲، ۲۰۰۳، ۲۰۰۵، ۲۰۰۸، ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰ خشکسالی شدیدی داشته‌اند، ولی در سال‌های ۲۰۱۱ خشکسالی بسیار شدید رخ داده است. سپس در سال‌های ۲۰۱۲، ۲۰۱۷ خشکسالی بسیار شدید و سال ۲۰۱۹ شدید است. SPI دوازده ماهه الگوهای بارندگی بلندمدت سالانه را منعکس می‌کند. در تحقیق حاضر در این مقیاس ایستگاه‌های مورد بررسی ۲۰۰۱، ۲۰۰۴، ۲۰۰۸، ۲۰۰۹ خشکسالی شدید مشاهده می‌شود. با توجه به یافته‌های تحقیق حاضر می‌توان بیان کرد که در مقیاس زمانی کوتاه‌مدت، تعداد خشکسالی‌ها زیاد ولی تداوم آنها کم است، در حالی که در مقیاس زمانی بلندمدت تعداد خشکسالی‌ها کم ولی تداوم آنها طولانی‌تر است. در اینجا فقط به مواردی که در هر دو ایستگاه (ارومیه و تبریز)، خشکسالی‌های بسیار شدید و شدید بصورت همزمان رخ داده بود اشاره شد در صورتی که در برخی از سال‌ها یکی از ایستگاه‌ها دارای خشکسالی شدید بود و در ایستگاه دیگر خشکسالی خفیف مشاهده می‌شد؛ به عنوان مثال می‌توان به سال ۲۰۰۸ اشاره کرده که در این سال در ایستگاه تبریز خشکسالی بسیار شدید در تمامی مقیاس‌ها با بارش سالانهٔ ۱۷۲ میلی‌متر رخ داده است و به طور همزمان در ایستگاه ارومیه در همین سال خشکسالی با اینکه در همهٔ مقیاس‌ها مشاهده می‌شود ولی به شدتی که در تبریز است نبوده، بارش ایستگاه ارومیه در این سال با بارش ۲۷۴ میلی‌متر مؤید این نکته است. در سایر سال‌ها هم خشکسالی ایستگاه‌های مورد بررسی در مقیاس‌های مختلف نوساناتی داشته‌اند که برای کاهش حجم مقاله به آنها اشاره‌ای نشد.

یافته‌های این بخش تحقیق مؤید نتایج حاصل از بررسی‌های سلیمانی ساردو و زارعی در سال ۱۳۹۸ می‌باشد. بر اساس مقایسهٔ هر دو شاخص به طور کلی شاخص VCI با SPI مطابقت بیشتری را نشان می‌دهد.



شکل ۵- سری زمانی شاخص SPI در ایستگاه‌های ارومیه و تبریز در مقیاس‌های زمانی ۱، ۳، ۶ و ۱۲ ماهه

نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر به منظور پایش خشکسالی‌های کشاورزی و هواشناسی حوضهٔ دریاچهٔ ارومیه طی دورهٔ آماری ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در محیط سامانه گوگل ارث انجین انجام شد. تصاویر ماهواره‌ای ترا سنجندهٔ مودیس، شامل محصولات پوشش گیاهی (NDVI) این سنجنده برای محاسبه شاخص VCI می‌باشد؛ علاوه‌براین شاخص دیگری که برای بررسی ارتباط بین شاخص‌های مبتنی بر سنجش از دور در دورهٔ مورد بررسی مورد استفاده قرار گرفت شاخص SPI است که با استفاده از داده‌های بارش ایستگاه‌های سینوپتیک ارومیه و تبریز در مقیاس‌های مختلف ماهه برای دورهٔ آماری مورد بررسی محاسبه شدند. در تحقیق حاضر بررسی خشکسالی حوضهٔ دریاچه ارومیه با استفاده از شاخص‌های VCI با تصاویر سنجندهٔ مودیس و با استفاده از فناوری نوین سامانه گوگل ارث انجین انجام شد. مطابق یافته‌ها شاخص VCI خشکسالی شدید در سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۰۲، ۲۰۰۷ و ۲۰۰۹ در شمال‌غرب دریاچه، غرب، شرق و غرب حوضه دارد و خشکسالی‌های شدید در سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ اطراف دریاچه، غرب، شرق و شمال حوضه را پوشش داده است. میزان بارندگی در ایستگاه ارومیه تقریباً در همین سال‌ها از مقدار کمتری نسبت به میانگین بلندمدت دورهٔ مورد بررسی برخوردار بوده است که این امر ارتباط نزدیک میزان بارندگی سالانه با نتایج حاصل از شاخص VCI را نشان می‌دهد. نتایج شاخص TCI نشان می‌دهد که سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۱ خشکسالی بسیار شدیدی در شرق، غرب و شمال حوضه تجربه کرده‌اند. با توجه به این شاخص در سال‌های ۲۰۱۲، ۲۰۱۳، ۲۰۱۴، ۲۰۱۵، ۲۰۱۷، ۲۰۱۸، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ خشکسالی بسیار شدید در غرب، شرق و شمال‌شرقی حوضه افزایش داشته است. بررسی شاخص VCI ، نشان می‌دهد که در این شاخص در سال‌های اخیر افزایش میزان خشکسالی‌های شدید مشاهده می‌شود. نتایج شاخص SPI در مقیاس یک ماهه در ایستگاه‌های ارومیه و تبریز در سال‌های ۲۰۰۱، خشکسالی شدید، ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹ خیلی شدید و در ۲۰۱۰، ۲۰۱۴ و ۲۰۱۹ خشکسالی شدید بوده است. این فرایند در مقیاس سه ماهه در سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۰۲، ۲۰۰۵، ۲۰۰۹، خشکسالی شدید و در ۲۰۱۰ و ۲۰۱۱ خیلی شدید و در ۲۰۱۷ خشکسالی شدید داشته است. در مقیاس شش ماهه، در سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۰۵ شدید و در ۲۰۰۸ خیلی شدید است. در سال‌های ۲۰۰۹ شدید و در ۲۰۱۱ خیلی شدید و در ۲۰۱۲ و ۲۰۱۹ نیز خشکسالی شدید بوده است. در نهایت در مقیاس دوازده ماهه نیز در سال‌های ۲۰۰۱ خشکسالی شدید و در ۲۰۰۸ خیلی شدید و در سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۲ خشکسالی شدید در ایستگاه‌های مورد بررسی به طور همزمان رخ داده است. بر اساس نتایج حاصل از این شاخص در مقیاس‌های زمانی کوتاه مدت (یک، سه و شش ماهه) نواسانات زیاد و در بلند مدت نوسانات کمتری دارد و تداوم خشکسالی‌ها در مقیاس زمانی بلندمدت افزایش می‌یابد. در تحقیق حاضر برآورد خشکسالی بر اساس نتایج حاصل از شاخص VCI در مقایسه با شاخص SPI در مقیاس‌های ۱، ۳، ۶ و ۱۲ ماهه مشخص گردید که شاخص‌های مزبور در مقیاس ۱ و ۶ ماهه با SPI در سال‌های وقوع خشکسالی انطباق بیشتری دارد که نتایج تحقیق حاضر با نتایج (جوان، ۱۳۹۹؛ پورخسروی، ۲۰۱۸؛ رضایی مقدم، ۱۳۹۱) همسو می‌باشد.

منابع

احراری، محمدحسین. (۱۳۹۹)، موتور مجازی پردازش تصاویر ماهواره‌ای: آموزش سامانه گوگل ارث انجین، انتشارات کلید آموزش، تهران، ص ۲۲۳.

جوان، خدیجه. (۱۴۰۰). بررسی خشکسالی هواشناسی در ایستگاه ارومیه با استفاده از شاخص SPI تحت سناریوهای تغییر اقلیم (RCP). پژوهش‌های تغییرات آب‌وهوایی. ۲(۵)، ۹۴-۸۱..

سلیمانی ساردو، مجتبی؛ زارعی، مهدی. (۱۳۹۸). پایش خشکسالی با استفاده از داده‌های سنجنده MODIS و مقایسه با شاخص هواشناسی SPI در دوره‌های کوتاه مدت (مطالعه موردی: حوزۀ آبخیز جازموریان). پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، ۱۰ (۲۰)، ۲۶۱-۲۵۰.

شمسی‌پور، علی اکبر؛ رودگرصفاری، وحید. (۱۳۹۹). بررسی پیامدهای تغییرات آب‌وهوایی با تمرکز بر تحلیل فضایی شدت خشکسالی در استان گلستان با شاخص‌های آماری و سنجش از دوری. پژوهش‌های تغییرات آب‌وهوایی، ۱ (۳)، ۷۶-۶۵. (فنی, زهره. (۱۳۹۶). بررسی اثرات خشکی دریاچه ارومیه بر آسیب‌پذیری محیط‌زیست طبیعی و انسانی ناحیه پیرامون .محیط زیست و توسعه فرابخشی، ۲(۵۸)، ۱۶-۱.

میرموسوی، سیدحسین؛ کریمی، حمیده. (۱۳۹۲). مطالعۀ اثر خشکسالی بر روی پوشش گیاهی با استفاده از تصاویر سنجندۀ مودیس مورد: استان کردستان. جغرافیا و توسعه، ۳۱، ۷۶-۵۷.

AghaKouchak, A., Norouzi, H., Madani, K., Mirchi, A., Azarderakhsh, M., Nazemi, A., ... & Hasanzadeh, E. (2015). Aral Sea syndrome desiccates Lake Urmia: call for action. Journal of Great Lakes Research, 41(1), 307-311.

Bhuiyan, C. (2008). Desert vegetation during droughts: response and sensitivity. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci, 37, 907-912.

Delju, A. H., Ceylan, A., Piguet, E., & Rebetez, M. (2013). Observed climate variability and change in Urmia Lake Basin, Iran. Theoretical and applied climatology, 111(1), 285-296.

Khazaei, B., Khatami, S., Alemohammad, S. H., Rashidi, L., Wu, C., Madani, K., ... & Aghakouchak, A. (2019). Climatic or regionally induced by humans? Tracing hydro-climatic and land-use changes to better understand the Lake Urmia tragedy. Journal of hydrology, 569, 203-217.

Kogan, F. N. (1995). Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. Advances in space research, 15(11), 91-100.

Kogan, F. N. (1995). Droughts of the late 1980s in the United States as derived from NOAA polar-orbiting satellite data. Bulletin of the American Meteorological Society, 76(5), 655-668.

Kogan, F., Stark, R., Gitelson, A., Jargalsaikhan, L., Dugrajav, C., & Tsooj, S. (2004). Derivation of pasture biomass in Mongolia from AVHRR-based vegetation health indices. International Journal of Remote Sensing, 25(14), 2889-2896.

Lin, H., Wang, J., Li, F., Xie, Y., Jiang, C., & Sun, L. (2020). Drought trends and the extreme drought frequency and characteristics under climate change based on SPI and HI in the upper and middle reaches of the Huai River Basin, China. Water, 12(4),

McKee, T. B. (1995). Drought monitoring with multiple time scales. In Proceedings of 9th Conference on Applied Climatology, Boston, 1995.
McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993, January). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology (Vol. 17, No. 22, pp. 179-183).
Montaseri, M., & Amirataee, B. (2017). Comprehensive stochastic assessment of meteorological drought indices. International Journal of Climatology, 37(2), 998-1013.
Rezaeimoghadam, M., Valizadeh Kamran, K., Rostamzadeh, H., & Rezaee, A. (2013). Evaluating the adequacy of MODIS in the assessment of drought (Case study: Urmia Lake Basin). Geography and Environmental Sustainability, 2(4), 37-52.
Sharafati, A., Nabaei, S., & Shahid, S. (2020). Spatial assessment of meteorological drought features over different climate regions in Iran. International Journal of Climatology, 40(3), 1864-1884.
Shaw, N., Zscheischler, J., Hirschi, M., Gudmundsson, L., & Seneviratne, S. I. (2017). A drought event composite analysis using satellite remote-sensing based soil moisture. Remote Sensing of Environment, 203, 216-225.
Sun, Z., Xu, R., Du, W., Wang, L., & Lu, D. (2019). High-resolution urban land mapping in China from sentinel 1A/2 imagery based on Google Earth Engine. Remote Sensing, 11(7), 752.
Thenkabail, P. S., & Gamage, M. S. D. N. (2004). The use of remote sensing data for drought assessment and monitoring in Southwest Asia (Vol. 85). Iwmi.
Wahap, N. A., & Shafri, H. Z. (2020, July). Utilization of Google earth engine (GEE) for land cover monitoring over Klang Valley, Malaysia. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 540, No. 1, p. 012003). IOP Publishing.
Wan, Z. (2013). MODIS Land Surface Temperature Products Users' Guide.Collection-6," Univ. California, St. Barbar.
Wu, M., Zhao, X., Sun, Z., & Guo, H. (2019). A hierarchical multiscale super-pixel-based classification method for extracting urban impervious surface using deep residual network from worldview-2 and LiDAR data. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 12(1), 210-222.
Yilmaz, B. (2019). Analysis of hydrological drought trends in the GAP region (southeastern Turkey) by Mann-Kendall test and innovative sen method. Appl Ecol Environ Res, 17(2), 3325-3342. DOI: http://dx.doi.org/10.15666/aeer/1702_33253342
Zhang, C., Sargent, I., Pan, X., Li, H., Gardiner, A., Hare, J., & Atkinson, P. M. (2018). An object-based convolutional neural network (OCNN) for urban land use classification. Remote sensing of environment, 216, 57-70.

Monitoring Agricultural and Meteorological Drought in the Lake Urmia Basin using VCI and SPI Indices

Ameneh Yahyavi Dizaj[1], Khadijeh Javan[2]*

1- PhD in Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University
2- Associate Prof., Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, Urmia University
* Corresponding author: kh.javan@urmia.ac.ir

Abstract

Drought is one of the most critical challenges facing the world and Iran, capable of causing natural and human damages and threatening national security in the region. Therefore, the present study was conducted to investigate drought in the Lake Urmia basin from 2000 to 2020 using satellite imagery within the Google Earth Engine platform. The Vegetation Condition Index (VCI) was evaluated based on vegetation products (NDVI) from the Terra MODIS satellite. Using precipitation data from Urmia and Tabriz stations during the mentioned period, the Standardized Precipitation Index (SPI) was obtained at various monthly scales. According to the VCI results, severe drought was observed in the years 2001, 2002, 2007, 2009, 2019, and 2020 in the northwest of the lake, as well as in the western, eastern, and western parts of the basin. In these years, extreme and severe drought affected the areas around Lake Urmia and the western, eastern, and northern parts of the basin. Consequently, during the study period, extreme drought increased significantly, indicating a rise in vegetation dryness in the western, eastern, and northeastern parts of the basin. Based on the results of the SPI at 1-, 3-, 6-, and 12-month scales, this index showed high variability in short-term scales, unlike long-term scales, and increased the persistence of droughts over long-term periods. The results indicated that the VCI index corresponds more closely with the SPI at the 1- and 6-month scales..

Keywords: Drought, Google Earth Engine, VCI, SPI, Lake Urmia Basin.

بررسی تغییرات زمانی-مکانی تبخیر-تعرق مرجع در بازه بلندمدت (مورد مطالعه: استان مازندران)

پیام نوری[۱]، فاطمه جعفری صیادی[۲] و شقایق احمدی[۱]

۱- دانشجوی کارشناسی علوم و مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.

۲- دکتری علوم و مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری.

Payam.nouri2002@gmail.com

چکیده

در سال‌های اخیر، محدودیت منابع آب و افزایش تقاضای آب، اهمیت مدیریت بهینه مصرف آب در بخش کشاورزی را دوچندان کرده است. یکی از ابزارهای کلیدی در این زمینه، برآورد دقیق تبخیر-تعرق مرجع (ET_0) است که مبنای طراحی سامانه‌های آبیاری و تخصیص منابع به‌شمار می‌رود. در این پژوهش، با استفاده از رابطه فائو-پنمن-مانتیث و داده‌های هواشناسی ایستگاه‌های سینوپتیک، مقادیر ماهیانه و سالیانه تبخیر-تعرق مرجع در استان مازندران طی دوره ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲ محاسبه شد. به‌منظور تحلیل مکانی، داده‌ها با روش درون‌یابی IDW در محیط GIS پهنه‌بندی و نقشه‌های مربوطه تهیه گردید. نتایج نشان داد که بیشترین میزان ET_0 در ماه تیر با مقدار ۳۹٫۳ میلی‌متر و کمترین مقدار آن در دی با ۶٫۶ میلی‌متر ثبت شده است. از نظر مکانی، ایستگاه ساری با میانگین ۳٫۱۷ میلی‌متر در روز، بالاترین و ایستگاه رامسر با ۲٫۳۹ میلی‌متر در روز، کمترین میانگین سالیانه را دارا بود. همچنین نقشه‌های سالانه حاکی از تمرکز مقادیر بالای تبخیر-تعرق در نواحی شرقی و مرکزی استان در مقابل مقادیر پایین‌تر در غرب استان بود. این تفاوت‌ها را می‌توان به ویژگی‌های اقلیمی، پستی‌وبلندی، پوشش گیاهی و تأثیر دریای مازندران نسبت داد. یافته‌های این تحقیق می‌تواند در تدوین تقویم‌های آبیاری منطقه‌ای و مدیریت هدفمند منابع آب به‌ویژه در نواحی با میزان تبخیر-تعرق بالا مورد استفاده قرار گیرد.

کلید واژه‌ها: فائو-پنمن-مانتیث، پهنه‌بندی اقلیمی، مدیریت آبیاری.

مقدمه

بحران آب در بسیاری از کشورها به‌عنوان یکی از چالش‌های اصلی قرن بیست‌ویکم مطرح است و مدیریت بهینه منابع آبی به دغدغه‌ای جهانی تبدیل شده است. ایران نیز به‌دلیل موقعیت جغرافیایی خاص خود در کمربند خشک و نیمه‌خشک

جهان، با محدودیت‌های شدید منابع آب روبه‌رو است (Zamani et al., 2019). در چنین شرایطی، تبخیر-تعرق مرجع (ET_0) به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های کلیدی چرخه هیدرولوژیکی در مقیاس جهانی شناخته می‌شود که تأثیر مستقیمی بر عملکرد محصولات کشاورزی، نیاز آبی، بهره‌وری منابع و برنامه‌ریزی آبیاری دارد (Zhao et al., 2023). این مشخصه نه‌تنها نقش تعیین‌کننده‌ای در برآورد نیاز آبی گیاهان دارد، بلکه در تدوین سیاست‌های کلان مدیریت منابع آب نیز از اهمیت بالایی برخوردار است (El-Kenawy et al., 2022). تبخیر-تعرق، از طریق انتقال رطوبت از سطح خاک و پوشش گیاهی به جو، یکی از اجزای حیاتی در توازن انرژی سطح زمین و مدل‌سازی چرخه آب محسوب می‌شود (Rajagopal et al., 2022). برآورد دقیق ET_0، به‌ویژه در مناطق کشاورزی، می‌تواند نقشی مؤثر در بهینه‌سازی مصرف آب، کاهش هزینه‌های انرژی و مواد شیمیایی، و پیشگیری از آلودگی‌های محیط‌زیستی ایفا کند (Huang et al., 2019).

Top of Form

Bottom of Form

Top of Form

Bottom of Form

از سوی دیگر، استفاده از برآوردهای دقیق ET_0 برای طراحی و زمان‌بندی برنامه‌های آبیاری، شرطی اساسی برای تولید پایدار و بهره‌وری حداکثری در مصرف منابع آبی محسوب می‌شود (ابراهیمی هفت‌چشمه و فرهادی بانسوله، ۱۴۰۰؛ زارع آبیانه و همکاران، ۱۳۸۹).

مطالعات متعددی به بررسی دقت روش‌های مختلف تجربی در برآورد ET_0 پرداخته‌اند. در این میان، روش فائو-پنمن-مانتیث به‌عنوان معیار مرجع شناخته شده و روش‌های دیگر نظیر بلانی-کریدل، تورنت-وایت، پنمن و هارگریوز-سامانی نسبت به آن ارزیابی شده‌اند (نادریان‌فر و همکاران، ۱۳۹۹). با توجه به محدودیت ایستگاه‌های هواشناسی و کمبود داده‌های اقلیمی در بسیاری از مناطق کشور، استفاده از روش‌های درون‌یابی مکانی برای تخمین تبخیر-تعرق مرجع پیشنهاد شده است (تافته و همکاران، ۱۳۹۹). استان مازندران با موقعیتی منحصربه‌فرد در شمال ایران، دارای تنوع اقلیمی قابل‌توجهی است به‌طوری‌که در این استان نواحی مرطوب ساحلی با ارتفاع کم تا مناطق کوهستانی با آب‌وهوای سرد و خشک مشاهده می‌شود. این تنوع اقلیمی، همراه با پراکنش نامتوازن منابع آب و کاربری گسترده کشاورزی، ضرورت تحلیل دقیق مکانی و زمانی تبخیر-تعرق در این استان را دوچندان می‌کند. بنابراین هدف پژوهش حاضر، بررسی تغییرات زمانی-مکانی تبخیر-تعرق مرجع در استان مازندران با استفاده از مدل فائو-پنمن-مانتیث و داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک طی دوره آماری ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲ و تهیه نقشه پهنه‌بندی استان است.

مواد و روش

منطقه مورد مطالعه

استان مازندران در شمال کشور، بین مدار ۳۵ درجه و ۴۷ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۳۵ دقیقه عرض شمالی و ۵۰ درجه و ۳۴ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار مبدا قرار گرفته است. این استان از شمال با دریای مازندران، از شرق با استان گلستان، از جنوب با استان‌های سمنان، تهران و قزوین، و از غرب با استان گیلان همسایه است. طول مازندران از شرق به غرب حدود ۳۳۸ کیلومتر و مساحت کل استان مازندران حدود ۲۴ کیلومترمربع است که شهرهای ساحلی، کوهستانی و جنگلی در این محدوده وجود دارد.

ایستگاه‌های هواشناسی

در پژوهش حاضر از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی سینوپتیک رامسر، نوشهر، قراخیل، بابلسر، گلوگاه، ساری و بندر امیرآباد استفاده شده است (شکل ۱). داده‌های مورد نیاز برای محاسبه تبخیر-تعرق مرجع به روش فائو-پنمن-مانتیث شامل بیشینه و کمینه دمای هوا، بیشینه و کمینه رطوبت نسبی، سرعت باد در ارتفاع ۲ متر از سطح زمین و ساعات آفتابی بود که از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲ از سازمان هواشناسی کشور دریافت شد.



شکل ۱- مشخصات ایستگاه های هواشناسی استان مازندران

محاسبه تبخیر-تعرق مرجع

به منظور محاسبه تبخیرـ تعرق مرجع در ایستگاه‌های هواشناسی استان مازندران، از روش فائو-پنمن-مانتیث مطابق با رابطه ۱ استفاده شده است.

$$\mathrm{ET}_0 = \frac{0.408\Delta(Rn - G) + \gamma\left[\frac{890}{T+273}\right]U_2(es - ea)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \qquad (۱)$$

نمادهای به‌کار رفته شده در رابطه ۱ به شرح زیر است:

ET0 : تبخیر-تعرق مرجع (میلیمتر بر روز)

Rn : تابش خالص در سطح پوشش گیاهی (مگا ژول بر مترمربع در روز)

T : متوسط دمای هوا در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین (درجه سلسیوس)

U2 :سرعت باد در ارتفاع ۲ متر از سطح زمین (متر بر ثانیه)

es :فشار بخار اشباع (کیلو پاسکال)

ea :فشار بخار واقعی (کیلو پاسکال)

es-ea :کمبود فشار بخار در ارتفاع ۲ متری (Kpa)

Δ :شیب منحنی فشار بخار (کیلو پاسکال بر درجه سلسیوس)

γ : ثابت سایکرومتریک (کیلو پاسکال بر درجه سلسیوس)

G :شار گرما به داخل خاک (مگا ژول بر مترمربع در روز)

پهنه‌بندی اقلیمی

روش‌های گوناگونی برای پهنه‌بندی بر اساس نقاط دارای اطلاعات یک مؤلفه مشخص ارائه شده است که اغلب بر مبنای درون‌یابی هستند. هدف از این روش‌ها، تعمیم اطلاعات حاصل از نقاط به سطح می‌باشد. به‌منظور این کار، نقاط مشخصی را با فواصل مناسب بر روی نقشه استان مشخص کرده تا مقدار عناصر اقلیمی را در هر نقطه برای استان اندازه‌گیری شود، تا آمار به‌دست‌آمده از نقاط را به پهنه‌ها تعمیم داده شود. این برآوردها همه پهنه را می‌پوشانند. از این‌پس مبنای همه داوری‌ها درباره اقلیم، پهنه قرار می‌گیرد و از داده‌های ایستگاه‌ها به‌عنوان شاهد برای ارزیابی درجه قطعیت نتایج تحلیل استفاده می‌شود. در این پژوهش، داده‌های نقطه‌ای فراهم‌شده از میانگین ماهانه اقلیمی روی هفت ایستگاه هواشناسی استان مازندران طی فرآیند میان‌یابی IDW به ماتریس‌هایی بر روی سراسر استان تبدیل شده و ماتریس اخیر، داده‌های پهنه را فراهم نموده است.

نتایج و بحث

در این پژوهش، میانگین تبخیر-تعرق ماهیانه و مجموع سالیانه استان مازندران با استفاده از رابطه پنمن-مانتیث-فائو محاسبه شد. بر اساس نتایج جدول ۱، بیشینه مقدار تبخیر-تعرق در ماه تیر برابر با ۳۹/۳ میلی‌متر به‌دست آمده است که

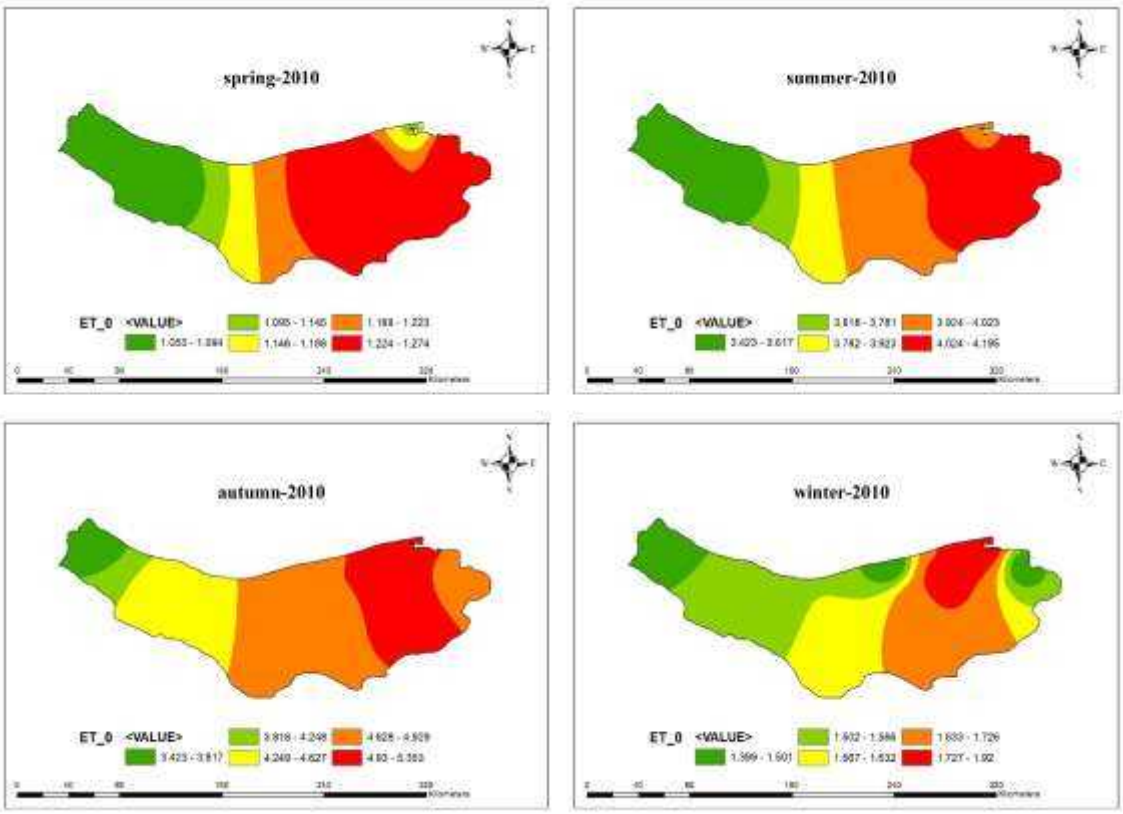
دلیل آن، افزایش ساعات آفتابی، بیشینه دمای روزانه و طولانی بودن طول روز است. درحالی‌که، کمینه مقدار تبخیر-تعرق مربوط به ماه دی با ۶/۶ میلی‌متر است که با کاهش دما، کاهش تابش خورشید و کوتاه بودن طول روز در این ماه قابل توجیه است. بررسی مکانی نشان می‌دهد که ایستگاه ساری با میانگین ۳/۱۷ میلی‌متر در روز دارای بیشترین مقدار تبخیر-تعرق بوده و ایستگاه گلوگاه با میانگین ۲/۳۹ میلی‌متر در روز کمترین مقدار را داشته است. این تفاوت مکانی را می‌توان به ویژگی‌های اقلیمی محلی، ارتفاع، پوشش گیاهی و موقعیت جغرافیایی مرتبط دانست.

جدول ۱: تبخیر-تعرق مرجع (میلیمتر بر روز) در ایستگاه های مورد مطالعه

نام ایستگاه	میانگین (میلی‌متر در روز)	مجموع سالانه (میلی‌متر)	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
رامسر	۲/۵۴	۳۰/۵۶	۳/۰۱	۴/۴۲	۴/۶۳	۴/۷۱	۳/۴۰	۲/۳۷	۱/۶۳	۱/۱۷	۱/۰۴	۰/۹۶	۱/۲۳	۱/۹۶
نوشهر	۲.۶۰	۳۱.۲۱	۳.۰۵	۴.۳۹	۴.۵۶	۴.۷۷	۳.۵۹	۲.۴۹	۱.۷۵	۱.۲۲	۱.۰۶	۰.۹۹	۱.۲۳	۲.۰۵
قراخیل	۲.۷۳	۳۲.۷۹	۳.۲۶	۴.۵۲	۴.۶۲	۴.۹۵	۴.۰۳	۲.۸۹	۱.۹۵	۱.۲۷	۱.۰۴	۰.۹۱	۱.۱۸	۲.۱۲
بندر امیرآباد	۲.۹۹	۳۵.۹۲	۴.۰۳	۵.۲۴	۵.۴۴	۵.۴۸	۳.۹۵	۲.۷۸	۱.۸۸	۱.۲۵	۱.۰۳	۰.۹۸	۱.۳۶	۲.۴۵
ساری	۳.۱۷	۳۸.۱۰	۳.۹۴	۵.۳۰	۵.۳۲	۵.۶۱	۴.۵۲	۳.۱۹	۲.۱۹	۱.۴۶	۱.۲۸	۱.۱۷	۱.۵۰	۲.۵۷
گلوگاه	۲.۳۹	۲۸.۷۱	۲.۸۶	۳.۸۸	۴.۱۰	۴.۴۲	۳.۳۶	۲.۴۳	۱.۷۳	۱.۱۷	۰.۹۴	۰.۸۶	۱.۰۶	۱.۸۵
بابلسر	۲.۵۱	۳۰.۱۵	۳.۰۳	۴.۰۹	۴.۵۶	۴.۵۴	۳.۶۶	۲.۶۲	۱.۷۵	۱.۱۹	۰.۸۵	۰.۷۶	۱.۱۳	۱.۹۴

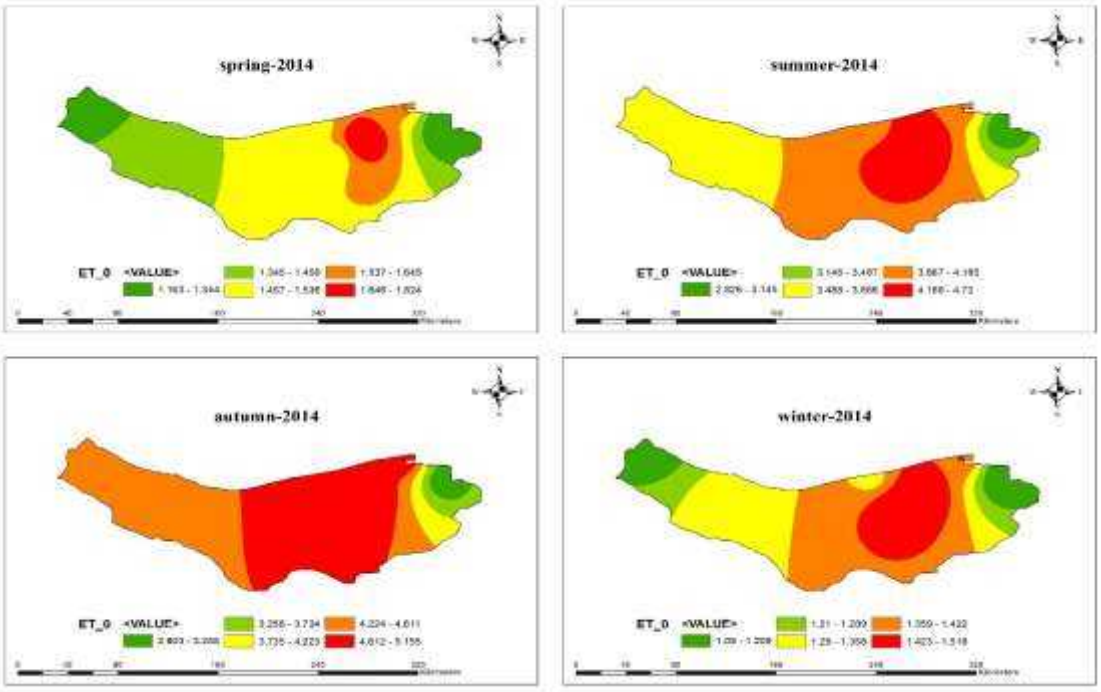
به‌منظور تحلیل مکانی دقیق‌تر، از تصاویر چهار سال ۲۰۱۰، ۲۰۱۴، ۲۰۱۸ و ۲۰۲۱ در فصول مختلف استفاده شد که شکل‌های ۲ تا ۵ به‌ترتیب، نقشه‌های مکان‌یابی تبخیر-تعرق برای این سال‌ها را در سطح استان نشان می‌دهند. مطابق با شکل‌های ۲ تا ۵ تابستان، به‌عنوان فصلی با بیشینه دمای هوا و تابش خورشیدی، بیشترین مقدار تبخیر-تعرق مرجع را داراست و تغییرات مکانی در این فصل به‌وضوح قابل مشاهده است. همچنین بررسی شکل‌ها نشان می‌دهد که در بازه زمانی

مورد مطالعه، روند کلی افزایش تبخیر-تعرق تابستانه، به‌ویژه در نواحی مرکزی و شرقی استان قابل توجه است. این مناطق که اغلب در معرض تابش مستقیم خورشید و دمای بالاتر قرار دارند، نسبت به مناطق غربی و ارتفاعات جنگلی (مانند رامسر و نوشهر)، تبخیر-تعرق بیشتری داشتند.



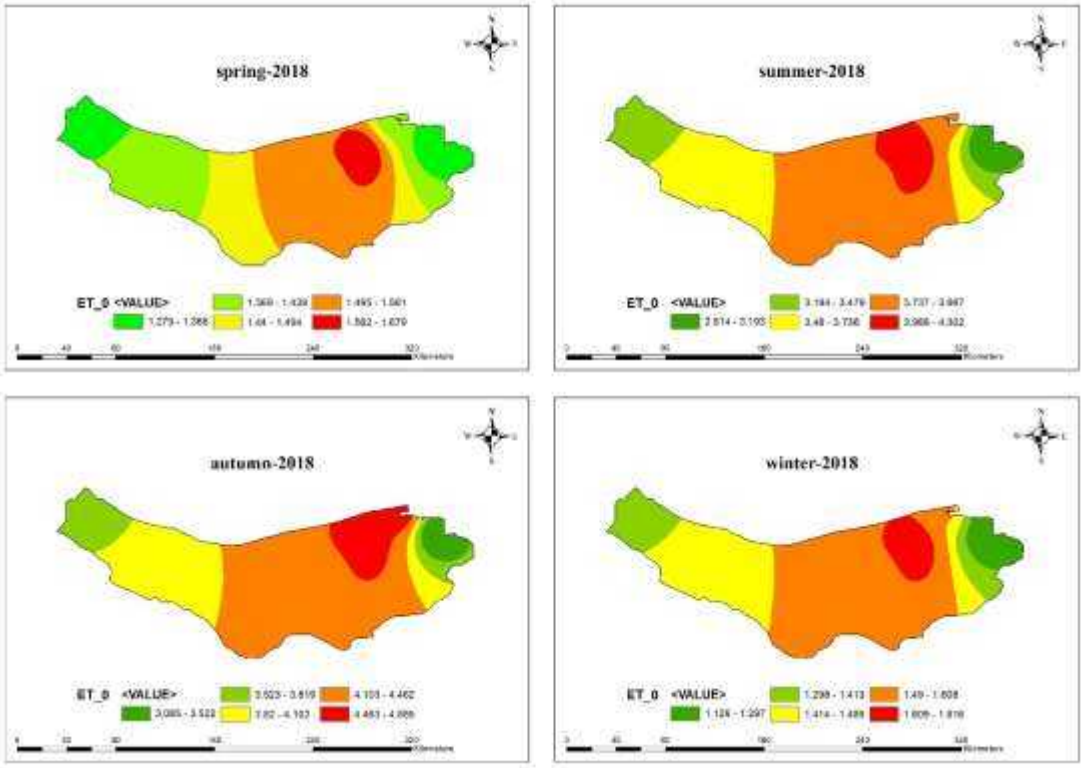
شکل ۲- نقشه درون‌یابی تبخیر-تعرق مرجع استان مازندران در سال ۲۰۱۰

مطابق شکل ۲، بیشینه تبخیر-تعرق در نواحی شرقی استان (محدوده بین بهشهر تا گلوگاه) با مقادیر بالاتر از ۴٫۰۲۵ میلی‌متر در روز متمرکز بوده است، در حالی‌که غرب استان، به‌ویژه منطقه رامسر، دارای کمترین مقادیر بوده است.



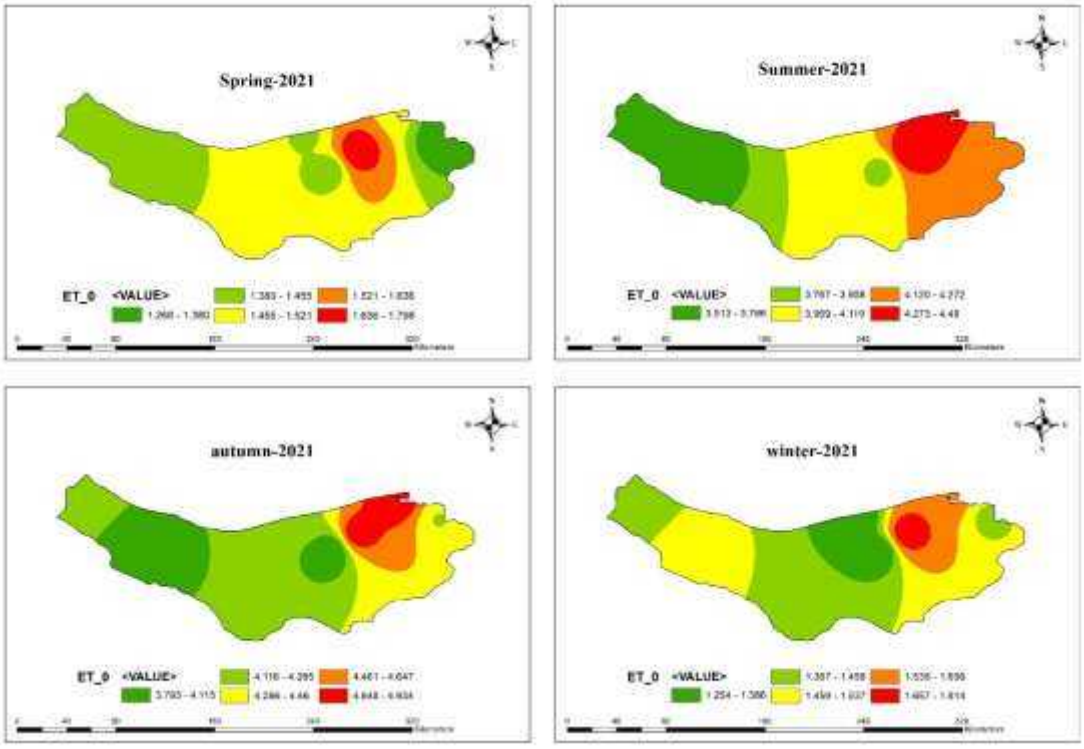
شکل ۳- نقشه درون‌یابی تبخیر-تعرق مرجع استان مازندران در سال ۲۰۱۴

با توجه به شکل ۳، تمرکز مناطق با تبخیر-تعرق بالا به ناحیه مرکزی و شرقی استان منتقل شده و نقاط قرمزرنگ با مقادیر بیش از ۴،۱۸۶ میلی‌متر در روز در این مناطق مشاهده می‌شود. همچنین نسبت به ۲۰۱۰، کاهش نسبی تبخیر-تعرق در غرب استان مشاهده می‌شود.



شکل ۴- نقشه درون‌یابی تبخیر-تعرق مرجع استان مازندران در سال ۲۰۱۸

در شکل ۴ مشاهده می‌شود که مناطق با بیشترین تبخیر و تعرق همچنان در بخش شرقی استان متمرکز است، اما یک نوار پهن با تبخیر و تعرق پایین‌تر (زرد و سبز) از غرب تا میانه استان کشیده شده که نشان‌دهنده شرایط مرطوب‌تر یا خنک‌تر آن نواحی است.



شکل ۵- نقشه درون‌یابی تبخیر-تعرق مرجع استان مازندران در سال ۲۰۲۱

مطابق با شکل ۵، شدت تبخیر-تعرق بار دیگر در شرق استان افزایش یافته و بخش‌های گسترده‌تری از مرکز و شرق به رنگ‌های نارنجی و قرمز درآمده‌اند که نشان‌دهنده مقادیر بالاتر از ۴،۲۷۳ میلی‌متر در روز است. این موضوع احتمالاً ناشی از افزایش دما یا کاهش بارش تابستانی در این سال است.

به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که طی دوره مطالعه، تمرکز مکانی تبخیر-تعرق بالا به‌صورت پایدار در نواحی شرقی استان باقی‌مانده و شدت آن نیز در سال‌های اخیر افزایش یافته است. در مقابل، مناطق غربی استان نظیر رامسر و تنکابن به‌طور مداوم مقادیر کمتری را تجربه کرده‌اند که می‌تواند ناشی از اثرات دریای مازندران، پوشش گیاهی انبوه‌تر و رطوبت نسبی بالاتر باشد.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با بهره‌گیری از روش فائو-پنمن-مانتیث و داده‌های هواشناسی ایستگاه‌های استان مازندران، میانگین تبخیر-تعرق مرجع ماهیانه و مجموع سالیانه استان طی دوره آماری ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲ برآورد و تحلیل شد. نتایج نشان داد که مقدار تبخیر-تعرق در استان از الگوی مکانی مشخصی تبعیت می‌کند، به‌گونه‌ای که نواحی شرقی به‌ویژه ایستگاه ساری با میانگین ۳،۱۷ میلی‌متر در روز بیشترین، و مناطق غربی نظیر ایستگاه رامسر با میانگین ۲،۳۹ میلی‌متر در روز کمترین مقدار

سالیانه را داشته‌اند. همچنین بررسی نقشه‌های درون‌یابی سالانه تبخیر-تعرق مرجع نشان داد که تمرکز مناطق با مقادیر بالا در شرق و مرکز استان، در طول سال‌های مورد مطالعه، روندی تقریباً پایدار و افزایشی داشته است. در مقابل، مناطق غربی مانند رامسر و تنکابن، به‌دلیل ویژگی‌های توپوگرافی، پوشش گیاهی متراکم‌تر و تاثیرات رطوبتی دریای مازندران، تبخیر-تعرق کمتری داشته‌اند. این یافته‌ها می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای بهبود برنامه‌ریزی آبیاری و مدیریت منابع آب در نواحی مختلف استان مورد استفاده قرار گیرد. به‌ویژه در مناطق شرقی استان که فشار تبخیر-تعرق بالاتر است، تدوین تقویم‌های آبیاری دقیق‌تر و بهره‌گیری از شیوه‌های نوین آبیاری می‌تواند در افزایش بهره‌وری و کاهش تلفات آبی موثر واقع شود.

مراجع

۱- ابراهیمی هفت‌چشمه، ا.، و فرهادی بانسوله، ب. (۱۴۰۰). تغییرات مکانی تبخیرتعرق مرجع در استان کرمانشاه. نشریه هواشناسی کشاورزی، ۹(۲)، ۶۱–۶۶.

۲- تافته، آ.، دواتگر، ن.، و ملاح، س. (۱۳۹۹). بررسی امکان پهنه‌بندی تبخیر–تعرق پتانسیل گیاه مرجع و نیاز آبی گیاه گندم با استفاده از روش‌های مختلف پهنه‌بندی. نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، ۱۰(۴۰)، ۲۲۹–۲۴۰.

۳- زارع آبیانه، ح.، بیات ورکشی، م.، سبزی‌پرور، ع.ا.، معروفی، ص.، و قاسمی، ع. (۱۳۸۹). ارزیابی روش‌های مختلف برآورد تبخیرتعرق گیاه مرجع و پهنه‌بندی آن در ایران. مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۷۴، ۹۵–۱۱۰.

۴- نادریان‌فر، ا.، دلبری، م.، افراسیاب، پ.، و کهخامقدم، پ. (۱۳۹۹). مقایسه فرآیندهای مختلف پهنه‌بندی تبخیرتعرق مرجع در ایران. علوم و مهندسی آبیاری، ۴۳(۳)، ۱۷–۳۱.

5- El-Kenawy, E. S. M., Khalil, A., Abutaleb, K., Almazroui, M., & Rajab, J. M. (2022). Improved weighted ensemble learning for predicting the daily reference evapotranspiration under the semi-arid climate conditions. Environmental Science and Pollution Research, 29(54), 81279–81299. https://doi.org/10.1007/s11356-022-22033-2

6- Huang, G., Hu, Y., He, Y., Zhou, J., Huang, Q., & Xu, J. (2019). Evaluation of CatBoost method for prediction of reference evapotranspiration in humid regions. Journal of Hydrology, 574, 1029–1041. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.05.013

7- Rajagopal, M., Ponnuchamy, M., & Kapoor, A. (2022). Water management for irrigation scheduling by computing evapotranspiration using ANFIS modelling. Desalination and Water Treatment, 251, 123–133. https://doi.org/10.5004/dwt.2022.28047

8- Zamani, S., Mahmoodabadi, M., Yazdanpanah, N., & Farpoor, M. H. (2019). Wind erosion potential of Kerman province using seasonal analysis of wind rose and sand rose. Journal of Water and Soil, 33(1), 83–101.

9- Zhao, B., An, D., Yan, C., Yan, H., Kong, R., & Su, J. (2023). Spatiotemporal variations of reference evapotranspiration and its climatic driving factors in Guangdong, a humid subtropical province of South China. Agronomy, 13(7), Article 1446. https://doi.org/10.3390/agronomy13071446

سومین کنفرانس ملی آب و هواشناسی ایران (با محوریت تغییر اقلیم)
The 3rd National Conference on Climatology of Iran (Focusing on Climate Change)
ارومیه ۱۶ مهر ۱۴۰۴

Spatio-Temporal Variability of Reference Evapotranspiration in the Long-Term Period (Case Study: Mazandaran Province, Iran)

, Shaghayegh Ahmadi[1] Payam Nouri[1], Fatemeh Jafari Sayadi[2]

B.Sc. Student, Water Science and Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University.

Ph.D. in Water Science and Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University.

Payam.nouri2002@gmail.com

Abstract

In recent years, limited water resources and increasing water demand have highlighted the importance of optimal water management in agriculture. One of the key tools in this regard is the accurate estimation of reference evapotranspiration (ET_0), which serves as the basis for irrigation system design and water allocation. In this study, monthly and annual values of ET_0 were calculated for Mazandaran Province during 2010–2022 using the FAO Penman–Monteith equation and meteorological data from synoptic stations. For spatial analysis, the data were interpolated using the IDW method in a GIS environment, and the corresponding maps were generated. The results showed that the highest ET_0 occurred in July (39.3 mm), while the lowest value was recorded in January (6.6 mm). Spatially, Sari station had the highest annual average (3.17 mm/day), whereas Ramsar station had the lowest (2.39 mm/day). The annual maps indicated that higher ET_0 values were concentrated in the eastern and central parts of the province, while lower values occurred in the western regions. These variations can be attributed to climatic conditions, topography, vegetation cover, and the influence of the Caspian Sea. The findings of this study can be applied in developing regional irrigation calendars and targeted water resource management, particularly in areas with high evapotranspiration rates.

Keywords: FAO Penman–Monteith, climatic zoning, irrigation management

تحلیل روند بارش، دما و شاخص خشکسالی و اثرات آن بر تولید گندم دیم در لرستان

[۱]- فروغ محمدی راوری، [۲]- کمال امیدوار*(نویسنده مسئول) [۳]- غلامعلی مظفری، [۴]- احمدمزیدی، [۵]- ایمان روستا

۱- دانشجوی دکتری تخصصی اقلیم شناسی دانشگاه یزد، یزد، ایران

۲و۳- استاد اقلیم شناسی دانشگاه یزد، یزد، ایران

۴و۵- دانشیار اقلیم شناسی دانشگاه یزد، یزد، ایران

ایمیل نویسنده مسئول:komidvar@yazd.ac.ir

چکیده

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی تأثیر تغییرات اقلیمی بر تولید دیم در لرستان طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ انجام شد. برای این منظور، از داده‌های اقلیمی بارش، دما، شاخص SPI و داده‌های کشاورزی بهره‌گیری شد. نتایج نشان داد که میانگین بارش سالانه در لرستان بین ۲۷۷.۸ تا ۷۹۰.۸ میلی‌متر متغیر بوده است. همچنین، میانگین دمای سالانه روند افزایشی معناداری داشته و از حدود ۱۷ به بیش از ۲۱.۷ درجه سلسیوس در سال ۲۰۲۴ رسیده است. بررسی شاخص SPI نیز نشان داد که این منطقه به‌طور مکرر تحت تأثیر رخدادهای خشکسالی و ترسالی قرار داشته‌اند. نتایج تاثیر پارامتر های اقلیمی بر داده های کشاورزی نشان داد که رابطه بارش با تولید گندم دیم در استان لرستان با ضراب تعیین R^2 برابر با ۰.۱۴ نسبتاً معنادار بوده و بیشتر از دما متاثر بوده است. اگرچه تغییر اقلیم نقش معناداری در تولید گندم دیم دارد، اما تصمیم‌گیری کشاورزان برای کشت همچنان بیشتر تحت تأثیر عوامل غیراقلیمی است. با توجه به روند افزایشی دما و کاهش یا نوسانات بارش، ادامه این شرایط می‌تواند امنیت غذایی منطقه را در آینده با تهدید جدی مواجه سازد. لذا، اتخاذ راهبردهای سازگاری همچون توسعه بذرهای مقاوم، بهینه‌سازی تقویم زراعی و حمایت مالی از کشاورزان دیم‌کار، ضرورت دارد.

کلید واژه‌ها: بارش و دما، شاخص SPI، لرستان، گندم دیم.

مقدمه

پدیده تغییر اقلیم به‌طور کلی منجر به تغییر در میزان و الگوی بسیاری از پارامترهای اقلیمی در مناطق مختلف جغرافیایی می‌شود. این تغییرات، با توجه به موقعیت و نوع اقلیم هر منطقه، اثرات گوناگونی به همراه دارد که می‌تواند مثبت یا منفی باشد. در سال‌های اخیر، تأثیرات منفی ناشی از تغییر اقلیم به‌طور فزاینده‌ای نمایان شده و شناخت این پدیده از طریق مدل‌های اقلیمی۱۲ به چالشی پیچیده تبدیل شده است (اکرمن۱۳ و همکاران، ۲۰۰۸). بر اساس گزارش منتشرشده از سازمان فائو، جمعیت جهان تا سال ۲۰۵۰ به بیش از ۹ میلیارد نفر خواهد رسید و در عین حال تغییرات آب‌وهوایی منجر به کاهش بارندگی و تولید غذا خواهد شد. برآورد می‌شود که شیوع ناامنی غذایی در کشورهای در حال توسعه و توسعه‌یافته بین ۶ تا ۷۳ درصد باشد (لوبل۱۴، ۲۰۰۸). بنابراین، سازگاری با تغییرات آب و هوایی به‌منظور کاهش آثار این تغییرات ضروری است و باید به‌عنوان یک نقطه شروع برای یکپارچه‌سازی استراتژی‌ها به منظور کاهش خطرات و اثرات تغییرات آب و هوایی در نظر گرفته شود (فیشر و همکاران۱۵، ۲۰۰۲). اقدامات سازگاری باید به مردم و جوامع کمک کند تا سازوکارهای مقابله با رویدادهای حدی و تغییرات مرتبط با آب‌وهوای خود را بهبود ببخشند. در نتیجه، سازگاری باید توانایی کاهش اثرات منفی و تحقق اثرات مثبت را داشته باشد و از خطر تغییرات در شرایط آب و هوایی جلوگیری کند (رابینگ۱۶، ۲۰۰۹). در بسیاری از کشورهای در حال توسعه، چالش‌های ناشی از بحران‌های جهانی نظیر تغییر اقلیم و بلایای طبیعی، بر وخامت آسیب‌های اجتماعی-اقتصادی موجود می‌افزاید. تأثیرات تجمعی تغییر اقلیم، گسیختگی نظام‌های اکولوژیکی، اجتماعی و اقتصادی را تشدید می‌کند. بنابراین، تغییرات آب و هوایی ناشی از فعالیت‌های انسانی، به‌عنوان تهدیدی نوظهور نه تنها تأثیرات زیست‌محیطی قابل‌مشاهده‌ای را به دنبال دارد، بلکه بر ساختارهای اجتماعی، عوامل اقتصادی و کل فرآیند توسعه نیز تأثیر می‌گذارد. تغییرات اقلیمی، به‌ویژه افزایش دما، کاهش بارش‌ها و تغییر در الگوهای بارشی، از جمله تهدیدات جدی برای کشاورزی در کشور ایران محسوب می‌شود و به طور خاص بر تولید گندم دیم تأثیرگذار است. در پی این تغییرات، منابع آب کاهش یافته، خشکسالی‌ها افزایش یافته و بهره‌وری کشاورزی در بخش گندم دیم به شدت کاهش یافته است. این چالش‌ها تأمین پایدار این محصول اساسی را با دشواری روبه‌رو کرده است. مطالعات زیادی در این رابطه انجام شده است که به برخی از آن‌ها در زیل اشاره می‌گردد.

12 Climate Models

13 Ackerman

14 Lobell

15 Fischer et al

16 Rabbinge

ازدوغان۱۷ (۲۰۱۱) تأثیر افزایش دی‌اکسید کربن و تغییرات اقلیمی را بر گندم زمستانه در غرب ترکیه با استفاده از چهار مدل گردش عمومی (GCM) و سه سناریوی انتشار بررسی کردند. نتایج مدل‌های اقلیمی مورد استفاده در این پژوهش نشان داد که دمای میانگین هوا در فصل رشد روندی افزایشی دارد. درحالی‌که میزان بارش نیز بسته به مدل و سناریوی در نظر گرفته‌شده کاهش یافت، اما نوسانات آن بیشتر از دمای هوا بود. شبیه‌سازی‌ها نشان دادند که افزایش دی‌اکسید کربن، در غیاب تغییرات اقلیمی، عملکرد گندم را بهبود می‌بخشد، اما افزایش دما و کاهش بارش، بازده محصول را ۵ تا ۳۵ درصد کاهش می‌دهد. دلیل اصلی این کاهش، کوتاه شدن دوره پر شدن دانه و افزایش تبخیر و تعرق است. این مطالعه بر نیاز به تحقیقات میدانی و اصلاح ژنتیکی ارقام گندم برای سازگاری با شرایط اقلیمی تأکید دارد. در پژوهشی دیگر، کیچامو و همکاران۱۸ (۲۰۱۸) در تحقیقی در شرق کنیا نشان دادند که درک کشاورزان از تغییرات آب و هوایی تحت تأثیر تجربیات گذشته آنها از رویدادهای حدی آب و هوایی قرار دارد که بر سطوح تولید و درآمد آنها تأثیرگذار است. سیادری۱۹ و همکاران نیز (۲۰۲۳)، به بررسی تأثیر تغییر آب و هوا بر بهره وری و امنیت غذایی در اندونزی با استفاده از روش PAR , FGD پرداختند. نتایج تحقیق نشان داد که تغییرات آب و هوایی تأثیرات متعددی بر امنیت غذایی دارد، از جمله خشکسالی، سیل، تغییر فصل‌های کاشت، افزایش علف‌های هرز، آفات و بیماری‌ها، و افزایش دما که منجر به کاهش بهره‌وری محصولات می‌شود. ایشان بیان کردند برای مقابله با این چالش‌ها، همکاری مستمر در همه جنبه‌های مدیریت تغییرات اقلیمی ضروری است.

در ایران نیز سبزی پرور و همکاران (۱۳۹۱) در پژوهشی به بررسی تأثیر شاخص‌ها و متغیرهای هواشناسی کشاورزی بر عملکرد گندم در استان همدان پرداخته‌اند. نتایج این مطالعه نشان داد که شاخص کمبود بارش گیاهی در مقایسه با دیگر شاخص‌ها، همبستگی قوی‌تری با عملکرد گندم دارد. همچنین، تحلیل‌های آماری نشان داد که تأثیر بارش‌های بهاره بر عملکرد گندم نسبت به بارش‌های فصول دیگر بیشتر بوده و نقش اساسی در بهینه‌سازی تولید این محصول ایفا می‌کند. در پژوهشی علی بیگی و همچنین زرعکانی و همکاران (۱۳۹۳) در مطالعه‌ای به ارزیابی تأثیر تغییرات اقلیمی بر اقتصاد گندم دیم در استان خراسان شمالی پرداخته‌اند. نتایج تحقیق نشان‌دهنده تغییرات اقلیمی در این استان در طی ۳۰ سال گذشته بود و مشخص شد که بین پارامترهای دمای حداقل، دمای حداکثر و بارندگی سالانه، رابطه‌ای معنادار با عملکرد گندم دیم وجود دارد. در پژوهشی که توسط کاظمی و همکاران (۱۴۰۱) انجام شد، به پیش‌بینی تغییرات اقلیمی در شهرهای تهران و یزد برای بازه زمانی ۲۰۳۶ تا ۲۰۶۵ با استفاده از مدل LARS-WG پرداخته شده است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که در آینده دما در هر دو شهر به‌طور قابل‌توجهی افزایش خواهد یافت. همچنین تغییرات بارندگی در ماه‌های مختلف

17- Ozdogan

18 Kichamu,et al

19 Siadari

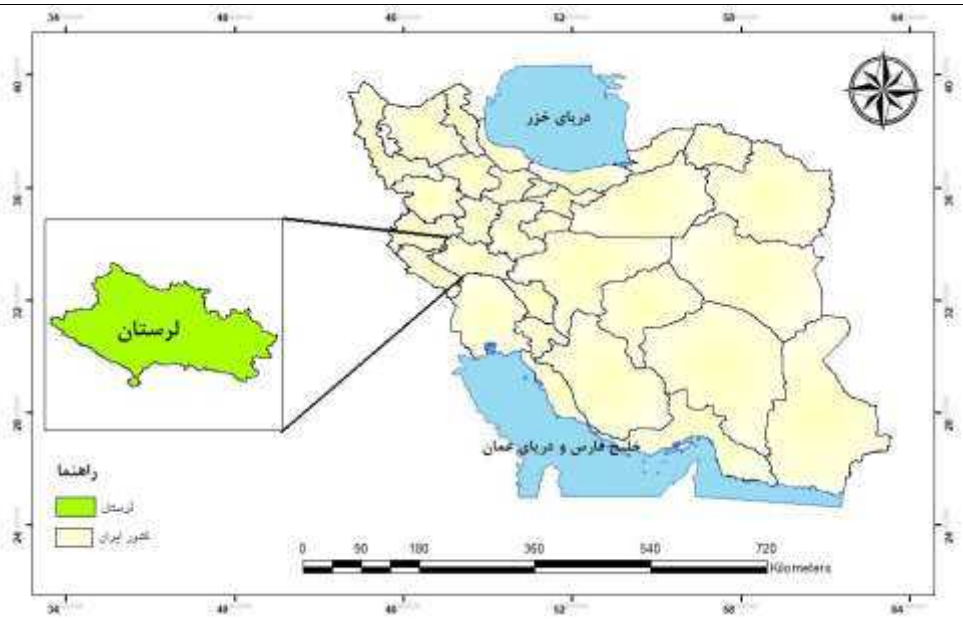
نوساناتی دارد، اما به‌طور کلی میزان بارش سالانه در تهران بین ۲۰ تا ۴۰ درصد و در یزد بین ۴۳ تا ۴۹ درصد افزایش خواهد داشت.

از آنجا که ایران یکی از تولیدکنندگان عمده گندم به شمار می‌آید، هر گونه کاهش در میزان تولید این محصول می‌تواند به ناپایداری تولید و افزایش وابستگی به واردات منجر شود. همچنین، کمبود منابع آب یکی از مشکلات عمده ایران در تأمین نیازهای آبی کشاورزی است، که این معضل به‌ویژه در شرایط تغییرات اقلیمی پیچیده‌تر شده و تهدیدات جدیدی را ایجاد کرده است. این تحقیق درصدد است تا با تحلیل دقیق پیامدهای تغییر اقلیم بر تولید گندم دیم لرستان، به درک عمیق‌تری از چگونگی تأثیرات این تغییرات بر کشاورزی منطقه پرداخته و به شناسایی راهکارهای عملی برای مقابله با این چالش‌ها بپردازد.

روش تحقیق

معرفی منطقه مورد مطالعه

در این پژوهش، استان لرستان به‌عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شده است. این استان در زاگرس میانی واقع بوده و دارای اقلیم کوهستانی نیمه‌خشک تا مدیترانه‌ای است که آن را به ناحیه‌ای حساس در برابر تغییرات اقلیمی، به‌ویژه نوسانات بارش و دما، تبدیل می‌کند. لرستان با وسعتی حدود ۲۸,۲۹۴ کیلومتر مربع، میانگین بارش سالانه ۵۰۰ تا ۸۰۰ میلی‌متر و دمای متوسط ۱۲ تا ۱۸ درجه سانتی‌گراد دارد. وابستگی بالای این استان به کشت دیم، به‌ویژه گندم دیم که حدود ۶۵ درصد سطح زیرکشت آن را تشکیل می‌دهد، اهمیت زیادی در تحلیل اثرات تغییر اقلیم بر تولیدات کشاورزی ایفا می‌کند (شکل ۱).



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه به همراه مشخصات ارتفاعی

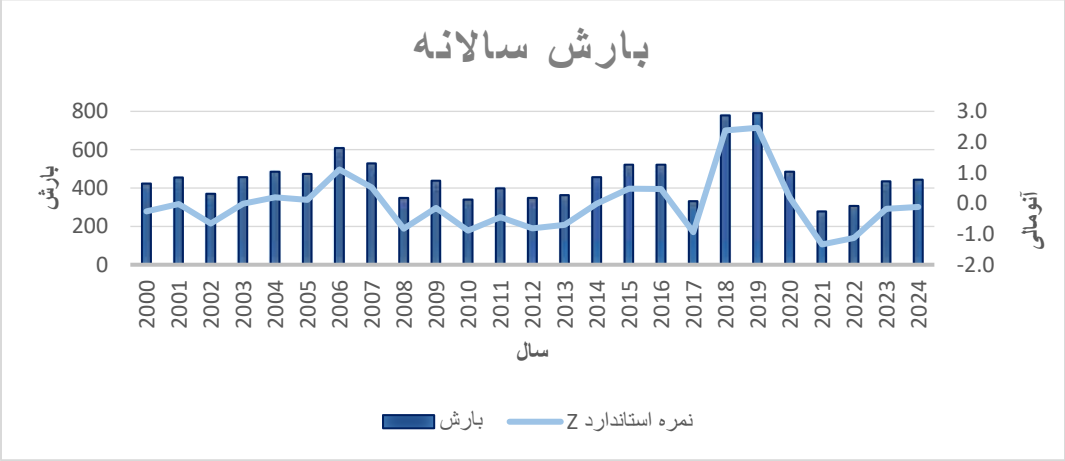
داده های مورد استفاده

منطقه مورد مطالعه استان لرستان می‌باشد که در ناحیه زاگرس میانی واقع شده و دارای اقلیم نیمه‌خشک تا مدیترانه‌ای کوهستانی است. وابستگی بالای کشاورزی دیم، به‌ویژه گندم دیم، به شرایط اقلیمی، این استان را به نمونه‌ای مناسب برای بررسی پیامدهای تغییر اقلیم تبدیل می‌سازد. در این پژوهش، داده‌های اقلیمی شامل میانگین بارش و دمای سالانه طی دوره آماری ۲۵ ساله (۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴) از سازمان هواشناسی کشور استخراج شد. همچنین داده‌های کشاورزی شامل میزان تولید گندم دیم در همان بازه زمانی از وزارت جهاد کشاورزی گردآوری گردید. به‌منظور بررسی روابط آماری بین متغیرهای اقلیمی و کشاورزی از تحلیل رگرسیون خطی استفاده شد و داده‌ها برای مقایسه دقیق‌تر با روش Z-Score نرمال‌سازی شدند. پردازش داده‌ها و ترسیم نمودارها با نرم‌افزار Excel انجام گرفت. این روش امکان تحلیل کمی اثرات تغییر اقلیم بر تولید گندم دیم در لرستان را فراهم ساخته و نتایج آن می‌تواند مبنای تصمیم‌سازی‌های مدیریتی و برنامه‌ریزی برای سازگاری با تغییر اقلیم در بخش کشاورزی باشد.

نتایج و بحث

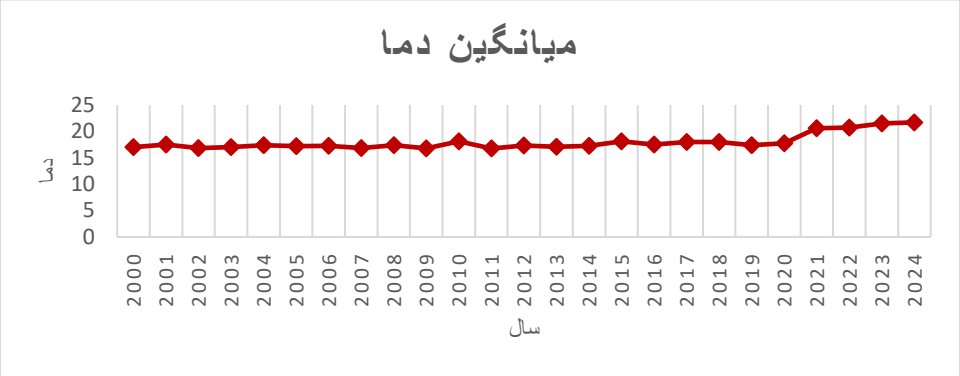
به‌منظور تحلیل تأثیر تغییر اقلیم بر تولید گندم دیم در منطقه غرب ایران، داده‌های بارش سالانه لرستان طی یک دوره آماری ۲۵ ساله (۲۰۰۰–۲۰۲۴ میلادی) مورد بررسی قرار گرفت. در این تحلیل، از مجموع بارش سالانه و نوسانات آن با استفاده از شاخص استاندارد بارش (SPI) بهره گرفته شد تا شرایط نرمال، خشکسالی و ترسالی در سال‌های مختلف شناسایی شود. در استان لرستان بالاترین بارش‌ها در سال‌های ۲۰۱۹ (۷۹۰.۸ میلی‌متر)، ۲۰۱۸ (۷۷۹.۶ میلی‌متر) و ۲۰۰۶ (۶۰۷.۹

میلی‌متر) به ثبت رسیده‌اند، در حالی که کمترین میزان بارش مربوط به سال‌های ۲۰۲۱ (۲۷۷.۸ میلی‌متر) و ۲۰۲۲ (۳۰۶.۲ میلی‌متر) بوده است. مقادیر شاخص SPI در این استان نیز بین ۱.۵- تا ۱.۵+ در نوسان بوده است که بیانگر نوسانات اقلیمی قابل‌توجه در طی این دوره است. بر اساس شاخصSPI ، سال‌های ۲۰۲۱، ۲۰۱۷، ۲۰۱۰ و ۲۰۰۸ در زمره سال‌های خشکسالی، و سال‌های ۲۰۱۹، ۲۰۱۸، ۲۰۱۶، ۲۰۱۵ و ۲۰۰۶ در زمره سال‌های ترسالی قرار گرفته‌اند. سایر سال‌ها وضعیت اقلیمی نرمال را نشان می‌دهند (شکل ۲). این نوسانات در مقادیر بارش سالانه و تغییرپذیری آن‌ها به‌روشنی گویای افزایش فراوانی و شدت دوره‌های خشکسالی و ترسالی در منطقه غرب ایران است که می‌تواند آثار مستقیمی بر تولید گندم دیم داشته باشد. استفاده از شاخص SPI در این تحلیل، امکان درک دقیق‌تری از توزیع زمانی خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها فراهم ساخته است.



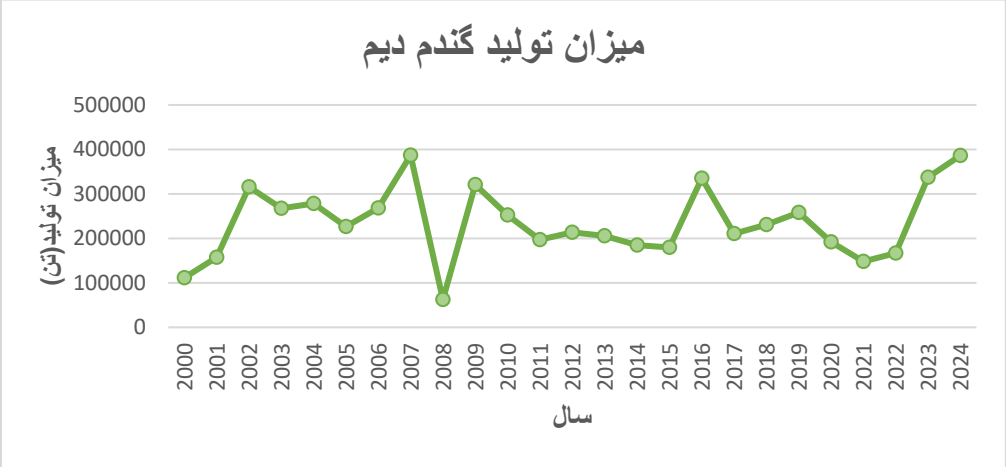
شکل۲. بارش سالانه و SPI استان لرستان طی دوره آماری ۲۰۲۴-۲۰۰۰

بررسی روند میانگین دمای سالانه طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ در استان لرستان نشان می‌دهد که این متغیر روندی افزایشی و معنادار داشته است؛ به‌طوری‌که میانگین دما از حدود ۱۷ درجه سانتی‌گراد در ابتدای دوره به بیش از ۲۱.۷ درجه در سال ۲۰۲۴ رسیده است. این افزایش بیانگر اثرات گرمایش اقلیمی در منطقه زاگرس میانی است. رشد شتاب‌دار دما، به‌ویژه در سال‌های اخیر، می‌تواند پیامدهایی همچون افزایش تبخیر و تعرق، کاهش رطوبت خاک، تغییر طول دوره رشد و در نهایت کاهش عملکرد گندم دیم را به همراه داشته باشد. همچنین، در صورت هم‌زمانی این شرایط با کاهش بارش یا وقوع خشکسالی، پایداری تولیدات کشاورزی در استان با چالش‌های جدی مواجه خواهد شد (شکل ۳).



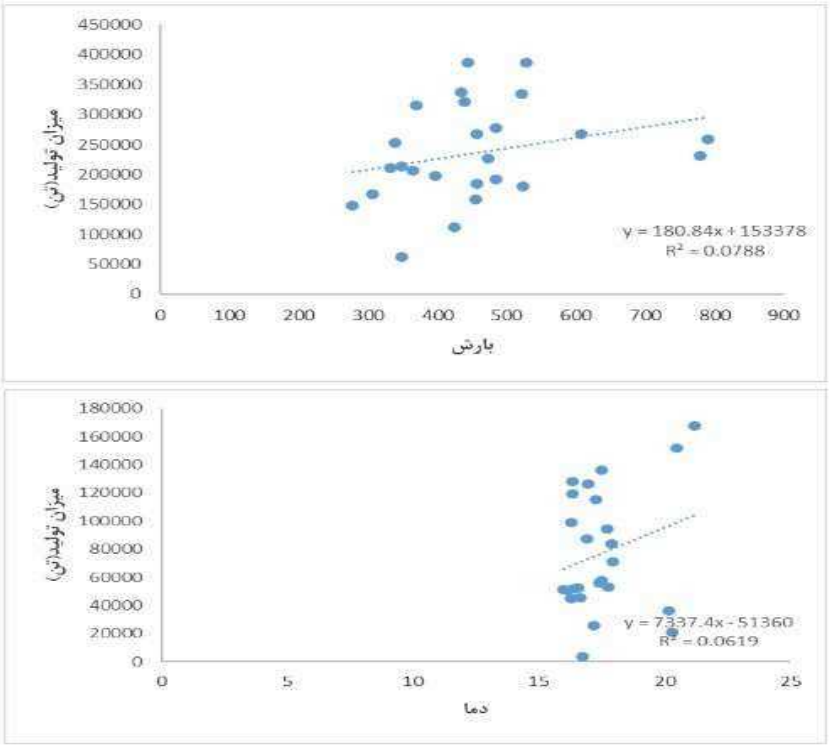
شکل۳. میانگین دمای سالانه لرستان طی دوره آماری ۲۰۲۴-۲۰۰۰

در لرستان ، تولید گندم دیم نسبتاً متعادل و پایدار است و بین ۱۵۰،۰۰۰ تا ۲۵۰،۰۰۰ تن در نوسان است. اگرچه تغییرات سالانه وجود دارد، اما میزان تولید این استان عملکرد نسبتاً مناسبی دارد(شکل۴).



شکل۴. میزان تولید گندم دیم طی دوره آماری ۲۰۲۴-۲۰۰۰

شکل ۵ روابط بین بارش، دما و میزان تولید گندم دیم با استفاده از رگرسیون خطی ارائه شده است. در استان لرستان بین بارش و تولید گندم دیم رابطه‌ی مثبت و نسبتاً متوسطی مشاهده می‌شود؛ یعنی افزایش بارش به بهبود تولید کمک کرده است. همچنین دمای بالا اثر منفی آشکاری بر میزان تولید گندم دیم داشته که نشان‌دهنده‌ی تأثیر مخرب افزایش گرما بر عملکرد گیاه است.



شکل۵. روابط بین بارش، دما و میزان تولید دیم لرستان با رگرسیون خطی طی دوره آماری ۲۰۲۴-۲۰۰۰

نتیجه‌گیری

تغییرات اقلیمی در دهه‌های اخیر، به‌ویژه در مناطق نیمه‌خشک و کوهستانی ایران، آثار قابل‌توجهی بر تولید محصولات کشاورزی به‌ویژه گندم دیم بر جای گذاشته است. بر اساس نتایج حاصل از تحلیل داده‌های اقلیمی و کشاورزی طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴، مشخص شد که استان لرستان با نوسانات شدید اقلیمی، به‌ویژه در متغیرهای بارش و دما مواجه بوده است. میانگین بارش سالانه لرستان بین ۲۷۷.۸ تا ۷۹۰.۸ میلی‌متر متغیر و میانگین دما نیز روندی افزایشی و معنادار را طی کرده است که این گرمایش، همراه با کاهش یا نوسانات بارش، می‌تواند منجر به تبخیر و تعرق بیشتر، کاهش رطوبت خاک، و کاهش طول فصل رشد گندم دیم شود. شاخص SPI نیز نشان داد که در بسیاری از سال‌ها، این استان تحت تأثیر خشکسالی (سال‌هایی مانند ۲۰۲۱، ۲۰۰۸، ۲۰۱۷) یا ترسالی شدید (مانند ۲۰۱۸، ۲۰۰۶، ۲۰۱۹) بوده‌اند. در لرستان، اگرچه تولید گندم دیم در بازه ۱۵۰،۰۰۰ تا ۲۵۰،۰۰۰ تن در نوسان بوده است، اما دمای بالا تأثیر منفی‌تری بر تولید نشان داده است، در حالی که بارش همچنان تأثیر مثبتی با ضریب R^2 حدود ۰.۱۴ داشته است. به‌طور کلی، یافته‌ها گویای آن است که رابطه اقلیم با تولید گندم دیم در منطقه زاگرس میانی، بیشتر از طریق بارش نمایان می‌شود تا دما. در مجموع، می‌توان نتیجه گرفت که تغییر اقلیم، اگرچه در برخی سال‌ها تأثیر مستقیمی بر کاهش یا افزایش تولید گندم دیم داشته، اما در حال حاضر نقش آن در تصمیم‌گیری کشاورزان برای کشت چندان پررنگ نیست. با این حال، ادامه روند گرمایش و

خشکسالی‌های مکرر می‌تواند در بلندمدت تولید گندم دیم را با تهدید جدی مواجه کند. بر این اساس، لازم است راهبردهای سازگاری اقلیمی در حوزه کشاورزی غرب ایران شامل موارد زیر مورد توجه قرار گیرد:

توسعه و ترویج بذرهای مقاوم به خشکی و گرما؛

بهینه‌سازی زمان کاشت برای کاهش مواجهه با پیک‌های گرمایی؛

حمایت‌های هدفمند مالی و بیمه‌ای از کشاورزان دیم‌کار؛

ارتقای سامانه‌های هشدار اقلیمی و پیش‌بینی بلندمدت بارش و دما.

منابع

۱- زرعکانی، ف.، کمالی، غ.، و چیذری، ا. (۱۳۹۳). اثر تغییر اقلیم بر اقتصاد گندم دیم (مطالعه موردی خراسان شمالی) . بوم‌شناسی کشاورزی، ۲(۶)، ۳۰۱-۳۱۰.

۲- سازمان جهادکشاورزی ایران، گزارش تولید محصولات کشاورزی و داده های بخش زراعت، (۱۴۰۳).

۳- سازمان هواشناسی کشور، داده های هواشناسی طی دوره آماری ۳۰ ساله، (۱۴۰۳).

۴- سبزی‌پرور، ع.، ترکمان، م.، و مریانجی، ز. (۱۳۹۱). بررسی تأثیر شاخص‌ها و متغیرهای هواشناسی کشاورزی در عملکرد بهینه گندم (مطالعه موردی: استان همدان) .آب و خاک، ۲(۲۶)، ، ۱۵۵۴-۱۵۶۷.

۵-شکوهی، م.، ثنائی‌نژاد، س ح.، بنایان‌اول، م. (۱۳۹۸). اثر تغییر اقلیم بر مناطق عمده تولید گندم دیم در ایران، تحقیقات آب و خاک ایران، ۶ (۵۰)، ۱۳۰۵-۱۲۹۳.

۶- کاظمی، ر.، خزائی، م ر . (۱۴۰۱)، پیش بینی تغییر اقلیم تهران و یزد در آینده تحت سناریوهای RCP و توسط مدل LARS-WG، فصلنامه علوم و تکنولوژی محیط زیست (JEST). https://civilica.com/doc/1620296

7- Ackerman, F., & Stanton, E. A. (2008). A comment on “economy-wide estimates of the implications of climate change: human health”. Ecological Economics, 66(1), 8-13.

8- Ohlemüller, R., Roy, D. B., & Thomas, C. D. (2011). Rapid range shifts of species associated with high levels of climate warming. Science, 333(6045), 1024-1026.

9- Fischer, G., Shah, M. M., & Van Velthuizen, H. T. (2002). Climate change and agricultural vulnerability.

10- Kichamu, E. A., Ziro, J. S., Palaniappan, G., & Ross, H. (2018). Climate change perceptions and adaptations of smallholder farmers in Eastern Kenya. Environment, development and sustainability, 20, 2663-2680.

11- Lobell, D. B., & Burke, M. B. (2008). Why are agricultural impacts of climate change so uncertain? The importance of temperature relative to precipitation. Environmental Research Letters, 3(3), 034007.

12- Özdogan, M. (2011). Modeling the impacts of climate change on wheat yields in Northwestern Turkey. Agriculture, Ecosystems, and Environment. 141 (2011): 1–12.

13- Rabbinge, R. (2009). Agricultural science and technology needs for climate change adaptation and mitigation (No. 16 (2)). International Food Policy Research Institute (IFPRI).

14- Siadari, U., Sari, R., & Munthe, M. A. (2023). The Impact Of Climate Change On Productivity and Food Security In Indonesia. Journal of Agri Socio-Economics and Business, 5(02), 191-202.

Analysis of Precipitation, Temperature, and Drought Index Trends and Their Effects on Rainfed Wheat Production in Lorestan

[1]–**Forough Mohammadi Ravari,** [2]**- Kamal Omidvar* (Corresponding Author),** [3]**- Gholamali Mozafari, 4- Ahmad Mazidi, 5- Iman Rousta**

1- Ph.D. Student in Climatology, Yazd University, Yazd, Iran.

2 & 3- Professor of Climatology, Yazd University, Yazd, Iran.

4 & 5- Associate Professor of Climatology, Yazd University, Yazd, Iran.

* Corresponding author: komidvar@yazd.ac.ir

Abstract

This study aims to evaluate the impact of climate variability on rainfed wheat production in Lorestan during the period 2000–2024. Climatic data including precipitation, temperature, and the Standardized Precipitation Index (SPI), along with agricultural data, were utilized. Results indicated that the annual precipitation in Lorestan ranged from 277.8 to 790.8 mm. Furthermore, the mean annual temperature showed a significant increasing trend, rising from about 17°C to over 21.7°C in 2024. Analysis of the SPI revealed that the region has frequently been affected by drought and wet spells. The relationship between climatic variables and agricultural data showed that precipitation had a relatively significant effect on rainfed wheat production in Lorestan, with a coefficient of determination (R^2) of 0.14, exerting more influence than temperature. Although climate change plays a notable role in rainfed wheat production, farmers' cropping decisions remain largely driven by non-climatic factors. Given the increasing temperature trend and decreasing or fluctuating precipitation, the continuation of these conditions may pose a serious threat to regional food security in the future. Therefore, adopting adaptation strategies such as the development of resistant seed varieties, optimization of the cropping calendar, and financial support for rainfed farmers is essential.

Keywords: Precipitation and temperature, SPI, Lorestan, rainfed wheat

اثرات تغییرات اقلیمی بر اکوسیستم، امنیت غذایی و تولیدات کشاورزی

عسگر شیرین زاده[1]*

۱. گروه کشاورزی، واحد پارس آباد مغان، دانشگاه آزاد اسلامی،پارس آباد مغان، ایران

Asgar.shirinzadeh@gmail.com

چکیده

در حالی که جمعیت جهان همچنان در حال افزایش است، زمین‌های کشاورزی و تولید مواد غذایی با سرعت فزاینده‌ای تحت تأثیر تغییرات اقلیمی قرار می‌گیرند. بخش کشاورزی به دلیل اثرات مستقیم و غیرمستقیم ناشی از تغییرات اقلیمی مداوم، در دستیابی به اهداف توسعه پایدار با چالش‌های جدی روبرو است. اگرچه بسیاری از صنایع با چالش تغییرات اقلیمی روبرو هستند، اما تأثیر آن بر صنعت کشاورزی بسیار زیاد است. تغییرات غیرمنطقی آب و هوا نگرانی‌های قریب‌الوقوع عمومی را برانگیخته است، زیرا تنوع زیستی، اکوسیستم و تولید و تأمین مواد غذایی کافی، در معرض تهدید مداوم قرار دارد. درک پویایی اکولوژیکی این تأثیرات اقلیمی، شناسایی نقاط حساس آسیب‌پذیری و تاب‌آوری و شناسایی مداخلات مدیریتی که ممکن است به تاب‌آوری زیست‌کره در برابر تغییرات اقلیمی کمک کند، ضروری است. سیستم تولید مواد غذایی با تغییر الگوهای اقلیمی به طور منفی تهدید می‌شود و در نتیجه خطر فقر غذایی را افزایش می‌دهد. این امر منجر به وضعیت نگران‌کننده‌ای در مورد الگوهای غذایی جهانی، به ویژه در کشورهایی که کشاورزی نقش مهمی در اقتصاد و سطح بهره‌وری آنها ایفا می‌کند، شده است. تغییرات اقلیمی و تغییر حاصل در دامنه دما، بقا و اعتبار بسیاری از گونه‌ها را در معرض خطر قرار داده است که با نوسان تدریجی ساختارهای اکولوژیکی، از دست دادن تنوع زیستی را تشدید کرده است. تأثیر غیرمستقیم تغییرات اقلیمی منجر به کیفیت پایین و هزینه‌های بالاتر مواد غذایی و همچنین سیستم‌های ناکافی توزیع مواد غذایی می‌شود. این بررسی، بر تأکید بر اجرای سیاست‌ها با هدف کاهش اثرات تغییرات اقلیمی، چه در مقیاس منطقه‌ای و چه در مقیاس جهانی، تأکید می‌کند. مطالب این مقاله از مقالات پایگاه های گوگل اسکولار،پابمد و کراسرف جمع آوری شده است. تا به خوانندگان در درک این موضوع کمک کند. مشارکت دولت برای پیشرفت بلندمدت ملت ضروری است، زیرا پاسخگویی دقیق به ابزارها و مقرراتی را که قبلاً برای ایجاد سیاست‌های اقلیمی پیشرفته اجرا شده‌اند، تضمین می‌کند. بنابراین، کاهش یا سازگاری با اثرات تغییرات اقلیمی بسیار مهم است، زیرا برای تضمین بقای جهانی، پرداختن به این خطر جهانی مستلزم تعهد جمعی جهانی برای کاهش عواقب وخیم آن است.

کلید واژه ها: تغییرات اقلیمی، توسعه پایدار، تنوع زیستی، امنیت غذایی

مقدمه

تغییرات اقلیمی موضوعی با نگرانی جهانی است که پیامدهای نگران‌کننده‌ای برای فرهنگ‌ها، اقتصاد و اکوسیستم‌های انسانی دارد. آب و هوای زمین تقریباً یک میلیون سال است که در حال تغییر است، اما نرخ فعلی تغییر به طور قابل توجهی سریع‌تر از آن چیزی است که فقط با فرآیندهای طبیعی قابل توضیح است. اجماع قاطع دانشمندان این است که فعالیت‌های انسانی عامل اصلی سرعت فزاینده تغییرات اقلیمی هستند (Hall, et al., 2022). تغییرات اقلیمی پیچیده ترین و لاینحل ترین چالش زیست محیطی(Kingra et al., 2019; United Nations, 2025)، یک تهدید مداوم برای امنیت غذایی و سیستم تولید کشاورزی است. بخش کشاورزی به دلیل اثرات مستقیم و غیرمستقیم ناشی از تغییرات اقلیمی مداوم، در دستیابی به اهداف توسعه پایدار با چالش‌های جدی روبرو است. اگرچه بسیاری از صنایع با چالش تغییرات اقلیمی روبرو هستند، اما تأثیر آن بر صنعت کشاورزی بسیار زیاد است. تغییرات غیرمنطقی آب و هوا نگرانی‌های قریب‌الوقوع عمومی را برانگیخته است، زیرا تولید کافی و تأمین مواد غذایی در معرض تهدید مداوم قرار دارد. سیستم تولید مواد غذایی با تغییر الگوهای اقلیمی به طور منفی تهدید می‌شود و در نتیجه خطر فقر غذایی را افزایش می‌دهد. این امر منجر به وضعیت نگران‌کننده‌ای در مورد الگوهای غذایی جهانی، به ویژه در کشورهایی که کشاورزی نقش مهمی در اقتصاد و سطح بهره‌وری آنها ایفا می‌کند، شده است. تغییرات اقلیمی و رویدادهای شدید آب و هوایی، از جمله چالش‌های اصلی پیش روی کشاورزی قرن بیست و یکم هستند. در سراسر جهان، جوامع کشاورزی باید خود را با تغییرات آب و هوایی وفق دهند. در عین حال، آنها با ضرورت افزایش دسترسی به غذا برای جمعیت رو به رشد، و همچنین تضمین استفاده پایدار از منابع طبیعی مواجه هستند (Kulshreshtha and Wheaton, 2018). کشاورزی از جمله بخش‌هایی است که بیشترین آسیب‌پذیری را در برابر خطرات آب و هوایی و اقلیمی دارد (WMO , 2016). بررسی ارتباط بین تغییرات اقلیمی و کشاورزان خرده‌پا نشان می‌دهد که در صورت عدم اجرای مداخلات استراتژیک، تغییرات اقلیمی و رویدادهای شدید بر عملکرد کشاورزی کشاورزان خرده‌پا تأثیر خواهد گذاشت. با توجه به شکاف قابل توجه و رو به رشد عملکرد محصولات غذایی اصلی و امنیت غذایی در کشورهای توسعه نیافته، نقش کشاورزی هوشمند اقلیمی (CSA) در بهبود بهره‌وری کشاورزی به طور فزاینده‌ای اهمیت می‌یابد (Zougmoré, et al., 2018). این امر به ویژه برای اقتصاد کشورهایی که به شدت به کشاورزی معیشتی و دیم و دامداری وابسته هستند، بسیار مهم است (Shiferaw, et al., 2014). مطالعات متعددی نشان داده‌اند که تغییرات شدید آب و هوایی و بارندگی تأثیر منفی قابل توجهی بر بهره‌وری کشاورزی، تولید ناخالص داخلی (Borgomeo, et al., 2017)، رفاه خانوار (Deressa and Hassan, 2009) و تولید اقتصادی ملی به ویژه در کشاورزی (Lesk, et al., 2016 ؛ Asfew and Bedemo, 2022) دارد.

بدون شک، تغییرات اقلیمی در حال وقوع است و از طریق افزایش تنوع اقلیمی، دمای جهانی و سطح دریا، تأثیرات قابل توجهی دارد (Masters et al., 2010; Sharma et al., 2018). تنوع و تغییر اقلیم بر اکوسیستم‌ها، امنیت غذایی، سلامت و سایر حوزه‌های اساسی برای وجود و رفاه انسان تأثیر می‌گذارد (Ghosh-Jerath et al., 2021). افزایش فراوانی رویدادهای

تنش گرمایی، خشکسالی و سیل، تأثیر منفی بر عملکرد محصولات کشاورزی دارد (Masters et al., 2010). این تأثیرات منفی تغییرات اقلیمی بر تولید محصولات کشاورزی و غذایی، توجه جامعه تحقیقاتی جهانی را برای انجام تحقیقات دقیق در این زمینه جلب کرده است (Joshi et al., 2016). بنابراین، درک تأثیرات تغییرات اقلیمی و تنوع بر جنبه‌های مختلف امنیت غذایی و تغذیه برای سیاست‌گذاری مناسب بسیار مهم است. اگرچه حجم فزاینده‌ای از نوشته ها در مورد تأثیر تغییرات اقلیمی بر امنیت غذایی و تغذیه در دنیا وجود دارد، اما مشخص نیست که آیا شواهد تولید شده تاکنون برای درک اثرات تغییرات اقلیمی بر ابعاد کلیدی مختلف امنیت غذایی و تغذیه، یعنی دسترسی به غذا، استفاده و ثبات، کافی است یا خیر. بنابراین، انجام یک بررسی سیستماتیک از منابع موجود برای شناخت اثرات تغییرات اقلیمی بر امنیت غذایی و تغذیه و شناسایی شکاف‌های شواهد ضروری است. این بررسی همچنین شکاف‌های شواهد تحقیقاتی در ادبیات فعلی را شناسایی کرده و نیاز به تحقیقات گسترده‌تر و در آینده را برای شناسایی خلاء تحقیقاتی در این زمینه را برجسته می‌کند. در نهایت، این بررسی سیستماتیک، شواهد پشتیبانی را برای سیاست‌گذاران و سایر ذینفعان فراهم می‌کند تا تصمیمات آگاهانه‌ای برای بهبود امنیت غذایی و تغذیه برای سازگاری بهتر با تغییرات اقلیمی بگیرند.

تغییرات اقلیمی و امنیت غذایی

امنیت غذایی به عنوان «وضعیتی تعریف می‌شود که در آن همه مردم، در همه زمان‌ها، دسترسی فیزیکی، اجتماعی و اقتصادی به غذای کافی، ایمن و مغذی دارند که نیازهای غذایی و ترجیحات غذایی آنها را برای یک زندگی فعال و سالم برآورده می‌کند» (FAO, 2018). امنیت غذایی شامل ابعادی مانند دسترسی به غذا، دسترسی، استفاده، ثبات در طول زمان و همچنین عاملیت و پایداری است (HLPE 2020). خطر تغییرات اقلیمی برای امنیت غذایی به فروپاشی سیستم‌های غذایی، از جمله محصولات کشاورزی، دام و شیلات، و همچنین اختلال در توزیع غذا، مرتبط با گرمایش جهانی، خشکسالی، سیل و تغییرات و شدت بارندگی، به ویژه برای جمعیت‌هایی که در حال حاضر به دلیل درآمد کمتر، دسترسی فیزیکی کمتر به غذای مغذی، تبعیض اجتماعی یا سایر عوامل در معرض ناامنی غذایی هستند، اشاره دارد (O’ Neill et al., 2022). در سطح جهانی، تخریب زمین‌های کشت‌شده و کاهش حاصلخیزی خاک، که با تغییرات اقلیمی و بلایای مرتبط با آن تشدید شده است، به عنوان نگرانی‌های مهمی برای امنیت غذایی در سراسر جهان ظهور کرده‌اند (Faye et al., 2025؛ Cheng et al., 2024). مدیریت پایدار زمین‌های کشت‌شده و پرداختن به چالش‌های اقلیمی برای حمایت از اقتصاد بسیار مهم است، زیرا رشد جمعیت جهانی و شهرنشینی در حال تجاوز به زمین‌های کشاورزی هستند و در نتیجه تولید غذا و امنیت غذایی را تهدید می‌کنند (Fazal Choudhary, et al., 2025؛ Gunapala et al., 2025). تغییرات اقلیمی منجر به کاهش تولیدات کشاورزی و اختلال در زنجیره‌های تأمین غذا می‌شود (Onyeaka et al., 2024). از این رو، خشکسالی‌های مکرر توام با رشد جمعیت، تهدیدی قابل توجه برای امنیت غذایی محسوب می‌شوند و نیاز فوری به شیوه‌های کشاورزی پایدار برای کاهش این چالش‌ها و تضمین دسترسی طولانی‌مدت به غذا را ضروری می سازد (Hao and Singh, 2015 ؛ Leip et al., 2024). عوامل تنش‌زای محیطی، بهره‌وری کشاورزی را کاهش می‌دهند و ناامنی غذایی را تشدید می‌کنند، به

طوری که سازمان غذا و کشاورزی سازمان ملل متحد پیش‌بینی می‌کند که تا سال ۲۰۵۰، ۵۰ درصد افزایش در تقاضای جهانی غذا رخ دهد (Nor and Yusof, 2025؛ Dai et al., 2025). از این رو، تغییرات اقلیمی جهانی به طور فزاینده‌ای بر سیستم‌های کشاورزی تأثیر می‌گذارد و تهدیدی برای تولید کشاورزی و تقاضای غذا محسوب می‌شود(Feng et al., 2025 ؛ Viet et al., 2024). تأثیر رویدادهای اقلیمی بر تولید محصولات کشاورزی چندوجهی است. از یک سو، شرایط اقلیمی مفید، مانند بارندگی به موقع و دمای متوسط، می‌تواند منجر به افزایش عملکرد محصول شود (Dong, et al., 2023). از سوی دیگر، افزایش تغییرات اقلیمی، از جمله رویدادهای نامطلوب مانند خشکسالی، سیل و یخبندان‌های غیرفصلی، تولید محصولات کشاورزی را تهدید می‌کند و پایداری کشاورزی را تضعیف می‌کند (Shah et al., 2021؛ Zhu et al., 2025). درک چگونگی بهره‌برداری از مزایای رویدادهای اقلیمی مطلوب و در عین حال کاهش اثرات منفی رویدادهای نامطلوب، برای بهینه‌سازی تولید محصولات ضروری است. مدیریت مؤثر رویدادهای اقلیمی مثبت و منفی می‌تواند تولید کشاورزی را افزایش دهد. این امر می‌تواند از طریق استراتژی‌های سازگاری کشاورزی جهانی که اثرات تغییرات اقلیمی را کاهش می‌دهند، با تأکید بر شیوه‌های پایدار، انتقال دانش و تحقیق (Grigorieva et al., 2023) حاصل شود. گرمایش جهانی، تناسب اقلیمی زمین‌های کشت‌شده را تغییر می‌دهد و احتمالاً توزیع مکانی و تنوع تولید محصولات غذایی جهانی را تغییر می‌دهد (Heikonen et al., 2025). دما، بارندگی، خشکسالی، سیل، رطوبت و تبخیر نقش مهمی در تعیین بهره‌وری کشاورزی دارند (Yuan et al., 2024؛ Furtak and Wolinska, 2023؛ Saleem, et al., 2024). این رویدادهای مخرب آب و هوایی می‌توانند عملیات کشاورزی را به شدت مختل کنند و منجر به خسارات قابل توجهی در تولید پایدار محصولات کشاورزی شوند. در این زمینه، کشاورزان، با حمایت برنامه‌های دولتی، باید به طور مداوم با شرایط آب و هوایی در حال تغییر سازگار شوند و این جنبه‌های آب و هوایی را در ارزیابی تولید کشاورزی بلندمدت و تضمین توانایی مقاومت در برابر عوامل تنش‌زای محیطی که بر تولید مواد غذایی و خروجی کشاورزی تأثیر می‌گذارند، حیاتی کنند. (Ge, et al., 2023). در این زمینه، تاب‌آوری اقلیمی برای حفظ اقتصاد روستایی و کاهش اثرات نامطلوب تغییرات محیطی ضروری است (Dorrio, et al., 2024). در شرایط آب و هوایی متغیر، کشاورزان خرده‌پا اغلب در معرض شوک‌های محیطی مانند رویدادهای شدید آب و هوایی قرار می‌گیرند (Teklewold, et al., 2020). از این رو، آبیاری مؤثر، به ویژه در مناطق خشک، تولید پایدارتر محصولات کشاورزی را امکان‌پذیر می‌کند، در حالی که بیمه کشاورزی با کاهش ریسک مالی، کشاورزان را به کاشت محصولات بیشتر تشویق می‌کند (Cabeza, et al., 2024؛ Hou, et al., 2025). علاوه بر این، سازمان‌های مردم نهاد نقش محوری در افزایش آگاهی، انجام تحقیقات و ترویج اتخاذ شیوه‌های پایدار آب و کشاورزی دارند. و مشارکت آنها باید برای دستیابی به مدیریت مؤثر آب در برنامه‌های آبیاری (Centrone, et al., 2017؛ Nosov, et al., 2023)، استفاده از ماشین‌آلات کشاورزی، کود و آفت‌کش‌ها، از اجزای ضروری برای کشاورزان برای مقابله با چالش‌های آب و هوایی هستند (Cabeza, et al., 2024؛ Brunelle, et al., 2024). با بهینه‌سازی این نهاده‌ها، کشاورزان می‌توانند بهتر با شرایط آب و هوایی سازگار شوند و تولید کشاورزی پایدارتری را تضمین کنند. از این رو استراتژی‌های مدیریتی می‌توانند تأثیرات نامطلوب عوامل آب و هوایی را کاهش دهند (Yu and Ma, 2022). بهره‌وری بالاتر نیروی کار کشاورزی معمولاً منجر به شیوه‌های کشاورزی کارآمدتر

می‌شود که منجر به بهبود مدیریت محصول و بازده بالاتر می‌شود (Blanco and Raurich, 2022؛ Chiarella, et al., 2023). بنابراین، نیروی کار، مانند نیروی کار کشاورزی و آبیاری مؤثر، برای تولید کشاورزی اساسی است. نیروی کار، که اغلب بازتابی از منابع انسانی است، ظرفیت نیروی کار مزرعه را تعیین می‌کند. (Li, et al., 2020؛ Hua, et al., 2023). افزایش بهره‌وری در استفاده از منابع انسانی و زمین برای حفظ تولیدات کشاورزی، به ویژه در مناطقی که با چالش‌هایی مانند تغییرات آب و هوایی روبرو هستند، بسیار مهم است (Qorri, et al., 2024). به طور خلاصه، استراتژی‌های سازگاری در مناطقی که در برابر تغییرات اقلیمی آسیب‌پذیر هستند، به طور فزاینده‌ای اهمیت پیدا می‌کنند و کشاورزان را قادر می‌سازند تا بهره‌وری را حفظ کرده و از تولیدات کشاورزی خود در برابر نوسانات شرایط محیطی محافظت کنند.

پیامدهای اکولوژیکی تغییرات اقلیمی

اکوسیستم‌ها جوامعی از موجودات زنده، شامل گیاهان، حیوانات و میکروارگانیسم‌ها هستند که با یکدیگر و دنیای فیزیکی تعامل دارند (Lipton et al., 2018). تغییرات اقلیمی از بسیاری جهات بر این اکوسیستم‌ها تأثیر می‌گذارد. اقلیم نحوه رشد گیاهان، نحوه رفتار حیوانات، رشد کدام موجودات و نحوه تعامل همه آنها با محیط فیزیکی را کنترل می‌کند (Lipton et al., 2018؛ Mc Elwee, et al., 2023). از آنجایی که زیستگاه‌ها، دما، الگوهای بارندگی و سایر تغییرات متفاوتی را تجربه می‌کنند، موجوداتی که اکوسیستم‌ها را تشکیل می‌دهند، این اثرات را احساس می‌کنند. اما این تأثیرات بر اساس منطقه و اکوسیستم متفاوت است (Lipton et al., 2018). با تغییر آب و هوا، برخی از گونه‌ها با تغییر رفتار، ویژگی‌های فیزیکی یا نحوه عملکرد بدن خود سازگار می‌شوند. برخی دیگر قادر به سازگاری نخواهند بود. در نتیجه، تغییرات آب و هوایی می‌تواند منجر به گسترش، کاهش یا انقراض برخی از جمعیت‌ها شود. این تغییرات، به نوبه خود، می‌تواند بر تنوع زیستی کلی یک منطقه تأثیر بگذارد. گیاهان و حیوانات همچنین ممکن است در پاسخ به تغییر شرایط آب و هوایی، محدوده جغرافیایی محل سکونت خود را تغییر دهند. تغییر دما و شرایط آب، دامنه‌ی پراکندگی بسیاری از گیاهان و حیوانات را تغییر داده است. بسیاری از گیاهان و حیوانات برای شروع مراحل خاصی از چرخه‌های زندگی خود به نشانه‌هایی در طبیعت، از جمله دما و شرایط آب، متکی هستند. با تغییر آب و هوا، این نشانه‌ها می‌توانند با سرعت‌های مختلف تغییر کنند یا به طور بالقوه اصلاً تغییر نکنند. در نتیجه، گونه‌هایی که در زمان‌های خاصی از سال به یکدیگر وابسته هستند، ممکن است دیگر با هم هماهنگ نباشند. به عنوان مثال، پلانکتون‌ها منبع غذایی مهمی برای ماهی‌های جوان هستند، اما آنها تمایل دارند سریع‌تر از ماهی‌ها به تغییرات دما واکنش نشان دهند. این بدان معناست که پلانکتون‌ها ممکن است در زمانی که ماهی‌های در حال رشد بیشترین نیاز را به آن دارند، در دسترس نباشند. همچنین، اگر پرنده‌ای هر سال در یک زمان مهاجرت کند، ممکن است به مقصد خود برسد و متوجه شود که به دلیل تغییر دما، منبع اصلی غذایش خیلی زود رشد کرده و دیگر در دسترس نیست . تغییرات آب و هوایی همچنین نحوه تعامل گونه‌ها و جمعیت‌ها با محیط و یکدیگر را تغییر می‌دهد. این تأثیرات را می‌توان در کل یک اکوسیستم احساس کرد (Mc Elwee, et al., 2023). مثلا گونه های مهاجم که بومی یک منطقه نیستند، می‌توانند از گیاهان و حیوانات بومی پیشی گرفته، بیماری‌های جدیدی را به همراه بیاورند و مشکلات

دیگری ایجاد کنند (Lipton et al., 2018). تغییرات آب و هوایی همچنین می‌تواند بر شبکه‌های غذایی تأثیر بگذارد. شبکه غذایی، کل مجموعه روابط تغذیه‌ای بین موجودات مختلف در یک اکوسیستم است. در پایین‌ترین بخش یک شبکه غذایی، موجوداتی مانند گیاهان و پلانکتون‌ها قرار دارند. سایر حیوانات، که در سطوح بالاتر شبکه قرار دارند، به عنوان منبع غذایی به آنها متکی هستند. تأثیرات آب و هوایی بر هر بخشی از یک شبکه غذایی می‌تواند کل سیستم و حتی سایر اکوسیستم‌ها را به طور کلی تحت تأثیر قرار دهد(Mc Elwee, et al., 2023). به عنوان مثال، اکوسیستم‌ها غذای فراوانی را برای مردم فراهم می‌کنند. تغییرات اقلیمی، مانند خشکسالی و گرما، می‌تواند بر دسترسی و کیفیت برخی از غذاها و همچنین توانایی کشاورزان در کشت برخی محصولات تأثیر بگذارد (Bolster et al., 2023). تغییرات اقلیمی همچنین می‌تواند بر خدمات اکوسیستمی مانند جذب و ذخیره کربن تأثیر بگذارد. اکوسیستم‌های جنگلی نقش مهمی در چرخه کربن دارند و به جذب دی اکسید کربن از جو و ذخیره آن در ریشه‌ها، خاک و کف جنگل کمک می‌کنند. اما افزایش آتش‌سوزی‌های جنگلی، سیل، آفات و بیماری‌ها ناشی از تغییرات اقلیمی می‌تواند توانایی یک اکوسیستم را در ارائه این خدمت مهم محدود کند((Domke et al., 2023). اکوسیستم‌ها پایه و اساس بخش‌های بزرگی از اقتصاد هستند. در سطح جهانی، ارزش خدمات اکوسیستم سالانه حدود ۱۲۵ تا ۱۴۵ تریلیون دلار تخمین زده می‌شود (U.S,2021). به طور کلی اختلال در کشاورزی و زنجیره‌های تأمین مواد غذایی می‌تواند تأثیرات اقتصادی برای کشاورزان و کارگران مزرعه داشته باشد و بر قیمت مواد غذایی تأثیر بگذارد. تغییرات اقلیمی همچنین بر صنایع گردشگری و تفریحی تأثیر می‌گذارد (EPA,2017). برخی از جوامع، از جمله جوامع بومی و روستایی، بیشتر از سایرین به اکوسیستم‌ها و خدمات آنها وابسته هستند. با تغییر اکوسیستم‌ها، جوامع بومی بدلیل رابطه منحصر به فردی که با محیط زیست دارند، تأثیرات تغییرات اقلیمی بر اکوسیستم‌ها می‌تواند به توانایی مردم بومی در حفظ و پایداری میراث فرهنگی‌شان آسیب برساند (Whyte et al., 2023؛ Jantarasami, et al., 2018). تغییر محدوده حیوانات می‌تواند توانایی مردم بومی در شکار و ماهیگیری را مختل کند، زیرا حیوانات از سرزمین‌های قبیله‌ای خود فراتر می‌روند (Jantarasami, et al., 2018). بسیاری از جوامع روستایی به معیشت مرتبط با اکوسیستم، از جمله کشاورزی، ماهیگیری و پرورش دام، وابسته هستند. مردم این مناطق در مواجهه با چالش‌های اکوسیستمی، مانند گونه‌های مهاجم و کاهش کیفیت خاک، بیشتر احتمال دارد که شاهد تأثیرات اقتصادی باشند(Lipton et al., 2018).

خدمات اقلیمی و سازگاری کشاورزی با تغییرات اقلیمی

خدمات اقلیمی (CS) ابزاری کلیدی برای جامعه جهت مدیریت خطرات مرتبط با تغییر و تنوع اقلیمی است (Suckall, and Soares, 2022). امروزه، این سرویس وسیله‌ای مهم برای حمایت از افراد، جوامع و سازمان‌ها در سازگاری مؤثر با تأثیرات کوتاه مدت و بلند مدت تغییرات اقلیمی است (Boon, et al., 2022). مزایای اقتصادی اجرای خدمات اقلیمی می‌تواند بسیار گسترده باشد، زیرا در سال ۲۰۱۹، تنها برای بخش کشاورزی، سازمان جهانی هواشناسی تخمین زد که پیش‌بینی‌های به‌روز شده می‌تواند منجر به افزایش سالانه ۳۰ میلیارد دلار در بهره‌وری جهانی و کاهش ۲ میلیارد دلار در خسارات سالانه دارایی‌ها شود (Suckall, and Soares, 2022). اهمیت بالای خدمات اقلیمی در پرداختن و سازگاری با

تأثیرات تغییرات اقلیمی در مطالعات و نتایج سازمان‌های بزرگی مانند IPCC، FAO، UNESCO، ICOMOS، MedECC و دیگران منعکس شده است (FAO, 2021 ؛ Azzopardi, et al., 2020؛ WMO, 2016). خدمات اقلیمی به طور فزاینده‌ای به عنوان پایه و اساس ایجاد تاب‌آوری و سازگاری با تأثیرات تغییرات اقلیمی بر کشاورزی و سایر بخش‌های حساس به آب و هوا شناخته می‌شوند .(Naab et al., 2019, Hansen et al., 2019) استفاده مؤثر از خدمات آب و هوا و اقلیم، همراه با مشاوره‌های هواشناسی کشاورزی، می‌تواند خطرات اقلیمی را برای جوامع کشاورزی کاهش دهد و راهنمایی‌های مناسبی را در مورد مدیریت منابع کشاورزی و اقلیمی در سطح محلی در اختیار آنها قرار دهد (FAO, 2019) . دمای جهانی در حال افزایش است و الگوهای آب و هوایی نامنظم‌تر می‌شوند. این تغییرات، سیستم‌های کشاورزی را تحت فشار فزاینده‌ای قرار می‌دهد. آنها باید ضمن برآورده کردن تقاضای رو به رشد غذا برای جمعیت در حال گسترش، خود را با شرایط وفق دهند (Allan et al., 2023; El Bilali et al., 2020). تغییرات ناشی از آب و هوا، آسیب‌پذیری‌های موجود را بدتر می‌کند. این امر به ویژه در مناطقی که کشاورزی برای معیشت و اقتصاد اهمیت دارد، صادق است (Emediegwu et al., 2022). در نتیجه، خدمات هواشناسی کشاورزی به عنوان ابزاری حیاتی ظهور کرده‌اند که اطلاعات اقلیمی و آب و هوایی قابل اجرا را ارائه می‌دهد که از تصمیم‌گیری آگاهانه پشتیبانی می‌کند، بهره‌وری را افزایش می‌دهد و در سیستم‌های کشاورزی انعطاف‌پذیری ایجاد می‌کند (FAO, 2021; Khatibu et al., 2022). در طول دهه گذشته، یک تغییر جهانی هماهنگ به سمت ادغام ابزارهای هواشناسی کشاورزی در شیوه‌های کشاورزی برای مقابله با چالش‌های درهم‌تنیده تغییرات اقلیمی، ناامنی غذایی و تخریب محیط زیست صورت گرفته است. به این ترتیب، با ترکیب داده‌های هواشناسی با برنامه‌های کاربردی کشاورزی، خدمات هواشناسی کشاورزی بینش‌های ارزشمندی مانند پیش‌بینی‌های فصلی، ارزیابی ریسک خشکسالی و هشدارهای شیوع آفات ارائه می‌دهند (Kumar, 2020). این ابزارها کشاورزان را قادر می‌سازند تا برنامه‌های کاشت، شیوه‌های آبیاری و استراتژی‌های مدیریت آفات را بهینه کنند و از این طریق کشاورزی پایدار را تقویت کرده و به اهداف گسترده‌تر تاب‌آوری اقلیمی و حفاظت از محیط زیست کمک کنند (Cegnar et al., 2023). این ادغام با تلاش‌های جهانی، مانند اهداف توسعه پایدار سازمان ملل متحد، به ویژه گرسنگی صفر و اقدامات اقلیمی همسو است و نقش هواشناسی کشاورزی را در دستیابی به توسعه پایدار برجسته می‌کند (United Nations, 2019). پیشرفت‌های فناوری به طور قابل توجهی تکامل خدمات هواشناسی کشاورزی را هدایت کرده‌اند، به طوری که نوآوری‌ها در سنجش از دور، سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی و تجزیه و تحلیل کلان‌داده، دقت، دسترسی و مقیاس‌پذیری آنها را بهبود بخشیده‌اند (Carter and Oroy, 2024). این فناوری‌ها امکان توسعه پیش‌بینی‌های آب و هوایی بسیار دقیق، سیستم‌های نظارت بلادرنگ و خدمات مشاوره اقلیمی خاص منطقه را فراهم کرده‌اند که برای سیستم‌های کشاورزی متنوع در سطح جهان ضروری هستند (Wellstead et al., 2024). با وجود پیشرفت‌های قابل توجه، چالش‌های قابل توجهی در تضمین دسترسی عادلانه به خدمات هواشناسی کشاورزی و رفع نابرابری‌ها در پذیرش و اجرای آنها همچنان وجود دارد (Singh et al., 2018; Partey et al., 2018). در حالی که برخی مناطق، به ویژه در کشورهای توسعه‌یافته، گام‌های قابل توجهی در ادغام این خدمات برداشته‌اند، برخی دیگر - به ویژه در کشورهای در حال توسعه - با موانع سیستمی، از جمله منابع مالی محدود، زیرساخت‌های ناکافی و عدم وجود راه‌حل‌های

محلی و مناسب فرهنگی مواجه هستند (Paparrizos et al., 2024; Canton, 2021). علاوه بر این، نابرابری‌های جنسیتی مانع دسترسی بیشتر می‌شود، به طوری که کشاورزان زن اغلب به دلیل نابرابری‌های ساختاری در آموزش و دسترسی به منابع از این خدمات محروم می‌شوند (Diouf et al., 2019; Gumucio et al., 2020).

خدمات اقلیمی پیش‌بینی‌های فصلی آب و هوا را در اختیار کشاورزان قرار می‌دهند و الگوهای آب و هوایی مورد انتظار را برای یک دوره خاص، مانند فصل رشد آینده، نشان می‌دهند (Capa-Morocho, et al., 2016). خدمات برای بخش کشاورزی به اجرای رویه‌های دقیق با هدف تضمین پیش‌بینی‌های فصلی با کیفیت بستگی دارد. این دیدگاه در موارد بررسی شده، به عنوان مثال، در مواردی که جغرافیای فیزیکی محلی و منطقه‌ای با پیچیدگی بالایی مشخص می‌شود، اساسی است (Rodriguez, et al., 2018). کشاورزان با راهنمایی‌های تخصصی در مورد شرایط آب و هوایی فصلی آینده (به عنوان مثال، آگاهی از تعداد روزهای بارانی و دوره‌های خشک)، قادر به انجام تصمیمات و استراتژی‌های کشاورزی تطبیقی بهتر (تغییر تاریخ کاشت/زمان کشت، سطح زیر کشت محصول، تخصیص زمین، انتخاب مناسب‌ترین نوع و رقم محصول، تغییر در مقدار کود) هستند و برای زمان انتظار رویدادهای بحرانی آب و هوایی به خوبی آماده هستند (Amegnaglo, et al., 2017؛ Foley and Kelman, 2018؛ Nyadzi, et al., 2018). در سطح جهانی، پیش‌بینی‌های قابل اعتماد پیش از فصل در مورد تغییرات در عملکرد محصولات اصلی، توانایی بخش کشاورزی را در واکنش مؤثر به شوک‌های تولید مواد غذایی و افزایش قیمت مواد غذایی ناشی از رویدادهای غیر طبیعی آب و هوایی تقویت می‌کند (Dayamba, et al., 2018). خدمات اقلیمی هشدارهایی در مورد رویدادهای آب و هوایی (مانند خشکسالی، سیل، موج گرما و طوفان) صادر می‌کنند. کشاورزان عمدتاً به مقیاس‌های زمانی کوتاه‌تر علاقه‌مند هستند که در آن اقدامات می‌توانند فوراً پیامدهای رویدادهای غیر طبیعی آب و هوایی را کاهش دهند. به این ترتیب، بهره‌برداری از هشدارها توسط کشاورزان و دامداران، با داشتن دانش بهبود یافته از ویژگی‌های آب و هوایی محلی، می‌تواند اقدامات پیشگیرانه سریع مانند خاک، آب، مدیریت کشت و شیوه‌های تعدیل شامل برنامه‌ریزی آبیاری، تاریخ کاشت، انتخاب گونه‌های بهبود یافته، عملیات کوددهی، تنوع محصول، تحرک گله و مهاجرت دام (جابجایی دام به مناطق امن‌تر، به عنوان مثال، برای جلوگیری از مناطق مستعد سیل) را اجرا کند (Antwi-Agyei et al., 2021؛ Iizumi, et al., 2018 ؛ Singh, et al., 2018 ؛ Kosoe and Ahmed, 2022).

بر اساس پیش‌بینی‌های آب و هوایی، کشاورزان می‌توانند انتخاب محصول خود را برای تطبیق بهتر با شرایط در حال تغییر تطبیق دهند. جایگزینی یک گونه محصول، تاکتیکی رایج بر اساس تناسب بهتر گونه جدید با آب و هوای پیش‌بینی‌شده است (به عنوان مثال، خدمات اقلیمی می‌توانند گونه‌های مقاوم به خشکسالی یا محصولاتی با دوره‌های رشد کوتاه‌تر را برای هماهنگی با الگوهای تغییر یافته دما و بارندگی توصیه کنند (Nkuba, et al., 2021 ؛ Nkiaka, et al., 2019). جایگزینی یک گونه محصول ممکن است با کاشت مواد اولیه تکامل‌یافته (بذر گیاهان توسعه‌یافته‌تر) یا انتخاب گونه مناسب که بیشتر با فصل آب و هوایی آینده مناسب است، مطابقت داشته باشد. جایگزینی رایج گونه محصول کمتر متناسب با آب و هوا در پاسخ به اطلاعات هواشناسی کشاورزی فصلی ممکن است به طور قابل توجهی عملکرد کشاورزی را افزایش دهد (Cook, 2016). افزایش قابل توجه عملکرد محصولات اصلی (به عنوان مثال، برنج و ذرت) قبلاً مستند شده و به سهم مهم خدمات

اقلیمی در برنامه‌ریزی فعالیت‌های کشاورزی نسبت داده شده است (Mihailesu and Bruno, 2020)، که بنابراین، ضرورت افزایش دسترسی و بهره‌برداری از خدمات اقلیمی توسط جامعه کشاورزی در سازگاری با نیازهای تغذیه‌ای فزاینده در سراسر جهان را برجسته می‌کند. این خدمات اقلیمی، بینش‌هایی در مورد دسترسی به آب در آینده و تغییرات بالقوه در الگوهای بارندگی ارائه می‌دهند. برای مثال، پیش‌بینی‌های زیرفصلی از میزان و فراوانی بارندگی روزانه می‌تواند برای کاربردهای کشاورزی وابسته به باران مفید باشد (Naab, et al., 2019). این اطلاعات به کشاورزان کمک می‌کند تا با بهینه‌سازی برنامه‌های آبیاری و صرفه‌جویی در مصرف آب در دوره‌های خشک بر اساس حداقل‌سازی مجاز مصرف آب (رطوبت خاک کمتر از یک آستانه مشخص نباشد) و در نتیجه دستیابی به ذخیره آب مورد نیاز در مقیاس مزرعه برای استفاده کاربردی از آن و نه به قیمت کاهش تولید کشاورزی، منابع آب خود را به طور مؤثرتری مدیریت کنند (Onyeneke, et al., 2023).

سیستم‌های هشدار سریع می‌توانند در پیش‌بینی تغییرات الگوهای آفات و بیماری‌ها تحت تأثیر تغییرات آب و هوایی کمک کنند (White et al., 2017). هشدارهای اولیه به کشاورزان این امکان را می‌دهد که استراتژی‌های مدیریت آفات هدفمند را اجرا کنند، در نتیجه تأثیر بر محصولات را کاهش می‌دهند، همزمان از شیوع آفات بیماری‌های گیاهی/محصولی جلوگیری می‌کنند (Roy, et al., 2023)، و ورود گونه‌های گیاهی بیگانه را به حداقل می‌رسانند (Kim, et al., 2022). پیش‌بینی زودهنگام پویایی آفات و بیماری‌ها می‌تواند اثربخشی پیشگیری مبتنی بر بهبود نظارت و پیش‌بینی را افزایش دهد و علاوه بر این، به محدود کردن کاربرد آفت‌کش‌های شیمیایی و در نتیجه امنیت غذایی، توسعه پایدار کشاورزی (Browm, et al., 2022) و محدود کردن آلودگی زیست‌محیطی که یکی از علل اصلی آلودگی‌های ناشی از فعالیت‌های انسانی است، کمک کند(Noar, et al., 2021). مدیریت هوشمند آفات بر اساس اقلیم (هماهنگی تولید محصول، ترویج، تحقیقات و سیاست‌گذاری در جهت سیستم‌های تولید مواد غذایی کارآمدتر و مقاوم‌تر) تلفات محصولات را کاهش می‌دهد، خدمات اکوسیستم را افزایش می‌دهد، شدت انتشار گازهای گلخانه‌ای را به ازای هر واحد غذای تولید شده به حداقل می‌رساند و تاب‌آوری سیستم‌های کشاورزی را که با چالش آلودگی‌های ناشی از فعالیت‌های انسانی مواجه هستند، تقویت می‌کند (Dong, et al., 2020).

تغییرات اقلیمی یک نگرانی مبرم است که بر سلامت و بهره‌وری خاک تأثیر می‌گذارد. برای کاهش و سازگاری با تأثیرات آن، ذینفعان باید به خدمات اقلیمی برای حفاظت از خاک دسترسی داشته باشند. این خدمات اطلاعات، داده‌ها و ابزارهای حیاتی را ارائه می‌دهند که از شیوه‌های مدیریت پایدار زمین، ادغام داده‌های اقلیمی، اطلاعات خاک و سایر پارامترهای مرتبط پشتیبانی می‌کنند. با ادغام خدمات اقلیمی در تلاش‌های حفاظت از خاک، ذینفعان می‌توانند تاب‌آوری اکوسیستم‌های کشاورزی و طبیعی را در برابر تغییرات اقلیمی افزایش دهند. این شامل نظارت و ارزیابی خواص خاک، اجرای استراتژی‌های مدیریت تطبیقی خاک و ارائه اطلاعات در زمان واقعی برای پاسخگویی سریع به چالش‌های مرتبط با آب و هوا می‌شود (Von, et al., 2015).. علاوه بر این، ذینفعان باید در مورد اهمیت حفاظت از خاک و شیوه‌های مدیریت پایدار زمین آموزش ببینند. همکاری با سیاست‌گذاران، حمایت از طرح‌های تحقیقاتی و تسهیل همکاری‌های بین‌المللی می‌تواند تلاش‌های جهانی برای رسیدگی به چالش‌های مرتبط با خاک را بهبود بخشد. ذینفعان با اولویت دادن به خدمات

اقلیمی برای حفاظت از خاک، می‌توانند شیوه‌های پایدار استفاده از زمین را برای آینده تضمین کنند و به داشتن سیاره‌ای سالم‌تر کمک کنند (Li, et al., 2024b ؛Sutanto, et al., 2022 ؛Heeb, et al., 2019 ؛Von, et al., 2015).

خدمات اقلیمی با ارائه داده‌های مربوط به خطرات مرتبط با آب و هوا از بخش بیمه کشاورزی پشتیبانی می‌کنند (Janke, et al., 2016). شرکت‌های بیمه می‌توانند سیاست‌های مناسبی را طراحی کنند که خسارات مربوط به محصولات مرتبط با آب و هوا را پوشش می‌دهد و یک شبکه ایمنی برای کشاورزان در طول رویدادهای شدید آب و هوایی ارائه می‌دهد. اشکال نوآورانه بیمه مبتنی بر پارامترهای آب و هوایی (بیمه شاخص آب و هوا) از کاربران نهایی/کشاورزان در برابر رویدادهای شدید آب و هوایی محافظت می‌کند (Li, et al., 2020). در عمل، چنین مکانیسم‌هایی از یک عامل (یعنی شاخص به عنوان مثال، دما، مقادیر سرعت باد یا میزان بارندگی) برای فعال کردن پرداخت غرامت به کشاورزان استفاده می‌کنند (Loboguerrero, et al., 2017). بنابراین، بیمه کشاورزی استفاده از اطلاعات آب و هوایی را برای اهداف تصمیم‌گیری در مزرعه تکمیل کرده (Janke, et al., 2016) به بیمه‌گران در ارائه پوشش مناسب و مدیریت کارآمد ریسک‌های مالی مرتبط با بلایای طبیعی آب و هوایی کمک می‌کند (Madki, et al., 2023).

کشاورزی هوشمند با آب و هوا، فعالیت‌های هماهنگ کشاورزان، دانشمندان، محققان، تصمیم‌گیرندگان/سیاست‌گذاران و بخش خصوصی/دولتی را به سمت مسیرهای تاب‌آوری در برابر آب و هوا بر اساس چهار حوزه عملیاتی اصلی تشویق می‌کند: "(۱) ایجاد شواهد؛ (۲) افزایش اثربخشی نهادی محلی؛ (۳) تقویت انسجام بین سیاست‌های آب و هوایی و کشاورزی؛ و (۴) پیوند دادن تأمین مالی آب و هوا و کشاورزی". کشاورزی هوشمند با آب و هوا با تمرکز بر توانایی اعمال راه‌حل‌های انعطاف‌پذیر و متناسب با شرایط با کمک سیاست‌ها و اقدامات مالی معاصر، با سایر دیدگاه‌ها (مثلاً رویکرد "کسب و کار طبق معمول") متفاوت است (Eltazarov, et al., 2021). خدمات اقلیمی راهنمایی‌هایی در مورد شیوه‌های کشاورزی هوشمند با آب و هوا ارائه می‌دهند که بر رویکردهای پایدار و تطبیقی به کشاورزی تمرکز دارند. این می‌تواند شامل کشاورزی حفاظتی، جنگلداری کشاورزی و سیستم‌های یکپارچه کشاورزی-دامداری باشد که تاب‌آوری در برابر تغییرات اقلیمی را افزایش می‌دهند. در این مفهوم، تغییرات اقلیمی شامل عملکردها، ارزش‌ها و مزایای مختلف زیست‌محیطی، از جمله خدمات کشاورزی و دامداری از کاشت تا فعالیت‌های پس از برداشت، منابع بیشتر زیست‌توده و انرژی خورشیدی، منابع آب زمینی، سطحی و جوی، بازاریابی محصول، ماهی و دام، سیستم‌های ذخیره‌سازی آب برای تولید و مراتع خصوصی یا عمومی برای چرای دام‌ها می‌شود(Wainimu, et al., 2016). از طریق سیاست‌های هوشمند اقلیمی، می‌توان از ضررهای اقتصادی آینده جلوگیری کرد و بیشترین سود زیستگاهی را برای گونه‌های در معرض خطر فراهم نمود (Lipper, et al., 2014 ؛Okaka, et al., 2019).

برخی از خدمات اقلیمی، خدمات مشاوره‌ای شخصی‌سازی‌شده را به کشاورزان ارائه می‌دهند، اطلاعات اقلیمی را متناسب با نیازهای خاص آنها تنظیم می‌کنند و به آنها در اجرای شیوه‌های مقاوم در برابر تغییرات اقلیمی در مزارعشان کمک می‌کنند. یافته‌ها نشان داده است که نتایج مطلوب مربوط به عملیات برای حمایت از تصمیم‌گیری و سازگاری کشاورزان با ریسک،

زمانی که کشاورزان درگیر می‌شوند، افزایش می‌یابد (Campos, et al., 2022). استفاده از فناوری‌های اطلاعات و ارتباطات (به عنوان مثال، تلفن‌های همراه، تلویزیون، رادیو و خدمات اینترنتی) زمینه‌ای نوظهور برای ارتباط سرویس های اقلیمی با کشاورزان است. خدمات مشاوره‌ای آب و هوا و کشاورزی می‌تواند به جوامع کشاورزی روستایی در تصمیم‌گیری بهتر در مورد مدیریت محصولات در فصل، انتخاب فناوری و توسعه استراتژی‌های بازاریابی کمک کند (Sekabira, et al., 2022). از یک سو، خدمات مشاوره‌ای ممکن است هزینه‌های جمع‌آوری، پردازش و تصمیم‌گیری را کاهش دهد. از سوی دیگر، آنها ممکن است امکان انتشار به موقع اطلاعات را فراهم کنند که کشاورزان را در کاهش خطرات اقلیمی راهنمایی می‌کند. ارائه اطلاعات به موقع و مرتبط با اقلیم، کشاورزان را قادر می‌سازد تا تصمیمات آگاهانه بگیرند، خطرات را به حداقل برسانند و شیوه‌های کشاورزی را با تغییرات اقلیمی تطبیق دهند. این به نوبه خود، تاب‌آوری کلی بخش کشاورزی را در برابر چالش‌های ناشی از تغییرات اقلیمی افزایش می‌دهد. خدمات مشاوره روستایی که به عنوان: «تمام فعالیت‌های مختلفی که اطلاعات و خدمات مورد نیاز و مورد تقاضای کشاورزان و سایر بازیگران در محیط‌های روستایی را ارائه می‌دهند تا به آنها در توسعه مهارت‌ها و شیوه‌های فنی، سازمانی و مدیریتی خود کمک کنند تا معیشت و رفاه خود را بهبود بخشند» تعریف شده است (Vedeld, et al., 2019)، دارای مزیت نسبی در توسعه فناوری و انتشار اطلاعات، تقویت کمک و واسطه‌گری، حمایت و پشتیبانی سیاستی، توانایی و بهره‌وری کشاورزان هستند. این اهداف با افزایش شیوه‌های کشاورزی در بین کشاورزان بر اساس نوآوری مشترک کشاورزی و نهادی با کشاورزان، محققان و سایر گروه‌ها محقق می‌شوند. اگرچه خدمات مشاوره‌ای در حال حاضر به طور فعال و گسترده‌تری در این اقدامات مشارکت دارند، اما برای ارتقاء موفقیت و افزایش نوآوری در زمینه کشاورزی هوشمند با آب و هوا و سازگاری با تغییرات اقلیمی، نیاز به توسعه ظرفیت در سطوح فردی و سازمانی و تعدیل نهادی در سطح سیستم‌ها دارند (Gangopadhyay, et al., 2019؛ Raj, et al., 2018؛ Rupan, et al., 2018).

CSها شکاف بین تحقیقات علمی و کاربرد عملی را پر می‌کنند. آنها تحقیقات مرتبط با آب و هوا را برای کشاورزان در دسترس قرار می‌دهند و یافته‌های علمی را به اطلاعات عملی تبدیل می‌کنند. برای پرداختن به چالش اطلاعاتی، استفاده از تکنیک‌های تجسم بهبود یافته، که به راحتی توسط متخصصان غیر اقلیمی قابل درک است، به کاربران نهایی در تفسیر و بهره‌برداری از دانش به ساده‌ترین و سریع‌ترین شکل ممکن کمک کرده است. تشویق گروه‌های بین رشته‌ای متشکل از محققان طراحی، دانشمندان اقلیمی و متخصصان ارتباطات، تخصص و شایستگی گسترده‌ای را در تمام مراحل توسعه CSها ایجاد کرده است(Kamruzzaman, et al., 2020). همچنین، نمونه‌های اولیه CSها که نقش کاربران نهایی را در طراحی مشترک محصول درخواستی به رسمیت شناخته‌اند، به طور قابل توجهی در پیشبرد قابلیت استفاده از پیش‌بینی‌های اقلیمی، تنظیم اطلاعات اقلیمی با خواسته‌های واقعی کاربران نهایی، انتقال کافی‌تر عدم قطعیت و پر کردن شکاف بین پیش‌بینی‌های اقلیمی پیشرفته و آمادگی کاربران برای اجرای چنین دانش جدیدی نقش داشته‌اند (Terrado, et al., 2022).

CSهای نوآورانه، استراتژی‌های سازگاری و پشتیبانی از سیاست پایدار برای پرداختن به چالش‌های ایجاد کشاورزی پایدار و امنیت غذایی الزامی هستند (Christel, et al., 2018). به دلیل افزایش مورد انتظار در تغییرپذیری پارامترهای آب و هوایی، شرایط آب و هوایی شدید و آسیب‌پذیری جوامع روستایی، به ویژه در کشورهای در حال توسعه، CSها برای

سیاست‌گذاری ضروری هستند. به عنوان مثال، کمیته‌های بازتاب CC منطقه‌ای تأسیس شده‌اند و درخواست کرده‌اند که CC در سیاست‌های مقامات محلی در نظر گرفته شود. موفقیت پروژه‌های اولیه خدمات آب و هوایی-اقلیمی، وزارت کشاورزی را تشویق کرده است تا اطلاعات اقلیمی را در طرح ملی سازگاری برای بخش کشاورزی بگنجاند (Buontempo, et al., 2020). پروژه‌های CSها، سیاست‌گذاران را برای ایجاد سیاست‌ها و چارچوب‌هایی که شامل اصول و فرآیندهای CSها شامل نقش‌ها و مسئولیت‌های خاص ذینفعان کلیدی است، درگیر می‌کند، که برای گسترش CS اساسی هستند. "گسترش CS به چالش‌های مربوط به توسعه ساختارهای نهادی و شبکه و محیط توانمندساز (سیاست‌ها، مقررات، عملیات و ظرفیت‌ها) نگاه می‌کند. این به معنای افزایش دسترسی CS ارائه شده در مقیاس بسیار بزرگتر (به عنوان مثال، در مقیاس استانی، منطقه‌ای یا ملی) به روشی پایدار فراتر از اجرای آزمایشی است. این به ادغام درس‌های آموخته شده در مقیاس محلی در سیاست، دستور کار عملی و برنامه‌های سرمایه‌گذاری در سطوح بالاتر اشاره دارد"(Blundo, et al., 2021).

نتیجه‌گیری، فرصت‌ها و چالش‌های آینده

تغییرات اقلیمی یک فرآیند مداوم است که تأثیرات آن از نظر مکانی متغیر است. تغییرات پیش‌بینی‌شده در اقلیم، چه مستقیماً از طریق تغییر الگوهای دما و بارندگی، و چه غیرمستقیم از طریق تأثیرات گیاهان مهاجم، آفات و عوامل بیماری‌زا، طغیان سواحل، شور شدن خاک و آفات و بیماری‌ها، می‌توانند تأثیر عمیقی بر تولید محصولات کشاورزی و غذایی داشته باشند. رویدادهای اقلیمی تهدیدی جدی برای امنیت غذایی جهانی، توسعه پایدار و ریشه‌کنی فقر بوده، انتظار می‌رود تا سال ۲۰۵۰، جمعیت جهان یک سوم افزایش یابد و بیشترین افزایش در کشورهای در حال توسعه رخ دهد. فائو تخمین می‌زند که اگر روند فعلی رشد درآمد و مصرف بدون کاهش ادامه یابد، تولید کشاورزی باید ۶۰ درصد رشد کند تا تقاضای افزایش یافته مورد انتظار برای غذا و خوراک دام را برآورده کند. برای تغذیه جمعیت رو به رشد جهان و فراهم کردن زمینه رشد اقتصادی و کاهش فقر، کشاورزی باید دستخوش تحول قابل توجهی شود. این کار با تغییرات اقلیمی دشوارتر خواهد شد. رویدادهای شدید آب و هوایی و افزایش غیرقابل پیش‌بینی بودن الگوهای آب و هوایی، پیش از این بر کشاورزی و امنیت غذایی تأثیر گذاشته و منجر به کاهش تولید و کاهش درآمد در مناطق آسیب‌پذیر شده است. کشاورزی نیاز به گذار به سیستم‌هایی دارد که پربازده‌تر باشند، از نهاده‌ها به طور کارآمدتری استفاده کنند، تغییرپذیری کمتر و ثبات بیشتری در خروجی‌های خود داشته باشند و در برابر خطرات، شوک‌ها و تغییرات اقلیمی بلندمدت انعطاف‌پذیرتر باشند. این تحول باید بدون تخریب منابع طبیعی انجام شود. همچنین باید منجر به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و افزایش جذب‌کننده‌های کربن شود که به طور قابل توجهی در کاهش تغییرات اقلیمی نقش خواهد داشت. نوآوری کشاورزی برای رسیدگی به مسائل بالقوه تغییرات اقلیمی ضروری است. این شامل مدیریت بهتر خاک، فناوری صرفه‌جویی در مصرف آب، تطبیق محصولات با محیط، معرفی انواع مختلف محصولات، تناوب زراعی، استفاده مناسب از کود و حمایت از استراتژی‌های سازگاری مبتنی بر جامعه است. در سطح دولتی و جهانی، تحقیقات و سرمایه‌گذاری‌ها در بهره‌وری و زیرساخت‌های کشاورزی باید انجام شود تا تصویر بهتری از مسائل مربوطه و بهترین روش‌ها برای رسیدگی به آنها به دست آید. سیاست‌ها

و برنامه‌های دولتی باید یارانه‌های دولتی حساس به محیط زیست، کمپین‌های آموزشی و مشوق‌های اقتصادی و همچنین بودجه، بیمه و شبکه‌های ایمنی برای جمعیت‌های آسیب‌پذیر فراهم کنند. علاوه بر این، ارائه سیستم‌های هشدار اولیه و پیش‌بینی‌های دقیق آب و هوا به مناطق فقیر یا دورافتاده، امکان آمادگی بهتر را فراهم می‌کند. به طور کلی، سیستم‌های اطلاعاتی کشاورزی ترکیبی از فناوری‌ها و روش‌های جدید است که هدف آنها استفاده بهتر از حجم عظیم و با کیفیت بالای اطلاعات اقلیمی و آب‌وهوایی است که در حال حاضر در دسترس هستند. استفاده از فناوری‌های جدید، مانند تلفن‌های هوشمند و اینترنت، ایجاد و بهره‌برداری از خدمات اقلیمی را ممکن ساخته است و هوش مصنوعی آنها را حتی مؤثرتر خواهد کرد. همه بخش‌های تولیدی خصوصا بخش کشاورزی می‌توانند از خدمات اقلیمی بهره‌مند شوند زیرا همه آنها به طور مستقیم یا غیرمستقیم به آب و هوا و اقلیم وابسته هستند. سرمایه‌گذاری در خدمات اقلیمی مربوط به بخش کشاورزی و تولید مواد غذایی می‌تواند مزایای اقتصادی چند برابری از نظر تضمین تولید و کفایت جهانی غذا داشته باشد. بدیهی است که خدمات اقلیمی به سرعت و کارآمد رشد خواهد کرد زیرا فناوری‌هایی که از آنها پشتیبانی می‌کنند، روز به روز اقتصادی‌تر می‌شوند و در عین حال می‌توانند توسط افراد غیرمتخصص نیز مورد استفاده قرار گیرند. علاوه بر این، کاهش و سازگاری با تغییرات اقلیمی به ابزارها و روش‌هایی نیاز دارد که به طور مداوم کار کنند و جریان مداوم و دو طرفه اطلاعات را برای همه ذینفعان فراهم کنند.

Impacts of Climate Change on Ecosystem, Food security and Agricultural production

Asgar Shirinzadeh1*

1.Department of Agronomy, Parsabad Moghan Branch, Islamic Azad University, Parsabad Moghan, Iran

Asgar.shirinzadeh@gmail.com

ABSTRACT

As the world population continues to grow, agricultural land and food production are increasingly affected by climate change. The agricultural sector faces serious challenges in achieving the Sustainable development goals due to the direct and indirect impacts of ongoing climate change. Although many industries are facing the challenge of climate change, its impact on the agricultural industry is enormous. Irrational climate change has raised imminent public concerns, as biodiversity, ecosystems, and adequate food production and supply are under constant threat. It is essential to understand the ecological dynamics of these climate impacts, identify hotspots of vulnerability and resilience, and identify management interventions that may help the biosphere become resilient to climate change. Food production systems are negatively threatened by changing climate patterns, thereby increasing the risk of food poverty. This has led to a worrying situation regarding global food patterns, especially in countries where agriculture plays a significant role in their economies and productivity levels. Climate change and the resulting shift in temperature ranges have put the survival and viability of many species at risk, which has exacerbated biodiversity loss by gradually shifting ecological structures. The indirect impact of climate change results in lower quality and higher costs of food, as well as inadequate food distribution systems. This review emphasizes the need to implement policies aimed at mitigating the impacts of climate change, both at the regional and global scales. The content of this article has been collected from articles in Google Scholar, PubMed, and Crossref to help readers understand this topic. Government involvement is essential for the

long-term progress of the nation, as it ensures strict accountability for the instruments and regulations already implemented to create advanced climate policies. Therefore, mitigating or adapting to the impacts of climate change is crucial because, to ensure global survival, addressing this global threat requires a global collective commitment to mitigate its dire consequences.

Keywords: Climate Change, Sustainable Development, Biodiversity, Food Scurity

References

Allan, R. P., Arias, P. A., Berger, S., Canadell, J. G., Cassou, C., & Chen, D., et al. (2023). "Summary for policymakers," in Climate change 2021: the physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. (eds.) V. Masson-Delmotte, P. Zhai, and A. Pirani. (Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press), 3–32.

Amegnaglo, C.J., Anaman, K.A., Mensah-Bonsu, A., Onumah, E.E., & Amoussouga Gero, F. (2017)Contingent Valuation Study of the Benefits of Seasonal Climate Forecasts for Maize Farmers in the Republic of Benin, West Africa. Climate Services. 6, 1–11.

Antwi-Agyei, P., Dougill, A.J., & Abaidoo, R.C. (2021). Opportunities and Barriers for Using Climate Information for Building Resilient Agricultural Systems in Sudan Savannah Agro-Ecological Zone of North-Eastern Ghana. Climate Services , 22, 100226.

Asfew, M., & Bedemo, A. (2022). Impact of climate change on cereal crops production in Ethiopia Advances in. Agriculture. 1, 2208694

Azzopardi, B., Balzan, M.V., Cherif, S., Doblas-Miranda, E., dos Santos, M., Dobrinski, P., Falder, M., Hassoun, .E.R., Giupponi, C., & Koubi, V.V. (2020). Climate and Environmental Change in the Mediterranean Basin–Current Situation and Risks for the Future. First Mediterranean Assessment Report; MedECC: Marseille, France, 2020.

Blanco, C., & Raurich, X. (2022). Agricultural composition and labor productivity. Journal of Develoment Economice. 158, 102934.

Brown, M.E., Mugo, S., Petersen, S., & Klauser, D. (2022). Designing a Pest and Disease Outbreak Warning System for Farmers, Agronomists and Agricultural Input Distributors in East Africa. Insects , 13, 232.

Boon, E.; Wright, S.J.; Biesbroek, R.; Goosen, H.; Ludwig, F. Successful Climate Services for Adaptation: What We Know, Don't Know and Need to Know. Clim. Serv. 2022, 27, 100314.

Bolster, C.H., Mitcheii, R., Kitts, A., & Campbell, A.l (2023) Chapter. 11. Agriculture, food systems, and rural communities. In: Fifth National Climate Assessment. U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, USA., 11-4.

Borgomeo,E., Vadheim,B., Woldeyes,F.B., Alamirew,T., Tamru, S., Charles, K.J., Kebede,S., Walker, O. (2017). The distributional and multi-sectoral impacts of rainfall shocks: evidence from computable general equilibrium modelling for the Awash Basin Ethiopia. Ecological Economics. 146 , 621-632.

Buontempo, C., Hutjes, R., Beavis, P., Berckmans, J., Cagnazzo, C., Vamborg, F., Thépaut, J.N., Bergeron, C., Almond, S., & Amici, A., et al. (2020). Fostering the Development of Climate Services through Copernicus Climate Change Service (C3S) for Agriculture Applications. Weather Clim. Extremes , 27, 100226.

Blundo-Canto, G., Andrieu, N., Soule Adam, N., Ndiaye, O., & Chiputwa, B. (2021). Scaling Weather and Climate Services for Agriculture in Senegal: Evaluating Systemic but Overlooked Effects. Climate Services, 22, 100216.

Buontempo, C., Burgess, S.N., Dee, D., Pinty, B., Thépaut, JN., Rixen, M., Almond, S., Armstrong, D., Brookshaw, A., & Alos, A.L., et al. (2022). The Copernicus Climate Change Service: Climate Science in Action. Bull. Am. Meteorological Society. 103, E2669–E2687.

Brunelle, T., Chakir, R., Carpentier, A., Dorin, B., Goll, D., Guilpart, N., Maggi, F., Makowski, D., Nesme, T., & Roosen, J., et al. (2024). Reducing chemical inputs in agriculture requires a system change. Communications Earth & Environment. 5, 369

Cabeza-Ramírez, L.J., Guerrero-Baena, M.D., Luque-Vílchez, M., & Sánchez-Cañizares, S.M. (2024). Assessing farmers' intention to adopt drought insurance. A combined perspective from the extended theory of planned behavior and behavioral reasoning theory. Intetnational Journal Disaster Risk Reduction, 113, 104818.

Cantone, C., Ivars Grape, H., El Habash, S., & Pechlivanidis, I.G. (2023). A Co-Generation Success Story: Improving Drinking Water Management through Hydro-Climate Services. Climate Services. 31, 100399.

Campos, J.C., Rodrigues, S., Sil, Â., Hermoso, V., Freitas, T.R., Santos, J.A., Fernandes, P.M., Azevedo, J.C., Honrado, J.P., & Regos, A. (2022). Climate Regulation Ecosystem Services and Biodiversity Conservation Are Enhanced Differently by Climate- and Fire-Smart Landscape Management. Environ. Res. Lett , 17, 054014.

Capa-Morocho, M., Ines, A.V.M., Baethgen, W.E., Rodríguez-Fonseca, B., Han, E., & Ruiz-Ramos, M. (2016). Crop Yield Outlooks in the Iberian Peninsula: Connecting Seasonal Climate Forecasts with Crop Simulation Models. Agricutural Systems, 149, 75–87.

Carter, E., and Oroy, K. (2024). Empowering change: How artificial intelligence is transforming climate mitigation efforts EasyChair Preprint No. 12679. Available at: https://easychair.org/publications/preprint/zpJMX

Cegnar, T., Boogaard, H., Finkele, K., Lalic, B., Raymond, J., Lifka, S., et al. (2023). Toward effective communication of agrometeorological services. Advances in Science and Research, 20, 9–16.

Centrone, F.A., Mosso, A., Busato, P., & Calvo, A. (2017). Water Gender Indicators in Agriculture: A Study of Horticultural Farmer Organizations in Senegal. Water, 9, 972.

Chiarella, C., Meyfroidt, P., Abeygunawardane, D., & Conforti, P. (2023). Balancing the trade-offs between land productivity, labor productivity and labor intensity. Ambio, 52, 1618–1634.

Cheng, W., Li, Y., Zuo, W., Du, G., & Stanny, M. (2024). Spatio-temporal detection of agricultural disaster vulnerability in the world and implications for developing climate-resilient agriculture. Science of The Total Environment. 928, 172412.

Christel, I., Hemment, D., Bojovic, D., Cucchietti, F., Calvo, L., Stefaner, M., & Buontempo, C. (2018). Introducing Design in the Development of Effective Climate Services. Climate Services, 9, 111–121

Cook, B.I., & Wolkovich, E.M. (2016). Climate Change Decouples Drought from Early Wine Grape Harvests in France. Nature Climate Change , 6, 715–719.

Dai, Z.Z., Chang, S., Zhao, G.R., Duan, J.J., Liang, H.Y., Zhu, Z.Y., Liu, S.L., Feng, Y.Z., & Wang, X. (2025). Unlocking China's grain yield potential: Harnessing technological and spatial synergies in diverse cropping systems. Agricultural Systems. 226, 104308.

Dayamba, D.S., Ky-Dembele, C., Bayala, J., Dorward, P., Clarkson, G., Sanogo, D., Diop Mamadou, L., Traoré, I., Diakité, A., & Nenkam, A., et al. (2018). Assessment of the Use of Participatory Integrated Climate Services for Agriculture (PICSA) Approach by Farmers to Manage Climate Risk in Mali and Senegal. Climate Services , 12, 27–35.

Domke, G.M., & Christopher, F., et al. (2023). Ch. 7: Forests. Fifth National Climate Assessment. U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, p. 7-16.

Dong, Y., Xu, F., Liu, L., Du, X., Ren, B., Guo, A., Geng, Y., Ruan, C., Ye, H., & Huang, W., et al. (2020). Automatic System for Crop Pest and Disease Dynamic Monitoring and Early Forecasting. IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sensing , 13, 4410–4418.

Dong, M., Zhao, J., Li, E., Liu, Z., Guo, S., Zhang, Z., Cui, W., & Yang, X. (2023). Effects of Changing Climate Extremes on Maize Grain Yield in Northeast China. Agronomy. 13, 1050.

Dorrío, V., Queiruga-Dios, A., Filipe, M., Costa, P.C.M., Ángel, M., Dios, Q., Yu, Y., Appiah, D., Zulu, B., & Asamoah, K., et al. (2014). Integrating Rural Development, Education, and Management: Challenges and Strategies. Sustainability. 16, 6474.

Diouf, N. S., Ouedraogo, I., Zougmoré, R. B., Ouedraogo, M., Partey, S. T., and Gumucio, T. (2019). Factors influencing gendered access to climate information services for farming in Senegal. Gend. Technology Develoment, 23, 93–110.

Deressa, T.T., & Hassan, R.M. (2009). Economic impact of climate change on crop production in Ethiopia: evidence from cross-section measures. Journal African Economies. 18, 529-544

FAO. (2022). The state of food and agriculture 2022: leveraging automation in agriculture for transforming agrifood systems. Rome, Italy: FAO.

FAO. (2021). Global Outlook on Climate Services in Agriculture: Investment Opportunities to Reach the Last Mile; FAO: Rome, Italy.

FAO. (2019). Handbook on climate information for farming communities – what farmers need and what is available. Rome. 184 pp. License: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.

FAO. (2018). The State of Food Security and Nutrition in the World: Building climate resilience for food security and nutrition., Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, FAO.

Foley, A., & Kelman, I. (2018). EURO-CORDEX Regional Climate Model Simulation of Precipitation on Scottish Islands (1971–2000): Model Performance and Implications for Decision-Making in Topographically Complex Regions. International Journal Climatology. 38, 1087–1095.

Fazal Choudhary, T., Gupta, M., & Ali Chandio, A. (2025). Assessing the barriers to climate change adaptation: Evidence from Western Himalayan Region of India. Clim. Dev. 1–10.

Faye, B., Du, G., Li, Y., Li, Q., Diène, J.C., Mbaye, E., & Kama, R. (2025). Connecting the farmers' knowledge and behaviors: Detection of influencing factors to sustainable cultivated land protection in Thiès Region, Senegal. Journal of Rural Studies. 116, 103634.

Feng, X., Liu, D., Zhao, J., Si, W., & Fan, S. (2025). Impact of climate change on farmers' crop production in China: A panel Ricardian analysis. Humanities and Social Sciences. Communications. 12, 250.

Furtak, K., & Wolińska, A. (2023). The impact of extreme weather events as a consequence of climate change on the soil moisture and on the quality of the soil environment and agriculture—A review. CATENA. 231, 107378.

Gangopadhyay, P.K., Khatri-Chhetri, A., Shirsath, P.B., & Aggarwal, P.K. (2019). Spatial Targeting of ICT-Based Weather and Agro-Advisory Services for Climate Risk Management in Agriculture. Climate Change , 154, 241–256.

Ghosh-Jerath, S., Kapoor, R., Ghosh,U., Singh, A., Downs, S., & Fanzo, J. (2021). Pathways of climate change impact on agroforestry, food consumption pattern, and dietary diversity among indigenous subsistence farmers of Sauria Paharia tribal community of India: a mixed methods study. Frontiers in Sustainable Food System., 5 , 667297

Ge, Y., Fan, L., Li, Y., Guo, J., & Niu, H. (2023). Gender differences in smallholder farmers' adoption of crop diversification: Evidence from Shaanxi Plain, China. Climate Risk Management. 39, 100482.

Grigorieva, E., Livenets, A., & Stelmakh, E. (2023). Adaptation of Agriculture to Climate Change: A Scoping Review. Climate, 11, 202.

Gumucio, T., Hansen, J., Huyer, S., & Van Huysen, T. (2020). Gender-responsive rural climate services: a review of the literature. Climate and Development. 12, 241–254

Gunapala, R., Gangahagedara, R., Wanasinghe, W.C.S., Samaraweera, A.U., Gamage, A., Rathnayaka, C., Hameed, Z., Baki, Z.A., Madhujith, T., & Merah, O. (2025). Urban agriculture: A strategic pathway to building resilience and ensuring sustainable food security in cities. Farming Systeme. 3, 100150.

EPA. (2017). Ch. 23: Coral reefs. In: Multi-model framework for quantitative sectoral impacts analysis: A technical report for the fourth national climate assessment. Washington, DC, p. 173.

Eltazarov, S., Bobojonov., I., Kuhn, L., & Glauben, T. (2021). Mapping Weather Risk—A Multi-Indicator Analysis of Satellite-Based Weather Data for Agricultural Index Insurance Development in Semi-Arid and Arid Zones of Central Asia. Climate Services, 23, 100251.

El Bilali, H., Bassole, I. H. N., Dambo, L., & Berjan, S. (2020). Climate change and food security. Agriculral Forestry, 66, 197–210.

Emediegwu, L. E., Wossink, A., & Hall, A. (2022). The impacts of climate change on agriculture in sub-Saharan Africa: a spatial panel data approach. World Development. 158,105967.

Hansen, J., Furlow, J., Goddard, L., Nissan, H., Vaughan, C., Rose, A., Fiondella, F., Braun, M., Steynor, A., & Jack, C. (2019). Scaling climate services to enable effective adaptation action.

Hall, K.J.C., & Acharya, N. (2022). XCast: A Python Climate Forecasting Toolkit. Frontiers in Climate. 4, 953262.

Hao, Z., & Singh, V.P. (2015). Drought characterization from a multivariate perspective: A review. Journal of Hydrology. 527, 668–678.

Heikonen, S., Heino, M., Jalava, M., Siebert, S., Viviroli, D., & Kummu, M. (2025). Climate change threatens crop diversity at low latitudes. Nat Food. 6, 331–342.

Heeb, L., Jenner, E., & Cock, M.J.W. (2019). Climate-Smart Pest Management: Building Resilience of Farms and Landscapes to Changing Pest Threats. Journal of Pest Science. 92, 951–969.

HLPE. (2020). Food security and nutrition: building a global narrative towards 2030. 112 pages, available at https://www.fao.org/3/ca9731en/ca9731en.pdf, accessed 05.05.2022.

Hou, D., & Wang, X. (2025). How does agricultural insurance influence grain production scale? An income-mediated perspective. Frontiers in Sustainable Food Systems, 9, 1524874.

Hua, M., Zhou, Y., Hao, C., & Yan, Q. (2023). Analyzing the Drivers of Agricultural Irrigation Water Demand in Water-Scarce Areas: A Comparative Study of Two Regions with Different Levels of Irrigated Agricultural Development. Sustainability, 15, 14951.

Jantarasami, L.C., et al. (2018). Ch. 15: Tribes and Indigenous peoples. In: Impacts, risks, and adaptation in the United States: Fourth national climate assessment, volume II. U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, p. 583.

Jantke, K., Müller, J., Trapp, N., & Blanz, B. (2016). Is Climate-Smart Conservation Feasible in Europe? Spatial Relations of Protected Areas, Soil Carbon, and Land Values. Environmental Science & Policy. 57, 40–49.

Joshi, R., Wani,S.H., Singh, B., Bohra, A., Dar, Z.A., Lone, A.A., …, & Singla-Pareek, S.L. (2016). Transcription factors and plants response to drought stress: current understanding and future directions. Frontiers Plant Science., 7, 1029

Kamruzzaman, M., Daniell, K.A., Chowdhury, A., Crimp, S., & James, H. (2020). How Can Agricultural Extension and Rural Advisory Services Support Agricultural Innovation to Adapt to Climate Change in the Agriculture Sector? Advancements in Agricultural Development. 1, 48–62.

Khatibu, S., Ngowi, E., & Mwamfupe, D. (2022). Climate information services and crop production enhancement among sorghum and maize farmers in Kondoa and Kiteto districts. Tanzania. The Sub Saharan Journal of Social Sciences and Humanities (SSJSSH), 1, 1-11.

Kumar, S. (2020). "Agromet advisory services: tool to mitigate the effect of extreme weather events" in Sustainable Agriculture. ed. R. Patel. (Apple Academic Press), 149–172.

Kingra, P.K., Ramanjit, K., & Satinder, K. (2019). Climate change impacts on rice (Oryza sativa) productivity and strategies for its sustainable management. Indian Journal of Agricultural Scinces., 89 (2) : 171-180

Kosoe, E.A., & Ahmed, A. (2022). Climate Change Adaptation Strategies of Cocoa Farmers in the Wassa East District: Implications for Climate Services in Ghana. Climate Services. 26, 100289.

Kim, K.-H., Petri, M., Inthipunya, K., Manivong, V., Han, J., Park, J., Palao, L.K., Phouthanoxay, S., Keomanivong, S., & Silattana, S., et al. (2022). Information and Communication Technology-Based Service Platform Enabling the Co-Creation of Agrometeorological Services: A Case Study of the Laos Climate Services for Agriculture. Climate Services. 27, 100316.

Leip, D., Rovenskaya, E., & Wildemeersch, M. (2024). Risk-adjusted decision making can help protect food supply and farmer livelihoods in West Africa. Commun. Earth Environ. 5, 101.

Lesk, C., Rowhani,P., & Ramankutty, N. (2016). Influence of extreme weather disasters on global crop production. Nature, 529 (7584), 84-87

Lipper, L., Thornton, P., Campbell, B.M., Baedeker, T., Braimoh, A., Bwalya, M., Caron, P., Cattaneo, A., Garrity, D. & Henry, K., et al. (2014). Climate-Smart Agriculture for Food Security. Nature Climate Change. 4, 1068–1072.

Lipton, D., et al. (2018). Ch. 7: Ecosystems, ecosystem services, and biodiversity. In: Impacts, risks, and adaptation in the United States: Fourth national climate assessment, volume II. U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, p. 270.

Iizumi, T., Shin, Y., Kim, W., Kim, M., & Choi, J. (2018). Global Crop Yield Forecasting Using Seasonal Climate Information from a Multi-Model Ensemble. Climate Services. 11, 13–23.

Li, J., Chen, X., De Maeyer, P., Van de Voorde, T., & Li, Y. (2024). Ecological Security Warning in Central Asia: Integrating Ecosystem Services Protection under SSPs-RCPs Scenarios. Science of Total Environment. 912, 168698

Li, J., Chen, H., & Zhang, C. (2020a). Impacts of Climate Change on Key Soil Ecosystem Services and Interactions in Central Asia. Ecological Indicators. 116, 106490.

Li, J., Fei, L., Li, S., Xue, C., Shi, Z., & Hinkelmann, R. (2020b). Development of "water-suitable" agriculture based on a statistical analysis of factors affecting irrigation water demand. Science of The Total Environment. 744, 140986.

Loboguerrero Rodriguez, A.M., Hansen, J., Baethgen, W.E., & Martínez Barón, D. (2017). Climate Services and Insurance: Scaling Climate Smart Agriculture. Agricultural Development. 30, 31–34.

Mihailescu, E., & Bruno Soares, M. (2020). The Influence of Climate on Agricultural Decisions for Three European Crops: A Systematic Review. Front. Sustainable Food System. 4, 64.

Madaki, M.Y., Kaechele, H., & Bavorova, M. (2023). Agricultural Insurance as a Climate Risk Adaptation Strategy in Developing Countries: A Case of Nigeria. Climate Policy. 23, 747–762.

Masters, G., Baker, P., & Flood, G. (2010). Climate change and agricultural commodities. CABI Work Pap, 2 , 1-38

Masters, G., Baker, P., & Flood, J. (2010).Climate change and agricultural commodities. CABI Working Paper, 2, 1-38

Meque, A., Gamedze, S., Moitlhobogi, T., Booneeady, P., Samuel, S., & Mpalang, L. (2021). Numerical Weather Prediction and Climate Modelling: Challenges and Opportunities for Improving Climate Services Delivery in Southern Africa. Climate Services. 23, 100243

McElwee, P. D., et al. (2023). Ch. 8: Ecosystems, ecosystem services, and biodiversity. Fifth National Climate Assessment. U.S. Global Change Research Program, Washington, DC, p. 8-35.

Naab, F.Z. Abubakari, Z. & Ahmed, A. (2019). The Role of Climate Services in Agricultural Productivity in Ghana: The Perspectives of Farmers and Institutions. Climate Services. 13, 24–32.

Nkiaka, E., Taylor, A., Dougill, A.J., Antwi-Agyei, P., Fournier, N., Bosire, E.N., Konte, O., Lawal, K.A., Mutai, B., & Mwangi, E., et al. (2019). Identifying User Needs for Weather and Climate Services to Enhance Resilience to Climate Shocks in Sub-Saharan Africa. Environmental Research Letters. 14, 123003.

Nkuba, M.R., Chanda, R., Mmopelwa, G., Mangheni, M.N., Lesolle, D., Adedoyin, A., & Mujuni, G. (2021). Determinants of Pastoralists' Use of Indigenous Knowledge and Scientific Forecasts in Rwenzori Region, Western Uganda. Climate Services. 23, 100242.

Noar, R.D., Jahant-Miller, C.J., Emerine, S., & Hallberg, R. (2021). Early Warning Systems as a Component of Integrated Pest Management to Prevent the Introduction of Exotic Pests. Journale of Integrated Pest Management. 12, 16.

Nor, B.A., & Yusof, Y. (2025). Environmental degradation and food security in Somalia. Discover Sustainability, 6, 75.

Nosov, V., Chai, Z., & Zhang, X. (2023). The Impact of Agricultural Insurance on Planting Structure Adjustment—An Empirical Study from Inner Mongolia Autonomous Region, China. Agriculture 14, 41.

Nor, B.A., & Yusof, Y. (2023). Environmental degradation and food security in Somalia. Discov. Sustain. 6, 75.

Nyadzi, E., Werners, S.E., Biesbroek, R., & Ludwig, F. (2022). Towards Weather and Climate Services That Integrate Indigenous and Scientific Forecasts to Improve Forecast Reliability and Acceptability in Ghana. Environmental Developmen. 42, 100698.

Onyeneke, C.J., Umeh, G.N., & Onyeneke, R.U. (2023). Impact of Climate Information Services on Crop Yield in Ebonyi State, Nigeria. Climate. 11, 7.

Okaka, W. (2019). Effectiveness of Local Community Policy Responses to Climate Change Impact on Ecosystem Services for Biodiversity Conservation in the Semi-Arid Zones. In Effectiveness of Local Community Policy Responses to Climate Change Impact on Ecosystem Services for Biodiversity Conservation in the Semi-Arid Zones; Karmaoui, A., Ed.; Advances in Environmental Engineering and Green Technologies (AEEGT); IGI Global USA: Hershey, PA, USA. 304–315.

O'Neill, B., M. van Aalst, Z. Zaiton Ibrahim, L. Berrang Ford, S. Bhadwal, H. Buhaug, D. Diaz, K. Frieler, M. Garschagen, A. Magnan, G. Midgley, A. Mirzabaev, A. Thomas, & R. Warren. (2022). Key Risks Across Sectors and Regions. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. x-y..

Onyeaka, H., Nwauzoma, U.M., Akinsemolu, A.A., Tamasiga, P., Duan, K., Al-Sharify, Z.T., & Siyanbola, K.F. (2024). The ripple effects of climate change on agricultural sustainability and food security in Africa. Food Energy Security. 13, e567.

Paparrizos, S., Vignola, R., & Sutanto, S. J. (2024). Integrating user-and datadriven weather forecasts to develop legitimate, credible, and salient information services for smallholders in the global south. Scientific Reports. 14:22841.

Partey, S. T., Zougmoré, R. B., Ouédraogo, M., & Campbell, B. M. (2018). Developing climate-smart agriculture to face climate variability in West Africa: challenges and lessons learnt. Journal of Cleaner Prodution. 187, 285–295.

Qorri, D., Pergéné Szabó, E., Felföldi, J., & Kovács, K. (2024). The Role of Human Resource Management in Agricultural Labor-Saving Technologies: An Integrative Review and Science Mapping. Agriculture. 14, 1144.

Raj, S., & Garlapati, S. (2020). Extension and Advisory Services for Climate-Smart Agriculture. In Global Climate Change: Resilient and Smart Agriculture; Venkatramanan, V., Shah, S., Prasad, R., Eds.; Springer: Singapore. 273–299. ISBN 978-9-81329-856-9_13

Rodriguez, D., de Voil, P., Hudson, D., Brown, J.N., Hayman, P., Marrou, H., & Meinke, H. (2018). Predicting Optimum Crop Designs Using Crop Models and Seasonal Climate Forecasts. Scientific Reports. 8, 2231.

Roy, A., Murtugudde, R., Narvekar, P., Sahai, A.K., & Ghosh, S. (2023). Remote Sensing and Climate Services Improve Irrigation Water Management at Farm Scale in Western-Central India. Science ofTotal Environment. 879, 163003.

Rupan, R., Saravanan, R., & Suchiradipta, B. (2018). Climate Smart Agriculture and Advisory Services: Approaches and Implications for Future; Discussion Paper 1, MANAGE-Centre for Agricultural Extension Innovations, Reforms and Agripreneurship (CAEIRA); National Institute of Agricultural Extension Management (MANAGE): Hyderabad, India. 1–42.

Saleem, A., Anwar, S., Nawaz, T., Fahad, S., Saud, S., Ur Rahman, T., Khan, M.N.R., & Nawaz, T. (2024). Securing a sustainable future: The climate change threat to agriculture, food security, and sustainable development goals. Journal of Umm Al-Qura University for Applied Sciences. 1–17.

singh, C., Daron, J., Bazaz, A., Ziervogel, G., Spear, D., Krishnaswamy, J., Zaroug, M., & Kituyi, E.. (2018). The utility of weather and climate information for adaptation decision-making: current uses and future prospects in Africa and India. Climate Development. 10, 389–405.

Suckall, N., & Soares, M.B. (2022). Evaluating the Benefits of Weather and Climate Services in South Asia: A Systematic Review. Regional Environmental Change. 22, 104.

Sutanto, S.J., Paparrizos, S., Kranjac-Berisavljevic, G., Jamaldeen, B.M., Issahaku, A.K., Gandaa, B.Z., Supit, I., & van Slobbe, E. (2022). The Role of Soil Moisture Information in Developing Robust Climate Services for Smallholder Farmers: Evidence from Ghana. Agronomy. 12, 541.

Sekabira, H., Tepa-Yotto, G.T., Djouaka, R., Clottey, V., Gaitu, C., Tamò, M., Kaweesa, Y., & Ddungu, S.P. (2022). Determinants for Deployment of Climate-Smart Integrated Pest Management Practices: A Meta-Analysis Approach. Agriculture. 12, 1052

Sharma, B., Singh, V.K., Sheoran,R.K., Thakral, N.K., & Naruka, A. (2018). Heat Stress in Plants. Ann. Biol., 34 (1) ,. 70-78

Shah, H., Hellegers, P., & Siderius, C. (2021). Climate risk to agriculture: A synthesis to define different types of critical moments. Climate Risk Management, 34, 100378.

Shiferaw, B., Tesfaye, K., Kassie, M., Abate, T., Prasanna, B.M., & Menkir, A. (2014). Managing vulnerability to drought and enhancing livelihood resilience in sub-Saharan Africa: technological, institutional and policy options. Weather and Climate Extremes, 3, 67-79

Terrado, M., Calvo, L., Bojovic, D., & Christel, I. (2022). Current Practice in Climate Service Visualization: Taking the Pulse of the Providers' Community. Bull. American Meteorological Society. 103, E828–E837.

Teklewold, H., Adam, R.I., & Marenya, P. (2020). What explains the gender differences in the adoption of multiple maize varieties? Empirical evidence from Uganda and Tanzania. World Development Perspectives. 18, 100206.

United Nations. (2019). Climate change and food security: global perspectives. United Nations Publications. Available at: https://www.un.org/reports/climatefoodsecurity-2019

United Nations. (2025). https://www.un.org/en/climatechange/what-is-climate-change (2025). accessed on 2nd March 2025

U.S. Department of the Interior, National Park Service. (2022). Greater Yellowstone ecosystem. Retrieved 01/29/2022.

U.S. Climate Resilience Toolkit. (2021). Ecosystems. Retrieved 03/18/2022.

Von Schneidemesser, E., Monks, P.S., Allan, J.D., Bruhwiler, L., Forster, P., Fowler, D., Lauer, A., Morgan, W.T., Paasonen, P., & Righi, M., et al. (2015). Chemistry and the Linkages between Air Quality and Climate Change. Chemical Reviews. 115, 3856–3897. .

Vedeld, T., Mathur, M., & Bharti, N. (2019). How Can Co-Creation Improve the Engagement of Farmers in Weather and Climate Services (WCS) in India. Climate Services. 15, 100103

Viet Ha, T.T., & Zhou, W. (2024). Response of the Northeast China grain market to climate change based on the gravity model approach. Heliyon , 10, e36139.

White, C.J., Carlsen, H., Robertson, A.W., Klein, R.J.T., Lazo, J.K., Kumar, A., Vitart, F., Coughlan de Perez, E., Ray, A.J., & Murray, V., et al. (2017). Potential Applications of Subseasonal-to-Seasonal (S2S) Predictions. Meteorological Applications. 24, 315–325.

Wairimu, E., Obare, G., & Odendo, M. (2016). Factors Affecting Weather Index-Based Crop Insurance in Laikipia County, Kenya. Journal of Agricultural Extension and Rural Development.. 8, 111–121.

Wellstead, A. M., Mechling, S. M., Carter, A., & Gofen, A. (2024). Artificial intelligence possibilities to improve analytical policy capacity: the case of environmental policy innovation labs and sustainable development goals. Policy Design Practice. 7, 456–467.

WMO. (2016). Climate Services for Supporting Climate Change Adaptation. Supplement to the Technical Guidelines for The National Adaptation Plan Process. WMO-No. 1170. Geneva: WMO.

Yuan, X., Li, S., Chen, J., Yu, H., Yang, T., Wang, C., Huang, S., Chen, H., & Ao, X. (2024). Impacts of Global Climate Change on Agricultural Production: A Comprehensive Review. Agronomy. 14, 1360.

Yu, X., & Ma, Y. (2022). Spatial and Temporal Analysis of Extreme Climate Events over Northeast China. Atmosphere , 13, 1197.

Zougmoré, R.B., Partey, S.T., Ouédraogo, M., Torquebiau, E., & Campbell, B.M. (2018). Facing climate variability in sub-Saharan Africa: analysis of climate-smart agriculture opportunities to manage climate-related risks.Cah. Agric, 27, 1-9,

Zhu, H., Zhu, X., Li, Y., Ao, Y., Jia, X., Peng, P., Li, M., & Li, J. (2025). The Spatiotemporal Evolution of Geo-Disaster Resilience in China and the Impact Mechanism of Environmental Governance. Atmosphere, 16, 247.

بررسی میزان تبخیر از دریاچه سدهای خوزستان و راهکارهای کاهش آن

ناصر اورک[۱] ، نصرت فرهادی[۲]، وحید اورک[۳]

۱ کارشناس ارشد اقلیم شناسی سازمان آب و برق خوزستان nop13m@yahoo.com

۲ دکترای اقلیم شناسی دانشگاه فرهنگیان استان خوزستان، اهواز farhadi.nosrat@yahoo.com

۳ دانشجوی کارشناسی علوم کامپیوتر دانشگاه شهیدچمران، اهواز vahidorak12@gmail.com

چکیده

جلگه خوزستان در جنوبغربی ایران در جهت شیب زمین، میزبان ۵ رودخانه بزرگ و پرآب از کوههای زاگرس بوده و همین عامل زمینه ساخت سدهایی بزرگ جهت ذخیره سازی و افزایش بهره وری های متنوع از این منابع آب را فراهم آورده، هم اینک ۹ سد مخزنی بزرگ و ۲۳ سد تنظیمی و انحرافی در خوزستان وجود دارد که با توجه به روند افزایشی گرمایش جهانی، یکی از پیامدهای مستقیم آن ، افزایش نرخ تبخیر از این آب های سطحی می باشد. اقلیم گرم و خشک خوزستان و روند افزایش دما، تشدید تبخیر را دو چندان کرده است. در این مطالعه، تأثیر افزایش دمای جهانی بر تبخیر دریاچه‌های پشت سدهای خوزستان مورد بررسی قرار گرفته و مدلهای پیش‌بینی آینده و راهکارهای کاهش اتلاف آب از این پدیده تحلیل شده‌اند. نتیجه مطالعه نشان می‌دهد که در حال حاضر از دریاچه پشت سدهای مخزنی استان خوزستان سالانه حدود ۶۸۰ میلیون مترمکعب آب تبخیر شده و با مدلهای گرمایش جهانی افزایش ۳ درجه سانتیگراد دما میزان تبخیر از دریاچه سدها به حدود ۸۲۰ میلیون مترمکعب خواهد رسید.

کلمات کلیدی: تغییراقلیم، تبخیر، سد، خوزستان

مقدمه

در سال‌های اخیر، کاهش بارش‌ها، افزایش دمای متوسط هوا و بحران کم‌آبی در کشور اهمیت مدیریت منابع آب را بیش از پیش نمایان کرده است. یکی از چالش‌های مهم پیش‌روی مدیریت منابع آب در ایران، به‌ویژه در استان‌های گرمسیر همچون خوزستان، افزایش تبخیر ناشی از تغییرات اقلیمی و گرمایش جهانی است. در خوزستان، که بخش عمده‌ای از آب کشور از آن عبور میکند، پدیده تبخیر یکی از مهمترین عوامل هدررفت منابع آبی به شمار می آید. تبخیر از سطح دریاچه‌های پشت سدها نه‌تنها موجب کاهش ذخایر آبی میشود، بلکه بهره‌برداری بهینه از سدها را نیز با مشکل مواجه میسازد. با توجه به

وابستگی شدید کشاورزی، صنعت و مصارف شهری خوزستان به منابع آبی سدهای بزرگ، بررسی اثرات گرمایش جهانی بر تبخیر و ارزیابی راهکارهای کاهش آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. پیامدهای تبخیر زیاد، هدررفت منابع آبی شیرین، کاهش تولید برقآبی در فصول گرم، کاهش حجم ذخیره مخزن برای مصارف کشاورزی و شرب، تشدید بحران کم‌آبی در پایین‌دست و استان‌های همجوار می‌باشد.

در سطح جهانی گزارش IPCC (۲۰۲۱) به‌صراحت بیان میکند که افزایش دمای جهانی با احتمال بسیار بالا موجب تشدید تبخیر در مناطق خشک خواهد شد. راینر(۲۰۰۶) عوامل موثر بر روند تبخیر در استرالیا را مطالعه نمود و به این نتیجه رسید که سرعت متوسط باد روزانه به عنوان یکی از علل مهم روند تبخیر از تشت شناخته می‌شود. وانگ و همکاران(۲۰۱۶) روند افزایشی تبخیر از تشت بر روی فلات نیمه خشک لس در کشور چین، تحت شرایط آب و هوایی رو به گرم شدن را بررسی نمودند. نتیجه این تحقیق نشان داد که افزایش دما، کاهش رطوبت نسبی و کاهش پوشش کم ابر، همگی باعث افزایش تبخیر از تشت شدند، برخلاف بسیاری از نقاط جهان که افزایش پوشش کم ابر، اثرات افزایش دما و کاهش رطوبت نسبی را بر تبخیر از تشت جبران می‌کند. بنابراین در مناطق گرم و خشک، افزایش تبخیر از تشت منجر به شرایط خشک‌تر می‌شود که ممکن است وقوع خشکسالی و سیل در سراسر جهان را تشدید کند. جانسون و شارما(۲۰۰۹) روند تبخیر آب‌های آزاد استرالیا برای اقلیم‌های فعلی و آینده از طریق تشت‌های تبخیر کلاس A و مدل‌های گردش عمومی جو را مقایسه نمودند و نتیجه گرفتند تغییرات آینده تبخیر از آب‌های آزاد با استفاده از پیش‌بینی‌ها که برای دو سناریوی انتشار ارزیابی شده‌اند، به طور متوسط در سراسر استرالیا مدل‌ها افزایش ۵ درصدی تبخیر از آب‌های آزاد را تا سال ۲۰۷۰ در مقایسه با سطوح ۱۹۹۰ نشان می‌دهند. تنوع قابل توجهی در پیش‌بینی‌های مدل، به ویژه برای مؤلفه آیرودینامیکی تبخیر، وجود دارد. فرضیات افزایش تبخیر در دنیای در حال گرم شدن، باید با توجه به تنوع پارامترهای مؤثر بر تبخیر در نظر گرفته شوند. چو و همکاران (۲۰۱۶) نرخ تبخیراز یک تشت تبخیر کلاس A با دو رنگ مختلف را بصورت تجربی بررسی کردند و به این نتیجه دست یافتند که تابش جذب شده توسط دیواره تشت می‌تواند بر بیلان انرژی و نرخ تبخیر تشت تاثیر بگذارد.

مطالعات متعددی در خصوص تأثیر گرمایش جهانی بر منابع آبی ایران انجام شده است. زمانی و رحیم‌زادگان(۱۳۹۶) با استفاده از مدل تبخیر و تعرق SEBAL بر روی سد امیرکبیر تبخیر و تعرق را محاسبه و ارزیابی نمودند. نتایج این مطالعه نشان دهنده افزایش تبخیر از سطح مخزن سد در مناطق کم عمق به سمت مناطق عمیقتر بود که این مورد می‌تواند نشان دهنده کارایی نامناسب روش‌های نقطه‌ای اندازه‌گیری تبخیر باشد. در مجموع، نتایج برای برآورد تبخیر از سطح دریاچه‌های سدها بود و میتوان با توجه به شرایط مکانی و زمانی SEBAL بیانگر کارایی الگوریتم هر منطقه، از آن برای تعیین تبخیر پهنه‌های آبی شیرین استفاده نمود.

شرایعی و حقایقی مقدم(۱۳۹۹) شیوه‌های مناسب کاربردی و اقتصادی روش‌های کاهش تبخیر از سطوح آزاد را را مرور کرده‌اند و انواع روش‌های کاهش تبخیر از سطح آزاد آب را با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی در سه سطح شاخص‌های

اقتصادی، شاخص‌های اجرایی و شاخص‌های زیست محیطی و راندمان کل کاهش تبخیر، بررسی و مقایسه نمودند و در نهایت به هر روش، امتیازی کلی دادند و ۱۳ روش را اولویت‌بندی نمودند که روش توپ‌های سایه با راندمان ۹۰ درصد بهترین روش کاهش تبخیر از دریاچه پشت سدها می‌باشد. روش‌های دیگری از قبیل آبدان‌ها، پنل‌های خورشیدی، طراحی ساختمان مخزن، مدیریت بهره برداری از مخزن، پوشش چند قسمتی، پوشش‌های شناور، بادشکن‌ها، ترکیبات سایه انداز، لایروبی مخزن، گیاهان آبزی، تک لایه‌ها و الکل‌های آلیفاتیک در اولویت‌های بعدی قرار می‌گیرند.میرمحمدصادقی و همکاران(۱۳۹۸) تبخیر از سطح آزاد دریاچه سد زاینده‌رود را با استفاده از سبال و مقایسه آن با روش‌های تجربی را مطالعه نمودند. نتیجه این پژوهش نشان داد که هیچ یک از روش‌های تجربی، همبستگی مناسب و قابل قبولی با اندازه‌گیری تبخیر در محل ندارند. ولی روش سبال با ضریب تبیین ۰/۹۸ دقت بالایی در تخمین تبخیر آب نسبت به فرمول‌های تجربی در برآورد تبخیر سطحی آب از مخازن دارد. برهانی و همکاران (۱۳۹۷) با استفاده از مدلهای اقلیمی، افزایش تبخیر در سد دز را تا ۲۵ درصد تا سال ۲۰۵۰ پیش‌بینی کرده‌اند. عسگری و موسوی (۱۴۰۰) در مطالعه‌ای بر روی سد کرخه نشان دادند که در سناریوی بدبینانهSSP5-8.5 ، میزان تبخیر سالانه میتواند بیش از ۳۰ درصد رشد داشته باشد. گرمایش جهانی از طریق افزایش دمای متوسط زمین، تأثیرمستقیمی بر فرآیند تبخیراز منابع آب سطحی دارد. تبخیر، تابعی از دمای هوا، رطوبت نسبی، تابش خورشیدی و سرعت باد است که در اقلیم خوزستان به‌ویژه در فصل تابستان شدت می‌یابد. بطور کلی میزان تبخیر از دریاچه‌ها به عوامل متعددی بستگی دارد که مهم‌ترین آنها عبارتند از:

دمای هوا هرچه دما بالاتر باشد، میزان تبخیر بیشتر است.

رطوبت نسبی هوا: هوای خشک موجب افزایش تبخیر می‌شود.

سرعت باد: بادباعث جابه‌جایی بخار و افزایش نرخ تبخیر می‌شود.

تابش خورشید: شدت تابش عامل اصلی افزایش دمای سطح آب است.

ویژگی‌های سطحی آب، مساحت، عمق، دمای سطحی و جریانات در آب نیز تاثیر دارند.

داده‌ها و روش‌ها

استان خوزستان با برخورداری از جریان رودخانه های کارون ، دز ، کرخه ، جراحی ، هندیجان شاوور وکوپال (حدود ۳۳ درصد آبهای جاری کشور) نقش مهمی را در چرخه حیاتی آب در کشور ایفا نموده و سهم قابل توجهی از اهداف توسعه پایدار در بخش آب و کشاورزی را به خود اختصاص داده است. بر روی رودخانه‌های وارد شده به استان خوزستان سدهای متعددی ساخته شده است که درحال حاضر ۹ سد مخزنی در استان خوزستان درحال بهره‌برداری است. علاوه برسدهای مخزنی فعلی یک سد مخزنی دیگر مراحل پایانی ساخت خود را طی می‌کند که به زودی وارد چرخه بهره‌برداری می‌شود. همچنین ۲۳ سد تنظیمی و انحرافی در استان خوزستان وجود دارد که مجموع سطح آب جمع شده در پشت آنها عدد قابل ملاحظه‌ای است که میزان اتلاف آب سطحی را بیشتر می‌کند. مساحت سطح آب دریاچه‌های این سدها بسته به فصل

متغیر است اما بطور متوسط حدود ۳۱۳ کیلومتر مربع می‌باشد. جدول شماره(۱) اطلاعات پایه دریاچه سدهای استان خوزستان را نشان می‌دهد. از جمله سدهای مهم استان خوزستان می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

سدکرخه: یکی از بزرگترین سدهای خاکی خاورمیانه

سد دز: با ارتفاع زیاد و یکی از قدیمی‌ترین سدهای بتنی ایران

سدگتوند علیا: از مهمترین سدهای برقابی کشور

جدول شماره(۱) مشخصات دریاچه پشت سدهای مخزنی استان خوزستان

سد	تراز متوسط متر	حجم میلیون مترمکعب	سطح کیلومترمربع	متوسط سالانه دما سانتیگراد	متوسط سالانه تبخیر متر
دز	۳۳۲.۴۶	۱۵۷۶.۰۲	۴۵.۹۹	۲۴.۲	۲.۲۴۴۲
عباسپور	۵۱۵	۱۶۲۷.۴۹	۴۰.۶۶	۲۲.۹	۱.۸۸۹۳
کرخه	۱۸۷.۱	۱۵۳۲.۳۸	۷۲.۲۱	۲۶.۴	۲.۶۱۰۳
مارون	۴۸۶.۲	۷۳۷.۱۸	۱۸.۹۷	۲۴.۵	۱.۹۶۷
مسجدسلیمان	۳۶۹	۲۳۳.۴۸	۷.۲۵	۲۵.۳	۲.۰۲۷۹
کارون ۳	۸۲۱.۹۴	۱۷۶۵.۶۸	۳۵.۸	۲۲.۴	۲.۰۵۰۳
کارون ۴	۱۰۱۰.۳۸	۱۷۴۵.۹۶	۲۵.۴۲	۲۲.۹	۲.۰۷۶۲
گتوند علیا	۲۰۴.۶	۲۶۰۶	۶۲.۲	۲۴	۱.۹۹۷۸
جره	۴۸۲.۱۱	۱۳۴.۳۳	۴.۷۹	۲۳.۶	۲.۱۶۴۴

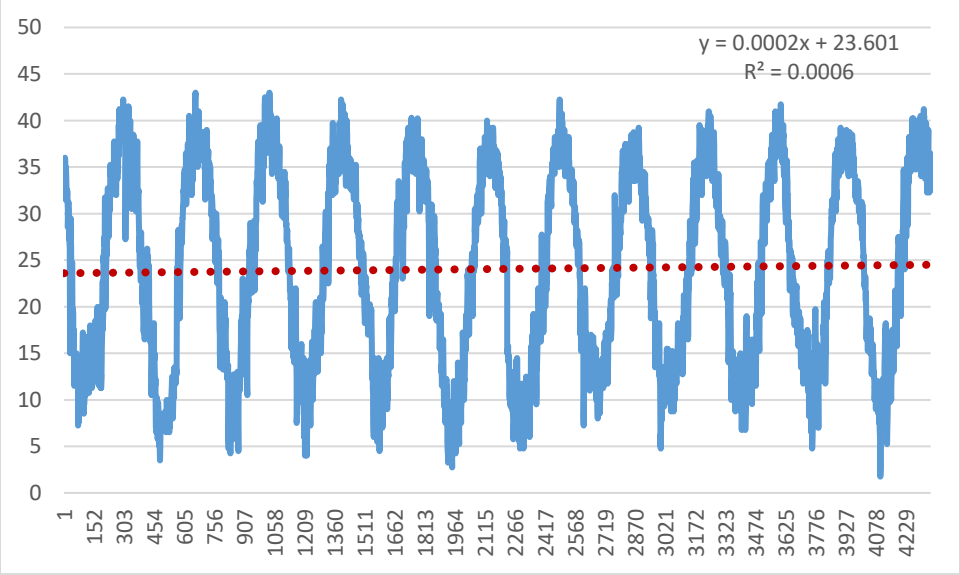
برای انجام این مطالعه داده‌های بلندمدت تراز، حجم و سطح سدهای استان خوزستان و همچنین داده‌های دما و تبخیر نزدیکترین ایستگاه‌های تبخیر سنجی کنار دریاچه سدها از سازمان آب و برق خوزستان اخذ و پس از بررسی دقت و صحت آنها، دسته بندی و با روش‌های آماری جداول و نمودارهای مناسب تهیه و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. داده‌های تبخیر

از تشت کلاس A امریکایی بعد از اعمال ضریب ۰.۷ به داده‌های واقعی‌تر تبدیل گردید و در تجزیه و تحلیل از این داده‌ها استفاده شد.

پیش‌بینی دقیق میزان تبخیر در آینده نیازمند استفاده از مدلهای اقلیمی و هیدرولوژیکی است. مدلهای گردش عمومی جو (GCM)در کنار مدلهای منطقه‌ای (RCM) و سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای نظیر SSP2-4.5 یاSSP5-8.5 ، امکان پیش‌بینی تغییرات اقلیمی را فراهم می‌کنند. یکی از روش‌های آماری که در این پژوهش از آن استفاده شد، رگرسیون خطی و همبستگی بین پارامترهای دما و تبخیر بوده که با استفاده از نرم‌افزارهای spss و excel اشکال و روابط بین متغیرها ترسیم و محاسبه شد که نتایج آن در ادامه مطلب ارائه گردیده است.

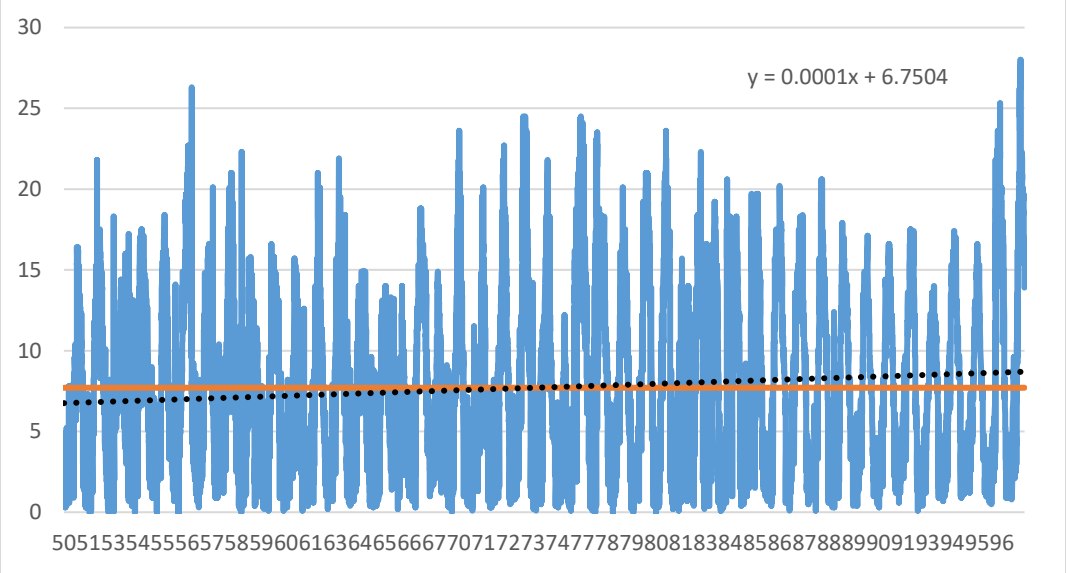
بحث و نتایج

برای بررسی بهتر و دقیقتر از داده‌های سد شهیدعباسپور به عنوان یک نمونه از سدهای مخزنی استفاده شد و این بدین معنا است که وضعیت دیگر سدهای استان تقریبا مشابه سد شهیدعباسپور می‌باشد. شکل شماره(۱) روند افزایش دمای روزانه طی دوره آماری را نشان می‌دهد. الگوی ثابت نوسانات دما در سد شهیدعباسپور منطبق بر فصول سال است به نحوی که در دردوره گرم دماهای بالای ۳۵ درجه سانتیگراد غالب هستند و در دوره سرد دماهای بین ۱۰ تا۱۵ درجه سانتیگراد غلبه دارند. همچنین در زمان تغییر دوره گرم به سرد و بالعکس دما در حوالی میانگین سیر می‌کند. با توجه به خط روند، افزایش دما در دوره آماری اتفاق افتاده است هرچند میزان شیب روند بسیار کند بوده اما این مقدار برای افزایش میزان تبخیر از سطح آب دریاچه‌ها کفایت می‌کند.



شکل شماره (۱) نوسانات دما در ایستگاه سد شهید عباسپور

شکل(۲) نوسانات تبخیر روزانه و روند آن در طی دوره آماری در ایستگاه سد شهیدعباسپوررا نشان میدهد. این شکل بیانگر افزایش میزان تبخیراز سطح دریاچه این سد است که باتوجه به جدول شماره(۲) مقدار آب تلف شده از دریاچه از ۷۶ میلیون مترمکعب در سال بیشتر خواهدشد. همانطور که مشاهده می‌شود در همه سال‌ها روزهای با تبخیر صفر ویا نزدیک به صفر وجود دارد که بدلیل سرما و احیانا بارندگی در آن روز میزان تبخیر بسیار اندک است. اما در فصل گرم بدلیل دمای زیاد میزان تبخیر روزانه بیشتر از ۱۰ میلیمتر می‌باشد.

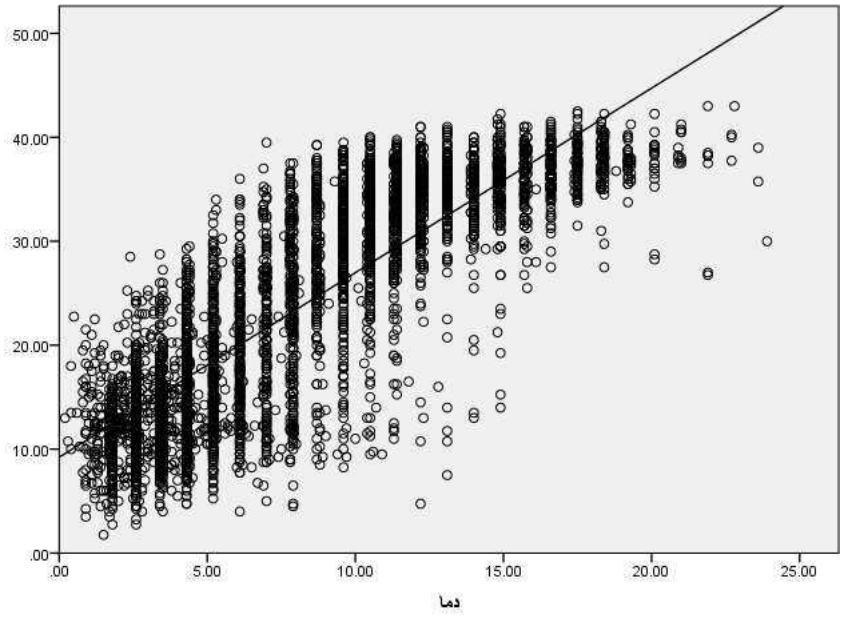


شکل شماره (۲) روند تبخیر روزانه در دریاچه سد شهید عباسپور

با افزایش دمای هوا در اثر گرمایش جهانی، ظرفیت جو برای نگهداری بخار آب افزایش یافته و رطوبت نسبی کاهش می‌یابد. این امر، پتانسیل تبخیر را بیشتر کرده و سبب افزایش تبخیر سالانه می‌شود. مدلهای اقلیمی نشان میدهند که دمای سالانه در خوزستان تا سال ۲۰۵۰ میتواند تا ۳ درجه سانتیگراد افزایش یابد. برآورد میشود که در نتیجه این گرمایش، تبخیر از دریاچه سدهای استان بین ۱۰ تا ۳۰ درصد افزایش یابد. این بدین معناست که بین ۷۰ تا ۲۰۰ میلیون مترمکعب از آب پشت سدها تبخیر خواهد شد. قطعا در زمانی که هوا گرمتر و نیاز به آب هم بیشتر خواهد شد از دست دادن این میزان آب با کیفیت، خسارت بسیار بزرگ و جبران ناپذیری خواهد بود. رابطه دما و تبخیر در سطح دریاچه سد شهید عباسپور در شکل شماره (۳) نشان داده شده است. براساس آنچه در شکل نمایش داده شده است افزایش دما موجب افزایش ظرفیت رطوبتی جو می‌شود و همین باعث بالارفتن تبخیر از سطح تبخیر شونده می‌گردد. دریاچه سدها که بطور مصنوعی ایجاد شده‌اند آب در دسترس طبیعت را برای تبخیر فراهم می‌سازند و موجبات اتلاف منابع آب را بوجود می‌آورند.

تلفات تبخیر نقش مهمی در بیلان آب مخازن سدها دارد با توجه به اینکه تمامی سدهای موجود در استان خوزستان در منطقه کوهپایه ای احداث شده‌اند که بدلیل خشکی هوا و دمای زیاد این منطقه میزان تبخیر از سطح آزاد آب نیز بسیار

زیاد می‌باشد در نتیجه حجم زیادی از آب پشت سدها تبخیر می‌گردد.. عوامل فیزیکی که نقش عمده‌ای در روند تبخیر دارند یکی عمق سطح آب دریاچه‌ها است که این ویژگی نقش مهمی در ذخیره انرژی دارد. تفاوت اساسی بین سطح آب کم عمق و یک سطح آب عمیق از حساسیت سطح کم عمق به تغییرات آب و هوایی فصلی ناشی می‌شود. یک سطح کم عمق تغییرات محیطی را از نزدیک دنبال می‌کند و سطح آبهای عمیق با تاخیر دمایی مهم پاسخی متفاوت به مبادلات آب و هوایی ارائه می‌دهد. برخی از دریاچه سدهای خوزستان در دره‌های عمیق واقع شده‌اند به همین دلیل عمق آب آنها زیاداست ولی در برخی از سدها که در دره‌های کم عمق کشیده شده‌اند عمق آب کمتر است در نتیجه این سدها و حاشیه کم عمق دریاچه‌های عمیق میزان تبخیر بیشتری دارند.



شکل(۳) رابطه دما و تبخیر روزانه در دریاچه سدشهیدعباسپور

دومین عامل گستردگی پهنه آبی دریاچه ها در جهت وزش باد غالب نیز بر افزایش تبخیر تاثیر می‌گذارد، بدین معنی که هرچه گستردگی پهنه آبی در مسیر وزش بادها بیشتر باشد شدت تبخیر افزونتر خواهد بود. در سطح ناهموار و نامنظم، اصطکاک سرعت باد را کاهش می‌دهد اما تمایل به ایجاد تلاطم دارد. بنابراین با یک مقدار جزئی افزایش سرعت باد، تبخیر بیشتر می‌شود. دریاچه سدهای خوزستان غالبا در معرض وزش بادهای شدید و تقریبا دائمی قرار دارند. سومین عامل که در برخی از سدهای خوزستان تاثیر زیادی دارد شوری آب است. افزایش شوری به میزان یک درصد باعث کاهش تبخیر با کاهش فشار آب یک درصد می شود. این فشارکاهش یافته مستقیما با غلظت محلول نمکی متناسب است. سدهای گتوند علیا و مارون که دارای غلظت نمک بیشتری هستند تحت تاثیر این پدیده می‌باشند. درجدول شماره(۲) میانگین سالانه میزان تبخیر ازسدهای استان نشان داده شده است.

جدول شماره(۲) میزان تبخیر از دریاچه سدهای استان خوزستان

سد	حجم تبخیرسالانه میلیون مترمکعب
دز	۱۰۳.۲۱
عباسپور	۷۶.۸۱
کرخه	۱۸۸.۴۶
مارون	۳۷.۳۱
مسجدسلیمان	۱۴.۷
کارون ۳	۷۳.۴
کارون ۴	۵۲.۷۷
گتوند علیا	۱۲۴.۶۷
جره	۱۰.۳۶
جمع	۶۸۱.۶۹

همبستگی بین میانگین سطح دریاچه سدها با میزان تبخیر از آنها حدود ۹۷/. می‌باشد.تاثیر مستقیم سطح دریاچه در میزان تبخیر است هرچند در فصول سرد سال که سطح دریاچه‌ها افزایش می‌یابد و بدلیل دمای پایین میزان تبخیر اندک می‌باشد ولی دمای بسیار زیاد فصول گرم با تبخیر زیاد، کمی تبخیر فصول سرد را جبران می‌نمایند.

براساس سناریوهای ارائه شده توسط IPCC که به صراحت عنوان می‌کنند چنانچه گرمایش جهانی با همین روند ادامه داشته باشد میانگین دمای هوا تا سال ۲۰۵۰ حدود ۳ درجه سانتیگراد افزایش خواهد یافت. و همچنین مطابق با رابطه کلازیوس – کلاپیروس که عنوان می‌کند با افزایش دما، ظرفیت نگهداری بخار آب در هوا افزایش می‌یابد. براساس این رابطه، با هر درجه سانتیگراد افزایش دما، ظرفیت بخار آب در هوا بین ۷٪ تا ۱۰٪ افزایش می‌یابد. در این صورت در سال ۲۰۵۰ میزان تبخیر از سدهای مخزنی و سدهای تنظیمی و انحرافی به حدود یک ۸۸۶ میلیون مترمکعب که با اضافه شدن سد دردست احداث بالارود و همچنین سدهای تنظیمی و انحرافی این مقدار به یک میلیارد مترمکعب هم خواهد رسید که این حجم آب معادل مصرف بسیاری از شهرها، کارخانجات و حتی اراضی کشاورزی می‌باشد.

با توجه به بحران آبی کشور و افزایش تبخیر در اثر گرمایش جهانی، کاهش بارندگی و خشکسالی‌های پی در پی، افزایش مصارف در همه بخش‌ها، انتقال آب به دیگر حوضه‌ها موجبات کاهش منابع آب را بوجود آورده است به همین دلیل به‌کارگیری راهکارهای مدیریتی و فنی برای کاهش پدیده تبخیر از منابع آب سطحی بویژه از دریاچه پشت سدهای مخزنی و تنظیمی و انحرافی ضرورت دارد. در زیر به برخی از این راهکارها اشاره می‌شود که در کشورهای مختلف که با کمبود منابع آب و خشکسالی دست به گریبان هستند مورد استفاده قرار گرفته است.

این راهکارهاعبارتند از:

۱- پوشش های شناور :(Floating Covers) استفاده از توپها یا صفحات شناور پلیمری که میتوانند تا ۸۰٪ تبخیر را کاهش دهند استفاده از مونولایه‌ها مانند الکل‌های چرب که بر سطح آب پخش می‌شود و تبخیر را کاهش می‌دهند.
۲- کاهش سطح آزاد آب: با عمق بخشی به مخازن به‌جای گسترش سطحی، سطح تماس آب با هوا کاهش مییابد.
۳- راهکارهای زیست محیطی ایجاد بادشکن‌های طبیعی یا مصنوعی برای کاهش سرعت باد و افزایش پوشش گیاهی اطراف دریاچه‌ها از جمله فعالیت‌هایی است که می‌تواند در کاهش میزان تبخیر موثر باشد.
۴-استفاده از افزودنی‌های شیمیایی :(Monolayers) لایه‌های نازکی از مواد شیمیایی خاص که با ایجاد مانع سطحی، تبخیر را محدود میکنند.
۵- استفاده از انرژی خورشیدی با نصب صفحات خورشیدی روی سطح دریاچه‌ها که همزمان تبخیر را کاهش می‌دهد و انرژی تجدیدپذیر تولید می‌کنند.
۶- بهره‌برداری بهینه از سد: رهاسازی آب در زمان‌های کم‌تبخیر مانند ساعات شب یا فصول سردتر.
۷- افزایش پوشش گیاهی اطراف مخزن: به‌منظور تعدیل دما و کاهش سرعت باد در سطح دریاچه.

نتیجه‌گیری

افزایش دما ناشی از گرمایش جهانی یکی از تهدیدات جدی برای منابع آب سطحی در خوزستان است. افزایش میزان تبخیر از دریاچه‌های پشت سدها نه‌تنها سبب کاهش حجم آب ذخیره شده میشود، بلکه امنیت آبی منطقه را نیز به مخاطره می‌اندازد. استفاده از مدلهای دقیق برای پیش‌بینی روندهای آتی، به همراه اجرای راهکارهای نوین همچون پوشش‌های شناور، بهره‌برداری هوشمندانه و افزودنی‌های شیمیایی، میتواند نقش مؤثری در کاهش این خسارات داشته باشد. تصمیم-گیری صحیح در این زمینه نیازمند توجه جدی سیاستگذاران، نهادهای مسئول آب کشور و بهره‌برداران محلی است. تبخیر از دریاچه سدهای خوزستان چالش بزرگی برای مدیریت منابع آب است که باید با رویکردی چندجانبه و تلفیقی به آن پاسخ داد. استفاده از فناوری‌های نوین، بکارگیزی روش‌های بومی و بهینه سازی بهره‌برداری از سدها می‌تواند در کاهش تبخیر موثر باد.

از سازمان آب و برق خوزستان بخاطر در اختیار گذاشتن داده‌ها و اطلاعات مربوط به ایستگاه‌ها و سدهای درحال بهره‌برداری تقدیر و تشکر می‌گردد.

منابع

برهانی، م.، و همکاران. (۱۳۹۷). بررسی اثرات تغییر اقلیم بر تبخیر-تعرق سد دز. نشریه علوم آب ایران.

عسگری، س.، موسوی، ع. (۱۴۰۰). مدلسازی تأثیر گرمایش جهانی بر تبخیر سد کرخه با استفاده از مدلهای اقلیمی. فصلنامه مدیریت منابع آب.

زمانی، سعیده و رحیم‌زادگان، مجید(۱۳۹۷) محاسبه و ارزیابی تبخیر در دریاچه پشت سدها با استفاده از مدل تبخیر و تعرق sebal مطالعه موردی: سدامیرکبیر، فصلنامه علمی-پژوهشی اطلاعات جغرافیایی(سپهر) دوره۲۷، شماره ۱۰۶صص ۶۹-۵۷

شرایعی، مریم و حقایقی مقدم، سیدابوالقاسم(۱۳۹۹) مروری بر روشه‌های کاهش تبخیر از سطح آزاد آب و معرفی شیوه‌های مناسب کاربردی و اقتصادی. نشریه آب و توسعه پایدار، سال هفتم، شماره ۲ صص ۵۳-۶۲

میرمحمدصادقی، سیدامیر و همکاران(۱۳۹۸) برآوردتبخیر از سطح آزاددریاچه سدزاینده‌رود با استفاده از سبال و مقایسه روش‌های تجربی. نشریه آب و خاک(علوم و صنایع کشاورزی) جلد۳۳، شماره۴، صص۵۳۷-۵۴۸

Ipcc,sixth assessment trport ap6 (2021) climate change 2021- the physical science basis, intergovernmental panel on climate change.

Chu, chia-ren. et al(2016) Evaporation Rate of a White Class A Evaporation Pan. American Society of Civil Engineers…..1-10

Johanson, Fiona and ashish sharma (2009) A Comparison of ustralian Open Water Body Evaporation Trends for Current and Future Climates Estimated from Class A vaporation Pans and General Circulation Models. Journal of hydrometeorology. vol 11..pp 105-121

Hang.z .Et al(2016) Increasing Trend of Pan Evaporation over the Semiarid Loess Plateau under a Warming Climate. Journal of applied meteorology and climatology volume 55 pp:2007-2020

Rayner.d.p (2006) Wind Run Changes: The Dominant Factor Affecting Pan Evaporation Trends in Australia. Journal of climate volume 20 pp.3379-3394

investigating the rate of evaporation from Khuzestan dam lakes and strategies to reduce it

Naser Orak[1], Nosrat Farhadi[2], Vahid Orak[3]

1 Master of Science in Climatology, Khuzestan Water and Electricity Organization nop13m@yahoo.com

2 PhD in Climatology, Farhangian University of Khuzestan Province, Ahvaz farhadi.nosrat@yahoo.com

3 Bachelor of Science in Computer Science, Shahid Chamran University, Ahvaz vahidorak12@gmail.com

Abstract

The Khuzestan Plain in southwestern Iran is home to five large, high-flowing rivers from the Zagros Mountains, and this factor has provided the basis for the construction of large dams to store and increase the various productivity of these water resources. Currently, there are nine large reservoir dams and 23 regulating and diversion dams in Khuzestan, and due to the increasing trend of global warming, one of its direct consequences is the increase in the evaporation rate of these surface waters. The hot and dry climate of Khuzestan and the trend of increasing temperatures have doubled the intensity of evaporation. In this study, the effect of increasing global temperatures on the evaporation of lakes behind Khuzestan dams is examined, and future prediction models and strategies for reducing water loss from this phenomenon are analyzed. The study results show that currently, about 680 million cubic meters of water evaporates annually from the lake behind the reservoir dams in Khuzestan province, and with global warming models of a 3-degree Celsius increase in temperature, the rate of evaporation from the lake and dams will reach about 820 million cubic meters.

Keywords: Climate change, evaporation, dam, Khuzestan

ارزیابی کیفیت آب قنات در آبخوان ارومیه با استفاده از شاخص کیفیت آب زیرزمینی (GQI)

لیلا بایایی[۱]، نازیلا علایی[۲] ، میرحسن میریعقوب‌زاده [۳]

۱- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ایران
۲- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ایران
۳- دانشیار دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ایران

آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول (m.miryaghoubzadeh@urmia.ac)

چکیده

قنات‌ها به‌عنوان یکی از قدیمی‌ترین روش‌های بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی، نقش مهمی در تأمین آب شرب و کشاورزی در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران دارند. ارزیابی منظم کیفیت آب این منابع، برای مدیریت پایدار و جلوگیری از افت کیفیت ضروری است. این تحقیق با هدف ارزیابی کیفیت آب قنات شیخ سرمست واقع در آبخوان ارومیه طی دوره ۱۳۸۱ تا ۱۴۰۱، با استفاده از شاخص کیفیت آب زیرزمینی (GQI) و تحلیل پارامترهای هیدروشیمیایی انجام شد. داده‌های سالانه شامل هدایت الکتریکی (EC)، اسیدیته (pH)، کل جامدات محلول (TDS)، سختی کل (TH)، نسبت جذب سدیم (SAR)، و غلظت یون‌های سولفات (SO_4^{2-})، کلراید (Cl^-)، بی‌کربنات (HCO_3^-)، کلسیم (Ca^{2+})، منیزیم (Mg^{2+})، سدیم (Na^+) و پتاسیم (K^+) مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد کیفیت آب قنات در محدوده خوب تا عالی قرار دارد. بالاترین شاخص کیفیت آب (GQI=92.04) در سال ۱۳۸۹ با مقادیر پایین TDS (۳۶۷/۲۵ mg/L) و EC (۵۶۵/۰۰ µS/cm) مشاهده شد. در مقابل، پایین‌ترین مقدار GQI در سال ۱۴۰۰ همراه با افزایش SO_4^{2-}، TDS و EC ثبت شد. اکثر پارامترها تا سال‌های ۱۳۹۹–۱۴۰۰ روند افزایشی داشته و پس از آن کاهش یافتند. کاهش کیفیت آب در سال‌های اخیر می‌تواند ناشی از فشار برداشت و نفوذ آب‌های کشاورزی باشد. پایش مستمر، مدیریت بهینه برداشت، و کنترل آلودگی‌های کشاورزی برای حفظ کیفیت آب قنات توصیه می‌شود.

کلید واژه‌ها: تغییرات زمانی کیفیت آب، پایداری اکوسیستم‌های آبی، هیدروشیمی آب، مدیریت منابع آب زیرزمینی

مقدمه

آب‌های زیرزمینی به‌عنوان منبعی مطمئن از آب شیرین، نقش کلیدی در پاسخ‌گویی به تقاضای روبه‌رشد آب برای جمعیت در حال افزایش جهان، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه ایفا می‌کنند. کیفیت آب به‌طور ذاتی با سلامت انسان، کاهش فقر، برابری جنسیتی، امنیت غذایی، معیشت، حفظ اکوسیستم‌ها و هم‌چنین رشد اقتصادی و توسعه اجتماعی جوامع ارتباط مستقیم دارد (Unesco, 2015 ؛IAH, 2008). با این‌حال، روند رو به افزایش شهرنشینی، صنعتی‌شدن و فعالیت‌های کشاورزی، اثرات منفی قابل توجهی بر کیفیت آب‌های سطحی و زیرزمینی در سراسر جهان برجای گذاشته است. آب‌های زیرزمینی منبع اصلی و ترجیحی تأمین آب آشامیدنی در سراسر جهان محسوب می‌شوند (Guppy et al, 2018). برخلاف آب‌های سطحی، آلودگی آب‌های زیرزمینی به‌دلیل ماهیت پنهان آن به‌سختی شناسایی می‌شود و پس از وقوع، به علت حرکت کند آب و آلاینده‌ها، ممکن است دهه‌ها یا حتی سده‌ها باقی بماند. بنابراین، طراحی و اجرای راهبردهای کارآمد برای بهره‌برداری پایدار و حفاظت از این منبع حیاتی ضرورتی انکارناپذیر است. استفاده از روش‌ها و ابزارهای مناسب پایش و ارزیابی، به‌ویژه در مقیاس‌های وسیع، می‌تواند نقش مهمی در مدیریت و توسعه پایدار این منابع داشته باشد (Jha et al, 2020).

در همین راستا Jha et al (2020) به ارزیابی کیفیت آب‌های زیرزمینی برای تأمین آب آشامیدنی با استفاده از شاخص کیفیت آب ترکیبی مبتنی بر Fuzzy-GIS در ایالت Bihar در بخش شرقی هند و در رودخانه گنگ (Middle Gangetic Plain)پرداختند. نتایج مدل‌سازی GQI نشان می‌دهد که آب‌های زیرزمینی اکثر بخش‌های شرقی و جنوبی (حدود ۶۰ درصد در فصل پیش از مانسون؛ حدود ۹۰ درصد در فصل پس از مانسون) منطقه مورد مطالعه برای آشامیدن نامناسب بوده است. Mardiana et al, (2020) شاخص GQI را بر اساس شش پارامتر

کلیدی شامل سدیم، منیزیم، کلسیم، سولفات، کلراید و کل جامدات محلول و هم‌چنین شاخص DRASTIC را با استفاده از هفت پارامتر هیدروژئولوژیکی برای ارزیابی آسیب‌پذیری آبخوان‌ها در منطقه شمال Sumatra، اندونزی به کار بردند. نتایج نشان داد که کیفیت آب زیرزمینی در این منطقه بسیار خوب بوده و آسیب‌پذیری آبخوان نسبت به آلودگی در سطح پایینی قرار دارد. هم‌چنین Ahn et al (2023) به پیش‌بینی شاخص کیفیت آب‌های زیرزمینی بمنظور ارزیابی کیفیت آب شرب با استفاده از شبکه عصبی و تحلیل مکانی پرداختند. این مطالعه نشان داد که بیش از ۵۰ درصد از چاه‌های ارزیابی شده (در مجموع ۸۳۲۶ چاه) به‌عنوان منبع آب شرب نامناسب بودند، که نشان‌دهنده نیاز مبرم به تجدیدنظر در سیاست‌های مدیریت آب آن منطقه است. مدل شبکه عصبی دارای دقت بسیار خوب تقریباً ۹۵ درصد برای درجات GQI دست یافت که در این تحقیق از سایر مدل‌های طبقه‌بندی بهتر عمل کرده است. علائی و میریعقوب‌زاده (۱۴۰۳) به بررسی و پیش‌بینی پارامترهای کیفیت آب از جمله هدایت الکتریکی (EC) و اسیدیته (pH) در زیرحوضه‌های آبخوان دشت ارومیه با بهره‌گیری از الگوریتم طبقه‌بندی و رگرسیون درختی (CART) پرداخته است. این تحقیق با هدف تحلیل اثرات شاخص‌های پیوستگی سیمای سرزمین بر کیفیت آب انجام شده و نشان داد که مدل CART در پیش‌بینی مقادیر pH دقت بالاتری نسبت به EC دارد.

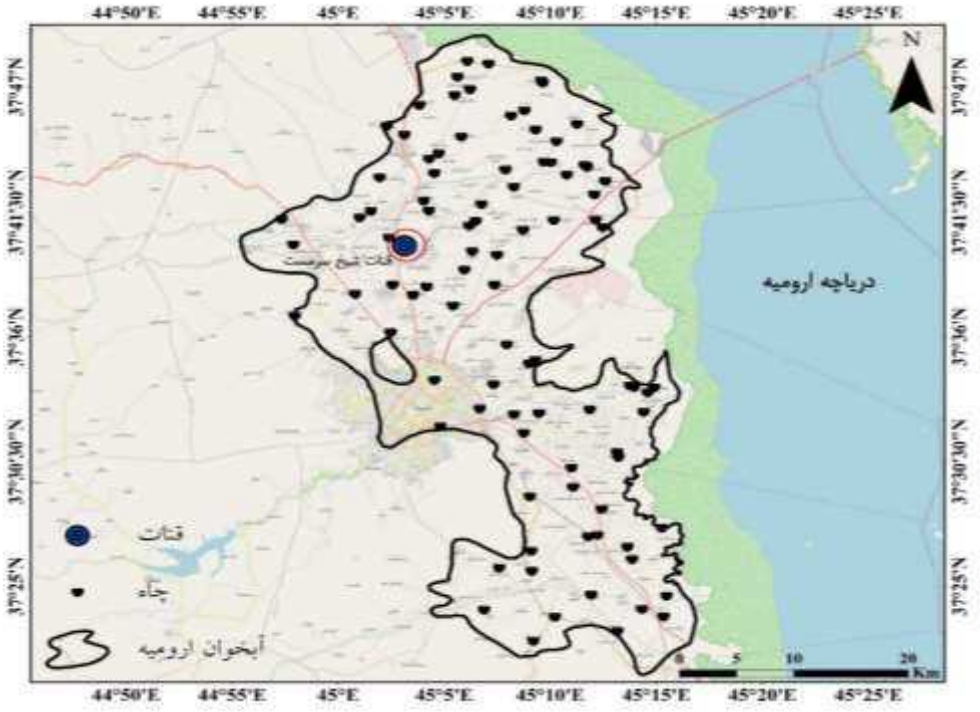
نتایج آماری حاصل از مطالعه، همبستگی بالای ۹۱ درصد برای pH و ۸۸ درصد برای EC را تأیید کرده و بر اهمیت استفاده از مدل‌های پیشرفته یادگیری ماشین در بهبود پیش‌بینی کیفیت آب تاکید کردند.

با توجه به نقش حیاتی آب‌های زیرزمینی در تأمین آب شرب و کشاورزی، ارزیابی دقیق کیفیت آن‌ها برای مدیریت پایدار منابع آبی ضروری است. قنوات به‌عنوان یکی از مهم‌ترین سازه‌های سنتی بهره‌برداری از آب زیرزمینی، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند آبخوان ارومیه، نیازمند پایش مستمر و علمی هستند تا از افت کیفیت و تهدیدهای ناشی از آلودگی جلوگیری شود. استفاده از شاخص کیفیت آب زیرزمینی (GQI) در این پژوهش ابزاری کارآمد برای مدیریت بهینه و تصمیم‌گیری آگاهانه در حفاظت و بهره‌برداری پایدار از این منابع ارزشمند به‌شمار می‌رود.

روش تحقیق

منطقه مورد مطالعه

آبخوان ارومیه در شمال غربی ایران و در محدوده حوضه آبریز دریاچه ارومیه واقع شده است. این آبخوان یکی از مهم‌ترین منابع تأمین آب شرب و کشاورزی منطقه به شمار می‌رود و دارای منابع آب زیرزمینی متنوعی از جمله چاه‌ها، چشمه‌ها و قنوات است. اقلیم منطقه بر اساس طبقه‌بندی دومارتن نیمه‌خشک سرد بوده و میانگین بارندگی سالانه حدود ۳۵۰ تا ۴۰۰ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه حدود ۱۰ تا ۱۲ درجه سانتی‌گراد است (علائی و میریعقوب‌زاده، ۱۴۰۳). لیتولوژی غالب شامل رسوبات آبرفتی کواترنر با نفوذپذیری بالا بوده که شرایط مناسبی برای ذخیره و انتقال آب زیرزمینی فراهم می‌کند. قنات مورد مطالعه در بخش مرکزی ـ شمالی آبخوان واقع است و با توجه به کاربری کشاورزی و شرب، بررسی تغییرات کیفی آن از اهمیت بالایی برخوردار است (قهرمانی و همکاران، ۱۴۰۴). قنات شیخ سرمست یکی از منابع مهم تأمین آب شرب و کشاورزی در بخش مرکزی-شمالی آبخوان ارومیه است. این قنات به دلیل اهمیت بالای آن در تأمین نیازهای مردم و کشاورزی، دسترسی به داده‌های کیفی مناسب و نمایندگی وضعیت عمومی آبخوان برای تحلیل روند کیفیت آب انتخاب شده است. در شکل (۱) موقعیت جغرافیایی قنات شیخ سرمست در آبخوان ارومیه را نشان می‌دهد.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی قنات مورد بررسی در آبخوان ارومیه

شاخص کیفیت آب زیرزمینی (GQI)

شاخص کیفیت آب زیرزمینی (Groundwater Quality Index – GQI) اولین بار توسط Babiker و همکاران (۲۰۰۷) برای ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی بر اساس پارامترهای شیمیایی پیشنهاد شد. این مطالعه به ارزیابی کیفیت آب قنات شیخ سرمست، واقع در بخش مرکزی ـ شمالی آبخوان ارومیه، با استفاده از شاخص کیفیت آب زیرزمینی (GQI) طی سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۴۰۱ می‌پردازد. داده‌های شیمیایی شامل هدایت الکتریکی (EC)، اسیدیته (pH)، کل جامدات محلول (TDS)، سختی کل (TH)، نسبت جذب سدیم (SAR)، و غلظت یون‌های سولفات (SO_4^{2-})، کلراید (Cl^-)، بی‌کربنات (HCO_3^-)، کلسیم (Ca^{2+})، منیزیم (Mg^{2+})، سدیم (Na^+) و پتاسیم (K^+) برای ارزیابی کیفیت آب شرب و کشاورزی به‌کار گرفته شدند. داده‌های مورد بررسی طی یک دوره ۲۰ ساله (۱۳۸۱–۱۴۰۱) از قنات جمع‌آوری و به‌صورت میانگین سالانه ارائه شده‌اند.

ارزیابی کلی کیفیت آب زیرزمینی بر اساس مقایسه غلظت یون‌های اصلی با مقادیر استاندارد سازمان بهداشت جهانی (WHO) و با استفاده از شاخص GQI انجام می‌شود. محاسبه شاخص با استفاده از، روابط (۱) تا (۳) محاسبه می‌شود (Najafzadeh et al ، 2022؛ El-Fadel et al، 2014).

$$C_{new}(i) = \frac{C_i - C_{i(WHO)}}{C_i + C_{i(WHO)}} \quad (۱)$$

$$R_i = 0.5C_{new}^2(i) + 4.5C_{new}(i) + 5 \quad (۲)$$

$$GQI = 100 - \left[\frac{W_i R_i}{12}\right] \quad (۳)$$

که در آن؛ i شاخص‌های پارامتر کیفی، Ci(WHO) حداکثر غلظت مجاز هر پارامتر بر اساس استاندارد WHO، Ci غلظت اندازه‌گیری‌شده پارامتر i، Cnew(i) غلظت نرمال‌سازی‌شده (بین ۱- و ۱) پارامتر، Ri امتیاز پارامتر کیفی (بین ۰ تا ۱۰) و Wi وزن نسبی پارامتر i می‌باشد. در تحقیق حاضر مبنای کلاسه‌بندی و ارزیابی کیفیت آب قنات بر اساس شاخص کیفیت آب زیرزمینی (GQI)، استاندارد کیفیت آب سازمان جهانی بهداشت WHO (جدول ۱) بوده است.

جدول ۱: استاندارد کیفیت آب سازمان جهانی بهداشت WH

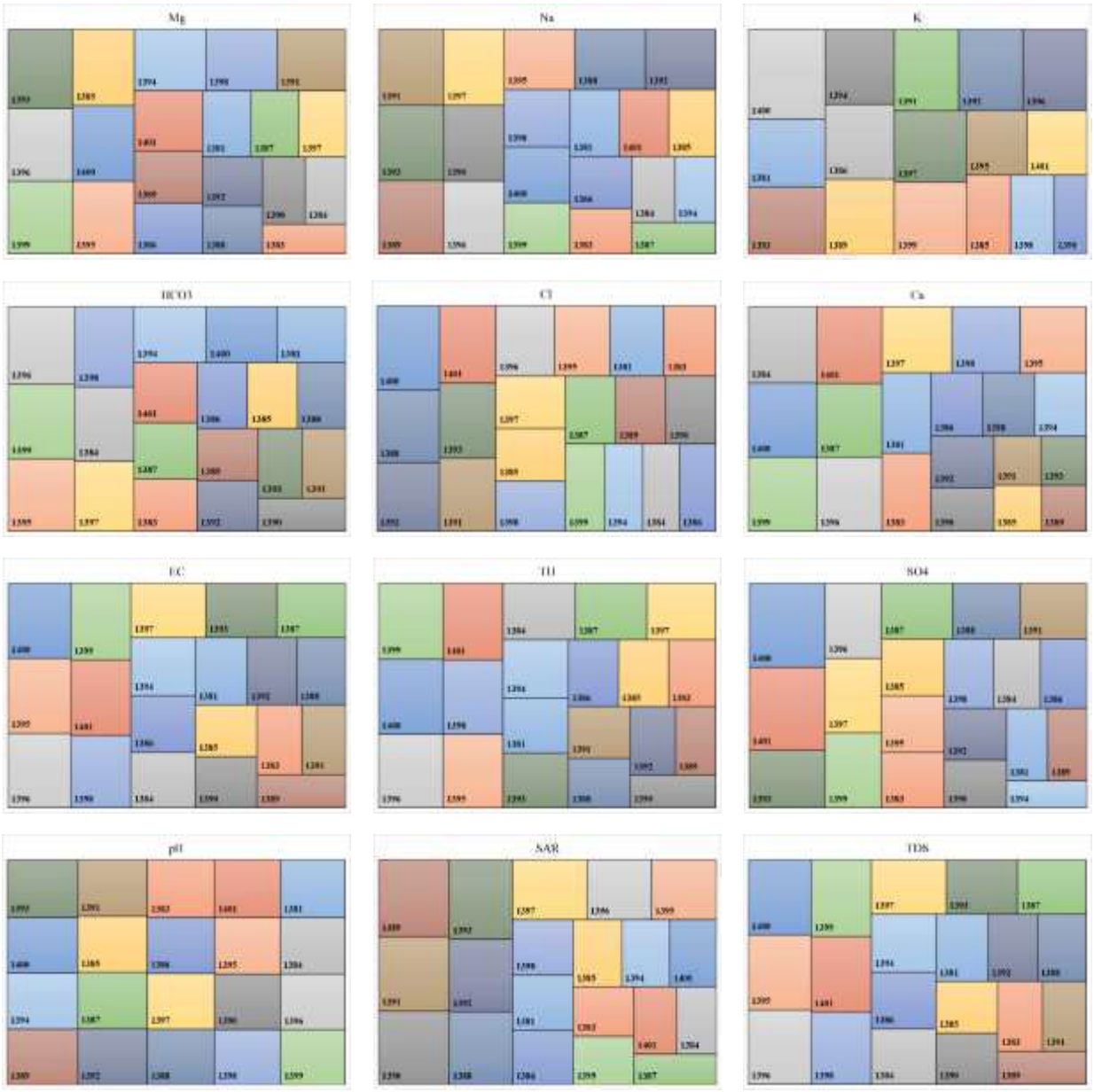
پارامتر	استاندارد WHO	واحد
SO_4^{2-}	۲۰۰	mg/L
Cl^-	۲۰۰	mg/L
HCO_3^-	۳۰۰	mg/L
pH	۷/۵	mg/L
TDS	۴۵۰	mg/L
TH	۵۰۰	mg/L
SAR	۱۰	-
EC	۷۵۰	µS/cm
K^+	۱۲	mg/L
Na^+	۲۰۰	mg/L
Mg^{2+}	۳۰	mg/L
Ca^{2+}	۷۵	mg/L

برای بررسی روند تغییرات زمانی پارامترهای کیفیت آب، از تست آماری من-کندال (Mann-Kendall) استفاده شد. این تست، که یک روش ناپارامتری برای شناسایی روندهای صعودی یا نزولی در داده‌های سری زمانی است (Mann, 1945)، به دلیل عدم نیاز به فرضیات توزیع نرمال و مقاومت در برابر داده‌های گمشده، انتخاب شد. داده‌های خام شامل مقادیر متغیرهایی مورد بررسی در بازه زمانی ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۰ بودند که پس از تبدیل به فرمت بلند، با R انجام شد. خروجی تست شامل ضریب Tau (جهت و شدت روند) و مقدار P-value (معنی‌داری آماری) بود، که روندها با آستانه P-value کم‌تر از ۰.۰۵ به عنوان معنی‌دار در نظر گرفته شدند. هم‌چنین، برای نمایش بصری نتایج، نمودارهای خطی با خطوط رگرسیون و نمایش مقادیر Tau و P-value ترسیم شدند.

نتایج و بحث

با توجه به نتایج حاصل از داده‌های مورد بررسی و شاخص کیفیت آب زیرزمینی (GQI) ارائه شده در شکل (۲) تغییرات پارامترهای مورد بررسی را در دوره زمانی ۲۰ ساله نشان می‌دهد. طبق نتایج کلراید (Cl^-) و بی‌کربنات (HCO_3^-) در سال ۱۳۹۶ با مقادیر ۳۵/۷ meq/L به حداکثر و در سال ۱۳۹۰ با ۱۰/۴ meq/L به حداقل رسیده است. اسیدیته (pH) در سال ۱۳۹۳ (۱۷/۸) بالاترین و در سال ۱۳۹۹ (۱۵/۷) پایین‌ترین مقدار را داشت. کل جامدات محلول (TDS) در سال ۱۴۰۰ (۳۳/۵۸۹ meq/L) بیش‌ترین و در سال ۱۳۸۹ (۲۵/۳۶۷ meq/L) کم‌ترین مقدار را نشان داد. سختی کل (TH) در سال ۱۳۹۹ (۵۰/۴۲۲ mg/L) بیشینه و در سال‌های ۱۳۸۹ و ۱۳۹۰ (۰۰/۲۴۰ mg/L) کمینه بود. هدایت الکتریکی (EC) در سال ۱۴۰۰ (۶۷/۹۰۶ µS/cm) بیش‌ترین و در سال ۱۳۸۹ (۰۰/۵۶۵ µS/cm) کم‌ترین مقدار را ثبت کرد. پتاسیم (K^+) در سال ۱۴۰۰ (۱۳/۰ mg/L) بالاترین و در سال‌های ۱۳۸۳، ۱۳۸۴، ۱۳۸۷ و ۱۳۸۸ با مقدار صفر پایین‌ترین مقدار را داشته است. سدیم (Na^+) در سال ۱۳۹۳ بیشترین و در سال ۱۳۸۷ کمترین میزان را داشت. منیزیم (Mg^{2+}) بالاترین مقدار خود را در سال ۱۳۹۳ و پایین‌ترین مقدار را در سال ۱۳۸۳ ثبت کرد. کلسیم (Ca^{2+}) نیز در سال ۱۳۸۴ به بیشینه و در سال ۱۳۸۹ به کمینه مقدار رسید. در جدول (۲) روند تغییرات پارامترهای شیمیایی آب قنات در آبخوان ارومیه (۱۳۸۱-۱۴۰۱) ارائه شده است.

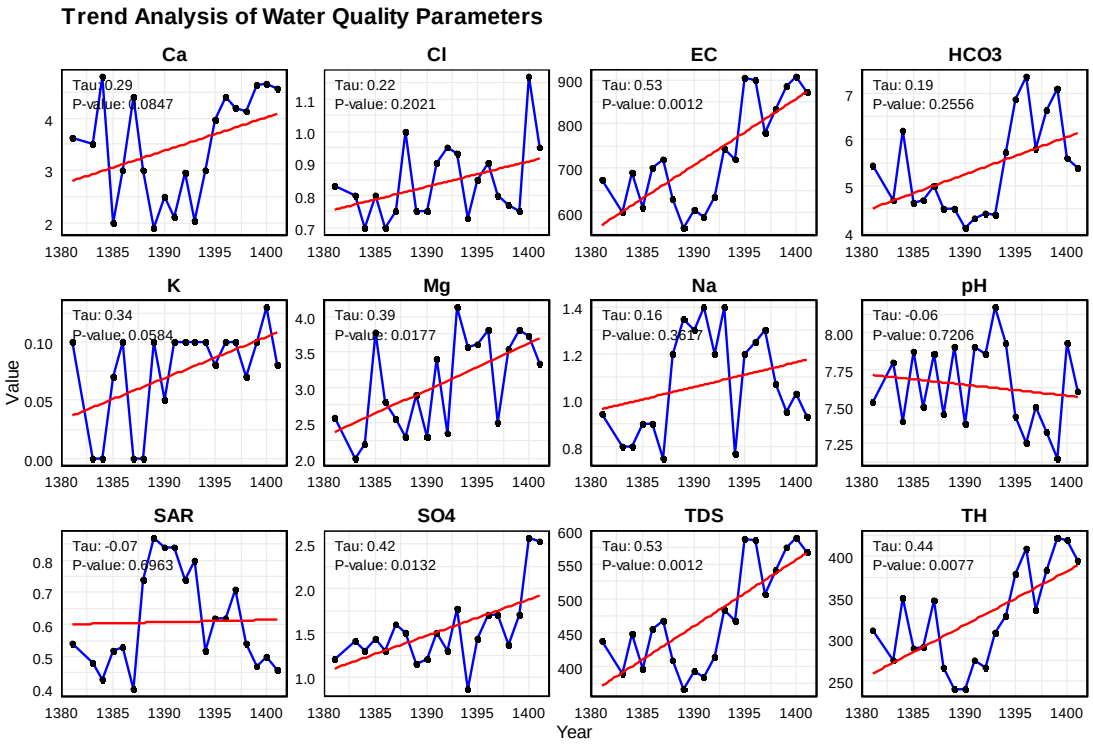
بررسی تغییرات پارامترهای شیمیایی آب قنات در آبخوان ارومیه طی بازه زمانی ۱۳۸۱ تا ۱۴۰۱ نشان می‌دهد که بیش‌تر پارامترهای مورد بررسی از ابتدای دوره تا سال‌های پایانی دهه ۱۳۹۰ تغییرات افزایشی داشته‌اند. با این‌حال، پس از رسیدن به اوج در سال‌های حدود ۱۳۹۹ تا ۱۴۰۰، اکثر پارامترها از جمله SO_4^{2-}، Cl^-، HCO_3^-، pH، TDS، TH، SAR، EC، K^+، Na^+، Mg^{2+} و Ca^{2+}، تغییرات کاهشی را در سال‌های اخیر (۱۳۹۹ تا ۱۴۰۱) تجربه کرده‌اند. این الگو می‌تواند نشان‌دهنده تغییراتی در شرایط زیست‌محیطی، مدیریت منابع آبی و عوامل تأثیرگذار بر کیفیت آب باشد که نیازمند بررسی‌های بیش‌تر جهت حفظ و بهبود کیفیت آب قنات منطقه است. در شکل (۳) تحلیل روند پارامترهای کیفیت آب از سال ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۰ ارائه شده است.



(اندازه مربع از بزرگ به کوچک نشان‌دهنده پارامتر زیاد به کم و اعداد داخل مربع‌ها نشان‌دهنده سال است)

شکل ۲: تغییرات مقادیر پارامترهای کیفیت آب در بازه ۲۰ ساله (۱۳۸۱-۱۴۰۱)

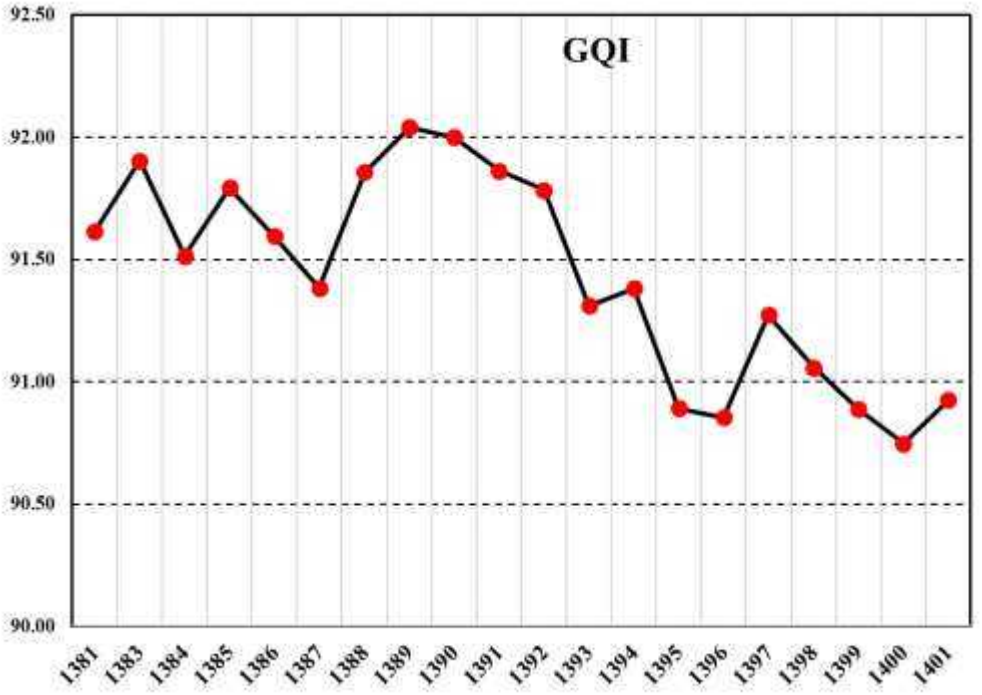
تحلیل روند پارامترهای کیفیت آب از سال ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۰ (شکل ۳) نشان می‌دهد که تنها SAR با Tau= -0.07 و P-value= 0.069دارای روند نزولی معنی‌دار آماری است، در حالی‌که pH با Tau=-0.06 و P-value=0.72 روند صعودی ضعیف و غیرمعنی‌داری دارد. سایر متغیرها متغیرهای مورد بررسی Tau مثبت و روند صعودی را نشان می‌دهند که برخی از پارامترها مانند EC، TDS و TH با P-value کم‌تر از ۰.۰۵ معنی‌دار هستند. در شکل (۴) نتایج شاخص کیفیت آب زیرزمینی (GQI) قنات آبخوان ارومیه در سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۴۰۱ ارائه شده است.



شکل ۳: تحلیل روند زمانی پارامترهای کیفیت آب (۱۳۸۰-۱۴۰۰)

شاخص کیفیت آب زیرزمینی (GQI)

طبق نتایج (شکل ۴)، بالاترین مقدار GQI در سال ۱۳۸۹ (۰۴/۹۲) مشاهده شد که نشان‌دهنده بهترین کیفیت آب در این بازه زمانی است. این مقدار با پارامترهایی مانند کل جامدات محلول (TDS) و هدایت الکتریکی (EC) پایین همراه بود. پایین‌ترین مقدار GQI نیز در سال ۱۴۰۰ (۷۵/۹۰) بدست آمد که همزمان با افزایش سولفات(SO_4^{2-})، کل جامدات محلول (TDS)و هدایت الکتریکی (EC) بوده و نشان‌دهنده کاهش کیفیت آب است. سایر پارامترها مانند اسیدیته (pH)، کلراید (Cl^-)، سختی کل (TH) و نسبت جذب سدیم (SAR) نیز در این سال‌ها نوسان داشتند، اما به‌طور کلی کیفیت آب در محدوده خوب تا عالی باقی مانده است.



شکل ۴: تغییرات مقادیر شاخص GQI در قنات آبخوان ارومیه

نتیجه‌گیری

بررسی روند تغییرات پارامترهای شیمیایی و شاخص کیفیت آب زیرزمینی (GQI) قنات‌های آبخوان ارومیه طی سال‌های ۱۳۸۱ تا ۱۴۰۱ نشان داد که کیفیت آب در این بازه عمدتاً در محدوده خوب تا عالی قرار داشته است. بالاترین کیفیت آب در سال ۱۳۸۹ با بیشترین مقدار GQI ثبت شد که با پارامترهای مطلوبی مانند مقادیر پایین کل جامدات محلول (TDS) و هدایت الکتریکی (EC) همراه بود. اما در سال ۱۴۰۰ کاهش نسبی کیفیت آب مشاهده شد که با افزایش سولفات (SO_4^{2-})، کل جامدات محلول (TDS) و هدایت الکتریکی (EC) همزمان بود. سایر پارامترها مانند اسیدیته (pH)، کلراید (Cl^-)، سختی کل (TH) و نسبت جذب سدیم (SAR) نوساناتی داشتند، اما تغییرات کلی منجر به افت شدید کیفیت آب نشده است. کاهش کیفیت آب در سال‌های اخیر احتمالاً ناشی از فشار بر منابع آب زیرزمینی و نفوذ آب‌های کشاورزی است که ضرورت مدیریت دقیق‌تر منابع آب را نشان می‌دهد. بنابراین، پایش مستمر کیفیت آب به‌ویژه تمرکز بر شوری و جامدات محلول، از اهمیت بالایی برخوردار است. اقدامات مدیریتی پیشنهادی شامل کاهش برداشت از آبخوان، کنترل مصرف کودهای شیمیایی در کشاورزی، ایجاد سیستم‌های تصفیه محلی و احیای آبخوان از طریق تغذیه مصنوعی است تا از افت بیشتر کیفیت آب جلوگیری شود و منابع آب پایدار باقی بمانند.

منابع

علائی، نازیلا.، میریعقوب‌زاده، میرحسن. (۱۴۰۳). ارزیابی اثرات شاخص های پیوستگی سیمای سرزمین بر پارامترهای کیفیت آب آبخوان ارومیه با استفاده از الگوریتم طبقه بندی و رگرسیون درختی. سیزدهمین همایش ملی سامانه های سطوح آبگیر باران. گرگان.

قهرمانی ساعتلو، عرفانیان، مهدی، میریعقوب‌زاده، میرحسن، ندیری، عطا الله، سلیمانی مطلق، مهدی، قره‌خانی، مریم. (۲۰۲۵). ارزیابی تغذیه آب زیرزمینی با استفاده از مدل WetSpass-M در آبخوان ارومیه. هیدروژئومورفولوژی. ۱۲(۴۳): ۱۰۴-۱۲۴.

Ahn, S. H., Jeong, D. H., Kim, M., Lee, T. K., & Kim, H. K. (2023). Prediction of groundwater quality index to assess suitability for drinking purpose using averaged neural network and geospatial analysis. Ecotoxicology and Environmental Safety, 265, 115485.

Babiker, I. S., Mohamed, M. A., & Hiyama, T. (2007). Assessing groundwater quality using GIS. Water Resources Management, 21(4), 699-715.

El-Fadel, M., Tomaszkiewicz, M., Adra, Y., Sadek, S., & Abou Najm, M. (2014). GIS-based assessment for the development of a groundwater quality index towards sustainable aquifer management. Water resources management, 28(11), 3471-3487.

Guppy, L., Uyttendaele, P., Villholth, K.G., Smakhtin, V., 2018.: Groundwater and sustainable development goals: Analysis of interlinkages.

IAH, 2008. Groundwater for Life and Livelihood: A Treasure of Planet Earth. International Association of Hydrogeologists (IAH), Kenilworth, United Kingdom.

Jha, M. K., Shekhar, A., & Jenifer, M. A. (2020). Assessing groundwater quality for drinking water supply using hybrid fuzzy-GIS-based water quality index. Water research, 179, 115867.

Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. Econometrica: Journal of the econometric society, 245-259.

Mardiana, S., Anzum, R., Dwijendra, N. K. A., Al Sarraf, A. A. M., Timoshin, A., Sergushina, E., ... & Tikhomirov, E. (2022). Assessment of groundwater quality and their vulnerability to pollution using GQI and DRASTIC indices. Journal of Water and Land Development, 138-142.

Najafzadeh, M., Homaei, F., & Mohamadi, S. (2022). Reliability evaluation of groundwater quality index using data-driven models. Environmental Science and Pollution Research, 29(6), 8174-8190.

Unesco, 2015. International Initiative on Water Quality. International Hydrological Programme. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), Paris, Fran.

سومین کنفرانس ملی آب و هواشناسی ایران (با محوریت تغییر اقلیم)
The 3rd National Conference on Climatology of Iran (Focusing on Climate Change)
ارومیه ۱۶ مهر ۱۴۰۴

Evaluation of Qanat Water Quality in the Urmia Aquifer Using the Groundwater Quality Index (GQI)

Leyla Babaie[2], Nazila Alaei[2] , Mirhassan Miryaghoubzadeh[1]*

Ph.D. Student, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Iran

Ph.D. Student, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Iran

Associate Professor, Department of Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Iran

(*Corresponding author: m.miryaghoubzadeh@urmia.ac.ir)

Abstract

Qanats, among the oldest groundwater management methods, are vital for supplying drinking and irrigation water in Iran's dry and semi-arid regions. Regular monitoring of their water quality is crucial for sustainable use and to preventing quality decline. This study evaluated the water quality of a qanat in the Urmia aquifer from 2002 to 2022, employing the Groundwater Quality Index (GQI) and hydrochemical analysis. Annual analysis of key parameters such as electrical conductivity (EC), pH, total dissolved solids (TDS), total hardness (TH), sodium adsorption ratio (SAR), and concentrations of sulfate (SO_4^{2-}), chloride (Cl^-), bicarbonate (HCO_3^-), calcium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}), sodium (Na^+), and potassium (K^+), were analyzed. The results revealed that qanat water quality varied from good to excellent. The highest GQI (92.04) was recorded in 2010, characterized by low TDS (367.25 mg/L) and EC (565.00 µS/cm), while the lowest GQI (90.75) occurred in 2021, with increased sulfate, TDS (589.33 mg/L), and EC (906.67 µS/cm). Key parameters such as chloride (peaking at 7.35 meq/L in 2017), bicarbonate (peaking in 2017), pH (8.17 in 2014), and total hardness (422.50 mg/L in 2020), exhibited an increasing trend until late 2010, then declined. Sodium peaked in 2014, magnesium also in 2014, and calcium in 2005, while potassium reached its highest level (0.13 mg/L) in 2021. The recent decline in water quality is likely due to overexploitation and agricultural runoff. Ongoing monitoring, optimized extraction methods, and pollution control are recommended to maintain qanat water quality.

Keywords: Temporal water quality changes, aquatic ecosystem sustainability, water hydrochemistry, groundwater resource management

کاربرد روش AHP در پهنه‌بندی اقلیم کشاورزی کشت گندم (مطالعه موردی: استان البرز)

بهروز سبحانی
استاد آب و هواشناسی گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
sobhani@uma.ac.ir

چکیده

شناخت اقلیم و پارامترهای موردنیاز در طول دوره رشد گیاهان زراعی از مهم‌ترین عامل در پهنه‌بندی آگروکلیماتیک است. هدف از این تحقیق شناخت نواحی مستعد کشت گندم در استان البرز با استفاده از روش AHP در محیط GIS است. به این منظور از داده‌های؛ دمای (دوره رشد، جوانه‌زنی، گل‌دهی و رسیدگی)، حداکثر دمای دوره رشد، حداقل دمای دوره رشد، بارش (دوره رشد، جوانه‌زنی، گل‌دهی و رسیدگی)، درجه ـ روز، رطوبت نسبی، ارتفاع، شیب، به‌عنوان فاکتورهای مؤثر استفاده شدند. نقشه‌های هریک داده‌های موردمطالعه در محیط GIS تهیه شدند. بر اساس روش AHP به هریک از پلیگون نقشه‌ها وزن داده شد. نتایج حاصل از این پژوهش بیانگر این است که بارش مهم‌ترین عامل در طول دوره رشد کشت گندم و توپوگرافی عامل مهم محدودکننده درکشت گندم است. بر اساس تحلیل نقشه‌های نهایی درروش AHP حدود ۳۷/۹ درصد از مساحت استان بدون محدودیت برای کشت گندم، ۳۲/۱ درصد با محدودیت کم، ۱۶/۴ درصد متوسط و ۱۳/۶ درصد فاقد استعداد لازم برای کشت گندم هستند.

کلیدواژه‌ها: اقلیم کشاورزی، گندم، استان البرز، روش AHP و GIS

مقدمه

شاخص‌های اقلیم کشاورزی اثر عوامل اقلیمی مؤثر بر رشد گیاهان را محاسبه و تصویری از وضعیت رشد، نمو و تولید محصولات زراعی در شرایط مختلف آب و هوایی ارائه می‌دهد (نصیری محلاتی و کوچکی، ۱۳۸۸). علاوه بر اقلیم خصوصیات خاک نیز در توسعه و تکامل نظام‌های زراعی اهمیت دارند(Delonge et al.,2015) . جمعیت و سرانه‌ی مصرف در محدود بودن منابع خاک بر روی اکوسیستم تأثیر می‌گذارد (Peng et al., 2015). روابط اقلیم، خاک و گیاهان زراعی به‌صورت یک مجموع تحت عنوان اقلیم‌شناسی کشاورزی مطالعه می‌شود. افزایش روزافزون جمعیت و به‌تبع آن افزایش نیاز غذایی کشور را ایجاب می‌کند که از این منابع محدود به نحو احسن استفاده گردد (یزدان پناه و همکاران، ۱۳۸۵) بنابراین، برنامه‌ریزی و اعمال مدیریت به‌منظور افزایش تولید این محصول اجتناب‌ناپذیر است. در دهه‌های اخیر تحقیقات متعددی در مورداستفاده از قابلیت‌های GIS در تعیین مناطق مستعد کشت محصولات کشاورزی با روش AHP انجام‌شده است که به چند مورداشاره می‌شود: سبحانی و رسولی (۱۳۸۴) نقش بارندگی را در

تعیین مناطق مساعد و تاریخ مناسب برای کشت گندم دیم بر اساس روش هتلینگ محاسبه نموده‌اند و به این نتیجه رسیده‌اند که این روش آماری توانایی تعیین تقویم زراعی را برای کشت محصولات کشاورزی دارد. مساعدی و کاهه (۱۳۸۷) تأثیر بارش را بر عملکرد محصولات گندم و جو در استان گلستان دریک دوره ۲۰ ساله بررسی و به این نتیجه رسیده‌اند که بارندگی طول دوره رشد، عملکرد محصولات گندم و جو را به‌شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد و سبب افزایش عملکرد آن می‌شود. کمالی و همکاران (۱۳۸۹) با استفاده از داده‌های اقلیمی در محیط GIS اطلس گندم دیم استان زنجان را تهیه کردند و نواحی مساعد برای کشت گندم دیم را در استان زنجان مشخص نمودند. علیجانی و همکاران (۱۳۹۰) تأثیر درجه حرارت و بارندگی را بر عملکرد گندم آبی در ۱۴ استان کشور را در محیط GIS مطالعه کرده‌اند و به این نتیجه رسیده‌اند که بارش نقش مهم در طول دوره رشد گندم دارد. اسماعیلی و همکاران (۱۳۹۰)، باقر زاده و همکاران (۱۳۹۱)، حسینی و همکاران (۱۳۹۲)، توکلی و همکاران (۱۳۹۲) و محمد نیا و محمدی (۱۳۹۲) پهنه‌بندی اقلیم کشاورزی را با استفاده از داده‌های اقلیمی و محیطی در محیط GIS با روش‌های چند معیاره انجام داده‌اند و نتایج نشان داد که عناصر و عوامل اقلیمی هرکدام در مراحل فنولوژی گندم نقش مؤثر دارند و همچنین برای وزن دهی معیارها نیاز به روش‌های چند معیاره و تلفیق معیارها نیاز به سامانه اطلاعات جغرافیایی است. هاشمی نسب خبیصی و همکاران (۱۳۹۳) اثر بارش بر عملکرد گندم دیم را بررسی نموده و در مقیاس زمانی شاخص رضایت‌مندی نیاز آب گندم را مطالعه کردند. آن‌ها داده‌های هواشناسی ۲۵ سال، ۶ ایستگاه استان‌های خراسان شمالی، رضوی و جنوبی و عملکرد گندم را از سال‌های ۱۳۸۷- ۱۳۶۲ محاسبه کرده‌اند. سبحانی و کریم زاده (۱۳۹۴) نواحی آگروکلیمایی کشت گندم دیم را بر مبنای شاخص‌های اقلیمی در استان کردستان موردبررسی قراردادند و به این نتیجه رسیدن ۲۵ درصد از مساحت استان مناسب، ۴۷ درصد شرایط متوسط و ۲۸ درصد استان شرایط نامناسب دارد. (Anasiru et al., 2013) در اندونزی باروی هم انداختن لایه‌های زمین‌شناسی، ژئوموفولوژی، توپوگرافی و کاربری اراضی، دوازده واحد نقشه همگن برای محدوده‌ی موردبررسی تفکیک کردند. (Akinci et al., 2013) کاربری زمین‌های مناسب برای کشاورزی را با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی مکان‌یابی نموده‌اند. (Devkota et al., 2015) تأثیر صرفه‌جویی آب آبیاری و کشاورزی حفاظتی را برای سیستم‌های برنج و گندم در مناطق خشک و نیمه‌خشک مرکزی شبیه‌سازی نمودند. در این تحقیق سعی شده تا با استفاده از شناسایی پتانسیل عناصر اقلیمی و عوامل محیطی که با بررسی تأثیر این فاکتورها بر تولید گندم، مناطق مناسب کشت را مورد شناسایی قرار گیرد که با مشخص شدن مناطق مساعد کشت، باعث افزایش عملکرد محصولات و استفاده بهینه از شرایط اقلیمی را ارائه داده و با این کار برنامه‌ریزی مناسب در حیطه کشاورزی را فراهم گردد.

روش تحقیق

موقعیت جغرافیایی

استان البرز با وسعتی حدود ۵۲۴۲ کیلومترمربع بین ۳۵ درجه و ۳۱ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۲۱ دقیقه عرض شمالی و ۵۰ درجه و ۱۰ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۳۰ دقیقه طول شرقی واقع است (شکل ۱). این استان از شمال به استان مازندران، از جنوب شرقی و شرق به استان تهران، از جنوب غرب به استان مرکزی و از غرب به استان قزوین محدودشده است. استان البرز بین خطالرأس چین‌خوردگی البرز مرکزی و حاشیه غربی دشت کویر واقع‌شده و بدین ترتیب آب‌وهوای استان عمدتاً متأثر از عامل ارتفاع است. میانگین درجه حرارت در این منطقه ۱۱/۴ درجه سانتی‌گراد است و بین ۲۱- تا ۳۵ درجه سانتی‌گراد متغیر است و متوسط میزان بارندگی در طالقان نیز حدود ۶۰۰ میلی‌متر بوده که موجب تنوع پوشش گیاهی در این منطقه گردیده است (جهاد کشاورزی استان البرز، ۱۳۹۱).



شکل ۱: منطقه موردمطالعه

در تحقیق حاضر از داده‌های اقلیمی ۲۳ ایستگاه سینوپتیک، تبخیر سنجی و باران‌سنجی در سطح استان استفاده‌شده و بعد از تحلیل توصیفی داده‌ها در نرم‌افزار Excel، نتایج به محیط GIS انتقال داده شد. برای مطالعه‌ی پتانسیل اقلیمی کشت گندم در استان البرز از عناصر اقلیمی (بارش، دما، درجه ـ روز) و همچنین عوامل اقلیمی (ارتفاع و شیب) استفاده گردیده است.

برای محاسبه تاریخ دقیق رسیدن به مراحل مختلف رشد گندم، در مناطق مختلف استان از روش درجه ـ روز (GDD) استفاده شد که از طریق رابطه‌ی (۱) محاسبه شد:

$$GDD = \sum_{a}^{b}\left\{\left[\frac{T_{max}+T_{min}}{2}\right] - T_b\right\} \quad (۱)$$

در رابطه (۱)

GDD = درجه _ روزرشد (حرارت تجمعی)، Tmax و Tmin درجه حرارت حداکثر و حداقل روزانه (برحسب درجه سانتی‌گراد)، Tbدرجه حرارت پایه (برحسب سانتی‌گراد)،a تاریخ شروع مراحل فنولوژیکی و b تاریخ پایان مراحل فنولوژیکی هستند (ساری صراف و همکاران، ۱۳۸۸). برای تحلیل داده‌ها، از سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی به کار گرفته‌شده درنهایت با بهره‌گیری از روش‌های سلسله مراتبی کلیه لایه‌ها در محیط GIS تلفیق‌شده و نقشه پهنه‌بندی کشت گندم تهیه گردید.

فرایند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

تحلیل سلسله مراتبی AHP یک روش تصمیم‌گیری چند معیاره است و فرایند آن بر اساس تجزیه یک مسئله به یک سری معیارها و زیر معیارها (تشکیل سلسله مراتبی) در سطح بالا و گزینه‌های تصمیم‌گیری در سطح انجام می‌گیرد. در این روش برای ارزیابی عناصر هر سطح، از مقایسه زوجی استفاده می‌شود.

ماتریس (A = aij) از مقایسه زوجی عناصر i نسبت به j به دست می‌آید. در مقایسات زوجی، به پیروی از مقیاس ساعتی، قضاوت تصمیم‌گیرندگان اعداد ۱ تا ۹ می‌گیرند؛ بنابراین ویژگیaij =1/ aij همواره برقرار است و برای ساختن ماتریس، تعداد n(n-1)/2 قضاوت کافی است. بردار وزنی به‌دست‌آمده در ضریب وزنی عناصر سطح بالاتر ضرب می‌شود. این رویه تا بالاترین سطح تکرار می‌شود و ضریب وزنی کل برای هر گزینه (میزان اولویت) به دست می‌آید.

نتایج

معمولاً توسعه کشاورزی هر منطقه در درجه اول بستگی مستقیم به نزولات آسمانی بالأخص بارش دارد (جدول ۱). باران به طریق مختلف به رشد و نمو گیاهان کمک می‌نماید، چه به‌صورت آبیاری محصولات دیم زمستانی و گیاهان خودرو و چه برای محصولات آبی. با این وصف آنچه در شرایط مزرعه برای زراعت مهم است زمان شروع بارندگی و ختم آن و شدت بارندگی و همچنین متوسط بارندگی سالانه است (نصوحی، ۱۳۸۶). مرحله جوانه زدن با جذب آب شروع و در مدت‌زمانی کوتاهی حجم دانه افزایش می‌یابد. حداقل میزان رطوبت برای جوانه زدن گندم ۴۵- ۳۵ درصد خشک دانه‌ها است. چنین شرایطی، مواقعی تأمین است که لایه روی خاک (صفرتا ۱۰ سانتی‌متری) حداقل ۱۵ الی ۲۰ میلی‌متر رطوبت قابل‌دسترسی داشته باشد. بر اساس مطالعات انجام‌شده مناسب‌ترین بارش برای مرحله گل‌دهی ۱۰۰- ۶۰ میلی‌متر تعیین‌شده است. پس از گرده‌افشانی، کمبود آب، عامل مهم دیگری که تعداد و وزن دانه‌ها را کاهش می‌دهد. برای رسیدن اهداف تحقیق و بررسی نحوه توزیع بارش در طول دوره بارش در استان البرز، مقادیر بارش جوانه‌زنی، گل‌دهی و رسیدگی موردمطالعه قرار گرفت. در شرایط مطلوب گندم پائیزه برای جوانه‌زنی ۴۵-۴۰ میلی‌متر بارش نیاز دارد که تنها این شرایط در قسمت کوچکی از استان مرکز ساوجبلاغ (بخش تنکمان و نجم‌آباد) میسر و در بخش‌های کمال‌آباد و گرم‌دره بارش کمتر از میزان موردنیاز است. در نواحی دیگر استان توزیع بارش امکان کشت را ممکن می‌سازد. با توجه به این‌که دوره گل‌دهی (سنبله دادن) و رسیدگی گندم در اواخر ماه اردیبهشت تا تیرماه است و در این موقع سامانه پرفشار در منطقه حاکم است مقدار بارش کاهش‌یافته و تنها قسمت کوچکی از استان در منطقه طالقان و جوسان در دوره گل‌دهی (۲۶ درصد از مساحت استان است) و منطقه جوسان در زمان رسیدگی با (۹ درصد از مساحت استان) بارش‌های مناسب را دارا می‌باشند و دیگر نقاط استان محدودیت‌های شدید تا متوسط برای کشت گندم دارند.

جدول ۱- نیازهای بارشی گیاه گندم و داده‌های بارشی شهرستان‌های استان البرز

مراحل رویشی محصولات	میزان بارش موردنیاز گیاه گندم	کرج	هشتگرد	اشتهارد	طالقان
مرحله کاشت تا جوانه‌زنی	۴۵ ـ ۴۰ (میلی‌متر)	۵۷/۵	۵۶/۶	۲۲/۳	۱۰۰/۶
مرحله جوانه‌زنی تا گل‌دهی	۷۰ ـ ۶۰ (میلی‌متر)	۳۱/۷	۳۹/۴	۳۹/۷	۷۱/۹
مرحله گل‌دهی تا رسیدگی کامل	۶۰ ـ ۵۵ (میلی‌متر)	۸/۶	۱۳/۶	۵.۵	۱۸/۱
دوره رشد	۳۵۰ ـ ۳۰۰ (میلی‌متر)	۲۸/۹	۳۸/۶	۲۳۴/۳	۴۱۹/۴

در این پژوهش، شرایط دمایی ایستگاه‌های موردمطالعه با توجه به نیازهای حرارتی گندم پائیزه در مراحل: جوانه‌زنی، دوره گل‌دهی و دوره رسیدگی (پر شدن دانه)، موردبررسی قرار گرفت. در انجام تحقیق با استفاده از نرم‌افزار EXCEL تاریخ کشت (GDD) هرسال و برای هر ایستگاه محاسبه و بدین ترتیب روزهای رسیدن به مراحل مختلف فنولوژی تعیین شد .با در اختیار داشتن مقدار درجه حرارت لازم برای رشد در هر مرحله و با توجه با آمار درجه حرارت می‌توان مراحل مختلف فنولوژی گیاهان را پیش‌بینی کرد (جدول ۲).

جدول ۲- نیازهای درجه ـ روز گیاه گندم و داده‌های بارشی شهرستان‌های استان البرز

مراحل رویشی محصولات	میزان GDD موردنیاز گیاه گندم	کرج	هشتگرد	طالقان
مرحله کاشت تا جوانه‌زنی	۱۵۰ درجه روز	۲۴۴	۱۹۱	۱۰۱
مرحله جوانه‌زنی تا گل‌دهی	۵۰۰ درجه روز	۱۱۶۰	۹۴۳	۵۵۶
مرحله گل‌دهی تا رسیدگی کامل	۸۵۰ درجه روز	۹۴۴	۸۵۶	۷۳۱
دوره رشد	۲۳۰۰- ۱ ۸۰۰ درجه روز	۲۳۱۵	۱۹۹۱	۱۳۸۸

منبع: رادمهر، ۱۳۷۶

تحلیل داده‌ها بر اساس روش‌های سلسله مراتبی

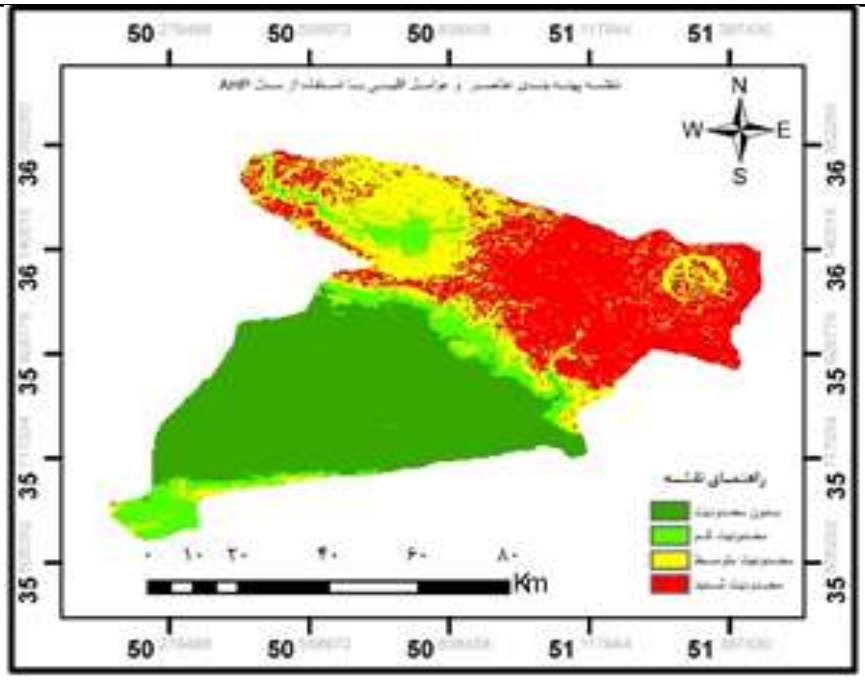
پس از تهیه نقشه از داده‌های مؤثر در محیط GIS، وزن دهی پلیگون های هریک از نقشه‌ها بر اساس روش‌های موردمطالعه انجام گردید و با همپوشانی نقشه‌ها پهنه‌بندی کشت گندم در استان البرز تعیین شد (شکل ۵).

۱- اراضی بدون محدودیت: این اراضی به دلیل دارا بودن شرایط مطلوب اقلیمی و فیزیوگرافی سبب افزایش راندمان تولید است. بر اساس روش AHP، بخش‌های مرکزی استان شامل ساوجبلاغ، نظرآباد، نواحی شمالی اشتهارد و نواحی جنوبی کرج از شرایط مطلوب برخوردار است که معادل ۳۴/۲۲ درصد استان است.

۲ - اراضی با محدودیت کم: این اراضی شرایط نسبتاً ضعیف‌تری را نسبت به گروه اول دارند بر اساس روش AHP، شهرستان نظرآباد، اشتهارد، مرکز طالقان و دامنه‌های البرز با ۱۲/۶ در صد مساحت استان را در برگرفته است.

۳- اراضی با محدودیت متوسط: این اراضی حدفاصل اراضی با محدودیت کم و محدودیت شدید قرارگرفته‌اند. راندمان تولید در این اراضی ضعیف است. درروش AHP، منطقه طالقان، نسا، آسار و منطقه ایپک حدود ۳۲/۶۵ درصد را پوشش می‌دهند.

۴ - اراضی با محدودیت زیاد: این اراضی ازنظر اقلیمی و فیزیو گرافی فاقد هرگونه بهر برداری برای کشت غلات می‌باشند که در استان البرز بر اساس روش AHP، جنوب منطقه طالقان و شرق شهرستان کرج با محدودیت شدید برای کشت گندم می‌باشند که حدود ۲۰/۵ درصد مساحت استان را دربر می‌گیرند. نتایج حاصل از این مطالعه با تحقیقات (پناه نژاد وهمکاران، ۱۴۰۱.، ظاهری عبده وند با همکاران، ۱۴۰۰.، نظری وبند و همکاران، ۱۳۹۹) در مورد پهنه اراضی مستعد به کشت کشاورزی با استفاده از روش فرایند تحلیل سلسله مراتبی مطابقت دارد.



شکل ۲- پهنه‌بندی عناصر و عوامل اقلیمی برای کشت گندم با استفاده از روش AHP

نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از داده‌های عناصر اقلیمی و عوامل محیطی پهنه‌بندی کشت گندم در استان البرز در محیط GIS انجام شد. نتایج تحلیل طبق نقشه ایجادشده بر اساس روش AHP به‌منظور امکان‌سنجی نواحی مستعد کشت گندم در استان البرز نشان می‌دهد که بیشترین مناطق مستعد در استان برای کشت گندم در مرکز و غرب استان قرار دارد که علت آن دریافت بارش بیشتر و دمای مناسب و عمق خاک است. در قسمت شرق و شمال استان به علت کوهستانی بودن، کاهش دما و شیب زیاد برای کشت این محصول مناسب نیست و تنها در درّه‌های این مناطق که وسعت مناسب دارند امکان کشت میسر است. نتایج حاصل از این پژوهش بیانگر این است که بارش مهم‌ترین عامل در طول دوره رشد کشت گندم و توپوگرافی عامل مهم محدودکننده درکشت گندم است. بر اساس تحلیل نقشه‌های نهایی درروش AHP حدود ۳۷/۹ درصد از مساحت استان بدون محدودیت برای کشت گندم، ۳۲/۱ درصد با محدودیت کم، ۱۶/۴ درصد متوسط و ۱۳/۶ درصد فاقد استعداد لازم برای کشت گندم هستند نتایج این تحقیق با مطالعات (Muhaimeed and Jaf, 2016., Sargi and Karaca, 2023.,Bagherzadeh and Gholizadeh., 2016) مطابقت دارد.

منابع

اسماعیلی، ر.، عطایی، ه و فلاح قالهری، غ. (۱۳۹۰). ارزیابی اثرات تغییرات اقلیم بر امکان توسعه هسته‌دار بادام و زردآلو در خراسان رضوی. نشریه دانش کشاورزی و تولید پایدار، ۱، ۱۶۲ ـ ۱۴۶.

باقر زاده، ح.، باقر زاده، ع و معین راد، ع. (۱۳۹۱). ارزیابی کیفی تناسب اراضی دشت نیشابور برای کشت گندم، ذرت و پنبه با استفاده از GIS. نشریه بوم‌شناسی کشاورزی، ۵۱ ـ ۴۱.

پناه نژاد، وحید؛ احمدی ثانی، ناصر و جوانمرد، عبدالله. (۱۴۰۱). تحلیل چندمعیاره مکانی تناسب اکولوژیک اراضی حوضه نازلو چای برای کاربری زراعت آبی. نشریه بوم‌شناسی کشاورزی، (۱۴)، ۲۳۳-۲۱۹.

توکلی، ع.، لیاقت، ع و اکبری، ز. (۱۳۹۲). بررسی نقش پارامترهای اقلیمی بر عملکرد دانه گندم در مناطق دیم کوه دشت و پل‌دختر استان لرستان. جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۴، ۱۴ ـ ۱.

جهاد کشاورزی، ۱۳۹۱، آمارنامه وزارت جهاد کشاورزی.

حسینی، م.ک.، زاهدی، م.، فتحی، م.ح.، و ادیزاده، ک. (۱۳۹۲). پهنه‌بندی آگروکلیماتیک آفتابگردان در شمال دریاچه ارومیه، نشریه علمی ـ پژوهشی جغرافیا و برنامه‌ریزی، (۱۷)۴۵، ۶۷-۴۲.

راد مهر، م. (۱۳۷۶). تأثیر تنش گرما بر فیزیولوژی رشد و نمو گندم، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد، شماره ۲۲۵.

ساری صراف، ب.، بازگیر، س و محمدی، غ. (۱۳۸۸). پهنه‌بندی پتانسیل‌های اقلیمی کشت گندم دیم در استان آذربایجان غربی، جغرافیا توسعه، ۱۳(۱۳)، ۲۶-۵.

سبحانی، ب وکریم زاده، س. (۱۳۹۴). تعیین نواحی آگروکلیمایی کشت گندم دیم بر مبنای شاخص‌های اقلیمی در استان کردستان، جغرافیا و آمایش شهری ـ منطقه‌ای، (۱۵)، ۳۲-۱۷.

سبحانی، ب.، رسولی، ع ا، ۱۳۸۴، نقش بارندگی در تعیین مناطق مساعد و تاریخ کشت گندم دیم در استان اردبیل، تحقیقات جغرافیایی، (۷۸)، ۱۱۷ ـ ۱۰۲

صادقی، ح.، محمدی، ح.، شمسی‌پور، ع.، زارعی، ک و کریمی، م. (۱۴۰۱). رابطهٔ فضایی متغیرهای آب و هوایی با عملکرد گندم دیم ایران. (۶۸)، ۲۱۴-۱۸۴.

ظاهری عبده وند، زی.، مکرم، م و مسکینی ویشکایی، ف. (۱۴۰۰). ارزیابی مناطق مناسب برای کشت گندم در دشت باغه شهرستان شوش با استفاده از روش تصمیم‌گیری چند معیاره. فصلنامه علمی-پژوهشی اطلاعات جغرافیایی، (۳۰)۱۲۰، ۲۱۵-۲۰۳.

علیجانی، ب.، کرباسی، ع و مظفری مسن، م (۱۳۹۰). برسی اثر درجه حرارت و بارندگی بر عملکرد گندم آبی ایران، اقتصاد کشاورزی توسعه، (۱۹)۷۶، ۱۶۷-۱۴۳.

عینی، ح.، صادقی، س.، حسین زاده، س ر. (۱۳۹۱). پهنه‌بندی پتانسیل توپوکلیمایی کشت گندم دیم در استان کرمانشاه، مجله جغرافیا و توسعه‌ی ناحیه‌ای (۱۹)، ۴۵-۲۱.

کریمی، ه. (۱۳۷۱). گندم، مرکز نشر دانشگاه تهران، ۱۰۳

کمالی، غ.، ملائی، پ.، بهیار، م ب. (۱۳۸۹). تهیه اطلس گندم دیم استان زنجان با استفاده از داده‌های اقلیمی و GIS، نشریه آب‌وخاک، (۲۴)۵، ۹۰۷-۸۰۴.

محمد نیا قرابی، س و محمدی ح. (۱۳۹۲). ناحیه بندی اقلیم کشاورزی محصول گندم دیم در استان خراسان رضوی بر اساس دما و بارش با استفاده از GIS. مجله جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای، (۲۱)، ۵۷-۴۳.

مساعدی، ا و کاهه، م. (۱۳۸۷). برسی تأثیر بارندگی بر عملکرد محصولات گندم و جو در استان گلستان، مجله علوم کشاورزی منابع طبیعی، ۱۵(۴)، ۲۱۷ ـ ۲۰۶

نصوحی، غ. (۱۳۸۶). هواشناسی و محصولات کشاورزی، چاپ سوم، اصفهان: انتشارات نوح.

نصیری محلاتی، م و کوچکی، ع. (۱۳۸۸). پهنه‌بندی آگرواکولوژی گندم در استان خراسان؛ برآورد پتانسیل و خلأ عملکرد، مجله پژوهش‌های زراعی ایران، (۷)۲، ۶۹۵-۷۰۹.

نظری وبند، ف.، کوهستانی، حسین.، ظریفیان، ش و کاظمیه، ف. (۱۳۹۹). پهنه‌بندی اراضی مستعد کشاورزی با استفاده از ترکیب روش تحلیل سلسه مراتبی در مناطق شمالی شهرستان خلخال (مطالعه موردی: حوضه آبخیز میکائیل آباد). دانش کشاورزی و تولید پایدار، (۳۰)۱، ۲۲۵-۲۳۹.

هاشمی نسب نصیبی، ف ا.، موسوی پایگی، م.، بختیاری، ب و. بنایان اول، م.(۱۳۹۳). اثر بارش بر عملکرد گندم دیم و شاخص رضایتمندی نیاز آبی در مقیاس زمانی مختلف، فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، (۵)۱۷، ۱۳-۱.

یزدان پناه، ح.، کمالی، غ ع.، حجازی زاده، ز و ضیاییان، پ. (۱۳۸۵). مکان گزینی اراضی مستعد کشت بادام در استان آذربایجان شرقی، مجله جغرافیا و توسعه، ۱۹۳ ـ ۲۰۴.

Akinci, H and Turght, B. (2013) Agricultural land use suitability analysis using GIS and AHP. computers and electronics in agriculture, 97, 71- 82.

Anasiru, R. M., Rayes, B., Setiawan, and D. Soemarno. (2013) An Agro-ecological approach for sustainable farming in Langge Sub-watershed. Bolango Watershed, Gorontalo, Indonesia. Journal of Enviromental and Earth Science, 3, 1-11.

Bagherzadeh, A and Gholizadeh, A. (2016). Modeling land suitability evaluation for wheat production by parametric and TOPSIS approaches using GIS, northeast of Iran, Model. Earth Syst. Environ, DOI 10.1007/s40808-016-0177-8.

DeLonge, M., Albie, S., Carlisle, L. (2015). Investing in the transition to sustainable agriculture., Environmental Science & Policy., 55(1), 266-273.

Devkota. G., Hoogenboom. K.J., Boote. U., Singh. J.P.A., Lamers. M., Devkota. P.L.G. (2015). Simulating the impact of water saving irrigation and conservation agriculture practices for rice–wheat systems in the irrigated semi-arid drylands of Central Asia. Agricultural and Forest Meteorology, 214(215), 266-280.

Muhaimeed, A.S., Jaf, D.R. (2016). Land Suitability for Wheat Production under Dry Farming System in Erbil Plain Using Remote Sensing and GIS. International Journal of Research in Agriculture and Forestry, 3(8), 1-9.

Peng, Jian., Zhicong. L., Yanxu, H., Wang, X. A. (2015). Multifunctionality assessment of urban agriculture in Beijing City. China, Science of The Total Environment., 537, 343-351.

Sargin, B and Karaca, S. (2023). Land suitability assessment for wheat-barley cultivation in a semi-arid region of Eastern Anatolia in Turkey. PeerJ, DOI:10.7717/peerj.16396.

سومین کنفرانس ملی آب و هواشناسی ایران (با محوریت تغییر اقلیم)
The 3rd National Conference on Climatology of Iran (Focusing on Climate Change)
ارومیه ۱۶ مهر ۱۴۰۴

Application of the AHP method in agricultural climate zoning for wheat cultivation (Case study: Alborz Province)

Behrouz sobhani

1- Professor of Meteorology, Department of Natural Geography, Faculty of Social Sciences, Unversity of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

* Corresponding author: Email: sobhani@uma.ac.ir

Abstract

Understanding the region and the parameters needed during the growth period of agricultural plants is one of the most important factors in agro-climatic zoning. The aim of this research is to identify areas suitable for wheat cultivation in Alborz province using the AHP method. For this purpose, the following data were used as effective factors: temperature (growth period, germination, flowering, and ripening), maximum temperature of the growth period, minimum temperature of the growth period, precipitation (growth period, germination, flowering, and ripening), degree days, relative humidity, elevation, and slope. Maps for each study area were prepared in the GIS environment. Based on the AHP method, each polygon in the maps was given a weight. The results of this study indicate that precipitation is the most important factor during the growth period of wheat, while topography is the key limiting factor in wheat cultivation. Based on the analysis of the final maps using the AHP method, approximately 37.9% of the area of the province has no restrictions for wheat cultivation, 32.1% has low restrictions, 16.4% has medium restrictions, and 13.6% lacks the necessary potential for wheat cultivation.

Keywords: agricultural climate, wheat, Alborz province, AHP method, and GIS.

سومین کنفرانس ملی آب و هواشناسی ایران (با محوریت تغییر اقلیم)
The 3rd National Conference on Climatology of Iran (Focusing on Climate Change)
ارومیه ۱۶ مهر ۱۴۰۴

پیش‌نگری تغییرات نمایه حداکثر بارش ۵ روزه (Rx5day) با استفاده از سناریوهای مختلفSSPs در شمال غرب ایران

نبی محمدی

دانش آموخته دکتری آب و هواشناسی، دانشگاه تبریز

Email: n.mohamadi1974@gmail.com

چکیده

در این پژوهش به پیش‌نگری بلندمدت تغییرات نمایه حداکثر بارش ۵ روزه در شمال‌غرب ایران در سه دوره آینده (۲۰۵۰-۲۰۲۱، ۲۰۸۰-۲۰۵۱ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱) نسبت به دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۸۵) پرداخته شد. بدین منظور از داده‌های مدل MPI-ESM1-2-LR از CMIP6 تحت سه سناریوی خط سیر اجتماعی- اقتصادی شامل SSP3-7.0، SSP1-2.6 و SSP5-8.5 بهره گرفته‌شد. جهت بررسی روند تغییرات نیز از آزمون من‌کندال (Maan-Kendall) و تخمینگر شیب‌سن استفاده گردید. بر اساس تحقیق، نتایج آزمون من-کندال بر روی سری‌های زمانی حداکثر بارش ۵ روزه در دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۸۵) در بیشتر ایستگاه های منطقه کاهشی است. نتایج تحقیق همچنین نشان داد که میانگین نمایه حداکثر بارش ۵رزوه در منطقه موردمطالعه در دوره پایه برابر با ۵۶ میلی متر است و در دوره‌های آینده بر اساس هر سه سناریوی مورد بررسی افزایش می‌یابد که بیشترین میزان افزایش آن مربوط به سناریوی SSP5-8.5 و برابر با ۲۴ میلی‌متر است. بر اساس نتایج، توزیع مکانی نمایه Rx5day در دوره‌های آینده از الگوی توزیع آن در دوره پایه پیروی می کند که بیشتر متأثر از آرایش توپوگرافی و ناهمواری‌های منطقه است. همچنین بررسی سری زمانی تغییرات حداکثر بارش ۵ روزه در دوره‌های آینده حاکی از دامنه تغییرات زیاد سالیانه آن بر اساس هر سه سناریو نسبت به دوره پایه است.

کلید واژه‌ها: بارش، شمال‌غرب، من-کندال، CMIP6.

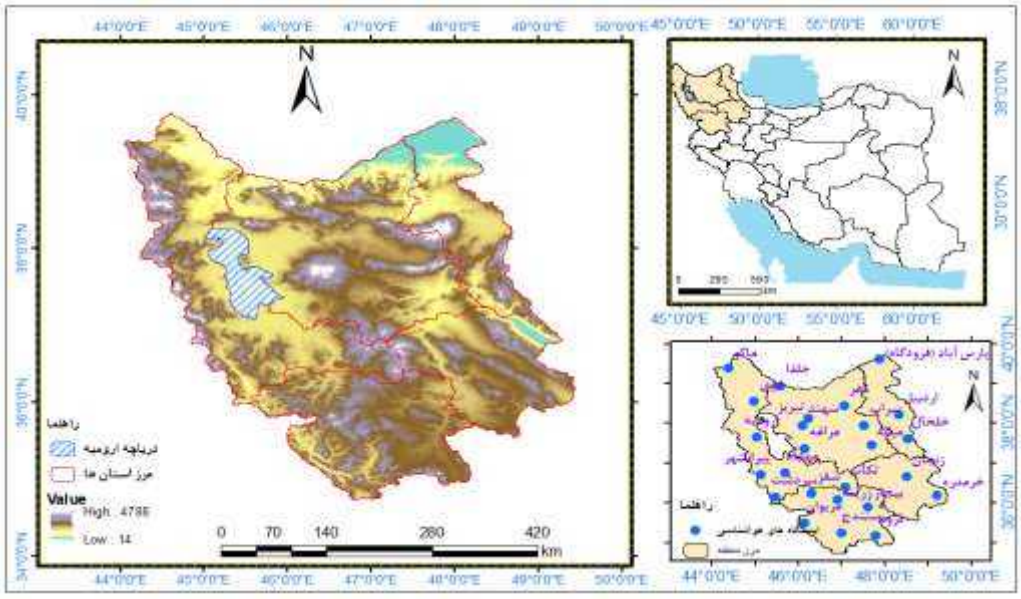
مقدمه

گرم شدن کره زمین و تغییر اقلیم منجر به افزایش احتمال رویدادهای حدی و تغییرات در فراوانی، شدت، وسعت مکانی، مدت و زمان آنها می‌شود و می‌تواند منجر به حدی های بی‌سابقه شود. گرمایش جهانی منجر به افزایش زیاد محتوای بخار آب جوی و تغییرات در چرخه هیدرولوژیکی می‌شود که باعث تشدید بارش‌های حدی می‌شود(Nikools at al. 2012). یکی از نمودهای گرمایش جهانی و تغییر اقلیم افزایش فراوانی و شدت دوره‌های همراه با دماهای بالا و پایین است و برخی مطالعات نشان داده‌اند که تأثیرات فرین‌های اقلیمی آشکارتر و مستقیم‌تر از میانگین‌های آب و هوایی است (هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم, (IPCC,2021). دمای بالاتر نگهداشت رطوبت جو را افزایش داده و این امر به نوبه خود می تواند منجر به افزایش بارش های فرین شود (Yang et al,2018). ممکن است فراوانی، شدت و وسعت فضایی رویدادهای فرین آب و هوایی افزایش یابد (Horton et al.2015). در این راستا ژانگ و همکاران (Zhang at al, 2021) با استفاده از ۴۲ مدل CMIP6 ، دما و بارش در سین کیانگ چین را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان دهنده قدرت این مدل ها برای شبیه سازی دما و بارش بود و مدل های ترکیبی عملکرد بهتری را به نمایش گذاشتند. مجدی و همکاران (Majdi et al,2022) با استفاده از متوسط ۲۳ مدل GCM و دو سناریوی SSP به پیش‌نگری تغییرات دما و بارش در خاورمیانه و شمال آفریقا پرداختند. نتایج حاکی از افزایش دما و کاهش بارش در بیشتر مناطق مورد مطالعه است. ژو و همکاران(Zhu et al,2023) به پیش نگری میانگین و بارش های حدی با استفاده از مدل های CMIP6 در حوزه رودخانه یانگ تسه در چین پرداختند. نتایج حاکی از افزایش بارش تحت سناریوی SSP5-8.5 بود درحالی که تحت دو سناریوی SSSP1-2.6 و SSP3-7.0 میزان بارش در دوره های آینده کاهشی خواهد بود. نازارنکو و همکاران(Nazarenko et al,2025) به بررسی دما و بارش تحت سناریوهای SSP پرداختند. به این منظور ۶ شاخص حدی بارش از جمله حداکثر بارش ۵ روزه را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج حاکی از کاهش بارش در بیشتر پهنه قاره آسیا، آفریقا و اروپا بود در حالی که در قطب شمال و سیبری بیشتر شاخص های حدی بارش افزایش بارش را نشان دادند. صراف و همکاران(۱۴۰۳) به بررسی پیش نگری بارش با استفاده از مدل های CMIP6 تا پایان قرن ۲۱ در شمال غرب ایران تحت سه سناریوی واداشت اجتماعی-اقتصادی(SSP) پرداختند. نتایج تحقیق نشان داد که بر اساس سناریوی SSP1-2.6 در هر سه دوره آینده و به طور متوسط تا پایان قرن ۲۱ به میزان ۲/۶ درصد افزایش پیدا خواهد کرد، اما بر اساس سناریوهای SSP3-7.0 و SSP5-8.5 میزان بارش تا پایان قرن ۲۱ به ترتیب ۱۴/۵ و ۳/۶ درصد کاهش پیدا خواهد کرد که بیشترین میزان کاهش آن نیز مربوط به مناطق پر بارش در جنوب غرب منطقه است. برای ارزیابی تغییرات اقلیمی مدل‌های جهانی (GCMs) طراحی‌شده‌اند که در حال حاضر برای تولید سناریوهای اقلیمی بسیار کارآمد هستند(شائمی و حبیبی‌نوخندان، ۱۳۸۸). در سال‌های اخیر پژوهش‌های فراوانی بر روی نمایه‌های فرین اقلیمی به‌ویژه نمایه‌های بارشی به‌عنوان یکی از شاخص‌های اقلیم کشاورزی در داخل و خارج از کشور صورت گرفته است ولی در کمتر پژوهشی حداکثر بارش ۵ روزه برای دوره‌های آینده پیش‌نگری گردیده است. بنابراین هدف اصلی این پژوهش پیش‌نگری نمایه حداکثر بارش ۵ روزه به‌عنوان یکی از نمایه‌های حدی بارشی با استفاده از داده‌های مدل‌های CMIP6 تحت سناریوهای مختلف SSP تا پایان قرن ۲۱ در شمال غرب ایران می‌باشد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه موردمطالعه

منطقه موردمطالعه در این پژوهش، شمال‌غرب ایران است که از عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۴۴ دقیقه الی ۳۹ درجه و ۴۷ دقیقه عرض شمالی و ۴۴ درجه و ۵ دقیقه الی ۴۹ درجه و ۵۲ دقیقه طول شرقی ازنظر تقسیمات اداری شامل استان‌های آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی، اردبیل، زنجان و کردستان می‌باشد. جهت بررسی از داده‌های ۲۵ ایستگاه همدید به‌صورت روزانه، با توزیع مناسب و دارای دوره آماری بلندمدت (۲۰۱۴-۱۹۸۵)، حداقل سی‌ساله در سطح منطقه موردمطالعه استفاده گردید که موقعیت جغرافیایی آن‌ها در شکل (۱) آورده شده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و توپوگرافی منطقه موردمطالعه و ایستگاه‌های هواشناسی موردبررسی

۲-۲- سناریوهای موردبررسی

به‌روزترین سناریوهای مورداستفاده برای پروژه متقابل مدل‌های جفت شده فاز ششم (CMIP6) و در گزارش ششم ارزیابی (AR6) گنجانده‌شده است که بر اساس مجموعه‌ای از خط سیرهای اجتماعی-اقتصادی مشترک (SSPs) بنانهاده شده‌اند (IPCC,2021). سناریوهای مبتنی بر SSP پیچیده‌ترین سناریوهایی هستند که تا به امروز ایجاد شده‌اند و دامنه‌ای از کاهش بسیار بلندپروازانه تا رشد مداوم انتشار را در برمی‌گیرند. بلندپروازانه ترین سناریوی کاهش به‌طور خاص برای همسویی باهدف دمایی جهانی توافقنامه پاریس طراحی‌شده است که افزایش دمای جهانی را به کمتر از ۲ درجه سلسیوس بالاتر از سطح قبل از صنعتی شدن نگه می‌دارد و تلاش‌ها برای محدود کردن افزایش به ۱/۵ درجه را دنبال می‌کند. سناریوهای مبتنی بر SSP عناصر روایت‌های جدید در مورد توسعه اجتماعی آینده (SSPs) را با تکرار سناریوهای قبلی،

سناریوهای واداشت تابشی (RCPs) ترکیب می‌کنند که مسیرهای تغییر در غلظت گازهای گلخانه‌ای و آئروسل اتمسفر (و تغییرات مربوطه در تشعشعات) را در طول زمان توصیف می‌کنند (ریاحی و همکاران، ۲۰۱۷). در این پژوهش جهت بررسی تغییرات نمایه طول فصل رشد در دوره‌های آینده موردبررسی (۲۱۰۰-۲۰۲۱)، از سنجه‌های خطا سنجی متداول مانند RMSE. MAE و R2 جهت انتخاب مدل بهینه یعنی مدل MPI-ESM1-2-LR استفاده گردید همچنین با استفاده از روش اصلاح اریبی و مقیاس کاهی خطی ((Liner Scaling Bias Correction(LSBC) ، داده‌های مدل CMIP6 اصلاح گردید(Shrestha et al,2015). در ادامه از سه سناریوی خط سیر اجتماعی- اقتصادی مشترک یعنی سناریوی SSP1-2.6 ، SSP3-7.0 و SSP5-8.5 برای بررسی تغییرات حدااکثر بارش ۵ روزه در دوره‌های آتی استفاده گردید.

۲-۳-نمایه حداکثر بارش ۵ روزه (Rx5day)

در این مرحله اول فرایند بررسی کنترل کیفی داده‌ها اقدام به شاخص سازی نمایه حدی حداکثر بارش ۵ روزه(Rx5day) با استفاده از نرم‌افزار Rclimdex در دوره مشاهداتی و آینده گردید. در این پژوهش جهت محاسبه و تجزیه‌وتحلیل Rx5day از نمایه‌های فرین مبتنی بر آستانه‌ها که توسط تیم کارشناسی تحقیقاتی و پایش تغییر اقلیم (Expert Team on Climate Change Detection, Monitoring and Indices(ETCCDMI) معرفی‌شده‌اند استفاده گردید (جدول ۱)

جدول ۱- ویژگی‌های نمایه فرین موردبررسی در این پژوهش

شاخص	نام تشریحی	تعریف	واحد
Rx5day	حداکثر بارش ۵ روزه (Max 5-day precipitation Amount)	اگر RRij میزان بارش ماهانه ۵ روز در دوره j باشد، آنگاه حداکثر بارش ۵ روزه برای دوره j عبارت است از (RX5DAYi = MAX(RRIJ)	میلی متر

۳-یافته های تحقیق

بررسی آماره من-کندال بر روی سری زمانی نمایه حداکثر بارش ۵ روزه در دوره پایه نشان داد که این آماره در بیشتر ایستگاه‌های منطقه کاهشی است و فقط در ایستگاه‌های مراغه و تکاب دارای روند معنی‌دار است. در سایر ایستگاه‌ها با شیب نسبتاً کمی افزایشی است ولی فاقد روند معنی‌دار است. همچنین نتایج تغییرات شیب سن بر روی سری زمانی Rx5day نشان داد که بیشترین شیب افزایشی و کاهشی به ترتیب مربوط به ایستگاه‌های جلفا و مراغه با شیب سن برابر با ۰/۴۲ و ۲/۲۸- میلی‌متر در سال است (جدول ۲).

جدول ۲- نتایج حاصل از آزمون آماری من-کندال و شیب سن در دوره پایه(۲۰۱۴-۱۹۸۵) بر روی سری‌های زمانی Rx5day

ردیف	ایستگاه	من-کندال	شیب سن	ردیف	ایستگاه	من-کندال	شیب سن
۱	اردبیل	-/۸۰	-/۱۳	۱۴	زرینه	-۱/۳۳	-۱/۲۰
۲	ارومیه	۰/۱۱	۰/۰۳	۱۵	زنجان	۰/۹۶	۰/۲۸
۳	اهر	-/۵۱	-/۰۶	۱۶	سراب	۰/۰۰	۰/۰۰
۴	بیجار	۰/۴۰	۰/۱۰	۱۷	سردشت	-/۳۰	-/۴۳
۵	پارس‌آباد	۰/۱۴	۰/۰۲	۱۸	سقز	-۱/۷۷	-/۵۶
۶	پیرانشهر	-/۲۲	۰/۰۲	۱۹	سنندج	-۱/۸۲	-/۵۲
۷	تبریز	۱/۱۲	-/۲۴	۲۰	سهند	-/۶۲	-/۱۴
۸	تکاب	-۲/۳۵*	-/۸۷	۲۱	قروه	۰/۱۶	۰/۱۸
۹	جلفا	۱/۹۲	۰/۴۲	۲۲	ماکو	۰/۸۹	۰/۳۰
۱۰	خرمدره	۰/۶۳	۰/۱۱	۲۳	مراغه	-۲/۰۱*	-۲/۲۸
۱۱	خلخال	-۱/۱۹	-/۴۵	۲۴	مریوان	-۱/۰۶	-/۵۹
۱۲	خوی	۰/۲۵	۰/۰۶	۲۵	مهاباد	-/۷۵	-/۲۲
۱۳	میانه	-۰/۵۵	-/۲۰				

**معنی‌داری در سطح ۱٪ درصد *معنی‌داری در سطح ۵٪ درصد

بررسی تغییرات سری زمانی نمایه حداکثر بارش ۵روزه (Rx5day) در دوره‌های آینده مورد بررسی تحت سناریوSSP1-2.6 نشان‌دهنده آماره افزایشی در ایستگاه‌های موردمطالعه است که در ایستگاه‌های اهر و سراب در سطح ۵٪ دارای روند معنی‌دار است. آماره من-کندال در ایستگاه سنندج در جنوب منطقه نیز کاهشی شده است. بیشترین میزان تغییرات نیز بر اساس تخمینگر شیب سن با ۰/۴۴ میلی‌متر مربوط به ایستگاه پیرانشهر است (جدول ۳).

جدول۳- روند تغییرات Rx5day تحت سناریوی SSP1-2.6 و SSP3-7.0 در دوره آینده (۲۱۰۰-۲۰۲۱)

				SSP3-7.0	SSP1-2.6		SSP3-7.0	SSP1-2.6

ردی ف	ایستگاه	من-کندال	شیب سن	من-کندال	شیب سن	ردی ف	ایستگاه	من-کندال	شیب سن	من-کندال	شیب سن
۱	اردبیل	۰/۵۳	۰/۰۳	۰/۸۳	۰/۰۴	۱۴	زنجان	۰/۷۶	۰/۰۵	۰/۵۱	۰/۰۳
۲	ارومیه	-۰/۲۲	-۰/۰۲	۰/۸۴	۰/۰۷	۱۵	سراب	-۰/۲۰	-۰/۰۱	۲/۲۳*	۰/۱۰
۳	اهر	۱/۰۸	۰/۰۵	۲/۰۹*	۰/۱۳	۱۶	سردشت	-۱/۴۳	-۰/۴۰	۱/۲۶	۰/۳۷
۴	بیجار	۰/۰۵	۰/۰۰	۱/۵۲	۰/۱۳	۱۷	سقز	۰/۶۱	۰/۰۸	۰/۹۴	۰/۱۳
۵	پارس‌آباد	-۰/۹۷	-۰/۰۹	۱/۷۸	۰/۱۷	۱۸	سنندج	۰/۰۳	۰/۰۱	-۰/۱۱	-۰/۰۴
۶	پیرانشهر	-۴/۳۰**	-۰/۹۶	۱/۵۷	۰/۴۴	۱۹	سهند	۰/۴۹	۰/۰۵	۰/۸۲	۰/۰۷
۷	تبریز	۱/۰۸	۰/۰۵	۱/۱۹	۰/۰۵	۲۰	قروه	۰/۲۰	۰/۰۴	۰/۲۳	۰/۰۶
۸	تکاب	-۰/۵۲	-۰/۰۵	۱/۰۲	۰/۱۲	۲۱	ماکو	-۰/۹۳	-۰/۰۵	۱/۰۳	۰/۰۸
۹	جلفا	-۱/۱۵	-۰/۰۷	۱/۷۷	۰/۱۹	۲۲	مراغه	۱/۱۷	۰/۰۸	۱/۱۵	۰/۰۸
۱۰	خرمدره	۰/۸۶	۰/۰۶	۰/۴۹	۰/۰۳	۲۳	مریوان	۱/۲۵	۰/۲۵	۰/۹۰	۰/۱۸
۱۱	خلخال	۰/۴۱	۰/۰۳	۱/۳۴	۰/۱۰	۲۴	مهاباد	-۰/۳۴	-۰/۰۵	۰/۹۱	۰/۲۰
۱۲	خوی	-۱/۱۰	-۰/۰۸	۱/۹۱	۰/۲۰	۲۵	میانه	۱/۰۷	۰/۰۸	۰/۶۱	۰/۰۳
۱۳	زرینه	-۰/۰۷	-۰/۰۱	۱/۰۵	۰/۱۲						

**معنی‌داری در سطح ۱٪ درصد *معنی‌داری در سطح ۵٪ درصد

بررسی نتایج آزمون من-کندال بر روی سری زمانی نمایه Rx1day بر مبنای سناریوSSP3-7.0 نشان‌دهنده آماره افزایشی در بیشتر ایستگاه‌ها و آماره کاهشی در چند ایستگاه ازجمله تکاب، جلفا، خوی، ماکو و مهاباد است. آماره آزمون در ایستگاه پیرانشهر به‌صورت کاهشی و در سطح ۱٪ و در ایستگاه‌های تبریز، مراغه و میانه به‌صورت افزایشی و در سطح ۵٪ دارای روند معنی‌دار است. بیشترین شیب سن افزایشی و کاهشی نیز با ۰/۱۵ و ۰/۹۶- مربوط به ایستگاه‌های مریوان و پیرانشهر است (جدول ۳).

بررسی آماره من-کندال بر روی سری زمانی نمایه Rx5day بر اساس سناریوSSP5-8.5 نیز نشان‌دهنده شیب افزایشی و کاهشی این نمایه در بین ایستگاه‌های منطقه است و این آماره تنها در ایستگاه‌های پارس‌آباد (۱/۹۸-)، سنندج (۲/۰۳) و میانه (۱/۹۷) دارای روند معنی‌دار است. شیب تغییرات نیز در این سناریو اندکی افزایش‌یافته است به صورتی که بیشترین شیب کاهشی و افزایشی با ۷۲/- و ۰/۳۸مربوط به سنندج و مریوان است (جدول ۴).

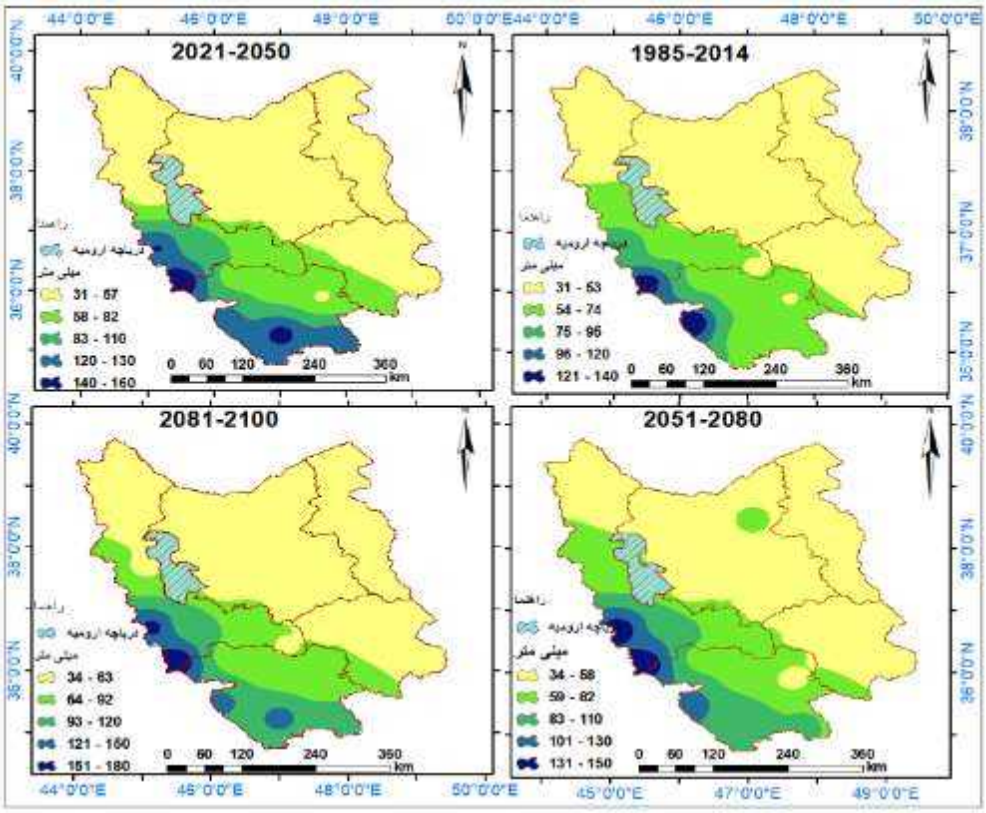
جدول۴- روند تغییرات نمایه Rx5day تحت سناریوSSP5-8.5 در دوره آینده (۲۱۰۰-۲۰۲۱)

ردیف	ایستگاه	من-کندال	شیب سن	ردیف	ایستگاه	من-کندال	شیب سن
۱	اردبیل	۱/۲۷	۰/۰۶	۱۴	زرینه	-/۱۷	-/۰۳
۲	ارومیه	۰/۱۳	۰/۰۲	۱۵	زنجان	۰/۶۴	۰/۰۵
۳	اهر	۰/۳۸	۰/۰۲	۱۶	سراب	۱/۰۱	۰/۰۵
۴	بیجار	۰/۲۳	۰/۰۳	۱۷	سردشت	-۱/۸۷	-/۶۵
۵	پارس‌آباد	-۱/۹۸*	-/۱۸	۱۸	سقز	۰/۲۶	۰/۰۶
۶	پیرانشهر	-۱/۶۴	-/۵۰	۱۹	سنندج	-۲/۰۳*	-/۷۲
۷	تبریز	۱/۱۳	۰/۰۷	۲۰	سهند	۱/۳۱	۰/۰۸
۸	تکاب	-/۴۹	-/۰۹	۲۱	قروه	-۱/۸۶	-/۵۳
۹	جلفا	-۱/۱۸	-/۱۲	۲۲	ماکو	-/۲۳	-/۰۳
۱۰	خرمدره	۰/۹۴	۰/۰۸	۲۳	مراغه	۱/۱۷	۰/۰۸
۱۱	خلخال	۰/۰۳	۰/۰۰	۲۴	مریوان	۱/۳۰	۰/۳۸
۱۲	خوی	-/۹۴	-/۱۰	۲۵	مهاباد	-۱/۲۰	-/۲۴
۱۳	میانه	۱/۹۷*	۰/۱۳				

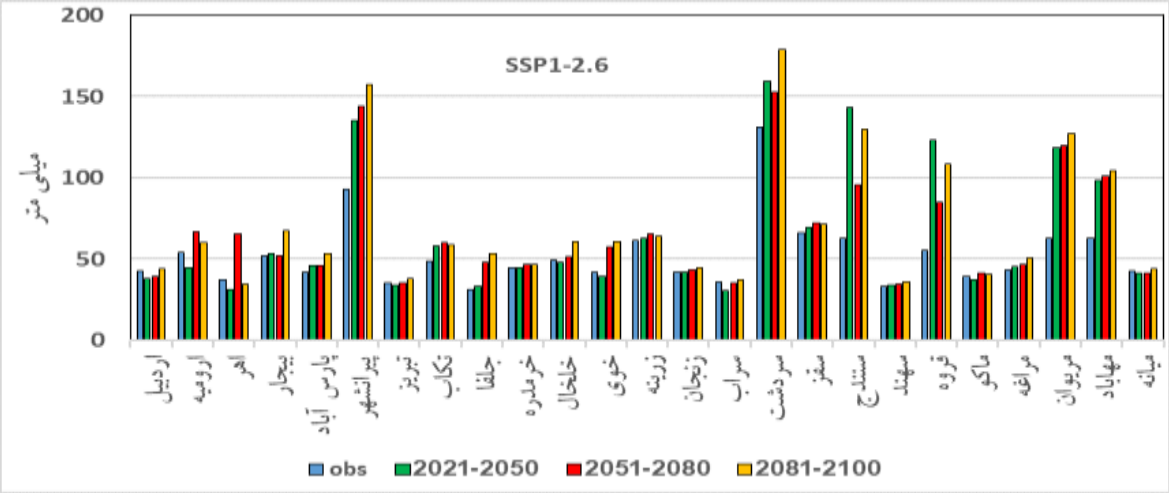
**معنی‌داری در سطح ۱٪ درصد *معنی‌داری در سطح ۵٪ درصد

بر اساس نتایج میانگین نمایه Rx5day در دوره پایه برابر با ۵۶ میلی‌متر است که در دوره‌های آینده (۲۰۵۰-۲۰۲۱، ۲۰۸۰-۲۰۵۱ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱) به ترتیب ۱۰/۷، ۱۰/۸ و ۱۵/۸ میلی‌متر افزایش می‌یابد. توزیع مکانی آن در دوره پایه با دو هسته بیشینه با میانگین ۱۳۰ میلی‌متر در جنوب غرب منطقه (ایستگاه‌های پیرانشهر و سردشت) مشخص‌شده است. با حرکت از جنوب و جنوب غرب به شمال و شمال شرق از میزان Rx5day کاسته می‌شود (شکل‌های ۲ و۳).

توزیع مکانی آن در دوره‌های آینده تحت سناریوی SSP1-2.6 از الگوی دوره پایه پیروی می‌کند. دامنه تغییرات این نمایه در دوره آینده نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۱)، بین ۳۱ و ۱۶۰ میلی‌متر است و در این دوره دارای دو هسته بیشینه با میانگین ۱۵۰ میلی‌متر در جنوب و جنوب غرب منطقه است. از نکات جالب‌توجه افزایش زیاد میزان Rx5day دو ایستگاه سنندج و قروه در این دوره نسبت به دوره پایه است. به‌طوری‌که این دو ایستگاه هر دو به ترتیب ۷۱ و ۶۸ میلی‌متر نسبت به دوره پایه افزایش داشته‌اند. با حرکت از جنوب و غرب منطقه به شمال و شمال شرق از میزان حداکثر بارش ۵ روزه کاسته می‌شود. توزیع مکانی آن در دوره‌های (۲۰۸۰- ۲۰۵۱ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱) همانند دوره پایه است و دامنه تغییرات آن در این دو دوره به ترتیب بین ۳۴ تا ۱۶۰ و ۱۸۰ میلی‌متر است. بیشترین تغییرات آن مربوط به دوره انتهایی قرن بیست و یکم (۲۱۰۰-۲۰۸۱) است و در دوره‌های آینده دامنه بارش ۳۱ تا ۶۳ میلی‌متری بیشترین مساحت منطقه را در مناطق شمالی، مرکزی و شرقی منطقه به خود اختصاص می‌دهد. درمجموع و براساس سناریوی SSP1-2.6 با توجه به افزایش حداکثر بارش‌های ۵ روزه در آینده و به‌ویژه در مناطق جنوبی و جنوب غربی منطقه احتمال افزایش رخداد مخاطراتی مانند سیل، رانش و لغزش زمین به‌ویژه در دامنه‌های پرشیب اطراف سنندج تا اورامانات زیاد خواهد بود (شکل‌های ۲ و۳).

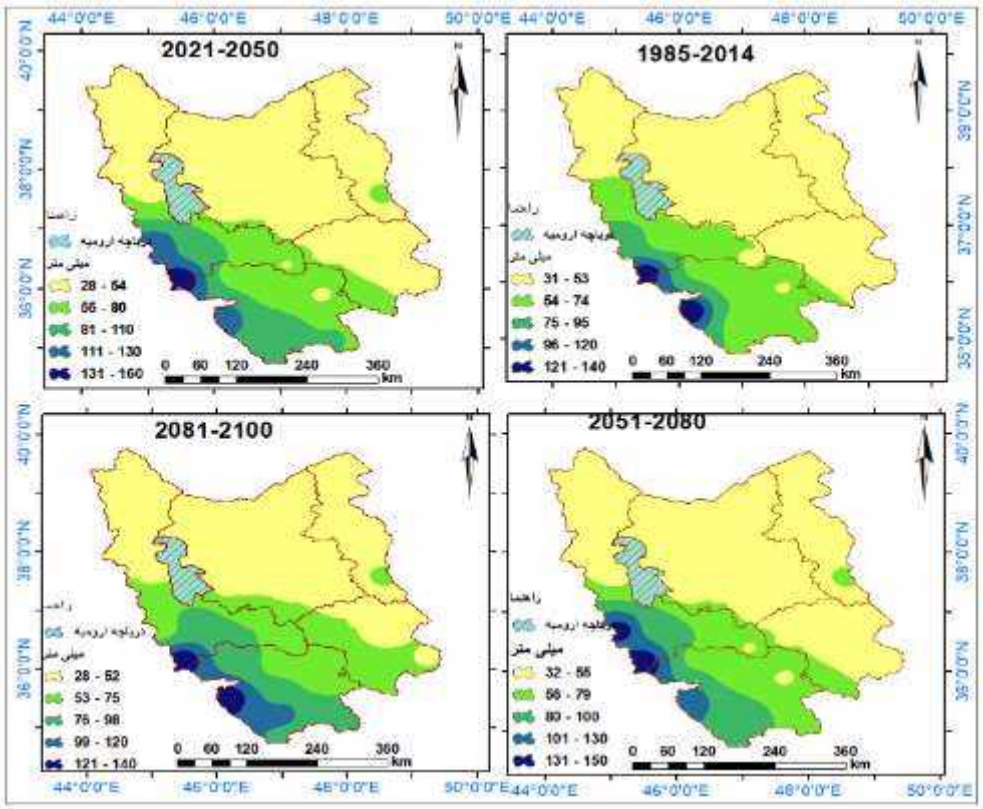


شکل ۲- توزیع فضایی شاخص Rx5day با استفاده از سناریوی SSP1-2.6 در منطقه موردبررسی

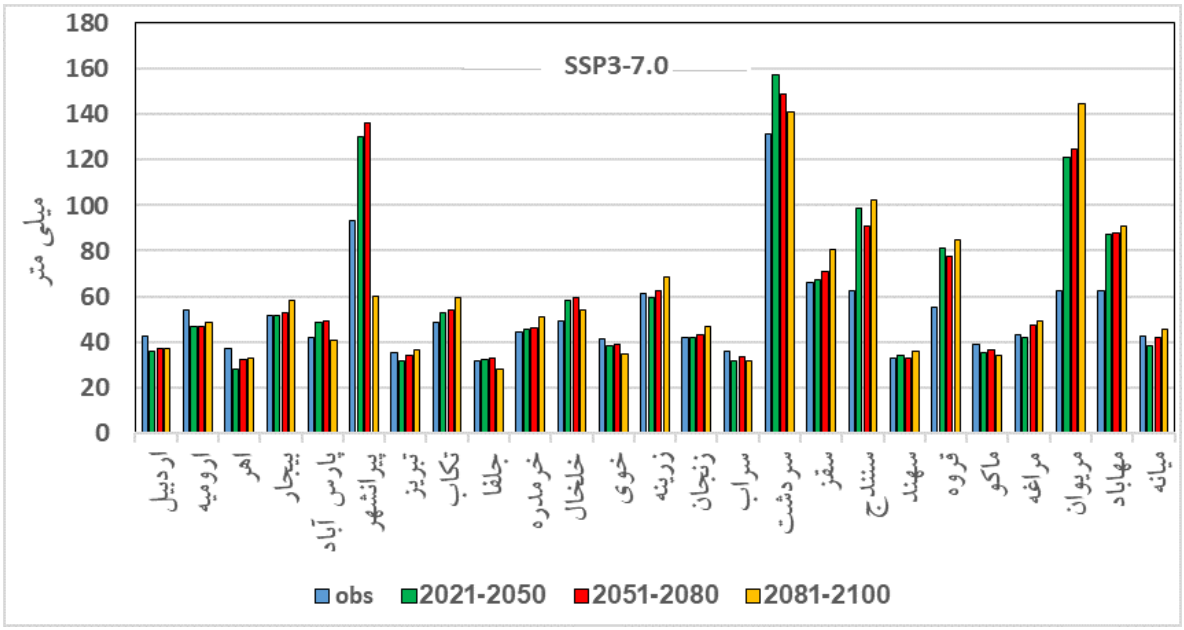


شکل ۳- تغییرات نمایه Rx5day تحت سناریوSSP1-2.6 به تفکیک ایستگاه

توزیع مکانی نمایه Rx5day تحت سناریوSSP3-7.0 در منطقه موردمطالعه نشان می‌دهد که این نمایه در دوره‌های آینده افزایش خواهد یافت و این افزایش نسبت به سناریو قبلی کمتر است به‌طوری‌که در دوره‌های آینده (۲۰۵۰-۲۰۲۱، ۲۰۸۰-۲۰۵۱ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱) به ترتیب۵/۹، ۵/۷ و ۴/۹ میلی‌متر نسبت به دوره پایه افزایش را نشان می‌دهد. در دوره آینده (۲۰۵۰-۲۰۲۱) دارای یک هسته بیشینه ۱۴۵ میلی‌متری در غرب منطقه مشخص می‌شود و الگوی کلی توزیع مکانی آن شبیه دوره پایه است. در این دوره دامنه تغییرات این نمایه بین ۲۸ و ۱۶۰ میلی‌متر است که نسبت به دوره‌های پایه و آینده دارای بیشترین دامنه تغییرات است. توزیع مکانی آن در دوره‌های (۲۰۸۰- ۲۰۵۱ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱) نیز همانند دوره پایه است. دامنه تغییرات آن در این دو دوره به ترتیب بین ۳۲ تا ۱۵۰ و ۲۸ تا ۱۴۰ میلی‌متر است. به‌طورکلی در دوره‌های آینده، دامنه تغییرات طبقه بارشی ۲۸ تا ۱۶۰ میلی‌متری بیشترین مساحت منطقه را در نواحی شمالی، مرکزی و شرقی به خود اختصاص می‌دهد. بر اساس این سناریو میزان نمایه حداکثر بارش ۵ روزه در ایستگاه‌های اردبیل، ارومیه، اهر، خوی، سراب و ماکو در هر سه دوره نسبت به دوره پایه کاهش و در سایر ایستگاه‌ها افزایش‌یافته است (شکل‌های ۴ و ۵).

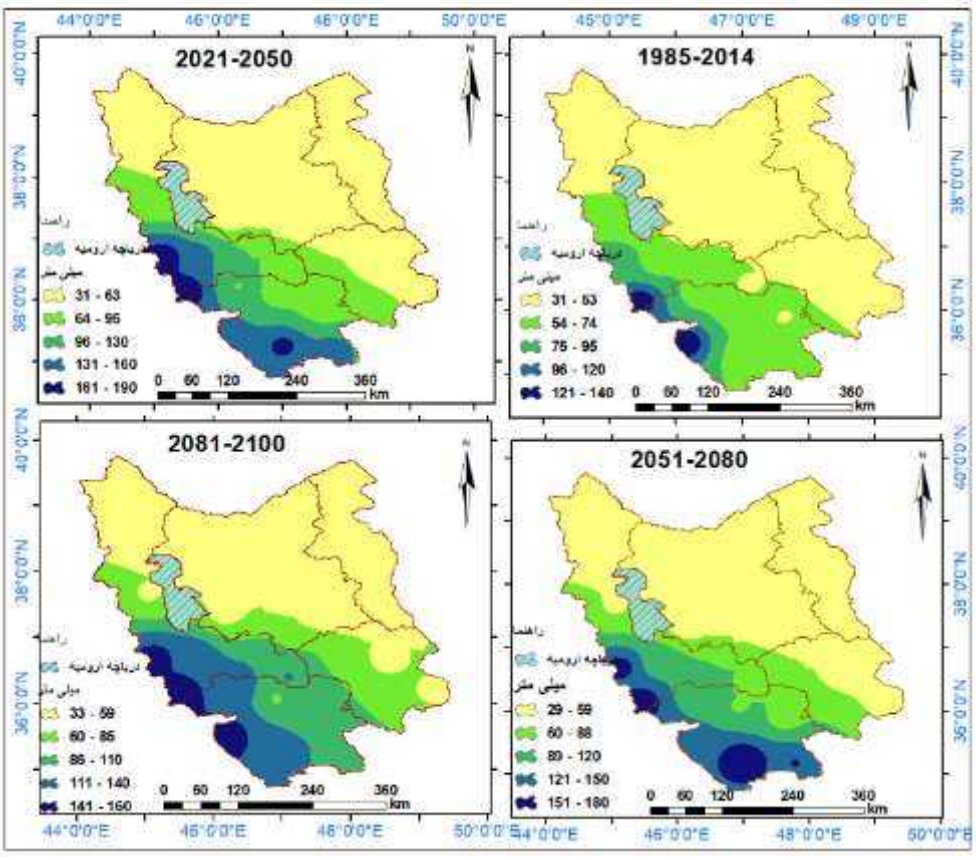


شکل ۴-توزیع فضایی شاخص Rx5day با استفاده از سناریوی SSP3-7.0 در منطقه موردبررسی

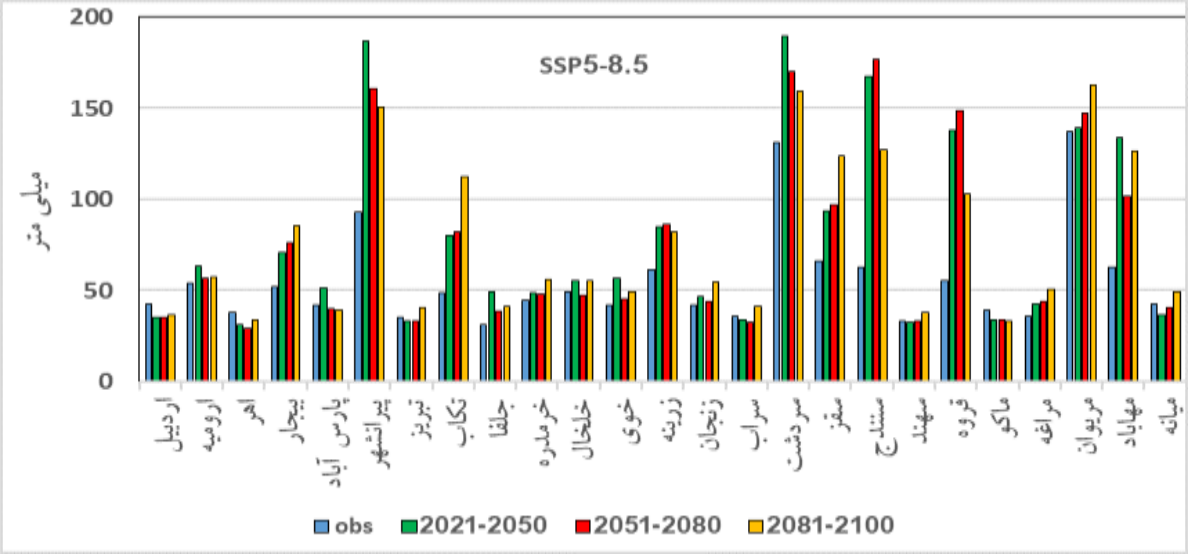


شکل ۵-تغییرات نمایه Rx5day تحت سناریوSSP3-7.0 به تفکیک ایستگاه

بررسی توزیع مکانی نمایه Rx5day تحت سناریوSSP5-8.5 نشان‌دهنده افزایش میانگین آن در منطقه موردمطالعه است، به‌طوری‌که در دوره‌های آینده (۲۰۵۰-۲۰۲۱، ۲۰۸۰-۲۰۵۱ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱) به ترتیب۲۴، ۱۸/۸ و ۲۴ میلی‌متر نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد. حداکثر بارش ۵ روزه نسبت به دوره پایه تنها در ایستگاه اهر کاهشی بوده است و در سایر ایستگاه‌ها افزایش‌یافته است. توزیع مکانی این نمایه در دوره (۲۰۵۰-۲۰۲۱) با دامنه تغییرات بین ۳۱ تا ۱۹۰ میلی‌متر دارای هسته‌های بیشینه ۱۷۵ میلی‌متری در غرب و جنوب منطقه به‌صورت پیوسته از سردشت تا پیرانشهر است. توزیع مکانی این نمایه در دوره (۲۰۸۰-۲۰۵۱) مشابه دوره قبلی با سه هسته بیشینه در جنوب و غرب منطقه می‌باشد و دامنه تغییرات آن بین ۲۹ تا ۱۸۰ میلی‌متر در تغییر است. در دوره آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۸۱) با دامنه تغییرات ۳۳ تا ۱۶۰ میلی‌متر از غرب به شرق و شمال منطقه از میزان میانگین حداکثر بارش ۵ روزه در منطقه کاسته می‌شود و در این دوره هسته‌های بیشینه با میانگین ۱۵۱ میلی‌متر همچنان متعلق به نواحی غربی و جنوب غربی منطقه است (شکل‌های ۶ و۷).

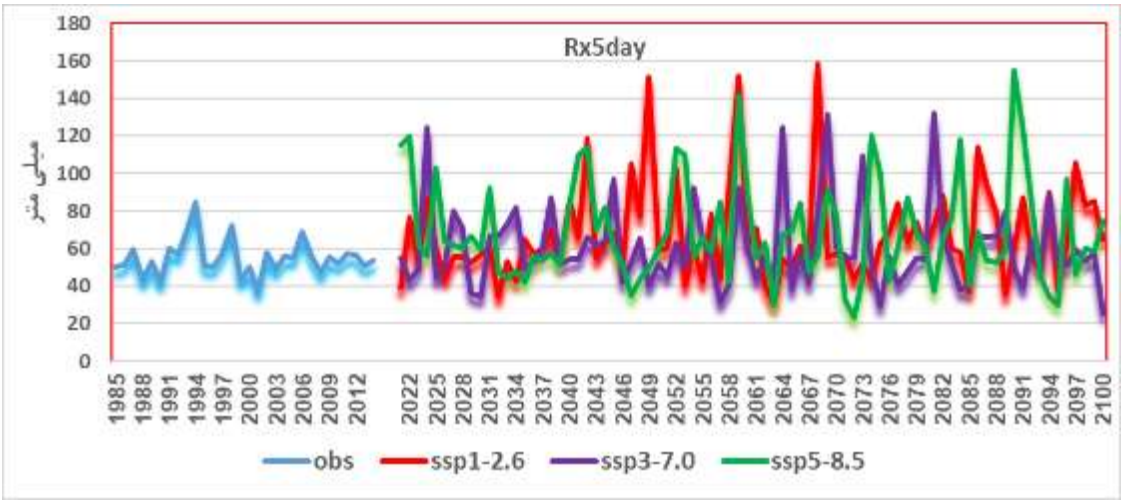


شکل ۶- توزیع فضایی شاخص Rx5day با استفاده از سناریوی SSP5-8.5 در منطقه موردبررسی



شکل ۷-تغییرات نمایهRx5day تحت سناریوSSP5-8.5 به تفکیک ایستگاه

بررسی سری‌های زمانی Rx5day در دوره ۱۹۸۵ تا ۲۱۰۰ نشان می‌دهد که در دوره بلندمدت تفاوت‌های قابل‌توجهی را نسبت به دوره پایه به نمایش می گذارد. به‌طورکلی، بررسی تغییرات نمایه حداکثر بارش ۵ روزه در دوره‌های آتی (۲۱۰۰-۲۰۲۰) در شمال غرب ایران نشان‌دهنده افزایش آن با دامنه تغییرات سالانه بیشتر بر اساس هر سه سناریو نسبت به دوره پایه در منطقه موردمطالعه است (شکل ۸).



شکل ۸-سری زمانی تغییرات نمایه Rx5day دوره موردبررسی در منطقه موردمطالعه

۴-نتیجه گیری

بررسی تغییرات حدی‌های بارشی به دلیل افزایش احتمالی بارش‌های سنگین، خشکسالی و رخداد طوفان‌های تابستانی دارای اهمیت زیادی است. لذا در این پژوهش به پیش‌نگری تغییرات حداکثر بارش ۵ روزه به عنوان یکی از حدی‌های بارشی مهم در شمال‌غرب کشور در دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۸۵) و سه دوره آینده (۲۰۵۰-۲۰۲۱، ۲۰۸۰-۲۰۵۱ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱) پرداخته‌شد. جهت پیش‌نگری تغییرات در دوره آینده از مدل MPI-ESM1-2-LR تحت سه سناریوی SSP1-2.6, SSP3-7.0 و SSP5-8.5 بهره‌گرفته‌شد. از آزمون روند من-کندال و تخمینگر شیب‌سن نیز جهت بررسی تغییرات در دوره‌های مورد بررسی استفاده شد. نتایج بررسی نمایه حداکثر بارش ۵ روزه (Rx5day) در دوره پایه نشان داد که میانگین آن در منطقه ۵۶ میلی‌متر است و در دوره‌های آینده بر اساس هر سه سناریوی موردبررسی افزایش خواهد یافت. نتایج آماره من-کندال بر روی سری زمانی حداکثر بارش ۵ روزه در دوره پایه نشان‌دهنده آماره کاهشی آن در بیشتر ایستگاه‌های موردمطالعه است که در چند ایستگاه دارای روند معنی‌دار است و در دوره‌های آینده بر اساس سناریوی SSPP1-2.6 در بیشتر ایستگاه‌ها افزایشی و بر اساس دو سناریوی دیگر در بیشتر ایستگاه‌ها کاهشی است و این کاهش در ایستگاه‌های پیرانشهر، پارس‌آباد و سنندج دارای روند معنی‌دار است. توزیع مکانی نمایه Rx5day نشان‌دهنده هسته‌های بیشینه در جنوب غرب و کاهش میزان نمایه به‌طرف شرق است و این الگوی توزیع از آرایش توپوگرافی و ناهمواری‌های منطقه متأثر است. بر اساس نتایج حاصل می‌توان بیان کرد تغییرات این نمایه با ناهنجاری‌های آب‌وهوایی و همچنین پیامدهای اجتماعی-اقتصادی در منطقه مورد مطالعه همراه خواهد بود و باعث می‌شود شرایط نرمال زندگی در این منطقه مختل گردد و دارای آسیب‌پذیری بالایی از نظر تغییرپذیری حدی‌های بارشی است. بنابراین لازم است برنامه‌ریزان مربوطه در بخش های مختلف به ویژه منابع آب و کشاورزی، برنامه‌ها و راهکارهای لازم برای مقابله و یا سازگاری با تغییرات اقلیمی حاصل را اتخاذ نمایند.

منابع

ساری صراف، ب، رستم زاده، ه و محمدی، ن (۱۴۰۳) . پیش نگری بارش با استفاده از مدل های CMIP6 تا پایان قرن ۲۱ در شمال غرب ایران، جغرافیا و مخاطرات محیطی، سال سیزدهم، شماره چهل و نهم، بهار ۱۴۰۳، صص۱۹۴-۱۷۳. 10.22067/geoeh.2022.76646.1223.

شائمی، ا. و حبیبی نوخندان، م. (۱۳۸۸). گرمایش جهانی و پیامدهای زیستی اکولوژیکی، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد.

Horton, D.E., Johnson, N.C., Singh, D., Swain, D.L., Rajaratnam, B.& Diffenbaugh, N.S. (2015). Contribution of changes in atmospheric circulation patterns to extreme temperature trends. Nature. 522 (7557), 465–469.

IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L.

Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu & B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.

Majdi, F., Hosseini, S.A., Karbalaee, A., Kaseri, M.& Marjanian, S. (2022). Future projection of precipitation and temperature changes in the Middle East and North Africa (MENA) region based on CMIP6. Theoretical and Applied Climatology, https://doi.org/10.1007/s00704-021-03916-2.

Nazarenko, L.S.; Tausnev, N.L.; Elling & Temperature M.T .(2025). Precipitation Extremes Under SSP Emission Scenarios with GISS-E2.1 Model. Atmosphere, 16, 920. https://doi.org/10.3390/ atmos16080920.

Nicholls, S.I., N. Easterling, D; Goodess, C.M; Kanae, S; Kossin, J; Luo, Y; Marengo,J; McInnes,K; Rahimi,M; Reichstein, M; Sorteberg, A; Vera, C. and Zhang,X. (2012) .Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, PP. 109-230.

Riahi K, Van Vuuren DP, Kriegler E, Edmonds J, O'neill BC & Fujimori S et al .(2017). The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: an overview. Glob Environ Chang 42:153–168.

Shrestha, S., Shrestha, M.& Babel, M.S. (2015). Modelling the potential impacts of climate change on hydrology of Indrawati River Basin in Nepal. Environmental Earth Science.

Yang, X; Wood, E. F; Shefield, J; Ren, L; Zhang, M. & Wang, Y. (2018). Bias Correction of Historical and Future Simulations of Precipitation and Temperature for China from CMIP5 Models. Journal of Hydrometeorology.

Zhang, L. Hua and. Jiang, D. (2020). Assessment of CMIP6 model performance for temperature and precipitation in Xinjiang , China, Atmospheric and Oceanic Science Letters, https://doi.org/10.1016/j.aosl.2021.100128.

Zhu, C.; Yue & Q.; Huang, J .(2023). Projections of Mean and Extreme Precipitation Using the CMIP6 Model: A Study of the Yangtze River Basin in China. Water, 15, 3043. https://doi.org/10.3390/w15173043

تحلیل تأثیرات تغییرات اقلیمی بر تغییرپذیری بارش در حوضه‌های آبریز دریاچه‌های ارومیه و وان تحت سناریوهای مختلف

کامران تقی پور[1]

دانشجوی کارشناسی ارشد رشته ای و هواشناسی گرایش تغییراقلیم

Kamrantaghipoor49@gmail.com

چکیده :

این مطالعه با هدف بررسی تغییرات بارش در مناطق ارومیه و وان ترکیه تحت تأثیر تغییرات اقلیمی و چگونگی تغییر آنها تحت تأثیر تغییرات اقلیمی آینده انجام شد. این مطالعه با استفاده از داده‌های مدل گردش عمومی جو (GFDL-ESM2G) بارش آینده در مناطق ارومیه و وان ترکیه را شبیه‌سازی کرد. یکی از نقاط ضعف اصلی مدل‌های گردش عمومی جو (GCMs)، مقیاس مکانی بزرگ متغیرهای اقلیمی شبیه‌سازی شده است. شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANNs) مدل‌های آماری هستند که برای کوچک‌مقیاس کردن متغیرهای اقلیمی از مدل‌های گردش عمومی جو (GCMs) استفاده شده‌اند. گام کلیدی در استفاده از این مدل‌ها، انتخاب مناسب‌ترین پارامترهای ورودی از داده‌های گسترده ارائه شده توسط مدل‌های گردش عمومی جو است. بنابراین، این مطالعه از ضرایب همبستگی برای انتخاب پارامترهای ورودی مؤثر استفاده کرد. نتایج نشان می‌دهد که در حالی که الگوهای بارش در وان، ترکیه و ارومیه بسیار مشابه هستند، و ارومیه حتی در ماه‌های خاصی از سال بارش بیشتری دریافت می‌کند، الگوهای متمایزی در دو دریاچه مشاهده می‌شود.

کلید واژه‌ها : تغییر اقلیم ،بارش شبکه عصبی مصنوعی دریاچه وان دریاچه ارومیه

مقدمه :

این راهنما به منظور استفاده مولفین مقالات کامل برای نوشتن مقالات فارسی مطابق الگوی استاندارد و واحد این کنفرانس تهیه شده است. رعایت این ضوابط برای همه مولفین محترم اجباری است. توجه نمایید که متن حاضر نیز با رعایت همین ضوابط تهیه شده است و می‌تواند جهت نمونه عملی مورد استفاده قرار گیرد (البته پس از حذف علائم و توضیحات راهنمای اضافی). مقالات باید در قالب نرم افزار مایکروسافت وُرد (MS word) تهیه و با فرمت‌های docx و pdf از طریق تارنمای کنفرانس ارسال گردد.

متن مقالات (فونت B Mitra – اندازه ۱۱)

تغییرات اقلیمی یک پدیده طبیعی بلندمدت است. مهم‌ترین عوامل تشدیدکننده تغییرات اقلیمی[20] شامل تغییرات در تابش خورشیدی منعکس‌شده، تغییرات در مدار زمین، گازهای گلخانه‌ای[21] و رانش قاره‌ای است (فرح، مکنون و ثقفیان، ۱۳۹۰). تأثیر تغییرات اقلیمی بر بارش، که یکی از عوامل اصلی در منابع آب ملی است، توجه اقلیم‌شناسان، هواشناسان، مهندسان منابع آب و هیدرولوژیست‌ها را می‌طلبد. در صورت عدم توجه، تغییرات اقلیمی آینده می‌تواند به شدت به کمیت و کیفیت منابع آب و همچنین زیرساخت‌های اقتصادی و اجتماعی ملی آسیب برساند(ناظم‌السادات، سامانی و مولایی نیکوم، ۱۳۸۴). مطالعه تغییرات اقلیمی و تأثیرات آن بر این منابع برای پرداختن به شرایط نامطلوب اقلیمی و تغییرات در کمیت و کیفیت منابع آب و اتخاذ سیاست‌های مناسب برای کاهش این خسارات بسیار مهم است. در سال‌های اخیر، مطالعات در سراسر جهان از مدل‌های مختلفی برای بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر بارش استفاده کرده‌اند(Ramirez et al., 2005). به عنوان مثال، ماریا و همکاران (۲۰۰۵) از شبکه‌های عصبی مصنوعی و مدل‌های رگرسیون برای پیش‌بینی بارش در منطقه سائوپائولو برزیل[22] استفاده کردند. نتایج نشان داد که هر دو مدل تخمین‌های بسیار دقیقی برای منطقه مورد مطالعه ارائه می‌دهند(Harpham & Wilby, 2005). هارپهام و وبلی (۲۰۰۵) از هر دو مدل SDSM[23] و شبکه عصبی برای پیش‌بینی بارندگی استفاده کردند، که مدل شبکه عصبی مصنوعی عملکرد بهتری داشت(Souvignet & Heinrich, 2011). در مطالعه خود، سوپوجانت و هنریک (۲۰۱۰) از خروجی‌های سه مدل گردش عمومی (GFDL GCGM3) و MRI برای بررسی توانایی SDSM در شبیه‌سازی داده‌های بارش و دما در منطقه ناهمگن آند مرکزی[24] در آمریکای جنوبی[25] استفاده کردند.

20 Climate change

21 Green house gases

22 Sao Paulo (Brazil)

23 Statistical Downscaling Model

24 Centeral Andes

25 South America

علاوه بر این، آنها از تحلیل فرکانس برای بررسی توانایی متغیرهای کوچک‌مقیاس‌شده برای نمایش رویدادهای حدی استفاده کردند.

نتایج نشان داد که عدم قطعیت در بارش کوچک‌مقیاس‌شده بالا است و این متغیرها نمی‌توانند رویدادهای حدی را به طور دقیق بازتولید کنند(Zarghami et al., 2011). ضرغامی و همکاران (۲۰۱۱) مدل HadCM3 را در منطقه آذربایجان شرقی۲۶ به کار بردند و از دو روش کوچک‌مقیاس‌سازی ۲۷ANN و LARS-WG برای سه سناریوی تغییر اقلیم استفاده کردند: B1، A1B و A2. در نتیجه، میانگین دما بین سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۵۰ تقریباً ۲.۳ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد و میزان بارندگی تقریباً ۳ درصد تغییر خواهد کرد. (Grillakis et al., 2011).

تأثیرات تغییرات اقلیمی بر هیدرولوژی و خشکسالی در حوضه کریک در جنوب انتاریو، کانادا، تحت سناریوی A2 را بررسی کرد. مهسفر و همکاران (۲۰۱۱) تأثیر تغییرات اقلیمی را بر سطح آب دریاچه ارومیه بررسی کردند. نتایج آنها روند کاهشی در بارش سطح دریاچه تحت سناریوهای B و A2 بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۱۰۰ را نشان داد(Chen et al., 2013). چن و همکاران (۲۰۱۲) از هفت مدل گردش جوی بر اساس سناریوی A2 برای پیش‌بینی دما و بارش در سودان۲۸ و سودان جنوبی۲۹ استفاده کردند و با استفاده از مدل LARS WG یک تحلیل ریزمقیاس‌نمایی انجام دادند. نتایج نشان داد که مدل‌های گردش جوی دارای عدم قطعیت بالایی هستند(Meenu et al., 2013).

مینو و همکاران (۲۰۱۳) از مدل هیدرولوژیکی HEC-HMS برای شبیه‌سازی هیدرولوژی حوضه رودخانه تونگ‌آباد در هند استفاده کردند و با استفاده از روش ریزمقیاس‌نمایی SDSM، حداقل و حداکثر دما و بارندگی روزانه را در منطقه مورد مطالعه کوچک‌مقیاس کردند. مطالعات بیلان آب، افزایش بارندگی و رواناب را نشان داد، در حالی که تبخیر و تعرق واقعی در منطقه مورد مطالعه کاهش یافت(Rajabi & Shabanlou, 2012). رجبی و شعبانلو (۲۰۱۲) از مدل SDSM برای ارزیابی تغییرات اقلیمی در منطقه کرمانشاه در غرب ایران و تأثیر آن بر شاخص‌های اقلیمی مانند جانسون کرنر و دومارتین استفاده کردند.

نتایج نشان می‌دهد که آب و هوای منطقه، به ویژه بین سال‌های ۲۰۹۹ تا ۲۰۷۰، خشک‌تر خواهد شد و این تغییر تحت سناریوی A2 بارزتر است. نوری و عالم (۲۰۱۳) مدل SDSM را برای مشاهدات روزانه دما و بارندگی از مدل جهانی HadCM3 از سال ۱۹۸۱ تا ۲۰۰۶ به کار بردند. نتایج نشان داد که داده‌های دما و بارندگی کوچک‌مقیاس‌شده عموماً با مشاهدات سازگار بودند(Su et al., 2015). بودا و همکاران. (۲۰۱۴) از یک شبکه عصبی مصنوعی برای کوچک‌مقیاس کردن

26 East-Azerbaijan

27 Artificial Neural Network (ANN)

28 Sudan

29 South-Sudan

داده‌های دو مدل GCM (ECHAM5 و MPI OM) تحت سناریوهای مختلف استفاده کردند و نتایج نشان داد که هم بارش و هم دبی رودخانه افزایش یافته است.

بر این اساس، مطالعه حاضر با هدف مقایسه تأثیر تغییرات اقلیمی بر بارش در حوضه‌های دریاچه وان و دریاچه اورومچی تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم انجام شد.

روش تحقیق :

برای تهیه داده‌های بارش برای سال‌های آینده، این مطالعه داده‌هایی را از حوضه ونچنگ و حوضه دریاچه اورومچی در منطقه از سال ۱۹۵۱ تا ۲۰۰۲ و ۱۹۵۱ تا ۲۰۰۵ جمع‌آوری کرد. بر اساس این داده‌ها و نتایج اعتبارسنجی آن، از یک مدل شبکه عصبی (ANN) برای تخمین بارش برای سال‌های آینده تحت سناریوهای مختلف استفاده شد. سپس داده‌های چند ساله در سطوح مختلف یک سیستم GIS۳۰ ارائه شدند.

مدل‌های ANN به طور گسترده در مدل‌سازی غیرخطی مسائل هیدرولوژیکی استفاده می‌شوند. اگرچه مدل‌های ANN توانایی بالایی در مدل‌سازی بارش دارند، اما تعداد زیاد پارامترهای مدل GCM و چهار مکان شبکه GCM در اطراف شهرهای ونچنگ و اورومچی منجر به تعداد زیادی پارامتر ورودی برای ANN می‌شود که می‌تواند منجر به حداقل‌های محلی شود و از یادگیری صحیح ANN جلوگیری کند. در حالی که تعداد زیاد پارامترهای ورودی، معیارهای ارزیابی مدل ANN را در طول آموزش بهبود می‌بخشد، درجات آزادی مدل را در طول آزمایش افزایش می‌دهد و کارایی آن را به طور قابل توجهی کاهش می‌دهد. برای پرداختن به مشکل پردازش نمونه‌های بزرگ داده توسط ANN، لازم است موثرترین پارامترها به عنوان ورودی تعیین شوند. برای این منظور، این مقاله از ضریب همبستگی استفاده کرده و نتایج مدل را برای دریاچه وان و دریاچه ارومیه مقایسه کرده است.

بنابراین، قبل از مدل‌سازی، این مطالعه ابتدا از روش ضریب همبستگی خطی برای تعیین موثرترین ورودی برای مدل استفاده کرد ۷۵ داده ورودی در مرحله آموزش و ۲۵ داده در مرحله اعتبارسنجی استفاده شد. شبکه عصبی مورد استفاده برای مدل‌سازی بارش در منطقه مورد مطالعه، یک پرسپترون پیش‌خور سه لایه (لایه ورودی، یک لایه پنهان و یک لایه خروجی) بود. این نوع مدل شبکه عصبی با استفاده از الگوریتم پس‌انتشار به طور گسترده در مدل‌سازی هیدرولوژیکی استفاده شده است (Nourani et al., 2019).

این مطالعه تعداد تکرارها را در محدوده ۱۰۰ تا ۳۰۰ با آزمایش‌های مکرر تعیین کرد. با توجه به توانایی همگرایی قوی آموزش شبکه عصبی، این مطالعه همچنین از الگوریتم لونبرگ، یعنی تابع مارکوارت، استفاده کرد. فرآیند آموزش شبکه

30 Geographic Information System (GIS)

زمانی متوقف شد که میزان خطا در داده‌های آزمایش شروع به افزایش کرد. تابع سیگموئید مماس متحرک به عنوان تابع هسته غیرخطی شبکه عصبی استفاده شد.

همبستگی بین پارامترهای پیش‌بینی پارامترهای مدل GCM چهار نقطه از شبکه GCM در اطراف مناطق شهروان و ارومیه و پارامترهای پیش‌بینی بارش در مناطق شهروان و ارومیه با روش ضریب همبستگی تعیین شد. پارامتری که بیشترین مقدار ویژه مؤثر را داشت، به عنوان مؤثرترین ورودی انتخاب شد. پس از تعیین خروجی با روش استخراج ویژگی لایه ورودی، لایه ورودی FFNN متشکل از مؤثرترین پارامترهای پیش‌بینی تشکیل شد. تعداد نورون‌ها در لایه میانی از طریق آزمون خطا تعیین شد و نتایج حالت بهینه شبکه گزارش شده است.

برای پیش‌بینی بارش آینده در منطقه مورد مطالعه از سال ۱۹۵۱ تا ۲۰۳۰، از داده‌های مدل GFDL ESM2G برای سناریوی RCP4.5 استفاده کردیم. داده‌ها از داده‌های موجود در www.ipcc-data.org انتخاب شدند. ما به منابع مرتبط مراجعه کردیم و نتایج هزاران پارامتر مؤثر بر بارندگی را تجزیه و تحلیل کردیم و در نهایت پارامترهایی را که بیشترین تأثیر را داشتند، انتخاب کردیم.

منطقه مورد مطالعه :

دریاچه وان :

همهمنطقه مورد مطالعه: دریاچه وان بزرگترین دریاچه ترکیه است. این دریاچه در غرب شهر شروان در شرق ترکیه، نزدیک به مرز ایران واقع شده است. مختصات جغرافیایی آن ۳۸°۳۸'شمالی و ۴۲°۴۹'شرقی است. طول متوسط آن ۱۲۰ کیلومتر، عرض آن ۸۰ کیلومتر و عمق متوسط آن ۱۷۱ متر است. مساحت دریاچه وان تقریباً ۳۷۵۵ کیلومتر مربع و حوضه آبریز آن ۱۲۵۰۰ کیلومتر مربع است. دریاچه وان همچنین یک دریاچه آب شور است که منبع اصلی آب آن رودخانه‌های خوشاب بند ماهی زیلان، بنی کوپرو و قره سو است. در شمال غربی دریاچه، کوه‌های سوبان قرار دارند که ۴۰۵۸ متر از سطح دریا ارتفاع دارند و در جنوب آن کوه‌های اختیار شهاب قرار دارد. چالپاتاغ و آختامار ادیرنه نیز از جزایر این دریاچه هستند. تشکیل دریاچه نمکی وان حاصل فعالیت های آتشفشانی طولانی مدت است و این دریاچه توسط نهرهایی که از کوه ها سرازیر می شوند، تغذیه می شود (شکل (۱)

دریاچه ارومیه :

دریاچه ارومیه بین استان‌های آذربایجان شرقی و غربی و بین حوزه‌های آبخیز آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی و کردستان واقع شده است (شکل (۱)). دریاچه ارومیه بزرگترین مخزن آب در غرب آسیا است و تشکیل آن را می‌توان به دوره دوم زمین‌شناسی نسبت داد. از نظر زمین‌شناسی، این دریاچه یک فرورفتگی چین‌خورده با ارتفاع سطح دریاچه ۱۲۷۸ متر از

سطح دریا و بلندترین نقطه آن ۱۶۰۰ متر از سطح دریا است. طول این دریاچه ۱۳۰ تا ۱۴۰ کیلومتر، عرض آن در عریض‌ترین نقطه ۵۸ کیلومتر و باریک‌ترین نقطه آن در شمال غربی ۱۵ کیلومتر است.

تصاویر ماهواره‌ای نشان می‌دهد که مساحت دریاچه در سال ۲۰۱۵، ۸۸ درصد کاهش یافته است.



شکل ۱- موقعیت دریاچه وان و دریاچه ارومیه

نتایج :

جدول (۱) مهمترین پارامترهای ورودی بدست آمده و استفاده از معیار ضریب همبستگی خطی را نشان می‌دهد و پس از آن بهترین ساختار و مدل ANN بر اساس معیارهای ۳۱DC و ۳۲RMSE ارائه شده است.

جدول ۱ نتایج مدل ANNبا استفاده از پارامترهای مؤثر به‌دست‌آمده از ضریب همبستگی.

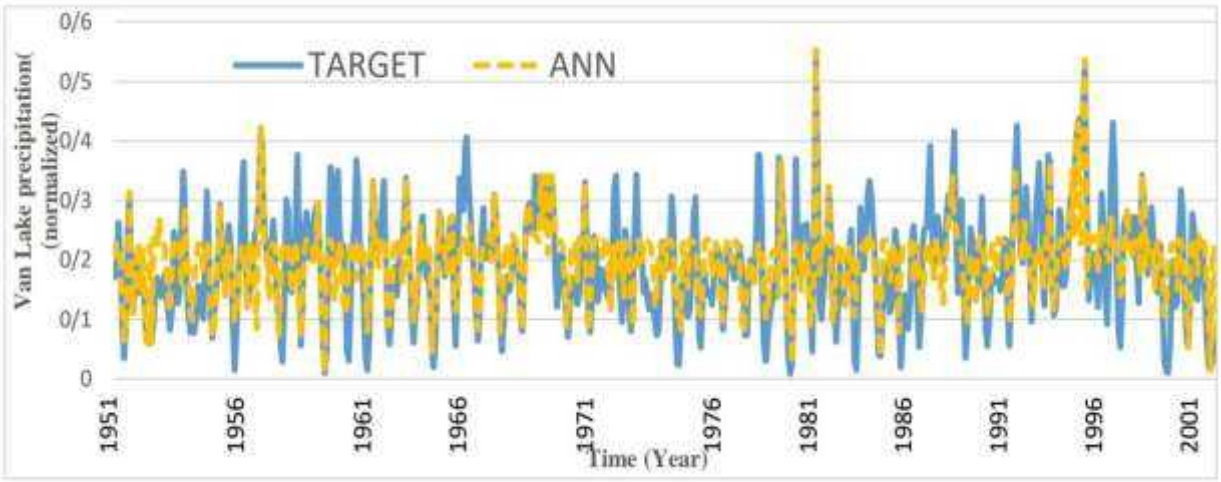
مدل	دریاچه	پارامتر	ساختارمدل	تعداد تکرار	DC		RMES(mm)	
					آموزش	صحت سنجی	آموزش	صحت سنجی

31 Coefficient of Determination

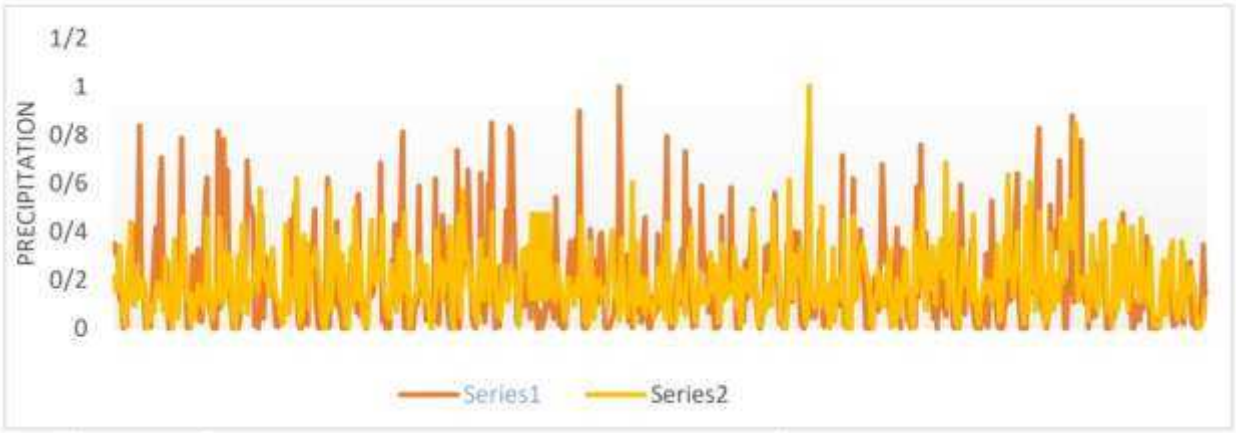
32 Root-Mean-Square Error

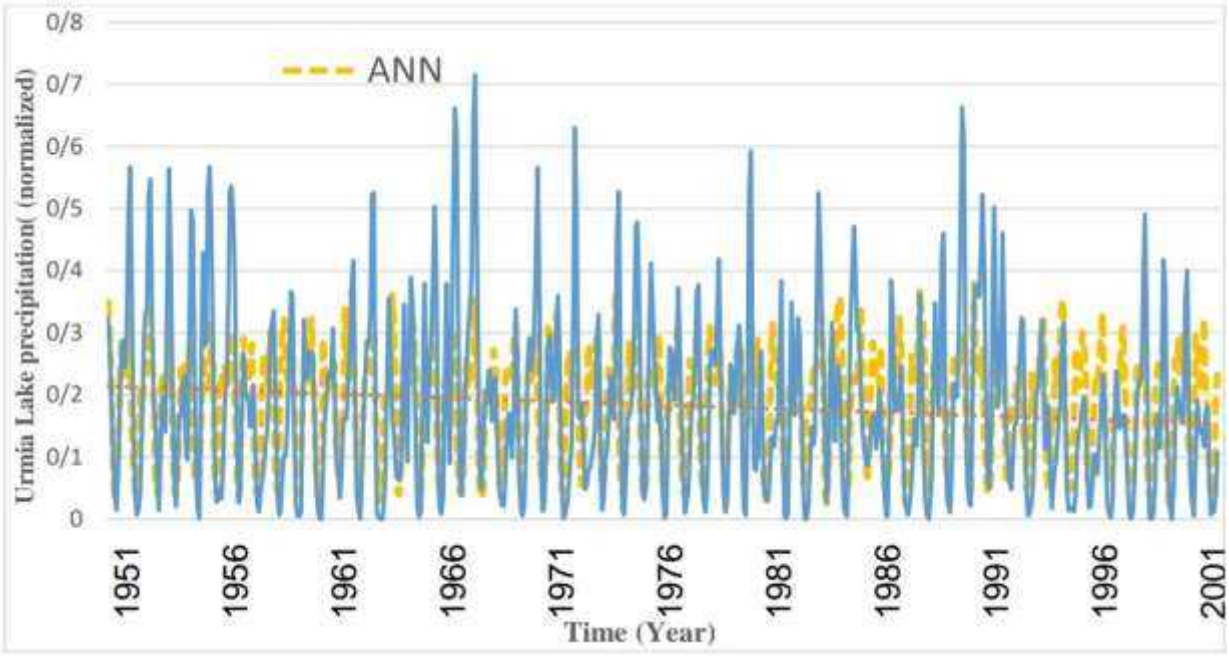
ANN	ارومیه	HUS1000 UA60000 VA70000 UA1000	۳-۴-۱	۲۰۰	۰/۴۰۵۹	۰/۳۷۳۴	۰/۱۱۱۷	۰/۱۰۸۴
ANN	وان	۴۱-۳۷ 37-43 ۴۳-۴۱	۳-۳-۱	۱۵۰	۰/۴۸۶۰	۰/۴۱۶۲	۰/۱۰۲۱	۰/۰۸۷۱

شکل‌های (۲) تا (۴) به ترتیب نتایج پردازش داده‌های بارش مشاهده شده و محاسبه شده را با استفاده از مدل ANN و مؤثرترین پارامترهای ورودی به‌دست آمده بر اساس ضریب همبستگی نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که در مدل GCM، مدل ANN با استفاده از مؤثرترین پارامترهای تعیین‌شده با روش ضریب همبستگی، به نتایج بارش مشاهده‌شده برای دوره پایه در فانچنگ و اورومچی نزدیک‌تر است و این دو رقم برای بارش مشاهده‌شده نیز بسیار نزدیک هستند. نتایج حتی نشان می‌دهد که در برخی ماه‌ها، بارش در اورومچی بیشتر از فانچنگ است، اما میانگین کل بارش در دریاچه فان کمی بیشتر از دریاچه اورومچی است.



شکل ۲- نتایج مربوط به مدل سازی بارش مشاهداتی و محاسباتی با موثر ترین پارامترها برای دریاچه وان (mm)





شکل ۳- نتایج مربوط به مدل سازی بارش مشاهداتی و محاسباتی با موثرترین پارامترها برای دریاچه ارومیه (mm)

شکل ۴- مقایسه بارش بارش مشاهداتی با موثر ترین پارامترها برای حوضه های دریاچه های وان و ارومیه بر حسب (mm)

با توجه به نتایج شکل های (۵) و (۶) به ترتیب تغییرات بارش ماهانه برای مدل GCMو تحت سناریوی RCP4.5بررسی در دوره ی آتی (۲۰۳۰-۲۰۱۹) نسبت به دوره پایه (۱۹۵۱-۲۰۰۲) برای دریاچه وان و (۱۹۵۱) تا (۲۰۰۵) برای دریاچه ارومیه را نشان میدهد. در دوره ۲۰۱۹ ۲۰۳۰ در برخی ماه‌ها شاهد کاهش بارندگی و در برخی دیگر شاهد افزایش بارندگی خواهیم بود.

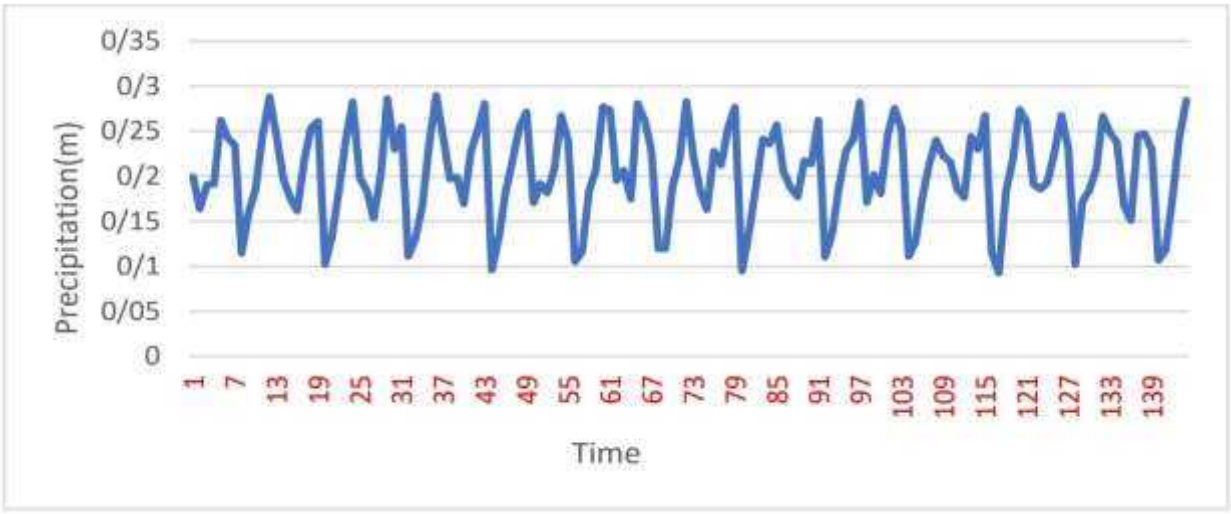
نتایج پیش بینی شده بر اساس مدل GCM نشان میدهد که الگوی بارش آینده نسبت به گذشته تغییر می یابد به عبارت دیگر ماههایی که در گذشته دارای بارش بیشتری بودن در دوره آینده بارش آنها کاهش می یابد و برعکس بنظر میرسد علت کاهش بارش در فصول سرد سال ماه های مهر تا اسفند میتواند این باشد که به دلیل افزایش غلظت آلاینده ها و جریان های مه دودهای شیمیایی ناشی از گازهای آلاینده نیروگاه ها ، کارخانه ها و پالایشگاه ها ذرات منتشر شده و آلودگی ها مانع تجمع ذرات بسیار ریز بخار و هدایت آن به سوی زمین و تشکیل قطرات باران میشود چرا که ذرات آلاینده باعث تغلیظ و عدم تجمع بخار آب شده و قطرات کوچکتر از حد معمول که برای تشکیل باران لازم است باقی نمی مانند. اما با توجه به جهت باد غالب در منطقه و همچنین سرعت بالای باد این ذرات آلاینده پراکنده شده و امکان تجمع بخار آب برای تشکیل قطرات باران فراهم می شود.

جدول ۲- مقادیر پیش بینی شده برای پارامتر موثر بارش (mm) برای شهر وان و ارومیه برای سال های ۲۰۱۹-۲۰۳۰

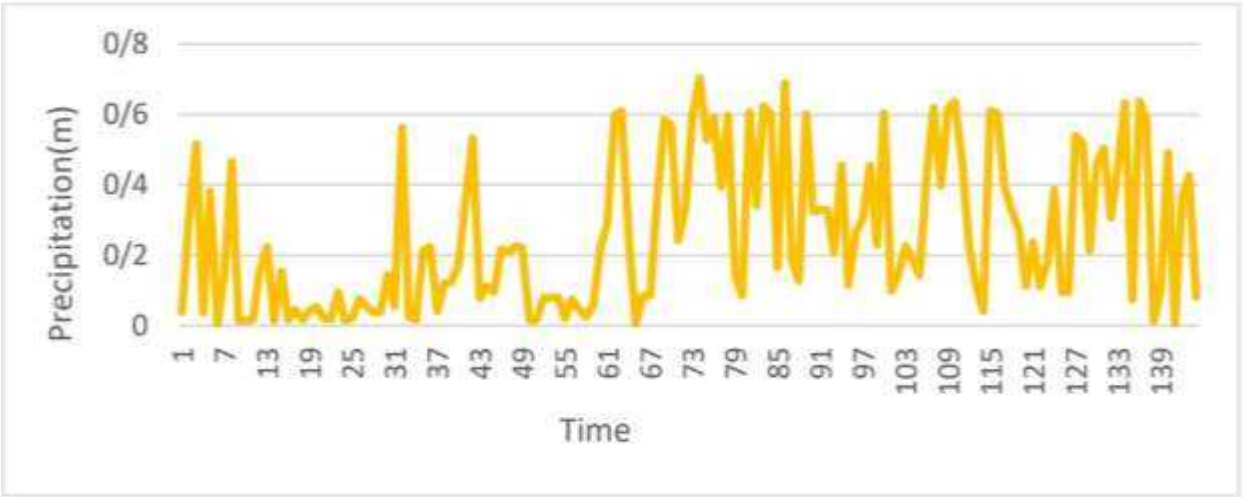
URUMIA	VAN	TIME	URUMIA	VAN	TIME
۰.۱۹۹۰۱۰۰۲	۰.۰۳۹۳۹۴	۱۳-۰۱-۲۰۱۹	۰.۲۷۶	۰.۰۴۳	۱۲-۰۷-۲۰۲۲
۰.۱۶۳۹۲۳۳۵	۰.۳۰۶۵	۱۲-۰۲-۲۰۱۹	۰.۱۰۸	۰.۰۵۲	۱۲-۰۸-۲۰۲۲
۰.۱۹۰۴۹۷۲۶	۰.۵۱۶۵۵۶	۱۳-۰۳-۲۰۱۹	۰.۱۳۹	۰.۰۵۲	۱۲-۰۹-۲۰۲۲
۰.۱۹۱۲۲۶۲۵	۰.۰۳۸۴۹۱	۱۳-۰۴-۲۰۱۹	۰.۱۹۴	۰.۰۱۹	۱۲-۱۰-۲۰۲۲
۰.۲۶۲۲۸۶۴	۰.۳۸۰۷۶۴	۱۳-۰۵-۲۰۱۹	۰.۲۵۴	۰.۰۹۸	۱۲-۱۱-۲۰۲۲
۰.۲۴۲۵۳۴۹۴	۰.۰۰۶۴۴۵	۱۳-۰۶-۲۰۱۹	۰.۲۹۷	۰.۰۱۶	۱۲-۱۲-۲۰۲۲
۰.۲۳۴۱۵۹۳۹	۰.۱۴۴۴۳۲	۱۳-۰۷-۲۰۱۹	۰.۲۰۹	۰.۰۲۲	۱۲-۰۱-۲۰۲۳
۰.۱۱۴۶	۰.۴۶۴۲۷۲	۱۳-۰۸-۲۰۱۹	۰.۱۹۳	۰.۰۷۹	۱۲-۰۲-۲۰۲۳
۰.۱۶۰۲۹۲۳	۰.۰۱۴۴۳۴	۱۳-۰۹-۲۰۱۹	۰.۱۶۱	۰.۰۵۸	۱۲-۰۳-۲۰۲۳
۰.۱۸۴۷۲۷۶۳	۰.۰۱۵۰۴۸	۱۳-۱۰-۲۰۱۹	۰.۲۱۰	۰.۰۳۹	۱۲-۰۴-۲۰۲۳
۰.۲۴۴۷۳۴۴۸	۰.۰۱۸۰۶۱	۱۳-۱۱-۲۰۱۹	۰.۳۰۰	۰.۰۴۱	۱۲-۰۵-۲۰۲۳
۰.۲۸۷۹۶۶۰۲	۰.۱۵۷۷۴۷	۱۳-۱۲-۲۰۱۹	۰.۲۷۵	۰.۰۱۹	۱۲-۰۶-۲۰۲۳
۰.۲۴۶۱۸۰۳۸	۰.۲۲۳۰۲۸	۱۳-۰۱-۲۰۲۰	۰.۲۸۳	۰.۰۴۴	۱۲-۰۷-۲۰۲۳
۰.۱۹۷۱۳۴۸۲	۰.۰۱۴۹۷	۱۲-۰۲-۲۰۲۰	۰.۱۱۱	۰.۰۵۳	۱۲-۰۸-۲۰۲۳
۰.۱۷۵۵۶۰۷۵	۰.۱۵۳۲۶۵	۱۲-۰۳-۲۰۲۰	۰.۱۴۳	۰.۰۲۳	۱۲-۰۹-۲۰۲۳

۰.۱۶۱۷۴۷۹۳	۰.۰۱۶۷۹۳	۱۲-۰۴-۲۰۲۰	۰.۱۹۹	۰.۰۲۰	۱۲-۱۰-۲۰۲۳
۰.۲۱۷۲۶۷۹۴	۰.۰۴۵۱۹۴	۱۲-۰۵-۲۰۲۰	۰.۲۶۰	۰.۱۰۰	۱۲-۱۱-۲۰۲۳
۰.۲۵۳۴۶۱۵۱	۰.۰۱۷۳۶۶	۱۲-۰۶-۲۰۲۰	۰.۳۰۴	۰.۰۱۷	۱۲-۱۲-۲۰۲۳
۰.۲۶۱۱۲۲۶۵	۰.۰۴۳۴۵۵	۱۲-۰۷-۲۰۲۰	۰.۲۱۴	۰.۰۲۳	۱۲-۰۱-۲۰۲۴
۰.۱۰۲۱۱۵۳۸	۰.۰۵۴۳۵۱	۱۲-۰۸-۲۰۲۰	۰.۱۹۸	۰.۰۸۱	۱۲-۰۲-۲۰۲۴
۰.۱۳۲۷۱۸۵۳	۰.۰۲۰۸۶۷	۱۲-۰۹-۲۰۲۰	۰.۱۶۵	۰.۰۵۹	۱۲-۰۳-۲۰۲۴
۰.۱۸۴۰۵۸۱۲	۰.۰۱۸۱۴۹	۱۲-۱۰-۲۰۲۰	۰.۲۱۵	۰.۰۴۰	۱۲-۰۴-۲۰۲۴
۰.۲۴۱۷۵۳۹۷	۰.۰۹۴۷۰۱	۱۲-۱۱-۲۰۲۰	۰.۳۰۷	۰.۰۴۲	۱۲-۰۵-۲۰۲۴
۰.۲۸۲۳۸۴۹۳	۰.۰۱۴۶۴۶	۱۲-۱۲-۲۰۲۰	۰.۲۸۲	۰.۰۲۰	۱۲-۰۶-۲۰۲۴
۰.۱۹۸۴۷۴۴۷	۰.۰۲۰۵۹۳	۱۲-۰۱-۲۰۲۱	۰.۲۹۰	۰.۰۴۵	۱۲-۰۷-۲۰۲۴
۰.۲۰۰۳۶۲۱۵	۰.۰۷۵۰۵۹	۱۱-۰۲-۲۰۲۱	۰.۱۱۴	۰.۰۵۴	۱۲-۰۸-۲۰۲۴
۰.۱۵۳۲۴۶۶۷	۰.۰۵۵۴۸۴	۱۲-۰۳-۲۰۲۱	۰.۱۴۷	۰.۰۲۴	۱۲-۰۹-۲۰۲۴
۰.۲۰۰۳۶۲۱۵	۰.۰۳۷۴۲۲	۱۲-۰۴-۲۰۲۱	۰.۲۰۴	۰.۰۲۱	۱۲-۱۰-۲۰۲۴
۰.۲۸۵۷۸۴۲۷	۰.۰۳۹۵۰۳	۱۲-۰۵-۲۰۲۱	۰.۲۶۶	۰.۱۰۲	۱۲-۱۱-۲۰۲۴
۰.۲۶۱	۰.۰۱۸	۱۲-۰۶-۲۰۲۱	۰.۳۱۱	۰.۰۱۸	۱۲-۱۲-۲۰۲۴
۰.۲۶۹	۰.۰۴۲	۱۲-۰۷-۲۰۲۱	۰.۲۱۹	۰.۰۲۴	۱۲-۰۱-۲۰۲۵
۰.۱۰۵	۰.۰۵۱	۱۲-۰۸-۲۰۲۱	۰.۲۰۳	۰.۰۸۳	۱۲-۰۲-۲۰۲۵
۰.۱۳۶	۰.۰۲۱	۱۲-۰۹-۲۰۲۱	۰.۱۶۹	۰.۰۶۱	۱۲-۰۳-۲۰۲۵
۰.۱۸۹	۰.۰۱۹	۱۲-۱۰-۲۰۲۱	۰.۲۲۰	۰.۰۴۱	۱۲-۰۴-۲۰۲۵
۰.۲۴۸	۰.۰۵۶	۱۲-۱۱-۲۰۲۱	۰.۳۱۴	۰.۰۴۳	۱۲-۰۵-۲۰۲۵
۰.۲۹۰	۰.۰۷۷	۱۲-۱۲-۲۰۲۱	۰.۲۸۹	۰.۰۲۱	۱۲-۰۶-۲۰۲۵
۰.۲۰۴	۰.۰۲۱	۱۲-۰۱-۲۰۲۲	۰.۲۹۷	۰.۰۴۶	۱۲-۰۷-۲۰۲۵
۰.۱۸۸	۰.۰۱۵	۱۲-۰۲-۲۰۲۲	۰.۱۱۷	۰.۰۵۵	۱۲-۰۸-۲۰۲۵
۰.۱۵۷	۰.۰۹۶	۱۲-۰۳-۲۰۲۲	۰.۱۵۱	۰.۰۲۵	۱۲-۰۹-۲۰۲۵

۱۲-۱۰-۲۰۲۵	۰.۰۲۲	۰.۲۰۹	۱۲-۰۴-۲۰۲۲	۰.۰۳۸	۰.۲۰۵
۱۲-۱۱-۲۰۲۵	۰.۱۰۴	۰.۲۷۲	۱۲-۰۵-۲۰۲۲	۰.۰۴۰	۰.۲۹۳
۱۲-۱۲-۲۰۲۵	۰.۰۱۹	۰.۳۱۸	۱۲-۰۶-۲۰۲۲	۰.۰۱۸	۰.۲۶۸



شکل ۵ پیش بینی بارش با موثر ترین پارامترها برای حوضه دریاچه وان ۲۰۳۰۲۰۱۹) بر حسب (m)



شکل ۶- پیش بینی بارش با موثر ترین پارامترها برای حوضه دریاچه ارومیه (۲۰۱۹ – ۲۰۳۰) بر حسب (m)



شکل ۷- سطح دریاچه ارومیه قبل و بعد از خشک شدن

عوامل فوق شرایط طبیعی حوضه دریاچه ارومچی را تغییر داده و منجر به کاهش بی‌سابقه سطح آب دریاچه ارومچی شده است. شکل (۷) تغییرات سطح آب دریاچه را در سال‌های اخیر نشان می‌دهد. از سال ۱۹۹۷، سطح آب نوسانات زیادی داشته است، اما از سال ۱۹۹۷ به بعد، سطح آب نه تنها جبران نشده، بلکه روند نزولی داشته است. در مقایسه با مناطقی با شرایط جغرافیایی و اقلیمی مشابه مانند دریاچه وان، دریاچه ارومچی روند نزولی قابل توجهی را نشان داده است. در سال‌های اخیر، با پیشرفت علم و فناوری، استفاده از نقشه‌های زمینی و تصاویر ماهواره‌ای برای مطالعه تغییرات هیدرولوژیکی و ژئومورفولوژیکی در حوضه رایج شده است. با این حال، این روش‌ها معمولاً پرهزینه و زمان‌بر هستند، یا به دلیل محدود بودن محدوده جغرافیایی منطقه مورد مطالعه، مطالعه کامل تغییرات کاربری اراضی غیرممکن است. بنابراین، تبدیل ریاضی ارائه شده در تحلیل سری‌های زمانی می‌تواند به عنوان استاندارد مناسبی برای ارزیابی و تحلیل میزان تغییر در فرآیند هیدرولوژیکی حوضه مورد استفاده قرار گیرد.

روند افزایش سطح آب دریاچه وان که شرایط اقلیمی و جغرافیایی مشابهی با دریاچه ارومیه دارد، ثابت می‌کند که عوامل انسانی نقش بسیار بیشتری نسبت به عوامل طبیعی در کاهش نوسان سطح آب دریاچه ارومیه دارند. دلیل خشک شدن دریاچه ارومیه صرفاً تبخیر آب نیست، بلکه به دلیل خشکسالی در منطقه، بخش کشاورزی از منابع آب زیرزمینی استفاده بیشتری کرده است. بنابراین، برای مدیریت منابع آب زیرزمینی، باید حفر چاه‌های غیرمجاز کشاورزی متوقف شود، زیرا بهره‌برداری بیش از حد نه تنها میزان آب زیرزمینی را کاهش می‌دهد، بلکه باعث انتقال آب شور دریاچه به چاه‌ها نیز می‌شود که برای اکوسیستم و کشاورزی بسیار مخرب‌تر از خشک شدن دریاچه است.

نتیجه‌گیری :

این مطالعه تأثیر تغییرات اقلیمی بر بارش در وان، ترکیه، از سال ۱۹۵۱ تا ۲۰۰۲، و در ارومیه، ایران، از سال ۱۹۵۱ تا ۲۰۰۵ را بررسی کرد. برای این منظور، از داده‌های مدل GCM، از جمله مدل GFDL-ESM2G از گزارش پنجم IPCC تحت سناریوی RCP4.5 استفاده شد. از روش شبکه عصبی مصنوعی (ANN) برای کوچک‌مقیاس کردن پارامترهای GCM استفاده شد. در حالی که پارامترهای مختلفی بر آب و هوای منطقه مورد مطالعه تأثیر می‌گذارند، همه آنها قابل توجه نیستند یا تأثیر قابل توجهی بر آب و هوای منطقه ندارند. بنابراین، استفاده از همه این پارامترها زمان‌بر است، ساختار مدل را پیچیده می‌کند و منجر به ناکارآمدی مدل می‌شود. این موضوع به ویژه هنگام استفاده از داده‌های GCM برای مدل‌سازی پارامترهای هیدرواقلیمی، به ویژه هنگام استفاده از داده‌های چند نقطه‌ای در یک شبکه GCM، اهمیت دارد. برای این منظور، این مطالعه از روش استخراج ویژگی ضریب همبستگی (CC) برای شناسایی مؤثرترین پارامترهای ورودی استفاده کرد. نتایج نشان می‌دهد که برای وان و اورومچی، مدل‌های GCM تغییرات بارش ماهانه در آینده نسبت به دوره پایه نشان می‌دهند که الگوهای بارش در وان در مقایسه با گذشته تغییر قابل توجهی نخواهد داشت، در حالی که بارش در اورومچی ابتدا کاهش و سپس افزایش خواهد یافت.

منابع :

مهسا فرح، مکنون ر و ثقفیان ب ۱۳۹۰ اثرات تغییر اقلیم بر بیلان آبی دریاچه ارومیه مجله تحقیقات منابع آب ایران سال ۷، شماره ۱، صفحه های ۴۷ تا ۵۸

ناظم السادات م ج، سامانی ن و مولایی نیکوم، ۱۳۸۴ تغییر اقلیم در جنوب و جنوب غرب ایران از دیدگاه مشاهدات بارش بر هم کنش با پدیده ی النینو نوسانات جنوبی مجله علمی کشاورزی دوره ۲۸ شماره ۲ صفحه های ۸۱ تا ۱۰۰

M. C. V. Ramirez, H. F. de Campos Velho, and N. J. Ferreira, “Artificial neural network technique for rainfall forecasting applied to the Sao Paulo region,” Journal of hydrology, vol. 301, no. 1-4, pp. 146-162, 2005

C.Harpham and R. L.. Wilby, “Multi-site downscaling of heavy daily precipitation occurrence and amounts,” Journal of Hydrology, vol. 312, no. 1-4, pp. 235-255, 2005.

M. Souvignet and J. Heinrich, “Statistical downscaling in the arid central Andes: uncertainty analysis of multi-model simulated temperature and precipitation,” Theoretical and Applied Climatology, vol. 106, no. 1, pp. 229-244, 2011.

M. Zarghami, A. Abdi, I. Babaeian, Y. Hassanzadeh, and R. Kanani, “Impacts of climate change on runoffs in East Azerbaijan, Iran,” Global and Planetary Change, vol. 78, no. 3-4, pp. 137-146, 2011.

M. Grillakis, A. Koutroulis, and I. Tsanis, “Climate change impact on the hydrology of Spencer Creek watershed in Southern Ontario, Canada,” Journal of Hydrology, vol. 409, no. 1-2, pp. 1-19, 2011.

H. Chen, J. Guo, Z. Zhang, and C.-Y. Xu, “Prediction of temperature and precipitation in Sudan and South Sudan by using LARS-WG in future,” Theoretical and Applied Climatology, vol. 113, no. 3, pp. 363-375, 2013.

R. Meenu, S. Rehana, and P. Mujumdar, "Assessment of hydrologic impacts of climate change in Tunga-Bhadra river basin, India with HEC-HMS and SDSM," Hydrological processes, vol. 27, no. 11, pp. 1572-1589, 2013

Rajabi and S. Shabanlou, "Climate index changes in future by using SDSM in Kermanshah, Iran," Journal of Environmental Research And Development, vol. 7, no. 1, pp. 37-44, 2012.

Su, X. Zeng, J. Zhai, Y. Wang, and X. Li, "Projected precipitation and streamflow under SRES and RCP emission scenarios in the Songhuajiang River basin, China," Quaternary International, vol. 380, pp. 95-105, 2015.

V. Nourani, Z. Razzaghzadeh, A. H. Baghanam, and A. Molajou, "ANN-based statistical downscaling of climatic parameters using decision tree predictor screening method," Theoretical and Applied Climatology, vol. 137, no ,۳.pp. 1729-1746, 2019.

Analysis of the effects of climate change on precipitation variability in the catchment areas of Lakes Urmia and Van under different scenarios

First author[1], Kamran Taghipour

Master's degree student in meteorology, climate change orientation

Email : Kamrantaghipoor49@gmail.com

Abstract

This study aimed to investigate the changes in precipitation in the Urmia and Van regions of Turkey under the influence of climate change and how they will change under the influence of future climate change. This study simulated future precipitation in the Urmia and Van regions of Turkey using data from the General Circulation Model (GFDL-ESM2G). One of the main weaknesses of General Circulation Models (GCMs) is the large spatial scale of simulated climate variables. Artificial Neural Networks (ANNs) are statistical models that have been used to downscale climate variables from General Circulation Models (GCMs). A key step in using these models is to select the most appropriate input parameters from the extensive data provided by the General Circulation Models. Therefore, this study used correlation coefficients to select effective input parameters. The results show that while the precipitation patterns in Van, Turkey, and Urmia are very similar, with Urmia receiving more precipitation even in certain months of the year, distinct patterns are observed in the two lakes.

Keywords: Climate change, precipitation, artificial neural network, Lake Van, Lake Urmia

ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر شاخص‌های خشکسالی و ارتباط آن با منابع آب زیرزمینی با رویکرد یادگیری ماشین در دشت کرمانشاه

کبری سلطانی[۱]، جعفر معصوم‌پور سماکوش[۲] *

۱- کبری سلطانی، فارغ‌التحصیل دکتری آب‌وهواشناسی، دانشگاه رازی، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، کرمانشاه، ایران.

۲- جعفر معصوم‌پور سماکوش، دانشیار اقلیم‌شناسی، دانشگاه رازی، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، کرمانشاه، ایران.

آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول: j.masoompour@razi.ac.ir

چکیده

خشکسالی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های مدیریت منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک نیازمند تحلیل چندبعدی از منظر هواشناسی، کشاورزی و هیدرولوژیکی است. در این پژوهش، شاخص‌های خشکسالی بارش استانداردشده (SPI)، رطوبت خاک استانداردشده (SSMI) و سطح آب زیرزمینی استاندارد شده (SGI) در دشت کرمانشاه طی دوره ۲۰۲۶ تا ۲۰۵۰ تحت دو سناریوی اقلیمی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 ارزیابی شد. متغیرهای بارش، رطوبت خاک و سطح آب زیرزمینی با الگوریتم جنگل تصادفی پیش‌بینی و سپس شاخص‌ها بر مبنای داده‌های برآوردشده محاسبه شد. ارزیابی مدل نشان داد که دقت پیش‌بینی بسیار بالا بوده است ($R \geq ۰/۹۰$، $NSE \geq ۰/۸۰$، $NRMSE \leq ۰/۱۹$). نتایج روندها بیانگر آن بود که SGI در هر دو سناریو روند افزایشی معنادار دارد (شیب ۰/۰۸ در SSP2-4.5 و ۰/۰۵ در SSP5-8.5)، در حالی‌که SPI و SSMI فاقد روند معنادار بودند. از نظر همبستگی، بیشترین رابطه در SSP2-4.5 میان SPI و SGI مشاهده شد ($p <۰/۰۱$ و $r = ۰/۵۱$)، در حالی‌که در SSP5-8.5 این رابطه منفی و غیرمعنادار بود. همبستگی بین SSMI و SGI در هر دو سناریو ضعیف و غیرمعنادار برآورد شد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که در شرایط اقلیمی میانه روابط بین شاخص‌ها پایدارتر است، در حالی‌که در سناریوی شدیدتر شدت و نوسان خشکسالی‌ها افزایش یافته و پیش‌بینی چرخه‌های رطوبتی با عدم‌قطعیت بیشتری همراه خواهد بود.

کلید واژه‌ها: شاخص SPI، شاخص SSMI، شاخص SGI، جنگل تصادفی، دشت کرمانشاه، CMIP6.

مقدمه

خشکسالی یکی از پیچیده‌ترین و مخرب‌ترین بلایای طبیعی است که به‌شدت تحت تأثیر تغییرات اقلیمی قرار دارد و پیامدهای اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی گسترده‌ای به همراه دارد. این پدیده در نتیجه برهم‌کنش عوامل جوی، هیدرولوژیکی و مدیریتی شکل می‌گیرد و مدیریت ناکارآمد منابع آب می‌تواند شدت آن را تشدید کند، تغییرات الگوهای

بارش و افزایش دما نه‌تنها فراوانی رخداد خشکسالی را افزایش می‌دهد، بلکه شدت آن را نیز در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان بیشتر می‌سازد. مطالعات نشان داده‌اند که تغییرات اقلیمی فشار مضاعفی بر منابع آب وارد کرده و سبب کاهش قابلیت اطمینان این منابع در بلندمدت می‌شود (Bhaga et al., 2020). پیامدهای خشکسالی در حوزه‌های مختلف قابل مشاهده است، اما بیشترین اثر آن بر بخش کشاورزی است که وابستگی شدیدی به شرایط آب‌وهوایی دارد. در ایالات متحده، خسارات اقتصادی ناشی از خشکسالی طی سال‌های اخیر به میلیاردها دلار رسیده است (Wilhite, 2016). این خسارات علاوه بر کاهش تولیدات کشاورزی، پیامدهای اجتماعی همچون افزایش فقر، مهاجرت اجباری و بروز تنش‌های اجتماعی را نیز به دنبال دارد. بررسی‌ها در کشورهای در حال توسعه مانند آفریقای جنوبی نشان داده است که خشکسالی می‌تواند امنیت غذایی را تهدید کرده و به افزایش فقر در میان کشاورزان کوچک‌مقیاس منجر شود (Ruwanza et al., 2022).

به منظور پایش و پیش‌بینی خشکسالی، شاخص‌های متعددی توسعه یافته‌اند که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به شاخص بارش استانداردشده (SPI) و شاخص تبخیر و تعرق استانداردشده (SPEI) اشاره کرد. این شاخص‌ها با بهره‌گیری از داده‌های اقلیمی، امکان ارزیابی شدت، مدت و گستره مکانی خشکسالی را فراهم می‌کنند (Mardian, 2022). افزون بر این، پیشرفت فناوری‌های سنجش‌ازدور و گردآوری داده‌های میدانی، دقت و کارایی سامانه‌های پایش خشکسالی را به میزان قابل توجهی افزایش داده است. رویکردهای نوین همچون الگوریتم‌های یادگیری ماشین نیز با توانایی پردازش حجم بالای داده‌ها و شناسایی الگوهای پیچیده، افق‌های جدیدی برای بهبود دقت پیش‌بینی خشکسالی گشوده‌اند (Vij and Tiwari, 2025).

مطالعات متعددی در ایران و سایر کشورها به بررسی ارتباط شاخص‌های هواشناسی، کشاورزی و هیدرولوژیکی با تغییرات سطح آب زیرزمینی پرداخته‌اند. در ایران، Torabi Haghighi و همکاران (۲۰۲۰) با تحلیل داده‌های شاخص بارش استانداردشده (SPI) و شاخص‌های خشکسالی کشاورزی در استان فارس طی دوره ۱۹۷۷ تا ۲۰۱۶، سه مرحله گذار از بهره‌برداری پایدار به ناپایدار منابع آب را شناسایی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که از سال ۱۹۹۷ تا ۲۰۱۶ شدت و تداوم خشکسالی‌های هیدرولوژیکی به‌طور معناداری افزایش یافته و این امر باعث تسریع افت سطح آب زیرزمینی شده است. در مطالعه‌ای دیگر، Ashraf و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از داده‌های سطح آب زیرزمینی ۴۷۸ زیرحوضه در ایران طی سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۵، کاهش قابل‌توجه حجم آب زیرزمینی (~۷۴ کیلومتر مکعب) را برآورد کرد. تحلیل‌ها نشان داد که خشکسالی‌های هیدرولوژیکی، به‌ویژه در مناطق مرکزی و شرقی کشور، نقش مؤثری در تشدید این روند کاهشی داشته‌اند. به همین ترتیب، Javadinejad و همکاران (۲۰۲۰) در حوضه آبریز اصفهان - بُرخار، داده‌های هیدروکلیمایی و شاخص‌های خشکسالی برای دوره ۱۹۷۱ تا ۲۰۴۰ را بررسی کرد و نتایج نشان داد که بین شاخص SPI و شاخص خشکسالی هیدرولوژیکی (GRI) همبستگی قوی وجود دارد. پیش‌بینی‌ها تحت سناریوهای اقلیمی مختلف حاکی از افزایش وقوع دوره‌های خشک در آینده و در نتیجه افت قابل‌توجه منابع آب زیرزمینی بود.

با بهره‌گیری از رویکرد سنجش از دور، Kashani and Safavi (۲۰۲۵) از داده‌های ماهواره‌ای GRACE و GLDAS برای شش حوضه بزرگ ایران طی سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۳ استفاده کرد. یافته‌ها حاکی از کاهش متوسط سالانه ۲۹ سانتی‌متر در تراز آب زیرزمینی بوده و خشکسالی به‌عنوان عامل تشدیدکننده اصلی این روند معرفی شد. در حوضه زاینده‌رود نیز، Abou Zaki و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از داده‌های سطح آب زیرزمینی و شاخص‌های خشکسالی، ارتباط مستقیم بین شدت خشکسالی هیدرولوژیکی و افت سطح آب زیرزمینی را شناسایی و نشان داد که کاهش بارش و افزایش برداشت آب از مهم‌ترین عوامل تشدید بحران آبی در این حوضه به شمار می‌روند. در منطقه عجب‌شیر، Faramarzpour و همکاران (۲۰۲۴) با تحلیل داده‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۹، کاهش مستمر سطح آب زیرزمینی و نقش ترکیبی خشکسالی و برداشت بی‌رویه آب در این روند را گزارش نمود.

در حوزه مطالعات خارجی، Shah and Mishra (۲۰۲۰) در هند با استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی و شاخص خشکسالی یکپارچه (IDI) برای دوره ۱۹۵۱ تا ۲۰۱۶، خوشه‌های همگن خشکسالی را شناسایی کرد و دریافت که تغییر اقلیم باعث افزایش شدت و تواتر خشکسالی‌ها شده است. همچنین، در حوضه نرما، Swain و همکاران (۲۰۲۲) شاخص آسیب‌پذیری خشکسالی جامع را توسعه داد و مناطق بحرانی را مشخص نمود؛ نتایج نشان داد که مناطقی با خاک‌های کم‌عمق و ظرفیت نگهداری آب پایین بیشترین آسیب‌پذیری را دارند.

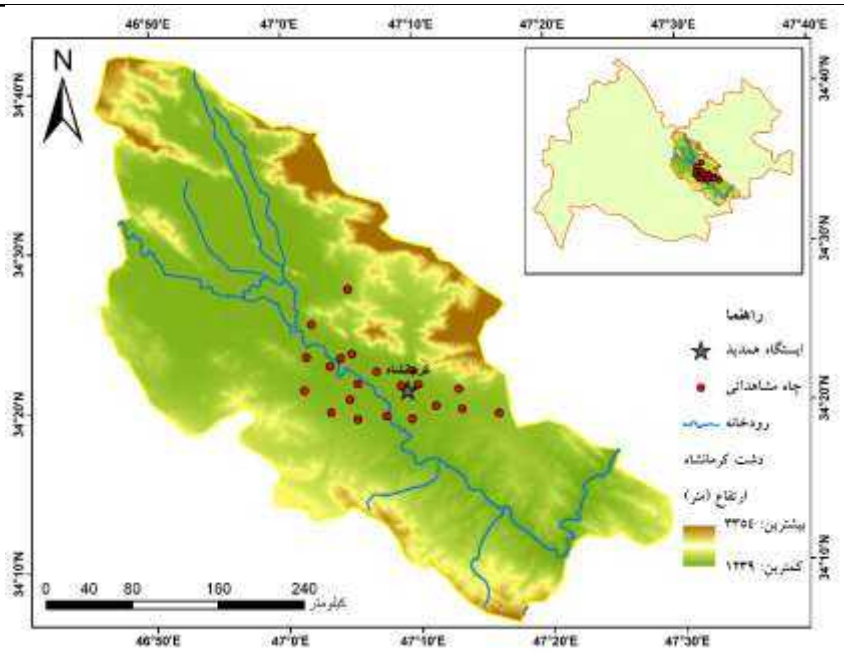
Mathew و همکاران (۲۰۲۵) در حوضه چالیار هند، با استفاده از داده‌های بارش و سطح آب زیرزمینی و شبیه‌سازی سناریوهای اقلیمی برای دوره ۲۰۲۲ تا ۲۰۵۰، پیش‌بینی کرد که در سناریوهای انتشار بالا، افت منابع آب زیرزمینی به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد. در مراکش، Dhmane و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از داده‌های سنجش از دور و شاخص‌های خشکسالی، روندهای زمانی خشکسالی و اثر آن بر منابع آبی حوضه بوگرگ را تحلیل کرد و نتیجه گرفت که خشکسالی‌های متوالی باعث کاهش شدید تغذیه آبخوان‌ها شده است. همچنین، Shaikh و همکاران (۲۰۲۴) در هند با استفاده از داده‌های GRACE و GLDAS طی سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۲، پویایی منابع آب زیرزمینی را بررسی و نقش تغییرات هیدرولوژیکی و بارش‌های موسمی در بهبود یا افت تراز آب زیرزمینی را مشخص کرد. در ایالات متحده، Alley و همکاران (۲۰۱۸) با مقایسه شاخص‌های استرس آب زیرزمینی نشان داد که برداشت بیش از حد و وقوع هم‌زمان خشکسالی، تهدید جدی برای پایداری منابع آب کشاورزی محسوب می‌شود. در اروپا، Karamuz و همکاران (۲۰۲۱) در حوضه رودخانه ویستولا لهستان، داده‌های جریان ۹ ایستگاه طی ۱۹۵۱ تا ۲۰۱۸ را تحلیل و عوامل مؤثر بر تغییرات زمانی و مکانی خشکسالی را شناسایی کرد. نتایج نشان داد که فعالیت‌های انسانی، به‌ویژه تغییر کاربری اراضی، نقش مهمی در تغییر چرخه آب دارند. در حوضه رودخانه نیل، Nigatu و همکاران (۲۰۲۴) با بررسی شاخص‌های هواشناسی، کشاورزی و آب زیرزمینی طی دوره ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۲ نشان داد که پدیده ال‌نینو موجب تشدید خشکسالی‌ها و کاهش منابع آب زیرزمینی می‌شود. در نهایت، در کره جنوبی، Seo and Lee (۲۰۲۳) با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و مدل یادگیری عمیق، میانگین زمان انتقال از خشکسالی هواشناسی به خشکسالی آب زیرزمینی را ۴/۳۴ ماه برآورد و تأکید کرد که این شاخص می‌تواند ابزار ارزشمندی برای مدیریت پیش‌دستانه خشکسالی باشد.

اگرچه مطالعات داخلی و خارجی متعددی به بررسی تأثیر خشکسالی‌های هواشناسی، کشاورزی و هیدرولوژیکی بر منابع آب پرداخته‌اند، بیشتر آن‌ها بر یک یا دو شاخص تمرکز داشته و بررسی همزمان ارتباط متقابل این سه شاخص با یکدیگر و با تغییرات سطح آب زیرزمینی در مقیاس دشت کمتر انجام شده است. همچنین، اغلب پژوهش‌ها بر تحلیل‌های تاریخی یا پیش‌بینی با استفاده از یک منبع داده یا یک مدل تمرکز داشته و رویکردهای یکپارچه‌سازی داده‌های چندمنبعی و چندشاخصی کمتر به کار گرفته شده است. پژوهش حاضر با تمرکز بر دشت کرمانشاه، نه تنها به بررسی ارتباطات دو سویه شاخص‌های هواشناسی، کشاورزی و هیدرولوژیکی می‌پردازد، بلکه این روابط را با تغییرات سطح آب زیرزمینی تحلیل می‌کند. استفاده از داده‌های چندمنبعی معتبر، تحلیل همزمان سه شاخص اصلی خشکسالی و تلفیق آن با داده‌های سطح آب زیرزمینی، نوآوری اصلی این تحقیق محسوب می‌شود که می‌تواند به درک عمیق‌تر پویایی منابع آب و طراحی راهبردهای مدیریتی مؤثرتر کمک نماید.

روش تحقیق

منطقهٔ مورد مطالعه

دشت کرمانشاه (شکل ۱) در غرب ایران و در محدوده استان کرمانشاه واقع شده و یکی از مهم‌ترین پهنه‌های آبرفتی و کشاورزی زاگرس مرکزی به شمار می‌آید. بر اساس داده‌های ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه که در مختصات جغرافیایی ۳۴.۳۵° عرض شمالی و ۴۷.۱۵° طول شرقی و در ارتفاع ۱۳۱۸ متر از سطح دریا قرار دارد، میانگین دمای سالانه منطقه حدود ۱۴ درجه سانتی‌گراد و میانگین بارش سالانه آن نزدیک به ۴۵۰ میلی‌متر گزارش شده است (Ahmadi et al., 2023). رطوبت منطقه عمدتاً از توده‌های هوای منبعث از اقیانوس اطلس و دریای مدیترانه تأمین می‌شود. این شرایط اقلیمی همراه با موقعیت زمین‌شناسی و منابع آبی، اهمیت ویژه‌ای به دشت کرمانشاه در مطالعات مرتبط با خشکسالی و مدیریت منابع آب می‌بخشد.



شکل ۱. منطقهٔ مورد مطالعه

داده‌ها

در این پژوهش، هدف بررسی هم‌بستگی و روند سه شاخص خشکسالی - هواشناسی (Standardized Precipitation Index; SPI)، کشاورزی (Standardized Soil Moisture Index; SSMI) و هیدرولوژیکی (Standardized Groundwater Index; SGI) - و همچنین ارتباط آن‌ها با سطح آب زیرزمینی در دشت کرمانشاه در بازه زمانی ۲۰۲۶–۲۰۵۰ تحت دو سناریوی تغییر اقلیم SSP2-4.5 و SSP5-8.5 بود. برای تولید داده‌های مورد نیاز محاسبه شاخص‌های خشکسالی، ابتدا مقادیر بارش (برای SPI)، رطوبت خاک (برای SSMI) و سطح آب زیرزمینی (برای SGI) با استفاده تمام مدلهای دردسترس CMIP6 (r1i1p1f1 شامل بارش، دمای حداقل و حداکثر، رطوبت خاک و رطوبت‌نسبی) و الگوریتم جنگل تصادفی (Random Forest- RF) پیش‌بینی شدند.

الگوریتم جنگل تصادفی (RF)

الگوریتم RFیکی از روش‌های یادگیری تجمعی (ensemble learning) است که بر پایه ترکیب چندین درخت تصمیم (Decision Trees) بنا شده است (Breiman, 2001). ایده اصلی این روش آن است که به‌جای استفاده از یک درخت منفرد که ممکن است به بیش‌برازش (overfitting) دچار شود، مجموعه‌ای از درخت‌ها ساخته شده و نتایج آن‌ها با یکدیگر ترکیب می‌گردد. در این فرایند، هر درخت تصمیم بر روی یک نمونه تصادفی از داده‌های آموزشی ساخته می‌شود و در هر تقسیم (split)، انتخاب ویژگی‌ها به‌صورت تصادفی محدود می‌شود. این دو سطح تصادفی‌سازی-bootstrap sampling و انتخاب

تصادفی ویژگی‌ها- موجب افزایش تنوع بین درخت‌ها و در نتیجه بهبود دقت و پایداری پیش‌بینی می‌گردد (Cutler et al., 2007).

در کاربردهای رگرسیونی، که موضوع این پژوهش نیز بر آن استوار است، خروجی نهایی الگوریتم RF میانگین مقادیر پیش‌بینی‌شده توسط درخت‌های مختلف است، در حالی‌که در مسائل طبقه‌بندی، رأی اکثریت مبنای تصمیم‌گیری نهایی قرار می‌گیرد (Liaw and Wiener, 2002). از مهم‌ترین مزایای این الگوریتم می‌توان به توانایی مدل‌سازی روابط غیرخطی پیچیده، مقاومت در برابر داده‌های پرت و نویزی، عدم نیاز به فروض توزیعی قوی، و قابلیت برآورد اهمیت متغیرها (variable importance) اشاره کرد (Rodriguez-Galiano et al., 2012). همین ویژگی‌ها سبب شده است که RF در علوم محیطی، هیدرولوژی و مطالعات خشکسالی به‌طور گسترده‌ای به‌کار گرفته شود (Tyralis et al., 2019). به‌کارگیری RF به دلیل پایداری و دقت بالا در داده‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی، روش‌شناسی تحقیق حاضر را از سایر رویکردهای کلاسیک متمایز می‌سازد

برای اجرای مدل RF، داده‌ها به بخش‌های آموزش (٪۸۰ برای بارش، رطوبت خاک و ٪۷۰ برای سطح آب زیرزمینی) و تست (٪۲۰ برای بارش و رطوبت خاک و ٪۳۰ برای سطح آب زیرزمینی) تقسیم شدند. ویژگی‌های ورودی شامل متغیرهای اصلی (بارش، دمای حداکثر و حداقل، رطوبت نسبی و رطوبت خاک) به‌همراه همین متغیرها و سطح آب زیرزمینی پیزومترها (۲۰ پیزومتر مناطق شهری دشت کرمانشاه) از داده‌های مشاهداتی بودند. معیارهای عملکرد مدل مانند خطای نرمال‌شدهٔ میانگین مربعات ریشه (NRMSE)، ضریب کارایی نش‌ساتکلیف (NSE) و ضیب همبستگی(R) برای ارزیابی دقت پیش‌بینی متغیرها استفاده شدند. داده‌های بارش، رطوبت خاک و سطح آب زیرزمین تحت دو سناریوی متوسط و بدبینانه پیش‌بینی شدند. پس از پیش‌بینی داده‌های ورودی، شاخص‌های SPI، SSMI و SGI با استفاده از کتابخانه‌های موجود در زبان پایتون محاسبه شدند. به‌عنوان نمونه، بسته spei امکان محاسبه شاخص‌هایی مانند SPI و SGI را با بهره‌گیری از pandas و scipy فراهم می‌کند (Vonk, 2025). همچنین بسته‌های دیگری مانند climate-indices امکان محاسبه SPI با استفاده از توزیع گاما یا پرسون نوع III را با پارالل‌سازی سریع فراهم می‌سازند (Data Partnership, 2025).

شاخص‌های خشکسالی

شاخص SPI

شاخص SPI یکی از پرکاربردترین شاخص‌های خشکسالی هواشناسی است که نخستین بار توسط McKee و همکاران (۱۹۹۳) معرفی شد. این شاخص بر پایه توزیع احتمالی بارش و نرمال‌سازی آن محاسبه می‌شود و امکان مقایسه شرایط رطوبتی در مقیاس‌های زمانی مختلف (از ماهانه تا چندساله) را فراهم می‌آورد (Guttman, 1999). مقادیر منفی SPI بیانگر شرایط خشک و مقادیر مثبت نشان‌دهنده شرایط مرطوب هستند. از مهم‌ترین مزایای SPI می‌توان به سادگی محاسبه،

انعطاف‌پذیری در مقیاس‌های زمانی و توانایی مقایسه مناطق مختلف با اقلیم‌های متفاوت اشاره کرد. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که SPI شاخصی مؤثر برای شناسایی خشکسالی هواشناسی و پایش تغییرات اقلیمی است (Svoboda et al., 2012).

شاخص SSMI

شاخص SSMI به‌عنوان یک شاخص خشکسالی کشاورزی توسعه یافته است و با استانداردسازی مقادیر رطوبت خاک در یک دوره آماری بلندمدت محاسبه می‌شود (Hao and AghaKouchak, 2014). این شاخص به‌طور مستقیم بازتاب‌دهنده شرایط در دسترس بودن آب برای گیاهان بوده و در نتیجه برای ارزیابی تأثیر خشکسالی بر کشاورزی اهمیت زیادی دارد (Hunt et al., 2009). مقادیر پایین SSMI نشان‌دهنده کمبود رطوبت و تنش آبی در پوشش گیاهی است. از آنجا که تغییرات رطوبت خاک نسبت به بارش پاسخ کندتری دارد، SSMI در شناسایی خشکسالی‌های کشاورزی و تأخیر زمانی اثر خشکسالی بر پوشش گیاهی کارایی بالایی دارد (Hao and Singh, 2015).

شاخص SGI

شاخص SGI با استانداردسازی تغییرات سطح آب زیرزمینی محاسبه می‌شود و به‌عنوان شاخصی برای پایش خشکسالی هیدرولوژیکی به کار می‌رود (Bloomfield and Marchant, 2013). این شاخص قادر است کاهش تدریجی منابع آب زیرزمینی ناشی از کمبود بارش‌های طولانی‌مدت و افزایش برداشت انسانی را بازتاب دهد. SGI برخلاف SPI و SSMI که نوسانات کوتاه‌مدت را نیز ثبت می‌کنند، بیشتر بیانگر شرایط بلندمدت و پایداری یا کاهش منابع آبی در سفره‌های زیرزمینی است (Thomas et al., 2017). به همین دلیل، SGI به‌عنوان یک ابزار کلیدی در مدیریت منابع آب و سیاست‌گذاری‌های سازگاری با تغییر اقلیم پیشنهاد شده است (Li and Rodell, 2015).

در گام بعدی، روند زمانی سه شاخص خشکسالی (SPI، SSMI و SGI) به همراه سطح آب زیرزمینی مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور از آزمون Mann–Kendall برای تشخیص معناداری روند و از رگرسیون خطی به منظور برآورد شیب روند استفاده شد. همچنین، جهت تحلیل روابط بین شاخص‌ها و سطح آب زیرزمینی، ضریب همبستگی پیرسون در شرایط با lag و بدون lag زمانی محاسبه گردید.

نتایج

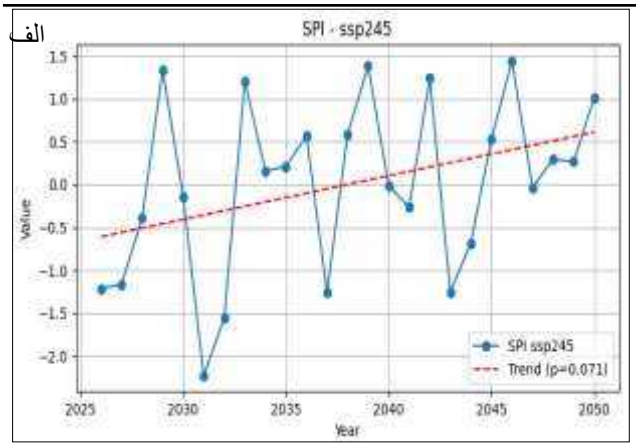
عملکرد الگوریتم جنگل تصادفی در پیش‌بینی متغیرهای ورودی (بارش، رطوبت خاک و سطح آب زیرزمینی) بسیار رضایت‌بخش ارزیابی شد. بطور کلی برای این متغیرها در مرحله تست، مقادیر R بیش از ۰/۹۰، NSE بزرگ‌تر از ۰/۸۰ و NRMSE کمتر از ۰/۱۹ به‌دست آمد که دلالت بر توانایی بالای مدل در شبیه‌سازی دقیق متغیرهای هیدرو اقلیمی دارد. بنابراین، می‌توان داده‌های پیش‌بینی‌شده با اطمینان برای محاسبه شاخص‌های SPI، SSMI و SGI به‌کار گرفته شد.

شدت و نوسان خشکسالی‌ها در دوره ۲۰۵۰ – ۲۰۲۶ در شرایط سناریوها

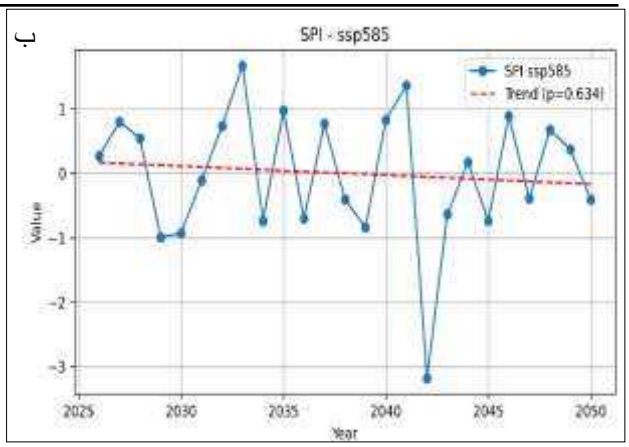
بر اساس نتایج شاخص‌های SPI، SSI و SGI در بازه زمانی ۲۰۲۶ تا ۲۰۵۰، وضعیت خشکسالی آینده در دو سناریوی میانی (SSP2-4.5) و شدید (SSP5-8.5) تفاوت‌های معناداری نشان می‌دهد. در سناریوی SSP2-4.5، شاخص SPI شدیدترین خشکسالی را در سال ۲۰۳۱ با مقدار ۲/۲- پیشبینی میکند (شکل ۲- الف) که همراه با مقادیر منفی SSI و SGI (شکل ۲- پ، ث) در همان سال، بیانگر وقوع یک خشکسالی چندبعدی است که هم بر بارش و هم بر رطوبت خاک و پوشش گیاهی اثر گذاشته است. در این سناریو، شاخص SGI نیز در سال ۲۰۲۸ به پایین‌ترین مقدار خود (۲/۴-) خواهد رسید (شکل ۲- پ) که نشان‌دهنده فشار شدید بر منابع آب است. در مقابل، ترسالی‌های شاخصی در سال‌های ۲۰۲۹ و ۲۰۳۹، با مقادیر مثبت قابل‌توجه SPI و SGI (شکل ۲- الف، پ)، حاکی از بهبود موقتی شرایط رطوبتی منطقه هستند. از نظر روند بلندمدت، MK نشان داد که SPI و SSI در این سناریو فاقد روند معنادار خواهد بود، در حالی که SGI دارای روند افزایشی معنادار ($Z = ۲/۷۳$، $p \approx ۰/۰۰۶$) با شیب ۰/۰۷ واحد در سال است. این روند مثبت در SGI بیانگر آن است که علی‌رغم وقوع خشکسالی‌های مقطعی، شرایط آب زیرزمینی در بلندمدت تمایل به بهبود دارد که می‌تواند ناشی از سازگاری آن یا تغییرات الگوی بارش باشد.

در سناریوی SSP5-8.5، بیشترین شدت خشکسالی بارشی در سال ۲۰۴۲ با مقدار ۳/۲- برای SPI رخ خواهد داد (شکل ۲- ب) که یک رویداد بسیار شدید و نادر محسوب می‌شود. در همین سال، شاخص SGI همچنان مثبت باقی مانده که نشان می‌دهد اثر این خشکسالی بر پوشش گیاهی ممکن است با تأخیر زمانی یا شدت کمتر بروز یابد (شکل ۲- ت). در بعد ترسالی، بیشترین مقدار مثبت SPI در سال ۲۰۳۳ (۱/۷) و بیشترین مقدار مثبت SGI در سال ۲۰۲۸ (۲/۲) پیشبینی میشود (شکل ۲- ب، ت) که بیانگر بهبود قابل‌توجه منابع آب در این سال‌هاست. از نظر روند، در این سناریو نیز SPI و SSMI فاقد روند معنادار بوده و تغییرات آنها بیشتر نوسانی است، اما SGI دارای روند افزایشی معنادار ($p \approx ۰/۰۳۴$) با شیب ۰/۰۵۲ واحد در سال است (شکل ۲- ت). این امر مشابه سناریوی میانی نشان می‌دهد که با وجود وقوع خشکسالی‌های شدید، شاخص استاندارد سطح آب زیرزمینی در بلندمدت تمایل به بهبود دارد، هرچند نوسانات سالانه آن در این سناریو شدیدتر و دامنه تغییرات SPI به‌مراتب بیشتر است. مقایسه این دو سناریو نشان می‌دهد که در SSP5-8.5، شدت و نوسان SPI بیشتر بوده و رویدادهای حدی خشکسالی و ترسالی با دامنه بالاتری رخ می‌دهند، در حالی که SSP2-4.5 دارای الگویی ملایم‌تر اما تداوم‌دارتر است. با این حال، هر دو سناریو روند افزایشی معنادار در SGI را نشان می‌دهند که بیانگر بهبود نسبی وضعیت منابع آب زیرزمینی در طول دوره پیش‌بینی است؛ این بهبود می‌تواند به‌طور غیرمستقیم به تاب‌آوری بیشتر اکوسیستم و پوشش گیاهی در برابر تغییرات اقلیمی کمک کند، اگرچه چنین روندی لزوماً تضمین‌کننده کاهش خسارات ناشی از خشکسالی‌های مقطعی شدید نخواهد بود.

الف

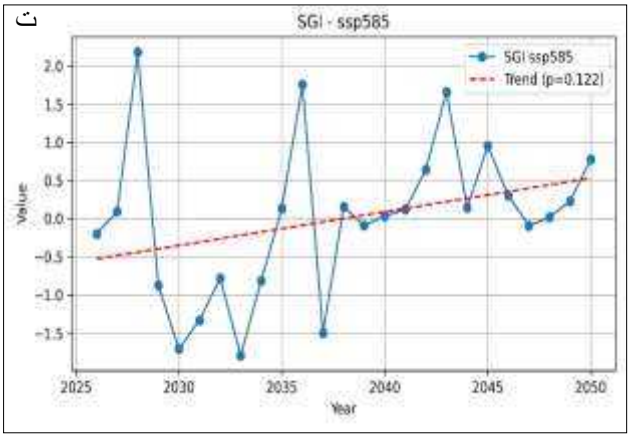

SPI - ssp245
SPI ssp245
Trend (p=0.071)
Value
Year

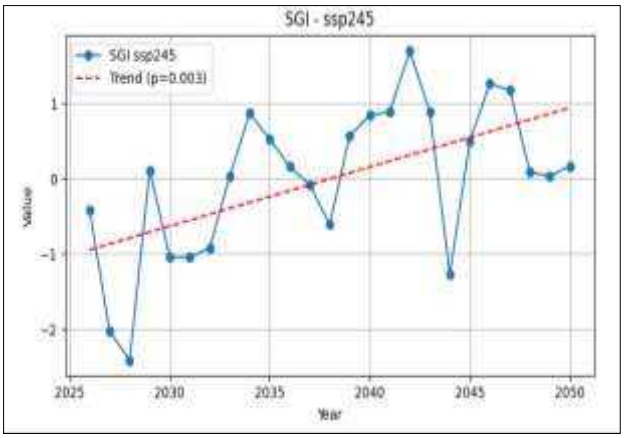
ب

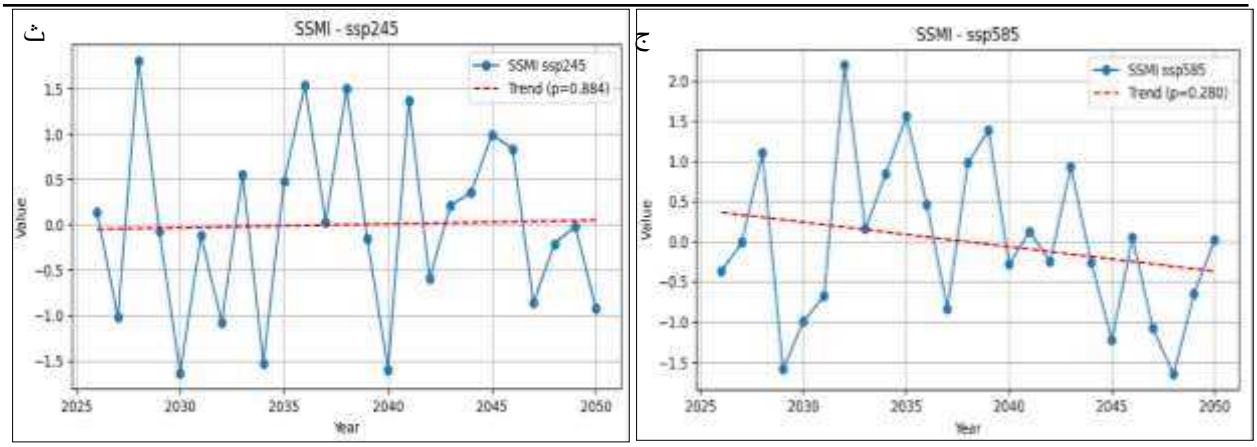

SPI - ssp585
SPI ssp585
Trend (p=0.634)
Value
Year

پ

ت


SGI - ssp585
SGI ssp585
Trend (p=0.122)
Value
Year


SGI - ssp245
SGI ssp245
Trend (p=0.003)
Value
Year

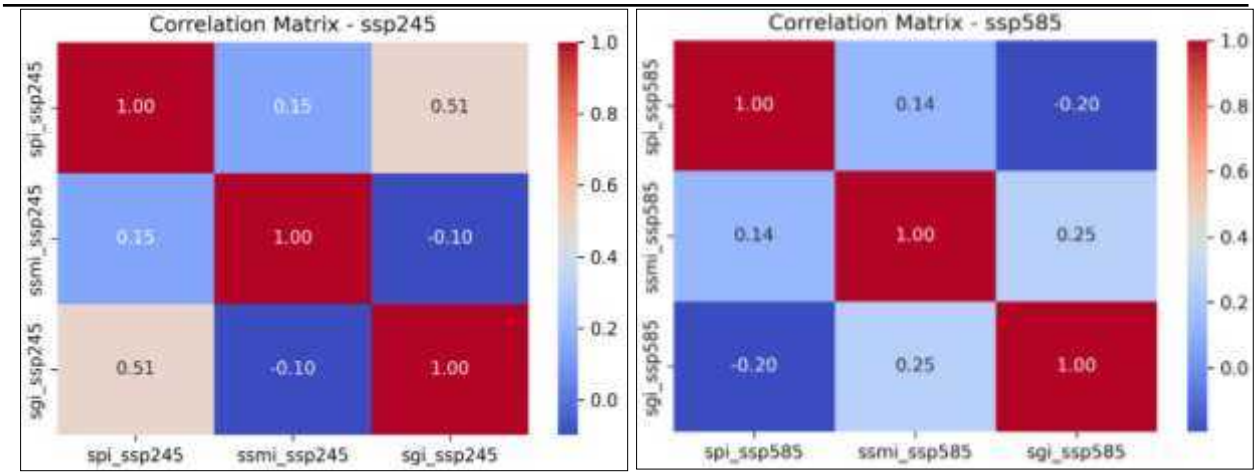


شکل ۲. روند شاخص‌های خشکسالی SPI، SGI و SSMI تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5

ارتباط شاخص‌های خشکسالی با یکدیگر در شرایط سناریوها

نتایج تحلیل همبستگی برای سناریوی SSP245 نشان می‌دهد که شاخص خشکسالی SPI و شاخص خشکسالی SGI دارای همبستگی مثبت و معنادار در سطح اطمینان ۹۹٪ (P = ۰/۰۰۹ و r = ۰/۵۱) هستند که بیانگر واکنش نسبتاً هم‌راستای سطح آب زیرزمینی به نوسانات بارش در این سناریو است. در مقابل، همبستگی بین SPI و شاخص رطوبت خاک (SSMI) ضعیف و غیرمعنادار (P = ۰/۴۹ و r = ۰/۱۵) است و ارتباط بین SSMI و SGI نیز منفی و غیرمعنادار (P = ۰/۶۴ و r = -۰/۱) است (شکل ۳- الف)؛ این امر نشان می‌دهد که تغییرات کوتاه‌مدت رطوبت خاک، حداقل در افق زمانی مدل‌سازی‌شده آینده، بازتاب مستقیمی بر تغییرات سطح آب زیرزمینی ندارد. در سناریوی SSP585، همبستگی بین SPI و SGI نه تنها ضعیف‌تر پیش‌بینی می‌شود، بلکه منفی و غیرمعنادار نیز خواهد بود (p =۰/۳۵ و r = -۰/۲۰)، که می‌تواند ناشی از تشدید ناهماهنگی زمانی بین بارش‌ها و پاسخ سطح آب زیرزمینی در شرایط گرمایش شدیدتر باشد. در این سناریو، ارتباط بین SSMI و SGI مثبت ولی ضعیف و غیرمعنادار است (p = ۰/۲۲ و r = ۰/۲۵) و پیوند بین SPI و SSMI همچنان پایین و فاقد معنی‌داری آماری (p = ۰/۵۱ و r = ۰/۱۴) است (شکل ۳- ب). این تغییر الگوها نشان می‌دهد که در شرایط انتشار بالای گازهای گلخانه‌ای (SSP585)، همبستگی مستقیم بین شاخص‌های مختلف خشکسالی کاهش خواهد یافت و احتمالاً سازوکارهای پیچیده‌تری در حاکمیت بر روابط بین بارش، رطوبت خاک و سطح آب زیرزمینی نقش دارند.

به طور کلی، این نتایج حاکی از آن است که در هر دو سناریو، شاخص SGI نسبت به دو شاخص دیگر بیشترین حساسیت را به تغییرات اقلیمی نشان می‌دهد و بهبود نسبی در وضعیت آب زیرزمینی را منعکس می‌کند، هرچند در SSP585 این بهبود با ضعف بیشتری همراه است. همچنین، کاهش معنی‌داری همبستگی بین شاخص‌ها در SSP585 نسبت به SSP245 نشان می‌دهد که با تشدید تغییر اقلیم، روابط خطی ساده بین خشکسالی هواشناسی، خشکسالی کشاورزی و خشکسالی هیدرولوژیکی تضعیف شده و تحلیل پویایی‌های خشکسالی نیازمند در نظر گرفتن فرآیندهای غیرخطی و تاخیری بیشتری خواهد بود.



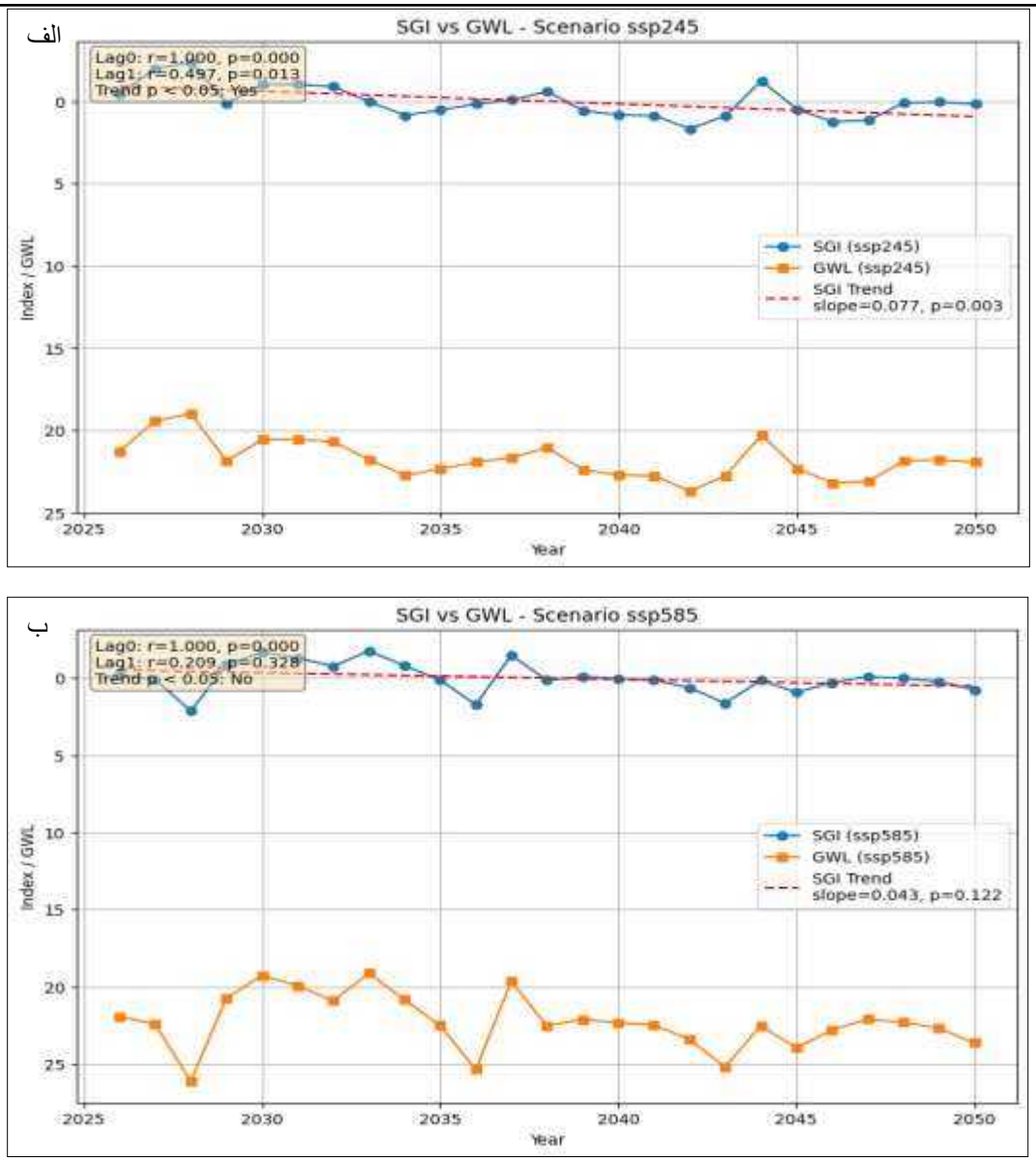
شکل ۳. همبستگی شاخصهای خشکسالی در شرایط سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5

ارتباط شاخص‌های خشکسالی با سطح آب زیرزمینی در شرایط سناریوها

در این مطالعه، ارتباط آماری بین شاخص‌های خشکسالی هیدرولوژیکی، هواشناسی و سطح آب زیرزمینی در دو سناریوی آینده اقلیمی SSP245 وSSP585 مورد بررسی قرار گرفت. به منظور بررسی همبستگی و اثرات زمانی، ضریب همبستگی پیرسون (r) برای دو حالت همزمان (lag 0) و با یک دوره تأخیر (lag 1) محاسبه شد. همچنین، روند زمانی این شاخص‌ها با محاسبه شیب روند و آزمون معنی‌داری آن تحلیل شد.

شاخص خشکسالی SGI

نتایج نشان داد که شاخص SGI در هر دو سناریوی SSP245 و SSP585، قوی‌ترین همبستگی را با سطح آب زیرزمینی دارا است. در سناریوی SSP245، ضریب همبستگی در lag صفر برابر با ۱ ($p < ۰/۰۰۱$) بود که دلالت بر تطابق کامل بین SGIو تغییرات سطح آب زیرزمینی دارد. این همبستگی در lag یک به ۰/۵۰ ($p = ۰/۰۱۳$) کاهش یافت (شکل ۴- الف). اما همچنان معنادار باقی ماند که نشان‌دهنده اثرات تاخیری مثبت این شاخص بر سطح آب است. این ارتباط قوی و معنادار بیانگر قابلیت بالای SGI در بازنمایی دقیق وضعیت منابع آب زیرزمینی و خشکسالی هیدرولوژیکی در منطقه مورد مطالعه است. در سناریوی SSP585، همبستگی lag صفر نیز برابر با ۱ ($p < ۰/۰۰۱$) بود، ولی در lag یک، کاهش قابل توجهی داشت و به ۰/۲۱ ($p = ۰/۳۳$) رسید که نشان‌دهنده ضعیف شدن ارتباط با تاخیر زمانی در شرایط اقلیمی شدیدتر است. این کاهش ممکن است ناشی از افزایش نوسانات و عدم قطعیت‌های اقلیمی در این سناریو باشد که بر پایداری روابط هیدرولوژیکی اثرگذار است. بررسی روند زمانی شاخص SGI تحت سناریوی SSP245 نشان‌دهنده شیب مثبت و معنادار ۰/۰۷۷ ($p = ۰/۰۰۳$) است، که بهبود نسبی شرایط منابع آب زیرزمینی را در طول دوره مورد مطالعه نشان می‌دهد. اما در سناریوی SSP585، شیب روند مثبت است (۰/۰۴۳) اما فاقد معنی‌داری آماری ($p = ۰/۱۲$) است که بیانگر عدم وجود روند قوی و قابل اتکا در شرایط اقلیمی شدیدتر است (شکل ۴- ب).

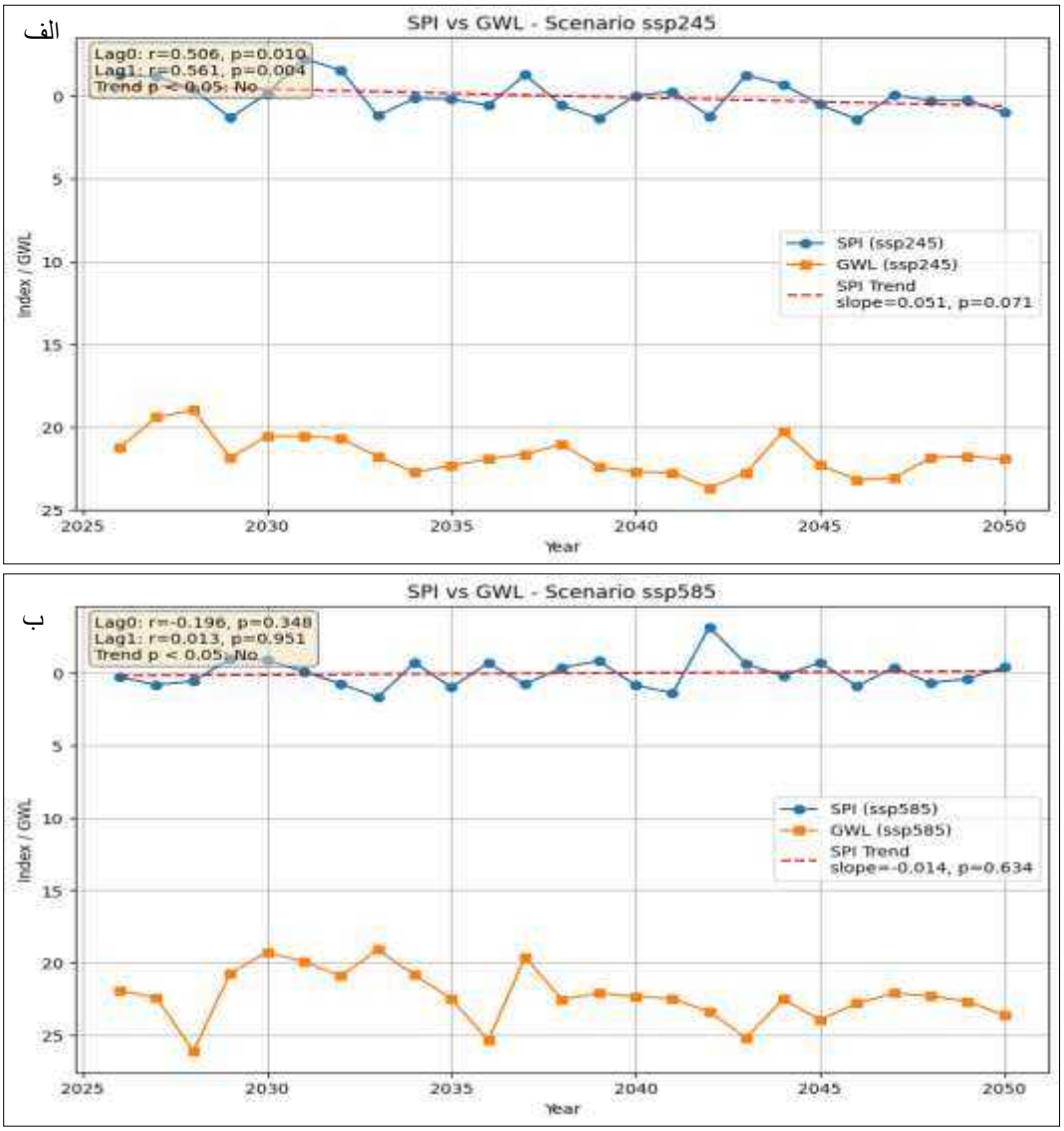


شکل ۴. ارتباط شاخص خشکسالی SGI با سطح آب زیرزمینی در شرایط سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5

شاخص خشکسالی SPI

شاخص SPI به عنوان شاخص بارش استاندارد شده، در سناریوی SSP245 همبستگی مثبت و معناداری با سطح آب زیرزمینی دارد. ضریب همبستگی پیرسون در lag صفر برابر ۰/۵۱ (p = ۰/۰۱) و در lag یک ۰/۵۶ (p = ۰/۰۰۴) است (شکل ۵- الف). این نتایج نشان می‌دهد که تغییرات بارش تأثیر قابل توجه و با تاخیر زمانی یک دوره بر سطح آب زیرزمینی دارد. این الگو هم‌خوانی بالایی با اصول هیدرولوژیکی دارد که طی آن تأثیر بارش بر تغذیه سفره‌های زیرزمینی با تاخیر زمانی مشاهده می‌شود. در سناریوی SSP585 اما همبستگی SPI با سطح آب زیرزمینی ضعیف و غیرمعنادار است (lag صفر

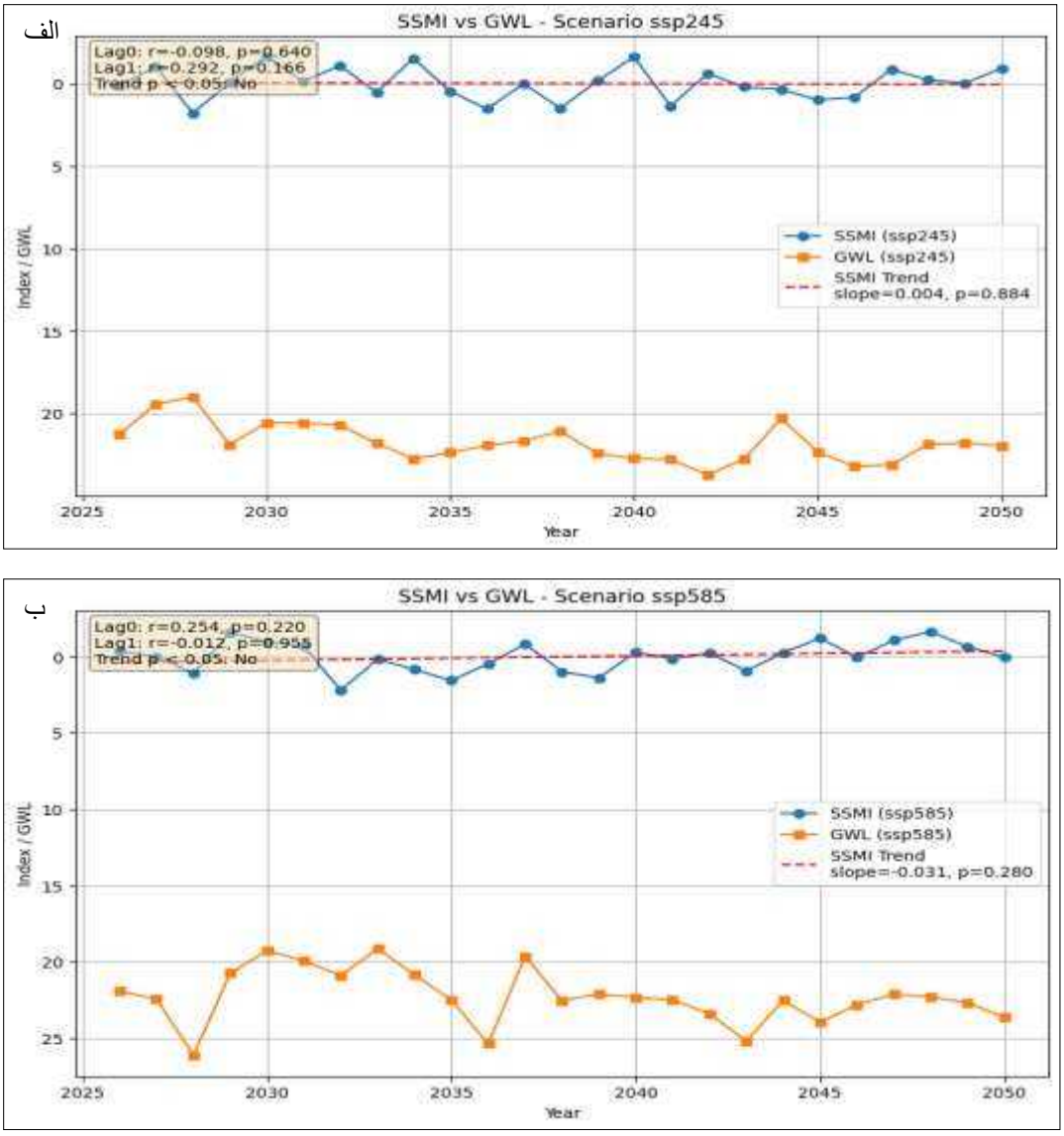
p = ۰/۳۵، r = -۰/۲ و lag یک p = ۰/۹۵، r = ۰/۰۱) (شکل ۵- ب). این یافته نشان‌دهنده کاهش اثر بارش بر منابع آب زیرزمینی در شرایط اقلیمی شدیدتر است که ممکن است ناشی از افزایش دما و تبخیر، تغییر الگوهای جریان آب زیرسطحی و یا فشارهای انسانی بیشتر باشد. از نظر روند زمانی، SPI در شرایط SSP245 دارای شیب مثبت ۰/۰۵۱ است اما سطح معنی‌داری آن نزدیک مرز (p = ۰/۰۷) قرار دارد و این نشان‌دهنده بهبود نسبی بارش در ۲۰۵۰ - ۲۰۲۶ است (شکل ۵- الف). در شرایط SSP585 روند SPI منفی و غیرمعنادار است (slope = -۰/۰۱۴ و p = ۰/۶۳) که نمایانگر تشدید خشکسالی هواشناسی در این سناریو می‌باشد (شکل ۵- ب).



شکل ۵. ارتباط شاخص خشکسالی SPI با سطح آب زیرزمینی در شرایط سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5

شاخص خشکسالی SSMI

شاخص SSMI همبستگی ضعیف و غیرمعناداری با سطح آب زیرزمینی در هر دو سناریو دارد.. در شرایط SSP245، ضریب همبستگی در lag صفر برابر با ۰/۱- (p = ۰/۶۴) و در lag یک ۰/۲۹ (p = ۰/۱۷) است (شکل ۶- الف). تحت شرایط SSP585نیز ضریب همبستگی lag صفر ۰/۲۵(p = ۰/۲۲) و lag یک ۰/۰۱- (p = ۰/۹۶) پیش‌بینی می‌شود (شکل ۶- ب). این نتایج حاکی از عدم تناسب و عدم قابلیت SSMI به عنوان شاخص مستقل برای ارزیابی وضعیت آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه است که می‌تواند ناشی از تفاوت مقیاس زمانی و مکانی شاخص و فرآیندهای پیچیده خاک و آب باشد. روند زمانی SSMI در SSP245 و SSP585 نیز فاقد معنی‌داری بوده و تغییرات آن در طول دوره مطالعه ثابت باقی مانده است (به ترتیب slope =۰/۰۰۴، p = ۰/۸۸ و slope = -۰/۰۰۳، p = ۰/۲۸) (شکل ۶- الف، ب).



شکل ۶. ارتباط شاخص خشکسالی SSMI با سطح آب زیرزمینی در شرایط سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5

بحث

نتایج این پژوهش نشان داد که شاخص‌های خشکسالی هواشناسی، کشاورزی و هیدرولوژیکی در دوره پیش‌بینی ۲۰۲۶–۲۰۵۰ تحت دو سناریوی اقلیمی SSP2-4.5 وSSP5-8.5 ، رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهند. در سناریوی میانه (SSP2-4.5)، شاخص SPI وقوع شدیدترین خشکسالی بارشی را در سال ۲۰۳۱ پیش‌بینی می‌کند، در حالی‌که شاخص SGI افت چشمگیرتری را در سال ۲۰۲۸ نشان می‌دهد. این نتایج بیانگر آن است که تغییرات بارش و نوسانات سطح آب زیرزمینی همواره همزمان رخ نمی‌دهند و در برخی سال‌ها تأخیر یا ناهمخوانی زمانی بین این دو پیش‌بینی می‌شود. در مقابل، در سناریوی شدیدتر (SSP5-8.5)، شدت و نوسانات شاخص SPI بسیار بالاتر بود و رویدادهای حدی خشکسالی و ترسالی با دامنه بیشتری رخ دادند، در حالی که SGI در برخی سال‌ها حتی با وجود خشکسالی شدید هواشناسی، روند متفاوتی نشان داد. این عدم تطابق می‌تواند ناشی از پیچیدگی‌های فرآیند تغذیه سفره‌های زیرزمینی، تبخیر و تعرق بالا و فشارهای انسانی باشد.

نتایج آزمون روند نیز نشان داد که شاخص SGI در هر دو سناریو دارای روند افزایشی معنادار است، در حالی‌که SPI و SSMIفاقد روند مشخص بودند. این موضوع می‌تواند نشان‌دهنده نوعی تاب‌آوری نسبی در منابع آب زیرزمینی دشت کرمانشاه باشد، اگرچه لزوماً به معنای کاهش اثرات خشکسالی‌های مقطعی شدید نیست. یافته حاضر با نتایج Kashani (2025)که کاهش سالانه منابع آب زیرزمینی ایران را گزارش کرده و همچنین با مطالعات Abou Zaki و همکاران (۲۰۲۰) و Ashraf و همکاران (۲۰۲۱) که رابطه مستقیم خشکسالی هیدرولوژیکی و افت سطح آب زیرزمینی را نشان داده‌اند، همخوانی نسبی دارد، با این تفاوت که در دشت کرمانشاه روند بلندمدت SGI نشانه‌هایی از پایداری بیشتر را بروز داده است.

از نظر همبستگی، در سناریوی SSP2-4.5 ارتباط مثبت و معناداری بین SPI و SGI مشاهده شد که بیانگر همسویی نسبی بین تغییرات بارش و سطح آب زیرزمینی است. این نتیجه مشابه یافته‌هایJavadinejad و همکاران (۲۰۲۰) است که ارتباط قوی بین SPI و شاخص‌های هیدرولوژیکی را گزارش کرده بود. با این حال، در سناریوی SSP5-8.5 ، این همبستگی کاهش یافته و حتی به سمت منفی تغییر کرده است. این یافته با مطالعهٔ Seo and Lee (۲۰۲۳) در کره جنوبی همخوانی دارد که نشان داده‌اند تحت شرایط تغییر اقلیم شدید، زمان و شدت پاسخ آب زیرزمینی به بارش دچار تغییر و ناهمخوانی می‌شود. همچنین، ارتباط ضعیف بین SSMI و SGI در هر دو سناریو تأیید می‌کند که تغییرات کوتاه‌مدت رطوبت خاک لزوماً بازتاب مستقیمی بر وضعیت منابع آب زیرزمینی نیست. به طور کلی، نتایج این پژوهش چند نکته کلیدی را آشکار می‌سازد:

شاخص SGI نسبت به سایر شاخص‌ها حساسیت بیشتری به تغییرات اقلیمی و روندهای بلندمدت دارد و می‌تواند به عنوان شاخصی قابل اعتماد برای پایش وضعیت منابع آب زیرزمینی به کار رود.

در شرایط اقلیمی SSP5-8.5، روابط خطی بین شاخص‌های خشکسالی تضعیف می‌شوند و پیچیدگی‌های غیرخطی و فرآیندهای تاخیری نقش پررنگ‌تری پیدا می‌کنند.

استفاده از الگوریتم جنگل تصادفی در پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی و هیدرولوژیکی، امکان برآورد نسبتاً دقیق شاخص‌های خشکسالی و تحلیل پویایی‌های آن‌ها را فراهم کرده است، که این خود نوآوری مهمی در مقایسه با مطالعات پیشین محسوب می‌شود.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش با بهره‌گیری از الگوریتم جنگل تصادفی، متغیرهای کلیدی شامل بارش، رطوبت خاک و سطح آب زیرزمینی برای دوره آینده (۲۰۲۶–۲۰۵۰) تحت دو سناریوی اقلیمی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 پیش‌بینی شدند. ارزیابی عملکرد مدل نشان داد که الگوریتم مورد استفاده از دقت بالایی در بازتولید داده‌های ورودی برخوردار است؛ به‌طوری‌که در مرحله تست، ضریب همبستگی بیش از ۰/۹۰، شاخص نش–ساتکلیف بالاتر از ۰/۸۰ و خطای نرمال‌شده ریشه میانگین مربعات کمتر از ۰/۱۹ به‌دست آمد. این نتایج بیانگر اعتبار بالای داده‌های پیش‌بینی‌شده برای استفاده در محاسبه شاخص‌های خشکسالی بود.

یافته‌ها نشان داد که شاخص SGI در هر دو سناریو روند افزایشی معناداری دارد (شیب ۰/۰۷۸ در SSP2-4.5 و ۰/۰۵۲ در SSP5-8.5، که نشان‌دهنده تاب‌آوری نسبی منابع آب زیرزمینی در برابر تغییرات اقلیمی است؛ هرچند شدت این روند در سناریوی شدیدتر ضعیف‌تر گزارش شد. شاخص SPI در هر دو سناریو روند معناداری نشان نداد، در حالی‌که شاخص SSMI نیز فاقد روند مشخص و معنادار بود. از منظر همبستگی، در سناریوی SSP2-4.5 بیشترین همبستگی بین SPI و SGI پیش‌بینی می‌شود (p = ۰/۰۰۹، r = ۰/۵۱) که نشان‌دهنده واکنش نسبتاً هم‌راستای سطح آب زیرزمینی به تغییرات بارش است. اما در سناریوی SSP5-8.5، این همبستگی نه‌تنها کاهش یافت بلکه به‌صورت منفی و غیرمعنادار گزارش شد (۰/۳۵ = p، ۰/۲- = r)، که بیانگر پیچیدگی و ناپایداری روابط هیدرو–اقلیمی در شرایط گرمایش شدید است. همچنین، همبستگی بین SSMI و SGI در هر دو سناریو ضعیف و فاقد معناداری بود که نشان می‌دهد تغییرات کوتاه‌مدت رطوبت خاک بازتاب مستقیمی بر رفتار آب زیرزمینی ندارد.

به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان داد که در سناریوی SSP2-4.5، روابط بین شاخص‌های خشکسالی پایدارتر و معنادارتر هستند، در حالی‌که در سناریوی SSP5-8.5 احتمال خشکسالی‌های مفرط و تغییرات ناگهانی‌تر در چرخه رطوبتی منطقه افزایش خواهد یافت. این امر بیانگر ضرورت بازنگری در مدیریت منابع آب زیرزمینی و توجه به سازوکارهای غیرخطی و تأخیری در تحلیل خشکسالی‌هاست. نوآوری این پژوهش در ترکیب پیش‌بینی داده‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی با الگوریتم یادگیری ماشین (RF) و استفاده از آن در تحلیل هم‌زمان سه شاخص SPI، SSMI و SGI است که می‌تواند الگویی برای مطالعات مشابه در سایر دشت‌های ایران و مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان فراهم آورد.

منابع

Abou Zaki, N., Torabi Haghighi, A., Rossi, P. M., Tourian, M. J., Bakhshaee, A., & Kløve, B. (2020). Evaluating impacts of irrigation and drought on river, groundwater and a terminal wetland in the Zayanderud Basin, Iran. Water, 12(5), 1302. https://doi.org/10.3390/w12051302

Ahmadi H, Aminnejad B, Sabatsany H (2023) Application of machine learning ensemble models for rainfall prediction. Acta Geophysica 71(4): 1775-1786. https://doi.org/10.1007/s11600-022-00952-y

Ait Dhmane, L., Saidi, M. E., Moustadraf, J., Rafik, A., & Hadri, A. (2024). Spatiotemporal characterization and hydrological impact of drought patterns in northwestern Morocco. Frontiers in Water, 6, 1463748. https://doi.org/10.3389/frwa.2024.1463748

Alley, W. M., Clark, B. R., Ely, D. M., & Faunt, C. C. (2018). Groundwater development stress: Global-scale indices compared to regional modeling. Groundwater, 56(2), 266-275. https://doi.org/10.1111/gwat.12578

Ashraf, S., Nazemi, A., & AghaKouchak, A. (2021). Anthropogenic drought dominates groundwater depletion in Iran. Scientific reports, 11(1), 9135. https://doi.org/10.1038/s41598-021-88522-y

Bhaga, T. D., Dube, T., Shekede, M. D., & Shoko, C. (2020). Impacts of climate variability and drought on surface water resources in Sub-Saharan Africa using remote sensing: A review. Remote Sensing, 12(24), 4184. https://doi.org/10.3390/rs12244184

Bloomfield, J. P., & Marchant, B. P. (2013). Analysis of groundwater drought building on the standardised precipitation index approach. Hydrology and Earth System Sciences, 17(12), 4769-4787. https://doi.org/10.5194/hess-17-4769-2013

Breiman, L. (2001). Random forests. Machine Learning, 45(1), 5–32. https://doi.org/10.1023/A:1010933404324

Cutler, D. R., Edwards Jr, T. C., Beard, K. H., Cutler, A., Hess, K. T., Gibson, J., & Lawler, J. J. (2007). Random forests for classification in ecology. Ecology, 88(11), 2783–2792. https://doi.org/10.1890/07-0539.1

Data Partnership. (2025). Climate and Drought Indices in Python — climate_indices 2.0.1. Data Partnership Faramarzpour, M., Saremi, A., Khosrojerdi, A., & Babazadeh, H. (2024). Evaluating machine learning models in predicting GRI drought indicators (case study: Ajabshir area). Applied Water Science, 14(9), 208. https://doi.org/10.1007/s13201-024-02224-0

Guttman, N. B. (1999). Accepting the standardized precipitation index: a calculation algorithm 1. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 35(2), 311-322. https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1999.tb03592.x

Hao, Z., & AghaKouchak, A. (2014). A nonparametric multivariate multi-index drought monitoring framework. Journal of Hydrometeorology, 15(1), 89-101. https://doi.org/10.1175/JHM-D-12-0160.1

Hao, Z., & Singh, V. P. (2015). Drought characterization from a multivariate perspective: A review. Journal of Hydrology, 527, 668-678. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.05.031

Hunt, E. D., Hubbard, K. G., Wilhite, D. A., Arkebauer, T. J., & Dutcher, A. L. (2009). The development and evaluation of a soil moisture index. International Journal of Climatology, 29(5), 747. https://doi.org/10.1002/joc.1749

Hussain, A., Niaz, R., Al-Rezami, A. Y., Mohamed Omer, A., S. Al-Duais, F., & MA Almazah, M. (2025). Application of random forest for identification of an appropriate model for predicting meteorological drought. Advances in Meteorology, 2025(1), 7674140. https://doi.org/10.1155/adme/7674140

Javadinejad, S., Dara, R., & Jafary, F. (2020). Evaluation of hydro-meteorological drought indices for characterizing historical and future droughts and their impact on groundwater. Resources Environment and Information Engineering, 2(1), 71-83. https://doi.org/10.25082/REIE.2020.01.003

Karamuz, E., Bogdanowicz, E., Senbeta, T. B., Napiórkowski, J. J., & Romanowicz, R. J. (2021). Is it a drought or only a fluctuation in precipitation patterns?—Drought reconnaissance in Poland. Water, 13(6), 807. https://doi.org/10.3390/w13060807

Kashani, A., & Safavi, H. R. (2025). Assessing groundwater drought in Iran using GRACE data and machine learning. Scientific Reports, 15(1), 14671. https://doi.org/10.1038/s41598-025-99342-9

Lalika, C., Mujahid, A. U. H., James, M., & Lalika, M. C. (2024). Machine learning algorithms for the prediction of drought conditions in the Wami River sub-catchment, Tanzania. Journal of Hydrology: Regional Studies, 53, 101794. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101794

Li, B., & Rodell, M. (2015). Evaluation of a model-based groundwater drought indicator in the conterminous US. Journal of Hydrology, 526, 78-88. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.09.027

Liaw, A., & Wiener, M. (2002). Classification and regression by randomForest. R news, 2(3), 18-22.

Mardian, J. (2022). The role of spatial scale in drought monitoring and early warning systems: a review. Environmental Reviews, 30(3), 438-459. https://doi.org/10.1139/er-2021-0102

Mathew, Sheba & K, Smitha. (2025). Prediction of Groundwater Storage under Climate Change Scenarios Using Meteorological and Hydrological Drought. International Journal Of Scientific Research In Engineering & Technology. 116-124. https://doi.org/10.59256/ijsreat.20250504C21

McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology (Vol. 17, No. 22, pp. 179-183).

Nigatu, Z. M., You, W., & Melesse, A. M. (2024). Drought dynamics in the Nile River basin: Meteorological, agricultural, and groundwater drought propagation. Remote Sensing, 16(5), 919. https://doi.org/10.3390/rs16050919

Rodriguez-Galiano, V. F., Ghimire, B., Rogan, J., Chica-Olmo, M., & Rigol-Sanchez, J. P. (2012). An assessment of the effectiveness of a random forest classifier for land-cover classification. ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing, 67, 93-104. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2011.11.002

Ruwanza, S., Thondhlana, G., & Falayi, M. (2022). Research progress and conceptual insights on drought impacts and responses among smallholder farmers in South Africa: a review. Land, 11(2), 159. https://doi.org/10.3390/land11020159

Seo, J. Y., & Lee, S. I. (2023). Probabilistic evaluation of drought propagation using satellite data and deep learning model: from precipitation to soil moisture and groundwater. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 16, 6048-6061. https://doi.org/10.1109/JSTARS.2023.3290685

Shah, D., & Mishra, V. (2020). Drought onset and termination in India. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 125(15), e2020JD032871. https://doi.org/10.1029/2020JD032871

Shaikh, B. Y., Parekh, A., & Gnanaseelan, C. (2024). Understanding satellite-derived groundwater dynamics and its association with hydrological processes over India during excess and deficit monsoon years. Hydrological Processes, 38(8), e15255. https://doi.org/10.1002/hyp.15255

Svoboda, M., Hayes, M., & Wood, D. (2012). Standardized precipitation index: user guide. https://public.wmo.int/en/resources/library/standardized-precipitation-index-user-guide

Swain, S., Mishra, S. K., Pandey, A., & Kalura, P. (2022). Inclusion of groundwater and socio-economic factors for assessing comprehensive drought vulnerability over Narmada River Basin, India: A geospatial approach. Applied Water Science, 12(2), 14. https://doi.org/10.1007/s13201-021-01529-8

Thomas, B. F., Famiglietti, J. S., Landerer, F. W., Wiese, D. N., Molotch, N. P., & Argus, D. F. (2017). GRACE groundwater drought index: Evaluation of California Central Valley groundwater drought. Remote Sensing of Environment, 198, 384-392. https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.026

Torabi Haghighi, A., Abou Zaki, N., Rossi, P. M., Noori, R., Hekmatzadeh, A. A., Saremi, H., & Kløve, B. (2020). Unsustainability syndrome—from meteorological to agricultural drought in arid and semi-arid regions. Water, 12(3), 838. https://doi.org/10.3390/w12030838

Tyralis, H., Papacharalampous, G., & Langousis, A. (2019). A brief review of random forests for water scientists and practitioners and their recent history in water resources. Water, 11(5), 910. https://doi.org/10.3390/w11050910

Vij, P., & Tiwari, A. (2025). AI-Driven Drought Monitoring: Advanced Machine Learning Techniques for Early Prediction. In SHS Web of Conferences (Vol. 216, p. 01024). EDP Sciences. https://doi.org/10.1051/shsconf/202521601024

Vonk, M. (2024). SPEI: a simple Python package to calculate and visualize drought indices (v0. 4.0). Python. doi, 10. https://doi.org/10.5281/zenodo.10816741

Wilhite, D. A. (2016). Drought as a natural hazard: concepts and definitions. In Droughts (pp. 3-18). Routledge.

Assessment of Climate Change Impacts on Drought Indices and Their Relationship with Groundwater Resources Using a Machine Learning Approach in the Kermanshah Plain

Kobra Soltani [1], Jafar Masoompour Samakosh [2]*

Ph.D. Graduate in Climatology, Razi University, Faculty of Literature and Humanities, Kermanshah, Iran.

Associate Professor of Climatology, Razi University, Faculty of Literature and Humanities, Kermanshah, Iran.

* Corresponding author: j.masoompour@razi.ac.ir

Abstract

Drought, as one of the most critical challenges in water resources management in arid and semi-arid regions, requires a multidimensional analysis from meteorological, agricultural, and hydrological perspectives. In this study, the Standardized Precipitation Index (SPI), the Standardized Soil Moisture Index (SSMI), and the Standardized Groundwater Index (SGI) were evaluated in the Kermanshah Plain during the period 2026–2050 under two climate scenarios, SSP2-4.5 and SSP5-8.5. Precipitation, soil moisture, and groundwater level variables were predicted using the Random Forest algorithm, and the drought indices were then calculated based on the estimated data. Model evaluation indicated very high predictive accuracy ($R \geq 0.90$, $NSE \geq 0.80$, $NRMSE \leq 0.19$). Trend results showed that SGI exhibited a significant increasing trend in both scenarios (slope 0.078 in SSP2-4.5 and 0.052 in SSP5-8.5), while SPI and SSMI showed no significant trends. In terms of correlations, the strongest relationship was observed in SSP2-4.5 between SPI and SGI

($r = 0.51$, $p < 0.01$), whereas in SSP5-8.5 this relationship was negative and not significant. The correlations between SSMI and SGI were weak and insignificant in both scenarios. These findings indicate that under the moderate scenario, the relationships among the indices are more stable and reliable, whereas under the more severe scenario, drought intensity and variability are greater, leading to increased uncertainty in predicting moisture cycles.

Keywords: SPI, SSMI, SGI, Random Forest, Kermanshah Plain, CMIP6.

تحلیل قوانین تغییرات اقلیم با رویکرد مقایسه ای المان و سوئد

مهرناز مرزی[1]
۱- دکترای مدیریت محیط زیست- حقوق محیط زیست
mehrnazmarzi005@gmail.com

چکیده

تغییرات اقلیمی به عنوان یکی از چالش‌های مهم قرن بیست و یکم، تأثیرات گسترده‌ای بر ابعاد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی دارد. این مطالعه با روش کتابخانه‌ای و تحلیل تطبیقی، سیاست‌ها و اقدامات دو کشور پیشرو اروپایی، آلمان و سوئد، در مدیریت پایدار اقلیمی را بررسی کرده است. نتایج نشان می‌دهد آلمان با تمرکز بر فناوری‌های نوین انرژی تجدیدپذیر و قوانین الزام‌آور، و سوئد با تاکید بر اقتصاد کم‌کربن و ابزارهای مالیاتی، موفق به کاهش قابل توجه انتشار گازهای گلخانه‌ای شده‌اند. انسجام سیاستی، تعهدات بین‌المللی و همکاری بین‌بخشی از عوامل کلیدی موفقیت این کشورها است که می‌تواند الگویی مناسب برای کشورهای در حال توسعه باشد.

کلمات کلیدی: تغییرات اقلیمی، قوانین بین المللی ، سیاست گذاری زیست محیطی، آلمان، سوئد.

مقدمه

تغییرات اقلیمی به عنوان یکی از چالش‌های مهم قرن بیست و یکم، تأثیرات گسترده‌ای بر ابعاد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی دارد. این مطالعه با روش کتابخانه‌ای و تحلیل تطبیقی، سیاست‌ها و اقدامات دو کشور پیشرو اروپایی، آلمان و سوئد، در مدیریت پایدار اقلیمی را بررسی کرده است. نتایج نشان می‌دهد آلمان با تمرکز بر فناوری‌های نوین انرژی تجدیدپذیر و قوانین الزام‌آور، و سوئد با تاکید بر اقتصاد کم‌کربن و ابزارهای مالیاتی، موفق به کاهش قابل توجه انتشار گازهای گلخانه‌ای شده‌اند. انسجام سیاستی، تعهدات بین‌المللی و همکاری بین‌بخشی از عوامل کلیدی موفقیت این کشورها است که می‌تواند الگویی مناسب برای کشورهای در حال توسعه باشد

مقدمه و اهمیت موضوع

در دنیای امروز، پیشرفت‌های علمی و فناوری به صورت روزافزون در حال تحول و تغییر ساختارهای مختلف زندگی انسانی است. یکی از حوزه‌های مهم که تأثیر قابل توجهی بر جامعه و توسعه کشورها دارد، بحث مدیریت و بهره‌وری منابع است. به ویژه در زمینه‌های اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی، استفاده بهینه از منابع محدود، نقش کلیدی در ارتقاء کیفیت زندگی افراد و توسعه پایدار دارد. این مقاله به بررسی اهمیت بهره‌وری منابع و راهکارهای ارتقاء آن می‌پردازد و تلاش می‌کند تا با نگاهی تحلیلی، عوامل مؤثر و چالش‌های موجود در این حوزه را مورد بررسی قرار دهد.

استفاده بهینه از منابع نه تنها موجب افزایش بازدهی فعالیت‌ها می‌شود بلکه باعث کاهش هزینه‌ها، صرفه‌جویی در انرژی و کاهش اثرات زیست‌محیطی نیز می‌گردد. با توجه به محدودیت‌های منابع طبیعی و افزایش جمعیت جهان، ضرورت مدیریت صحیح منابع بیش از پیش احساس می‌شود. به همین دلیل، این مقاله ابتدا به تعاریف و مفاهیم کلیدی مربوط به بهره‌وری منابع می‌پردازد و سپس به بررسی روش‌ها و تکنیک‌های بهبود آن در بخش‌های مختلف می‌پردازد.

عوامل مؤثر بر بهره‌وری منابع و چالش‌ها

بهره‌وری منابع تحت تأثیر مجموعه‌ای از عوامل داخلی و خارجی قرار دارد که شناخت دقیق آنها می‌تواند زمینه‌ساز تصمیم‌گیری‌های بهتر و برنامه‌ریزی‌های کارآمدتر باشد. از مهم‌ترین این عوامل می‌توان به مدیریت صحیح، فناوری‌های نوین، آموزش و فرهنگ سازمانی، سیاست‌های دولت و شرایط اقتصادی اشاره کرد.

یکی از عوامل کلیدی، مدیریت منابع است. مدیریت کارآمد، استفاده هوشمندانه از امکانات و تخصیص بهینه منابع انسانی، مالی و طبیعی را تضمین می‌کند. به طور مثال، در بخش کشاورزی، مدیریت صحیح منابع آبی نقش بسیار مهمی در افزایش بهره‌وری دارد. به همین ترتیب، در صنایع مختلف، بهره‌مندی از فناوری‌های مدرن می‌تواند باعث افزایش سرعت تولید و کاهش هدررفت مواد اولیه شود.

فناوری نوین به عنوان یک محرک قوی در بهبود بهره‌وری شناخته می‌شود. استفاده از ابزارهای دیجیتال، اتوماسیون و سیستم‌های هوشمند موجب می‌شود تا فرآیندهای تولید بهینه‌تر و با کیفیت بالاتری انجام شوند. همچنین آموزش کارکنان و ایجاد فرهنگ سازمانی مناسب، باعث می‌شود تا افراد به درک بهتری از اهمیت بهره‌وری برسند و نقش فعال‌تری در استفاده بهینه از منابع داشته باشند.

با این حال، چالش‌هایی نیز در مسیر افزایش بهره‌وری منابع وجود دارد. از جمله این چالش‌ها می‌توان به محدودیت‌های مالی، ضعف زیرساخت‌ها، مقاومت در برابر تغییرات و عدم هماهنگی بین بخش‌های مختلف اشاره کرد. این مشکلات گاهی باعث می‌شوند که برنامه‌های بهبود بهره‌وری به صورت کامل اجرا نشوند یا نتایج مطلوبی نداشته باشند

راهکارها برای بهبود بهره‌وری منابع

برای افزایش بهره‌وری منابع و مواجهه با چالش‌های موجود، لازم است مجموعه‌ای از راهکارها و سیاست‌های عملی و کاربردی اتخاذ شود. این راهکارها باید در سطوح مختلف مدیریتی، سازمانی و حتی ملی به کار گرفته شوند تا تأثیرگذار باشند.

یکی از مهم‌ترین اقدامات، توسعه فناوری‌های نوین و سرمایه‌گذاری در تحقیق و توسعه است. با توجه به سرعت پیشرفت فناوری‌ها، استفاده از فناوری‌های هوشمند، سیستم‌های اتوماسیون و دیجیتال‌سازی فرآیندها می‌تواند باعث کاهش هزینه‌ها

و افزایش کیفیت شود. همچنین، فراهم آوردن بسترهای آموزشی برای کارکنان و مدیران در زمینه مهارت‌های فنی و مدیریتی، نقش کلیدی در بهبود بهره‌وری دارد.

توسعه فرهنگ بهره‌وری در سازمان‌ها از دیگر راهکارهای مهم است. ایجاد انگیزه در کارکنان، پاداش‌دهی مناسب به افرادی که بهره‌وری بالایی دارند و ارتقای سطح آگاهی درباره اهمیت استفاده بهینه از منابع، از جمله اقداماتی است که می‌تواند به بهبود عملکرد کمک کند. این فرهنگ باید در تمامی سطوح سازمانی نهادینه شود تا تغییرات پایدار و مؤثر باشند.

همچنین، همکاری و هماهنگی میان بخش‌های مختلف، مانند دولت، بخش خصوصی و نهادهای آموزشی، می‌تواند در اجرای سیاست‌های بهره‌وری بسیار مؤثر باشد. سیاست‌گذاری‌های حمایتی و ایجاد چارچوب‌های قانونی مناسب به گونه‌ای که بهره‌گیری از منابع به شکل بهینه و پایدار تضمین شود، از جمله وظایف مهم دولت‌هاست.

در نهایت، توجه به مسائل زیست‌محیطی و پایداری منابع، از جمله راهکارهای اساسی است. بهره‌وری منابع باید به گونه‌ای باشد که منابع طبیعی برای نسل‌های آینده حفظ شود و فشارهای ناشی از مصرف بی‌رویه کاهش یابد. استفاده از منابع تجدیدپذیر، بازیافت و کاهش ضایعات نمونه‌هایی از این رویکرد پایدار به شمار می‌آیند.

نتیجه گیری

در پایان، می‌توان گفت که بهره‌وری منابع یکی از ارکان حیاتی توسعه پایدار و رشد اقتصادی هر کشور به شمار می‌رود. چالش‌های پیش‌رو، از جمله محدودیت منابع طبیعی، افزایش تقاضا و تغییرات اقلیمی، ضرورت توجه ویژه به استفاده بهینه از منابع را بیش از پیش آشکار کرده‌اند. بهره‌وری بالا نه تنها باعث کاهش هزینه‌ها و افزایش کیفیت محصولات و خدمات می‌شود، بلکه می‌تواند به حفظ محیط زیست و ارتقای کیفیت زندگی جوامع نیز کمک کند.

تحقیقات و بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که بهره‌وری منابع نیازمند رویکردی جامع و چندبعدی است که ترکیبی از فناوری‌های نوین، آموزش و فرهنگ‌سازی، سیاست‌گذاری‌های درست و همکاری بین بخشی را شامل می‌شود. بدون توجه به هر یک از این عوامل، دستیابی به اهداف بهره‌وری به سختی امکان‌پذیر خواهد بود.

چشم‌انداز آینده بهره‌وری منابع باید مبتنی بر توسعه فناوری‌های پایدار، حمایت از نوآوری و تقویت زیرساخت‌های آموزشی و پژوهشی باشد. همچنین، توجه به تغییرات اقلیمی و ضرورت حفظ محیط زیست باید در تمامی برنامه‌ها و سیاست‌ها جایگاه ویژه‌ای داشته باشد تا بتوان منابع محدود را برای نسل‌های بعدی نیز حفظ کرد.

در نهایت، بهبود بهره‌وری منابع نه تنها مسئولیتی ملی بلکه تعهدی جهانی است که همکاری و همگرایی کشورهای مختلف را می‌طلبد. تنها از طریق این همکاری‌ها می‌توان به توسعه پایدار واقعی دست یافت و آینده‌ای روشن‌تر و بهتر برای همه فراهم آورد.

منابع و ماخذ

۱-Biermann, F., & Pattberg, P. (۲۰۲۵). The fall and rise of global environmental governance. Ambio.

۲-Chean, X. M., Sharma, A., & Liu, H. (۲۰۲۳). The impact of climate change on environmental sustainability and human mortality. Environments, ۱۰(۱۰), .۱۶۵

۳-Craig, R. K. (۲۰۱۹). Five principles for climate change adaptation law.

۴-Esty, D. C. (۲۰۰۸). Rethinking global environmental governance to deal with climate change: The multiple logics of global collective action. American Economic Review, ۹۸(۲), ۱۱۶–.۱۲۱

۵-Gonzales, R., & Peters, A. (۲۰۱۸). Environmental taxes reforms and the transition to a green economy: A comparative study of OECD countries. Journal of Environmental Policy and Planning, ۲۰(۴), ۴۳۷–.۴۵۲

-Intergovernmental Panel on Climate Change. (۲۰۲۱). Climate Change ۲۰۲۱: The physical science basis. Cambridge University Press. https://doi.org/۹۷۸۱۰۰۹۱۵۷۸۹۶/۱۰.۱۰۱۷

پیامدهای سناریوی تغییر آب‌وهوا برکشت گندم در منطقه اردبیل با استفاده از مدل‌های LARS-WG و CROPWAT

بهروز سبحانی[۱]

۱-استاد اقلیم‌شناسی گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

sobhani@uma.ac.ir

چکیده

تغییر اقلیم در سراسر جهان به‌صورت افزایش دما و تغییر الگوی بارندگی مشاهده می‌شود. این تغییرات بخش کشاورزی را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد، ازجمله آن اثر افزایش دما، تبخیر و تعرق گیاه را افزایش داده و گیاه را با تنش آبی در فصل رشد روبرو می‌سازد. در پژوهش حاضر که تأثیر تغییر اقلیم بر رشد محصول گندم در منطقه اردبیل با استفاده از نرم‌افزارهای LARS-WG انجام‌گرفته شده است، داده‌های مربوط به هواشناسی از سازمان هواشناسی کشور اخذ گردید و پس از صحت سنجی و ساختن سناریوهای متفاوت وارد نرم‌افزار SPSS نموده و با داده‌های اخذشده از سازمان هواشناسی همبستگی گرفته شد و سناریویی که با داده واقعی همبستگی بیشتری داشت به‌عنوان سناریوی تحقیق پذیرفته گردید. با استفاده از مدل LARS داده‌ها برای دو دوره ۲۰۱۶ تا ۲۰۴۵ و ۲۰۴۶ تا ۲۰۶۵ تولید گردید که نتیجه این تولید داده‌ها افزایش دما و کاهش بارش در ایستگاه موردمطالعه بود. تولیدات این مدل که شامل دمای حداقل و حداکثر، بارش و ساعات آفتاب است وارد مدل CROPWAT گردید، این مدل تبخیر و تعرق و نیاز آبی گندم را در دوره‌های آتی برآوردمی نماید که نتایج آن حاکی از افزایش تبخیر وتعرق و نیاز آبی گندم در دوره‌های آتی را نشان داد. طبق برآورد مدل CROPWAT در آینده گیاه گندم در منطقه موردمطالعه با تنش آبی روبرو خواهد شد.

کلید واژه‌ها: اردبیل، تغییر اقلیم، گندم، مدل LARS-WG و CROPWAT

مقدمه

تغییر اقلیم یکی از مهم‌ترین چالش‌هایی است که بخش‌های مختلف زندگی انسان را درروی زمین تحت تأثیر قرار داده است (زرعکاری و همکاران، ۱۳۹۲). دراین‌ارتباط، ارزیابی تأثیرات تغییر اقلیم بر کشاورزی یک نیاز ضروری است که یکی از مؤلفه‌های تأثیرگذار بر بازده محصولات کشاورزی، شناخت دقیق و صحیح از نیاز آبی است. نیاز آبی ازیک‌طرف به مقدار تبخیر و تعرق گیاه و از طرف دیگر به باران مؤثر بستگی دارد (سبحانی و گل دوست،۱۳۹۵). کشور ایران در ردیف کشورهای

با خطرپذیری بالای تغییر اقلیم قرار دارد. واقع‌شدن ایران در منطقه خشک جهان، محدودیت منابع آب و به‌تبع آن افزایش دما، وابستگی تولیدات کشاورزی به آبیاری، لزوم توجه به موضوع تغییر اقلیم را اجتناب‌ناپذیر کرده است (سبحانی و همکاران، ۱۳۹۹). با توجه به این که منطقه موردمطالعه از قطب‌های کشاورزی و دامپروری استان اردبیل است و هرگونه تغییر در اقلیم، زندگی بیشتر ساکنان این منطقه را به مخاطره خواهد انداخت و باعث تغییر کاربری مزارع، مراتع و از بین رفتن تولیدات روستایی خواهد داشت. تحقیقات متعددی در ایران و جهان به دلیل اهمیت موضوع به‌عمل‌آمده که در ذیل به بعضی از آن‌ها اشاره می‌شود: مطالعه اثر تغییر اقلیم بر ویژگی‌های رشد و عملکرد گندم دیم، نشان داد که تأثیر شرایط اقلیمی بر کاهش عملکرد گندم دیم در ایران قابل‌توجه است و این تأثیر که به دلیل افزایش درجه حرارت و کاهش میزان بارندگی بروز نموده و در میانگین کاهش عملکردی معادل ۲۰ تا ۲۸ درصد را به ترتیب برای سال‌های ۱۴۰۴ تا ۱۴۲۹ به همراه خواهد داشت (نصیری و کوچکی، ۱۳۸۵). در شهرستان مشهد با استفاده از مدل LARS-WG ارزیابی شرایط تغییر اقلیم و اثر آن بر تاریخ تقویم زراعی کشت گندم بررسی و نتایج نشان داد که بهترین زمان کشت گندم در مشهد اواسط آبان ماه است و تاریخ رسیدگی و برداشت نیمه دوم خردادماه است (بخش کلارستاقی و همکاران، ۱۳۹۲). در شهرستان بهشهر رخداد تغییر اقلیم و تأثیر آن بر زمان کاشت در طول دوره‌ی رشد و نیاز آبی گندم زمستانه بررسی و نتایج نشان داد که درجه حرارت در همه‌ی ماه‌های سال افزایش بین ۱ تا ۲ درجه سانتی‌گراد تا پایان سال ۲۱۰۰ دارد (سلیمانی ننادگانی و همکاران، ۱۳۹۱). در شهرستان اهواز با استفاده از مدل AOGCM33 ارزیابی ریسک تأثیرات تغییر اقلیم بر عملکرد و فنولوژی رشد گندم انجام شد و نتایج نشان داد که با قبول ریسک ۱۰ درصد عملکرد در دوره آتی ۲۰۱۵ تا ۲۰۴۵ و ۲۰۷۰ تا ۲۱۰۰ نسبت به دوره مبنا به ترتیب ۴ و ۱۵ درصد کاهش می‌یابد (دلقندی و همکاران، ۱۳۹۳). در ایستگاه سرا رود کرمانشاه بررسی رخداد تغییر اقلیم و تأثیر آن بر زمان کاشت و طول دوره‌ی رشد گندم دیم به کمک مدل LARS-WG تحت سناریوی RCP4.5 در سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۳۹ شبیه‌سازی شد به این نتیجه رسیدند که تحت شرایط تغییر اقلیم، در آینده طول دوره رشد گندم ۲۵ روزکوتاه تر خواهد شد (محمدی همکاران، ۱۳۹۳). در شمال غرب ایران ارتباط شاخص اقلیمی NAO با مقادیر میانگین، حداکثر و حداقل دمای ماهانه در دوره آماری ۱۹۸۷ تا ۲۰۰۵ بررسی و نتایج نشان داد که پدیده NAO در همه ایستگاه‌ها با دمای هوا همبستگی منفی دارد (سبحانی و همکاران، ۱۳۹۳). مطالعه مدل فضایی تولید گندم دیم در استان کردستان با ریز پهنه‌بندی اقلیم کشاورزی در ۲۲ ایستگاه سینوپتیک بررسی و نتایج تحقیق نشان داد که بیشترین مقدار عملکرد در منطقه کامیاران، بانه و مریوان و کمترین عملکرد در منطقه سنندج و بیجار است (قادری و همکاران، ۱۳۹۷). در شهرستان لنجان با استفاده از روش‌های چند معیاره، مکان‌یابی کشت برنج بررسی و نتایج حاصل نشان داد که دما و ارتفاع به ترتیب نقش مؤثر در مراحل رشد برنج دارد (سبحانی و همکاران، ۱۳۹۹). در دشت ایندوگیتی هندوستان بر اساس متغیرهای دما و بارش ارزیابی تأثیر تغییرات آب‌وهوا درکشت محصولات گندم و برنج در طول سال‌های ۲۰۷۰ تا ۲۱۰۰ با استفاده از سناریوهای A2 و B2 مطالعه و نتایج نشان داد که به علت افزایش دما و کاهش بارش در منطقه، طول دوره رشد محصولات فوق کوتاه‌تر و عملکرد محصول کمتر خواهد شد (Zhacharis et al, 2014;

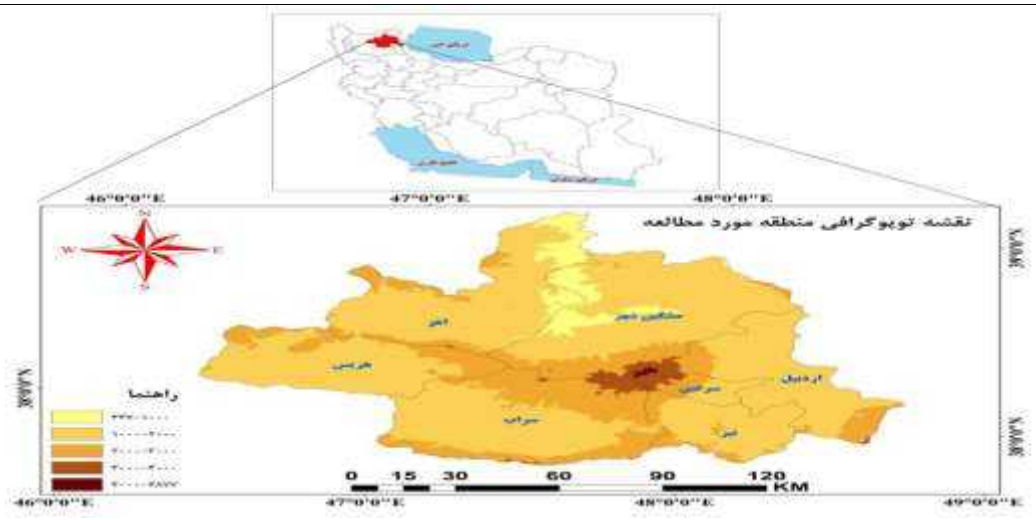
1- Atmosphere-Ocean General circulation Model

(Shrestha et al, 2013. (Naresh kumar et al, 2011) بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر بهره‌وری محصولات زراعی در نواحی ساحلی غرب هند انجام و نتایج نشان داد که محصولات کشت‌شده در منطقه باید بر اساس شرایط جوی و مقدار بارش منطقه کشت شود تا نیاز آبی آن در طول دوره رشد تأمین گردد. نتایج تحقیق در جنوب چین نیز تأثیر فرین دمایی باعث کاهش حدود ۰/۱۴ درصدی عملکرد محصول شده است (Zhang et al, 2016). درنتیجه تغییرات مقدار بارش و دما در عملکرد محصول گندم و تاریخ کشت مؤثر است (Zhang et al, 2016 and Floht et al, 2017)؛ بنابراین، اگر توزیع بارش در طول دوره رشد گندم منظم باشد و نیاز آبی لازم برای کشت آن تأمین شود شرایط برای کاشت گندم مناسب است که این مورد به‌وضوح در نواحی از کانزاس، داکوتای شمالی، دشت‌های بزرگ امریکا و بوینوس آیرس آرژانتین دیده می‌شود (Hatfied and Dold, 2018; Pol and Binyamin, 2014). لذا نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که بهینه‌سازی دوره کاشت محصول یکی از مهم‌ترین راهبردهای انعطاف‌پذیری آب‌وهوا برای بهبود عملکرد زراعی است (Sandhu et al, 2019). اهداف این تحقیق ارزیابی کار آیی مدل‌های LARS-WG و CROPWAT در موردبررسی اثرات تغییر اقلیم در مراحل کشت گندم در منطقه اردبیل است.

روش تحقیق

موقعیت جغرافیایی

منطقه موردمطالعه در دامنه شرقی کوه سبلان، در دشت اردبیل واقع در مرکز استان اردبیل است. موقعیت جغرافیایی منطقه در عرض جغرافیایی ۳۷ درجه و ۵۶ دقیقه تا ۳۸ درجه ۲۳ دقیقه و در طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۲۳ دقیقه تا ۴۷ درجه ۴۱ دقیقه واقع است (شکل، ۱). مواد سطح تشکیل‌دهنده دشت اردبیل آبرفت حاصل از جریان سطحی رودخانه قره‌سو، بالیخلی چای و سایر شعبات متعدد آن است. شهر اردبیل و روستاهای اطراف آن در این منطقه استقراریافته‌اند، به سبب وجود خاک‌های نرم و رسوبی و آتش‌فشانی از نواحی عمده کشاورزی استان محسوب می‌شود که بیشتر کشت غالب گندم است (جغرافیای طبیعی استان اردبیل، ۱۳۹۴). پست‌ترین نقطه منطقه حوالی پل روستای سامیان ۱۲۹۴ متر از سطح دریاهای آزاد و مرتفع‌ترین منطقه قله سبلان به ارتفاع ۴۸۱۱ متر از سطح دریا است.



داده‌ها

داده‌های موردنیاز برای این تحقیق شامل حداقل دما، حداکثر دما، بارش، باد و ساعات آفتابی به‌صورت روزانه از ایستگاه سینوپتیک اردبیل تهیه و پس از اطمینان از صحت داده‌ها، محاسبه و تجزیه‌وتحلیل داده‌ها توسط نرم‌افزارهای LARS-WG و CROPWAT انجام گردید.

مدل LARS-WG

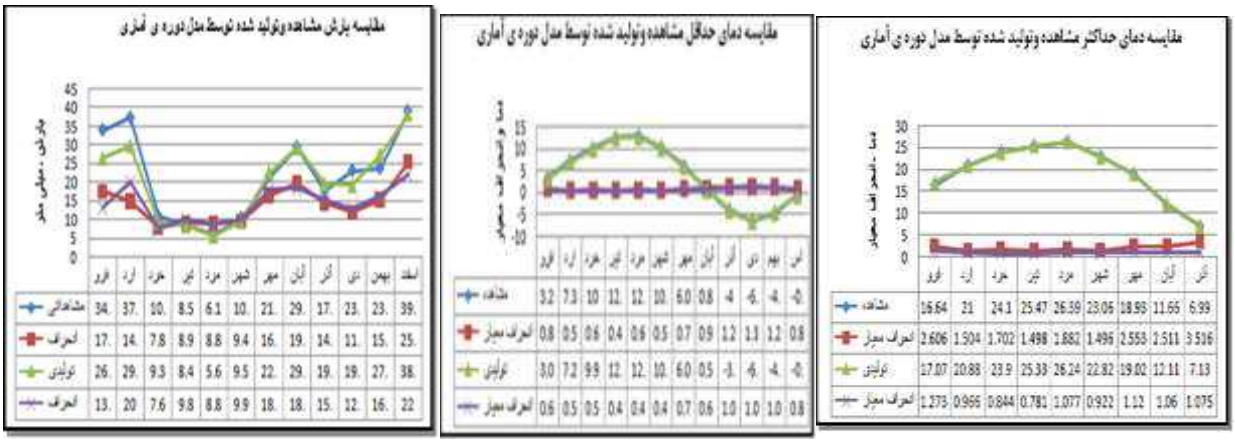
مدل LARS-WG یکی از مولد داده‌های تصادفی وضع هوا است که برای تولید مقادیر بارش، تابش، دمای بیشینه و کمینه روزانه در یک ایستگاه در شرایط آب‌وهوای پایدار و آینده به کار می‌رود (زرعکاری و همکاران، ۱۳۹۲). این مدل توانایی مدل‌سازی دوره گذشته و آینده را دارد. تحلیل مکانی از مهم‌ترین امتیازهای مدل LARS-WG است به‌طوری‌که در این مدل اولین گام تولید سری‌های زمانی روزانه داده‌های آب‌وهوایی در مقیاس ایستگاهی است. در این فرایند داده‌های دیده‌بانی شده برای هر ایستگاه واکاوی و دو فایل دربرگیرنده مشخصه آماری تولید می‌شوند (شمسی‌پور،۱۳۹۲).

مدل CROPWAT

برای برآورد نیاز آبی و بارش موثرگیاه از مدل CROPWAT استفاده گردید. در این نرم‌افزار نیاز آبی گیاه با روش پنمن مانیث محاسبه می‌گردد. روش کار به این صورت است که با وارد نمودن داده‌های حداقل دما، حداکثر دما، درصد رطوبت نسبی، سرعت باد و تعداد ساعات آفتابی مربوط به گیاه موردنظر و همچنین محیط و منطقه و زمان کشت آن می‌توان نیاز آبی گیاه را در مراحل مختلف رشد محاسبه نمایید.

نتایج تحقیق

بررسی مدل LARS-WG از طریق مقایسه داده‌های دوره آماری و داده‌های تولیدشده انجام شد. برای اطمینان از توانایی مدل داده‌های محاسباتی توسط مدل و داده‌های مشاهداتی در ایستگاه‌های موردمطالعه باهم مقایسه شدند. نتایج مقایسه‌ای داده‌های دمای حداقل، دمای حداکثر، بارش و تابش آفتاب در ایستگاه‌های سینوپتیک اردبیل را برای دوره پایه نشان می‌دهد. بر اساس شکل‌های (۲ تا ۴) توانمندی مدل LARS-WG در مدل‌سازی دمای حداقل، دمای حداکثر و تابش در این ایستگاه‌ها کاملاً با داده‌های دیده‌بانی شده مطابقت دارد. میزان انحراف معیار بین عدد ۰/۵ و ۱ است. در مورد بارش این اختلاف با a= ۰/۰۰۵ معنی‌دار نیست. در تحقیقی کار آیی مدل LARS-WG از طریق مقایسه داده‌های دوره آماری و داده‌های تولیدشده مورد تائید است (رحمانی و همکاران، ۱۳۹۴ و احمدی فر و همکاران، ۱۳۹۹).



شکل ۲- مقادیر مشاهده و تولیدشده دمای حداکثر. شکل ۳- مقادیر مشاهده و تولیدشده دمای حداقل شکل

۴- مقادیر مشاهده‌شده و تولیدشده بارش

با توجه به شکل‌های (۱ تا ۳) مقادیر مشاهداتی و شبیه شده دوره نزدیک به هم می‌باشند به‌طوری‌که نمودارهای مشاهداتی و تولیدی این مقادیر در بیشتر مواقع روی‌هم قرار دارند و از طرف دیگر نیز با مقایسه انحراف معیار آمار تولیدی متوجه این نکته می‌گردد که میزان انحراف معیار به‌جز در بارش در بقیه متغیرها اکثراً در اطراف عدد یک می‌باشند. با توجه به عوامل بالا باید بیان کرد که مدل lars توان شبیه‌سازی در دمای حداقل و حداکثر را به‌خوبی دارد. در مورد بارش نیز به قسمت ks و p.value توجه گردید که در جدول ۱ عددهای به‌دست‌آمده اشاره گردیده است

جدول ۱-مقایسه میزان ks و p.value ایستگاه اردبیل

ماه	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
kc	۰/۰۳۰	۰/۰۶۹	۰/۰۵۶	۰/۰۸۱	۰/۰۶۹	۰/۰۹۰	۰/۰۷۶	۰/۰۳۶	۰/۰۶۱	۰/۰۸۴	۰/۱۳۱	۰/۰۲۹
p.value	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	۰/۹۸	۱

با توجه به جدول (۱) که متغیر بارش را در محدوده مطالعاتی نشان می‌دهد، این نتیجه‌گیری را می‌توان نمود که مدل lars توانایی زیادی برای شبیه‌سازی بارش در ایستگاه‌های مورد مطالعاتی را دارد. لازم به ذکر است که هرچقدر ks به عدد صفر نزدیک‌تر و p.value به عدد یک نزدیک‌تر باشد بیانگر این است که مدل کارایی لازم برای این منظور را دارد.

تحلیل دما و بارش ایستگاه اردبیل

با توجه به جدول (۲) که دمای سه دوره به‌صورت ماهانه بیان‌شده است و در آخر نیز مجموع بارش و میانگین دما و میزان افزایش و کاهش نشان داده‌شده است که ماه‌های فروردین، اردیبهشت، تیر، مرداد، شهریور، مهر، آبان و اسفند با کاهش بارش در هر دو دوره روبرو است. به‌طوری‌که میزان کاهش بارندگی در دوره‌ی ۲۰۱۶ تا ۲۰۴۵ نسبت به دوره‌ی پایه ۴/۹ درصد و در دوره ۲۰۴۶ تا ۲۰۶۵ نسبت به دوره‌ی پایه ۹/۲ درصد کاهش نشان می‌دهد. ازنظر دما نیز در تمام ماه‌ها نسبت به دوره‌ی پایه شاهد افزایش دما هستیم به‌طوری‌که دما در دوره ۲۰۱۶ تا ۲۰۴۵ نسبت به دوره‌ی پایه ۰/۲۶ درجه و در دوره‌ی ۲۰۴۶ تا ۲۰۶۵ نسبت به دوره‌ی پایه ۱/۷۵ درجه افزایش داشته است که (Dettorr et al, 2017 and Yan-Ling et al, 2012) نیز در مطالعات خود به این نتیجه رسیده اند.

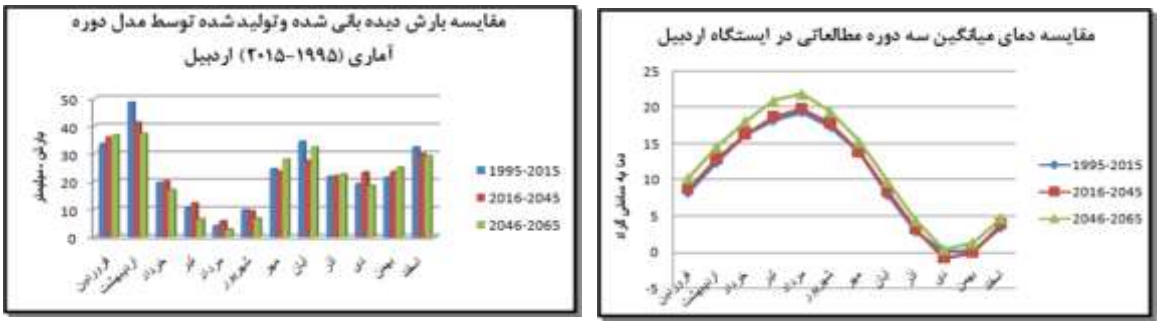
جدول ۲-بارش و دمای تولیدی ایستگاه اردبیل در دوره‌ی آماری و دوره‌ی آتی و اختلاف آن با دوره‌ی پایه ایستگاه اردبیل

متغیر	دوره آماری	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	مجموع
بارش	۱۹۹۵	۳/۴۶	۴/۴۹	۱۹/۵	۱/۲۹	۳/۹۳	۹/۴۶	۲/۳۷	۳۴/۳	۲/۷۸	۱/۱۲	۲/۳۴	۳/۲۴	۲/۴۹
-	۳	۸		۰			۴			۱	۹	۱	۲	۸۷
۲۰۱۵														
۲۰۱۶	۳۵/۹	۴/۱۵	۲/۰۲	۱/۱۲	۵/۶۹	۹/۲۴	۲/۴۴	۲/۴۸	۲/۹۴	۲/۲۲	۲/۴۲	۲/۷۸	۲۷/۴	
-		۱	۰	۲				۳	۷	۱	۳	۳	۹	۳
۲۰۴۵														
اختل اف به درصد	۳/۵۷ +	۱/۱۳ -۵	+۲/۶۶	۱/۷۸ +۷	۴/۸۷ +۴	۲/۳۲ -	۳/۸۱ -	۱/۹۵ -۹	۰/۷۳ +	۲/۴۴ +۱	۹/۷۴ +	-۷/۶۳	-۴/۹	

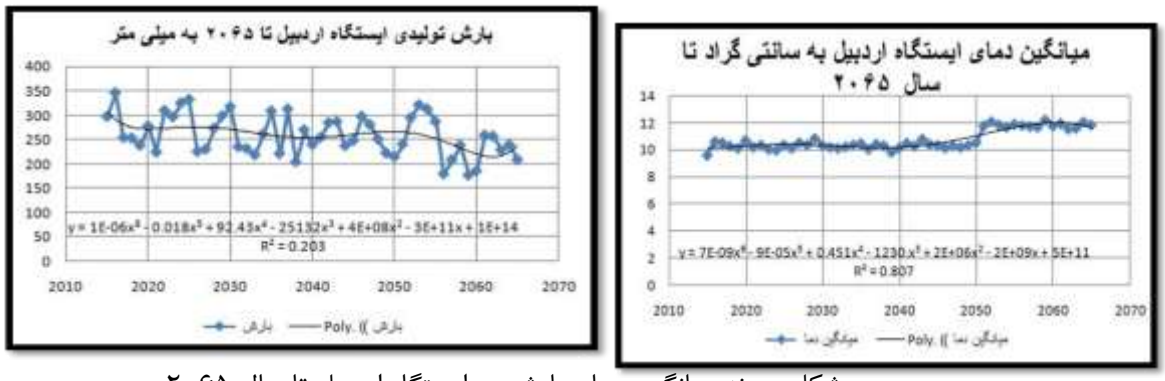
	۲۰۴۶ - ۲۰۶۵	۳/۶۴	۲۷/۲	۱/۹۲	۶/۳۵	۲/۶۸	۶/۵۵	۲/۹۲	۲۲/۳	۲/۵۳	۱/۴۲	۲۵	۲/۱۱	۲۶۱
	اختل اف به درجه	۱/۹۷ +	+۲/۱۶	+۱/۹	۲/۷۱ +	۲/۵۵ +	۲/۰۸ +	۱/۵۲ +	۱/۸۳ +	۱/۵۲ +	۰/۲۴ +	۱/۳۱ +	۱/۳۰ +	۱/۷۵ +
دما	۱۹۹۵ - ۲۰۱۵	۸/۲۵	۱/۳۷ ۲	۱/۱۹ ۶	۱/۱۹ ۸	۱/۳۱ ۹	۱/۳۶ ۷	۱/۷۴ ۳	۷/۹۷	۲/۹۲	۰/۰۷	/۰۱۸ ۰	۳/۴۸	میانگین ۱۰
	۲۰۱۶ - ۲۰۴۵	۸/۷۴	۱/۹۴ ۲	۱/۳۴ ۶	۱/۷۷ ۸	۱/۸۰ ۹	۱/۸۰ ۷	۱/۸۷ ۳	۸/۴۴	۳/۲۰	-۰/۷۶	۰/۰۴	۴	۱/۲۶ ۰
	اختل اف با دوره پایه	۱/۷۵ +	۱/۳۰ +	۱/۳۱ +	۰/۳۴ +	۱/۵۲ +	۱/۸۳ +	۱/۵۲ +	۲/۰۸ +	۲/۵۵ +	۲/۷۱ +	+۱/۹	۲/۱۹ +	۱/۹۷ +
	۲۰۴۶ - ۲۰۶۵	۱/۷۵ ۱	۴/۷۸	۱/۳۳	۰/۴۱ +	۴/۴۴	۹/۸	۱/۲۶ ۵	۱/۴۴ ۹	۲/۸۶ ۱	۲/۹۰ ۰	۱/۰۹ ۸	۱/۵۶ ۴	۱/۲۲ ۰

اختلاف به درجه	+ ۱/۷۵	+ ۱/۳۰	+ ۱/۳۱	+ ۰/۳۴	+ ۱/۵۲	+ ۱/۸۳	+ ۱/۵۲	+ ۲/۰۸	+ ۲/۵۵	+ ۲/۷۱	+۱/۹	+ ۲/۱۹	+ ۱/۹۷

با کاهش بارش و افزایش دما خصوصاً در ماه‌های رشد گندم در آینده این گیاه گندم با تنش آبی و تبخیر و تعرق زیاد روبه‌رو خواهد شد که در اشکال (۵ و ۶) نشان داده شده است.



شکل ۵- مقایسه میانگین دماو بارش در دوره آماری و دوره‌های آتی در ایستگاه اردبیل



شکل -روند میانگین دما و بارش در ایستگاه اردبیل تا سال ۲۰۶۵

اثر تغییر اقلیم روی محصول گندم:

با توجه به این که نوسانات دما و بارش در دوره‌های مختلف مشاهده می‌شود، این نوسانات را وارد نرم‌افزار CROPWAT شده تا تأثیر این متغیرهای اقلیمی را روی کشت محصول گندم ارزیابی گردید که بعد از ارزیابی نتایج در جدول (۳) ارائه‌شده است. همان‌گونه که در جدول ۳ مشاهده می‌شود مصرف واقعی آب گیاه گندم در دوره‌های آتی رو به افزایش است و دلیل آن نیز کاهش بارندگی و افزایش دما که منجر به تبخیر و تعرق در گیاه گندم می‌شود. افزایش دما که منجر به بالا

رفتن تبخیر و تعرق گیاه و از طرف دیگر کاهش بارندگی باعث ایجاد تنش آبی برای گیاه می‌گردد که بر بازدهی محصول گندم اثر منفی خواهد داشت که با نتایج تحقیقات (اسدی و کرمی، ۱۳۹۹؛ شریفی و همکاران، ۱۳۹۹) همخوانی دارد..

جدول ۳- بررسی نوسانات بارش و دما بر اساس نرم‌افزار CROPWAT

دوره	Rain بارش	Eff.Rain بارش مؤثر	KC ضریب عملکرد	ETC تبخیر و تعرق پتانسیل	ETA تغییرات مصرف	%chang ETA درصد تغییرات مصرف	Irr. ERG آبیاری موردنیاز	Irr. ERG درصد آبیاری	%chang تغییرات
۱۹۹۵- ۲۰۱۵	۲۸۷/۴	۲۲۲/۷	۰/۹۱	۵۹۳	۵۹۳	--------	۴۸۱/۶	---------	
۲۰۴۵-۲۰۱۶	۲۷۳/۳	۲۱۸/۶	۰/۸۹	۶۱۰	۶۱۰	+/۸۸	۵۲۰	+۸/۱۰	
۲۰۶۵-۲۰۴۶	۲۶۱	۲۰۹	۰/۸۸	۶۵۰	۶۵۰	+۹/۶۱	۵۸۰	+۲۰/۵۸	

نتیجه‌گیری

گرمایش جهانی یک واقعیت انکارناپذیر زندگی بشر امروزی است و اثرات آن در سراسر جهان به‌صورت افزایش دما و تغییر الگوی بارندگی مشاهده می‌شود. این تغییرات بخش کشاورزی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. ازجمله افزایش درجه حرارت موجب بالا رفتن میزان تبخیر و تعرق پتانسیل گیاهی می‌شود که به‌تبع آن نیاز آبی گیاهان افزایش می‌یابد. دو عنصر درجه حرارت و بارندگی مهم‌ترین پارامترهای اقلیمی مؤثر در رشد نمو گیاه گندم است. نکته مهم این است که در ماه‌های دوران رشد گیاه گندم خصوصاً در ماه اردیبهشت روند کاهشی بوده است که می‌تواند در آینده برای رشد گندم تنش آبی ایجاد کند. با توجه به پدیده تغییر اقلیم که در منطقه در حال روی دادن است باید اثرات اجتناب‌ناپذیر آن بر روی محصولات کشاورزی به‌ویژه محصول استراتژیک گندم در نظر گرفته شود و راهکارها و اقدامات لازم در این زمینه صورت پذیرد. یکی از این راهکارها انتخاب نژادهای جدید با نیاز آبی کمتر و مقاومت بیشتر در برابر شرایط محیطی آینده است. راهکار دوم اصلاح روش‌های آبیاری سنتی که باعث هدر رفت آب و بهره‌وری کمتر آب است و جایگزین کردن روش‌های جدید آبیاری است. تا بدین طریق امکان سازگاری با شرایط جدید و مقابله با آثار سو تغییر اقلیم فراهم گردد.

منابع

احمدی فر، رقیه؛ موسوی، سید مرتضی؛ رحیم زادگان، مجید. (۱۳۹۹). بررسی اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی (مطالعه موردی: آبخوان دشت سراب)، نشریه دانش آب‌وخاک، ۳۰(۱): ۱۶۶-۱۵۳.

اسدی، مهدی؛ کرمی، مختار. (۱۳۹۹). برآورد میزان تبخیر و تعرق در استان فارس با استفاده از شاخص‌های تجربی، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۲(۵۶): ۱۹۵- ۱۷۵.

بخش کلارستاقی، کیومرث؛ ابراهیمی، حسین؛ مروت، سید علی‌اصغر. (۱۳۹۲). ارزیابی شرایط تأثیر اقلیم و اثر آن بر روی تقویم زراعی کشت گندم در مشهد، مجله یافته‌های نوین کشاورزی، ۷(۴): ۳۵۴-۳۳۹.

دلقندی، مهدی؛ برومند نسب، سعید؛ اندرزیان، بهرام؛ مساح بوانی، علیرضا. (۱۳۹۵). راهکارهای سازگاری گندم با شرایط تغییر اقلیم (مطالعه موردی: شهرستان اهواز)، نشریه آب‌وخاک، ۳۰(۱): ۳۱۱-۳۰۰.

ذوالفقاری، حسن؛ معصوم پور سماکوش، جعفر؛ چاهوری، شبنم. (۱۳۹۷). برآورد درجه-روزهای رشد در شمال غرب ایران بر اساس مدل‌های تغییر اقلیم، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۱۸(۴۹): ۲۴۰-۲۲۱.

رحمانی، میترا؛ جامی الا حمدی، مجید؛ شهیدی، علی؛ هادی زاده ازغندی، مصطفی. (۱۳۹۴). تأثیر تغییر اقلیم بر طول دوره رشد و نیاز آبی گندم و جو (مطالعه موردی: دشت بیرجند)، نشریه بوم‌شناسی کشاورزی، ۷(۴): ۴۶۰-۴۴۳.

زرعکاری، فاطمه؛ کمالی، غلامعلی؛ چیذری، امیرحسین. (۱۳۹۲). اثر تغییر اقلیم بر اقتصاد گندم دیم (مطالعه موردی خراسان شمالی)، نشریه کشاورزی، ۶(۲): ۳۱۰-۳۰۱.

سبحانی، بهروز؛ گل دوست، اکبر. (۱۳۹۵). بررسی تغییر دما و ارزیابی امکان پیشینی آن در استان اردبیل بر اساس روش‌های آماری و سیستم استنتاج فازی- عصبی تطبیقی، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۱۶(۴۲): ۴۰-۲۷.

سبحانی، بهروز؛ صفریان زنگیر، وحید؛ زمانی، لیلا. (۱۳۹۹). پهنه‌بندی آگروکلیماتولوژی کشت برنج با استفاده از روش‌های AHP و TOPSIS (مطالعه موردی: شهرستان لنجان استان اصفهان)، تحقیقات اقتصاد کشاورزی، ۱۲ (۱): ۲۲۶- ۲۰۲.

سبحانی، بهروز؛ صفریان زنگیر، وحید؛ کرمی، اخضر. (۱۳۹۹). تعیین تقویم زراعی کاشت ذرت با استفاده از آزمون T مشاهده‌ای و پهنه -بندی آگروکلیمایی و زراعی آن با آزمون هتلینگ در استان کرمانشاه، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۲۰(۵۷): ۳۷-۲۵.

سبحانی، بهروز؛ صلاحی، برومند؛ گلدوست، اکبر. (۱۳۹۳). ارتباط شاخص اقلیمی NAO با مقادیر میانگین، حداکثر و حداقل دمای ماهانه شمال غرب ایران، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۴(۳۳): ۹۰-۷۷.

شاه نظری، مجتبی؛ حجازی زاده، زهرا؛ سلیقه، محمد. (۱۳۹۹). اثر تغییر اقلیم بر تقویم زراعی در شمال ایران، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۲۰(۵۹): ۱۱۷-۹۹.

سلیمانی ننادگانی، مجید؛ پارسی نژاد، مسعود؛ عراقی نژاد، شهاب؛ مساح بوانی، علیرضا. (۱۳۹۱). بررسی رخداد تغییر اقلیم و تأثیر آن بر زمان کاشت، طول دوره رشد و نیاز آبی گندم زمستانه (مطالعه موردی: بهشهر)، نشریه پژوهش آب ایران، ۶(۱۰): ۲۰-۱۱.

شریفی، لیلا؛ بازگیر، سعید، محمدی، حسین؛ دربان، آستانه؛ کریمی احمدآباد، مصطفی. (۱۳۹۹). بررسی عوامل مؤثر بر تغییرات تولید گندم در اقلیم‌های مختلف استان فارس، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۲۰(۵۷): ۳۵۴-۳۳۵.

شمسی‌پور، علی‌اکبر. (۱۳۹۲). مدل‌سازی آب‌وهوایی نظریه و روش‌ها، انتشارات دانشگاه تهران.

قادری، ناصح؛ علیجانی، بهلول؛ حجازی زاده، زهرا؛ سلیقه، محمد. (۱۳۹۷). مدل فضایی تولید گندم دیم استان کردستان با ریز پهنه‌بندی اقلیم کشاورزی، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۱۸(۴۸): ۱۹-۱.

محمدی، الهام؛ یزدان پناه، حجت‌الله؛ محمدی، فریبا. (۱۳۹۳). بررسی رخداد تغییر اقلیم و تأثیر آن بر کاشت و طول دوره‌ی رشد گندم دو روم (دیم) مطالعه موردی ایستگاه سرارود کرمانشاه، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۴۶(۲): ۲۴۶-۲۳۱.

نصیری، مهدی و کوچکی، علیرضا. (۱۳۸۵). آنالیز شاخص‌های اگروکلیماتیک ایران در شرایط تغییر اقلیم، مجله پژوهش‌های زراعی ایران، ۴(۱): ۱۷۰-۱۶۹.

وزارت جهاد کشاورزی. (۱۳۹۶). آمارنامه کشاورزی زراعت و غلات جلد ۱.

Dettorr, M., Cesaraccio, C., Duce, P., (2017), Simulation of climate change impacts on production and phenology ofdurum wheat in Mediterranean environments using CERES-Wheat model, Field Crops Research. 20(6): 53–43.

Flohr, B. M., Hunt, J. R., Kirkegaard, J. A., Evans, J. R., (2017), Water and temperature stress define the optimal flowering period for wheat in south-eastern Australia, Field Crops Res,. 20(9): 108–119.

Hatfied, J.L., Dold, C., (2018), Agroclimatology and Wheat Production: Coping with Climate Change, Frontiers in Plant Science, doi: 10.3389/fpls.2018.00224.

Naresh Kumar, S., Aggarwal, P.K., Swaroopa, R., Jain, S., Saxena, R., Nitin Chauhan, N., (2011), Impact of climate change on crop productivity in Western Ghats, coastal and northeastern regions of India, Curr.Science., 101 (3): 33-42.

Pol, M., Binyamin, J., (2014), Impact of Climate Change and Variability on Wheat and Corn Production in Buenos Aires, Argentina, American Journal of Climate Change, 3(4): 145-152. http://dx.doi.org/10.4236/ajcc.2014.32013.

Sandhu, S.S., Prabhjyot Kaur, K.K., Vashisth, B.B., (2019), The effect of recent climate shifts on optimal sowing windows for wheat in Punjab, India, Journal of Water and Climate Change. https://doi.org/10.2166/wcc.2019.241.

Shrestha, S., Gyawali, B., Bhattarai, U., (2013), Impacts of climate change on irrigation water requirements for rice–wheat cultivation in Bagmati River Basin, Nepal, Journal of water and climate change, doi: 10.2166/wcc.2013.050.rnal of Water ahange

Yan-Ling, S., De-liang, C., Yan-Ju, L., Ying, XU., (2012), The In fluence of Climate Change on Winter Wheat during 2100 under A2 and A1B Scenarios in China, Advences in climate change research, 3(3): 138-146.

Zacharias, M., Nareshkumar, S., Singh, S.D., Swarooparani, D.N., Aggarwal, P.K., (2014), Assessment of impacts of climate change on rice and wheat in the Indo-Gangetic plains, Journal of Agrometeorology,16(1): 9-17.

Zhang, S., Tao, F., Zhang, Z., (2016), Changes in extreme temperatures and their impacts on rice yields insouthern China from 1981 to 2009, Field Crops Research, 189(6): 43–50.

Zhang, B., Chenu, K., Chapman, S.C., (2016), Velocity of temperature and flowering time in wheat – assisting breeders to keep pace with climate change, Global Change Biology, 22(4): 921–933, doi: 10.1111/gcb.13118.

اعتبار سنجی آزمون من –کندال براساس دامنه تغییرات داده‌های هواشناسی

لاله پرویز[۱]، فاطمه معصومی[۲]، هستی شاکر[۳]

۱- دانشیار دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید مدنی آذربایجان

۲-۳- دانشجوی کارشناسی دانشگاه شهید مدنی آذربایجان

آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول (laleh_parviz@yahoo.com)

چکیده

تغییرات در داده‌های هواشناسی مانند دمای بیشینه، کمینه، بارندگی،... می‌تواند نمایانگر تغییرات اقلیمی حاکم بر مناطق مختلف باشد. در این راستا استفاده از روشی کارآمد در تعیین روند داده‌های هواشناسی می‌تواند نقش مهمی داشته باشد، به همین دلیل اعتبار آزمون مهم تعیین روند ،آزمون من-کندال، با استفاده از دامنه تغییرات داده‌ها بررسی شد. در ابتدا دامنه تغییرات دمای بیشینه، کمینه و بارندگی در هفت ایستگاه در مقیاس سالانه و ماهانه (فوریه، می،آگوست و نوامبر) محاسبه و با آماره من-کندال این تغییرات پایش شدند. بیشترین مقدار آماره من-کندال در مقیاس فصلی و سالانه به ترتیب مربوط به دمای بیشینه، کمینه و بارندگی است. هماهنگی بین دامنه تغییرات و آماره آزمون من-کندال در مقیاس سالانه بیشتر از ماهانه و در مورد بارندگی بیشتر از سایر داده‌ها بود. بیشترین مقدار دامنه تغییرات و آماره آزمون من-کندال دمای کمینه به ترتیب مربوط به ایستگاه‌های بجنورد و آبادان بود و این مساله اهمیت آزمون من-کندال را در تعیین روند داده‌های هواشناسی نسبت به دامنه تغییرات نشان می‌دهد. به‌طور کلی استفاده از روش‌های کارآمد تعیین روند مانند آزمون من-کندال در آشکارسازی تغییرات و اتخاذ تصمیم‌گیری‌های مرتبط کمک چشمگیری خواهد داشت.

کلید واژه‌ها: من- کندال، روند، دامنه، آشکارسازی.

مقدمه

رشد جمعیت و رویکرد صنعتی‌شدن، تاثیر چشمگیری در افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای به جو را دارند، که این پدیده، گرمایش جهانی و تغییرات اقلیمی را تشدید می‌کند و به نوبه خود بر داده‌های هواشناسی مانند دما، بارش، رطوبت و غیره از نظر روند تأثیر می‌گذارد. در نتیجه منجر به افزایش وقایع حدی مانند سیل، خشکسالی و سایر پدیده‌های مرتبط با آب و هوا می‌شود. بنابراین تعیین الگوهای عوامل هواشناسی، در طراحی، مدیریت و اجرای پروژه‌های منابع آب، بسیار مهم است (Güçlü et al., 2025).

تغییرات اقلیمی (CC۳۴) به تغییرات بزرگ در میانگین‌های اقلیمی گفته می‌شود که برای دهه‌ها یا حتی دوره‌های طولانی‌تر وجود دارند. اگرچه تغییرات اقلیمی در مقیاس جهانی رخ داده است، اما تأثیرات آن اغلب از منطقه‌ای به منطقه دیگر متفاوت است. بنابراین، تجزیه و تحلیل تغییرات در متغیرهای هواشناسی، عامل مهمی در تشخیص تغییرات اقلیمی است. تغییرات اقلیمی به عنوان نوسانات قابل توجه در میانگین‌های اقلیمی توصیف می‌شود که برای دهه‌ها یا حتی قرن‌ها ادامه می‌یابد که در حال وقوع است و تأثیرات آن در حال حاضر در مکان‌های خاصی مشاهده می‌شود و همچنین مدیریت جهانی سیستم‌های طبیعی و انسانی را مختل کرده است. تغییرات اقلیمی در حال حاضر به عنوان یکی از مهمترین مسائل پیش روی جهان در نظر گرفته می‌شود. تغییرات اقلیمی شامل تغییرات در داده‌های اقلیمی مانند بارندگی، دما، سرعت باد، رطوبت، تابش خورشید و موارد دیگر می‌شود. اگرچه تغییرات اقلیمی در مقیاس جهانی رخ داده است، اما تأثیرات آن اغلب از مکانی به مکان دیگر متفاوت است. مطالعات متعدد روش‌های متنوعی را برای تعیین الگوهای داده‌های هواشناسی با ترکیب روند به کار گرفته‌اند که از آن جمله می‌توان به آزمون من-کندال، تخمین‌گر شیب سن اشاره کرد.

بررسی داده‌های اقلیمی مانند بارش می‌تواند نشان دهنده وضعیت اقلیمی هر منطقه باشد، که اگر این نتایج روند با نتایج یکی از شاخص‌های خشکسالی همراه باشد، وان شرایط اقلیمی را بهتر تحلیل کرد. روند بارش در استان تهران در چهار ایستگاه در بازه زمانی ۱۹۸۵ تا ۲۰۰۷ با آزمون من-کندال و سن در بازه زمانی ماهانه، فصلی و سالانه بررسی شد. جهت تحلیل نتایج و تعیین روند خشکسالی از شاخص استاندارد بارش استفاده شد. نتایج دو آزمون حاکی از این بود که روند خاصی در سری زمانی فصلی مشاهده نمی‌شود، ولی در سری سالانه با آزمون سن در ایستگاه‌های آبعلی و کرج روند صعودی مشاهده می‌شود که دلیل این مساله را می‌توان به ارتفاع بالاتر این دو ایستگاه ربط داد. مقایسه روند بارندگی و خشکسالی در مقیاس سالانه نشان‌دهنده برتری آزمون سن نسبت به آزمون من –کندال بود (ملکی نژاد و همکاران ۱۳۹۲). از آزمون من-کندال در تعیین روند داده‌های دما و بارش سالانه همه مراکز استان‌های کشور در بازه زمانی ۱۳۹۴-۱۳۶۴ استفاده شد. دما در نواحی مرکزی، شمال غرب، ساحلی خزر، خوزستان، زاگرس مرکزی، جنوبی خشک، خراسان، ساحلی جنوب و مرکزی دارای روند صعودی است. بارندگی در نواحی خوزستان، و زاگرس مرکزی بدون روند بود. افزایش درجه حرارت منجر به افزایش تبخیر و تعرق خواهد شد. نتایج کلی شامل افزایش روند معنی‌داری متوسط دمای سالانه و عدم وجود روند خاص در بارندگی است (بارانی و کرمی ۱۳۹۸). روند تغییرات فصلی و سالانه دمای خاک در عمق های ۵، ۱۰،۲۰،۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ سانتیمتری از سطح خاک در برخی از ایستگاه‌های استان خوزستان در بازه زمانی ۲۵ سالانه بررسی شد. آزمون من –کندال اصلاح شده و تخمین‌گر شیب سن به ترتیب در تعیین روند تغییرات دمای خاک و شیب خط روند استفاده شد. نتایج نشان دادند که دمای سالانه خاک به مقدار ۱/۲۸ درجه سانتیراد همراه با افزایش بوده است، همچنین دمای خاک در فصل بهار و تابستان با افزایش عمق کاهش داشته است، ولی در فصل‌های سرد دمای خاک با افزایش عمق به صورت جزئ افزایش داشت (زاد مهر و فرخیان فیروزی ۱۴۰۰). روندهای سالانه و فصلی هفت متغیر هواشناسی برای دوازده ایستگاه

34 Climate Change

هواشناسی در صربستان طی سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۰ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. از روش‌های ناپارامتری من-کندال و سن برای تعیین وجود روند مثبت یا منفی در داده‌های هواشناسی و معناداری آماری آنها استفاده شد. وقوع تغییرات ناگهانی با استفاده از نمودارهایی شناسایی شد. در مطالعه حاضر، روندهای افزایشی در سری‌های دمای هوای کمینه و بیشینه سالانه و فصلی نشان داده شد. رطوبت نسبی در تابستان و پاییز به طور قابل توجهی کاهش یافت، در حالی که فشار بخار در بهار، تابستان و پاییز روند افزایشی قابل توجهی داشت. علاوه بر این، هیچ روند معناداری در سری‌های بارش تابستان و زمستان مشاهده نشد. به طور کلی، نتایج استفاده از آزمون‌های من-کندال و سن، تطابق خوبی از عملکرد را در تشخیص روند متغیرهای هواشناسی نشان داد (Gocic, and Trajkovic 2013). تحلیل روند داده‌های دما بر اساس داده‌های میانگین دمای ماهانه و سالانه بین سال‌های ۱۹۵۷ تا ۲۰۲۲ در سه ایستگاه در ترکیه انجام شد. هدف اصلی تحقیق، دستیابی به یک مقدار همبستگی خودرگرسیو قابل قبول برای آزمون من –کندال بود. برای این منظور، فصلی بودن (دوره‌ای بودن) به ویژه در سری‌های زمانی ماهانه تنظیم شد. مقادیر همبستگی خودرگرسیو و آزمون همگنی پس از تنظیم فصلی کاهش می‌یابد. سپس، از روشی برای داده‌های تعدیل‌شده فصلی اعمال می‌شود. این فرآیند منجر به همگن شدن داده‌ها شد. نسخه نهایی سری زمانی برای آزمون من –کندال مناسب است. علاوه بر این، سری‌های زمانی به فواصل زمانی مختلف تقسیم و اثربخشی روش بررسی می‌شود. نتایج نشان داد که این روش برای سری‌های زمانی با داده‌های کمتر از ۳۰ سال مناسب است. این مطالعه نشان داد که روش پیشنهادی قابلیت اطمینان داده‌ها را افزایش می‌دهد (Güçlü et al., 2025). هدف این تحقیق اعتبار سنجی آزمون من-کندال با استفاده از دامنه تغییرات دمای کمینه، بیشینه و بارندگی در مقیاس ماهانه و سالانه است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

ایستگاه‌های مطالعاتی تحقیق شامل گرگان، بجنورد، نوشهر، الیگودرز، قزوین، سبزوار و آبادان است، نوع اقلیم حاکم بر ایستگاه‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- شاخص دومارتن ایستگاه‌های مختلف در بازه زمانی مطالعاتی

براساس شکل ۱ کمترین میزان شاخص دومارتن در ایستگاه آبادان و بیشترین آن در نوشهر است. ایستگاه‌های آبادان، سبزوار، بجنورد در اقلیم خشک و نوشهر در اقلیم بسیار مرطوب قرار دارند.

آزمون من- کندال[35] (MK) در تعیین روند سری زمانی

آزمون من- کندال یکی از کاربردی‌ترین آزمون‌های ناپارامتری جهت تشخیص روند در داده‌ها است. روش ناپارامتری کمتر تحت تاثیر وجود نقاط پرت در سری داده‌ها قرار می‌گیرد. یکی از دلایل کارایی آزمون من- کندال عدم تاثیر پذیری این آزمون نسبت به توزیع سری می‌باشد، حتی اگر سری زمانی دارای توزیع نامتقارن باشد. علاوه بر این، آزمون من- کندال نسبت به مقادیر غیر ایستایی، غیر خطی و گمشده مقاوم است (Rashid et al., 2015). فرض صفر این آزمون حاکی از عدم وجود روند در داده‌ها و یا به‌عبارتی دیگر تصادفی بودن سری‌های زمانی است. در مقابل، فرض یک حاکی از وجود روند در سری زمانی است. در آزمون من- کندال هر مقدار در سری زمانی پیوسته و پشت سر هم با بقیه مقادیر سری مقایسه می شود. مقدار آماره آزمون (Z) از رابطه ۱ بدست می‌آید.

$$Z=\begin{cases}\dfrac{S-1}{\sqrt{Var(S)}} & S>0\\ 0 & S=0\\ \dfrac{S+1}{\sqrt{Var(S)}} & S<0\end{cases} \quad (۱)$$

S: مربوط به علامت‌های تفاوت مقادیر با یکدیگر، sgn(x): تابع علامت، Var(S): واریان

در یک آزمون دو دامنه‌ای برای روند سری داده‌ها فرض صفر در حالتی پذیرفته می‌شو

$$|Z| \le Z_{\frac{\alpha}{2}} \quad (۲)$$

α: سطح معنی‌داری است که برای آزمون در نظر گرفته می‌شود، Zα : آماره توزیع نرمال استاندارد در سطح اطمینان α.

مقدار آماره Z در آزمون من- کندال می‌تواند مقدار مثبت و یا منفی باشد که به‌ترتیب نشان دهنده روند مثبت و منفی در سری داده‌ها است (Rashid et al., 2015)

نتایج

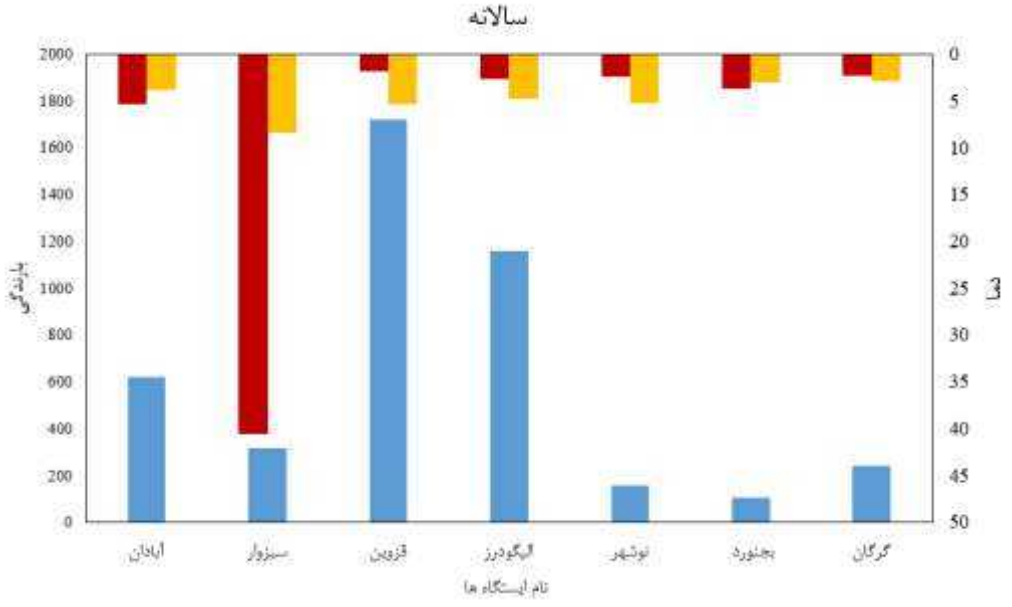
35 Mann-Kendall

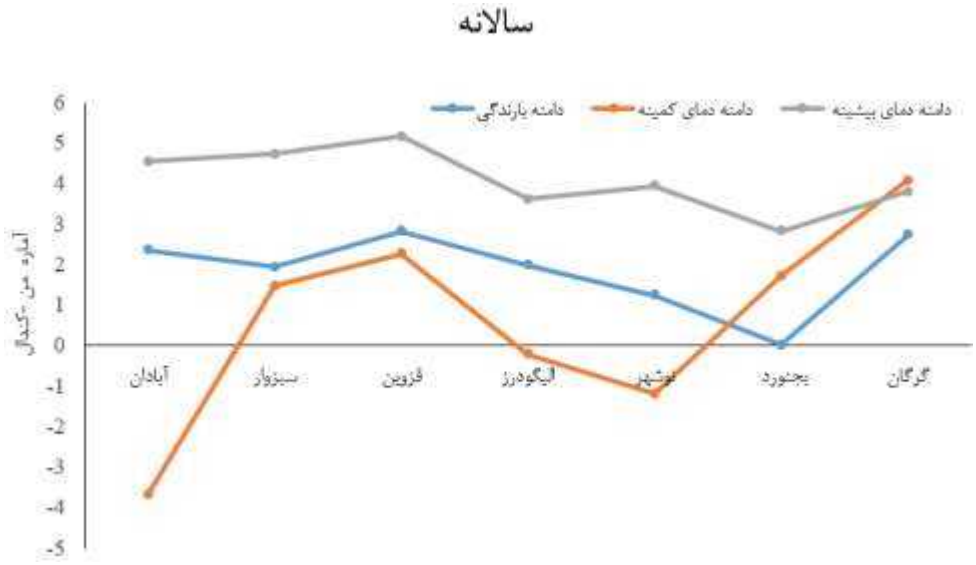
بازه زمانی مطالعاتی در این تحقیق ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۴ در نظر گرفته شد که کمینه و بیشینه بارندگی مربوط به ایستگاه‌های آبادان و نوشهر می‌باشد. تغییرات بارندگی و دمای سالانه در شکل ۲ آورده شده است.



شکل ۲- نمودار تغییرات بارندگی و دمای سالانه ایستگاه های مختلف

براساس شکل ۲ در برخی از ایستگاه‌ها مانند آبادان، سبزوار، قزوین روند افزایش دما با کاهش بارندگی چشمگیری مشاهده می‌شود، ولی در بقیه ایستگاه‌های مطالعاتی این مساله (تعارض روند این دو داده) بین دو داده دما و بارندگی از بین نرفته و هماهنگی بین این دو داده مشاهده می‌شود. بنابراین روند حاکم بر داده‌ها در ایستگاه‌های مختلف متفاوت است. برای بررسی بیشتر این مساله دامنه تغییرات داده‌های هواشناسی در شکل ۳ آورده شده است.





شکل ۳- دامنه تغییرات و آماره آزمون من –کندال تمام داده‌های مطالعاتی در تمام ایستگاه‌های مطالعاتی در مقیاس سالانه

بیشترین مقدار آماره من-کندال به ترتیب مربوط به دمای بیشینه، کمینه و بارندگی است. ترتیب دامنه تغییرات بارندگی ایستگاه‌ها از بزرگ به کوچک شامل ایستگاه‌های نوشهر، الیگودرز، گرگان، بجنورد، آبادان، قزوین و سبزوار است که این ترتیب در مورد آماره من –کندال شامل ایستگاه‌های نوشهر، آبادان، الیگودرز، بجنورد، قزوین و سبزوار است. از نظر ترتیب رتبه دامنه تغییرات بارندگی و آماره من-کندال بین ایستگاه‌های نوشهر، گرگان، قزوین و سبزوار هماهنگی وجود دارد. بیشترین مقدار آماره من-کندال و دامنه تغییرات بارندگی و کمترین به ترتیب مربوط به ایستگاه نوشهر و سبزوار است. ترتیب بیشترین دامنه تغییرات دمای کمینه از بزرگ به کوچک شامل ایستگاه‌های بجنورد، گرگان، سبزوار، الیگودرز، قزوین، آبادان، نوشهر است. این ترتیب در مورد آماره من-کندال شامل ایستگاه‌های آبادان، گرگان، نوشهر، سبزوار، بجنورد، قزوین، الیگودرز است. از نظر ترتیب رتبه دامنه تغییرات دمای کمینه و آماره من-کندال در ایستگاه گرگان هماهنگی وجود دارد. بیشترین مقدار آماره آزمون من –کندال مربوط به ایستگاه آبادان است، ولی دامنه تغییرات دمای کمینه ایستگاه آبادان نسبت به سایر ایستگاه‌ها از مقدار بیشتری برخوردار نیست. ترتیب بیشترین دامنه تغییرات دمای بیشینه از بزرگ به کوچک شامل ایستگاه‌های بجنورد، نوشهر، قزوین، الیگودرز، گرگان، سبزوار و آبادان است. این ترتیب در مورد آماره من-کندال شامل ایستگاه‌های نوشهر، بجنورد، گرگان، قزوین، آبادان، الیگودرز و سبزوار است. نوشهر و بجنورد از نظر دامنه تغییرات دما و آماره من کندال در رتبه‌های اول قرار دارند. در ادامه این بررسی بر روی داده‌های ماهانه (فوریه، می، آگوست و نوامبر) انجام گرفت که نتایج در جدول ۱ و ۲ آورده شده است.

جدول ۱- دامنه تغییرات ایستگاه‌های مطالعاتی در مقیاس ماهانه

آبادان	سبزوار	قزوین	الیگودرز	نوشهر	بجنورد	گرگان	داده	ماه
۲۰/۲	۶۲	۸۳/۶	۶۳/۳	۱۸۵/۷	۶۴/۵	۱۱۳/۷	بارندگی	دامنه فوریه
۴/۸	۹/۵	-۳/۸	۶/۴	۴/۶	۳۹/۹	۱۶/۶	دمای کمینه	
۵	۹/۱	۱۲/۷	۱۲/۳	۱۰/۴	۱۴/۷	۶/۵	دمای بیشینه	
۲۵/۶	۳۷/۳	۷۲/۶	۶۹/۴	۱۲۹/۸	۵۶/۵	۶۰/۹	بارندگی	دامنه می
۴/۳	۷/۲	۸/۲	۱۵	۳/۲	۷۴/۱	۲۱/۲	دمای کمینه	
۵/۶	۸/۲	۱۳/۹	۹/۳	۹/۸	۱۴/۷	۸/۴	دمای بیشینه	
۴۸	۳	۴۳	۶/۲	۲۰۰/۴	۳۰/۹	۴۲	بارندگی	دامنه آگوست
۴	۶/۲	۱۱/۱	۴/۹	۸/۴	۶۱/۸	۱۵/۲	دمای کمینه	
۲/۶	۳/۵	۶/۱	۴	۸/۵	۱۳/۵	۵/۲	دمای بیشینه	
۷۴/۵	۷۹/۴	۷۷/۸	۱۵۲/۴	۳۵۵/۴	۷۷/۹	۹۵/۹	بارندگی	دامنه نوامبر
۶/۷	۵/۱	۵/۴	۷/۶	۸/۵	۳۲/۵	۹/۶	دمای کمینه	
۵	۹/۲	۸/۶	۵/۹	۹/۲	۹/۴	۱۱/۲	دمای بیشینه	

جدول ۲- آماره آزمون من-کندال ایستگاه‌های مطالعاتی در مقیاس ماهانه

آبادان	سبزوار	قزوین	الیگودرز	نوشهر	بجنورد	گرگان	داده	ماه
۱/۷۵	۱/۵۸	۲/۴۹	۲/۹۷	۳/۴۳	۱/۳۳	۲/۸	بارندگی	دامنه فوریه
۱/۴۲	۱/۲۸	۰/۷۲	۰/۸۱	۱/۹۴	۰/۳۵	-۱/۴۲	دمای کمینه	
۱/۷۷	۰/۸۶	۲/۱۷	۲/۹۴	۴/۲۳	۱/۹۱	۱/۶۳	دمای بیشینه	
۳/۵۹	۳/۶۴	۱/۳۵	۱/۳۸	۳/۲	۳/۴۶	۱/۸۵	بارندگی	دامنه می
۰/۳۷	-۰/۵۱	-۱/۳	-۲/۵۷	۰/۴۴	۰/۹۱	-۲/۹۹	دمای کمینه	
-۰/۴۲	۰/۰۹۳	۱/۷۹	۲/۰۳	۳/۴۸	۳/۴۵	۳/۸۱	دمای بیشینه	

دامنه آگوست	بارندگی	۰	۰/۲۶	۰/۸۲	۰/۹	۱/۱۴	۰/۱۱	-۰/۴۱
	دمای کمینه	-۲/۵۲	-۰/۲۵	۱/۳۵	۱/۲۴	-۱/۱۹	۰/۵۶	۲/۵۲
	دمای بیشینه	۲/۵۹	۲/۰۱	۳/۰۸	۱/۰۱	۱/۸۹	۰/۸۶	۰/۲۱
دامنه نوامبر	بارندگی	-۱/۰۵	۰/۹۸	۲/۶۴	۲/۹۷	۱/۴	-۰/۱۱	۱/۸۹
	دمای کمینه	-۲/۸۷	-۰/۲۵	-۰/۳۷	۱/۰۵	۰/۷۷	۱/۲۱	۳/۷۸
	دمای بیشینه	۱/۲۸	۱/۱۹	۰/۷۲	۲/۵۷	۲/۰۵	۰/۸۶	۲/۵

بیشترین مقدار آماره آزمون من-کندال در مقیاس ماهانه مربوط به ایستگاه سبزوار در ماه می (۳/۶۴)، دمای کمینه مربوط به ایستگاه آبادان در ماه نوامبر (۳/۷۸)، دمای بیشینه مربوط به ایستگاه نوشهر در ماه فوریه (۴/۲۳) می‌باشد. در مورد بارندگی بیشترین مقدار دامنه تغییرات در ماه‌های فوریه، می، آگوست و نوامبر به ترتیب مربوط به ایستگاه نوشهر است، بیشترین مقدار آماره آزمون من-کندال در ماه‌های بیان شده شامل نوشهر، سبزوار، قزوین و الیگودرز است. در مورد بارندگی کمترین مقدار دامنه تغییرات در ماه‌های فوریه، می، آگوست و نوامبر به ترتیب مربوط به ایستگاه آبادان، آبادان، سبزوار، آبادان است، کمترین مقدار آماره آزمون من-کندال در ماه‌های بیان شده شامل بجنورد، قزوین، گرگان، بجنورد می‌باشد. در مورد دمای کمینه بیشترین مقدار دامنه تغییرات در ماه‌های بیان شده در ایستگاه‌های بجنورد اتفاق افتاده است. بیشترین مقدار آماره آزمون من-کندال در ماه‌های بیان شده شامل نوشهر، گرگان، آبادان-گرگان و آبادان است. در مورد دمای کمینه کمترین مقدار دامنه تغییرات در ماه‌های فوریه، می، آگوست و نوامبر به ترتیب مربوط به ایستگاه قزوین، نوشهر، آبادان، سبزوار است، کمترین مقدار آماره آزمون من-کندال در ماه‌های بیان شده شامل بجنورد، آبادان، بجنورد و بجنورد می‌باشد. در مورد دمای بیشینه بیشترین مقدار دامنه تغییرات در ماه‌های بیان شده در ایستگاه‌های قزوین، بجنورد، بجنورد، گرگان اتفاق افتاده است. بیشترین مقدار آماره آزمون من-کندال در ماه‌های بیان شده شامل نوشهر، گرگان، نوشهر، الیگودرز است. در مورد دمای بیشینه کمترین مقدار دامنه تغییرات در ماه‌های فوریه، می، آگوست و نوامبر به ترتیب مربوط به ایستگاه آبادان است، کمترین مقدار آماره آزمون من-کندال در ماه‌های بیان شده شامل سبزوار، سبزوار، آبادان و نوشهر می‌باشد.

نتیجه‌گیری کلی

بررسی تغییرات حاکم بر داده‌های هواشناسی مانند دما، بارندگی، تابش، .. با روشی کارآمد در پایش تغییرات اقلیمی، گرمایش جهانی می‌تواند اهمیت شایان توجهی داشته باشد. در این راستا دامنه تغییرات داده‌های هواشناسی با آماره آزمون من-کندال مقایسه شدند. بیشترین مقدار آماره من-کندال در مقیاس فصلی و سالانه به ترتیب مربوط به دمای بیشینه،

کمینه و بارندگی است. هماهنگی بین دامنه تغییرات و آماره آزمون من-کندال در مقیاس سالانه بیشتر از ماهانه و در مورد بارندگی بیشتر از سایر داده‌ها بود.

منابع

بارانی، ن.، و کرمی، آ. (۱۳۹۸). تحلیل روند سالانه پارامترهای اقلیمی دما و بارش در نواحی ده گانه زراعی- اکولوژیکی ایران. فصلنامه علوم محیطی، ۱۷(۴)، ۹۰-۷۵.

زادمهر، ح.، و فرخیان فیروزی، ا. (۱۴۰۰). بررسی دمای خاک با استفاده از آزمون ناپارامتری من-کندال اصلاح شده در مناطق انتخابی استان خوزستان. نشریه علمی پژوهش های خاک، ۳۵ (۴): ۴۴۳-۴۲۹.

ملکی نژاد، ح.، سلیمانی مطلق، م.، جایدری، ا.، و شاطر آبشوری، س. (۱۳۹۲). تحلیل روند تغییرات بارندگی و خشکسالی با استفاده از آزمون‌های من – کندال و سن در استان تهران. مجله علمی و فنی نیواز، ۸۰(۸۱)، ۵۴-۴۳.

4-Gocic, M., & Trajkovic, S. (2013). Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen's slope estimator statistical tests in Serbia. Global and planetary change, 100, 172-182.

5-Güçlü, Y.S., Acar, R. & Saplıoğlu, K. (2025). Seasonally adjusted periodic time series for Mann-Kendall trend test. Physics and Chemistry of the Earth, Parts, 138,103848.

6-Rashid, M.M., Beecham, S. & Chowdhury, R.K. 2015. Assessment of trends in point rainfall using continuous wavelet transforms. Advances in water resources, 82,1-15.

Validation of the Mann-Kendall test based on the range of changes in meteorological data

Laleh Parviz[1], Fatemeh Masomi[2] , Hasti Shaker[3]

Associate Proffersor, Faculty of Agriculture, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran.

2-3-BSc Student, Faculty of Agriculture, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran.

* Corresponding author: laleh_parviz@yahoo.com

Abstract

Changes in meteorological data such as maximum, minimum temperature, precipitation,… can represent the climatic changes prevailing in different regions. In this regard, using an efficient method in determining the trend of meteorological data can play an important role, for this reason, the validity of the important test for determining the trend, the Mann-Kendall test, was examined using the range of data changes. Initially, the range of changes in maximum, minimum temperature and precipitation at seven stations on an annual

and monthly scale (February, May, August and November) was calculated and these changes were monitored with the Mann-Kendall statistic. The highest value of the Mann-Kendall statistic on a seasonal and annual scale is related to maximum, minimum temperature and rainfall, respectively. The agreement between the range of changes and the Mann-Kendall test statistic was greater on an annual scale than on a monthly scale and greater in the case of rainfall than on other data. The highest values of the range of changes and the Mann-Kendall test statistic for minimum temperature were related to Bojnurd and Abadan stations, respectively, and this shows the importance of the Mann-Kendall test in determining the trend of meteorological data in relation to the range of changes. In general, the use of efficient methods for determining trends such as the Mann-Kendall test will be of significant help in detecting changes and making relevant decisions.

Keywords: Mann-Kendall, trend, range, detecting

تبیین اقدامات سازشی کشاورزان گندم‌کار دشت مغان نسبت به پیامدهای تغییر اقلیم

مجتبی سوختانلو[۱]*، یاسر باهنر[۲]، مجید رئوف[۳]

۱- دانشیار، دانشکده علوم و فناوری کشاورزی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مدیریت کشاورزی، دانشکده علوم و فناوری کشاورزی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

۳- استاد، دانشکده علوم و فناوری کشاورزی و پژوهشکده مدیریت آب، گروه مهندسی آب، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

نویسنده مسئول: *msookhtanlo@gmail.com

چکیده

اقلیم، تعیین‌کننده اصلی بهره‌وری عوامل تولید محصولات زراعی از جمله گندم، در بخش کشاورزی است. با پذیرش تغییرات شدید اقلیمی، توجه به مسئله "سازش با اقلیم" یک راهبرد اجتناب ناپذیر در میان کشاورزان تلقی می‌شود. لذا، این تحقیق به دنبال آن است تا اقدامات سازشی کشاورزان گندم‌کار دشت مغان نسبت به پیامدهای تغییر اقلیم را تبیین نماید. جامعه آماری تحقیق، شامل همه کشاورزان گندم‌کار (کشت آبی) در دشت مغان به تعداد ۷۰۰۱ نفر بودند. با کمک روش چندمرحله‌ای و استفاده از جدول بارتلت و همکاران، حجم نمونه ۳۷۰ نفر از سه شهرستان بیله‌سوار، پارس‌آباد و گرمی تعیین شد. با توجه به یافته های تحقیق، "بارندگی شدید و ناگهانی"، "سرمازدگی محصولات" و "دوره خشکسالی" مهم‌ترین اثرات فاکتورهای تغییر اقلیمی بودند. همچنین، اقدامات وجین و تنک بیشتر محصولات زراعی، استفاده بیشتر از ارقام و بذور سازگار و تغییر دادن زمان برخی عملیات های کشاورزی، مهم‌ترین اقدامات سازشی کشاورزان جهت مواجهه با پیامدهای تغییراقلیم بودند. تغییر الگوهای کشت رایج در منطقه، تقویت دسترسی به روش‌های آبیاری تحت فشار، تسهیل و بهبود شرایط بیمه کشاورزی، ارایه روش‌های فنی کاراتر، بهبود مدیریت مزرعه و ارایه تسهیلات مالی و حمایتی بر بهبود اقدامات سازشی کشاورزان در مواجهه با تغییر اقلیم اثرگذار خواهد بود.

کلید واژه‌ها: تغییر اقلیم، کشاورزی، گندم، رفتار سازشی، دشت مغان

مقدمه

امروزه از تغییر اقلیم، به عنوان یکی از مهم‌ترین چالش های زیست محیطی قرن بیست و یکم یاد می‌شود که پیامدهای جدی اقتصادی به دنبال دارد. اگر چه بخش‌های مختلف اقتصادی اعم از کشاورزی، جنگل‌داری، آب، صنعت، گردشگری، انرژی و حتی بازارهای مالی و بیمه از تغییرات اقلیم متأثرند. اما در این میان بخش کشاورزی وابسته‌ترین بخش به اقلیم است و اقلیم تعیین‌کننده اصلی مکان، منابع تولید و بهره‌وری فعالیت‌های کشاورزی است (Ricart et al., 2025). با توجه به اهمیت تغییرات آب و هوا، دانستن اینکه آسیب‌پذیرترین گروه از جمله کشاورزان چگونه به این تغییرات پاسخ می‌دهند و چگونه می‌توانند با این تغییرات و وضعیت جدید سازگار باشد، اهمیت بسیاری دارد (Kaushik and Sharama, 2015). در سال‌های اخیر، مسأله تغییر اقلیم یکی از مهم‌ترین چالش‌هایی بوده که ذهن محققان سازمان‌های ملی و بین المللی را به خود مشغول کرده است. وقوع سیل‌های بسیار مخرب، گرما و سرماهای بی‌موقع، خشکسالی‌ها، بالا رفتن سطح آب اقیانوس ها و دریاها، شیوع آفات و بیماری‌های گیاهی و جانوری، کاهش ضخامت لایه ازن و غیره از جمله مواردی هستند که بحث تغییر اقلیم را در محافل علمی جهان مطرح ساخته است (Ahmed et al., 2025). تغییرات اقلیمی، به سرعت در حال تبدیل شدن به یکی از جدیترین خطراتی است که بشریت با آن روبرو است. از طرفی اقلیم، یکی از اصلی‌ترین عوامل محیطی است که همه‌ی موجودات زنده وغیر زنده را به شکل مستقیم و غیر مستقیم تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. شناخت وضعیت هوا و تغییرات آن از گذشته‌های دور مورد توجه دانشمندان علوم مختلف بوده است. با توجه به تغییرات شدید اقلیمی، این موضوع بیش از پیش نظر بسیاری از پژوهش‌گران را به خود جلب کرده است. اقلیم، شرایط متوسط آب و هوا برای یک محدوده‌ی خاص و یک دوره‌ی خاص است، بنابراین توجه به این مسئله بسیار ضروری می‌باشد (Mensah, 2025). با این حال بررسی توان سازگاری نسبت به تغییرات اقلیمی و علل های تاثیر گذار بر این موضوع می تواند از اهمیت و ضرورت بالایی برخوردار باشد. در تعریف مختصری از توان سازگاری می‌توان چنین بیان کرد که، فرایند تصمیم گیری و اجرای مجموعه ای از اقدامات برای حفظ ظرفیت مقابله با تغییرات پیش بینی شده در حال حاضر یا در آینده سازگاری گفته می‌شود (Nelson et al., 2007). تغییرات اقلیم علاوه بر عملکرد محصولات کشاورزی بر ریسک عملکرد محصولات نیز اثر می‌گذارد (حسینی و همکاران، ۱۳۹۲). لذا سازگاری در جوامع روستایی و کشاورزی که قادرند خود را از طریق روش‌های متنوع با تغییرات آب و هوایی سازگار نمایند، باعث تعدیل خسارت‌های بالقوه می‌شود و همچنین، به مردم درکاهش عوارض جانبی و یا مشکلات غیر مستقیم مانند مهاجرت، ناخواسته خالی شدن روستاها، تغییر اجباری شغل و حتی دلسرد شدن جوانان روستایی از اشتغال در بخش کشاورزی کمک خواهد کرد. امروزه فعالیت های انسان می‌تواند اقلیم را که یکی از اجزای محیط می‌باشد تحت تأثیر قرار دهد و اقلیم نیز به نوبه خود بر کشاورزی، منابع غذایی انسان و دام‌ها تأثیر می‌گذارد. بدون شک عواملی همچون افزایش جمعیت، افزایش تقاضای آب، تخریب شدید جنگل ها، تغییر کاربری اراضی، توسعه نابجای صنعتی در کنار فعالیت های کشاورزی از عوامل تحریک تغییر اقلیم در مناطق مختلف محسوب می‌شود (بصیری‌راد و همکاران،۱۳۹۴). نتیجه چنین تغییراتی سبب بروز خشکسالی ها، تغییر پارامترهای هواشناسی مانند نوع و مقدار بارندگی و شاخص‌های حرارتی بوده و بدین ترتیب بروز مشکلاتی در امور کشاورزی، اقتصادی و حتی اجتماعی، کمبود مواد غذایی و کاهش منابع

آب از تبعات چنین تغییراتی است. بنابراین، توجه به مسئله تغییرات اقلیمی و شناسایی علل ها و پارامترهای تأثیرگذار و همچنین راه و روش‌های مقابله با این تغییرات پیش از پیش ما را وادار به جستجوی راه حل برای کاهش خطرات ناشی از این مسئله و همچنین سازگاری‌ها نسبت به این تغییرات را می‌نماید.

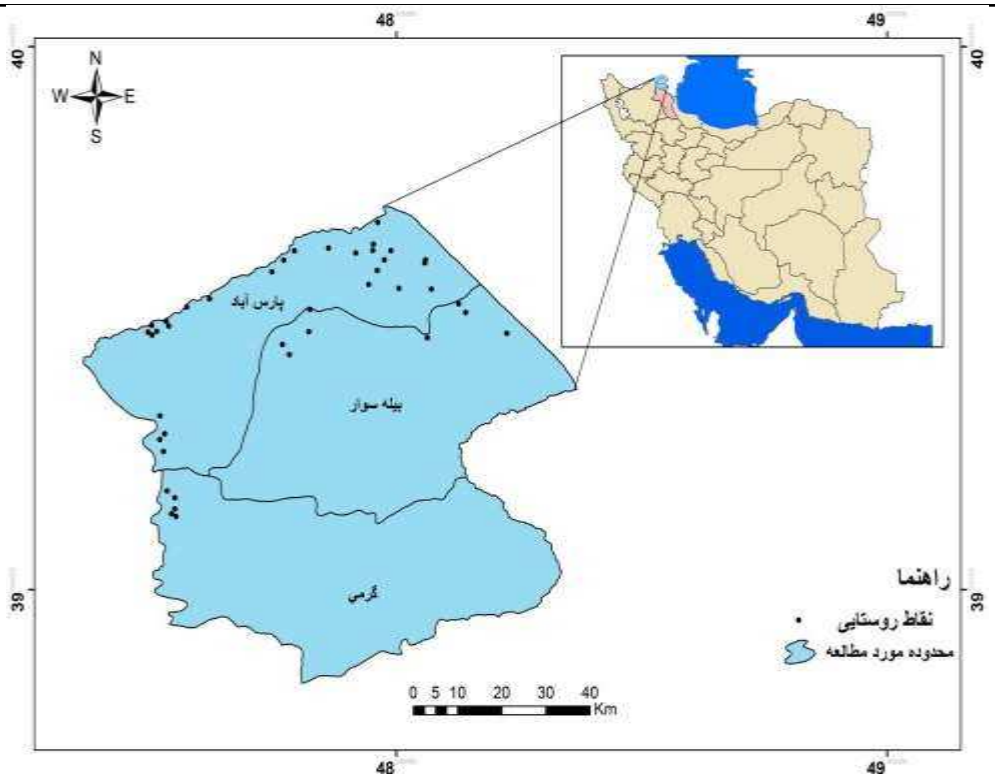
جمشیدی و همکاران (۱۳۹۴)، در پژوهشی سازگاری کشاورزان با تغییرات اقلیمی در شهرستان سیروان در استان ایلام نتیجه گرفتند که اقدامات غالب کشاورزان شامل بی عملی، تغییر در زمان کاشت و استفاده از ارقام و واریته های جدید و مقاوم به خشکی را برای سازگاری با تغییرات آب و هوایی استفاده کردند. کشاورز (۱۳۹۷)، در بررسی سازگاری استراتژی‌های مدیریت مزرعه با تغییرات اقلیمی در استان فارس نتیجه گرفت که تفاوت‌های معناداری در انتخاب استراتژی‌های کاهش و سازگاری با تغییرات اقلیمی وجود دارد و اقدامات سازگاری بیشتر توسط کشاورزان اتخاذ شده است. مطابق نتایج از میان اقدامات سازشی، افزایش کاشت ارقام و واریته های مقاوم و سازگار به خشکی، بیمه محصولات کشاورزی، استفاده از سموم و کودهای شیمیایی و تغییر زمان آبیاری مهم‌ترین اقدامات تلقی می شد. همچنین از جمله راهبردهای سازگاری در شرایط تغییر اقلیم نیز می توان به آیش‌گذاری و رعایت تناوب زراعی، کم خاک‌ورزی یا بی‌خاک‌ورزی و مصرف کودهای ارگانیک در اولویت اقدامات قرار داشتند.

منساح (Mensah, 2025)، در تشخیص میدانی چالش‌های سازگاری کشاورزان با تغییرات اقلیمی نتیجه گرفت که سه استراتژی کلیدی سازگاری در کشاورزان جهت مواجهه با خشکسالی وجود دارد. این استراتژی‌ها شامل اقدام به استفاده از ارقام و بذور سازگار و کاشت گونه‌های زراعی محلی؛ دوم، گسترش اندازه مزارع خود را برای افزایش تولید در شرایط خشکسالی، و سوم مهاجرت برای زراعت بهتر می‌باشد. این مطالعه همچنین، نشان داد که عوامل اجتماعی-اقتصادی مانند درآمد مزرعه، مالکیت زمین و عضویت در انجمن‌های کشاورزان نیز بر اتخاذ برخی شیوه‌های مواجهه با خشکسالی تأثیر می‌گذارند. احمد و همکاران (Ahmed et al., 2025)، در بررسی راهبردهای سازگاری کشاورزان با تغییرات اقلیمی و نقش آگاهی و آموزش زیست‌محیطی در آفریقا نتیجه گرفتند که ادراک کشاورزان به تغییر اقلیم غالباً شامل تغییرات در الگوهای دما و بارندگی بوده است. آنان، همچنین از افزایش سیل و خشکسالی و کاهش تولید محصولات کشاورزی خبر می‌دهند. مهم‌ترین اقدامات سازشی نیز، شامل تنوع‌بخشی به محصولات کشاورزی، تغییر محصولات، کاشت محصولات مقاوم در برابر خشکسالی و تغییر زمان عملیات کشاورزی تعیین شد. ریکات و همکاران (Ricart et al., 2025)، در بررسی رفتار کشاورزان ایتالیایی در مواجهه با تغییرات اقلیمی، نتیجه گرفتند که کشاورزان اقدامات تطبیقی، از جمله خدمات اقلیمی و بیمه را با مکانیسم‌های پیشگیرانه مانند کاهش مصرف کود، تناوب و تنوع‌بخشی به محصولات و معرفی تکنیک‌های حفاظت از خاک ترکیب می‌کنند. با این حال، آنها با موانعی مانند کمک‌های ضعیف دولتی، سرمایه‌گذاری‌های گران‌قیمت و مقررات پیچیده‌ی همپوشانی مواجه می‌شوند. در مورد فرآیندهای تصمیم‌گیری، نتایج نشان داد که ادراک کشاورزان درباره پیامدهای تغییر اقلیمی می‌تواند به طور معقولی تغییرات در رفتار کشاورزان در مورد اثرات اقلیمی را پیش‌بینی کند. جالب توجه است که عواملی مانند تجربه کشاورزی، اندازه مزرعه، سطح زیر آبیاری و نوع محصول اصلی به طور قابل توجهی بر نحوه درک خطرات و اتخاذ اقدامات تأثیر می‌گذارند.

همان‌گونه که در پیش به آن اشاره گردید، گندم یک کالای استراتژی بوده و جزء کالاهای اصلی در سبد غذایی انسان ها قرار دارد و علاوه بر آن در تغذیه دام نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین، از گندم می توان به عنوان یک محصول ضرروری نام برد که نقش به‌سزایی در تأمین امنیت غذایی انسان و دام دارد. از دیدگاه اقلیم شناسی، کشور ایران در منطقه ای خشک و نیمه خشک واقع شده است و بیش از دوسوم مساحت کشور را آب و هوای خشک و نیمه خشک پوشانده است. گندم، محصولی بسیار استراتژیک و در عین حال حساس به پیامدهای تغییر اقلیم است. از آنجایی که تولید محصولات کشاورزی بر ویژگی‌های آب و هوایی متکی می‌باشد، لذا بروز تغییرات اقلیمی، تولید این محصول را بیش از گذشته متأثر خواهد ساخت. دشت مغان در استان اردبیل، یکی از مناطق مهم تولید محصول کشاورزی گندم است. بر این اساس، به منظور کاهش اثرات منفی ناشی از تغییرات اقلیمی، بررسی عوامل مؤثر بر سازگاری با آن ضروری و دارای اهمیت به نظر می‌رسد. منظور از سازگاری، استراتژی و راهکارهایی است که بتواند کمترین آسیب ممکن را در مقابل اثرات منفی تغییرات اقلیمی به بار آورد. بنابراین، آگاهی و درک اینکه چه عواملی بر توان سازگاری گندم‌کاران دشت مغان نسبت به تغییرات اقلیمی تأثیر می‌گذارد ضروری به نظر می‌رسد. لذا، رتبه‌بندی اثرات فاکتورهای اقلیمی کشاورزان طی پنج سال گذشته، رتبه‌بندی ادراک کشاورزان نسبت به پیامدهای تغییر اقلیم و در نهایت اقدامات سازشی کشاورزان با پیامدهای تغییراقلیمی از اهداف اصلی این تحقیق تعیین شد.

روش تحقیق

دشت مغان، جلگه‌ای است در ساحل جنوبی رود ارس و غرب دریای خزر که قسمت عمده آن در جمهوری آذربایجان و بخشی نیز شمالی‌ترین قسمت استان اردبیل در (شمال غربی ایران) که از شمال به رود ارس و جمهوری آذربایجان و شرق به جمهوری آذربایجان و از غرب به استان آذربایجان شرقی و جنوب به شهرستان مشکین‌شهر واقع بوده که به علت وجود شرایط مناسب کشاورزی، وجود رودخانه ارس و سد اصلاندوز، همچنین وجود خاک حاصل‌خیز و دما و رطوبت مناسب، یکی از قطب‌های مطرح کشاورزی محسوب می‌رود که مهم‌ترین محصولات کشاورزی در این منطقه شامل ذرت، گندم، جو و برنج است. حداکثر ارتفاع این دشت از سطح دریا، ۵۰۰ متر و حداقل آن ۵۰ متر بوده و مساحت کل حوزه آبریز مغان بیش از ۵۵۴۵ کیلومترمربع است. کل مساحت سطح زیر کشت دشت مغان حدوداً ۲۸۰۴۹۷ هکتار بوده که ازاین‌بین حدود ۹۰۵۳۴ هکتار اراضی آبی که حدود ۲۴ هزار از این اراضی آبی متعلق به کشت صنعت‌های دشت مغان می‌باشد. اقلیم منطقه ازنظر تقسیم‌بندی آب و هوایی جزء مناطق نیمه بیابانی خفیف بوده و میانگین بارندگی سالیانه منطقه طبق آمار هواشناسی ۳۸۹ میلی‌متر می‌باشد (باهنر، ۱۳۹۷). این منطقه از سه شهرستان گرمی، شهرستان بیله سوار و شهرستان پارس‌آباد تشکیل شده است.



شکل ۳-۱- موقعیت دشت مغان استان اردبیل

جامعه آماری تحقیق، شامل کلیه گندم‌کاران آبی در دشت مغان به تعداد ۷۰۰۱ نفر بودند. مطابق شکل ۳، دشت مغان از سه شهرستان تشکیل‌شده است. شهرستان پارس‌آباد با ۴ بخش و ۸ دهستان به تعداد ۳۴۵۱ کشاورز گندمکار آبی و شهرستان بیله سوار از ۲ بخش و ۴ دهستان با ۲۸۰۰ گندمکار کشت آبی و شهرستان گرمی از ۳ بخش و ۶ دهستان با ۷۵۰ گندمکار کشت آبی را شامل می‌شدند. با استفاده از جدول بارتلت و همکاران (Bartlett et al., 2003)، با خطای پنج درصد، حجم نمونه برابر با ۳۶۴ نفر تعیین گردید و برای افزایش ضریب اطمینان در مجموع، حجم نمونه به ۳۷۰ نفر افزایش یافت. در این پژوهش، برای تعیین نمونه‌های تحقیق، از روش چندمرحله‌ای استفاده شد. در مرحله اول، ابتدا شهرستان‌ها به نسبت جمعیت گندم‌کار دارای کشت آبی، مبنای شروع نمونه‌گیری بوده و بخش‌ها و دهستان‌های شهرستان‌ها، که دارای غالب کشت آبی بودند تعیین شدند. در مرحله دوم از هر شهرستان، تعدادی روستا با رعایت پراکنش و تناسب جمعیتی تعیین شدند. بر این مبنا، از شهرستان بیله‌سوار، سه روستا به تعداد ۱۵۲ نفر، شهرستان پارس‌آباد، چهار روستا به تعداد ۱۸۷ نفر و شهرستان گرمی نیز یک روستا، به تعداد ۳۱ نفر به طور تصادفی تعیین شدند. ابزار پژوهش، شامل پرسشنامه و مصاحبه با گندمکاران دشت مغان استان اردبیل بود. متغیرهای مورد نظر تحقیق شامل متغیرهای مربوط به ویژگی‌های فردی و اقتصادی پاسخ‌گویان به صورت سوالات باز و چند وجهی بود. متغیرهای اصلی تحقیق، شامل متغیرهای اثرات فاکتورهای اقلیمی (هشت گویه به صورت طیف لیکرت از خیلی کم تا خیلی زیاد (۱ تا ۵))، ادراک پاسخ گویان نسبت به پیامدهای تغییر اقلیم (۱۸ گویه به صورت طیف لیکرت از خیلی کم تا خیلی زیاد (۱ تا ۵)) و اقدامات سازشی کشاورزان

(۲۵ گویه به صورت طیف لیکرت از خیلی کم تا خیلی زیاد (۱ تا ۵)) بود. جهت تعیین روایی ابزار تحقیق، دیدگاه کارشناسان سازمان جهاد کشاورزی، اعضای هیأت علمی دانشگاه محقق اردبیلی درباره جزییات ابزار تحقیق در قالب روایی صوری مبنای کار قرار گرفت و اصلاحات لازم اعمال شد. جهت تعیین پایایی ابزار تحقیق نیز، پرسشنامه میان ۳۰ نفر از میان افراد خارج از نمونه تحقیق، ولی در داخل جامعه آماری دشت مغان (شهرستان‌های بیله سوار، پارس آباد و گرمی) توزیع گردید. سپس توسط نرم‌افزار SPSS و با استفاده از ضریب آلفای کرونباخ (مقادیر بالای ۰/۷) مناسب بودن گویه‌ها تأیید شد.

نتایج و یافته ها

ویژگی‌های فردی و اقتصادی پاسخ‌گویان

مطابق نتایج تحقیق، پاسخگویان با میانگین سنی ۴۶/۶ سال بوده که بیشترین فراوانی بر اساس سن مربوط به دامنه سنی ۴۱ تا ۵۰ سال بود. بیشترین فراوانی تحصیلات، مربوط به پاسخ‌گویان دارای تحصیلات دیپلم و فوق دیپلم بوده که ۲۳/۵ درصد از حجم نمونه آماری را تشکیل داده اند. بیشترین فراوانی تعداد نیروی کار کشاورزی (۷۹/۵ درصد)، مربوط به پاسخ‌گویان گروه ۱ (۳ نفر و کمتر) بود. پاسخگویان دارای میانگین ۲۷/۴ سال سابقه کار در کشاورزی بودند. همچنین، بیشترین فراوانی سابقه کار کشاورزی (۲۶/۵ درصد) مربوط بع دامنه ۳۱-۴۰ سال بود. بیشتر پاسخ‌گویان (۵۴/۳ درصد) در تعاونی‌های تولید کشاورزی یا در شرکت های کشاورزی عضویت داشتند. غالب پاسخ‌گویان (۴۰/۵ درصد)، دارای زمین آبی بوده و ۶۵/۱ درصد کشاورزان، خرده مالک (۰/۱ تا ۵ هکتار) محسوب می‌شدند. از لحاظ عملکرد نیز، بیشترین فراوانی (۴۵/۹ درصد)، مربوط به حد فاصل ۴/۱ تن تا ۵ تن تعیین شد. همچنین، از لحاظ استفاده از بیمه کشاورزی، بیشتر پاسخ گویان (۵۱/۴ درصد) دارای بیمه محصولات کشاورزی بودند.

رتبه‌بندی اثرات فاکتورهای اقلیمی کشاورزان، طی ۵ سال گذشته

با توجه به یافته‌های موجود درباره اثرات فاکتورهای اقلیمی توسط پاسخ‌گویان در (جدول ۱)، گویه‌های "بارندگی شدید و ناگهانی"، "سرمازدگی محصولات" و "دوره خشکسالی" به ترتیب در رتبه‌های اول تا سوم قرار داشتند. این در حالی است که کمترین رتبه کسب شده مربوط به گویه "سیلاب" بدست آمد.

جدول ۱- رتبه‌بندی فاکتور های اقلیمی به وقوع پیوسته در ۵ سال گذشته در میان پاسخ گویان

اثرات فاکتورهای اقلیمی	میانگین	انحراف معیار	رتبه
بارندگی شدید و ناگهانی	۱/۸۶۴	۱/۶۲۴	۱
سرمازدگی محصولات	۱/۰۳۲	۰/۷۹۵	۲
دوره خشکسالی	۰/۸۰۵	۰/۷۳۶	۳
باد شدید	۰/۵۶۴	۱/۰۴۷	۴

تگرگ شدید	۰/۴۰۸	۰/۶۲۳	۵
گرد باد و طوفان	۰/۳۴۰	۰/۷۳۰	۶
گرمازدگی محصولات	۰/۳۲۱	۰/۷۹۷	۷
سیلاب	۰/۲۴۸	۰/۴۶۸	۸

رتبه‌بندی ادراک کشاورزان نسبت به پیامدهای تغییر اقلیم

مطابق نتایج جدول ۲، درباره درک و تصور کشاورزان نسبت به پیامدهای تغییر اقلیم، بیشترین میانگین کسب شده به ترتیب رتبه، مربوط به گویه‌های "افزایش آفات در سال‌های اخیر"، "کاهش منابع آبی و بروز خشکسالی" و "کاهش میزان بارش باران و برف" بدست آمد. همچنین کمترین رتبه‌های بدست امده نیز مربوط به گویه‌های"افزایش میزان گرد و غبار، در سال‌های اخیر"، "افزایش میزان تگرگ و شدت خسارت آن در سال‌های اخیر" و " افزایش میزان طوفان و بادهای خسارت‌زا در سال‌های اخیر" تعیین شد.

جدول ۲- رتبه‌بندی ادراک پاسخ‌گویان نسبت به پیامدهای تغییر اقلیم

ادراک درباره پیامدهای تغییر اقلیم	میانگین	انحراف معیار	رتبه
افزایش آفات در سال‌های اخیر	۴/۴۱۶	۰/۸۸۶	۱
کاهش منابع آبی و بروز خشکسالی	۴/۳۱۸	۰/۹۳۴	۲
کاهش میزان بارش باران و برف	۴/۱۲۷	۰/۷۸۰	۳
کاهش سطح آب و یا خشک شدن رودخانه های فصلی	۴/۱۱۳	۰/۸۳۸	۴
افزایش نسبی میزان دما، نسبت به سال‌های گذشته	۴/۰۶۲	۰/۸۰۵	۵
تداوم دوره گرم، نسبت به سال‌های گذشته	۴/۰۴۵	۰/۸۰۶	۶
طولانی شدن فصول خشک، نسبت به سال‌های گذشته	۴/۰۳۵	۰/۸۳۰	۷
تغییرات کلی آب و هوا، نسبت به سال‌های گذشته	۴/۰۱۰	۰/۸۵۲	۸
تأخیر زمانی در شروع دوره‌های بارش و تسریع در اتمام دوره‌های بارش در سال‌های اخیر	۳/۹۰۵	۰/۸۷۳	۹
کوتاه‌تر شدن دوره فصول سرد، نسبت به سال‌های گذشته	۳/۷۱۳	۰/۹۵۹	۱۰
کاهش یکنواختی بارش در مناطق مختلف در سال‌های اخیر	۳/۶۴۳	۰/۹۵۲	۱۱
افزایش سرمازدگی یا گرمازدی محصولات در سال‌های اخیر	۳/۶۱۶	۱/۱۵۴	۱۲

افزایش قابل پیش بینی نبودن بارش، در سال‌های اخیر	۳/۶۰۲	۱/۰۰۲	۱۳
افزایش بارش های تند و خسارت‌زا در سال‌های اخیر	۳/۵۵۱	۱/۰۱۶	۱۴
افزایش وقوع سیلاب ها، نسبت به سال‌های گذشته	۳/۴۳۲	۱/۱۹۷	۱۵
افزایش میزان طوفان و بادهای خسارت‌زا در سال‌های اخیر	۳/۳۵۴	۱/۱۲۶	۱۶
افزایش میزان تگرگ و شدت خسارت آن در سال‌های اخیر	۳/۱۴۰	۲/۳۶۳	۱۷
افزایش میزان گرد و غبار، در سال‌های اخیر	۲/۹۲۷	۱/۰۸۳	۱۸

مقیاس: ۱- خیلی کم، ۲- کم، ۳- متوسط، ۴- زیاد، ۵- خیلی زیاد

رتبه‌بندی اقدامات سازشی کشاورزان در مواجهه با پیامدهای تغییراقلیم

مطابق نتایج پژوهش (جدول ۳)، در ارتباط با اقدامات سازشی کشاورزان جهت مواجهه با پیامدهای تغییراقلیم، گویه‌های"اقدام به وجین و تنک بیشتر محصولات زراعی"، "اقدام به استفاده از ارقام و بذور سازگار" و "تغییر دادن زمان برخی عملیات های کشاورزی" به ترتیب در رتبه‌های اول، دوم و سوم اقدامات سازشی کشاورزان بدست آمد. با این وجود، گویه‌های "افزایش اقدام به فروش اراضی"، "افزایش اقدام به مهاجرت" و "افزایش اقدام به اجاره دادن اراضی" به ترتیب در رتبه‌های آخر اقدامات سازشی قرار داشتند.

جدول ۳- اقدامات سازشی کشاورزان نسبت به پیامدهای تغییر اقلیم

استراتژی های سازگاری	میانگین	انحراف معیار	رتبه
اقدام به وجین و تنک بیشتر محصولات زراعی	۳/۷۹۷	۱/۵۴۰	۱
اقدام به استفاده از ارقام و بذور سازگار	۳/۰۹۴	۱/۲۸۷	۲
تغییر دادن زمان برخی عملیات های کشاورزی	۲/۸۸۶	۱/۴۱۹	۳
افزایش استفاده از پساب‌ها	۲/۸۴۸	۱/۸۶۰	۴
افزایش اقدامات مشارکتی کشاورزی	۲/۷۷۵	۱/۵۵۸	۵
گرایش بیشتر به مشاغل دوم و غیرکشاورزی	۲/۷۵۹	۱/۶۲۷	۶
کاهش تعداد دفعات آبیاری	۲/۷۲۹	۱/۵۹۱	۷
تغییر دادن زمان‌های آبیاری	۲/۶۴۵	۱/۴۹۳	۸
کاهش دادن هزینه‌های زراعی	۲/۵۴۳	۱/۵۰۸	۹
افزایش استفاده از فناوری‌های نوین زراعی	۲/۴۴۰	۱/۲۵۲۸	۱۰
افزایش اقدام به فروش دارایی های نقدی و غیرنقدی	۲/۲۸۱	۱/۶۹۷	۱۱
افزایش استفاده از وام ها و تسهیلات مالی	۲/۲۷۵	۱/۶۸۰	۱۲

کاهش استفاده از نهاده‌های کشاورزی	۲/۲۲۹	۱/۲۶۸	۱۳
افزایش اقدام به بیمه محصولات کشاورزی	۱/۵۴۹	۱/۴۲۱	۱۴
افزایش اقدام به کشت‌های مختلط در مزرعه	۱/۴۱۸	۱/۶۴۷	۱۵
گرایش بیشتر جهت استفاده از آبیاری تحت فشار	۱/۳۲۹	۱/۶۹۳	۱۶
توجه بیشتر به ایجاد سیستم کشاورزی یکپارچه	۱/۲۹۷	۱/۴۶۴	۱۷
افزایش فروش محصول واسطه ها و دلالان	۱/۰۶۴۹	۱/۲۵۲۰	۱۸
کاهش مقدار زیرکشت بردن زمین‌ها	۱/۰۶۴۹	۱/۳۶۱	۱۹
افزایش اقدام به پیش فروش کردن محصول	۰/۸۱۸	۱/۱۳۴	۲۰
آیش گذاشتن بیشتر زمین‌های زراعی	۰/۷۵۶	۱/۳۲۹	۲۱
افزایش اقدام به تغییر کاربری اراضی	۰/۵۸۶	۱/۱۲۸	۲۲
افزایش اقدام به اجاره دادن اراضی	۰/۵۵۹	۱/۱۵۸	۲۳
افزایش اقدام به مهاجرت	۰/۵۲۹	۱/۱۲۶	۲۴
افزایش اقدام به فروش اراضی	۰/۳۴۸	۰/۹۳۷	۲۵

مقیاس: ۰-هیچ، ۱- خیلی کم، ۲- کم، ۳- متوسط، ۴- زیاد، ۵- خیلی زیاد

نتیجه گیری

با توجه به یافته های تحقیق، در میان پاسخ‌گویان، گویه‌های "بارندگی شدید و ناگهانی"، "سرمازدگی محصولات" و "دوره خشکسالی" به ترتیب در رتبه‌های اول تا سوم اثرات فاکتورهای تغییر اقلیمی قرار داشتند. به نظر می‌رسد همگام با نتایج احمد و همکاران (Ahmed et al., 2025) و ریکات و همکاران (Ricart et al., 2025)، تغییرات دمایی، بارش و شروع خشکسالی بیشترین اثرگذاری جهت بروز رفتارهای سازشی کشاورزان ایجاد کرده است. بنابراین می‌توان گفت که اکثر کشاورزان تجربه وقوع فاکتورهای اقلیمی را داشته اند و وقوع آن را تجربه کرده‌اند و این فرایند بر ادراک از پیامدهای تغییر اقلیم کشاورزان اثرگذار خواهد بود. به نظر می‌رسد، بیشترین پیامدهای تغییر اقلیمی اثرگذار در منطقه تحقیق، شامل تغییرات در بارش (اثرات بارندگی شدید و ناگهانی نسبت به گذشته و بروز خشکسالی) و تغییرات در دما (بروز سرمازدگی) بوده است که زمینه انگیزش جهت اقدامات سازشی کشاورزان را ایجاد کرده است. آمادگی ادراکی نیز، بر بروز اقدامات مواجهه با تغییرات اقلیم مؤثر بوده است. توجه به انگیزش ایجاد شده و ایجاد فرصت مطلوب جهت ارایه راهکارهای تخصصی‌تر در مواجهه با ایجاد شرایط سازگار، یک راهبرد کوتاه‌مدت جهت مواجهه با پیامدهای تغییر اقلیم محسوب می‌شود. از جمله این راهکارها، ایجاد تغییرات عمده در جایگزینی سریع بذور سازگار با شرایط خشکسالی، کسب آموزش‌های صحیح درباره اقدامات فنی مطلوبتر در مواجهه با تغییر اقلیم، تغییر الگوهای کشت رایج در منطقه، مطابق شرایط تغییر اقلیم و تقویت دسترسی به روش‌های آبیاری تحت فشار محسوب می‌شود.

درباره درک و تصور کشاورزان نسبت به پیامدهای تغییر اقلیم، بیشترین پیامدهای اثرگذار شامل "افزایش آفات در سال‌های اخیر"، "کاهش منابع آبی و بروز خشکسالی" و "کاهش میزان بارش باران و برف" تعیین شده است که با نتایج ریکات و

همکاران (Ricart et al., 2025) همخوانی نداشت. به عبارتی از دیدگاه کشاورزان این پدیده‌ها، اولین پیامدهای تغییر اقلیم محسوب می‌شدند که قابل محسوس تلقی می‌شد. در این راستا، به نظر می‌رسد مدیریت مبارزه با آفات زراعی، توسعه روش‌های آبیاری تحت فشار و مدیریت منابع آبی بایستی در در اولویت برنامه‌های مواجهه با تنش آبی در دشت مغان قرار بگیرد.

مطابق نتایج، در ارتباط با اقدامات سازشی کشاورزان جهت مواجهه با پیامدهای تغییراقلیم، از میان انواع اقدامات فنی، اقتصادی، اجتماعی و تغییر مکانی، اقدامات فنی زراعی در اولویت اقدامات کشاورزان قرار داشت. اقدام به وجین و تنک بیشتر محصولات زراعی، اقدام به استفاده از ارقام و بذور سازگار و تغییر دادن زمان برخی عملیات های کشاورزی، شامل این نوع اقدامات فنی بوده است. این نتایج، با یافته‌های جمشیدی و همکاران (۱۳۹۴)، کشاورز (۱۳۹۷) و منساح (Mensah, 2025) همخوانی داشت. در این زمینه، به نظر می‌رسد تنوع در اقدامات فنی در قالب کسب آموزش‌های لازم و شناخت بیشتر درباره ابعاد دیگری از اقدامات سازشی (اقتصادی، اجتماعی)، توان سازش کشاورزان در مواجهه با تغییر اقلیم را بهبود خواهد داد. اقدامات تکمیل‌کننده، شامل تسهیل و بهبود شرایط بیمه کشاورزی، ارایه روش‌های فنی کاراتر، بهبود مدیریت مزرعه و ارایه تسهیلات مالی و حمایتی از روش‌های آبیاری تحت فشار می‌تواند باشد.

منابع

۱- یاسر. (۱۳۹۷). بررسی عوامل مؤثر بر توان سازگاری کشاورزان گندم‌کار در مواجهه با تغییرات اقلیمی (مطالعه موردی: دشت مغان، استان اردبیل). پایان‌نامه کارشناسی ارشد در رشته مدیریت کشاورزی. دانشکده علوم و فناوری کشاورزی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل.

۲- بصیری‌راد، م.، شیرانی بیدآبادی، ف.، و کرامت‌زاده، ع. (۱۳۹۴). موانع موجود بر سر راه بکارگیری استراتژی‌های تطبیق با اثرات تغییر اقلیمی از نقطه نظر روستاییان مناطق روستایی بابلسر. سومین همایش ملی پژوهش های محیط زیست و کشاورزی ایران، دانشگاه بوعلی سینا، همدان.

۳- جمشیدی، ع.، نوری زمان آبادی، س.ه.، و ابراهیمی، م.ص. (۱۳۹۴). درک رفتار سازگاری کشاورزان در برابر تغییرات اقلیم: مطالعه موردی مناطق روستایی شهرستان چرداول، استان ایلام. فصلنامه روستا و توسعه، ۱۸ (۲)، ۸۸-۶۵.

۴- حسینی، س. ص.، نظری، م. ر.، و عراقی‌نژاد، ش. (۱۳۹۲). بررسی اثر تغییر اقلیم بر بخش کشاورزی با تأکید، نقش به کارگیری راهبردهای تطبیق در این بخش. تحقیقات اقتصاد و توسعه کشاورزی ایران، ۴۴ (۱)، ۱۶-۱.

۵- کشاورز، م. (۱۳۹۷). واکاوی میزان انطباق راهبردهای مدیریت کشاورزی با تغییر اقلیم: مطالعه موردی استان فارس. علوم ترویج و آموزش کشاورزی ایران، ۱۴ (۲)، ۱۲۳-۱۰۷.

6. Ahmed, M.N.Q., & Givens, J.E. (2025). Farmers' Climate Change Adaptation Strategies and the Role of Environmental Awareness and Education: A Review on Africa. Practices, Perceptions and Prospects for Climate Change Education in Africa. Springer, Cham. 1, 175- 194.

7. Bartlett, J.E., Kotrlik, J.W. & Chadwick, C. (2001). Organizational research: Determining appropriate sample size in survey research. Information Technology, Learning, and Performance Journal, 19(1), 43-50.

8. Kaushik., K. Sharama, 2015. Climate change and rural livelihoods-adaptation and vulnerability in Rajetan. Global NEST Journal, 17(1), 41-49.

9. Mensah, H. (2025). Field diagnosis of farmers' adaptation challenges to climate change in the agricultural urban landscapes. City and Environment Interactions, 27, 100208.

10. Nelson, D.R., Adger,W.N., & Brown, K. (2007). Adaptation to environmental change: contributions of a resilience framework. Annual Review of Environment and Resources, 32, 395-419

11. Ricart, A., Gandolfi, C., & Castelletti, A. (2025). What drives farmers' behavior under climate change? Decoding risk awareness, perceived impacts, and adaptive capacity in northern Italy. Heliyon ,11(1) ,e41328.

Explaining the adaptation measures of wheat farmers in the Moghan Plain towards the consequences of climate change

Mojtaba Sookhtanlou[1]*, Yaser Bahonar[2], Majid Raoof[3]

1 - Associate Professor, Faculty of Science and Technology of Agriculture. University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

2- Graduate in Agricultural Management, Faculty of Science and Technology of Agriculture, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil. Iran.

3– Professor, Faculty of Science and Technology of Agriculture and Water Management Research Institute. University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

* Corresponding author: msookhtanlo@gmail.com

Abstract

Climate is the main determinant of the productivity of crop production factors, including wheat, in the agricultural sector. By accepting severe climate changes, paying attention to the issue of "climate adaptation" is considered an inevitable strategy among farmers. Therefore, this study seeks to explain the adaptation measures of wheat farmers in the Moghan Plain towards the consequences of climate change. The statistical population of the study included all wheat farmers (irrigated farming) in the Moghan Plain, numbering 7001 people. With the help of the multi-stage method and using the Bartlett et al. table, the sample size was determined as 370 people from the three counties of Bilesavar, Parsabad, and Germi. According to the research findings, "heavy and sudden rainfall", "frost damage to crops", and "drought

period" were the most important effects of climate change factors. Also, weeding and thinning of crops, using more compatible varieties and seeds, and changing the timing of some agricultural operations were the most important adaptation measures taken by farmers to face the consequences of climate change. Changing the prevailing cropping patterns in the region, strengthening access to pressurized irrigation methods, facilitating and improving agricultural insurance conditions, providing more efficient technical methods, improving farm management, and providing financial and support facilities will have an impact on improving farmers' adaptation measures in the face of climate change.

Keywords: Climate change, Agriculture, Wheat, Adaptive behavior, Moghan plain

سومین کنفرانس ملی آب و هواشناسی ایران (با محوریت تغییر اقلیم)
The 3rd National Conference on Climatology of Iran (Focusing on Climate Change)
ارومیه ۱۶ مهر ۱۴۰۴

پیش‌نگری تغییرات اقلیمی با مدل‌های CMIP6 تحت سناریوهای SSPs : مطالعه موردی حوزه دریاچه ارومیه

مسعود گودرزی(مسئول)، نوید دهقانی، مهشید کریمی

چکیده

هدف این پژوهش، پیش‌نگری تغییرات اقلیمی در دهه‌های آتی بر اساس مدل‌های CMIP6 تحت سناریوهای خط سیر اجتماعی- اقتصادی مشترک (SSP) و اثرات آن در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه است. لذا در این پژوهش عملکرد این دو مدل در مقیاس‌کاهی برونداد مدل‌های CMIP6 و شبیه‌سازی متغیرهای دما و بارش در حوضه آبخیز دریاچه ارومیه ارزیابی شد. ایستگاه‌های هواشناسی مورد بررسی شامل ۷ ایستگاه همدیدی با دوره آماری ۳۰ سال متناسب با دوره پایه مدل‌ها (۲۰۱۴-۱۹۸۵) می‌باشد. جهت ارزیابی عملکرد مدل‌ها نیز از سنجه‌های خطاسنجی MSE، RMSE، MAE و همچنین R2 بهره گرفته شد. نتایج نشان داد که هر دو مدل در شبیه‌سازی متغیرهای دما و بارش در حوضه مورد مطالعه از توانایی بالایی برخوردارند؛ اما در ایستگاه‌های مختلف و متغیرهای اقلیمی مختلف نتایج متفاوتی دارند. مقایسه سنجه‌های مختلف آماری و نمودارهای مقایسه‌ای نشان داد هر دو مدل در شبیه‌سازی دما از دقت بیشتری نسبت به بارش برخوردار بودند و در شبیه سازی بارش نیز مدل SDSM در بیشتر ایستگاه‌ها موفق‌تر عمل نموده و دارای عدم قطعیت کمتری است. اما دارای فرآیند شبیه‌سازی وقت‌گیر و پیچیده‌تری است در حالیکه مدل LARS-WG دارای سادگی و سرعت عملکرد بیشتری است. در مجموع هیچکدام از مدل‌ها برتری مطلق بر یکدیگر ندارند و علی‌رغم تفاوت‌هایی در شبیه‌سازی، می‌توانند در پیش‌نگری تغییرات اقلیمی مفید واقع شوند و جهت بررسی عدم قطعیت تغییرات اقلیمی لازم است از هر دو مدل و یا مدل‌های مختلف استفاده کرد.

کلید واژه‌ها: تغییراقلیم، حوزه دریاچه ارومیه، ریزمقیاس‌گردانی، LARS-WG، SDSM.

مقدمه

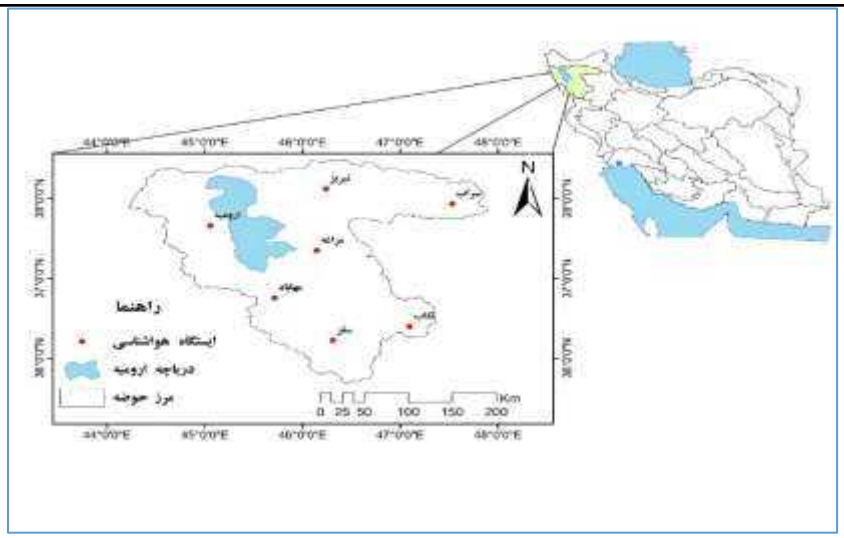
در بیش‌تر تغییرات اقلیمی در طول دهه‌های گذشته همواره موضوع بحث بوده است. دانشمندان یکی از مهم‌ترین اثرات آن را تحت عنوان تشدید چرخه هیدرولوژیکی نام می‌برند که موجب تغییر میزان تبخیر و تعرق و تغییر الگوی بارش می‌شود. تجزیه و تحلیل هیدرولوژیکی، سناریوهای محتمل تغییرات اقلیمی نشان می‌دهد که خشک‌سالی‌های شدید در برخی از مکان‌ها و سیل در مکان‌های دیگر رخ می‌دهد (Yimer et al, 2009). تبعات منفی این پدیده برای بشر تا آنجا می‌تواند مخرب باشد که در بین ده عامل تهدیدکننده بشر در قرن بیست و یکم، مانند فقر، سلاح‌های هسته‌ای، کمبود غذا و غیره پدیده تغییر اقلیم مقام اول را به خود اختصاص داده است (هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم، ۲۰۰۱). در بین عناصر اقلیمی، دما و بارش به دلیل تأثیر گسترده بر سایر عوامل و به خصوص تأثیراتی که بر فعالیت‌های انسانی دارند از اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد به طوری‌که تقریباً بیشترین نمود تغییرات اقلیمی در سطح کره زمین بر روی این دو متغیر متمرکز شده است(مجدی و همکاران، ۲۰۲۲). بنابراین پیش‌بینی بلندمدت آن‌ها جهت اطلاع از میزان تغییرات و در نظر گرفتن تمهیدات لازم به منظور تعدیل اثرات سوء ناشی از تغییرات اقلیمی مورد توجه بسیاری از مجامع علمی جهانی قرار گرفته است. بر همین اساس مدل‌های گردش کلی جو (GCM) توسعه یافته‌اند (کین و همکاران، ۲۰۰۴). هر چند که این مدل‌ها در مقیاس فضایی اتمسفری و قاره‌ای نتایج معنی‌داری را به نمایش می‌گذارند و بخش بزرگی از پیچیدگی سیستم کره زمین را ترکیب می‌کنند، اما ذاتاً قادر نیستند که دینامیک و اشکال با شبکه ریزمقیاس‌تر محلی را به نمایش بگذارند (کارتر و همکاران، ۱۹۹۴؛ ایگلی و همکاران، ۱۹۹۰؛ شارما و همکاران، ۲۰۰۷). لذا ارزیابی تأثیر تغییرات اقلیم در مقیاس محلی نیازمند رویکردی است تا شکاف موقتی و فضایی بین متغیرهای اقلیمی بزرگ مقیاس و متغیرهای هواشناسی با مقیاس محلی را پر کند که در این مورد، رویکرد اساسی همان روش‌های مقیاس‌کاهی هستند (ویلبی و همکاران، ۲۰۰۲). یکی از مناسب‌ترین و معتبرترین ابزارها جهت مقیاس‌کاهی داده‌های GCM استفاده از روش‌های آماری است. در این راستا، سمنوف و همکاران (۱۹۹۸) به مقایسه دو مدل LARS-WG و WGEN بر روی ۱۸ ایستگاه واقع در ایالات متحده، اروپا و آسیا پرداختند نتایج نشان داد که مدل LARS-WG از توانایی خوبی در تولید داده‌های آب و هوایی برخوردار است. هاشمی و همکاران (۲۰۱۰) به مقایسه دو مدل LARS-WG و SDSM در شبیه‌سازی بارش‌های شدید در حوضه کلوتا در نیوزلند پرداختند. نتایج نشان داد که هر دو مدل توانایی‌های مشابه و خوبی دارند. سونیر و همکاران (۲۰۱۵) به مقایسه روش‌های مختلف مقیاس‌کاهی جهت بررسی بارش‌های فرین در اروپا پرداختند. نتایج نشان داد که مدل‌های مقیاس‌کاهی آماری از دقت بیشتری برخوردارند. باباسمایل و همکاران (۲۰۲۱) به ارزیابی عملکرد ۱۵مدل CMIP6 در تغییرات زمانی و مکانی بارش در شمال افریقا پرداختند. نتایج نشان داد که جهت بررسی تغیرات بارش بهتر است از چند مدل برتر استفاده کرد. مسگری و همکاران (۲۰۲۲) به ارزیابی عملکرد مدل‌های CMIP6 در پیش‌نگری تغییرات بارش در شمال آفریقا و خاورمیانه با استفاده از شاخص‌های مختلف خطاسنجی و نمودار تیلور پرداختند. نتایج بیانگر دقت بالای مدل‌های CMIP6 در شبیه سازی بارش در منطقه مورد مطالعه است. پنگ و همکاران (۲۰۲۳) به ارزیابی عملکرد مدل‌های CMIP6 در پیش‌بینی تغییرات دما و بارش در حوضه رودخانه Ishikari در ژاپن پرداختند. نتایج نشان داد که مدل‌های CMIP6 در شبیه‌سازی دما عملکرد بهتری نسبت به بارش به نمایش می‌گذارند. گودرزی و همکاران (۱۳۹۴) به ارزیابی عملکرد مدل‌های مقیاس

کاهی SDSM و LARS-WG در حوضه آبخیز دریاچه ارومیه بر اساس داده‌های گزارش چهارم پرداختند. نتایج حاصل حاکی از عدم برتری مطلق مدل‌ها بر یکدیگر بود. سبحانی و همکاران (۱۳۹۶) به مقایسه سه مدل SDSM، ANN و LARS-WG در شبیه‌سازی تغییرات دما و بارش در شمال غرب ایران پرداختند. نتایج نشان داد که عملکرد مدل‌ها بسته به نوع اقلیم منطقه متفاوت است. زارعیان و همکاران (۱۴۰۱) به ارزیابی دقت مدل‌های CMIP6 در برآورد دما و بارش در ایران پرداختند. نتایج نشان داد که مدل‌های مختلف در ماه‌های متفاوت سال، دقت یکسانی در برآورد دما و بارش کشور ندارند و تغییرپذیری خطای مدل‌ها در برآورد بارش، بیش‌تر از دما است. حافظی مقدس و همکاران (۱۴۰۳) به ارزیابی عملکرد مدل های CMIP6 در پیش‌نگری تغییرات دما و بارش در محدوده چاه نیمه های استان سیستان و بلوچستان پرداختند. نتایج نشان داد مدل‌های مورد بررسی توانایی بالایی در شبیه‌سازی دما و بارش در منطقه مورد مطالعه دارند. بررسی پیشینه پژوهش نشان داد که از میان مدل‌های مقیاس‌کاهی در بررسی تغییرات اقلیمی مدل‌های SDSM و LARS-WG از پرکاربردترین مدل‌های آماری هستند. لذا در این مقاله عملکرد این دو مدل در مقیاس‌کاهی برونداد آخرین نسل مدل‌های جهانی آب و هوا یعنی CMIP6 در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه مورد بررسی قرار گرفته است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه این پژوهش، حوزه آبخیز دریاچه ارومیه در شمال غرب ایران است که در مختصات جغرافیایی ۴۴ درجه و ۷ دقیقه تا ۴۷ درجه و ۵۳ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۳۰ دقیقه عرض شمالی قرار گرفته است. وسعت این حوضه برابر با ۵۱۸۷۶ کیلومتر مربع است. این حوضه به دلیل موقعیت جغرافیایی و کوهستانی بودن، مرطوب ترین حوزه آبخیز داخلی ایران است (حسینی، ۱۳۹۴). متغیرهای هواشناسی مورد بررسی در این پژوهش نیز شامل بارش و دمای کمینه و بیشینه در طول دوره آماری (۲۰۱۴-۱۹۸۵) بصورت روزانه است دوره مذکور متناسب با دوره پایه مدل‌های CMIP6 انتخاب شده است. موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعاتی و ایستگاه‌های هواشناسی مورد بررسی در شکل (۱) آورده شده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و ایستگاه‌های هواشناسی مورد بررسی

بررسی وضعیت دما و بارش در دوره مورد مطالعه نشان داد که بیشترین میزان بارش با ۴۵۷/۵ میلی‌متر مربوط به ایستگاه سقز و کمترین میزان نیز با ۲۴۰/۶ میلی‌متر مربوط به ایستگاه سراب است. دامنه تغییرات متوسط دما در سطح حوزه نیز بین ۸/۹ تا ۱۳/۴ درجه سلسیوس است که کمترین و بیشترین میزان آن به ترتیب مربوط به ایستگاه‌های سراب و تبریز است. ابتدا داده‌ها و منابع اطلاعاتی برای منطقه موردمطالعه جمع‌آوری گردید و پس از تفهیم مفاهیم نظری و ارائه فرضیات تحقیق از طریق روش‌های تجربی اقدام به تجزیه‌وتحلیل داده‌ها و آزمون فرضیات شد. در واقع در این پژوهش بیشتر از روش‌های آماری برای تحلیل داده‌های مورد نظر استفاده شده است. بدین صورت که تغییرات اقلیمی در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه در دوره آینده (۲۰۶۰-۲۰۳۱) با استفاده از خروجی مدل‌های CMIP6 تحت سناریوهای SSP پیش‌بینی می‌شود. همچنین ارزیابی عملکرد مدل‌های مختلف CMIP6 و روند تغییرات اقلیمی و هیدرلوژیکی حوضه مورد مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است. جامعه آماری این تحقیق شامل ایستگاه‌های همدیدی و هیدرومتری با توزیع مناسب در حوزه آبخیز دریاچه می‌باشد. سناریوهای SSPs بخشی از چارچوب جدیدی است که جامعه تحقیقاتی در مورد تغییرات آب و هوا اتخاذ کرده است تا بتواند تجزیه و تحلیل یکپارچه تأثیرات اقلیمی، آسیب پذیری‌ها، سازگاری و کاهش آتی آن را تسهیل کند. کمیت‌های SSP بر اساس تلاش مشترک بین انجمن‌های IAV و IAM بنا شده است که در یک سلسله جلسات برگزار شده و مجموعه محدودی از پنج خط داستان SSP را مشخص کرده‌اند. خط داستان‌ها ویژگی‌های اصلی مسیرهای توسعه آینده SSP را توصیف می‌کنند که می‌توان از ابزارهای مختلف مدل‌سازی برای توسعه کمیت‌های این داستان، از جمله عواملی مانند جمعیت، توسعه اقتصادی، کاربری اراضی و مصرف انرژی استفاده کرد. SSP ها داستان‌های جایگزینی را در مورد چگونگی توسعه جهان در قرن آینده در غیاب سیاست آب‌وهوا نشان می‌دهند. SSP ها روایات قابل قبولی از تحولات اجتماعی جهانی در آینده را بدون در نظر گرفتن تغییرات آب‌وهوا، یا واکنش‌های کاهش یا سازگاری توصیف می‌کنند. بنابراین درحالی‌که آن‌ها به‌تنهایی یک بعد انطباق یا کاهش راکمی سازی نمی‌کنند، اما منعکس‌کننده دشواری و موفقیت‌ها

یا چالش‌های مرتبط با اجرای استراتژی‌های کاهش یا انطباق بر اساس ویژگی‌های اجتماعی مانند اندازه جمعیت، میزان همکاری منطقه‌ای، پیشرفت‌های فنّاورانه و غیره هستند. پنج SSP با مفروضات مختلف در مورد تحولات انسانی ازجمله: جمعیت، آموزش، شهرنشینی، تولید ناخالص داخلی (GDP)، رشد اقتصادی، نرخ پیشرفت‌های فنّاورانه، انتشار گازهای گلخانه‌ای (GHG) و آئروسل، عرضه و تقاضای انرژی، ایجاد شد. سناریوهای خط سیر اجتماعی-اقتصادی مشترک(SSP) ، برای کار در ترکیب با نسخه به‌روز شده سناریوهای واداشت تابشی (RCP) طراحی‌شده‌اند. واداشت‌های سناریوهای SSP و RCP بسیار نزدیک به همدیگر هستند، درنتیجه مقایسه نتایج پژوهش‌های انجام‌گرفته توسط مدل‌های CMIP5 با CMIP6 قابل‌مقایسه هستند. . آمار لازم برای بررسی تغییرات اقلیمی دوره ۳۰ ساله برای مدل‌های CMIP6 از سال ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۴ به عنوان دوره تاریخی از وب پایگاه ESGF و داده‌های مشاهداتی ایستگاه هواشناسی از سازمان هواشناسی کشور اخذ شد.

نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست‌آمده از اعمال آزمون من-کندال و تخمین‌گر شیب سن بر روی‌داده‌های بارش سالانه در دوره آماری پایه (۲۰۱۴-۱۹۸۵) در ایستگاه‌های موردمطالعه نشان می‌دهد که آماره من-کندال (Z) به جز در ایستگاه سراب در سایر ایستگاه‌ها کاهشی است و این تغییرات نیز به جز ایستگاه مراغه که با آماره ۲/۹- در سطح ۱ درصد معنی شده است و حاکی از روند و تغییرات کاهشی زیاد بارش در این ایستگاه است در سایر ایستگاه‌های موردمطالعه دارای روند معنی‌داری نبوده و تغییرات مذکور از نوع نوسانات کوتاه‌مدت آب و هوایی در منطقه است. بیشترین شیب تغییرات نیز بر اساس تخمین‌گر شیب سن مربوط به ایستگاه مراغه با شیب سِن برابر با ۵/۸- میلی‌متر در سال است و کمترین شیب تغییرات نیز مربوط به ایستگاه تبریز با شیب سن برابر با ۰/۳- است. بر اساس نتایج حاصل به‌استثنای ایستگاه مراغه، بارش در دوره پایه در حوزه موردمطالعه فاقد روند معنی‌داری تشخیص داده شد (جدول ۱)

جدول ۱- روند تغییرات بارش در ایستگاه‌های هواشناسی موردمطالعه در دوره پایه

ردیف	ایستگاه	مَن-کندال	شیب سِن
۱	ارومیه	-۰/۳	-۰/۵
۲	تبریز	-۰/۲	-۰/۳
۳	سراب	۱/۴	۲/۱
۴	سقز	۱/۷-	-۴/۵
۵	تکاب	۱/۴-	۲/۹-
۶	مراغه	**۲/۹-	-۵/۸
۷	مهاباد	۰/۹-	-۲

**معنی‌داری در سطح ۱درصد *معنی‌داری در سطح ۵ درصد

نتایج حاصل از اعمال آزمون من-کندال بر روی داده‌های دمای کمینه و بیشینه در دوره آماری پایه (۲۰۱۴-۱۹۸۵) نشان داد که تغییرات دمای بیشینه در تمامی ایستگاه‌های موردمطالعه افزایشی بوده و این افزایش به‌جز ایستگاه سراب در سایر ایستگاه‌ها دارای روند معنی‌داری است و این روند معنی دار نیز به جز ایستگاه سقز که در سطح ۵ درصد معنی‌دار شده در سایر ایستگاه‌ها در سطح ۱ درصد معنی‌دار شده است. بیشترین شیب تغییرات دمای بیشینه نیز بر اساس تخمین‌گر شیب سن مربوط به ایستگاه‌های مراغه با ۰/۰۹ و کمترین شیب تغییرات نیز مربوط به ایستگاه سراب با شیب سن برابر با ۰/۰۲ است. بررسی روند تغییرات دمای کمینه نیز نشان داد که مقادیر آن به‌جز ایستگاه سقز در سایر ایستگاه‌ها افزایشی است. البته تغییرات کاهشی در ایستگاه سقز نیز مربوط به نوسانات کوتاه مدت آب و هوایی است و دارای روند معنی‌دار نیست. آماره افزایشی من-کندال نیز به جز ایستگاه سراب در سایر ایستگاه‌ها در سطح ۱ و ۵ درصد دارای روند معنی‌داری است. کمترین شیب تغییرات نیز برابر با ۰/۰۱- درجه مربوط به ایستگاه سقز در جنوب حوزه است و بیشترین شیب تغییرات نیز با ۰/۰۹ درجه، مربوط به ایستگاه تبریز در مرکز است (جدول ۲).

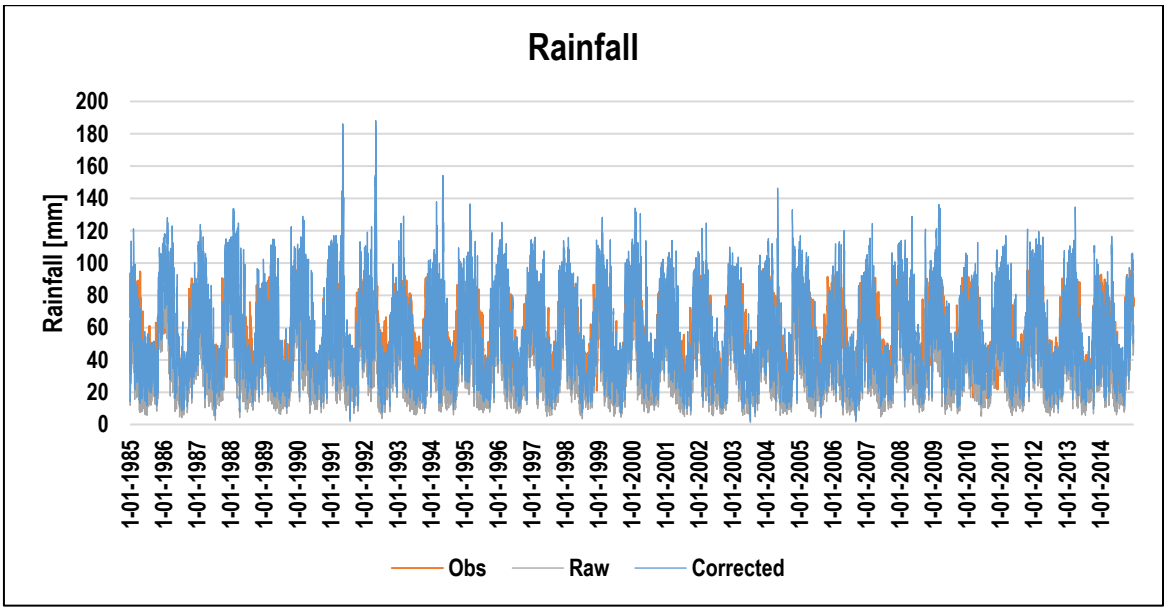
جدول ۲- روند تغییرات دمای کمینه و بیشینه در ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه در دوره پایه

ردیف	ایستگاه	دمای بیشینه		دمای کمینه	
		مَن-کِندال	شیب سِن	مَن-کِندال	شیب سِن
۱	ارومیه	۴/۳**	۰/۰۷	۲/۵*	۰/۰۷
۲	تبریز	۳/۵**	۰/۰۵	۳/۱**	۰/۰۹
۳	سراب	۱/۳	۰/۰۲	۰/۴	۰/۰۱
۴	سقز	۲/۰۲*	۰/۰۴	-۰/۱	-۰/۰۱
۵	تکاب	۳/۳**	۰/۰۶	۲/۴*	۰/۰۷
۶	مراغه	۵/۱**	۰/۰۹	۲/۸**	۰/۰۷
۷	مهاباد	۳/۸**	۰/۰۶	۲/۶*	۰/۰۸

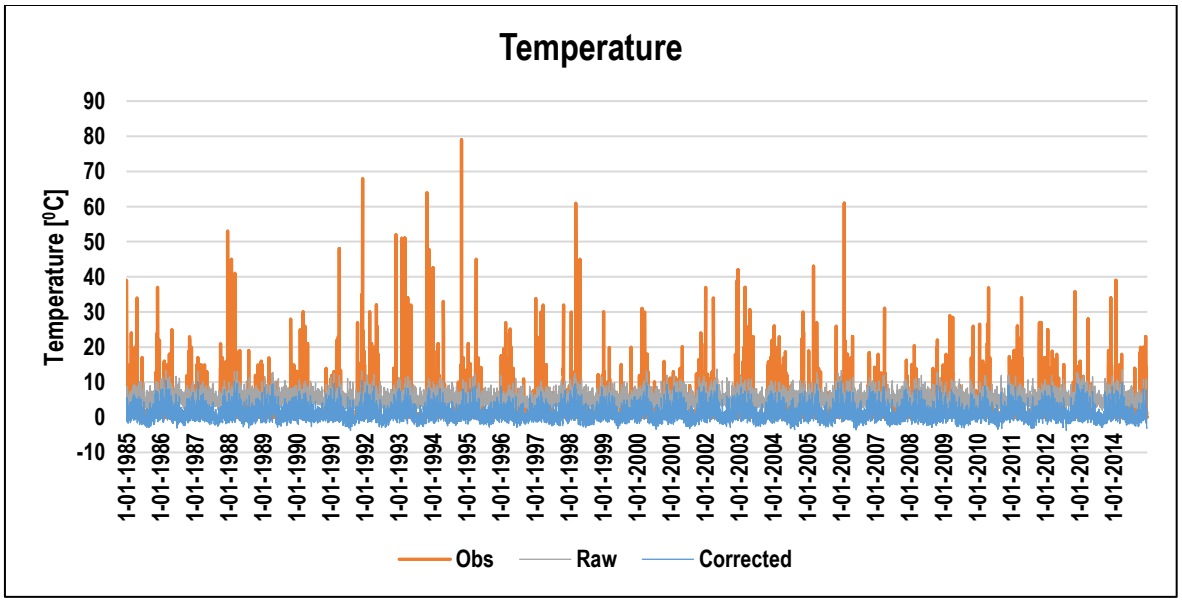
**معنی‌داری در سطح ۱درصد *معنی‌داری در سطح ۵ درصد

در این پژوهش، ۱۰ مدل GCMs از CMIP6 با توجه به کاربرد بیشتر و همچنین دقت بالا و داده‌های هواشناسی در دسترس آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت و پس از اصلاح اریبی به روش LSBC به ارزیابی عملکرد این مدل‌ها در شبیه‌سازی دما و بارش در دوره تاریخی این مدل‌ها (۲۰۱۴-۱۹۸۵) پرداخته شد. نمونه‌ای از اصلاح اریبی بر روی داده های دما و بارش

ایستگاه سقز در شکل‌های (۲ و ۳) آورده شده است همانطور که مشاهده می‌شود داده‌های اصلاح شده به روش LSBC نسبت به داده‌های خام، بسیار نزدیکتر به داده‌های مشاهداتی ایستگاهی هستند و باعث دقت در شبیه‌سازی پارامترهای مذکور شده است.



شکل ۲- مقادیر مشاهداتی، خام و اصلاح شده بارش به روش LSBC برای ایستگاه سینوپتیک سقز در دوره پایه



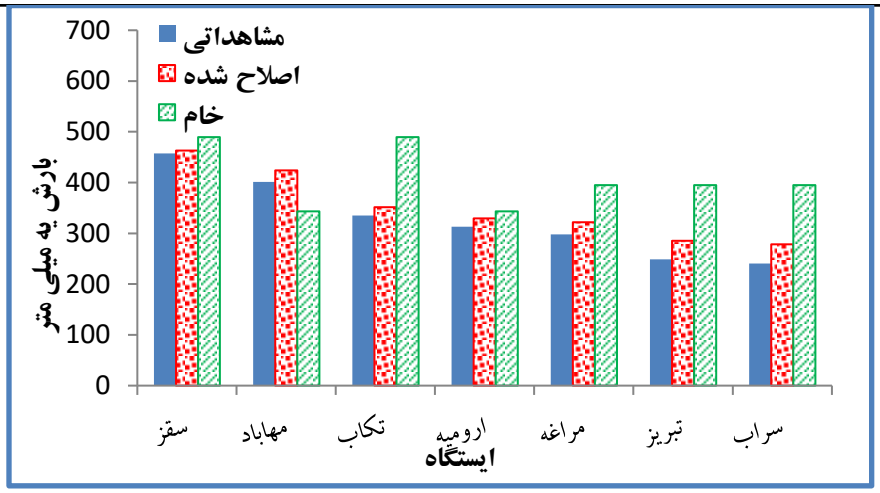
شکل ۳- مقادیر مشاهداتی، خام و اصلاح شده دما به روش LSBC برای ایستگاه سینوپتیک سقز در دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۸۵)

پس از اصلاح اریبی، به ارزیابی عملکرد و دقت مدل‌ها در شبیه‌سازی پارامترهای دما و بارش با استفاده از سنجه‌های مختلف در ایستگاه سینوپتیک تبریز به عنوان ایستگاه منتخب حوزه پرداخته شد که در ادامه به بررسی نتایج حاصل از آن پرداخته می‌شود. نتایج حاصل از ارزیابی داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده بارش توسط مقیاس کاهی خطی نشان می‌دهد که دقت مدل‌های متفاوت است. بر اساس مقادیر RMSE مدل MRI-ESM2-0 و سپس MPI-ESM1-2-HR از دقت بالاتری نسبت به سایر مدل‌ها جهت شبیه‌سازی بارش در ایستگاه منتخب حوزه برخوردار است. میزان RMSE این مدل‌ها با داده‌های بارش مشاهداتی در منطقه مورد مطالعه برابر با ۴/۳ و ۴/۹ است. مدل GFDL-ESM4 نیز با R2 برابر ۰/۸۸ و RMSE برابر با ۱۲، ضعیف‌ترین عملکرد را در بین مدل‌های مورد بررسی جهت شبیه‌ساز بارش در حوزه مورد مطالعه داشته است. در مجموع بر اساس شاخص‌های مختلف دقت مدل MRI-ESM2-0 در شبیه‌سازی بارش در حوزه مورد مطالعه مناسب است بطوری که میزان ضریب تعیین آن برابر با ۰/۹۸ می‌باشد. نتایج عملکرد مدل‌های مورد بررسی در شبیه‌سازی بارش حوزه مورد مطالعه در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳- ارزیابی عملکرد مدل‌های CMIP6 بر اساس مقیاس کاهی LSBC در شبیه‌سازی بارش

ردیف	مدل	MSE	RMSE	MAE	R2
۱	MRI-ESM2-0	۱۸/۶	۴/۳	۳/۸	۰/۹۸
۲	MPI-ESM1-2-LR	۲۴/۲	۴/۹	۴/۲	۰/۹۷
۳	BCC_CSM2_MR	۶۴/۸	۸/۱	۶/۷	۰/۹۶
۴	MIROC6	۱۴۳/۷	۱۲	۷/۸	۰/۹۲
۵	FGOALS-g3	۹۸/۹	۹/۹	۸/۱	۰/۹۵
۶	CanESM5	۷۴/۴	۸/۶	۶/۸	۰/۹۴
۷	CESM2	۸۵/۴	۹/۲	۷/۵	۰/۹۷
۸	GFDL-ESM4	۱۴۴/۸	۱۲	۹/۲	۰/۸۸
۹	EC-Earth 3	۶۸/۹	۸/۳	۶/۴	۰/۹۵
۱۰	NorESM2-LM	۷۹/۲	۸/۹	۷/۱	۰/۹۶

مقایسه مقادیر بارش مشاهداتی و شبیه‌سازی در طول دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۸۵) بر اساس مدل منتخب یعنی MRI-ESM2-0 و اصلاح اریبی LSBC در ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه در شکل ۴ آورده است. نتایج حاکی از دقت مناسب مدل منتخب در شبیه‌سازی بارش حوزه آبخیز مورد مطالعه است.



شکل ۴- مقادیر مشاهداتی، خام و اصلاح شده بارش در ایستگاه‌های حوزه آبخیز دریاچه ارومیه در دوره آماری پایه

بر اساس شاخص RMSE مدل MPI-ESM1-2-LR با ۰/۰۹ بهترین عملکرد را در بین مدل‌های مورد بررسی جهت شبیه سازی دما دارد. همچنین مدل CanESM5 با RMSE برابر با ۰/۹۱ ضعیف‌ترین عملکرد را داشته است. نتایج حاصل از بررسی دقت مدل‌های CMIP6 در شبیه‌سازی دما با استفاده از شاخص‌های مختلف خطاسنجی نشان می‌دهد که روش LSBC در مقیاس کاهی دما از دقت بالایی برخوردار است. بطوری که ضریب تعیین در همه مدل‌های مورد بررسی بیشتر از ۰/۹۵ است.

منابع

اوجی، روح‌اله. ۱۳۹۷. مقایسهٔ ریزگردانی تک‌ایستگاهی و چندایستگاهی فرین‌های دما و بارش (مطالعهٔ موردی: سواحل جنوبی دریای خزر)، مجله فیزیک زمین و فضا، دوره ۴۴، ش ۲، صص ۴۱۰-۳۹۷.

حافظی مقدس، ناصر.، لشکری پور، غلامرضا.، پارسائی، رشید. ۱۴۰۳. ارزیابی عملکرد مدل های CMIP6 در پیش نگری تغییرات دما و بارش در محدوده چاه نیمه های استان سیستان و بلوچستان. پژوهش های اقلیم شناس، ۱۴ (۵۶): ۱۷۸-۱۶۵.

گودرزی م.، صلاحی ب.، حسینی س. ا. ۱۳۹۴. بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر تغییرات رواناب سطحی (مطالعه موردی: حوزه آبخیز دریاچه ارومیه). مجله اکوهیدرولوژی. ۲(۲): ۱۷۵-۱۸۹.

گودرزی م.، حسینی س. ا. ، مسگری،ا.، ۱۳۹۵، مدلهای آب و هواشناسی، انتشارات آذر کِلک، زنجان، ایران.

Beecham, S., Rashid, M., and Chowdhury R.K., 2014. Statistical downscaling of multi-site daily rainfall in a South Australian catchment using a Generalized Linear Model. International Journal of Climatology. 34(14): 3654–3670.

Jones, R.N., and Page. C.M. 2001. Assessing the risk of climate change on the water resources of the Macquare river catchment. International Congress on modelling and simulation. Modelling and simulation society of Australia and New Zealand. Canberra: 673-678.

Hashmi, M.Z., Shamseldin, A.Y., and Melville, B.W. 2011. Comparison of SDSM and LARS-WG for simulation and downscaling of extreme precipitation events in a watershed. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment. 25(4): 475–484.
HAYES M., 2000 "Drought Indices" National Drought Mitigation Center, University of NebraskaLinclon.
Shukla S and Wood AW, 2008. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. Geophysics Research Letter 35: 1-8.
Nalbantis N and Tsakiris G, 2009. Assessment of hydrological drought revisited. Water Resources Management 23: 881-897.
Nalbantis, G. Tsakiris(2008). Assessment of Hydrological Drought Revisited. Springer Science + Business Media B.V. 2008.
Shafer, B.A. and Dezman, L.E.1982. Development of a Surface Water Supply Index (SWSI) to assess the severity of drought condition in snowpack runoff area, Proc. Western Snow Conf., pp 164-175.
Wigley, T.W. L., Jones, P. D., Briffa, K. R. and Smith, G. 1990. Obtaining sub-grid scale information from coarse resolution general circulation model output, J. Geophys. Res. 951: 1943–1953.
Wilby R.L., Dawson C.W, Barrow E.M. 2002. SDSM- a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts, Environmental Modeling & Software, 17: 147-159.

Climate Change Forecasting with CMIP6 Models under SSPs Scenarios:A Case Study of Lake Urmia Basin

Abstract

The aim of this study is to predict climate change in the coming decades based on CMIP6 models under the common socio-economic trajectory (SSP) scenarios and its impacts in the Lake Urmia watershed. Therefore, in this study, the performance of these two models in downscaling the output of CMIP6 models and simulating temperature and precipitation variables in the Lake Urmia watershed was evaluated. The meteorological stations in this research include 7 synoptic stations with a statistical period of 30 years corresponding to the base period of the models (1985-2014). To evaluate the performance of the models, the error metrics MSE, RMSE, MAE and R2 were used. The results showed that both models have high ability in simulating temperature and precipitation variables in the studied basin; however, they have different results at different stations and different climatic variables. Comparison of different statistical measures and comparative graphs showed that both models were more accurate in simulating temperature than precipitation, and in simulating precipitation, the SDSM model performed more successfully at most stations and had less uncertainty. But it has a more time-consuming and complex simulation process, while the LARS-WG model has greater simplicity and speed of operation. In general, none of the models has absolute superiority over each other, and despite differences in simulation, they can be useful in predicting climate change. In order to examine the uncertainty of climate change, it is necessary to use both models or different models.

Keywords: Climate change, Lake Urmia basin, down-scaling, LARS-WG, SDSM.

.

شناسایی روند تغییرات و الگوی فضایی شدیدترین خشکسالی و ترسالی ها در ایران

علی زارعی*[۱]، معصومه مقبل[۲]

۱- دانشجوی دکتری اقلیم شناسی، دانشگاه تهران، ایران.

۲- دانشیار اقلیم شناسی، دانشگاه تهران، ایران.

*E-mail: alizarei2576@gmail.com

چکیده

خشکسالی یکی از مهم‌ترین مخاطرات اقلیمی در ایران است که آثار گسترده‌ای بر منابع آب و امنیت غذایی دارد. این پژوهش با هدف تحلیل روند تغییرات خشکسالی در سه دهه اخیر و شناسایی الگوهای فضایی شدیدترین خشکسالی و ترسالی ها در ایران انجام شده است. برای این منظور، شاخص شدت خشکسالی استانداردشده (ZSI) به‌صورت سالانه و بر پایه داده‌های بارش بازتحلیل‌شده ERA5-Land محاسبه شد. روند تغییرات شاخص ZSI در طول دوره مورد مطالعه با استفاده از رگرسیون خطی تحلیل گردید تا جهت و معنی‌داری تغییرات خشکسالی در مقیاس زمانی مشخص شود. نتایج نشان داد که سال ۲۰۱۹ مرطوب‌ترین و سال ۲۰۲۱ خشک‌ترین سال‌های دوره مورد مطالعه بوده‌اند به گونه ای کهدر سال ۲۰۱۹ حدود ۶۳ درصد از مساحت کشور درگیر ترسالی متوسط تا بسیار شدید بوده است، در حالی که در سال ۲۰۲۱ بیش از ۸۰ درصد از مساحت مناطق ایران شرایط خشکسالی متوسط تا بسیار شدید را تجربه کرده‌اند. تحلیل فضایی شاخص نیز تفاوت بارز در الگوی پراکنش مکانی شرایط تر و خشک را نشان داد؛ به‌طوری که در سال ۲۰۱۹ نواحی شمال‌شرق، غرب و جنوب کشور بیشترین مقادیر مثبت شاخص را ثبت کرده‌اند، در حالی که در سال ۲۰۲۱ بیشترین شدت خشکسالی مربوط به نواحی شرقی، شمال‌غربی و غربی کشور بوده است. همچنین بررسی روند بلندمدت شاخص ZSI شیب منفی ضعیفی معادل ۰/۰۰۶۸- را نشان داد، که از نظر آماری معنادار نبوده و بیانگر فقدان روند پایدار در شدت خشکسالی طی این دوره است. بر این اساس، پیشنهاد می‌شود سیاست‌های مدیریت خشکسالی در کشور، به‌جای اتکا به پیش‌بینی‌های بلندمدت، بر پایش مستمر، سامانه‌های هشدار سریع و برنامه‌ریزی‌های انعطاف‌پذیر سازگار با نوسانات اقلیمی تمرکز یابد.

کلید واژه‌ها: خشکسالی، شاخص ZSI، تحلیل فضایی، ، روند تغییرات، ترسالی، ایران.

۱. مقدمه

خشکسالی یکی از مهم‌ترین و پیچیده‌ترین بلایای طبیعی است که با تأثیرگذاری بر منابع آب، کشاورزی، محیط‌زیست و اقتصاد، چالش‌های جدی برای جوامع انسانی ایجاد می‌کند .(Wilhite and Pulwarty, 2017) این پدیده نه‌تنها دارای ویژگی مکانی و زمانی متغیر است، بلکه در مقایسه با سایر مخاطرات اقلیمی، تشخیص و پایش آن نیز به‌واسطه ماهیت تدریجی‌اش دشوارتر است (Van Loon, 2015) . خشکسالی بر خلاف دیگر بلایای طبیعی نظیر سیل یا زلزله به صورت تدریجی رخ می دهد اما پیامدهای آن در بلند مدت می تواند بسیار گسترده و جبران ناپذیر باشد، به ویژه زمانی که با ضعف در مدیریت منابع آب و نبود برنامه ریزی مناسب همراه باشد (عباسی، ۱۳۹۶). در سال‌های اخیر، افزایش فرکانس و شدت خشکسالی‌ها تحت تأثیر تغییر اقلیم جهانی، موجب نگرانی گسترده‌ای در سراسر جهان شده است .(Spinoni et al., 2019)

مطالعه‌ای توسط رضایی و همکاران (۱۴۰۳) با هدف تحلیل ویژگی‌های خشکسالی در ایران، شامل مدت، فراوانی، شدت و بزرگی انجام شده است. در این پژوهش، خشکسالی‌ها در بازه‌های زمانی مختلف مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که خشکسالی با شدت‌های گوناگون در سراسر کشور رخ می‌دهد و به پدیده‌ای پایدار در اقلیم ایران تبدیل شده است. از نظر فضایی، بیشترین فراوانی و شدت خشکسالی در جنوب شرق و شرق کشور مشاهده شد، در حالی‌که کمترین مقادیر در سواحل شمالی و جنوب‌غرب ایران ثبت شد.

مطالعه حیدری و همکاران (۱۴۰۱) با هدف شناسایی و تحلیل الگوهای مکانی خشکسالی‌های سالانه، فصلی و ماهانه ایران با استفاده از شاخص ZSI و داده‌های بارش ماهانه بازکاوی‌شده ERA5 در بازه ۱۹۷۹ تا ۲۰۲۱ انجام شد. نتایج نشان داد که با افزایش شدت خشکسالی، پراکنش مکانی آن خوشه‌ای‌تر می‌شود. خوشه‌های خشکسالی شدید و بسیار شدید عمدتاً در جنوب، جنوب‌شرق و شرق ایران مشاهده شده است. در فصول مختلف، جهت‌گیری الگوهای مکانی متفاوت بوده و در پاییز الگوی جنوب‌شرقی–شمال‌غربی و در زمستان و بهار تفاوت معناداری بین خشکسالی‌های شدید و بسیار شدید دیده شد. همچنین، خوشه‌های مکانی در شمال‌غرب، شمال‌شرق و سواحل خزر برای خشکسالی‌های شدید و بسیار شدید ماهانه شناسایی شدند که نشان‌دهنده ضرورت توجه جدی به مدیریت منابع آب و کشاورزی در این نواحی است.

ترابی نژاد و همکاران (۱۴۰۲) با هدف بررسی مشخصه‌ها و انواع خشکسالی در ایران طی چهار دهه گذشته، از داده‌های ۴۹ ایستگاه همدید در بازه زمانی ۱۹۸۱ تا ۲۰۲۰ استفاده کردند. خشکسالی با استفاده از شاخص SPEI در چهار مقیاس زمانی ۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه تحلیل شد و مشخصه‌های آن شامل بزرگی، طول دوره، شدت و فراوانی به‌کمک تئوری دوره‌های پیوسته (Run Theory) محاسبه گردید. نتایج نشان داد که فراوانی خشکسالی در سطح کشور بین ۱۳/۱۲ تا ۱۳/۱۸ درصد از کل ماه‌ها متغیر بوده و این پدیده در غرب، جنوب‌غرب، سواحل خلیج فارس و شمال‌غرب ایران فراوانی بیشتری دارد، در حالی‌که در شرق و مرکز ایران، طول دوره خشکسالی بیشتر است. همچنین بیش از ۶۰ درصد از رخدادهای خشکسالی از نوع متوسط بوده و خشکسالی‌های متوسط و شدید عمدتاً در نواحی غربی و شمال‌غربی کشور رخ داده‌اند. بررسی روندهای دهه‌ای نیز نشان‌دهنده افزایش تدریجی طول دوره و بزرگی خشکسالی و هم‌زمان کاهش شدت آن در سال‌های اخیر است.

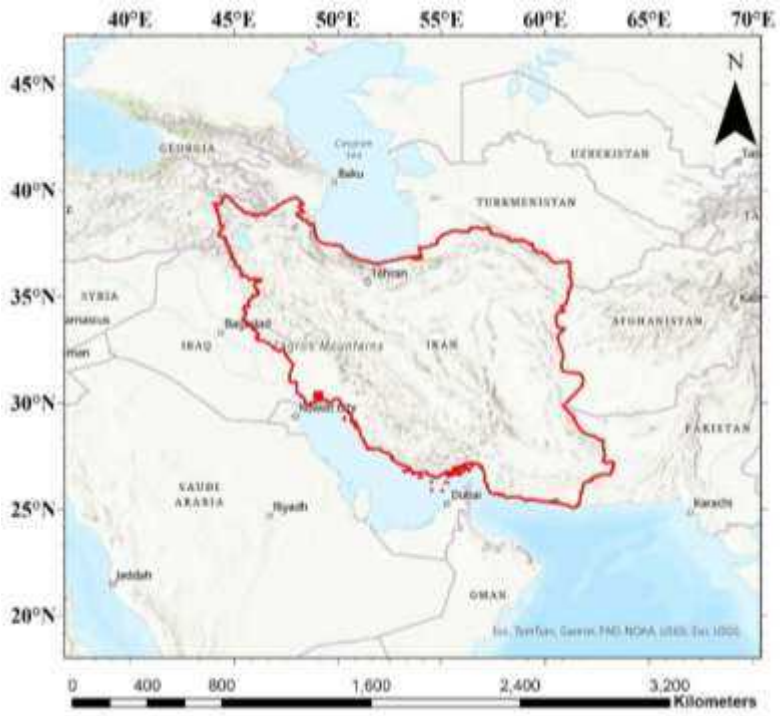
ایران به‌دلیل موقعیت جغرافیایی خاص، اقلیم خشک و نیمه‌خشک، و وابستگی بالای بخش‌های مختلف اقتصادی به منابع آبی، از جمله کشورهایی است که به‌شدت تحت تأثیر خشکسالی قرار دارد. با توجه به اینکه میانگین بارندگی ایران کمتر از یک‌سوم میانگین جهانی است، خشکسالی نه یک پدیده گذرا بلکه یک بحران دائمی و ساختاری محسوب می‌شود (موسوی و احمدی، ۱۴۰۰). در بسیاری از سال‌ها، کاهش چشمگیر بارندگی، افت منابع سطحی و زیرزمینی، افزایش تبخیر و تعرق، و کاهش پوشش گیاهی باعث تشدید اثرات خشکسالی شده است. افزون بر این، گسترش بی‌رویه اراضی کشاورزی، توسعه غیراصولی منابع آبی و حفر چاه‌های غیرمجاز نیز نقش مهمی در تسریع روند خشکسالی و کاهش تاب‌آوری منابع طبیعی ایفا کرده‌اند (رضایی و همکاران، ۱۳۹۷; Madani, 2014). روند خشکسالی در ایران طی دهه‌های گذشته، هم در شدت و هم در گستره جغرافیایی، روندی فزاینده داشته است. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که از دهه ۱۳۷۰ تاکنون، دوره‌های خشکسالی شدیدتر و متراکم‌تری در کشور تجربه شده است، به‌گونه‌ای که در برخی مناطق، حتی سال‌های به‌ظاهر نرمال نیز با کمبود منابع آب همراه بوده‌اند (حسینی، ۱۴۰۱). این مسأله نه‌تنها موجب کاهش تولیدات کشاورزی و بروز بحران‌های معیشتی در مناطق روستایی شده، بلکه مهاجرت‌های محیطی، افزایش تنش‌های اجتماعی و تهدید امنیت غذایی را نیز در پی داشته است. بنابراین، روند کاهشی بارش‌ها، افزایش دما، و بهره‌برداری ناپایدار از منابع آبی، آسیب‌پذیری کشور در برابر خشکسالی را بیش از پیش افزایش داده است (Abbaspour et al., 2009) . بنابراین، پایش دقیق خشکسالی و ترسالی، شناسایی شدیدترین سال‌ها، و بررسی الگوهای فضایی آن، گامی اساسی برای مدیریت پایدار منابع آب در ایران محسوب می‌شود. با توجه به افزایش احتمال بروز خشکسالی‌های شدید در آینده، به‌ویژه تحت تأثیر تغییرات اقلیم جهانی، ضرورت دارد که این پدیده به‌صورت دقیق و چندبُعدی مورد مطالعه قرار گیرد. تحلیل روند خشکسالی، شناخت مناطق آسیب‌پذیر، ارزیابی اثرات اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی آن، و در نهایت طراحی راهبردهایی برای کاهش آسیب‌پذیری و افزایش تاب‌آوری جوامع، از جمله اقداماتی است که باید در دستور کار سیاست‌گذاران، پژوهشگران و نهادهای اجرایی قرار گیرد (کریمی، ۱۳۹۹).از اینرو، هدف این پژوهش، بررسی روند تغییرات خشکسالی سالانه در سه دهه اخیر و شناسایی الگوهای فضایی شدیدترین سال‌های خشکسالی و ترسالی در ایران است.

۲. داده‌ها و روش‌ها

۲-۱. منطقه مورد مطالعه

ایران با وسعتی در حدود ۱۶۴۸۰۰۰ کیلومتر مربع در بخش جنوب‌غربی قاره آسیا واقع شده و به‌عنوان یکی از کشورهای کلیدی در منطقه خاورمیانه شناخته می‌شود. میانگین ارتفاع این سرزمین از سطح دریا بیش از ۱۲۰۰ متر است. اقلیم غالب در بخش وسیعی از ایران خشک و نیمه‌خشک است. بیشترین میزان بارندگی سالانه در نواحی شمالی است در حالی که بخش‌هایی از مرکز و جنوب‌شرقی کشور، به‌ویژه دشت لوت، از کم‌بارش‌ترین مناطق به‌شمار می‌روند. اختلافات ارتفاع و

موقعیت جغرافیایی موجب شده که ایران از تنوع اقلیمی گسترده‌ای برخوردار باشد؛ به‌طوری که در بسیاری از مناطق کشور، امکان تجربه‌ی چهار فصل متفاوت در یک زمان فراهم است (فرج‌زاده‌اصل، ۱۳۷۴؛ محمدی و همکاران، ۱۴۰۲) (شکل ۱).



شکل ۱. موقعیت کشور ایران در جنوب غربی آسیا

۲-۲. روش پژوهش

در مطالعه حاضر، به‌منظور تحلیل روند و شناسایی الگوهای فضایی خشکسالی و ترسالی سالانه در ایران، از داده‌های بارش طی دوره ۳۰ ساله (۱۹۹۵ تا ۲۰۲۴) استفاده گردید. داده‌های بارش از محصول بازتحلیل ERA5_Land استخراج و برای کل کشور پردازش شد. براساس مطالعات پیشین، داده‌های ERA5 وERA5_Land همبستگی بالایی با داده‌های ایستگاهی دارند و برای تحلیل‌های اقلیمی کاملا مناسب و معتبر هستند (Urban et al., 2021; Kyaw et al., 2023; Zarei and Moghbel, 2025)

مراحل انجام پژوهش:

۱. محاسبه میانگین شاخص خشکسالی ZSI (شاخص نرمال‌شده انحراف از میانگین) سراسر ایران، به‌منظور شناسایی شدت‌های مختلف خشکسالی و ترسالی در هر سال از دوره ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۴.

۲. شناسایی شدیدترین سال‌های خشکسالی و ترسالی با استفاده از تحلیل آماری مقادیر سالانه.

۳ .ترسیم نقشه‌های فضایی پراکنش خشکسالی و ترسالی برای شدیترین سال‌های تر و خشک به‌منظور استخراج و تحلیل الگوهای فضایی رخداد.

.4 تحلیل روند تغییرات خشکسالی در طی ۳۰ سال اخیر با استفاده از رگرسیون خطی، به‌منظور ارزیابی جهت و شدت روندهای افزایشی یا کاهشی.

کلیه پردازش‌ها و تحلیل‌های آماری با استفاده از کدنویسی در سامانه Google Earth Engine، نرم‌افزار MATLAB و همچنین سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) انجام شده است.

۲-۱-۱. تحلیل رگرسیونی

برای تحلیل روند زمانی شاخص خشکسالی در سراسر ایران، از مدل رگرسیون خطی ساده استفاده شد. در این مدل، سال‌های تقویمی (۱۹۹۵ تا ۲۰۲۴) به‌عنوان متغیر مستقل و مقادیر سالانه شاخص ZSI برای کل ایران به‌عنوان متغیر وابسته تعریف شدند. این روش به‌دلیل سادگی و قابلیت تفسیر بالا، یکی از ابزارهای متداول در تحلیل سری‌های زمانی اقلیمی محسوب می‌شود (Islam et al., 2021). جهت ارزیابی معناداری آماری روند، مقدار p (p-value) برای ضریب شیب محاسبه گردید. در این تحلیل، شیب خط رگرسیون به‌عنوان شاخصی برای سنجش جهت و شدت تغییرات شاخص خشکسالی طی دوره مطالعه مورد استفاده قرار گرفت.

۲-۱-۲. محاسبه شاخص ZSI

شاخص Z-Score Index (ZSI) یکی از شاخص‌های ساده و متداول برای ارزیابی خشکسالی است که با استفاده از آماره‌های توصیفی مانند میانگین و انحراف معیار، ناهنجاری بارش را بیان می‌کند (جدول ۱). این شاخص نشان می‌دهد که مقدار بارش در یک سال خاص، چند انحراف معیار کمتر یا بیشتر از میانگین بلندمدت است(Nedham et al,m 2019). این شاخص به شکل نرمال شده بیان می‌شود و مقدار آن نشان‌دهنده شدت خشکسالی (مقادیر منفی) یا ترسالی (مقادیر مثبت) است. در این مطالعه، میانگین و انحراف معیار بارش سالانه بازه زمانی ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۴ به‌عنوان دوره مرجع در نظر گرفته شده است.(رابطه ۱).

$$ZSI = \frac{X - \mu}{\sigma} \qquad (۱)$$

در رابطه بالا X مقدار بارش در دوره مدنظر؛ μ میانگین درازمدت بارش در دوره مورد نظر و σ انحراف معیار مقادیر بارش در دوره مورد نظر می‌باشد.

جدول ۱. طبقه‌بندی شرایط خشکسالی و ترسالی بر اساس مقادیر شاخص ZSI (Jain et al., 2015; Zarei et al., 2017 ; Dafouf et al., 2022)

طبقه‌بندی	بازه مقدارZSI
خشکسالی بسیار شدید	ZSI ≤ -2.0
خشکسالی شدید	-1.99 < ZSI ≤ -1.5
خشکسالی متوسط	-1.49 < ZSI ≤ -1.0
نرمال	-0.99 ≤ ZSI ≤ 0.99
ترسالی متوسط	1.0 ≤ ZSI < 1.49
ترسالی شدید	1.5 ≤ ZSI < 1.99
ترسالی بسیار شدید	ZSI ≥ 2.0

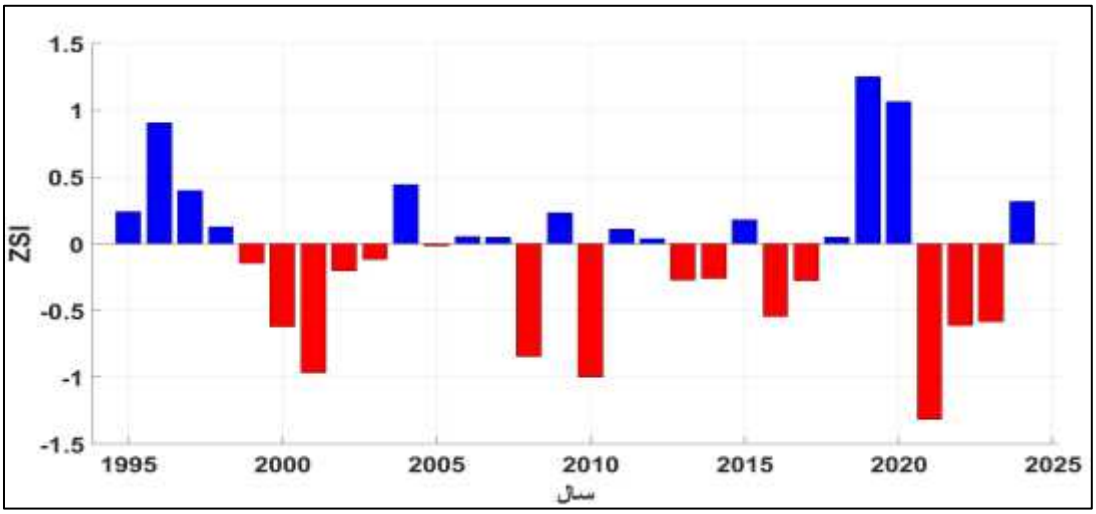
۳. نتایج

۳-۱ میانگین مقادیر شاخص ZSI سالانه

مقادیر شاخص خشکسالی استانداردشده (ZSI) طی دوره ۳۰ ساله (۱۹۹۵ تا ۲۰۲۴) نشان‌دهنده نوسانات قابل توجهی در وضعیت خشکسالی منطقه مورد مطالعه است. در سال‌های آغازین این دوره، به‌ویژه بین سال‌های ۱۹۹۵ تا ۱۹۹۸، شاخص مقادیر مثبت را نشان می‌دهد که بیانگر شرایط نسبتاً مرطوب یا نرمال است. بیشترین مقدار مثبت شاخص در این دوره مربوط به سال ۱۹۹۶ است. با این حال، از سال ۱۹۹۹ تا اوایل دهه ۲۰۰۰، کاهش محسوس در مقادیر شاخص مشاهده می‌شود و سال‌هایی مانند ۲۰۰۰ و ۲۰۰۱ با مقادیر منفی قابل توجهی همراه بوده است که بیانگر وقوع خشکسالی می‌باشد.

در بازه زمانی سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۴ نوسانات شاخص کمتر بوده و بیشتر سال‌ها شرایط نزدیک به نرمال داشته‌اند، اگرچه در برخی سال‌ها نظیر ۲۰۰۸ و ۲۰۱۰، شاخص به مقادیر منفی متمایل شده که نشان‌دهنده خشکسالی‌های خفیف است. از سال ۲۰۱۵ به بعد، شاخص نوسانات بیشتری داشته است؛ به‌گونه‌ای که در سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۱۹ شاخص به مقادیر مثبت قابل توجهی رسیده است که نشان‌دهنده دوره‌ای مرطوب می‌باشد. در مقابل، سال ۲۰۲۱ خشک‌ترین سال‌های دوره مورد بررسی بوده است. میانگین شاخص در سراسر ایران در این سال به کمتر از ۱/۳- سقوط کرده است. خشکسالی در سال‌های ۲۰۲۲ و ۲۰۲۳ نیز تداوم یافته، هرچند شدت آن نسبت به سال ۲۰۲۱ اندکی کاهش یافته است.

به‌طور کلی، مرطوب‌ترین سال براساس میانگین شاخص ZSI در کل ایران، سال ۲۰۱۹ با مقدار حدود ۱٫۴+ و خشک‌ترین سال، سال ۲۰۲۱ با مقدار کمتر از ۱٫۳- شناخته شد.(شکل۲).



شکل ۲.میانگین مقادیر شاخص ZSI سالانه کشور ایران طی دوره ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۴

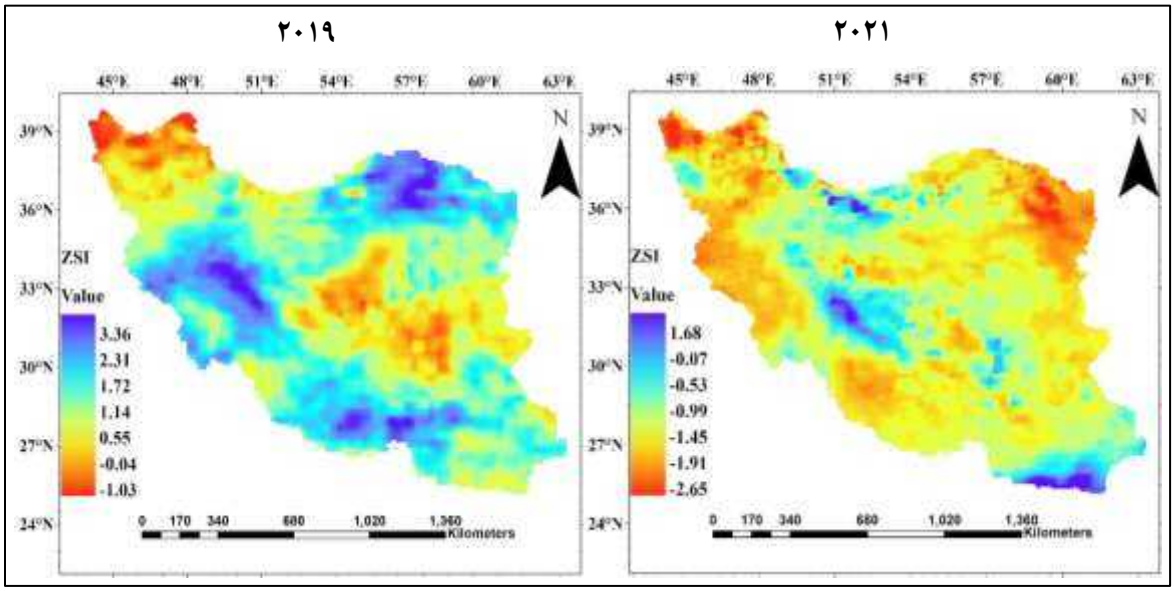
۲-۳ الگوی فضایی شاخص ZSI برای شدیدترین ترسالی (۲۰۱۹) و خشکسالی (۲۰۲۱) دوره مورد مطالعه

نقشه‌های فضایی شاخص شدت خشکسالی استانداردشده (ZSI) برای دو سال متضاد از نظر وضعیت بارندگی، یعنی سال تر ۲۰۱۹ و سال خشک ۲۰۲۱، تفاوت‌های چشمگیری را در توزیع مکانی و شدت شرایط بارشی در سراسر کشور نشان می‌دهند.

در سال ۲۰۱۹ که به‌عنوان ترسالی شناخته می‌شود، اغلب مناطق کشور مقادیر مثبت شاخص را تجربه کرده‌اند. در این سال حداکثر مقدار مثبت و منفی به ترتیب برابر با ۳/۳۶ و ۱/۰۳- است. بیشترین مقادیر مثبت شاخص (۳/۳۶) در شمال‌شرق، غرب و جنوب کشور به چشم می‌خورد که نشان‌دهنده وقوع ترسالی شدید در آن نواحی است. در مقابل، مناطق محدودی در مرکز و شمال غرب کشور دارای مقادیر منفی بوده‌اند که بیانگر شرایط نرمال در آن نواحی است.

در مقابل، سال ۲۰۲۱ با گستره‌ی وسیع‌تری از مقادیر منفی شاخص همراه بوده است. اکثر نقاط کشور در این سال با شرایط خشکسالی متوسط تا شدید مواجه بوده‌اند؛ به‌ویژه نواحی شرقی، شمال غربی و غربی که مقادیر شاخص تا حدود ۲/۶۵- نیز کاهش یافته است. در این سال تنها بخش‌های کوچکی از نواحی ساحلی جنوب شرق کشور، ارتفاعات البرز و زاگرس دارای مقادیر مثبت بوده‌اند که نشان از شرایط نرمال تا نسبتاً مرطوب در آن نواحی دارد. نکته قابل توجه این است که منطقه شمال‌غرب کشور در هر دو سال‌های مرطوب و خشک، با خشکسالی مواجه بوده است؛ به‌خصوص در سال ۲۰۲۱ که شدت خشکسالی در این منطقه به طور چشمگیری افزایش یافته بود.

به طور کلی، مقایسه نقشه‌های فضایی نشان می‌دهد که شرایط بارشی کشور در طول این دو سال تفاوت قابل‌توجهی داشته است. در حالی که در سال ۲۰۱۹ بخش عمده‌ای از کشور تحت تأثیر شاخص مثبت قرار دارد، در سال ۲۰۲۱ الگوی غالب، خشکسالی بوده است. این نوسانات بارز بین‌سالی در شدت و گستره‌ی خشکسالی و ترسالی، اهمیت توجه به سیستم‌های هشدار سریع، پایش مستمر و برنامه‌ریزی سازگار با تغییراقلیم را برجسته می‌سازد(شکل ۳).

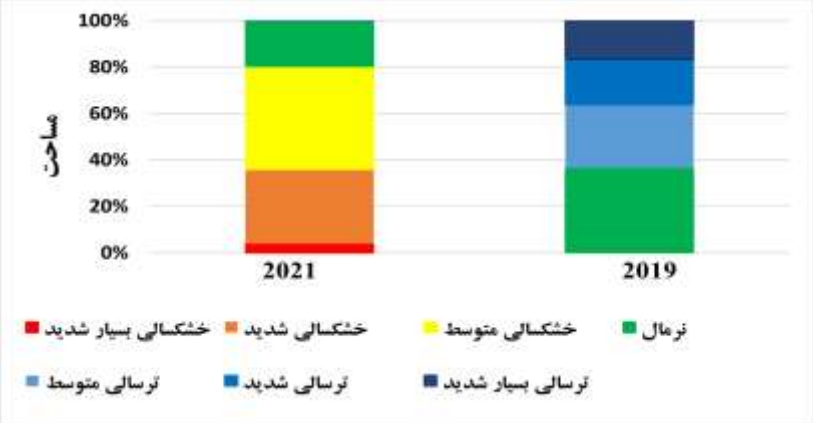


شکل ۳. الگوهای فضایی شدیدترین ترسالی (۲۰۱۹) و خشکسالی (۲۰۲۱) سالانه ایران، دوره ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۴

۳-۳. تغییرات مساحت شرایط شاخص ZSI در سال ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰

در سال ۲۰۱۹، بخش قابل‌توجهی از کشور در شرایط ترسالی قرار داشته است. به‌طور مشخص، حدود ۱۶/۵ درصد از مساحت کشور در شرایط ترسالی بسیار شدید، ۱۹/۷ درصد با ترسالی شدید و ۲۷/۱ درصد با ترسالی متوسط رو به رو بوده است. همچنین، ۳۶/۵ درصد از مساحت کشور در وضعیت نرمال اقلیمی قرار داشته و تنها ۰/۰۱ درصد از مساحت کشور دچار خشکسالی متوسط بوده است. در این سال، هیچ‌گونه خشکسالی شدید یا بسیار شدید در کشور حاکم نبوده که نشان‌دهنده شرایط مطلوب بارندگی در بخش زیادی از کشور می‌باشد.

در مقابل، سال ۲۰۲۱ به‌عنوان یکی از سال‌های خشک شناخته می‌شود که شرایط اقلیمی متفاوتی را نسبت به سال ۲۰۱۹ نشان می‌دهد. در این سال، حدود ۳/۸ درصد از کشور با خشکسالی بسیار شدید، ۳۲/۱ درصد با خشکسالی شدید و ۴۴/۴ درصد با خشکسالی متوسط مواجه بوده است. در این میان، تنها ۱۹/۶ درصد از مساحت کشور دارای وضعیت نرمال بوده است. سهم مناطق دارای ترسالی متوسط و ترسالی شدید به‌ترتیب تنها ۰/۰۷ و ۰/۰۰۶ درصد بوده و ترسالی بسیار شدید نیز در این سال مشاهده نشده است. این توزیع بیانگر کاهش بارندگی و گسترش خشکسالی در مقایسه با یک ترسالی می‌باشد(شکل ۴).



شکل ۴. تغییرات مساحت شرایط شاخص ZSI در سال ۲۰۱۹ (ترسالی) و ۲۰۲۱ (خشکسالی)

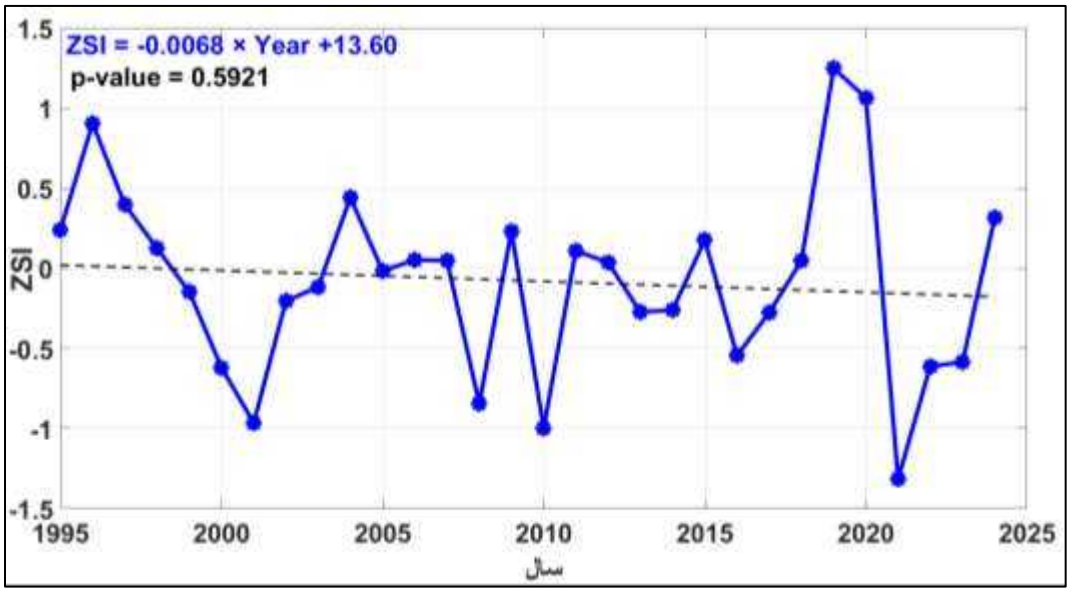
۴-۳. روند تغییرات شاخص خشکسالی ZSI

نتایج روند تغییرات شاخص خشکسالی استانداردشده (ZSI) سالانه در بازه‌ی زمانی ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۴، حاکی از شیب ۰/۰۰۶۸- در سال است. اگرچه این مقدار دارای علامت منفی است و به‌ظاهر از کاهش خفیف مقادیر شاخص در طول این دوره حکایت دارد، اما نتایج آزمون معناداری، حاکی از آن است که این روند از لحاظ آماری معنادار نیست.

به بیان دیگر، مقدار بالای p-value (۰/۵۹) نشان می‌دهد که نمی‌توان روند مشاهده‌شده را به یک تغییر سیستماتیک و پایدار نسبت داد، بلکه احتمال آن وجود دارد که تغییرات شاخص عمدتاً ناشی از نوسانات طبیعی، تصادفی یا دوره‌ای باشند. بنابراین، نمی‌توان با اطمینان از وجود روند مشخص کاهشی یا افزایشی در شدت خشکسالی سالانه طی این سه دهه سخن گفت.

اگرچه در این بازه‌ی زمانی برخی سال‌ها با خشکسالی شدید (مانند سال ۲۰۲۱) و برخی دیگر با شرایط مرطوب (مانند سال ۲۰۱۹) همراه بوده‌اند، اما در مجموع، روند کلی شاخص در مقیاس ملی از ثبات نسبی برخوردار بوده است و تغییر چشمگیر یا قابل پیش‌بینی در آن مشاهده نمی‌شود.

این نتایج نشان‌دهنده‌ی آن است که پدیده‌ی خشکسالی سالانه در ایران طی دوره‌ی مورد بررسی بیشتر به‌صورت نوسانات بین‌سالی بروز یافته است و فاقد یک الگوی پایدار و جهت‌دار (مثلاً کاهشی یا افزایشی) بوده است. در نتیجه، مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی‌های مرتبط با مقابله با خشکسالی باید بیش از آن‌که بر پیش‌بینی روندهای بلندمدت تکیه کند، بر پایش مستمر شرایط، واکنش سریع به نوسانات سالانه، و تدوین سیاست‌های تطبیقی متمرکز شود(شکل ۵).



شکل ۵. روند تغییرات شاخص ZSI دوره ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۴

۴. بحث

هدف مطالعه حاضر، بررسی روند تغییرات خشکسالی سالانه در سه دهه اخیر و شناسایی الگوهای فضایی شدیدترین سال‌های خشکسالی و ترسالی در ایران است. پس از محاسبه شاخص شدت خشکسالی استانداردشده (ZSI) برای هر سال در دوره‌ی ۳۰ ساله‌ی مورد بررسی (۱۹۹۵–۲۰۲۴)، مشخص شد که سال ۲۰۱۹ به‌عنوان مرطوب‌ترین و سال ۲۰۲۱ به‌عنوان خشک‌ترین سال این بازه شناخته می‌شوند که این نتیجه با مطالعه آریا صدر و رحیمی (۱۴۰۳) همسو است. میانگین شاخص ZSI در سال ۲۰۱۹ برابر با حدود ۱/۴+ و در سال ۲۰۲۱ کمتر از ۱/۳- بوده است که نشان‌دهنده تضاد آشکار بارشی میان این دو سال است.

بررسی الگوی فضایی این دو سال نیز مؤید همین تفاوت شدید در وضعیت بارشی کشور است. در سال ۲۰۱۹، اغلب مناطق ایران به‌ویژه شمال‌شرق، غرب و جنوب کشور مقادیر مثبت بالایی از شاخص را تجربه کرده‌اند و حداکثر مقدار شاخص به ۳/۳۶+ رسیده است که نشان‌دهنده وقوع ترسالی شدید در این نواحی می‌باشد. در مقابل، در سال ۲۰۲۱، بیشتر نقاط کشور با مقادیر منفی قابل‌توجهی مواجه بوده‌اند و شاخص در برخی مناطق به ۲/۶۵- نیز کاهش یافته است، به‌ویژه در نواحی شرقی، شمال‌غربی و غربی ایران که خشکسالی‌های شدیدتری را تجربه کرده‌اند. منطقه شمال‌غرب کشور در هر دو سال‌های مرطوب و خشک، با خشکسالی مواجه بوده است؛ به‌خصوص در سال ۲۰۲۱ که شدت خشکسالی در این منطقه به طور چشمگیری افزایش یافته بود. این نتیجه با مطالعه ترابی نژاد و همکاران (۱۴۰۲) که نشان داد خشکسالی‌های متوسط و شدید در ایران بیش‌تر در شمال‌غرب ایران دیده می‌شوند، تایید می‌گردد.

از نظر توزیع درصدی مساحت نیز تفاوت‌های بارزی بین این دو سال مشاهده می‌شود. در سال ۲۰۱۹، حدود ۱۶/۵ درصد از مساحت کشور در شرایط ترسالی بسیار شدید، ۱۹/۷ درصد در ترسالی شدید و ۲۷/۱درصد در ترسالی متوسط قرار داشته‌اند. در حالی که تنها ۰/۰۱ درصد از کشور خشکسالی متوسط را تجربه کرده و هیچ منطقه‌ای درگیر خشکسالی شدید یا بسیار شدید نبوده است. این در حالی است که در سال ۲۰۲۱، حدود ۳/۸ درصد از کشور با خشکسالی بسیار

شدید، ۳۲/۱ درصد با خشکسالی شدید و ۴۴/۴ درصد با خشکسالی متوسط مواجه بوده و سهم مناطق دارای شرایط نرمال به تنها ۱۹/۶ درصد کاهش یافته است. به‌عبارتی، سهم مناطق دارای شرایط تر به کمتر از یک درصد تنزل یافته است که حاکی از گسترش فراگیر خشکسالی در سطح کشور در این سال است.

تحلیل روند مقادیر سالانه شاخص طی دوره مورد بررسی نشان می‌دهد که روند تغییرات سالانه به لحاظ آماری معنادار نیست که به وسیله مطالعه (رضییی و همکاران، ۱۳۸۴) تایید می‌گردد. شیب محاسبه‌شده برابر با ۰/۰۰۶۸- در سال بوده، اما با توجه به عدم معناداری، نمی‌توان نتیجه‌گیری کرد که خشکسالی در

کشور در حال افزایش یا کاهش سیستماتیک است. بنابراین، به نظر می‌رسد تغیر اقلیم مرتبط با خشکسالی در ایران طی سه دهه‌ی گذشته بیشتر تابع نوسانات طبیعی و غیرخطی بوده و فاقد جهت‌گیری مشخص است.

بنابراین، با توجه به یافته‌های این پژوهش، سیاست‌گذاری در حوزه مدیریت منابع آب و مقابله با خشکسالی نباید صرفاً مبتنی بر پیش‌بینی بلندمدت باشد، بلکه باید تمرکز اصلی بر پایش مستمر، هشدار سریع و طراحی راهکارهای انعطاف‌پذیر در مقابل نوسانات اقلیمی قرار گیرد.

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با استفاده از شاخص خشکسالی استانداردشده (ZSI) وضعیت خشکسالی ایران طی دوره‌ی ۳۰ ساله‌ی ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۴ مورد بررسی قرار گرفت. بر پایه تحلیل سالانه شاخص، سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۱ به‌ترتیب به‌عنوان مرطوب‌ترین و خشک‌ترین سال‌های دوره شناسایی شدند.

این دو سال نمایانگر تضاد بارز بارشی در کشور هستند و بررسی الگوهای فضایی آن‌ها نشان داد که دامنه و شدت ترسالی و خشکسالی به‌صورت گسترده در سطح کشور پراکنده بوده است.

در سال ۲۰۱۹، بخش بزرگی از کشور با ترسالی متوسط تا بسیار شدید مواجه بود، در حالی که در سال ۲۰۲۱، بیشتر مناطق ایران تحت تأثیر خشکسالی متوسط تا بسیار شدید قرار گرفته است. تحلیل مساحت تحت تاثیر نیز این تفاوت را به‌خوبی نشان داد، به‌طوری‌که نسبت مساحت تحت تأثیر ترسالی شدید در سال ۲۰۱۹ با نسبت مناطق درگیر خشکسالی شدید در سال ۲۰۲۱ تفاوت چشمگیری دارد.

نتایج این پژوهش نشان داد که منطقه شمال‌غرب ایران به‌عنوان یکی از مناطق بحرانی خشکسالی، حتی در سال‌های با بارش نسبتاً بالا نیز دچار خشکسالی بوده است. این پایداری خشکسالی، به ویژه شدت قابل توجه آن در سال ۲۰۲۱، نشان‌دهنده شکنندگی بیشتر این منطقه نسبت به تغییر اقلیم و نیاز مبرم به مدیریت بهینه منابع آب و برنامه‌ریزی‌های جامع مقابله با خشکسالی است.

روند کلی تغییرات شاخص ZSI در این بازه دارای شیب منفی بسیار خفیف بود (۰/۰۰۶۸- در سال)، اما این روند از نظر آماری معنادار تشخیص داده نشد. این موضوع بیانگر آن است که تغییرات خشکسالی سالانه در ایران طی سه دهه اخیر از الگوی خاص یا روند بلندمدت پیروی نمی‌کند و بیشتر تابع نوسانات طبیعی، نامنظم و بین‌سالی است.

در نتیجه، اتکای صرف به پیش‌بینی‌های بلندمدت برای مدیریت خشکسالی نمی‌تواند راهبرد مناسبی باشد. بلکه لازم است سیاست‌گذاری در این حوزه بر پایه پایش مستمر شرایط اقلیمی، سامانه‌های هشدار سریع، و برنامه‌ریزی منعطف و منطقه‌محور انجام گیرد. همچنین پیشنهاد می‌شود پژوهش‌های آینده با تمرکز

بر عوامل مؤثر بر شدت و تداوم خشکسالی در مقیاس‌های محلی و بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای و مدل‌های اقلیمی پیشرفته، درک دقیق‌تری از رفتار این پدیده در ایران فراهم آورند.

منابع

آریا صدر، م.، و رحیمی، د. (۱۴۰۳). مقایسه آماری-همدیدی بارش ایران در خشکسالی و ترسالی (۲۰۲۱–۱۹۹۱). مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، ۱۵(۵۶)، ۱۴۰–۱۲۳.

ترابی‌نژاد، ن.، زرین، آ.، و داداشی‌رودباری، ع. (۱۴۰۲). بررسی انواع خشکسالی و مشخصه‌های آن در ایران با استفاده از شاخص بارش تبخیر-تعرق استاندارد شده (SPEI). مجله آب و خاک، ۳۷(۳)، ۴۸۶–۴۷۳. https://doi.org/10.22067/jsw.2023.81322.1257

حسینی، م. (۱۴۰۱). تحلیل دوره‌ای خشکسالی و اثرات آن بر منابع آب زیرزمینی استان‌های مرکزی ایران. مجله پژوهش‌های منابع طبیعی و محیط زیست، ۱۲(۱)، ۴۴–۵۹.

حیدری، س.، کریمی، ع.، و شمسی‌پور، ــــ . (۱۴۰۱). تبیین الگوهای مکانی شدت‌های خشکسالی در ایران. تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۳۶(۹)، ۱–۲۰.

رضایی، س.، معصوم‌پور سماکوش، ج.، و میری، م. (۱۴۰۳). تحلیل ویژگی‌های خشکسالی (شدت، مدت، بزرگی) ایران بر اساس شاخص خشکسالی چندمتغیره. فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب، ۴(۱)، ۸۲–۹۸. https://doi.org/10.22126/atwe.2024.10319.1114

رضایی، م.، حسینی، ر.، و ناصری، س. (۱۳۹۷). پیامدهای اجتماعی خشکسالی در مناطق روستایی ایران. فصلنامه مطالعات توسعه روستایی، ۹(۳)، ۵۶–۷۲.

رضییی، ط.، دانش‌کارآراسته، پ.، و ثقفیان، ب. (۱۳۸۴). بررسی روند بارندگی سالانه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مرکزی و شرقی ایران. آب و فاضلاب، ۱۶(۲)، ۷۳–۸۱.

عباسی، ک. (۱۳۹۶). مدیریت پایدار منابع آب در شرایط خشکسالی. نشریه مدیریت منابع طبیعی، ۴(۲)، ۲۱–۳۸.

کاظمی، م.، شریفی، ن.، و عبادی، س. (۱۳۹۸). تحلیل روند خشکسالی در ایران با استفاده از شاخص SPI. فصلنامه پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۵۱(۲)، ۸۷–۱۰۲.

کریمی، ع. (۱۳۹۹). راهبردهای کاهش اثرات خشکسالی در مناطق خشک ایران. فصلنامه سیاست و برنامه‌ریزی محیط زیست، ۶(۴)، ۶۷–۸۳.

فرجزاده‌اصل، م.، و دارند، م. (۱۳۸۷). تحلیل تأثیر دمای هوا بر مرگ‌ومیر شهر تهران. تحقیقات نظام سلامت حکیم، ۱۱(۳)، ۲۷–۳۴.

محمدی، ح.، ایزدی، ن.، و قاسمی گرکانی، ا. (۱۴۰۲). بررسی آسیب‌پذیری و تحلیل فضایی ریسک خشکسالی بخش کشاورزی در ایران. مخاطرات محیط طبیعی، ۱۲(۳۶)، ۷۹–۹۸.

موسوی، ح.، و احمدی، ف. (۱۴۰۰). بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر شدت خشکسالی در ایران. مجله علوم محیطی ایران، ۱۸(۱)، ۳۳–۴۵.

Abbaspour, K. C., Faramarzi, M., Ghasemi, S. S., & Yang, H. (2009). Assessing the impact of climate change on water Abbaspour, K. C., Faramarzi, M., Ghasemi, S. S., & Yang, H. (2009). Assessing the impact of climate change on water resources in Iran. Water Resources Research, 45(10). https://doi.org/10.1029/2008WR007615

Dafouf, S., Lahrach, A., Tabyaoui, H., El Hafyani, M., & Benaabidate, L. (2022). Meteorological drought assessment in the Ziz watershed (South East of Morocco). Ecological Engineering & Environmental Technology, 23, Article 9. https://doi.org/10.12912/27197050/150113

Islam, A., Karim, M., & Mondol, M. (2021). Appraising trends and forecasting of hydroclimatic variables in the north and northeast regions of Bangladesh. Theoretical and Applied Climatology, 143, 1–18. https://doi.org/10.1007/s00704-020-03411-0

Jain, V. K., Pandey, R. P., Jain, M. K., & Byun, H.-R. (2015). Comparison of drought indices for appraisal of drought characteristics in the Ken River Basin. Weather and Climate Extremes, 8, 1–11. https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.05.002

Kyaw, A. K., Hamed, M. M., & Shahid, S. (2023). Spatiotemporal changes in Universal Thermal Climate Index over South Asia. Atmospheric Research, 292, 106838. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.106838

Madani, K. (2014). Water management in Iran: What is causing the looming crisis? Journal of Environmental Studies and Sciences, 4(4), 315–328. https://doi.org/10.1007/s13412-014-0182-z

Nedham, U. S., & Hassan, A. S. (2019). Comparison of some drought indices in Iraq. Al-Mustansiriyah Journal of Science, 30(4), 1–9.

Spinoni, J., Vogt, J. V., Naumann, G., Barbosa, P., & Dosio, A. (2018). Will drought events become more frequent and severe in Europe? International Journal of Climatology, 38(4), 1718–1736. https://doi.org/10.1002/joc.5291

Urban, A., Di Napoli, C., Cloke, H., Kyselý, J., Pappenberger, F., Sera, F., Schneider, R., Vicedo-Cabrera, A., Acquaotta, F., Ragettli, M., … Gasparrini, A. (2021). Evaluation of the ERA5 reanalysis-based

Universal Thermal Climate Index on mortality data in Europe. Environmental Research, 198, 111227. https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111227

Van Loon, A. F. (2015). Hydrological drought explained. Wiley Interdisciplinary Reviews: Water, 2(4), 359–392. https://doi.org/10.1002/wat2.1085

Wilhite, D. A., & Buchanan-Smith, M. (2005). Drought as hazard: Understanding the natural and social context. In D. A. Wilhite (Ed.), Drought and Water Crises: Science, Technology, and Management Issues (Vol. 3, pp. 29–51). CRC Press.

Zarei, A., Asadi, E., Ebrahimi, A., Jafary, M. M., Malekian, A., Tahmoures, M., & Alizadeh, E. E. (2017). Comparison of meteorological indices for spatio-temporal analysis of drought in Chahrmahal-Bakhtiyari province in Iran. Hrvatski Meteorološki Časopis, 52, 13–26.

Zarei, A., & Moghbel, M. (2025). Detection of changes in the annual cooling degree days (ACDD) index in Iran for the historical and future periods, considering the highly populated provinces. Journal of Thermal Biology, Article 104147. https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2025.104147

آشکار سازی روند تغییرات شاخص دومارتن و بارش موثر در واکاوی تغییر اقلیم

لاله پرویز[۱]، امیر حسین صفوی [۲]

۱- دانشیار دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید مدنی آذربایجان
۲- دانشجوی کارشناسی دانشکده کشاورزی دانشگاه شهید مدنی آذربایجان

آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول (laleh_parviz@yahoo.com)

چکیده

آشکارسازی تغییرات اقلیمی با توجه به تبعات منفی گسترده آن در سطوح مختلف جهت کاهش خسارات ناشی با استفاده از روشی کارآمد و در عین حال ساده می‌تواند نقش موثری داشته باشد. در این راستا جهت پایش تغییر اقلیمی از شاخص‌های دومارتن و بارش موثر استفاده شد، به این صورت که سری زمانی شاخص‌ها در حالت‌های مختلف (حالت اول ۷:۲۵، حالت دوم۱۱:۲۱، حالت سوم ۱۴:۱۸، حالت چهارم ۹:۲۳، حالت پنجم ۳:۲۹) به زیر سری‌هایی تقسیم و شیب هر قسمت محاسبه شد. علامت شیب خط روند در دو قسمت در برخی از حالت‌ها یکسان و در برخی از حالت‌ها متفاوت است. حتی در یک حالت واحد، علامتی شیب دو قسمت خط روند دارای عکس العمل‌های متفاوتی در ایستگاه‌های مختلف است. حالت پنجم دارای بیشترین مقدار تغییرات در دو قسمت خط روند بود که حاکی از تغییرات اقلیمی در سال‌های اخیر است. قدر مطلق متوسط شاخص در دو قسمت در تمام حالت‌ها برای هر دو شاخص محاسبه شد که بیشترین مقدار آماره در شاخص دومارتن مربوط به ایستگاه‌های یزد، کرمانشاه و شیراز و در شاخص PEI آماره مربوط به ایستگاه کرمانشاه، همدان، شیراز و زنجان می‌باشد. ایستگاه کرمانشاه و شیراز با دو شاخص تغییرات زیادی داشتند.

کلید واژه‌ها: شیب، شاخص، علامت، ساده.

مقدمه

تغییرات اقلیمی تأثیر قابل توجهی بر محیط زیست دارد. این تأثیر نه تنها از منطقه‌ای به منطقه دیگر، بلکه از زمانی به زمان دیگر نیز متفاوت است. از سوی دیگر تغییرات زیست‌محیطی به ویژه تغییرات اقلیمی می‌تواند وضعیت اقتصادی افراد به ویژه مردم در مناطق روستایی را تحت تاثیر قرار دهد، چرا که معیشت اکثریت آنها مستقیماً به منابع طبیعی وابسته است. کاهش حاصلخیزی خاک و تخریب منابع جنگلی، منابع آبی، مراتع و شیلات، فقر را در بسیاری از کشورهای در حال توسعه تشدید کرده است. گرمایش جهانی به بحرانی‌ترین پدیده در جهان تبدیل شده است. طبق گزارش IPCC (2013)، دمای زمین ۰/۸۵ درجه سانتیگراد افزایش یافته است. بنابراین، می‌توان انتظار داشت که گرمایش جهانی منجر به کاهش بارندگی شود که این امر باعث تغییراتی در سطح آب‌های زیرزمینی به دلیل تبخیر و تعرق، از بین رفتن پوشش گیاهی و رواناب سطحی خواهد شد (Sharafi and Mir Karim 2020).

دما و بارندگی به عنوان مولفه‌های اقلیمی مهمی هستند، بنابراین روند تغییرات بارش و دمای شمال غرب ایران در ده ایستگاه هواشناسی در سه مقیاس زمانی ماهانه، فصلی و سالانه با آزمون ناپارامتری من-کندال مورد بررسی قرار گرفت. از روش تخمینگر شیب سن در تعیین نرخ تغییرات داده‌های مورد بررسی استفاده شد. دما در مقیاس ماهانه در بیشتر ماه‌ها دارای روند افزایشی بود. در این میان ماه‌های اردیبهشت و مهر در بین ایستگاه‌ها دارای بیشترین روند افزایش معنی‌دار بودند. داده‌های ماهانه بارندگی با روند کاهشی مواجه بود. در مقیاس فصلی، تابستان، پاییز و زمستان دارای بیشترین افزایش دما بودند و بهار و زمستان بیشترین مقدار کاهش بارندگی را داشتند. در مقیاس سالانه روند افزایش معنی‌دار دما در ۶۰ درصد ایستگاه‌ها و روند کاهشی بارش در ۷۰ درصد ایستگاه‌ها مشاهده شد. ۱/۲ درجه سانتی گراد افزایش دما و ۸۸/۹ میلیمتر کاهش بارندگی در پنجاه سال گذشته در شمال‌غرب ایران مشاهده شد (امیر رضائیه و همکاران، ۱۳۹۵). برای بررسی تغییرات اقلیمی از تحلیل روند وقوع رخدادهای فرین اقلیمی در غرب و جنوب‌غرب ایران استفاده شد. برای این منظور شاخص‌های حدی محاسبه و روند تغییرات هر یک از شاخص‌ها با آزمون من-کندال بررسی شد. در بیشتر ایستگاه‌ها روند شاخص‌های گرم مانند شب‌های گرم، روزهای گرم، تعداد روزهای تابستانی و تعدا شب‌های حاره‌ای افزایشی بود. شاخص‌های سرد مانند روزهای سرد، شب‌های سرد و تعداد روزهای همراه با یخبندان کاهشی بود. همچنین بارش‌های شدید و کوتاه مدت در مقابل کوتاه‌تر شدن فصل بارش هم مشاهده شد. روند نزولی شاخص روزهای تر و روند صعودی شاخص روزهای خشک متوالی نمایانگر شرایط بری شدن و تشدید کم آبی است (غلامرضایی و همکاران، ۱۴۰۲). مهم‌ترین تأثیرات تغییرات اقلیمی مربوط به دما و بارش می‌باشد، در این میان بارش می‌تواند به عنوان مولفه مهمی در نظر گرفته شود، زیرا تغییرات در الگوهای بارش ممکن است منجر به سیل یا خشکسالی در مناطق مختلف شود. همچنین، بارش عامل مهمی در کشاورزی است و در سال‌های اخیر نیاز به اطلاع از تغییرپذیری بارش برای دوره‌های ماهانه تا روندهای سالانه و فصلی افزایش یافته است و نقاط تغییر برای ۲۲ ایستگاه باران‌سنجی در استان فارس طی سال‌های ۱۹۷۲ تا ۲۰۱۱

مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. از آزمون ناپارامتری من-کندال و روش سن برای تعیین روندهای مثبت یا منفی استفاده شده است .همچنین از آزمون Pettitt، آزمون همگنی نرمال استاندارد، آزمون دامنه Buishand و نسبت Von Neuman برای تشخیص نقاط تغییر در سری‌های زمانی استفاده شده است. از رویکرد TFPW برای کاهش اثرات خودهمبستگی و همبستگی پیاپی بر آزمون من-کندال استفاده شده است. نتایج آزمون من-کندال و روش سن، روند کاهشی را برای همه ایستگاه‌های بارندگی به جز یک ایستگاه نشان داد، ولی هیچ روند معنی‌داری در همه ایستگاه‌ها مشاهده نشد. همچنین نتایج نشان داد که بارش ناهمگنی رخ نداده است و هیچ نقطه تغییر در سری‌های زمانی بارش وجود ندارد. یچ تغییر و تغییر ناگهانی در سری‌های زمانی بارش به جز در فصل زمستان برای چهار ایستگاه قابل مشاهده نبود (Khosravi et al., 2017). برای پایش تغییرات اقلیمی از داده‌های هواشناسی بلندمدت ۴۷ ایستگاه در ایران به مدت ۶۶ سال استفاده شد. برای طبقه‌بندی آب و هوا بر اساس معیارهای دما و بارش، به ترتیب از روش کوپن و شاخص خشکی یونسکو استفاده شد .بر اساس روش کوپن، آب و هوای ایران به ۴ منطقه محیطی شامل بیابان خشک، نیمه‌خشک، مرطوب با زمستان‌های ملایم و مرطوب با زمستان‌های شدید تقسیم شد. بر اساس شاخص خشکی یونسکو، آب و هوای ایران به ۵ منطقه محیطی شامل بسیار خشک، خشک، نیمه‌خشک، مرطوب و بسیار مرطوب طبقه‌بندی می‌شود. نتایج نشان داد که در ۴۲ ایستگاه (۸۹٪ ایستگاه‌ها)، شیب خط روند مثبت و میانگین دمای سالانه بلندمدت ۵ ایستگاه (۱۱٪ ایستگاه‌ها) منفی بود. علاوه بر این برای بارش، ۱۱ ایستگاه (۲۵٪ ایستگاه‌ها) روند مثبت و ۳۳ ایستگاه روند منفی (۷۵٪ ایستگاه‌ها) داشتند. در نهایت مشخص شد که تغییرات قابل توجهی در دما و بارش وجود دارد. از سوی دیگر، روند کلی افزایش دما و روند کاهشی بارش از مناطق سردسیر با ارتفاع بالا یا عرض جغرافیایی بالا به مناطق سردسیر با عرض جغرافیایی پایین مانند خطوط ساحلی در ایران مشاهده شد (Sharafi and Mir Karim 2020). تغییرات اقلیمی تأثیر قابل توجهی بر الگوهای بارش، به ویژه در مورد وقوع رویدادهای بارش شدید دارد. این مطالعه به بررسی پیامدهای تغییرات اقلیمی بر شدت و فراوانی بارش‌های شدید در استان آذربایجان شرقی می‌پردازد. تجزیه و تحلیل جامعی بر روی داده‌های بارش روزانه به دست آمده از شش ایستگاه هواشناسی در طول دوره ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۴ با هدف شناسایی روندهای خاص بارش انجام شد. از مدل اقلیمی منطقه‌ای LARS-WG7 برای شبیه‌سازی بارش استفاده شد و این شبیه‌سازی به طور دقیق با داده‌های مشاهده شده مقایسه شدند تا صحت آنها تأیید شود. پس از یک فرآیند اعتبارسنجی کامل مدل، سناریوهای مختلف تغییر اقلیم به ویژه SSP1-2-6، SSP2-4-5 و SSP5-8-5- برای پیش‌بینی الگوهای بارش از سال ۲۰۲۱ تا ۲۰۴۱ اجرا شدند. شاخص‌هایR10mm، R95P و R99P برای ارزیابی تغییرات در شدت و فراوانی رویدادهای بارش شدید استفاده شدند. یافته‌ها نشان می‌دهد که با پیش‌بینی انجام گرفته، شدت و فراوانی رویدادهای بارش شدید در برخی مناطق به طور قابل توجهی افزایش یابد، در حالی که در برخی مناطق دیگر کاهش می‌یابد. این تغییرات خطرات قابل توجهی از جمله افزایش سیل، فرسایش خاک، آسیب به زیرساخت‌ها و اثرات نامطلوب بر کشاورزی و منابع آب را به همراه دارد. این امر بر ضرورت گنجاندن این یافته‌ها در استراتژی‌های مدیریت منابع آب و کاهش خطر بلایا توسط سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان در آینده تأکید می‌کند. پایش تغییرات اقلیمی

می‌توانند به طور مؤثر اثرات تغییرات اقلیمی را کاهش داده و با شرایط اقلیمی در حال تحول که پایداری و تاب‌آوری منطقه را تهدید می‌کند، سازگار شوند .(Hedjazizadeh et al., 2025)

با توجه اهمیت پایش و بررسی تغییرات اقلیمی، هدف این تحقیق بررسی روند تغییرات شاخص دومارتن و شاخص بارش موثر با شیب خط روند در طول زیر سری‌های مختلف طول دوره آماری مورد مطالعه است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

یزد، زنجان، اردبیل، شیراز، سمنان، همدان و کرمانشاه ایستگاه‌های مطالعاتی تحقیق بودند که اقلیم حاکم بر ایستگاه در محدوه خشک تا نیمه‌خشک قرار دارد. ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۱ طول دوره آماری در نظر گرفته شده است.

شاخص‌های اقلیمی

شاخص‌های اقلیمی کمیت‌هایی هستند که می‌توان از آنها برای مشخص کردن خشکسالی‌ها، حالت‌های تغییر پذیری آب و هوا استفاده کرد. شاخص‌های اقلیمی نقش کلیدی در پایش و پیش‌بینی آب و هوا دارند. شاخص‌های اقلیمی دارای ساختار ریاضی هستند که نوع معادله ریاضی حاکم بر آنها و داده‌های دخیل در آنها با هم متفاوت است. معادلات دو نوع شاخص کاربردی تحقیق در ادامه آورده شده است.

*شاخص دومارتن

دومارتن با تغییراتی در فرمول ترانسو و جایگزین کردن عامل تبخیر با نمایه از دمای هوا رابطه ۱ را پیشنهاد داد.

$$I = \frac{P}{T + 10} \qquad (۱)$$

P : متوسط بارندگی سالانه (میلیمتر)، T: متوسط دمای سالانه (درجه سانتی گراد).

اگرچه در فرمول دومارتن عامل تبخیر حذف شده است، اما تبخیر خود در ارتباط با دمای هوا بوده و افزایش دما باعث افزایش تبخیر می‌شود. بنابراین زیاد بودن I ممکن است یا به دلیل پایین بودن دما یا بالا بودن بارندگی باشد. براساس فرمول دومارتن ۶ نوع آب و هوا طبقه بندی می‌شود.

*شاخص بارش موثر

(۲)

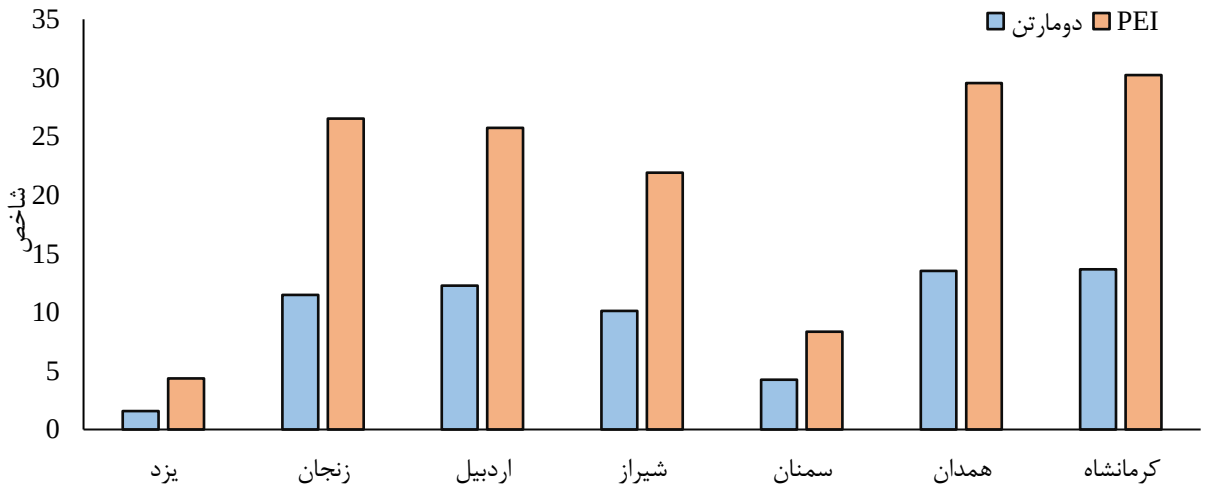
$$PEI = 115\left(\frac{P}{T-10}\right)^{1.11}$$

P: مقدار بارندگی ماهانه (اینچ)، T: متوسط دمای ماهانه (درجه سانتی گراد).

برای تعیین اقلیم، مقادیر ماهانه شاخص باران موثر در طول سال با یکدیگر جمع می‌شوند تا نمایه باران موثر محاسبه شود. براساس شاخص بارش موثر پنج نوع طبقه‌بندی اقلیمی وجود دارد.

نتایج

شاخص‌های اقلیمی از جمله مولفه‌هایی هستند که در پایش تغییرات اقلیم نقش مهمی دارند، به همین دلیل در این تحقیق از شاخص‌های دومارتن و بارش موثر در این زمینه استفاده شد. شکل ۱ نمودار تغییرات شاخص‌ها را در ایستگاه های مطالعاتی نشان می‌دهد.



شکل ۱- نمودار تغییرات شاخص دومارتن و بارش موثر در ایستگاه‌های مطالعاتی

متوسط مقادیر شاخص دومارتن در بازه زمانی ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۱ در ایستگاه‌های یزد، زنجان، اردبیل، شیراز، سمنان، همدان و کرمانشاه به ترتیب برابر با ۲/۲۲، ۱۲/۳۹، ۱۲/۲۷، ۱۰/۱، ۴/۲۵، ۱۳/۵۳ و ۱۳/۶۶ محاسبه شد. بیشترین و کمترین مقدار شاخص دومارتن و شاخص بارش موثر مربوط به کرمانشاه و یزد بود. برای بررسی تغییرات اقلیمی دوره مطالعاتی سری شاخص دومارتن و بارش موثر به چندین زیرسری تقسیم و شیب خط روند در هر زیر بازه محاسبه شد. هر زمان تفاوت بین شیب خط روند زیاد باشد، حاکی از تغییرات اقلیمی است. حالت‌های مورد بررسی شامل حالت اول ۷:۲۵، حالت دوم۱۱:۲۱،

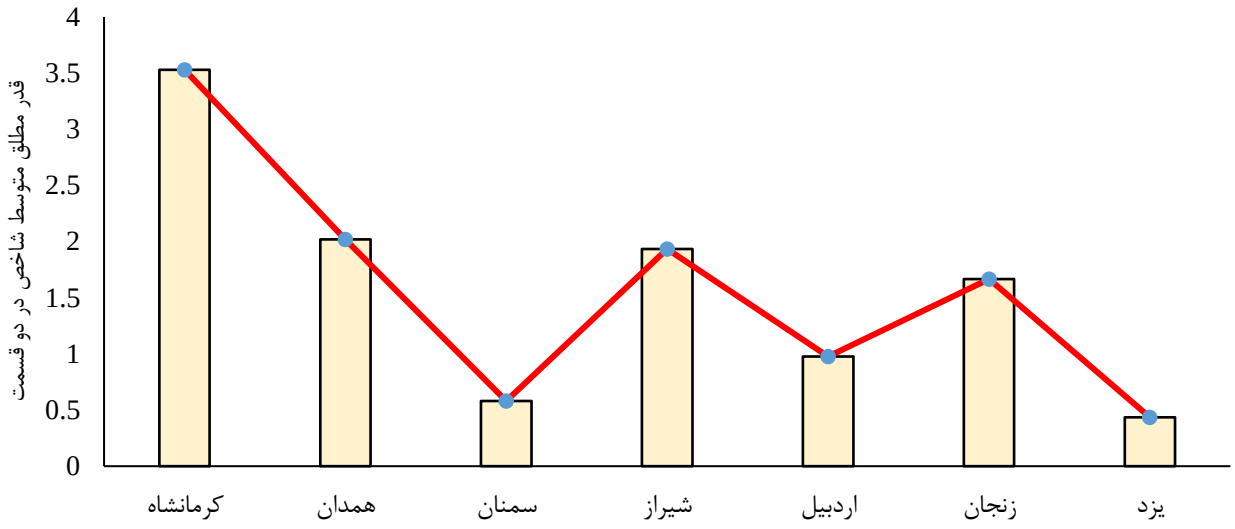
حالت سوم ۱۴:۱۸، حالت چهارم ۹:۲۳، حالت پنجم ۳:۲۹. مقادیر شیب در خط روند در حالت‌های مختلف در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- بررسی تغییرات شیب خط روند مربوط به سری شاخص دومارتن ایستگاه‌های مختلف

	یزد	زنجان	اردبیل	شیراز	سمنان	همدان	کرمانشاه
حالت اول	-۰/۱۷	-۰/۱۹	-۰/۲۱	-۰/۱۳	-۰/۰۱۳	-۰/۰۵	-۰/۱۴
	۰/۱۹	۰/۲	-۰/۲۹	۰/۰۱۳	۰/۰۷۸	۰/۴۸	-۰/۱۵
حالت دوم	-۰/۲۳	-۰/۳۵	-۰/۲۹	-۰/۲۳	۰/۰۷۸	۰/۰۳۹	-۰/۲۳
	۰/۰۴۴	-۰/۴۱	-۰/۲۳	-۰/۴۵	-۰/۰۴۵	-۰/۰۶۴	-۰/۲۷
حالت سوم	-۰/۲۷	-۰/۳۵	-۰/۳۲	-۰/۰۵	۰/۱	۰/۰۴۴	-۰/۲۱
	۰/۰۳۴	-۰/۰۵۱	-۰/۰۴۱	۰/۰۲۷	۰/۰۵۸	-۰/۱۷۲	-۰/۰۰۹۸
حالت چهارم	-۰/۲۱	-۰/۲۱	-۰/۲۳	-۰/۱۱	۰/۰۱	۰/۰۱۴	-۰/۱۷
	۰/۰۸۴	-۰/۰۵۸	-۰/۲۲	-۰/۰۳۹	۰/۱۲	۰/۱۲	-۰/۳۳
حالت پنجم	-۰/۱۴	-۰/۲۱	-۰/۱۹	-۰/۱۶	-۰/۰۳۱	-۰/۰۹	-۰/۰۶۹
	-۱۳/۴۲	-۴/۷۶	-۲/۵۸	-۴/۵۳	-۱/۴۹	-۵/۰۸	-۷/۱

براساس جدول ۱، اختلاف شیب خط روند بین دو قسمت هر حالت در برخی از حالت ها با هم زیاد است مانند حالت پنجم که در تمام ایستگاه‌ها اختلاف زیاد است که می‌تواند نشانه‌ای از تغییر اقلیم باشد. در برخی از دو قسمت حالت‌ها اختلاف کم است مانند حالت اول در کرمانشاه. در برخی از ایستگاه و حالت‌ها علامت شیب خط روند تغییر پیدا می‌کند مانند حالت اول در ایستگاه یزد که از حالت منفی به مثبت تغییر پیدا کرده است. در برخی حالت ها شیب خط روند در دو قسمت از هر حالت تغییر نکرده است مانند حالت دوم اردبیل. برای بررسی بیشتر متوسط شیب بخش اول خط روند در حالت اول و همین طور متوسط شیب بخش دوم خط روند در حالت دوم در ایستگاه‌ها محاسبه شد و بعد قدرمطلق اختلاف شیب در دو حالت محاسبه شد که این مقادیر در ایستگاه‌های کرمانشاه، همدان، سمنان، شیراز، اردبیل، زنجان و یزد به ترتیب برابر با ۱/۴۲، ۰/۰۱۹، ۰/۲۸، ۰/۸۵، ۰/۴۲، ۰/۷۵ و ۲/۴ بود. بیشترین اختلاف به ترتیب مربوط به ایستگاه یزد، کرمانشاه و شیراز بود. در حالت بعدی تغییرات شاخص PEI بررسی می‌شود. در این حالت هم تغییرات دو بخش خط روند در حالت پنجم زیاد است که حاکی از وجود تغییرات اقلیمی است. در این حالت هم علامت شیب در دو قسمت خط روند در برخی از حالت‌ها یکسان است مانند حالت دوم ایستگاه کرمانشاه ، حالت چهارم ایستگاه همدان یا در برخی از موارد علامت دو

قسمت خط روند در هر حالت یکسان نیست مانند حالت چهارم ایستگاه یزد. با استفاده از شاخص PEI متوسط شیب بخش اول خط روند در حالت اول و همین طور متوسط شیب بخش دوم خط روند در حالت دوم در ایستگاه‌ها محاسبه می‌شود و بعد قدر مطلق اختلاف شیب در دو حالت محاسبه می‌شود که این مقادیر در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- قدر مطلق متوسط شیب خط روند در دو قسمت در تمام ایستگاه‌های مطالعاتی

براساس شکل ۲ بیشترین مقدار آماره مربوط به ایستگاه کرمانشاه، همدان، شیراز و زنجان می‌باشد. ایستگاه کرمانشاه و شیراز با دو شاخص تغییرات زیادی داشتند.

نتیجه گیری

واکاوی تغییرات اقلیمی با روشی کارآمد در کاهش اثرات منفی می تواند کمک شایانی کند. در این راستا سری زمانی شاخص های دومارتن و PEI در حالت‌های مختلف به زیر سری‌هایی تقسیم شدند و شیب هر قسمت محاسبه می‌شود. حالت پنجم دارای بیشترین مقدار تغییرات در دو قسمت خط روند بود که حاکی از تغییرات اقلیمی در سال‌های اخیر است. قدر مطلق متوسط شاخص در دو قسمت در تمام حالت‌ها برای هر دو شاخص محاسبه شد که بیشترین مقدار آماره در شاخص دومارتن مربوط به ایستگاه‌های یزد، کرمانشاه و شیراز و در شاخص PEI آماره مربوط به ایستگاه کرمانشاه، همدان، شیراز و زنجان می باشد. ایستگاه کرمانشاه و شیراز با دو شاخص تغییرات زیادی داشتند.

منابع

۱-امیر رضائیه، ع.، پرهمت، ج.، و احمدی، ف. (۱۳۹۵). بررسی روند تغییرات بارش و دمای شمال غرب کشور در نیم قرن اخیر. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۶(۱۰):۸۰۹-۷۹۷.

۲-غلامرضایی، س.، زند، م.، دریابادی، س.ج.، و علیجانی، ب. (۱۴۰۲). آشکار سازی تغییر اقلیم با تحلیل روند وقوع رخدادهای فریت اقلیمی در غرب و جنوب عرب ایران. نشریه پژوهش های اقلیم شناسی، ۱۴(۵۴): ۵۴-۳۷.

3-Hedjazizadeh, Z., Karbalaee, A. and Kazemiazarr, M. (2025). Investigating the Impact of Climate Change on Extreme Precipitation Events in East Azerbaijan Province. Geography, 22(83),.1-20.

4-Khosravi, H., Sajedi Hosseini, F., Nasrollahi, M. & Gharechaee, H.R. (2017). Trend analysis and detection of precipitation fluctuations in arid and semi-arid regions. Desert, 22(1), 77-84.

5-Sharafi, S. and Mir Karim, N., 2020. Investigating trend changes of annual mean temperature and precipitation in Iran. Arabian Journal of Geosciences, 13(16), 759.

Revealing the trend of changes in the Dumartin index and effective precipitation in analyzing climate change

Laleh Parviz[1], Amir Hossein Safavi[2]

Associate Proffersor, Faculty of Agriculture, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran.

2-BSc Student, Faculty of Agriculture, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran.

* Corresponding author: laleh_parviz@yahoo.com

Detecting climate change, considering its widespread negative consequences at different levels, can play an effective role in reducing the resulting damages using an efficient and simple method. In this regard, the Dumartin and effective precipitation indices were used in such a way that the time series of the indices in different modes (first mode 7:25, second mode 11:21, third mode 14:18, fourth mode 9:23, fifth mode 3:29) are divided into sub-series and the slope of each part is calculated. The sign of the trend line slope in the two parts is the same in some modes and different in some modes. Even in a single mode, the slope signs of the two parts of the trend line have different reactions. The fifth mode had the highest amount of changes in the two parts of the trend line, which indicates climate changes in recent years. The average absolute value of the index in the two parts was calculated in all cases for both indices, with the highest statistical value in the Demarton index being related to the stations of Yazd, Kermanshah and Shiraz, and in the PEI index, the statistic was related to the stations of Kermanshah, Hamedan, Shiraz and Zanjan. The stations of Kermanshah and Shiraz had large changes with the two indices.

Keywords: Slope, index, sign, simple

وردایی طول فصول ایران در اثر گرمایش جهانی

محمد دارند

استاد گروه آب و هواشناسی دانشکده منابع طبیعی دانشگاه کردستان

m.darand@uok.ac.ir

چکیده

گرمایش جهانی نه تنها بر شدت و فراوانی فرین¬های جوی در قالب رخنمود امواج گرمایی و ر دماهای بیشینه¬ی کم سابقه نقش داشته است، بلکه نظم زمانی و گاه¬شمار فصول را نیز دستخوش وردایی کرده است. این پژوهش بر آن است که وردایی فصول ایران را مورد کندوکاو قرار دهد. برای نیل به آن از داده های روزانه¬ی شبکه¬بندی شده¬ی مرکز پیش میان مدت جوی اروپایی(ECMWF) نسخه ERA-5 در طول دوره¬ی آماری ۱۹۷۹ تا ۲۰۲۴ بهره گرفته شد. رفتار فراسنج دما مبنای تعریف فصول و به بیانی دیگر جهت شناخت فصول هواشناسی قرار گرفت. براش چندجمله¬ای درجه¬ی سه بر روی سری زمانی مقادیر دما و بهره¬گیری از روش آستانه¬ی صدکی گاه¬شمار زمانی فصول هواشناسی را برای هر یاخته¬ی مکانی از گستره¬ی ایران روشن ساخت. وردایی فصول هواشناسی بر روی گستره¬ی ایران توسط آزمون من کندال اصلاح شده مورد آزمون قرار گرفت. نرخ وردایی آن به کمک تخمینگر شیب سن برآورد شد. یافته¬ها نشان داد که فصول ایران دچار وردایی معناداری شده است. میانگین پهنه¬ای نشان داد که طول فصل تابستان ایران ۱۱/۸ روز در هر ده سال افزایش یافته است در حالیکه طول فصل زمستان ایران حدود ۵/۸ روز به ازای هر دهه کاهش یافته است.

کلید واژه‌ها: گرمایش جهانی، دما، فصول هواشناسی، ایران.

مقدمه

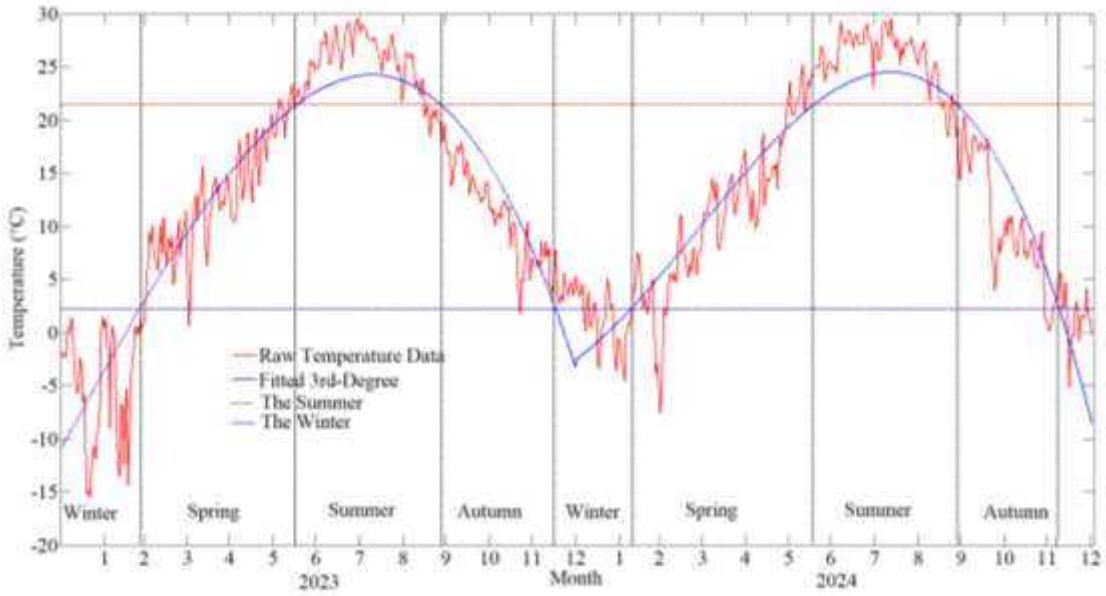
یکی از پیامدهای گرمایش جهانی و تغییرات اقلیمی، وردایی معنادار و قابل توجه در نظم زمانی، گاه شمار و طول فصل هاست. در اثر گرمایش جهانی، طول دوره رشد طولانی تر شده است(Christidis et al.2007) و دامنه‌ی چرخه‌ی دمای فصلی دچار وردایی شده است(Stine et al. 2009; Qian and Zhang 2015, 2019). تغییرات در طول و زمان بندی فصول بر چرخه های زیستی گیاهان و جانوران، کشاورزی و منابع طبیعی اثرات بسیار گسترده‌ای دارد(IPCC,2021; Parmesan and Yohe, 2003) و برپایه‌ی گزارش هیات بین دول تغییر اقلیم (IPCC, 2021) وردایی گاه شمار فصول و طول آنها بر روی مناطق زیادی از کره‌ی زمین به لحاظ آماری معنادار است و با ادامه گرمایش جهانی شدت و شتاب بیشتری را تجربه خواهد کرد. لین و وانگ (۲۰۲۲) با بررسی که بر روی وردایی طول فصل تابستان در نیمکره شمالی در اثر گرمایش جهانی انجام دادند به این نتیجه دست یافتند که با افزایش ۱ درجه سلسیوس دمای جهانی طول فصل تابستان ۱۵ روز در دوره ۲۰۱۴-۱۹۶۱ افزایش یافته است. براساس مدلهای گزارش CMIP6 با افزایش ۱ درجه سلسیوس دما طول فصل تابستان ۱۰ روز طولانی تر می شود.

تعاریف متعددی از فصول وجود دارد. در یک دسته بندی کلی می توان آنها را در دو گروه جای داد. گروه اول شناخت فصل‌ها برپایه‌ی گاه شمار نجومی(Astronomy) است و فصل ها براساس زاویه تابش خورشید، حرکت ظاهری خورشید روی زمین و چرخش زمین حول خورشید تعریف می شوند. برای نمونه در نیمکره شمالی، فصل تابستان از ۲۲ اُم ژوئن گاه شمار میلادی یا ۱ تیر گاه شمار خورشیدی (انقلاب تابستانی) آغاز و در ۲۳ اُم سپتامبرگاه شمار میلادی یا ۱ مهر گاه شمار خورشیدی(اعتدال پاییزی) پایان می یابد. در حالی که در گروه دوم که گاه شمار هواشناسی(Meteorology) نیز نامیده می شود، فصل ها براساس رفتار فراسنج های هواشناختی عمدتاً فراسنج دما تعریف می شوند. برای نمونه گرم ترین سه ماهه‌ی سال (ژوئن(خرداد) تا اوت(مرداد)) در نیمکره شمالی به عنوان فصل تابستان در نظر گرفته می شود. علاوه بر دسته‌بندی یاد شده روشهای دیگری نیز برای تعریف فصول وجود دارد. برای نمونه به روش آلپرت و همکاران (۲۰۰۴) اشاره کرد که از روش طبقه بندی همدید سامانه‌های جوی در شرق مدیترانه برای شناخت فصل تابستان با عنوان تابستان همدید استفاده کرده اند. ممکن است برپایه‌ی رویداد خاصی همچون رخنمود تورنادو (فصل تورنادو)، رخنمود بارش(فصل موسمی جنوب شرق ایران) یا فعالیت های خاصی(فصل رشد) فصول نیز تعریف شوند.

اگر مبنای تعریف فصول را فراسنج هواشناسی دما در نظر بگیریم دو روش برای تعریف فصول برپایه‌ی آن وجود دارد. روش اول بر مبنای آستانه‌های مطلق و روش دوم بر مبنای آستانه‌های نسبی است. آستانه‌های عددی در مناطق مختلف کاربست پذیر نیستند، بنابراین آستانه‌های نسبی جهت مقایسه مناطق مختلف مناسب تر هستند. این پژوهش برآن است که طول فصول در ایران را بر مبنای فراسنج دمای هوا شناسایی و وردایی آن را طی بازه زمانی ۱۹۷۱ تا ۲۰۲۴ مورد کندوکاو قرار دهد.

منطقه مورد مطالعه، داده و روش شناسی

منطقه مورد واکاوی در این پژوهش گستره ایران است. برای انجام این پژوهش از داده های ساعتی دمای شبکه ای پایگاه داده جهانی ERA-5 طی بازه زمانی ۱۹۷۱/۱/۱ تا ۲۰۲۴/۱۲/۳۱ استفاده شد. تفکیک مکانی داده¬ها ۰/۲۵ درجه¬ی قوسی است که با توجه به تفکیک مکانی آنها ۲۴۸۸ پیکسل در داخل مرز سیاسی ایران قرار می گیرد(شکل ۱). در ابتدا داده های ساعتی تبدیل به داده های روزانه شدند و سپس جهت شناخت تقویم فصول دمایی از روش وانگ و همکاران (۲۰۲۱)، چریستدیس و همکاران(۲۰۰۷) و پارک و همکاران(۲۰۱۸) بهره گرفته شد. برای شناخت تقویم فصول از آستانه¬های دمایی بلندمدت طی بازه زمانی مورد واکاوی صدک ۲۵ام و صدک ۷۵ ام استفاده شد. فصل تابستان زمانی شروع می شود که دمای روزانه از صدک ۷۵ ام دمای روزانه¬ی بلندمدت بیشتر باشد. فصل زمستان زمانی شروع می شود که دمای روزانه از صدک ۲۵ ام دمای روزانه¬ی بلندمدت کمتر باشد. دوره گذار بین فصل زمستان و فصل تابستان به عنوان فصل بهار در نظر گرفته شد و فصل پاییز به عنوان دوره گذار بین فصل تابستان و فصل زمستان در نظر گرفته شد. با برازش چندجمله¬ای درجه ۳ بر روی سری زمانی داده های خام در هر سال افت و خیزهای دمای روزانه نرم شدند به طوری که صرفاً خط برازش داده شده تنها در دو نقطه مقادیر صدک ۲۵ ام و ۷۵ ام را قطع کند (چریستدیس و همکاران، ۲۰۰۷، پارک و همکاران، ۲۰۱۸). برای هر یاخته محاسبات جداگانه طی بازه زمانی مورد واکاوی انجام گرفت. تقویم فصول دمایی در قالب ، تاریخ شروع، تاریخ پایان و طول فصول محاسبه شد. شکل ۲ به صورت شماتیک برازش چندجمله ای درجه ۳ را بر روی سری زمانی داده های دمای سنندج در دو سال ۲۰۲۳ و ۲۰۲۴ را نشان می دهد.



شکل ۲- برازش چندجمله ای درجه ۳ بر روی سری زمانی داده های روزانه دمای سنندج طی دو سال ۲۰۲۳ و ۲۰۲۴. خط قرمز سری زمانی خام داده های دمای روزانه، خط آبی برازش چندجمله ای درجه ۳، خط قرمز نقطه چین صدک ۷۵

ام بلند مدت دمای روزانه و خط آبی نقطه چین صدک ۲۵ ام بلند مدت دمای روزانه است. خط نقطه چین سیاه بازه زمانی فصول مختلف را نشان می دهد.

بعد از محاسبه¬ی تقویم فصول دمایی برای هر یاخته طی دوره مورد واکاوی (۵۴ سال)، آزمون ناپارامتریک من کندال اصلاح شده جهت شناخت روند و آزمون ناپارامتریک تخمینگر شیب سن جهت برآورد نرخ شیب در سطح اطمینان ۹۰ درصد استفاده شد.

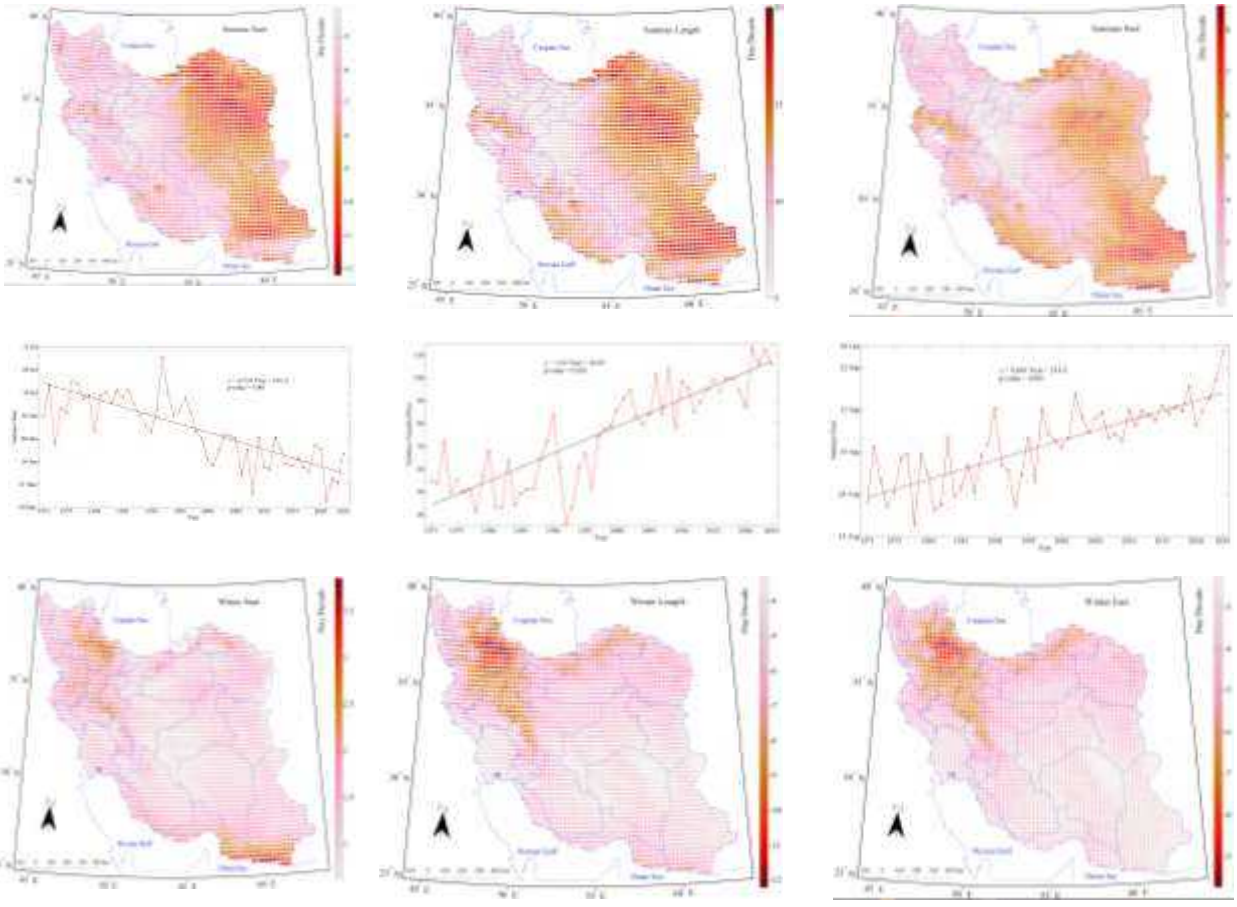
نتایج

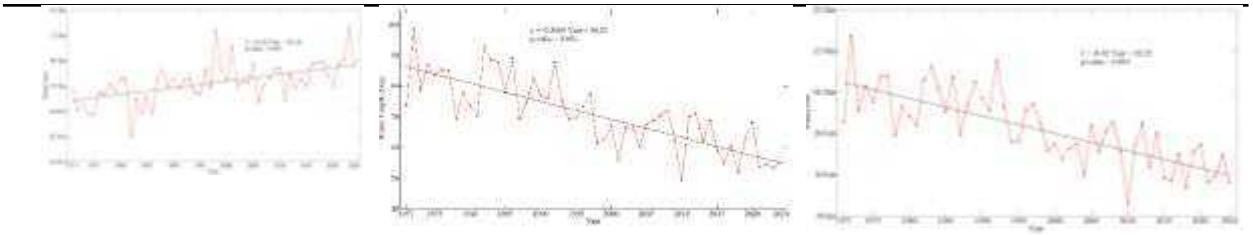
شکل ۳ پراکنش مکانی روند زمان آغاز، طول و پایان دو فصل تابستان و زمستان را بر روی ایران طی دوره‌ی مورد واکاوی ۱۹۷۱ تا ۲۰۲۴ نشان می دهد. همانطور که پیداست تاریخ شروع فصل تابستان بر روی کل گستره‌ی ایران روند منفی و معناداری را در سطح اطمینان ۹۰ درصد نشان می دهد. روند کاهشی تاریخ آغاز تابستان بدین معنی است که فصل تابستان زودتر از موعد خود در فصل بهار شروع می شود و وارد فصل بهار شده است. یافته‌ها بیانگر آن است که نرخ روند بر روی نیمه‌ی شرقی کشور بیشتر از مناطق غربی کشور است. روند کاهشی آغاز فصل تابستان در برخی مناطق در شمال شرق کشور در استانهای خراسان رضوی و شمالی نسبت به سایر مناطق دیگر کشور، بیشینه است و حدود ۱۲ روز به ازای هر دهه است. در نیمه‌ی غربی کشور شروع زودهنگام فصل تابستان با روند کاهشی حدود ۵ الی ۶ روز به ازای هر دهه است. برخلاف تاریخ آغاز، پایان فصل تابستان روند مثبت و معناداری را بر روی کل گستره‌ی ایران نشان می دهد. روند مثبت تاریخ پایان فصل تابستان بیانگر جابه‌جایی تاریخ پایان به سمت فصل پاییز است و دیرتر از موعد خود فصل تابستان پایان می یابد. نرخ وردایی تاریخ پایان فصل تابستان به نسبت نرخ وردایی تاریخ آغاز آن کمتر است و در نیمه‌ی شرقی کشور و جنوب شرق کشور تاریخ پایان فصل تابستان به نسبت سایر مناطق بیشتر است و بر روی برخی مناطق یاد شده بیش از ۸ روز به ازای هر دهه به سمت فصل پاییز جابه‌جا شده است. روند کاهشی تاریخ آغاز فصل تابستان و روند افزایشی تاریخ پایان فصل تابستان منجر به افزایش طول فصل تابستان ایران شده است. افزایش طول فصل تابستان بر روی کل گستره‌ی ایران به لحاظ آماری معنادار است و به تبعیت از دو گاه شمار یاد شده، بر روی نیمه‌ی شرقی کشور نرخ وردایی به مراتب بیشتر از سایر مناطق دیگر کشور است. در استان سیستان و بلوچستان طول فصل تابستان حدود ۲۰ روز به ازای هر دهه در دوره‌ی مورد واکاوی افزایش یافته است. برپایه‌ی میانگین پهنه‌ای وردایی گاه شمار فصل تابستان می توان دریافت که به طول فصل تابستان ایران ۱۱/۸ روز در هر ده سال افزوده شده است و سهم آغاز فصل تابستان(حدود ۷/۴ روز

به ازای ده سال) بیشتر از تاریخ پایان آن است(حدود ۴/۷ روز به ازای هر ده سال) است. بنابراین می توان گفت تاریخ آغاز فصل تابستان به مراتب وردایی بیشتری نسبت به تاریخ پایان آن تجربه کرده است.

همانند گاه شمار و طول فصل تابستان، سری زمانی گاه شمار و طول فصل زمستان نیز بر روی کل گستره‌ی مانا نمانده است و وردایی آن در سطح اطمینان ۹۰ درصد معنادار بوده است. آغاز فصل زمستان دیرتر از موعد همیشگی خود شروع

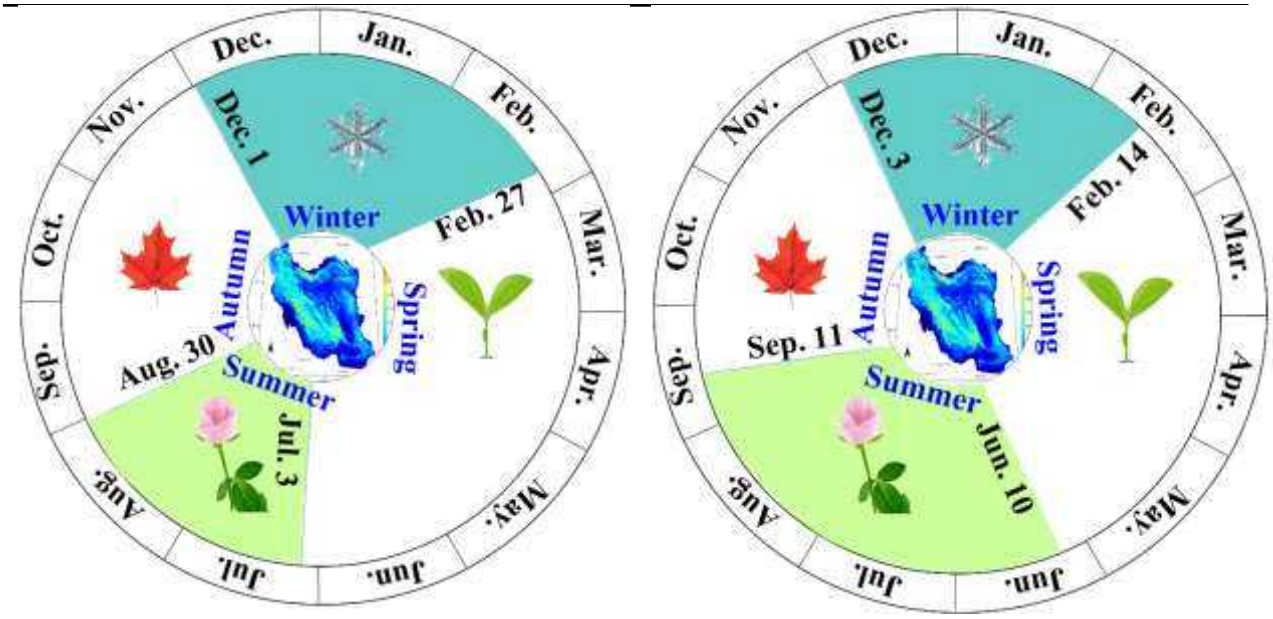
می شود. بر روی گستره‌ی ایران آغاز دیرهنگام فصل زمستان بین حدود ۰/۵ الی ۴ روز به ازای هر دهه است. آغاز دیرهنگام به لحاظ مکانی بر روی جنوب شرق(جنوب سیستان و بلوچستان و جنوب هرمزگان) و شمال غرب کشور(زنجان، گیلان و اردبیل) به نسبت سایر مناطق دیگر کشور بیشتر است و بیش از ۳/۵ روز به ازای هر دهه آغاز فصل زمستان به تأخیر افتاده است. پایان زودتر از موعد فصل زمستان به مراتب وردایی بیشتری را به نسبت آغاز آن تجربه کرده است. پایان زودهنگام فصل زمستان از حدود ۲/۵ روز به ازای دهه در مناطق مرکزی و جنوب غرب کشور الی بیش از ۹/۵ روز به ازای دهه بر روی شمال غرب کشور متغیر است. میانگین پهنه‌ای پایان زودهنگام فصل زمستان گستره‌ی ایران ۰/۴۲ روز به ازای هر سال است که در مقایسه با آغاز دیرهنگام آن (۰/۱۳ به ازای هر سال) حدود سه برابر شتاب بیشتری دارد. بنابراین طول فصل زمستان به تبعیت از آن دو، دچار وردایی معناداری شده است و فصل زمستان چروکیده شده و از طول آن کاسته شده است. بیشترین کاهش در ماندگاری فصل زمستان بر روی شمال غرب کشور مشاهده می شود که در آن بیش از ۱۲ روز به ازای هر دهه از ماندگاری فصل زمستان کاسته شده است. میانگین پهنه‌ای کاهش طول فصل زمستان بر روی گستره‌ی ایران حدود ۵/۸ روز به ازای هر دهه است. برخلاف فصل تابستان، سهم وردایی پایان فصل زمستان از ماندگاری آن، بیشتر از سهم وردایی آغاز است.





شکل ۳- پراکنش مکانی وردایی و سری زمانی میانگین پهنه‌ای برای زمان آغاز، طول و پایان فصول تابستان (دو ردیف اول) و زمستان (دو ردیف آخر) بر روی ایران طی دوره‌ی مورد واکاوی

برای شناخت بیشتر از وردایی تقویم فصول مختلف بر روی گستره‌ی ایران، گاه‌شمار فصول در دو دوره‌ی متفاوت ۱۹۹۸-۱۹۷۱ و ۲۰۲۴-۱۹۹۹ در شکل ۴ آمده است. همانطور که پیداست در دوره‌ی نخست(۱۹۹۸-۱۹۷۲) فصل زمستان از ۱اُم دسامبر آغاز و در ۲۷اُم فوریه پایان می یافت ولی در دوره‌ی دوم (۲۰۲۴-۱۹۹) فصل زمستان از ۳اُم دسامبر آغاز و در ۱۴اُم فوریه پایان می یابد. به بیانی دیگر طول فصل زمستان در دوره‌ی دوم کوتاه‌تر شده است و از ماندگاری آن به طور متوسط در دوره‌ی دوم ۱۶ روز کاسته شده است. فصل تابستان نیز در دوره‌ی اول بسیار کوتاهتر از دوره‌ی دوم بوده است. طوری که آغاز آن از ۳اُم ژوئیه و پایان آن در ۳۰اُم اوت به مدت کمتر از ۲ ماه در سال دوام داشت ولی در طول دوره‌ی دوم ماندگاری فصل تابستان بیشتر شده است. فصل تابستان با آغاز زودتر از موعد و جابه‌جایی ۱۴ روزه به سمت بهار در دوره‌ی دوم از ۱۰اُم ژوئن آغاز و در ۱۱اُم سپتامبر پایان می یابد. بنابراین دوام و ماندگاری فصل تابستان در دوره‌ی دوم بیشتر شده است و به بیش از ۳ ماه در سال رسیده است. اگرچه به طور متوسط طول فصل بهار در هر دو دوره یکسان است ولی آغاز زود هنگام آن در دوره‌ی دوم از ۱۴اُم فوریه و پایان آن در ۱۰اُم ژوئن بیانگر پایان زودهنگام فصل زمستان و آغاز زودهنگام فصل تابستان است. پیشروی فصل تابستان به سمت فصل پاییز بر روی گستره‌ی ایران نیز بر جابه‌جایی و بهم خوردن نظم زمانی فصل پاییز نقش داشته است و ماندگاری فصل پاییز را کوتاهتر کرده است.



شکل ۴- وردایی طول چهار فصل ایران در دو دوره‌ی ۱۹۹۸-۱۹۷۱ (سمت چپ) و ۲۰۲۴-۱۹۹۹ (سمت راست)

نتیجه‌گیری

این پژوهش برآن بود که برپایه‌ی نمایه‌ی آستانه‌های صدکی (۲۵ و ۷۵اُم) وردایی فصول هواشناسی ایران را مورد کندوکاو قرار دهد. برای نیل به آن از داده‌های روزانه‌ی شبکه‌ای دمای پایگاه داده‌ی مرکز پیش بینی میان مدت جوی اروپایی(ECMWF) نسخه ERA5 بهره گرفته شد. بازه‌ی زمانی مورد واکاوی در این پژوهش از سال ۱۹۷۹ تا ۲۰۲۴ بود. یافته‌های این پژوهش نشان داد که نظم زمانی گاه‌شمار فصول در ایران وردایی معناداری را در طول دوره‌ی مورد واکاوی تجربه کرده است. فصل تابستان با آغاز زودهنگام و پایان دیرهنگام طولانی تر و ماندگارتر شده است. آغاز زودهنگام فصل تابستان نسبت به پایان دیرهنگام آن، سهم بیشتری در ماندگاری فصل تابستان داشته است. فصل بهار زودتر از موعد خود آغاز می شود و زودتر از موعد پایان می یابد. فصل زمستان کوتاهتر شده است. سهم پایان زودهنگام فصل زمستان نسبت به آغاز دیرهنگام آن، سهم بیشتری در چروکیده شدن فصل زمستان دارد. آشوب و بهم خوردن نظم زمانی فصول بر فعالیت‌های انسان در حوزه کشاورزی(گاه شمار کاشت و برداشت)، گلدهی درختان، میوه‌دهی و گرده افشانی گیاهان، عملکرد محصولات کشاورزی، اختلال در چرخه‌های طبیعی و زیستی، تغییرات زیست‌بوم ها، منابع آب و مصرف انرژی نقش مهمی دارد. بنابراین شناخت وردایی نظم زمانی فصول در ایران می تواند راهنمای سودمندی برای مدیریت و برنامه‌ریزی بهینه جهت کاهش خسارات و پیامدهای ناشی از آن باشد.

سپاسگزاری

نویسنده مقاله از مرکز پیش بینی میان مدت جوی اروپایی (ECMWF) به دلیل آماده سازی داده‌های دما در قالب نسخه ERA5 تشکر و قدردانی کند.

منابع

Alpert, P., Osetinsky, I., Ziv, B., & Shafir, H. (2004). A new seasons definition based on classified daily synoptic systems: an example for the eastern Mediterranean. International Journal of Climatology, 24(8), 1013–1021. https://doi.org/10.1002/joc.1037

IPCC. (2021). Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

Parmesan, C., & Yohe, G. (2003). A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. Nature, 421(6918), 37–42. https://doi.org/10.1038/nature01286

Park, B. J., Kim, Y. H., Min, S. K., & Lim, E. P. (2018). Anthropogenic and natural contributions to the lengthening of the summer season in the Northern Hemisphere. Journal of Climate, 31(17), 6803–6819. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0643.1

Lin, W., & Wang, C. (2022). Longer summers in the Northern Hemisphere under global warming. Climate Dynamics, 58(7), 2293–2307. https://doi.org/10.1007/s00382-021-06009-y

Stine, A. R., Huybers, P., & Fung, I. Y. (2009). Changes in the phase of the annual cycle of surface temperature. Nature, 457(7228), 435–440. https://doi.org/10.1038/nature07675

Christidis, N., Stott, P. A., Brown, S., Karoly, D. J., & Caesar, J. (2007). Human contribution to the lengthening of the growing season during 1950–99. Journal of Climate, 20(21), 5441–5454. https://doi.org/10.1175/2007JCLI1568.1

Qian, C., & Zhang, X. (2015). Human influences on changes in the temperature seasonality in mid- to high-latitude land areas. Journal of Climate, 28(15), 5908–5921. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00821.1

Qian, C., & Zhang, X. (2019). Changes in temperature seasonality in China: Human influences and internal variability. Journal of Climate, 32(19), 6237–6249. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0081.1

Wang, J., Guan, Y., Wu, L., Guan, X., Cai, W., Huang, J., Dong, W., & Zhang, B. (2021). Changing lengths of the four seasons by global warming. Geophysical Research Letters, 48(6), e2020GL091753. https://doi.org/10.1029/2020GL091753.

Changes in Seasons Length over Iran due to Global Warming

Mohammad Darand[1]

Professor of Climatology, University of Kurdistan, Iran.

Corresponding author:m.darand@uok.ac.ir

Abstract

Global warming has not only impacted the intensity and frequency of atmospheric extremes, such as heatwaves and unprecedented maximum temperatures, but it has also altered the temporal order and calendar of the seasons. This research aims to investigate the variability of the seasons in Iran. To achieve this, we utilized the daily gridded data from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) ERA-5 version, covering the statistical period from 1979 to 2024. The behavior of the temperature parameter served as the basis for defining the seasons, in other words, for identifying the meteorological seasons. Fitting a third-degree polynomial to the temperature time series and employing the percentile threshold method clarified the temporal calendar of the meteorological seasons for each spatial cell across Iran. The variability of the meteorological seasons over Iran was examined using the Modified Mann-Kendall test. The rate of change was estimated using the Sen's Slope estimator. The findings revealed that Iran's seasons have undergone significant changes. Areal averages showed that the length of the summer season in Iran has increased by 11.8 days per decade, while the length of the winter season has decreased by approximately 5.8 days per decade.

Keywords: Global warming, Temperature, Meteorological Seasons, Iran.

پدیده تغییر اقلیم و روند تشدید سیل در کلان حوزه آبخیز خزری (هیرکانی)

مریم سادات جعفرزاده

چکیده

از مهم‌ترین پیامدهای تغییر اقلیم افزایش وقوع بلایای جوی- اقلیمی نظیر سیل، خشکسالی، بالا آمدن سطح آب دریا و ... است. از میان این بلایا سیل به عنوان یکی از مخرب‌ترین آن‌ها در جهان محسوب می‌شود، به طوری که وقوع آن باعث خسارت جبران ناپذیری در بخش‌های کشاورزی، صنعت، مسکن و امور معیشتی مردم در کشورهای مختلف می‌گردد. در مطالعه حاضر نقش تغییر اقلیم بر سیلاب‌های حوزه خزری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج و نقشه‌های تهیه شده نشان داد وقوع سیلاب‌ها در حوزه خزری سیر صعودی داشته و بیشترین سیلاب‌ها طی دهه‌های اخیر اتفاق افتاده است. تغییرات اقلیمی و تغییرات الگوهای بارشی در مناطق زیادی از جهان رخ داده و ایران نیز مستثنی از این تغییرات نیست. اما کنترل برخی شرایط ازجمله کنترل عدم وقوع یا کنترل میزان خسارات وارده ناشی از سیل، از طریق اقداماتی چون آبخیزداری می‌تواند بسیار مفید واقع گردد. به این منظور مطالعه و اجرای طرح‌های سازه‌ای و غیر سازه‌ای، مدیریت حوزه و حفاظت آبخیز و تهیه و تدوین نظامنامه مدیریت سیل توصیه می‌گردد.

کلید واژه‌ها: تغیر اقلیم، حوزه آبخیز خزری، رواناب، سیلاب.

مقدمه

رشد صنایع و کارخانه‌ها از آغاز انقلاب صنعتی و به تبع آن افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی از یک‌سو و تخریب جنگل‌ها و تغییر کاربری اراضی از سوی دیگر باعث افزایش گازهای گلخانه‌ای در چند دهه اخیر شده به‌گونه‌ای که غلظت این گازها مخصوصاً گاز دی‌اکسیدکربن از ۲۸۰ ppm در سال ۱۷۵۰ به ۳۷۹ ppm در سال ۲۰۰۵ افزایش یافته است. در صورت ادامه روند کنونی غلظت این گاز تا قبل از پایان قرن ۲۱ می‌تواند به بیش از ۶۰۰ ppm برسد (IPCC۲۰۱۹,). فرایند تغییر اقلیم به ویژه تغییرات دما و بارش مهم‌ترین بحث مطرح در قلمرو علوم محیطی می‌باشد. هندرسون و سلز (۱۹۵۲)، تغییر اقلیم را تفاوت میان دوحالت اقلیم در یک دوره مشخص بیان کرده‌اند، به عنوان مثال تفاوت دو ژانویه و یا دو دهه با یکدیگر. لاندزبرگ (۱۹۷۵)، دگرگونی اقلیمی را جابه‌جایی حالت اقلیمی از یک موقعیت به سطح تعادلی نوین تعریف نموده که بر اثر انتقال مقادیر و ارزش‌های عناصر اقلیمی تغییر معنی‌داری متحمل می‌شوند. کارآموز و عراقی نژاد (۱۳۸۴)، تغییر اقلیم را تغییرات رفتار آب و هوایی یک منطقه نسبت به رفتاری که در طول یک افق زمانی بلند مدت از اطلاعات ثبت شده در آن منطقه مورد انتظار است، می‌دانند. بر اساس IPPC، هرگونه تغییر قابل تشخیص (به عنوان مثال با استفاده از آزمون‌های آماری تغییر در میانگین یا سایر خصوصیات) در آب و هوا در طول زمان که طبیعی بوده یا براثر فعالیت‌های انسانی حاصل

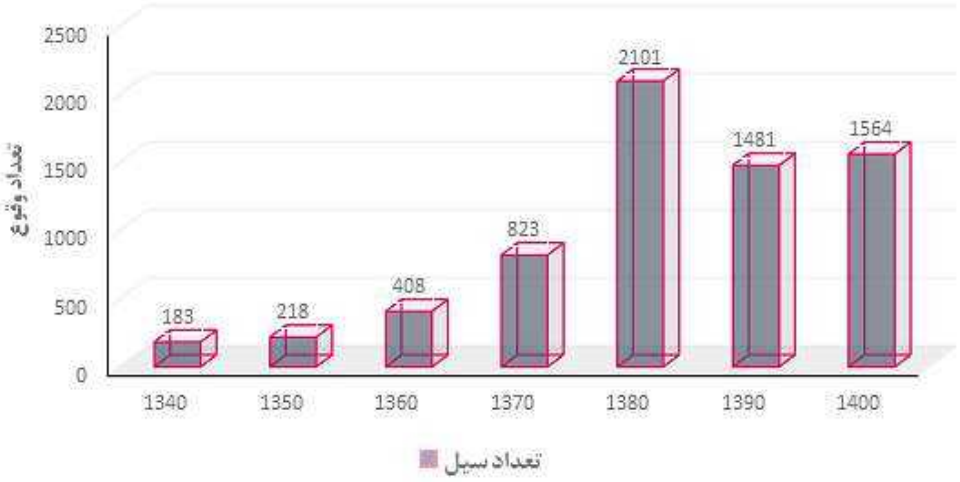
شود و هم‌چنین برای دوره طولانی (ده‌ها سال یا بیشتر) ادامه می‌یابد (IPCC ,۲۰۱۴). گوناگونی این نظرات نشان از عدم شناخت کامل سامانه اقلیم و پیچیدگی و درهم‌تنیدگی تغییرات دارد.

از مهم‌ترین پیامدهای تغییر اقلیم افزایش وقوع بلایای جوی- اقلیمی نظیر سیل، خشکسالی، بالا آمدن سطح آب دریا و ... است. از میان این بلایا سیل به عنوان یکی از مخرب‌ترین آن‌ها در جهان محسوب می‌شود، به طوری که وقوع آن باعث خسارت جبران ناپذیری در بخش‌های کشاورزی، صنعت، مسکن و امور معیشتی مردم در کشورهای مختلف می‌گردد. رواناب و سیل، در صورت مهار و کنترل، از منابع آب مورد استفاده در توسعه اقتصادی بوده و منافع زیادی را در بخش‌های کشاورزی و منابع طبیعی موجب می‌شود. در صورت عدم شناخت و کنترل و مهار آن، از بلایای طبیعی به شمار آمده و پیوسته خسارت و تلفات جانی در پی خواهد داشت. در ایران نیز هر ساله سیلاب‌های متعددی در بسیاری از استان‌ها به وقوع می‌پیوندد. لذا با توجه به پتانسیل سیل‌خیزی کشور، مطالعه و بررسی احتمال وقوع و دوره‌های بازگشت سیلاب‌ها می‌تواند به برنامه‌ریزان و مسئولان در جهت کنترل این پدیده یاری رساند. هم‌چنین این در حالی است که وقوع سیل، کیفیت آب و دسترسی به آب سالم را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. بنابراین بررسی اثر تغییر اقلیم بر فراوانی سیل در دوره‌های آتی در راستای مدیریت صحیح منابع آب و ارائه راهکارهای مناسب جهت کنترل سیل ضروری به نظر می‌رسد.

توجه به پدیده تغییر اقلیم و تاثیر آن بر منابع آب از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. از آن جایی‌که تغییر رواناب همواره نسبت به تغییرات بارندگی بیش از تغییرات تبخیر و تعرق حساس‌تر است و تغییر نسبی رواناب همیشه بیشتر از تغییر نسبی بارندگی است، در این مطالعه شاخص رواناب حوزه مورد بررسی قرار گرفت. تغییرات اقلیم باعث تغییر در حجم، زمان و مدت رواناب می‌شود، که پیامد این اتفاق در عرصه مدیریت منابع آب تحولات و تغییرات بسیاری را به وجود خواهد آورد. مطالعه حاضر می‌تواند راه‌گشای پیش‌بینی تغییرات هیدرولوژیکی در آینده و ارائه برنامه‌های کاراتر در زمینه توسعه پایدار منابع موجود در منطقه مطالعاتی و اتخاذ سیاست‌های آینده جهت مدیریت همه جانبه و بهینه‌سازی در این حوزه باشد.

بررسی روند تغییر اقلیم موثر بر سیلاب

در دهه‌های اخیر شدیدترین پدیده‌های اقلیمی رخ داده است و بخش‌هایی از جهان، برترین پدیده‌های هواشناسی مانند سیلاب‌های شدید، خشکسالی‌ها و امواج گرما را تجربه کرده‌اند. این تغییرات اثر شکننده‌ای بر چرخهٔ هیدرولوژیکی و منابع آب داشته‌اند. گرمایش جهانی باعث شده است که الگوهای اقلیمی در سراسر جهان دستخوش تغییرات قابل توجهی شوند. در این راستا سیلاب‌های کشور طی شش دهه اخیر بررسی شد. این بررسی که در قالب یک نمودار تهیه گردید (شکل ۱)، نشان می‌دهد رویدادهای سیل در کشور از دهه ۱۳۳۰ – ۱۳۴۰ تا ۱۳۷۰ – ۱۳۸۰ روند افزایشی داشته و در دهه اخیر این روند کمی نسبت به دهه قبلی کاهش یافته است.



شکل ۱- مقایسه سیلاب‌های کشور طی ۶ دهه اخیر

در دهه‌های اخیر، تغییرات اقلیمی، تغییرات کاربری زمین و افزایش سطح غیر قابل نفوذ در برابر آب، از دلایل اصلی وقوع سیلاب‌های ویرانگر عنوان شده‌اند. در یک طبقه بندی کلی می توان سیلاب‌های رخ داده در کشور را در دسته‌های زیر تقسیم بندی کرد:

سیل ناگهانی: سیلاب ناشی از بارش شدید در حوزه‌های کوچک، مانند سیل گلابدره تهران (۱۳۶۶)، ماسوله (۱۳۷۷) و گلستان (۱۳۹۶).

سیل رودخانه‌ای: ناشی از بارش نسبتا شدید و طولانی مدت در حوزه‌های با مساحت و بیش از ظرفیت نفوذپذیری حوزه مانند آنچه در سال ۱۳۷۱ در استان‌های سیستان و بلوچستان، کرمان، هرمزگان، بوشهر اتفاق افتاد.

سیل برفی: ناشی از ذوب برف‌های بالادست به دلیل افزایش ناگهانی دما که می‌تواند توام با بارندگی نیز باشد.

سیل دریایی: به دلیل بالا آمدن سطح آب دریا و یا دریاچه‌ها مانند بالاآمدن سطح آب دریاچه خزر در سال‌های ۱۳۷۱ تا ۱۳۷۵.

جدول ۱- تعداد رودخانه‌های جاری در حوزه دریای خزر

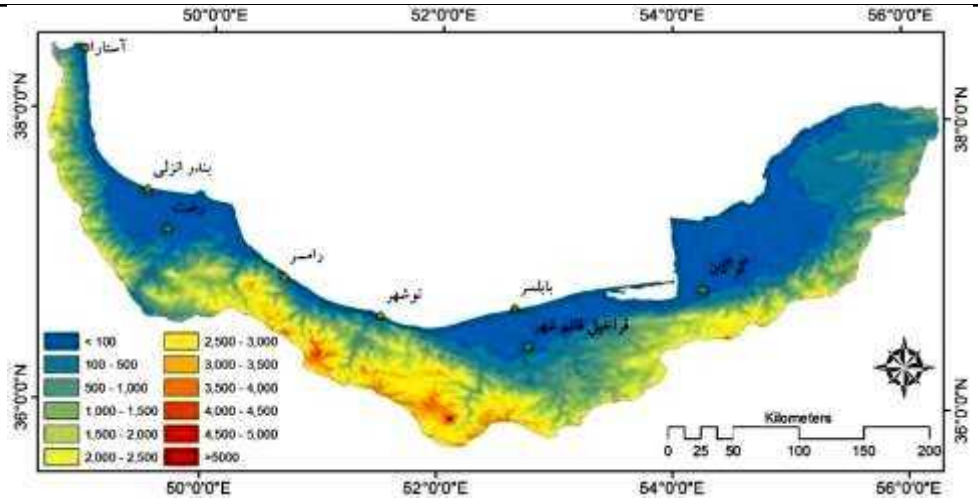
استان	تعداد رودخانه
گلستان	۴۳
گیلان	۱۱

مازندران	۱۸۰
جمع	۲۳۴

وقوع سیل در هر نقطه‌ای از کشور محتمل بوده و تقریبا تمام نقاط کشور، برخی مواقع از این پدیده متاثر می‌شوند. البته نوع و مشخصات سیلاب در مناطق مختلف، متفاوت است. به عنوان مثال در مناطق شمالی با وجود رودخانه‌های با طول کوتاه و شیب تند، اغلب تلفات و خسارات سیل زیاد بوده در حالی که در مناطق جنوبی اغلب سیلاب‌ها، تدریجی و ناشی از بارش‌های سنگین در بالادست رودخانه‌ها است و تلفات جانی کم، اما خسارات بسیار بالای اراضی کشاورزی، مسکونی و صنعتی را منجر می‌شود. وقوع سیل در زمان نامناسب نیز از دیگر دلایل افزایش خسارات می‌باشد. تغییر شکل بارش‌ها از برف به باران نیز عاملی در جهت افزایش سیلاب می‌باشد. وقتی بارش بصورت باران باشد سریع بر سطح زمین جاری شده و سیلاب را به دنبال خواهد داشت و تغذیه ذخایر زیرزمینی نیز انجام نخواهد شد.

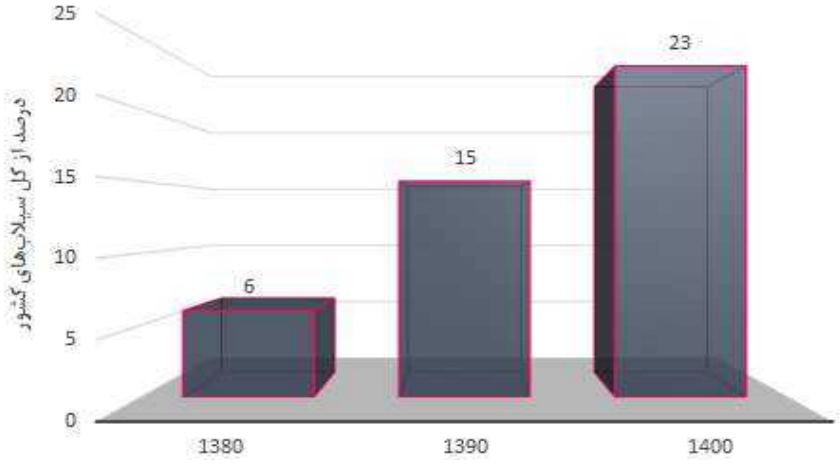
نقش تغییر اقلیم بر سیلاب‌های دریای خزر

حوزه آبریز خزر از نظر توپوگرافی دارای شیب زیاد بوده و بیشترین اختلاف ارتفاع حوزه‌های کشور را که بالغ بر ۵۵۹۹ متر است، به خود اختصاص داده است. به همین مناسبت رودخانه‌های ارس، سفیدرود، هراز و اترک که دارای حوزه‌های آبریز کوهستانی پهناوری هستند از طول کم و شیب زیاد برخوردار می‌باشند. تغییر اقلیم بر تمام نقاط کره زمین اثر گذاشته و دریای خزر هم از این آسیب محفوظ نمانده است. با در نظر گرفتن داده‌های هواشناسی و مدل‌های گردش عمومی جو، پیش‌بینی‌های مربوط به تغییرات الگوی بارش در دوره‌های آتی (۲۰۵۰ و ۲۰۸۰) کم شدن متوسط بارش ماهانه و سوق پیدا کردن بارش به سمت بارش‌های سنگین محتمل است. به علت دارا بودن یخچال‌های طبیعی، شیب بسیار زیاد زمین در منطقه پایین دست این یخچال‌ها و نظر به افزایش دمای ۰/۵ درجه سانتی‌گراد در میانگین دمای ماهیانه این منطقه، پتانسیل ذوب ناگهانی و ایجاد سیلاب وجود دارد.

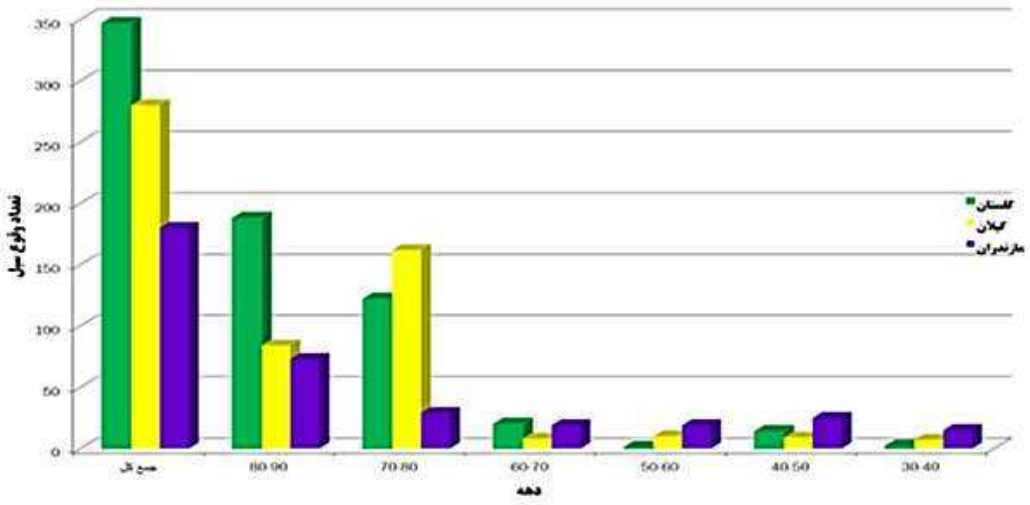


شکل ۲- محدوده و موقعیت ایستگاه‌های مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، سواحل جنوبی دریای خزر را پوشش داده و کل وسعت سه استان گیلان، مازندران و گرگان در شمال کشور را شامل می‌شود. این منطقه محصور بین دریای خزر و رشته کوه البرز با میانگین مجموع بارش بیش از ۱۰۰ میلیمتر در سال، بالاترین میزان بارش را در سراسر کشور به خود اختصاص داده است. داده‌های مورد بررسی در این پژوهش شامل داده‌های دیده‌بانی روزانه ۱۳ ایستگاه سینوپتیک منطقه می‌باشد. سواحل جنوبی دریای خزر از نظر اقلیمی با سایر مناطق کشور بسیار متفاوت است. وجود دریای خزر، توپوگرافی پیچیده و تأثیرپذیری این منطقه از الگوی گردش بزرگ مقیاس برون حاره‌ای در تمام طول سال، ویژگی‌های اقلیمی بسیار پیچیده و برجسته‌ای را برای این منطقه فراهم نموده است. استقرار بزرگترین مرکز پرفشار ساکن نیمکره شمالی موسوم به پرفشار سیبری در مجاورت منطقه همراه با تأثیر مداوم و ممتد الگوی موجی عرض‌های برون حاره در کنار ویژگی‌های خاص محلی، تحلیل و پیش‌بینی وضعیت جوی و خصوصیات اقلیمی منطقه خزری را بسیار مشکل ساخته است.



شکل ۳- درصد وقوع سیلاب‌ها در حوزه خزری



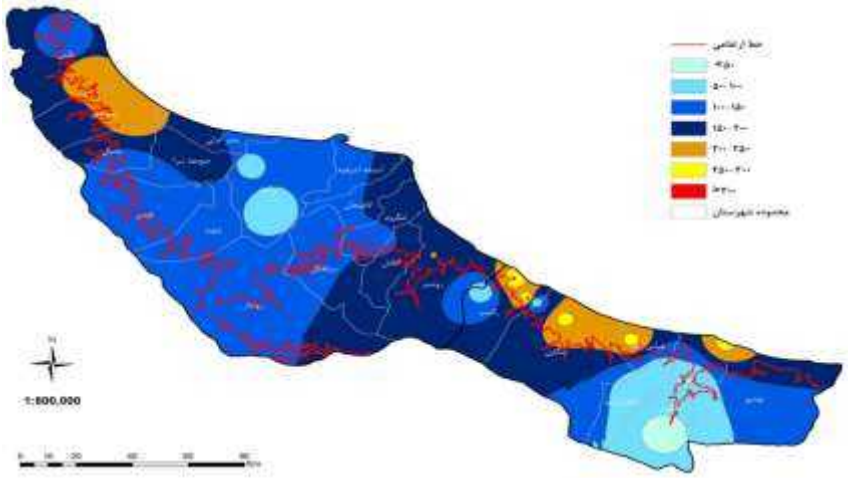
شکل ۴- مقایسه وضعیت سیلاب‌های استان‌های حوزه خزر

وقوع بارش‌های شدید در سواحل جنوبی دریای خزر ناشی از وقوع ترکیبی خاص از برهم کنش مؤلفه‌های گردش بزرگ مقیاس با مؤلفه‌های مقیاس منطقه‌ای و محلی می‌باشد. یافته‌های تحقیق ویژگی‌های زیر را در رابطه با بارش‌های شدید سواحل جنوبی دریای خزر نشان می‌دهد:

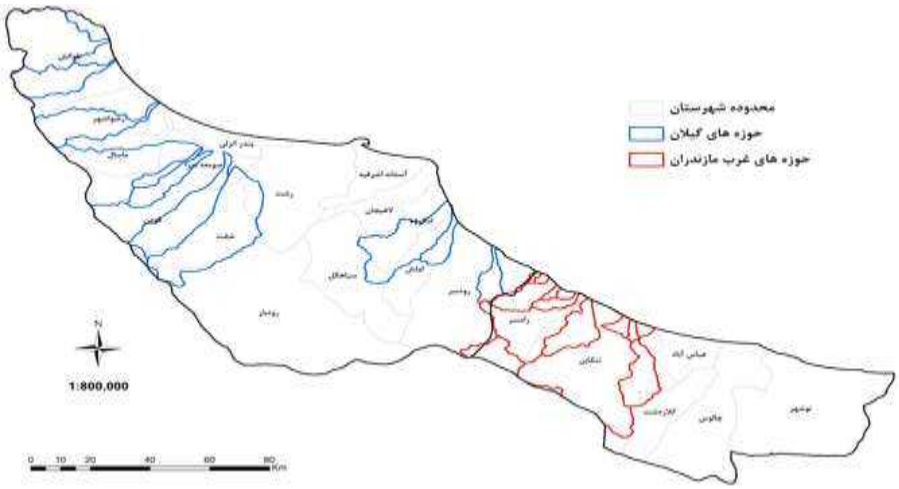
۱- بیش از ۸۰ درصد از تعداد کل روزهای بارش شدید در فصل پائیز (سپتامبر، اکتبر و نوامبر) به وقوع می‌پیوندد.

۲- تمامی بارش‌های حدی منطقه خزری در فصل پائیز بوقوع پیوسته است.

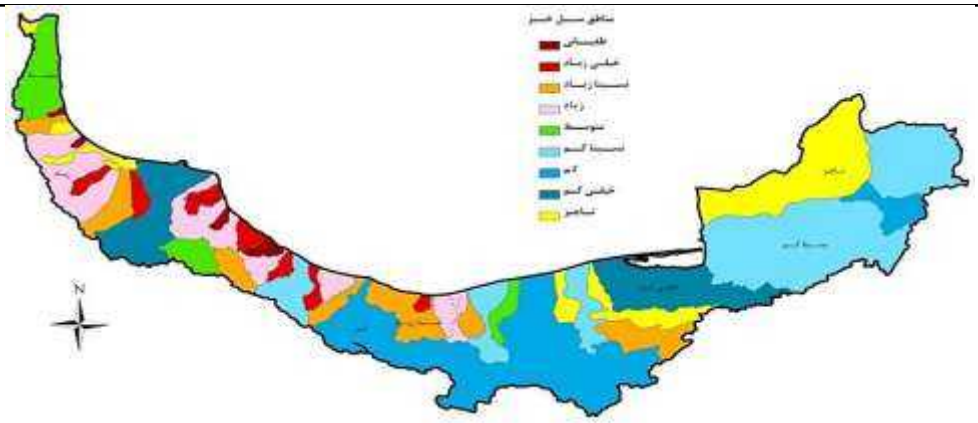
۳- بارش‌های شدید و حدی سواحل جنوبی دریای خزر در سه الگوی سینوپتیکی اصلی (پرفشار، زوجی و کم فشار) جای می‌گیرند.



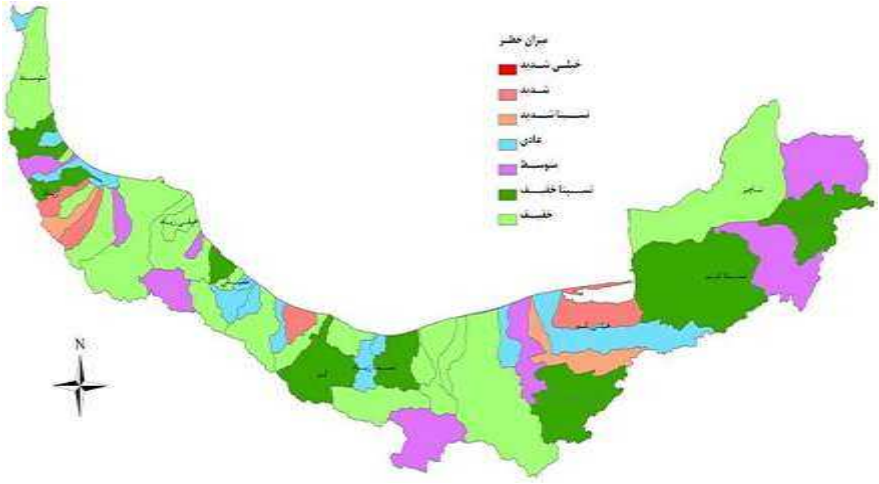
شکل ۵- نقشه همباران پهنه سیل شمال کشور



شکل ۶- حوزه‌ها با شدت سیل بالا در پهنه سیل شمال کشور



شکل ۷- پهنه‌بندی شدت سیل در دامنه شمالی



شکل ۸- پهنه‌بندی خطر سیل در دامنه شمالی

نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر نقش تغییر اقلیم بر سیلاب‌های حوزه خزری مورد بررسی قرار گرفت. نتایج و نقشه‌های تهیه شده نشان داد وقوع سیلاب‌ها در حوزه خزری سیر صعودی داشته و بیشترین سیلاب‌ها طی دهه‌های اخیر اتفاق افتاده است. تغییرات اقلیمی و تغییرات الگوهای بارشی در مناطق زیادی از جهان رخ داده و ایران نیز مستثنی از این تغییرات نیست. اما کنترل برخی شرایط ازجمله کنترل عدم وقوع یا کنترل میزان خسارات وارده ناشی از سیل، از طریق اقداماتی چون آبخیزداری می‌تواند بسیار مفید واقع گردد. در رابطه با موضوع مورد بررسی می‌توان برخی راهکارها و توصیه‌هایی را پیشنهاد داد از جمله در نظر گرفتن ملاحضات تغییرات اقلیمی تا حد امکان در سیاست‌های توسعه اجتماعی، اقتصادی، زیرساختی و زیست محیطی. انجام آن همراه با پیوستن به کنوانسیون¬های بین المللی تا حدود زیادی از سرعت روند انتشار گازهای گلخانه‌ای

و در نتیجه تغییرات حدی اقلیمی ناشی از آن را کاهش می‌دهد. طرح‌های پیشگیری و کاهش خسارات سیل در شش محور اصلی دسته‌بندی می¬شود که اجرای هماهنگ و توام آن‌ها می‌تواند به نتایج موثری در جهت کاهش خسارات ناشی از سیل و همچنین ذخیره سازی آب منجر شود.

مطالعه و اجرای طرح¬های سازه‌ای (ساماندهی و مهندسی رودخانه به منظور اصلاح و حفاظت از مسیر رودخانه، لایروبی و بازگشایی مسیرهای مسدود شده به منظور افزایش ظرفیت عبوری جریان، بهسازی و افزایش ظرفیت آبگذری سازه‌های تقاطعی رودخانه، حفاظت از پایه پل‌ها در مقابل آبشستگی، سدسازی در نواحی بحرانی‌تر).

مطالعه و اجرای طرح‌های غیر سازه‌ای (تهیه نقشه‌های پهنه‌ندی سیل و پیاده‌سازی حد بستر و حریم رودخانه‌ها، ایجاد سیستم‌های پیش‌بینی و هشدار سیل، ایجاد بانک اطلاعاتی داده‌های مرتبط با سیل، برنامه‌ریزی و مدیریت مخازن سدهای ساخته شده و پیش‌بینی اثرات بهره‌برداری از سدهای در دست ساخت).

مدیریت حوزه و حفاظت آبخیز (عملیات بیولوژیکی و مکانیکی به متظور تقویت پوشش گیاهی، حفاظت خاک و افزایش نفوذپذیری، مطالعات آبخوان‌داری و پخش سیلاب، مطالعات اصلاح و تغییر کاربری‌های مجاز خصوصا با توجه به مطالعات پهنه‌بندی سیل‌خیزی در کوتاه مدت و دراز مدت).

تهیه و تدوین نظامنامه مدیریت سیل و طرح عمل در مواقع بحران در جهت آمادگی مدیران بحران محلی، منطقه‌ای و کشوری و تیم‌های عملیات نجات بحران.

آموزش همگانی و تخصصی با مشارکت ذینفعان (برنامه‌ریزی از حالت متمرکز به برنامه‌ریزی در سطوح مختلف تقسیمات کشوری تغییر نماید تا ضمن استفاده از نظرات و آگاهی‌های افراد هر منطقه برنامه‌ای متناسب با واقعیات آن منطقه با بهره‌گیری از توانمندی‌های موجود در هر قسمت صورت پذیرد. ضمن حفظ ارتباط تعاملی خود با سطوح بالاتر همسویی برنامه تنظیمی با سیاست‌های کلان حاکمیتی حفظ گردد. استفاده از ظرفیت‌های‌های بخش خصوصی و سازمان‌های مردم نهاد در قالب برنامه ریزی غیرمتمرکز قابلیت اثربخشی دارد) .

سناریوهای تغییر اقلیم (ارائه دیدی از اینکه چگونه فعالیت‌های بشری در تغییر و تحولات اتمسفر زمین دخالت دارد و چگونه باعث تاثیر بر اقلیم جهانی می‌شود و در نهایت چگونه تغییر اقلیم به محیط زیست و فعالیت‌های بشری آسیب وارد می‌کند و باعث اختلال در آن‌ها می‌شود. اما این تغییرات قابل پیش‌بینی دقیق نیست و وابسته به متغیرهای داخلی هستند که تصویری از آینده این تغییرات می‌سازند و هرکدام وابسته به فرضیات پیشین است).

منابع

عراقی نژاد, ش. و کارآموز، م. (۱۳۸۴). پیش‌بینی بلند مدت رواناب با استفاده از شبکه های عصبی مصنوعی و سیستم استنتاج فازی. تحقیقات منابع آب ایران, ۱(۲), ۲۹-۴۱.

IPCC.(2019). J.B.R. Matthews (Ed.), In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty. [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)].

IPCC, R.K. Pachauri, L.A. Meyer (Eds.), Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, IPCC, Geneva, Switzerland (2014), p. 151.

M. Hisano, E.B. Searle, H.Y. Chen. (2018). Biodiversity as a solution to mitigate climate change impacts on the functioning of forest ecosystems, Biol. Rev., 93, pp. 439-456.

M. Hisano, E.B. Searle, H.Y. Chen. (2018). Biodiversity as a solution to mitigate climate change impacts on the functioning of forest ecosystems, Biol. Rev., 93 (2018), pp. 439-456

Climate change phenomenon and the trend of increasing floods in Caspian (Hyrkanian) watershed

Abstract

Increased flooding, drought, rising sea levels, etc. One of the most important consequences of climate change is the increase in the occurrence of weather-climatic disasters. Flooding is considered one of the most destructive events in the world, as its occurrence causes irreparable damage to the agricultural, industrial, housing, and livelihood sectors of people in different countries. In the present study, the role of climate change on floods in the Caspian Basin was examined. The results and maps prepared showed that the occurrence of floods in the Caspian Basin has been increasing and most floods have occurred in recent decades. Climate change and changes in precipitation patterns have occurred in many regions of the world, and Iran is no exception to these changes. However, controlling some conditions, including controlling the absence of occurrence or controlling the amount of damage caused by floods, through measures such as watershed management, can be very useful. For this purpose, it is recommended to study and implement structural and non-structural plans, basin management and watershed protection, and prepare and compile a flood management regulation.

Keywords: Climate Change, Flood, Hyrkanian, Runoff.

تحلیل روند تغییرات بلندمدت دمای هوا و پیامدهای اقلیمی آن در استان گلستان

مصطفی یلقی*[۱]، علی فتحی هیر[۲]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد اقلیم‌شناسی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

*mostafa.yelghei@ut.ac.ir

چکیده

تغییر اقلیم به عنوان یکی از چالش‌های اصلی قرن حاضر، تأثیرات گسترده‌ای بر سیستم‌های طبیعی و انسانی دارد. استان گلستان با دارا بودن تنوع اقلیمی و وابستگی شدید به بخش کشاورزی، در معرض مخاطرات ناشی از تغییرات دما قرار دارد. این مطالعه به‌صورت توصیفی-تحلیلی و از نظر روش نرم‌افزاری بوده و با هدف تحلیل روند بلندمدت تغییرات دمای استان گلستان و شهرستان‌های آن و پیامدهای اقلیمی آن طی دوره آماری ۲۰۲۴-۱۹۵۰ صورت گرفت. داده‌های مورد نیاز از پایگاه ERA5 (ECMWF) استخراج و با نرم‌افزار Panoply به داده‌های قابل استفاده تبدیل شدند. نمودارهای تغییرات بلندمدت دما با استفاده از Excel و تحلیل سری زمانی و تحلیل فضایی با استفاده از ابزار Hotspots در محیط Arcmap تهیه شد. نتایج نشان داد میانگین دمای استان روند افزایشی معناداری معادل ۰.۲۷۵ درجه سلسیوس در هر دهه داشته است (افزایش ۲ درجه‌ای میانگین دما طی دوره). همچنین، الگوی فضایی تغییرات دما یکپارچه نبوده و خوشه‌های معنادار افزایش دما در شمال‌غرب (آق‌قلا) و کاهش دما در جنوب‌غربی استان (مینودشت) شناسایی شد. این واگرایی دمایی نشان‌دهنده تأثیر توأم تغییراقلیم جهانی و عوامل محلی نظیر توپوگرافی و پوشش زمین است. پیامدهای این تغییرات شامل تشدید تنش آبی، تهدید امنیت غذایی و افزایش مخاطرات طبیعی است که لزوم تدوین راهبردهای سازگاری مکان‌محور را ایجاب می‌کند.

کلید واژه‌ها: تغییر اقلیم، استان گلستان، تحلیل فضایی، دما، پیامدهای اقلیمی

مقدمه

تغییرات اقلیمی یکی از چالش‌های اصلی قرن بیست و یکم است که تأثیرات گسترده‌ای بر محیط‌زیست، کشاورزی، منابع آب، سلامت انسان و زیرساخت‌ها دارد. افزایش دما، تغییر در الگوهای بارش، افزایش فراوانی و شدت پدیده‌های اقلیمی شدید مانند خشکسالی و سیل، از جمله پیامدهای بارز این تغییرات هستند. بررسی‌ها در سطح جهانی نشان داده است که میانگین دمای سطح زمین طی قرن بیستم حدود ۰/۷۴ درجه سلسیوس افزایش یافته و دهه‌های اخیر به‌عنوان گرم‌ترین دوره‌های ثبت شده شناخته می‌شوند. از طرفی دیگر، تغییر اقلیم به‌عنوان مهم‌ترین چالش زیست‌محیطی قرن حاضر، با افزایش میانگین دمای جهانی، تشدید امواج گرما و کوتاه‌تر شدن فصول سرد در اغلب مناطق دنیا شناخته می‌شود. در سطح منطقه‌ای، کشورهای مختلف خاورمیانه و آسیای میانه به دلیل موقعیت جغرافیایی و حساسیت‌های اقلیمی خود بیش از سایر مناطق در معرض تهدیدات ناشی از تغییر اقلیم قرار دارند. ایران به‌واسطه اقلیم‌های متنوع و اتکای بالای معیشت به کشاورزی و منابع آب، نسبت به تغییرات دما و بارش حساس است و پیامدهای آن می‌تواند بر امنیت غذایی، سلامت و اکوسیستم‌ها اثرگذار باشد (IPCC, 2021). بررسی‌های کشوریِ شاخص‌های حدی نشان داده‌اند که طی دهه‌های اخیر، بخش عمده ایستگاه‌های ایران با افزایش فراوانی و شدت گرماهای حدی و رشد میانگین دما مواجه بوده‌اند (Rahimzadeh et al., 2009). شمال ایران از جمله استان گلستان، به دلیل وابستگی بالای معیشت مردم به کشاورزی و منابع طبیعی، آسیب‌پذیری بیشتری در برابر تغییر اقلیم دارد. تغییرات دما در نواحی شمالی ایران، افزایش معنادار میانگین دما به‌ویژه در ماه‌های گرم سال گزارش شده است (اختری روح‌انگیز و همکاران، ۱۳۹۵). استان گلستان با تنوع توپوگرافی از سواحل خزر تا دامنه‌های البرز و جلگه گرگان، در معرض گرمایش و تغییر الگوهای دمایی–تبخیری قرار دارد که می‌تواند الگوی نیاز آبی، طول فصل رشد و خطر رخدادهای حدی حرارتی را تغییر دهد (Ghasemi et al., 2025; Ahmadi et al., 2023). این استان همچنین طی دهه‌های اخیر با روندی افزایشی در بروز خشکسالی‌های هواشناسی روبه‌رو بوده است (بذرافشان و همکاران، ۱۳۹۰). با وجود مطالعات ملی و منطقه‌ای درباره روندهای دمایی ایران، شکاف دانشی در «ترسیم نظام‌مند روند بلندمدت دمای سالانه استان گلستان در مقیاس شهرستانی و مقایسه فضایی شدت روند» باقی مانده است (Ghanghermeh, 2015; Biazar et al., 2020). سنجش روند دما و شدت آن در سطح شهرستان‌ها برای تطبیق کشاورزی، مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی سازگاری اقلیمی ضروری است؛ زیرا افزایش حتی چند دهم درجه در هر دهه می‌تواند نیاز آبی محصولات، ریسک گرمازدگی و طول فصل رشد را دگرگون کند (Rahimzadeh et al., 2009; Kousari et al., 2013). بیشتر پژوهش‌های داخلی بر شاخص‌های خشکسالی یا بررسی‌های بارشی متمرکز بوده‌اند، اما تحلیل فضایی–زمانی دما در مقیاس شهرستانی و ارتباط آن با پیامدهای تغییر اقلیم کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین، پژوهش حاضر با تمرکز بر روند تغییرات بلندمدت دمای استان گلستان و پیامدهای اقلیمی آن، می‌تواند به تکمیل شکاف‌های موجود در ادبیات پژوهش کمک کند. هدف این پژوهش، برآورد روند تغییرات دمای سالانه استان و شهرستان‌ها در بازه بلندمدت، تحلیل سری زمانی و تحلیل فضایی و تفسیر نتایج در چارچوب تغییر اقلیم و پیامدهای مدیریتی است. یا به بیانی دیگر، پژوهش حاضر با ترکیب تحلیل سری زمانی و مکانی، تصویری روشن از گرمایش اقلیمی استان و پیامدهای بالقوه آن برای مدیریت

منابع و برنامه‌ریزی سازگاری ترسیم نماید. بنابراین، بررسی روندهای بلندمدت دما در مقیاس زمانی مختلف، به‌ویژه در مناطق حساس مانند استان گلستان می‌تواند اطلاعات ارزشمندی برای برنامه‌ریزی‌های مدیریتی و سیاست‌گذاری‌های اقلیمی فراهم آورد.

در ایران نیز مطالعات فراوانی در زمینه تغییر اقلیم انجام شده است. در پژوهشی افزایش روند دما در استان‌های شمالی، رابطه مستقیمی با کاهش عملکرد برخی محصولات کشاورزی از جمله گندم و برنج دارد (محمدی و همکاران، ۱۳۹۷). در استان گلستان به طور خاص، درباره تغییرات سطح آبی سد گلستان با استفاده از داده‌های سنجش از دور نشان داده شد که تغییرات بارش و دما نقش مهمی در تغییر رژیم هیدرولوژیک منطقه دارند (یلقی، ۱۴۰۴). در مطالعه‌ای تحلیل روند دمای حداقل و حداکثر در نواحی خشک و نیمه‌خشک ایران با روش‌های ناپارامتری، افزایش معنادار دما در بسیاری از ایستگاه‌ها گزارش شده است (Tabari & Talaee, 2011). همچنین، مطالعه نقاط تغییر در میانگین سالانه دمای کشور، وقوع تغییر رژیم‌های حرارتی طی نیم‌قرن اخیر را با تأکید بر جهش‌های دمایی نشان داده است (Shirvani, 2015). پژوهشی دیگر، روندهای Tmax در مقیاس سالانه و فصلی در ۳۲ ایستگاه سراسری، افزایش معنادار به‌ویژه در فصل گرم سال را مستند کرده و پیامدهای آن برای نیاز آبی و پیک مصرف انرژی را مطرح نموده است (Kousari et al., 2013). مطالعه‌ای دیگر نیز تحلیل مشترک روند و نقطه تغییر برای بارش و دما در جنوب‌غرب ایران نیز رشد دما همراه با تغییرپذیری زمانی بارش را گزارش کرده و بر مدیریت ریسک خشکسالی تأکید دارد (Zarenistanak et al., 2014). در سطح فرایندی، تغییر جریان رودخانه‌ها در غرب کشور همگام با سیگنال‌های گرمایش و تغییر بارش ثبت شده است که به‌طور غیرمستقیم اهمیت مؤلفه دما را در چرخه هیدرولوژیک برجسته می‌کند (Abghari et al., 2013). در مقیاس نوار شمالی، روند شاخص‌های یخبندان در سواحل خزر با آزمون من–کندال نشان داده که تعداد روزهای یخبندان کاهش و طول فصل رشد افزایش یافته است که با گرمایش سازگار است (Biazar et al., 2020). تحلیل روندهای هیدرو–اقلیمی در حوضه‌های شمالی با استفاده از آزمون من–کندال، تغییرات معنادار در دما و بارش و پیامدهای آن بر رواناب را گزارش کرده و بر ناهمگنی فضایی تأکید داشته است (Nikzad Tehrani et al., 2019). در استان گلستان، مطالعه شاخص‌های دمایی نشان داده که بخش بزرگی از پهنه استان طی ماه‌های گرم با روند افزایشی معنادار دما مواجه بوده است (Ghanghermeh, 2015). شبیه‌سازی‌های محلی با LARS-WG برای گلستان نیز افزایش چشمگیر دما و جابجایی پهنه‌های اقلیمی به‌سوی خشکی بیشتر تا پایان قرن را نشان می‌دهد (Meftahhalaghi, 2015). تحلیل تبخیر و تغییرات آن در گلستان، همبستگی تنگاتنگ با روندهای دما و نقش گرمایش در تشدید نیاز آبی و تبخیر–تعرق را تأیید می‌کند (Ahmadi et al., 2023). ارزیابی تغییرات آینده دما و بارش در ایستگاه‌های هاشم‌آباد گرگان و پیرامون آن نشان داده که سناریوهای اقلیمی بر افزایش دمای حداقل و حداکثر و تغییر بارش دلالت دارند (Ghorbani-Minaei et al., 2024). پژوهش‌های موردی ایستگاه هاشم‌آباد نیز با رگرسیون صدکی و تحلیل سری زمانی، گرم‌تر شدن همه فصول به‌ویژه تابستان را طی دهه‌های اخیر گزارش کرده‌اند (Hashem-Abad Station case, 2022). همچنین در مقیاس ملی، ردیابی ۱۳ شاخص حدی دما در ۳۷ ایستگاه طی ۱۹۹۰–۲۰۲۰ با آزمون من–کندال، روند افزایشی معنی‌دار در اغلب شاخص‌ها را نشان داده و پیامدهای آن برای سلامت و انرژی را برجسته کرده

است (Kamali et al., 2025). مرور تازه تبخیر–تعرق و تبخیر تشت در ایران نیز نشان می‌دهد افزایش دما همراه با تغییر باد و رطوبت، تبخیر را در بسیاری از مناطق از جمله شمال کشور افزایش داده است (Ghasemi et al., 2025). جمع‌بندی پژوهش‌های ملی نشان می‌دهد که گرمایش ایران با ناهمگنی مکانی همراه است و نواحی شمالی و ساحلی نیز از این قاعده مستثنی نیستند (Soltani et al., 2016). از طرف دیگر در سطح جهانی، ارزیابی ششم IPCC اثبات کرده که گرمایش مشاهده شده عمدتاً انسان‌زاد است و در سناریوهای مختلف، دست‌کم در دهه ۱۴۰۰ خورشیدی به ۱.۵ درجه سانتی‌گراد نزدیک یا از آن عبور می‌کند؛ نکته‌ای که اهمیت پایش محلی روندهای دما را دوچندان می‌کند (IPCC, 2021). مطالعات بین‌المللی متعددی روند بلندمدت افزایش دما را با استفاده از تحلیل سری زمانی و رگرسیون یا آزمون Mann–Kendall در مناطق مختلف جهان بررسی کرده‌اند. در پژوهشی نشان داده شده که در گرمایش سطح زمین طی پنجاه سال گذشته تقریباً ۰.۱۸ بوده و روند اخیر در سال ۲۰۲۲ مطابق با این مقدار کلی است (Samset et al. 2023). در اروپا نیز گزارش شده که تابستان‌های غرب اروپا در ۷۰ سال گذشته با نرخ افزایش دمایی بیش از مقدار پیش‌بینی‌شده توسط مدل‌های اقلیمی مواجه بوده‌اند، و تغییرات جریان‌های جوی در افزایش این گرما نقش داشته‌اند (Vautard et al. 2023). در مطالعه‌ای دیگر، تحلیل داده‌های ماهواره‌ای MODIS روند افزایش دمای سطح زمین را برای سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰ نشان داده که نشان‌دهنده یک الگوی گرمایش جهانی و منطقه‌ای هماهنگ با مشاهدات ایستگاهی بود (Wang et al. 2022). همچنین پژوهشی نیز با بررسی داده‌های ایستگاه‌های اروپا از ۱۹۵۱ تا ۲۰۲۰، روندهای معنادار در دمای سالانه و فصلی را ثبت کرد و تأکید کرد که مناطق مختلف اروپا تجربه گرمایش متفاوتی دارند (Twardosz et al. 2021). در مطالعه‌ای دیگر نیز با استفاده از مدل فضایی–زمانی بیزی برای داده‌های دمای شبکه‌ای اروپا، نشان دادند که تحلیل روند مستقل در شبکه‌ها می‌تواند اهمیت ناحیه‌ای گرمایش را نادیده بگیرد و روند واقعی را با همبستگی فضایی دقیق‌تر اندازه‌گیری کرد (Haug et al. 2019). در تحقیقی نیز، روندهای دمایی جهانی را در طول ۱۶۰ سال گذشته با در نظر گرفتن روندهای خطی و نوسانی مورد تحلیل قرار دادند و نشان دادند که برخی نوسانات (مثل چرخه ۶۰ ساله) لزوماً معنادار نیستند اما روند افزایشی خطی دما در زمین و دریا قابل تایید است (Østvand et al. 2013).

مواد و روش

پژوهش حاضر از نوع توصیفی–تحلیلی و نرم‌افزاری بوده و به‌منظور بررسی روند تغییرات بلندمدت دما در استان گلستان و شهرستان‌های آن در بازه زمانی ۱۹۵۰ تا ۲۰۲۴ و تحلیل سری زمانی و مکانی انجام شده است. در ابتدا، داده‌های مورد نیاز از پایگاه داده‌های بازتحلیل اقلیمی ERA5 (ECMWF) استخراج و پس از کنترل و پاکسازی اولیه با استفاده از نرم‌افزار Panoply و Arcmap به داده‌های قابل استفاده و فرمت‌های CSV و Excel تبدیل شدند (جدول ۱).

جدول ۱: مشخصات داده‌های اقلیمی مستخرج از سایت ECMWF

داده‌های میانگین ماهانه ERA5-Land	
۱ نوع داده	شبکه‌بندی شده

۲	نمایش	شبکه طول و عرض جغرافیایی منظم
۳	پوشش افقی	جهانی
۴	وضوح افقی	۰.۱° × ۰.۱°، وضوح اصلی ۹ کیلومتر
۵	پوشش عمودی	۲ متر بالاتر از سطح زمین تا عمق خاک ۲۸۹ سانتی‌متر
۶	وضوح زمانی	ماهانه

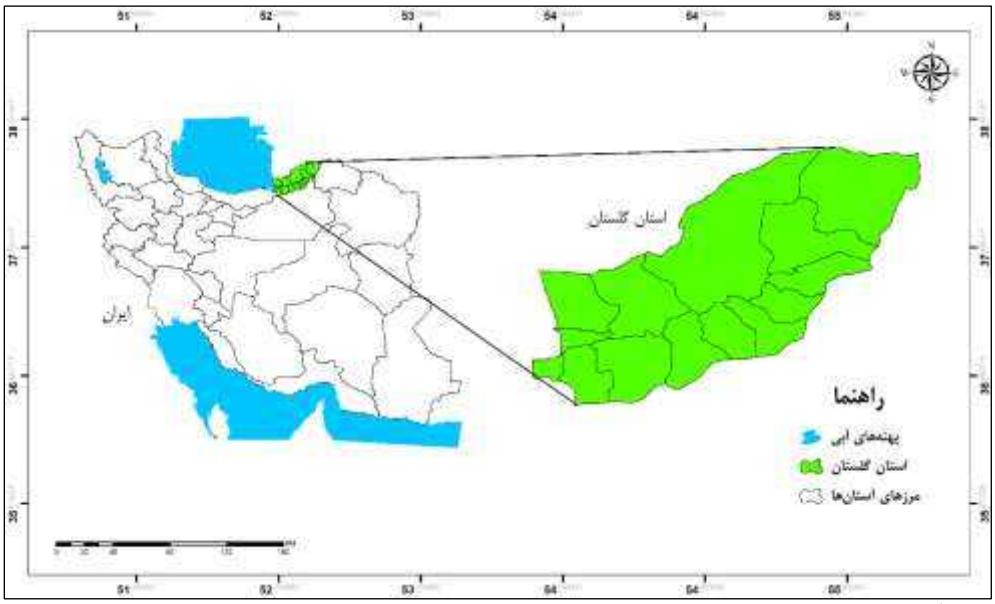
منبع: یلقی، ۱۴۰۴

برای تحلیل روندهای زمانی، ابتدا میانگین سالانه دمای استان در بازه مورد مطالعه محاسبه و به صورت نمودار خطی ترسیم گردید تا تغییرات بلندمدت و روند کلی گرمایش استان مشخص شود؛ سپس به‌منظور بررسی تغییرات فضایی و رسم نمودار در سطح محلی و شهرستانی، میانگین‌های دمای بلندمدت سالانه برای هر شهرستان به وسیله ابزار Zonal Statistics as Table در محیط نرم‌افزار Arcmap به تفکیک استخراج و پس از انتقال به Excel، در قالب نمودار خطی به تفکیک شهرستان‌ها ارائه شد. همچنین به‌منظور نمایش الگوی مکانی تغییرات دما، از ابزار تحلیل فضایی نقاط داغ (Hotspots) در نرم‌افزار Arcmapاستفاده شد و به صورت سالانه نقشه آن تهیه گردید. در نهایت، برای تفسیر نتایج، یافته‌های کمی حاصل از نمودارها و نقشه‌های مکانی ترکیب شد تا تصویری جامع از روند تغییرات دما در استان گلستان ارائه گردد. بدین ترتیب، روش پژوهش حاضر تلاش دارد تا با ترکیب تحلیل‌های فضایی–زمانی، تصویری روشن از گرمایش اقلیمی استان و در سطح شهرستان و پیامدهای بالقوه آن برای مدیریت منابع و برنامه‌ریزی سازگاری ترسیم نماید.

محدوده مورد مطالعه

استان گلستان با ۲۰۳۶۷ کیلومتر مربع وسعت یکی از استان‌های شمالی کشور با مرکزیت گرگان است که از شمال با جمهوری ترکمنستان، از غرب با استان مازندران و دریای خزر، از جنوب با استان سمنان و از شرق با استان خراسان شمالی همسایه است. این استان، دارای ۱۴ شهرستان و ۱ میلیون و ۸۰۰ هزار نفر جمعیت است. بیشتر مناطق استان گلستان آب و هوای معتدل مدیترانه‌ای دارد اما جلگه گرگان به لحاظ مجاورت با صحرای ترکمنستان از آب و هوای نیمه‌بیابانی و گرم برخوردار است (شمال‌غربی استان). ویژگی بارز استان گلستان تنوع اقلیمی و زیست‌محیطی آن است. بخشی از رشته‌کوه البرز شرقی از غرب به شرق استان کشیده شده و با گرایش به سمت شمال‌شرق، به‌تدریج از ارتفاع آن کاسته می‌شود؛ به همین دلیل، استان از مناطق کوهستانی و جنگلی تا نواحی جلگه‌ای و بیابانی گسترده است. این تنوع ناهمواری سبب شده که استان دارای آب و هوای متنوع، از معتدل مرطوب خزری در غرب تا نیمه‌خشک و حتی بیابانی در شرق و شمال باشد. بصورت کلی از نظر اقلیمی ۷ اقلیم از ۱۳ اقلیم شناخته شده جهان (معتدل مرطوب، معتدل مدیترانه‌ای، معتدل خشک، معتدل کوهستانی، سرد کوهستانی، نیمه‌خشک و خشک) در این استان وجود دارد. می‌توان گفت که میانگین بارش سالانه استان گلستان در رتبه سوم بالاترین میزان بارش بعد از استان‌های گیلان و مازندران است. منابع آب استان شامل آب‌های سطحی و زیرزمینی با حجم بیش از ۲۴۰۰ میلیون متر مکعب است که حدود ۵۲ درصد آن آب‌های سطحی و ۴۸ درصد

آن آب‌های زیرزمینی هستند. بیش از ۴۰ رودخانه در استان جریان دارند که عمدتاً از جنوب به شمال و از شرق به غرب حرکت می‌کنند. از میان آن‌ها رود اترک، گرگان‌رود و قره‌سو مهم‌ترین رودهای استان به شمار می‌روند (شکل ۱).

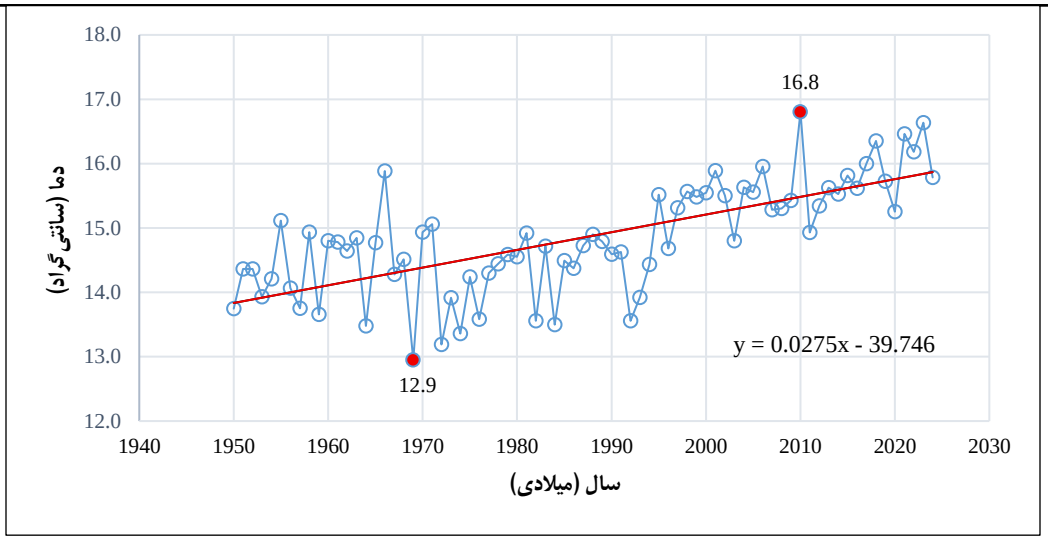


منبع: یلقی، ۱٤۰٤

شکل ۱: نقشه موقعیت جغرافیایی استان گلستان

نتایج

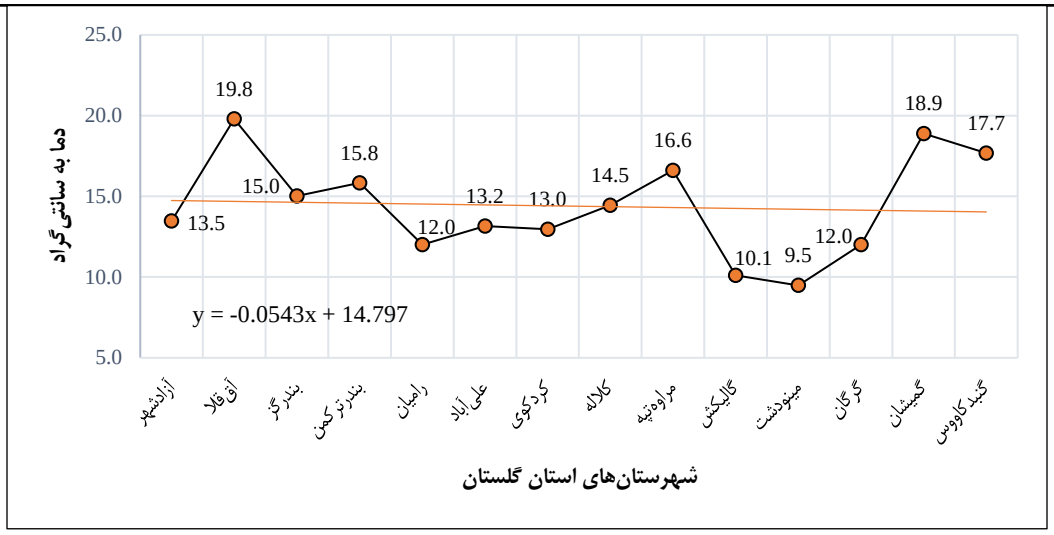
نتایج این پژوهش بر پایه تحلیل سری زمانی میانگین سالانه دما و تحلیل فضایی آن در استان گلستان طی دوره ۱۹۵۰ تا ۲۰۲۴ و بررسی تغییرات آن بر اساس میانگین دما در سطح شهرستان‌ها استوار است. نتایج توصیفی اولیه نشان می‌دهد که روند دما در کل استان طی بازه بلندمدت صعودی بوده و افزایش میانگین دما در دهه‌های پایانی قرن بیستم و اوایل قرن بیست و یکم شدت بیشتری یافته است. مقایسه شهرستان‌ها نیز بیانگر تفاوت‌های مکانی معنادار در شدت گرمایش بوده، به‌گونه‌ای که برخی نواحی مرکزی و شمالی استان افزایش بیشتری را نسبت به نواحی جنوبی و کوهستانی تجربه کرده‌اند. نتایج حاصل از تحلیل روند بلندمدت دمای استان گلستان در بازه زمانی ۷۴ ساله (از ۱۳۲۹ تا ۱۴۰۳ شمسی) گویای یک روند افزایشی واضح و نگران‌کننده است. این روند صعودی به وضوح نشان‌دهنده تأثیر پدیده تغییر اقلیم در سطح منطقه‌ای است. بر اساس معادله خط روند ترسیم شده بر روی داده‌ها ($y = 0.0275x - 39.746$) در شکل ۲، میانگین دمای استان گلستان به طور متوسط حدود ۰.۲۷۵ درجه سلسیوس در هر دهه افزایش یافته است. این بدان معناست که در طول این دوره ۷۴ ساله، میانگین دمای این استان به میزان تقریبی ۲ درجه سلسیوس گرم‌تر شده است.



شکل ۲: نمودار روند تغییرات بلندمدت میانگین دمای سالانه استان گلستان در بازه ۱۹۵۰-۲۰۲۴

با توجه به شکل ۲، میانگین کلی دمای استان در طول بازه ۷۴ ساله برابر با ۱۴.۹ درجه سانتی‌گراد بوده است. بالاترین میانگین دمای استان در سال ۲۰۱۰ اتفاق افتاده که میانگین دمای استان در این سال به ۱۶.۸ درجه سانتی‌گراد رسیده است. پایین‌ترین میانگین دمای استان نیز در سال ۱۹۶۹ بوده که دما در حدود ۱۲.۹ درجه سانتی‌گراد بوده است. اما بصورت کلی دما در طی این ۷۴ سال روند صعودی داشته است. این نرخ افزایش، از میانگین گرمایش جهانی در همین بازه زمانی بالاتر است که حساسیت و آسیب‌پذیری خاص اکوسیستم‌های استان گلستان را نشان می‌دهد. نمودار حاضر نه تنها روند صعودی بلندمدت، بلکه نوسانات قابل توجهی را در مقیاس دهه‌ای به نمایش می‌گذارد. از سال ۱۹۵۰ تا سال ۱۹۹۲ روند تغییرات دما حالتی نوسانی را نشان می‌دهد اما از سال ۱۹۹۲ به بعد روند صعودی دما را شاهد هستیم که علاوه بر ادامه روند صعودی تا سال ۲۰۲۴، فراوانی سال‌های با دمای بسیار بالا نیز در آن‌ها بیشتر به چشم می‌خورد. این موضوع پدیده افزایش تناوب و شدت امواج گرمایی را در منطقه یادآوری می‌کند.

نتایج حاصل از بررسی روند دمایی شهرستان‌های استان گلستان نیز نشان‌دهنده تنوع قابل توجه رفتار دمایی در سطح منطقه است. بر خلاف روند افزایشی معمول در مقیاس جهانی و استانی، این نمودار الگوی متفاوتی را در برخی شهرستان‌ها نشان می‌دهد که بیانگر اهمیت مطالعه اقلیم در مقیاس محلی است. بر اساس معادله خط روند ترسیم شده (y = -0.0543x + 14.797)، میانگین دمای شهرستان‌های مورد بررسی به طور متوسط حدود ۰.۵۴ درجه سلسیوس در هر دهه کاهش یافته است. این روند کاهشی در بازه زمانی بلندمدت نشان‌دهنده رفتار خاص اقلیمی در این شهرستان‌ها است که ممکن است تحت تأثیر عوامل محلی مانند تغییرات پوشش گیاهی، الگوهای بارشی یا تأثیرات جغرافیایی خاص منطقه باشد.

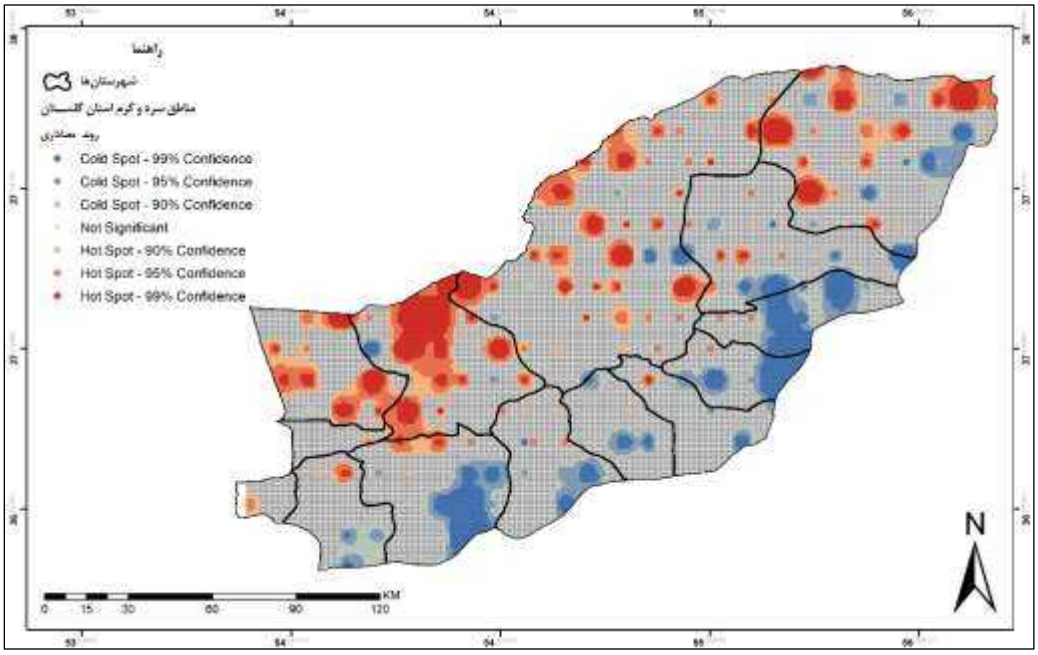


شکل ۳: نمودار روند میانگین تغییرات دمای سالانه در شهرستان‌های مختلف استان گلستان (۱۹۵۰-۲۰۲۴)

در شکل ۳ مشاهده می‌شود که بالاترین میزان میانگین دما مربوط به شهرستان آق‌قلا بوده که میانگین دمای آن در طول ۷۴ سال مطالعه در حدود ۱۹.۸ درجه سانتی‌گراد بوده است که گرم‌ترین شهرستان استان محسوب می‌شود و کمترین میزان میانگین دما مربوط به شهرستان مینودشت بوده که میانگین دمای بلندمدت آن ۹.۵ درجه سانتی‌گراد بوده است. دامنه تغییرات میانگین دمای شهرستان‌ها بیش از ۱۰ درجه سانتی‌گراد است که این از طرفی تنوع اقلیمی استان را نشان می‌دهد و از طرف دیگر می‌تواند نشان‌دهنده تأثیر خاص عوامل محلی بر اقلیم منطقه، امکان ایجاد میکروکلیماهای خاص در اثر تغییرات محیطی و یا نیاز به مطالعات بیشتر برای شناسایی دقیق عوامل تأثیرگذار باشد. بصورت کلی، شهرستان مینودشت در جنوب‌غربی استان و در نقطه‌ای خوش آب و هوا و در منطقه پایکوهی قرار دارد؛ در حالی که شهرستان آق‌قلا در شمال‌غربی استان قرار داشته و قسمت شمالی آن از بیابان قره‌قوم در کشور ترکمنستان متاثر است و این عامل آسیب‌پذیری این شهرستان را در برابر تغییراقلیم افزایش می‌دهد. بطور کلی می‌توان چنین بیان کرد که شهرستان‌هایی که در قسمت شمالی استان گلستان قرار گرفتند، میانگین دمای بالاتری نسبت به شهرستان‌های جنوبی استان داشته و تغییراقلیم تاثیر بیشتری را در این شهرستان‌ها (گمیشان، گنبدکاووس، مراوه‌تپه و بندرترکمن) گذاشته است. این یافته‌ها بر اهمیت مطالعه اقلیم در مقیاس خرد و لزوم در نظرگیری عوامل محلی در برنامه‌ریزی‌های محیطی تأکید می‌کند.

نتایج حاصل از تحلیل فضایی (Spatial Analysis) روند بلندمدت دما، الگوی مکانی کاملاً واضح و معناداری از تغییرات دما در سطح استان گلستان را آشکار می‌سازد. این تحلیل که مبتنی بر آماره Getis-Ord Gi* است و نشان می‌دهد که روند تغییرات دما در سطح استان به صورت یکنواخت نبوده و خوشه‌بندی فضایی معناداری از مناطق با روند گرمایشی و سرمایشی شدید وجود دارد. نقشه مربوط به شکل ۴، استان را به سه دسته اصلی تقسیم می‌کند: ۱. نقاط داغ (Hotspots - قرمز): این مناطق که با رنگ‌های قرمز نشان داده شده‌اند، خوشه‌هایی از شهرستان‌هایی هستند که روند افزایش دمای شدید و معناداری را در بلندمدت تجربه کرده‌اند. شدت رنگ قرمز بیانگر سطح اطمینان آماری این روند است (از ٪۹۰ تا ٪۹۹). ۲.

نقاط سرد (Coldspots - آبی): این مناطق که با رنگ‌های آبی مشخص شده‌اند، خوشه‌هایی از شهرستان‌ها با روند کاهش دمای شدید و پایدار هستند. این الگو تأییدی بر یافته‌های نمودار قبلی است که میانگین دمای برخی شهرستان‌ها روندی کاهشی داشته است. ۳. مناطق فاقد معناداری (Not Significant - سفید): این مناطق روند تغییر دمای معناداری (چه افزایشی و چه کاهشی) از خود نشان نداده‌اند (شکل ۴).



شکل ۴: نقشه تحلیل فضایی نقاط داغ و سرد دمای سالانه شهرستان‌های استان گلستان (۱۹۵۰-۲۰۲۴)

نقشه شکل ۴، مکمل بسیار مهمی برای نمودارهای قبلی است و به توضیح یک پارادوکس ظاهری کمک می‌کند. نمودار کلی استان (نمودار شکل ۲) یک روند افزایشی را نشان می‌داد و نمودار پراکندگی شهرستان‌ها (نمودار شکل ۳) یک روند کاهشی در میانگین را گزارش کرد. این نقشه (شکل ۴) در حال حاضر نشان می‌دهد که گرمایش شدید و بسیار معنادار در «نقاط داغ» به حدی بوده که بر روند کلی استان غلبه کرده و آن را مثبت کرده است، در حالی که در همان بازه، «نقاط سرد» در حال تجربه سرمایش بوده‌اند که در نمودار پراکندگی شهرستان‌ها مشهود بود. اما بصورت کلی، شکل ۳ نمودار روند میانگین تغییرات دمای سالانه در شهرستان‌های مختلف استان و شکل ۴ نقشه تحلیل فضایی نقاط داغ و سرد دمای سالانه شهرستان‌های استان باهم همخوانی دارند چرا که بیشترین پهنه نقاط سرد در قسمت جنوب‌غربی استان یعنی شهرستان مینودشت و بیشترین پهنه نقاط داغ نیز در قسمت شمال‌غربی استان یعنی شهرستان آق‌قلا بوده و در واقع این نشان‌دهنده بالا بودن میانگین بلندمدت دما در شهرستان آق‌قلا و پایین بودن میانگین بلندمدت دما در شهرستان مینودشت است.

این یافته‌ها به طور قاطع نشان می‌دهد که تغییرات اقلیمی در استان گلستان یک پدیده یکدست و همگن نیست. به نظر می‌رسد عواملی مانند موقعیت جغرافیایی (ارتفاع، دوری و نزدیکی به دریای خزر و بیابان)، پوشش زمین (جنگلی بودن، کشاورزی) و احتمالاً عوامل محلی دیگر سبب ایجاد میکروکلیماهای واگرا شده‌اند که برخی مناطق را به شدت در معرض گرمایش و برخی دیگر را در معرض سرمایش قرار داده است. این موضوع لزوم تدوین راهبردهای متفاوت و مکان‌محور را برای مدیران و برنامه‌ریزان استان بیش از پیش آشکار می‌سازد.

بحث و نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان داد که استان گلستان در بازه بلندمدت ۷۴ ساله (۲۰۲۴-۱۹۵۰) با یک الگوی دوگانه و پیچیده از تغییرات دمایی مواجه بوده است. از یک سو، یک روند افزایشی معنادار در مقیاس کلی استان با نرخ ۰.۲۷۵ درجه سلسیوس در هر دهه مشاهده شد که منجر به گرمایشی حدود ۲ درجه سلسیوس در طول دوره مطالعه شده است که این یافته با مطالعات پیشین در مقیاس ملی و جهانی که بر گرمایش یکنواخت تأکید دارند (مانند IPCC, 2021; Rahimzadeh et al., 2009; Kousari et al., 2013) و تأثیر پدیده تغییر اقلیم را در سطح منطقه تأیید می‌کند. با این حال، نوآوری و یافته کلیدی این پژوهش، آشکارسازی یک پارادوکس اقلیمی در مقیاس محلی بود. از سوی دیگر، بر خلاف روند کلی استان، تحلیل داده‌های شهرستانی یک روند کاهشی متوسط (۰.۵۴- درجه سلسیوس در هر دهه) را نشان داد. این تناقض ظاهری با استفاده از تحلیل فضایی نقاط داغ و سرد (Hotspot Analysis) به طور کامل هماهنگ بود. نتایج این تحلیل نشان داد که روند تغییرات دما در سطح استان یکنواخت نبوده و همزمان با شکل‌گیری خوشه‌های معنادار از نقاط داغ (Hotspots) در شمال‌غرب استان (به ویژه شهرستان آق قلا که گرم‌ترین شهرستان شناخته شد)، خوشه‌های نقاط سرد (Coldspots) نیز در مناطق جنوبی و کوهستانی (به ویژه شهرستان مینودشت که سردترین شهرستان شناخته شد) پدیدار شده‌اند. به نظر می‌رسد این واگرایی دمایی شدید را بتوان با عواملی چندگانهٔ توضیح داد: تأثیرات توپوگرافی و میکروکلیما: مناطق کوهستانی جنوبی (نقاط سرد) با پوشش جنگلی انبوه (جنگل‌های هیرکانی) ممکن است در برابر گرمایش جهانی تاب‌آوری بیشتری نشان داده یا تحت تأثیر الگوهای گردش جوی محلی خنک‌تر شده باشند. در مقابل، مناطق پست شمالی و شمال‌غربی (نقاط داغ) که در مجاورت بیابان‌های ترکمنستان قرار دارند، بیشتر تحت تأثیر فرایندهای تشدیدکننده گرمایش، همچون کاهش رطوبت خاک و تغییرات کاربری اراضی قرار گرفته‌اند. این نتیجه با یافته‌های (Ghanghermeh, 2015) و (Nikzad Tehrani et al., 2019) در مورد ناهمگنی فضایی تغییرات اقلیمی در شمال ایران همخوانی دارد. تأثیر تغییرات الگوی بارش و رطوبت: کاهش بارش و رطوبت خاک در مناطق شمالی استان (همانطور که در مطالعاتی مانند (Pazhouhan et al., 1390) و (Ahmadi et al., 2023) به آن اشاره شده) می‌تواند با افزایش تابش ورودی و کاهش تبخیر-تعرق، باعث تشدید گرمایش در این نواحی شده باشد. این الگوی دوگانه، اهمیت مطالعه تغییر اقلیم در مقیاس محلی را بیش از پیش نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، در حالی که سیگنال گرمایش جهانی در کل استان قابل تشخیص است ولی عوامل محلی می‌توانند این سیگنال را تقویت یا تضعیف کنند و حتی در مواردی (مانند نقاط سرد) به طور موقت بر آن

غلبه یابند. این موضوع لزوم حرکت از مدیریت یکسان‌ساز به سمت راهبردهای سازگاری مکان‌محور را برای مدیران و برنامه‌ریزان استان ضروری می‌سازد. این پژوهش با به کارگیری ترکیبی از تحلیل‌های سری زمانی و فضایی، به بررسی روند تغییرات دمای استان گلستان پرداخت. مهم‌ترین دستاوردها و نکات انجام شده در این کار روند گرمایش در مقیاس کلان یعنی در مقیاس استانی، میانگین دمای هوا با نرخی فراتر از میانگین جهانی (۰.۲۷۵ درجه سلسیوس در هر دهه) افزایش یافته که نشان‌دهنده آسیب‌پذیری بالا و حساسیت این منطقه به تغییر اقلیم به ویژه در قسمت‌های شمالی استان است. کشف واگرایی دمایی در مقیاس محلی که برای اولین بار در این استان، همزمانی روندهای مخالف گرمایشی و سرمایشی در شهرستان‌های مختلف به اثبات رسید و این یافته دیدگاه سنتیِ «یکنواخت بودن گرمایش» را در سطح منطقه به چالش می‌کشد. ارائه نقشه راه برای مدیریت محلی و شناسایی دقیق نقاط داغ و سرد دمایی، اطلاعات ارزشمندی برای اولویت‌بندی اقدامات سازگاری (مانند مدیریت آب در نقاط داغ و حفاظت از اکوسیستم‌های آسیب‌پذیر در نقاط سرد) در اختیار تصمیم‌گیران قرار می‌دهد.

با توجه به یافته‌های این پژوهش، افزایش معنادار دمای استان گلستان در کنار شکل‌گیری خوشه‌های فضایی متضاد (نقاط داغ و سرد)، پیامدهای گسترده و نگران‌کننده‌ای را برای این استان به دنبال خواهد داشت. از جمله این پیامدها می‌توان به تشدید تنش آبی ناشی از افزایش تبخیر-تعرق و کاهش منابع آب قابل دسترس، تهدید امنیت غذایی با ایجاد اختلال در الگوهای کشت و کاهش عملکرد محصولات استراتژیک به دلیل تنش گرمایی، افزایش خطر آتش‌سوزی در جنگل‌های ارزشمند هیرکانی و تشدید مخاطرات بهداشتی ناشی از امواج گرما اشاره کرد. این تغییرات نه تنها اکوسیستم‌های حساس استان را تحت تأثیر قرار می‌دهد، بلکه با تهدید معیشت وابسته به کشاورزی و منابع طبیعی، می‌تواند به تشدید فقر روستایی و مهاجرت منجر شود. بنابراین، شناسایی این پیامدها به برنامه‌ریزان استان کمک می‌کند تا راهبردهای سازگاری مکان‌محور و مؤثری را برای کاهش آسیب‌پذیری جامعه و اکوسیستم در برابر تغییرات اقلیمی طراحی کنند. با توجه به یافته‌های تحقیق، پیشنهاد می‌شود برنامه‌ریزی برای سازگاری با تغییر اقلیم در استان گلستان با رویکردی مکان‌محور و مبتنی بر الگوهای فضایی شناسایی شده صورت پذیرد؛ به‌طوری که در مناطق گرم شده تمرکز بر مدیریت بحران آب از طریق توسعه سیستم‌های آبیاری با راندمان بالا، کشت محصولات مقاوم به خشکی و گرمازدگی و احیای آبخوان‌ها معطوف گردد، درحالی که در مناطق با روند خنک شدن، حفاظت از اکوسیستم‌های طبیعی و بهره‌برداری پایدار از پتانسیل‌های کشاورزی خاص آن مناطق در اولویت قرار گیرد. همچنین، استقرار سامانه‌های هشدار زودهنگام برای پدیده‌های حدی، سرمایه‌گذاری در پژوهش‌های کاربردی برای توسعه ارقام سازگار و تدوین یک برنامه جامع و یکپارچه "مدیریت اقلیمی استان" با مشارکت کلیه ذی‌نفعان ضروری به نظر می‌رسد.

منابع

اختری، روح‌انگیز، مهدیان، محمدحسین و مرید، سعید. (۱۳۹۵). تحلیل تغییرات اقلیمی و خشکسالی با شاخص SPEI در شمال ایران. پژوهش‌های جغرافیایی، ۴۸(۲)، ۱۲۱-۱۳۶.

بذرافشان، ام‌البنین، محسنی ساروی، محسن، ملکیان، آرش و معینی، ابوالفضل. (۱۳۹۰). بررسی وضعیت خشکسالی استان گلستان با استفاده از شاخص بارش استاندارد (SPI). تحقیقات مرتع و بیابان ایران، ۱۸(۳)، ۳۹۵-۴۰۷.

محمدی، مهدی، علیزاده، جواد، و نیکو، سارا. (۱۳۹۷). تأثیر تغییرات دما و بارش بر عملکرد گندم و برنج در شمال ایران . مجله علوم کشاورزی ایران، ۴۹(۴)، ۷۲۳–۷۳۴.

یلقی، مصطفی، (۱۴۰۴)، ارزیابی نقش عناصر و عوامل اقلیمی در بروز مخاطرات جاده‌ای در استان گلستان، دوازدهمین کنفرانس بین المللی بهداشت، بحران و ایمنی، تهران. (مقاله کنفرانس).

یلقی، مصطفی. (۱۴۰۴). تغییرات محیطی سطح آبی سد گلستان و تأثیر بارش در آن با استفاده از سنجش از دور. دهمین همایش بین‌المللی دانش و فناوری علوم کشاورزی، منابع طبیعی و محیط زیست ایران، تهران. (مقاله کنفرانس).

Reference

Abghari, H., Tabari, H., & Talaee, P. H. (2013). River flow trends in the west of Iran during the past 40 years: Impact of precipitation variability. Global and Planetary Change, 101, 52–60.

Ahmadi, B., Ghorbani-Minaei, S., & Meftahhalaghi, M. (2023). Analysis of evaporation changes and their relation with temperature trends in northern Iran. Journal of Hydrology: Regional Studies, 47, 101-334.

Biazar, S. M., Lashkari, H., & Azizi, G. (2020). Trend analysis of frost indices in the Caspian Sea coastal regions of Iran using the Mann–Kendall test. Theoretical and Applied Climatology, 142, 1743–1758.

Copernicus Climate Change Service (C3S) (2022): ERA5-Land monthly averaged data from 1950 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS).

Ghasemi, A. R., Nikzad Tehrani, E., & Moradi, M. (2025). Evapotranspiration dynamics and pan evaporation trends in Iran: A review. Environmental Monitoring and Assessment, 197(6), 765.

Ghanghermeh, A. (2015). Spatio-temporal trend analysis of temperature indices in Golestan Province. Geographical Research Quarterly, 30(2), 45–60.

Ghorbani-Minaei, S., Ahmadi, B., & Soltani, A. (2024). Climate change projection of temperature and precipitation in northern Iran using statistical downscaling. Theoretical and Applied Climatology, 158(3), 1345-1362.

Hashem-Abad Meteorological Station. (2022). Annual climate report and trend analysis for Golestan Province (Unpublished raw data). Iranian Meteorological Organization.

Haug, T., Rue, H., & Rue, G. (2019). Bayesian spatio-temporal modeling of European temperature trends. Annals of Applied Statistics, 13(3), 1484–1506.

IPCC. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

Kamali, G. A., Rahimzadeh, F., & Tabari, H. (2025). Detection of temperature extremes indices trends across Iran during 1990–2020. International Journal of Climatology, 45(2), 987–1003.

Kousari, M. R., Ahani, H., & Movahedi, S. (2013). Trend detection of maximum temperatures in Iran. International Journal of Climatology, 33(2), 365–377.
Meftahhalaghi, M. (2015). Climate change scenarios in Golestan Province using LARS-WG model. Journal of Water and Climate Change, 6(3), 543–555.
Muñoz Sabater, J. (2019): ERA5-Land monthly averaged data from 1950 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS).
Nikzad Tehrani, E., Ghasemi, A. R., & Hosseini, S. A. (2019). Hydro-climatic trend analysis in northern Iranian basins using Mann–Kendall test. Arabian Journal of Geosciences, 12(15), 470.
Ostvand, L. C., et al. (2013). Global and regional climate oscillations: A spatio-temporal analysis of temperature trends. Journal of Climate Research, 56(4), 321–335.
Rahimzadeh, F., Asgari, A., & Fattahi, E. (2009). Variability of extreme temperature and precipitation in Iran during recent decades. International Journal of Climatology, 29(3), 329–343.
Samset, B. H., et al. (2023). Global surface warming over the past five decades: Updated assessment. Nature Climate Change, 13(5), 450–457.
Shirvani, A. (2015). Detection of change points in annual mean temperature of Iran during the last half century. Theoretical and Applied Climatology, 122(1–2), 329–338.
Soltani, A., Gholipoor, M., & Zeinali, E. (2016). Simulating climate change impacts on wheat and maize in Iran using crop models. Agricultural and Forest Meteorology, 223, 38–52.
Tabari, H., & Talaee, P. H. (2011). Analysis of trends in temperature data in arid and semi-arid regions of Iran. Global and Planetary Change, 79(1–2), 1–10.
Twardosz, R., et al. (2021). Long-term variability and trends in air temperature in Europe (1951–2020). International Journal of Climatology, 41(3), 1423–1440.
Vautard, R., et al. (2023). Rapid intensification of western European summer heatwaves. Nature Communications, 14(1), 12-33.
Wang, J., Li, C., & Zhang, X. (2022). Global and regional trends of land surface temperature derived from MODIS data (2001–2020). Remote Sensing, 14(14), 32-81.
Zarenistanak, M., Dhorde, A. G., & Kripalani, R. H. (2014). Trend analysis and change point detection of annual and seasonal precipitation and temperature series over southwest Iran. Journal of Earth System Science, 123(2), 281–295.

Long-term trends in air temperature changes and their climatic consequences in Golestan Province

Mostafa Yelghei*[1], Ali Fathi Hir[2]

Master's student in Climatology, Department of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

Master's student in Geography and Urban Planning, Department of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

*mostafa.yelghei@ut.ac.ir

Abstract

Climate change, as one of the main challenges of the current century, has widespread impacts on natural and human systems. Golestan Province, with its climatic diversity and strong dependence on the agricultural sector, is exposed to risks from temperature changes. This study is descriptive-analytical and software-based and aims to analyze the long-term trend of temperature changes in Golestan Province and its counties and its climatic consequences during the statistical period of 1950-2024. The required data were extracted from the ERA5 database (ECMWF) and converted into usable data using Panoply software. Long-term temperature change graphs were prepared using Excel and time series analysis and spatial analysis using the Hotspots tool in the Arcmap environment. The results showed that the average temperature of the province had a significant increasing trend of 0.275 degrees Celsius per decade (2 degrees increase in the average temperature during the period).Also, the spatial pattern of temperature changes was not uniform, and significant clusters of temperature increase in the northwest (Aqqala) and temperature decrease in the southwest of the province (Minudasht) were identified. This temperature divergence indicates the combined effect of global climate change and local factors such as topography and land cover. The consequences of these changes include increased water stress, threats to food security, and increased natural hazards, which necessitate the development of location-based adaptation strategies.

Keywords: Climate change, Golestan province, Spatial analysis, Temperature, Climate consequences

بررسی مدل SALTMED در برآورد عملکرد خیار گلخانه‌ای در شرایط تنش رطوبتی در تیمارهای اختلاط خاک‌اره

یاسر حسینی [۱]، جواد رمضانی مقدم [۲]

۱- استاد دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی (نویسنده مسئول)
۲- دانشیار دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی

آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول Y_hoseini@uma.ac.ir

چکیده

به‌منظور مدل‌سازی عملکرد خیار گلخانه‌ای در شرایط رژیم رطوبتی در تیمارهای خاک‌اره، آزمایشی در قالب طرح بلوک‌های کاملاً تصادفی با سه تکرار انجام شد. تیمارها شامل تیمار بدون خاک‌اره (S0) و ترکیب اختلاط ۱۰(S1)، ۲۰ (S2) درصد خاک‌اره بود و تنش‌های رطوبتی در سطوح بدون تنش(I1) و ۴۵ (I2) و ۶۵ (I3) درصد ظرفیت زراعی منظور گردید. با استفاده از مدل SALTMED، نتایج نشان داد، برای تیمار I1S1 ، I1S2، I1S3 عملکرد محاسبه شده توسط مدل، به‌ترتیب برابر ۸۳، ۱۱۹ و ۱۲۰ (T.ha-۱) بود و نتایج گلخانه‌ای این تیمارها برابر ۸۶، ۱۲۲ و ۱۳۴ (T.ha-۱) برآورد گردید. همچنین در تیمارهای در معرض تنش آبی و در تیمارهای I2S1 ، I2S2 ،I2S3 ، عملکرد محاسبه شده توسط مدل، به‌ترتیب برابر ۵۵، ۶۵و ۷۶ (T.ha-۱) محاسبه گردید و نتایج گلخانه‌ای این تیمارها، برابر ۵۷، ۷۳ و ۸۳ (T.ha-۱) بود. در تیمارهای I3S1 ، I3S2 ،I3S3 نیز عملکرد محاسبه شده توسط مدل، به‌ترتیب برابر ۴۱، ۸۲ و ۷۰ (T.ha-۱) برآورد گردید و نتایج گلخانه‌ای این تیمارها به‌ترتیب برابر ۳۲، ۷۲ و ۷۷ (T.ha-۱) بود. ارزیابی مدل با استفاده از آماره‌های ریشه‌ی میانگین مربعات خطا (RMSE36)، درصد خطای نسبی (ε۳۷)، میانگین خطای مطلق (MAE38)، ضریب تبیین۳۹ (R2)، ضریب باقیمانده جرم (CRM40) و کارایی مدل (EF41) که مقادیر آن‌ها به‌ترتیب برابر ۷/۷۸، ۹/۷، ۶/۶۸، ۰/۹۴، ۰/۰۳۴، ۰/۲۲ محاسبه گردید، چکیده مقاله باید شامل تعریف مساله، فرضیات، روش کار و خلاصه‌ای از مهمترین نتایج باشد. متن چکیده

36- Root mean square error

37- Relative percentage error

38- Mean Absolute Error

39- Goodness of Fit

40- Efficient of Residual Mass

41- Model Efficiency

با فونت (B Mitra - اندازه ۱۰- پر رنگ) و با یک خط فاصله نوشته شود. طول چکیده در مقاله نباید بیشتر از ۲۰۰ کلمه باشد. چکیده باید کامل و فقط در یک پاراگراف آورده شود. از اشاره به مراجع و کلیات تحقیق در چکیده خودداری گردد.

کلید واژه‌ها : تنش رطوبتی، عملکرد، مدل SALTMED، خاک‌اره، خیار گلخانه‌ای.

مقدمه

با توجه به آنکه شرایط محیطی در میزان تولید محصول بسیار موثر بوده و تعیین کننده میزان عملکرد محصول می باشد، لذا مدل‌های زیادی برای پیش‌بینی شرایط رشد محصول با در نظر گرفتن عوامل مختلف موثر بر رشد گیاه ارائه شده است، از جمله این مدل‌ها، مدل‌های یک بعدی(1975) Bresler و(1992) Vogel and Hopmans و همچنین مدل‌های جذب رطوبتی (1992) Cardon and Letey می باشند که هر یک، جنبه‌ای از مسائل آب و خاک را بررسی نموده و مدل می‌نمایند. لذا نیاز مبرمی جهت ایجاد مدلی که هم بتواند انواع گیاهان زراعی را در نظر گرفته و هم جنبه‌های مختلف مدیریتی رادر نظر بگیرد لازم به نظر می‌رسد. مدیریت مناسب و پایدار منابع آب و خاک، بستگی زیادی به توانایی پیش‌بینی اثرات تنش‌ها و شرایط مختلف بر روی گیاهان دارد. تغییرات رطوبت و شوری در عمق ریشه نسبت به زمان همواره وجود دارد و در سراسر ناحیه ریشه نیز به‌صورت غیریکنواخت است. افزایش تنش در یک بخش ریشه با افزایش جذب از قسمت‌های مرطوب‌تر و با شوری کم‌تر جبران می‌گردد. ارزیابی مدل‌های شبیه‌سازی جذب و پیش‌بینی جریان آب به سمت ریشه و پیش‌بینی عملکرد محصولات، توسط این مدل‌ها از آن جهت اهمیت و ضرورت دارد که میزان جذب آب توسط ریشه را در شرایط خشکی برآورد می‌نماید و در نتیجه می‌توان میزان عملکرد محصول را با استفاده از مدل‌های جذب مناسب برای گونه گیاهی و شرایط منطقه پیش‌بینی نمود.استفاده از این مدل‌ها، مستلزم ارزیابی آن‌ها در شرایط واقعی و کالیبره کردن آن‌ها در شرایط مزرعه می‌باشد.کالیبره نبودن روابط موجود در این مدل‌ها با شرایط ایران سبب می‌شود که این مدل‌ها عملکرد محصولات را کم‌تر یا بیش‌تر از از مقدار واقعی برآورد نمایند. لذا می‌بایست هر از این مدل‌ها در مناطق مختلف کشور قبل از آنکه به عنوان ابزار جهت مدیریت و تخصیص آب در هر منطقه قرار گیرد، مورد ارزیابی قرار گیرد. پیش‌بینی دقیق محصول با استفاده از مدل‌های مختلف در شرایط تنش رطوبتی و شرایط بستر متفاوت، می‌تواند سبب بهینه‌سازی استفاده از منابع آبی در کشور شده و کارایی مصرف آب را افزایش دهد. در این طرح تاثیر مخلوط خاک اره و خاک را در خصوصیات خاک مورد مطالعه قرار داده و تاثیر متقابل گیاه را در استفاده از آب قابل دسترس خاک در شرایط تنش و میزان تولید محصول را با استفاده از مدل SALTMED مورد بررسی قرار می‌دهیم. مدل SALTMED نمونه‌ای از مدل‌هایی می باشد که پارامترهای مختلف موثر بر رشد و نمو محصول را در نظر گرفته و تاثیر آن را بر عملکرد محصول مدل می‌نماید. در این صمینه تحقیقاتی صورت گرفته است از جمله حسینی و همکاران(۱۳۸۵) عوامل مختلف از جمله شوری آب و نوع آبیاری را در برداشت محصول با استفاده از این مدل بررسی نمودند، در تحقیق ایشان مدل به خوبی افزایش محصول را در شرایط آبیاری قطره‌ای و همچنین کیفیت مناسب اب آبیاری نشان داد،همچنین نتایج نشان داد انتخاب صحیح نوع آبیاری در

شرایط برابر از نظر مقدار شوری آب آبیاری، عملکردهای متفاوتی را خواهد داشت. ایشان بیان نمودند که با دانستن چگونگی تغییرات شوری خاک در فصل رشد گیاه و دانستن تاثیر شوری خاک و محیط ریشه در عملکرد گیاه می‌توان گیاه مناسب را به طور مناسبی انتخاب نمود. حسینی و همکاران(۱۳۸۹) در بررسی مدل SALTMED جهت استفاده از آب‌های شور در آبیاری قطره‌ای به این نتیجه رسیدند که استفاده از آب شور جهت آبیاری نیاز به انتخاب گیاهان مقاوم به شوری و مدیریت درست آب دارد و همانطور که نتایج برنامه نشان داد انتخاب صحیح نوع گیاه در شرایط برابر از نظر خاک و نوع آبیاری، عملکرد های متفاوتی را در بر داشت.همچنین مدل به خوبی کاهش محصول را با افزایش شوری آب آبیاری مدل نمود. Hirich (2012) با در نظر گرفتن شش رژیم رطوبتی برای ذرت و بررسی عملکرد این محصول و بررسی میزان رطوبت محیط ریشه در دوره رشد محصول مشاهده نمود که مقدار رطوبت مشاهده شده در تمام فصل رشد بیشتر از رطوبت نشان داده شده توسط مدل SALTMED می‌باشد. در ارتباط با استفاده از افزودنی‌هایی مانند خاک‌اره، برای بهبود شرایط خاک نیز تحقیقاتی صورت گرفته است لیکن، استفاده از بقایای باغی در اصلاح خاک در ایران کمتر مورد بررسی و مطالعه قرارگرفته است. De Vries et al., (2019) بیان نمودند که بقایای باغی در خاک می‌تواند باعث ایجاد حالت بافری در خاک شده و تنش‌های دمایی را در گیاه کاهش دهد و باعث افزایش فعالیت‌های بیولوژی و افزایش عملکرد گیاه شود. Osundare et al., (2019) در تحقیق خود تأثیر مقادیر مختلف خاک‌اره را بر میزان عملکرد خیار گلخانه‌ای مورد بررسی قراردادند، نتایج تحقیق ایشان نشان‌داد که پلات‌های حاوی ۵ کیلوگرم خاک‌اره در مساحت ۴ × ۴ (متر مربع) باعث افزایش معنی‌دار عملکرد در واحد سطح می‌گردد. در تحقیقی که توسط Li and Yingzhong(2012) انجام شد، تیمارهای حاوی بقایای باغی باعث افزایش محتوای کربن خاک در طی دو سال گردید و افزایش قابل ملاحظه‌ای را از نظر محتوای کربن خاک نشان داد. در رابطه با تاثیر کم آبیاری بر میزان عملکرد خیار گلخانه‌ای نیز مطالعات چندی صورت گرفته است که اغلب مطالعات صورت گرفته کاهش عملکرد خیار گلخانه‌ای را نسبت به کم‌آبیاری و تنش‌آبی گزارش نموده‌اند.(Alomran et al., (2013 در مطالعه‌ای، تنش رطوبتی را به میزان ۴۰، ۶۰، ۸۰ درصد تبخیر و تعرق مورد نیاز گیاه بر خیار گلخانه‌ای اعمال نمودند. نتایج نشان‌داد که با افزایش تنش رطوبتی، شوری خاک افزایش می‌یابد و بیش‌ترین نسبت تولید به ازای واحد آب مصرفی، در تیمار ۴۰ درصد تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه به‌دست می‌آید. همچنین Amer et al., (2009) نشان دادند که عملکرد خیار گلخانه‌ای با افزایش تنش رطوبتی به صورت خطی کاهش می‌یابد. حسینی و مارالیان (۱۳۹۱) در پژوهشی به ارزیابی مدل SALTMED در برآورد میزان عملکرد محصول گندم در منطقه مغان پرداختند. ایشان عملکرد محصول را در شرایط بهینه با عملکرد پیشبینی شده توسط مدل مقایسه کردند. نتایج نشان داد که در مراحل اولیه رشدگیاه تا مرحله میانی مدل به خوبی دوره رشد گیاه را پیش‌بینی می‌نماید، ولی درمراحل پایانی رشد میزان عملکرد پیشبینی شده در مدل کمتر ازمقدار واقعی برآورد میگردد به طوریکه مدل میزان عملکرد محصول را بیست درصد کمتر ازمقدار واقعی برآورد نمود. خالوندی و همکاران (۱۳۹۵) مدل SALTMED را در شبیه‌سازی عملکرد و توزیع رطوبت تحت کشت ذرت و با آبیاری با آب شور ارزیابی کردند. نتایج نشان داد، در پیشبینی مقدار رطوبت خاک مدل در عمق ۶۰ -۹۰ سانتی‌متری، بیش‌ترین دقت و در عمق ۱۲۰-۹۰ سانتی‌متری خاک، کمترین دقت را داشت. همچنین با افزایش شوری آب آبیاری دقت مدل در شبیه‌سازی

رطوبت خاک افزایش یافت. کمالی و همکاران(۱۴۰۰) مدل SALTMED را در برآورد عملکرد گندم در شرایط تنش شوری و رطوبتی در منطقه بیرجند، مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که مدل قادر است میزان عملکرد را با ضریب تبیین ۰/۹۹ برآورد نماید و علاوه بر آن تغییرات افقی و عمودی رطوبت و شوری خاک را با دقت بالایی مدل‌سازی نماید. Abdelraouf et al., (2020) مدل SALTMED را در شرایط گلخانه و کشت خیار گلخانه‌ای مورد مطالعه قرار دادند، نتایج ایشان نشان داد که این مدل می‌تواند مقدار محصول، جذب نیتروژن، بهره‌وری آب و رطوبت خاک را با ضریب تبیین ۰/۸۸ تا ۰/۹۷ درصد برآورد نماید. با توجه به مطالب بیان شده مشخص است که اکثر مدلسازیها در شرایط تنش های رطوبتی یا شوری انجام شده و تغییرات بستر محصولات کمتر مورد توجه قرار گرفته است، لذا با توجه به اینکه امروزه از مواد افزودنی برای اصلاح خاک ها بیشتر مورد توجه قرار گرفته است، لذا، لزوم بررسی مدل‌های شبیه‌ساز عملکرد محصول در شرایط تغییرات بستر کشت، برای پیش‌بینی و مدیریت بهینه منابع آبی، لازم به نظر می‌رسد. لذا هدف از این تحقیق برآورد و ارزیابی مدل مذکور برای پیش‌بینی میزان محصول خیار گلخانه‌ای در شرایط تنش رطوبتی و ماده افزودنی خاک‌اره می‌باشد.

مواد و روش‌ها

این تحقیق در شهرستان پارس‌آباد استان اردبیل انجام شده است. خاک مورد استفاده برای کشت از زمین زراعی موجود در محوطه دانشکده کشاورزی مغان انتخاب گردید که برخی از مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن در جدول(۱) نشان داده شده است. بافت خاک منطقه جزء خاک‌های ریزبافت طبقه‌بندی می‌گردد. چگالی ظاهری خاک که در حدود ۱/۵۶ (گرم به سانتی‌متر مکعب) تعیین شد که در محدودهٔ متوسط از نظر چگالی ظاهری خاک قرار دارد و در محدوده خاک‌های رسی و لوم سیلتی شخم خورده می‌باشد. از نظر میزان درصد آهک خاک، خاک مورد آزمایش، جزو خاک‌های آهکی طبقه‌بندی نمی‌شود، زیرا درصد آهک آن کم‌تر از ۱۰ (درصد) می‌باشد. از نظر pH ، خاک مورد آزمایش در محدوده قلیایی کم قرار گرفته و از نظر میزان فسفر خاک نیز میزان آن با توجه به مطالعات نوابی و همکاران(۱۳۷۷)، در شرایط متوسط قرار دارد.

جدول۱- خصوصیات فیزیکی و شیمیایی نمونه‌های منطقه مورد استفاده برای آزمایشات

فسفر (ppm)	ماسه (%)	رس (%)	سیلت (%)	چگالی ظاهری (g.cm-3)	هدایت الکتریکی (dS/m)	کربن آلی (%)		درصد آهک TNV%	بافت
۸/۴۳	۷۰	۲۰	۱۰	۱/۵۶	۱/۱	۱/۰۵		۷/۶۴	لوم،رس،شنی

این پژوهش در قالب طرح کاملاً تصادفی با سه تکرار در گلخانه دانشکده کشاورزی مغان انجام گرفت. عامل اصلی شامل تنش‌های رطوبتی در دو سطح ۶۵ و ۴۵ درصد ظرفیت زراعی و تیمار شاهد بدون اعمال تنش بود و فاکتور فرعی شامل

سه سطح خاک اره، در سطوح ۲۰، ۱۰، ۵ درصدحجمی و تیمار شاهد بدون خاک اره بود. برای اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی اشباع تیمارهای مختلف خاک‌اره، برای استفاده در مدل SALTMED از دستگاه اندازه‌گیری هدایت هیدرولیکی بار افتان استفاده شد و برای تعیین منحنی خصوصیات رطوبتی خاک، نمونه‌هایی از خاک مورد نظر انتخاب و با استفاده از دستگاه صفحات فشاری، درصدهای رطوبت وزنی در فشارهای ۰/۳- ، ۵- ،۱۰- و۱۵- (bar) که در برگیرنده نقاط پتاسیلی مهم خاک می‌باشند، تعیین گردید. سپس پارامترهای معادله منحنی مشخصه خاک مطابق مدل Van Genuchten(1987) برای درصدهای مختلف خاک اره تعیین شد(جدول(۲)). این مدل مطابق رابطه زیر می‌باشد.

$$\theta_h = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \times \left[1 + (\alpha h)^n\right]^{-m} \qquad (۱)$$

در این رابطه θ_s و θ_r به ترتیب مقادیر رطوبت اشباع و باقی مانده بر حسب (cm3.cm-3)، h مقدار مکش بر حسب (cm)، α معادل عکس پتانسیل در نقطه ورود هوا بوده و m و n پارامترهای تجربی معادله می‌باشد.

جدول۲- پارامترهای منحنی رطوبتی خاک در درصدهای مختلف خاک اره

تیمار خاک اره	θ_r (cm3.cm-3)	θ_s (cm3.cm-3)	α (cm-1)	n	m	KS (cm.day-1)
صفر درصد خاک اره	۰/۱۸	۰/۵۱	۰/۰۵	۱/۴۸	۰/۳۲	۳۱/۴
پنج درصد خاک اره	۰/۱۹	۰/۷	۰/۰۲۸	۱/۳۵	۰/۲۶	۲۱/۷۸
ده درصد خاک اره	۰/۲	۰/۷۱	۰/۰۲	۱/۳	۰/۲۳	۲۱
بیست درصد خاک اره	۰/۲۳۷	۰/۷۵	۰/۰۲	۱/۳۵	۰/۲۶	۱۹

با استفاده از منحنی رطوبتی خاک، رطوبت معادل دو سطح تنش‌های تخلیه رطوبتی شامل ۶۵ و ۴۵ درصد رطوبت در دسترس تعیین گردید. سپس از دستگاه رطوبت‌سنج TDR-100 جهت تعیین رطوبت روزانه و زمان آبیاری استفاده شد. رطوبت گلدان‌ها به‌صورت روزانه به‌وسیله دستگاه رطوبت‌سنج اندازه‌گیری می‌شد و این اندازه‌گیری‌ها تا زمانی که رطوبت حجمی باقی‌مانده در گلدان‌ها به اعداد مربوط به تنش‌های تخلیه رطوبتی ۴۵ و ۶۵ درصد رطوبت در دسترس برسد، ادامه می‌یافت و زمانی که دستگاه اعداد مربوط به این نقاط می‌رسید، آبیاری انجام می‌گرفت. رطوبت حجمی این نقاط برای تخلیه رطوبتی ۶۵، ۴۵ و تیمار شاهد به‌ترتیب برابر ۱۷، ۲۱ و ۲۸ درصد حجمی بودند. همچنین رطوبت نقطه پژمردگی خاک برای تیمار شاهد، برابر ۱۱ درصد حجمی برآورد گردید. در این آزمایش برای تعیین عملکرد به این‌صورت عمل شد که در طول اعمال دوره آبیاری، میزان محصول هر تیمار توزین شده و ثبت گردیدند.

معیارهای ارزیابی مدل

برای ارزیابی مدل از آماره‌های خطای بیشینه (ME)، ریشه‌ی میانگین مربعات خطا (RMSE)، درصد خطای نسبی (ε)، میانگین خطای مطلق (MAE)، ضریب تبیین (R2)، ضریب باقیمانده جرم (CRM) و کارایی مدل (EF) استفاده می‌گردد. بهترین پیش‌بینی‌ها زمانی رخ می‌دهد که آماره‌های ME، RMSE، CRM، ε و MAE به صفر و EF و R2 به یک میل نمایند. روابط (۲) الی (۷) معادلات آماره‌های مذکور را نشان می‌دهند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left(Q_i - P_i\right)^2} \quad (۲)$$

$$\varepsilon = \frac{100\%}{N}\sum_{i=1}^{N}\left|\frac{Q_i - P_i}{Q_i}\right| \quad (۳)$$

$$MAE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left|Q_i - P_i\right| \quad (۴)$$

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^{N}\left(P_i - \bar{P}\right)\left(Q_i - \bar{Q}\right)\right]^2}{\sum_{i=1}^{N}\left(P_i - \bar{P}\right)^2 \sum_{i=1}^{N}\left(Q_i - \bar{Q}\right)^2} \quad (۵)$$

$$EF = \frac{\sum_{i=1}^{N}\left(Q_i - \bar{Q}\right)^2 - \sum_{i=1}^{N}\left(P_i - Q_i\right)^2}{\sum_{i=1}^{N}\left(Q_i - \bar{Q}\right)^2} \quad (۶)$$

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^{N}Q_i - \sum_{i=1}^{N}P_i}{\sum_{i=1}^{N}Q_i} \quad (۷)$$

در روابط فوق، N: تعداد نمونه، Pi: مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل، Qi: مقادیر واقعی، $\bar{P}$: میانگین مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل، $\bar{Q}$: میانگین مقادیر واقعی می‌باشد.

نتایج وبحث

همانطور که در جدول(۳) مشخص است، کاهش منطقی میزان عملکرد در تیمار شاهد بدون خاک‌اره با کاهش رطوبت در دسترس مشاهده می‌شود؛ به‌طوریکه با کاهش رطوبت در دسترس از صفر درصد ظرفیت زراعی به ۶۵ درصد ظرفیت زراعی در تیمار بدون خاک اره، میزان عملکرد تقریبا ۶۲ درصد کاهش یافت. این درحالیست که در تیمارهای ۱۰ و ۲۰ (درصد) با کاهش رطوبت در دسترس، میزان کاهش عملکرد ۴۲، ۴۲ (درصد) می‌شود. میزان کاهش عملکرد در رژیم تخلیه رطوبتی ۴۵ (درصد) رطوبت در دسترس، برای تیمارهای شاهد، ۱۰، ۲۰ درصد خاک‌اره به‌ترتیب برابر ۳۵، ۳۹، ۳۷ (درصد) به‌دست آمد. همانطور که نتایج نشان می‌دهد با کاهش رطوبت در دسترس از ۴۵ درصد ظرفیت زراعی به ۶۵ درصد، کاهش عملکرد بوجود می‌آید. میزان کاهش عملکرد در رژیم تخلیه رطوبتی ۶۵ درصد رطوبت در دسترس، نسبت به رژیم رطوبتی ۴۵ درصد، به‌ترتیب برای تیمارهای شاهد، ۱۰، ۲۰ (درصد) خاک اره، برابر ۵۰، ۴، ۸ درصد به‌دست آمد. همانطور که نتایج نشان می‌دهد، با افزایش درصد خاک اره، کاهش عملکرد تا حدودی جبران می‌شود.

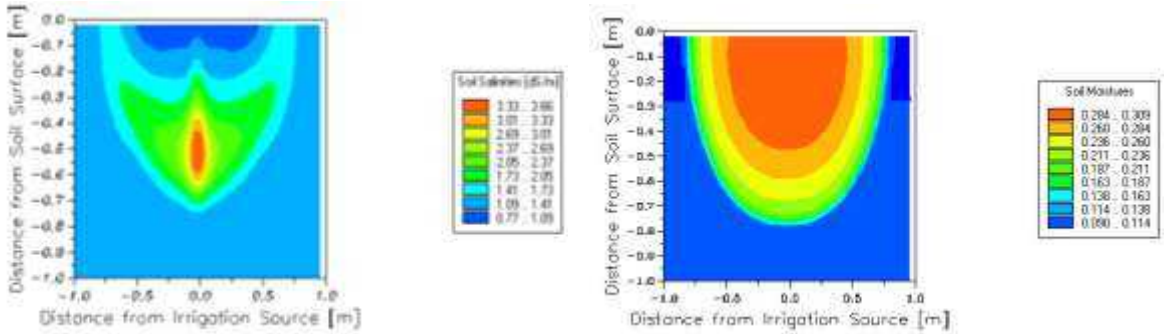
جدول۳- میزان عملکرد واقعی و پرآورد شده توسط مدل در تنش‌های رطوبتی و در صدهای مختلف خاک اره

عملکرد مدل (T.ha-1)	عملکرد گلخانه (T.ha-1)	تنش رطوبتی (٪)	درصد خاک اره (٪)
۷۰	۷۶/۸	۶۵	۲۰
۸۲	۷۳	۶۵	۱۰
۴۱	۳۲	۶۵	۰
۷۶	۸۳/۲	۴۵	۲۰
۶۵	۷۳/۶	۴۵	۱۰
۵۵	۵۷/۶	۴۵	۰
۱۲۰	۱۳۴	۰	۲۰
۱۲۲	۱۲۲	۰	۱۰
۸۳	۸۶	۰	۰

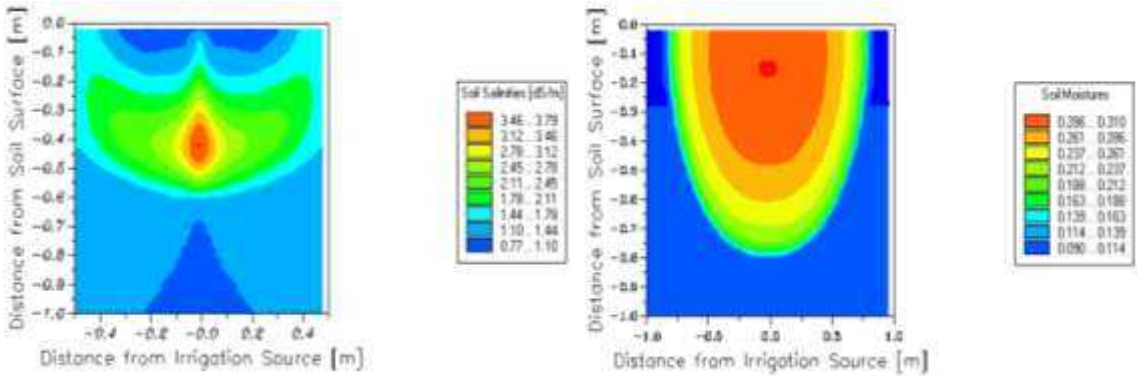
در اشکال (۱) تا (۳) نتایج پیش‌بینی عملکرد خیار گلخانه‌ای با استفاده از مدل SALTMED برای تیمارهای ۰، ۱۰ و ۲۰ درصد خاک اره و تنش ۶۵ (درصد) رطوبتی نشان داده شده است، در شکل (۱) تغییرات رطوبت در عمق خاک، در انتهای دوره کشت نشان داده شده است و همچنین تغییرات شوری در عمق خاک، در انتهای دورهٔ کشت تیمار صفر درصد خاک‌اره نشان داده شده است. بررسی پروفیل تغییرات افقی و عمودی رطوبت در انتهای دوره کشت، نشان می‌دهد که توزیع رطوبت در انتهای دوره رشد خیار گلخانه‌ای، تا عمق ۷۵ (سانتی‌متری) خاک روند کاهشی دارد و رطوبت خاک تا این عمق با توجه به بافت خاک که لوم- رس- شنی می‌باشد، کاهش می‌یابد. اما با درنظر گرفتن ابعاد گلدان‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که بیش‌تر حجم خاک در اواخر دوره کشت در محدوده رطوبتی ظرفیت زاراعی قرار می‌گیرد. همانطور که در شکل (۱) مشخص است، توزیع افقی رطوبت در خاک در این تیمار برای اعماق کم، به صورت یکنواخت انجام شده است. همانطور که در شکل (۲) مشخص است، توزیع املاح در عمق خاک روند یکنواختی نداشته، به طوری که بیشترین شوری بدست آمده برای عمق ۵۰ (سانتی‌متری) خاک می‌باشد که به صورت بیضوی شکل است و یک روند کاهشی از این نقطه در جهت طولی و عرضی پروفیل خاک دیده می‌شود. مقدار حداکثر شوری خاک در این منطقه در محدوده ۳/۳ (دسی‌زیمنس بر متر) قرار می گیرد. که مانند تیمارهای بدون تنش، در محدوده کاهش محصول قرار نمی‌گیرد. با بررسی نسبت تبخیر و تعرق به تبخیر و تعرق پتانسیل در این تیمار در طول فصل رشد، برای تیمار صفر (درصد) خاک اره و تنش رطوبتی ۶۵ درصد ظرفیت زراعی، در کل دوره رشد گیاه، میزان جذب واقعی ریشه بسیار کمتر از میزان حداکثر پتانسیل جذب ریشه می‌باشد و این سبب شده

است که میزان عملکرد این تیمار معادل ۴۱ (تن بر هکتار) به‌دست آید(شکل ۴) که تقریبا نصف حالت بدون تنش این تیمار که ۸۶ (تن بر هکتار) است، البته این برآورد نزدیک به مقادیر بدست آمده از آزمایش انجام شده (۳۲ تن بر هکتار) است. همچنین با بررسی میزان تبخیر تعرق درکل فصل رشد و میزان آبیاری در طول فصل رشد، مشخص می‌شود در این تیمار، میزان تبخیر از سطح خاک (Kcb)، در کل فصل رشد، نسبت بیشتری از تبخیر و تعرق را به خود اختصاص می‌دهد. برای تیمار ده (درصد) خاک اره و تنش ۶۵ (درصد) رطوبتی، همانطور که در شکل(۲) مشخص است، تا عمق ۸۰ (سانتی‌متری) خاک روند کاهشی دیده می‌شود و رطوبت خاک تا این عمق، کاهش می‌یابد. اما با درنظر گرفتن ابعاد گلدان‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که بیشتر حجم خاک در اواخر دوره کشت در محدوده رطوبتی ظرفیت زاراعی قرار دارد. همانطور که در شکل(۲) مشخص است، توزیع افقی رطوبت در خاک در این تیمار برای اعماق مختلف، به صورت غیر یکنواخت انجام شده است و توزیع املاح در عمق خاک روند یکنواختی نداشته است، به طوری که بیشترین شوری بدست آمده در عمق ۴۰ (سانتی‌متری) خاک دیده می‌شود. مقدار حداکثر شوری خاک در این منطقه در محدوده ۳/۵ (دسی زیمنس بر متر) قرار می‌گیرد. که مانند تیمارهای بدون تنش، در محدوده کاهش محصول قرار نمی‌گیرد. چگونگی توزیع شوری در این تیمار، مانند تیمار صفر درصد خاک اره می‌باشد با این تفاوت که بیشترین شوری خاک در عمق بیشتری نسبت به تیمار صفر درصد خاک اره قرار می‌گیرد و این می‌تواند به دلیل شستشوی املاح سطحی خاک و نفوذ آن به عمق خاک باشد. همچنین شیب تغییرات طولی و عرضی املاح در تیمار ۱۰ (درصد) خاک‌اره و ۶۵ (درصد) تنش رطوبتی، نسبت به تیمار بدون خاک اره بیش‌تر است که می‌تواند به دلیل اثر اختلاط خاک‌اره باشد. میزان عملکرد این تیمار معادل ۸۲ (تن بر هکتار) برآورد شده است (شکل ۵) که تقریبا ۶۷ (درصد) حالت بدون تنش این تیمار که ۱۲۲(تن بر هکتار) است، برآورد گردیده است. البته این برآورد نیز نزدیک به مقادیر بدست آمده از آزمایش انجام شده، که ۷۳ (تن بر هکتار) است، برآورد گردیده است. تحقیقات نشان داده است که خیار با داشتن ریشه‌های قوی و عمیق در مواجه با تنش‌رطوبتی، باعث توسعه بیش‌تر ریشه می‌گردند و می‌توانند آب و عناصر معدنی را با کارایی بیش‌تری جذب نمایند. تحقیقات نیز نشان داده است که در اثر تنش آبی، مقدار ریشه در واحد حجم خاک افزایش می‌یابد (آذرمی و همکاران، ۱۳۹۸، Assadian et al., 2020). در شکل (۳) تغییرات رطوبت و شوری در عمق خاک، در انتهای دوره کشت نشان داده شده است و در شکل (۶) نتایج پیش‌بینی عملکرد خیار گلخانه‌ای در طول دوره رشد، برای تیمار ۲۰ (درصد) خاک اره و تنش ۶۵ (درصد) رطوبتی نشان داده شده است، همانطور که مشاهده می‌شود، در رابطه با توزیع رطوبت در انتهای دوره رشد خیار گلخانه‌ای در این تیمار، تا عمق ۸۵ (سانتی‌متری) خاک روند کاهشی دیده می‌شود و رطوبت خاک تا این عمق، کاهش می‌یابد و می‌توان نتیجه گرفت که در این تیمار نیز، بیشتر حجم خاک در اواخر دوره کشت در محدوده رطوبتی ظرفیت زاراعی قرار دارد. همانطور که در شکل (۳) مشخص است، توزیع افقی رطوبت در خاک در این تیمار برای اعماق مختلف، به صورت غیر یکنواخت انجام شده است و نسبت به تیمار ۱۰ (درصد) خاک‌اره، از شیب تغییرات بیشتری برخوردار است. همچنین، توزیع املاح در عمق خاک روند یکنواختی نداشته است، به طوری که بیشترین شوری بدست آمده در عمق ۵۵ (سانتی‌متری) خاک دیده می‌شود. مقدار حداکثر شوری خاک در این منطقه در محدوده ۳ (دسی زیمنس بر متر) قرار می‌گیرد. که مانند سایر

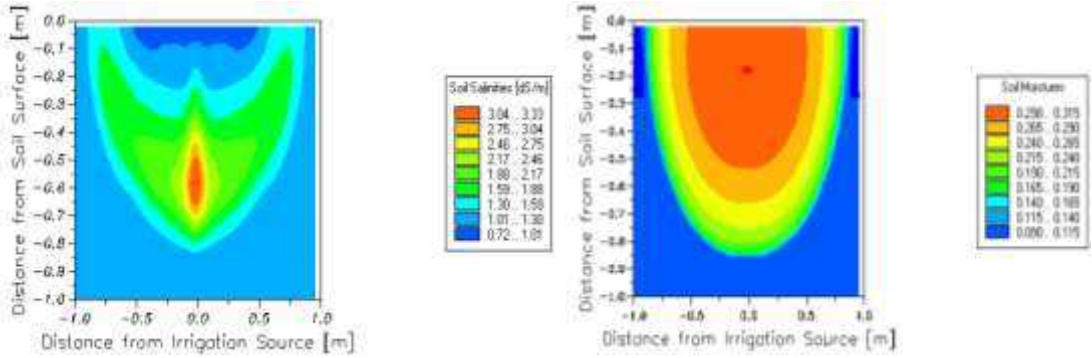
تیمارهای مورد آزمایش در تنش رطوبتی ۶۵ (درصد ظرفیت زراعی)، در محدوده کاهش محصول قرار ندارد. چگونگی توزیع تنش در این تیمار، مانند تیمار ۱۰ درصد خاک‌اره است، با این تفاوت که بیشترین شوری خاک در عمق بیشتری نسبت به تیمار ۱۰ درصد خاک‌اره قرار می‌گیرد. همچنین شیب تغییرات طولی و عرضی املاح در تیمار ۲۰ (درصد) خاک‌اره و ۶۵ (درصد) تنش رطوبتی، نسبت به تیمار ۱۰ (درصد) خاک‌اره بیش‌تر است، که می‌تواند به دلیل اثر اختلاط خاک‌اره باشد. مطابق تحقیقات نوشادی و همکاران(۲۰۲۰)، مدل SALTMED حرکت املاح را به خوبی مدل می نماید، لیکن نسبت به مدل HYDOUS1D در پیشبینی حرکت املاح در پروفیل خاک از دقت کمتری برخوردار است، لیک با توجه به دقت نتایج عملکرد می توان نتیجه گرفت که مدل SALTMED نیز با دقت مناسبی حرکت املاح را مدلسازی نموده است. همچنین کشیدگی عمقی تغییرات شوری در این تیمار نسبت به تیمار ۱۰ (درصد) خاک اره دیده می‌شود.. در این تیمار، در کل دوره رشد گیاه، میزان جذب واقعی ریشه بسیار کمتر از میزان حداکثر پتانسیل جذب ریشه می‌باشد و این اختلاف در مراحل میانی و پایانی دوره رشد محصول بیشتر است. این امر سبب شده است که میزان عملکرد این تیمار معادل ۷۰ (تن بر هکتار) به‌دست آید که تقریبا ۵۳ (درصد) حالت بدون تنش این تیمار که ۱۳۴(تن بر هکتار) است، محاسبه شود. البته این برآورد نیز نزدیک به مقادیر بدست آمده از آزمایش انجام شده، که ۷۶ (تن بر هکتار) است، برآورد شده است که با تحقیقات Kaya et al., (2015) مطابقت دارد در تحقیق ایشان نیز مدل SALTMED میزان عملکرد را با دقت مناسبی برآورد نمود. در تیمارهای شاهد در رژیم رطوبتی ۴۵ درصد، میزان عملکرد نسبت به رژیم رطوبتی ۶۵ (درصد) تفاوت معنی‌داری داشته و کاهش عملکرد در این تیمارها نسبت به تیمارهای ۱۰، ۲۰ (درصد) خاک‌اره بیش‌تر مشهود است. این موضوع نشان می‌دهد که تاثیر مثبت خاک اره در جلوگیری از کاهش عملکرد محصول در تیمارهای با رطوبت در دسترس کمتر، موثرتر است. علاوه بر این تاثیر متفاوت میزان خاک‌اره در سطوح رطوبتی، نشان‌گر آنست که تعیین درصد بهینه خاک‌اره برای اختلاط با خاک بسیار مهم می‌باشد(آلدبی و همکاران،۲۰۱۲). در تحقیقی که توسط Raphael et al., (2010) انجام شد، افزایش مقاومت نسبت به تنش رطوبتی در رابطه با تولید محصول، به افزایش پارامترهای جذب ریشه در جذب رطوبت ارتباط داده شده است. نتایج شبیه‌سازی عملکرد مدل و نتایج آزمایشی در شکل(۷) نشان داده شده است. همچنین آماره های ارزیابی مدل در جدول (۴) بیان شده است. همانطور که نتایج نشان می‌دهد، ارزیابی مدل با استفاده از آماره‌های ریشه‌ی میانگین مربعات خطا (RMSE)، درصد خطای نسبی (ε)، میانگین خطای مطلق (MAE)، ضریب تبیین(R2)، ضریب باقیمانده جرم (CRM) و کارایی مدل (EF) که مقادیر آن‌ها به ترتیب برابر ۷/۷۸، ۹/۷، ۶/۶۸، ۰/۹۴، ۰/۰۳۴، ۰/۲۲ محاسبه گردید، که نشان‌دهنده کارایی بالای مدل در برآورد مقدار عملکرد خیارگلخانه ای را درشرایط تنش رطوبتی و اختلاط خاک‌اره است، دقت نتایج این تحقیق در مقایسه با تحقیق کمالی و همکاران(۱۴۰۰) که رطوبت و شوری را با استفاده از مدل SALTMED بررسی نموده بودند کمی کمتر است که می‌تواند به دلیل تغییرات بستر کشت باشد. لیکن دقت نتایج حاصل از نتایج Abdelraouf et al., (2021) که عملکرد خیارگلخانه ای را در گلخانه مدل‌سازی نمودند، بیش‌تر می‌باشد.



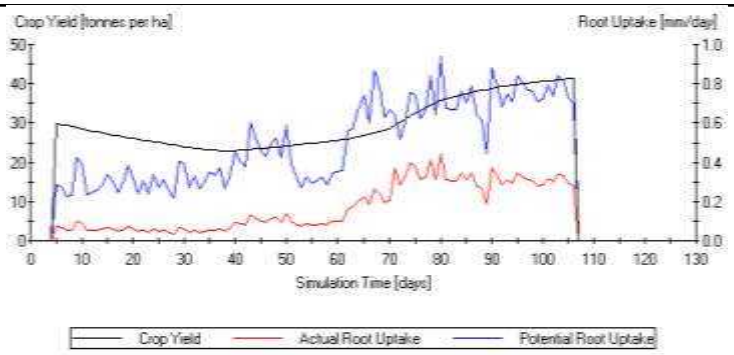
شکل۱- تغییرات پروفیل رطوبتی خاک در تیمار صفردرصد خاک اره و ۶۵ درصد تنش رطوبتی در انتهای دوره کشت



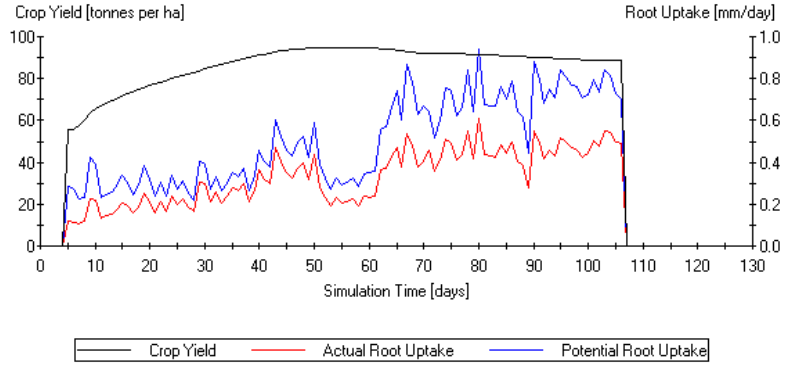
شکل۲- تغییرات پروفیل رطوبتی خاک در تیمار ۱۰ درصد خاک اره و ۶۵ درصد تنش رطوبتی در انتهای دوره کشت



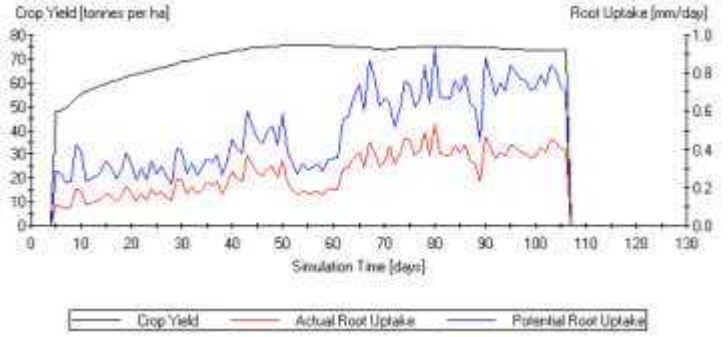
شکل۳-تغییرات پروفیل رطوبتی خاک در تیمار ۲۰ درصد خاک اره و ۶۵ درصد تنش رطوبتی در انتهای دوره کشت



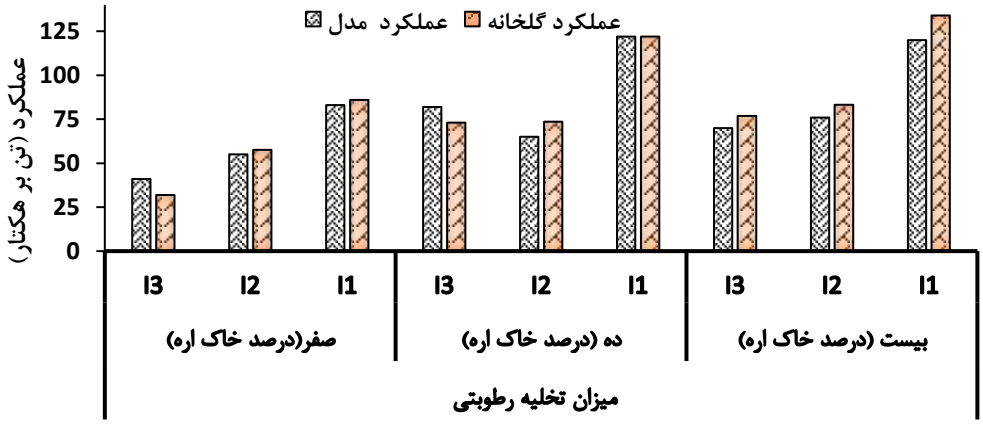
شکل۴- عملکرد محصول در دوره کشت در تیمار صفر درصد خاک اره و ۶۵ درصد تنش رطوبتی



شکل۵- عملکرد محصول در دوره کشت در تیمار ۱۰ درصد خاک اره و ۶۵ درصد تنش رطوبتی



شکل۶- عملکرد محصول در دوره کشت در تیمار ۲۰ درصد خاک اره و ۶۵ درصد تنش رطوبتی



شکل۷- مقایسه نتایج پیشبینی شده توسط مدل و مقادیر اندازه‌گیری شده در گلخانه

جدول ۴- شاخص‌های عملکردی مدل

R2	ε	MAE(/.)	RMSE(/.)	CRM	EF
۰/۹۴	۹/۷	۶/۶۸	۷/۷۸	۰/۰۳۴	۰/۲۲

نتیجه‌گیری

از آنجائیکه خشکی یکی از مهم‌ترین عوامل محدود کننده رشد و تولید گیاهان می‌باشد و اختلاط مناسب افزودنی هایی مانند خاک‌اره، می‌تواند از اثرات منفی تنش آبی بر روی گیاه بکاهد. بدین منظور برای بررسی دقت مدل‌سازی نرم افزار SALTMED در پیش‌بینی عملکرد خیار گلخانه‌ای در شرایط اختلاط خاک‌اره و تنش رطوبتی، آزمایشی در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار انجام گرفت. نتایج نشان داد که مدل، در کلیه تیمارهای تنش رطوبتی و درصد خاک اره، به خوبی مقدار عملکرد را نزدیک به مقادیر حاصل از گلخانه نشان می‌دهد. همچنین با بررسی روند تغییرات عملکرد در طول دوره رشد گیاه که توسط مدل ارائه می‌شود، مشخص گردید که تیمارهای خاک‌اره در مراحل رشد میانی و نهایی تا حدودی می‌تواند تنش رطوبتی را جبران نموده و مقدار کاهش عملکرد را تاحدی جبران نماید. همچنین نتایج نشان داد، تغییرات شوری خاک در پروفیل خاک در جهات طولی و عرضی یکسان نبوده و بیشترین شوری خاک در اعماق ۴۰ تا ۶۰ (سانتی‌متری) خاک تشکیل می‌گردد، لیکن با توجه به آنکه خاک مورد آزمایش از شوری کمی(۱/۱ دسی زیمنس بر متر) برخوردار بود، در طول دوره رشد، گیاه، در معرض تنش شوری کمتر از ۱۰ (درصد) کاهش محصول قرار داشت. نتایج نشان داد با کاهش رطوبت در دسترس، کلیه تیمارها با روند خطی کاهش عملکرد همراه شدند، لیکن با افزایش میزان درصد خاک اره تاثیر مثبتی بر عملکرد محصول در سطوح مختلف رطوبتی مشاهده گردید و در حالت کلی کاهش عملکرد در کلیه تیمارهای خاک اره در شرایط رژیم رطوبتی مختلف مشاهده شد، لیکن در کلیه سطوح رطوبتی اعمالی، بالا بودن

عملکرد تیمارهای خاک‌اره نسبت به تیمار شاهد مشاهده گردید و در کلیه تیمارهای تنش رطوبتی و اختلاط خاک اره، مدل SALTMED به خوبی مقدار عملکرد محصول را برآورد نمود.

سپاسگزاری

این مقاله با حمایت معاونت محترم پژوهشی دانشگاه محقق اردبیلی، تهیه شده است و از ایشان تشکر و قدردانی می‌گردد.

منابع

آذرمی، ر.، ترابی گیگلو، م و حسینی، ی. (۱۳۹۸). تأثیر پایه های کدو و تنش آبی بر خصوصیات رشد و عملکرد خیار گلخانه ای. علوم و فنون کشت های گلخانه ای, ۱۰(۱)، ۴۷-۵۸.

حسن لی، م.، افراسیاب، پ. و ابراهیمیان، ح. (۱۳۹۴). ارزیابی مدل‌های Aqua Crop و SALTMED در تخمین عملکرد محصول ذرت و شوری خاک. تحقیقات آب و خاک ایران. ۴۶(۳)، ۴۷۸-۴۹۸.

حسینی ,ی. (۱۳۸۵). تاثیر همزمان نوع خاک وروش آبیاری و شوری آب در میزان برداشت محصول با استفاده از مدل SALTMED - دومین همایش ملی مدیریت شبکه های آبیاری و زهکشی- دانشگاه شهید چمران اهواز.

حسینی، ی. (۱۳۸۹). بررسی تاثیر شوری آب در میزان برداشت محصول در آبیاری قطره ای با استفاده از مدل SALTMED سومین همایش مدیریت شبکه های آبیاری و زهکشی - دانشگاه شهید چمران- اهواز.

حسینی،ی.، و مارالیان، ح. (۱۳۹۱). ارزیابی مدل SALTMED در برآورد میزان عملکرد محصول گندم درمنطقه مغان. اولین کنگره ملی کشاورزی ارگانیک. ص ۲۴۹-۲۴۰.

خالوندی، ن.، سلطانی محمدی، ا. و برومند نسب، س. (۱۳۹۵). شبیه‌سازی رطوبت خاک و عملکرد ذرت در شرایط آبیاری با آب‌شور با مدل SALTMED. علوم و مهندسی آبیاری. ۴۰ (۱)، ۲۳۱-۲۴۶.

کمالی, ح. ر.، عبداللهی پور، م. و نحوی نیا، م. ج. (۱۴۰۰). ارزیابی مدل SALTMED در تخمین محصول گندم در شرایط کم آبیاری و شوری در مناطق خشک (مطالعه موردی: بیرجند). مدیریت آب و آبیاری.۱۱(۴)، ۸۱۵-۸۲۷..

نوابی، ف. (۱۳۷۷). تعیین نقطه بحرانی فسفر و پتاسیم برای محصول پنبه. وزارت جهاد کشاورزی، موسسه تحقیقات خاک و آب.

Abdelraouf, R. E., Ghanem, H. G., Bukhari, N.A., & El-Zaidy. M. (2020). Field and modeling study on manual and automatic irrigation scheduling under deficit irrigation of greenhouse cucumber. Sustainability, 12(23), 98-109.

Abdelraouf, R. E., El-Shawadfy, M. A., Dewedar, O. M., & Hozayn. M. (2021). Field and modelling study for deficit irrigation strategy on roots volume and water productivity of wheat. Journal of Water and Land Development, 49(4-6), 129-138.

Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M. (1998). FAO Irrigation and Drainage Paper 56,.

Al-Debei, H.S., Makhadmeh, I., Abu-Al Ruz, I., Al-Abdallat, A.M., Ayad, J.Y. & Al Amin. N. (2012). Influence of different rootstocks on growth and yield of cucumber (Cucumis sativus L.) under the impact of soil-borne pathogens in Jordan. J. Food, Agric. Environ. 10 (2), 343-349.

Alomran, A.M., Louki, I.I., Aly, A.A. & Nadeem. M.E. (2013). Impact of deficit irrigation on soil salinity and cucumber yield under greenhouse condition in an arid environment. Journal of Agricultural Science and Technology, 15, 1247-1259.

Amer, K.H., Sally, A. & Jerry, L.H. (2009). Effect of deficit irrigation and fertilization on cucumber, Journal of Agrobiology, 101, 1556–1564.

Assadian, F., Niazi, A. & Ramayana, M. (2020). Response Surface Modeling and Optimization of Effective Parameters for Zn(II) Removal from Aqueous Solution Using Gracilaria Corticata. Journal of Chemical Health Risks.10(31), 213-224.

Bresler, E. (1975). Two-dimensional transport of solute during nonsteady infiltration for a trickle source. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 39, 604–613.

Cardon, E.G. & Letey, J. (1992). Plant water uptake terms evaluated for soil water and solute movement models. Soil Sci. Soc. Am. J. 5, 1876–1880.

De Vries, F.T., Liiri, M.E., Bjørnlund, L., Bowker, M.A., Christensen, S., Setala, H.M. & Bardgett, R.D. (2012). Land use alters the resistance and resilience of soil food webs to drought. Nature Climate Change, 2, 276–280.

Hirich. A. (2012). The SALTMED model calibration and validation using field data from Morocco. J. Mater. Environ. Sci. 3 (2), 342-359.

Kaya, C.I., Yazar, A., & Metin Sezen, S. (2015). SALTMED model performance on simulation of soil moisture and crop yield for Quinoa irrigated using different irrigation systems, irrigation strategies and water qualities in Turkey. Agriculture and Agricultural Science Journal, 4, 108-118.

Li, Zh & Yingzhong, Xi .(2015). Improving desertified soil properties by incorporating and mulching tree branch in Ningxia province- Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 31(10), 174-181.

Noshadi, M., Fahandej-Saadi, S. & Sepaskhah, A.R. (2020). Application of SALTMED and HYDRUS-1D models for simulations of soil water content and soil salinity in controlled groundwater depth. Journal of Arid Land, 12, 447-461.

Osundare, O.T., Badmus, A.A. & Olatubosun, O.A. (2019). Effects of organic weed control methods on weed density, phenotypic traits and yield attribute of cucumber (Cucumis Sativus). Journal of Biology, Agriculture and Healthcare, 9(10), 105-110.

Raphael, Y., Schwarz, D., Krumbein, A. & Colla, G. (2010). Impact of grafting on product quality of fruit vegetables. Scientia Horticulture, 127, 172–179.

Simbnek, J., Suarez, D. L. & Sejna, M. (1996). The UiXSATCHEA4 software package for aimulating the one-dimensional variably saturated water flow, heat transport, carbon dioxide production and transport and multicomponent solute transport with Major Ion Equilibrium and Kinetic Chemistry. Research Report. 141. U. S. Salinity Laboratory.

Van Genuchten, M.Th. (1987). A numerical model for water and solute movement in and below the root zone. Research Report, U. S. Salinity Lab. Riverside CA.

Van Genuchten, M.Th. (1980). A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. Soil society of America journal.44(5) , 892-898.

Vogel, T. & Hopmans, J.W. (1992). Two –Dimensional analysis of furrow infiltration. J. Irrigation Drainage Eng.118, 791-806.

Yilmaz, I. & Kaynar, O. (2011). Multiple regressions, ANN (RBF, MLP) and ANFIS models for prediction of swell potential of clayey soils. Expert Systems with Applications. 38(5), 5958–5966.

Study of the SALTMED model in estimating greenhouse cucumber yield under moisture stress conditions in sawdust mixture treatments

Yaser Hoseini *[1], Javad Ramazani Moghadam [2]

Professor, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili

Associate Professor, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili

* Corresponding author: y_hoseini@uma.ac.ir

Abstract

In order to model the effect of mixing soil with sawdust on the yield of greenhouse cucumber under moisture stress conditions, an experiment was conducted in the form of a completely randomized block design with three replications. The treatments included no sawdust (S0) and a combination of 10 (S1), 20 (S2) percent of sawdust, and the moisture stresses were considered at the level of no stress (I1), 45 (I2) and 65 (I3) percent of field capacity depletion. Using the saltmed model, the results showed that the yield results for the treatment I1S1, I1S2, I1S3 were estimated as 83, 119 and 120 (T. ha-1), respectively, and the greenhouse results of these treatments were estimated as 86, 122 and 134 (T. ha-1). In the treatments exposed to water stress and in the I2S1, I2S2, and I2S3 treatments, the yield calculated by the model was estimated as 55, 65 and 76 (T. ha-1), respectively, and the greenhouse results of these treatments were equal to 57, 73 and 83(T. ha-1), In treatments I3S1, I3S2, I3S3, the crop yields were calculated by the model were equel to 41, 82, and 70 (T. ha-1), respectively, and the greenhouse results of these treatments were 32, 72, and 77 (T. ha-1), respectively. Evaluation of the model using root mean square error (RMSE), relative error percentage (ε), mean absolute error (MAE), Goodness of Fit (R2), Efficient of Residual Mass (CRM) and Model Efficiency (EF) were calculated as 7.78, 9.7, 6.68, 0.94, 0.034, and 0.22, respectively.

Keywords: Yield, SALTMED model, Sawdust, Greenhouse cucumber.

بررسی کارایی مدل‌های تجربی در برآورد تبخیر تعرق مرجع ماهانه در اقلیم سرد و خشک (مطالعه موردی: ایستگاه سینوپتیک بافت)

هانیه میرکمالی پور[۱]، سودابه گلستانی کرمانی*[۲]، بهرام بختیاری[۳]

۱- دانشجوی مقطع کارشناسی ارشد، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان ،کرمان، ایران.

*۲- نویسنده مسئول و عضو هیات علمی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.

۳- عضو هیات علمی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.

Corresponding Author Email: s.golestani@uk.ac.ir

چکیده

مدیریت صحیح منابع آب به برآورد مناسب تبخیر تعرق به عنوان یکی از اجزای اصلی چرخه هیدرولوژی بستگی دارد. هر چند روش‌هایی مانند پنمن- مانتیث- فائو در اکثر مناطق به عنوان روش استاندارد مورد استفاده قرار می‌گیرند، اما استفاده از روش‌های ساده‌تر که نیاز به داده‌های هواشناسی کمتری داشته باشند و از پیچیدگی کمتر برخوردار باشند، در فرایند برنامه‌ریزی و مدل‌سازی اولویت دارد. در پژوهش حاضر با استفاده از اطلاعات هواشناسی روزانه ایستگاه سینوپتیک بافت در استان کرمان، به بررسی دقت ده مدل تجربی شامل ۳ مدل مبتنی بر تابش، ۳ مدل مبتنی بر انتقال جرم، ۲ مدل ترکیبی و ۲ مدل مبتنی بر دما جهت تخمین تبخیر تعرق ماهانه در بازه زمانی (۲۰۲۱-۱۹۹۱) پرداخته شد. کارایی مدل‌ها با استفاده از شاخص‌های آماری R2 ، RMSE ، NSE و MAE محاسبه شد و جهت رتبه‌بندی مدل‌ها از روش تصمیم‌گیری چند معیاره TOPSIS استفاده شد. نتایج بدست آمده نشان داد که مدل‌های Abtew ، Rohwer ، Valiantzas 5 و Romanenko 1 با بیشترین امتیاز، مناسب‌ترین مدل‌ها از هر گروه مورد بررسی هستند و در مجموع دقت بالاتر مدل‌های مبتنی بر تابش و ترکیبی در مقایسه با سایر مدل‌ها تایید شد.

کلید واژه‌ها : اقلیم سرد و خشک، بافت، تبخیر و تعرق ماهانه، روش تصمیم گیری چند معیاره.

مقدمه

کاهش بارندگی و افزایش تبخیر، میزان خشکی در کشور را افزایش داده و کمبود منابع آب را به مهم‌ترین چالش بخش‌های مختلف به ویژه بخش کشاورزی تبدیل کرده است (عزیزی زهان، ۱۳۹۵). از این رو، مدیریت بهینه منابع آب که لازمه آن تعیین دقیق مولفه‌های بیلان آب در هر منطقه می‌باشد، تنها راهکار مقابله با این شرایط است (حیدری مطلق و همکاران، ۱۴۰۰). تبخیر تعرق که شامل تبخیر از سطح آب یا خاک مرطوب همراه با تعرق از سطح پوشش گیاهی است، از تاثیرگزارترین اجزای بیلان آبی در هر منطقه است. دربخش کشاورزی نیز تعیین نیاز آبی گیاهان وابسته به تخمین دقیق تبخیر تعرق از سطح پوشش گیاهی است که می‌تواند منجر به بهبود مصرف و کاهش هدر رفت آب در این بخش شود (Wen et al., 2015). تبخیر تعرق از سطح پوشش گیاهی به عوامل مختلفی مانند شرایط اقلیمی و نوع گیاه وابسته است و اولین قدم در برآورد آن، تخمین تبخیر تعرق مرجع (ETo) است که معرف شرایط اقلیمی منطقه می‌باشد. طبق تعریف، تبخیر تعرق گیاه مرجع عبارت است از میزان آبی که یک مزرعه پوشیده از گیاه مرجع (چمن یا یونجه) در یک دوره زمانی مشخص بدون مواجه با تنش رطوبتی و یا آفت و بیماری و در شرایط شاداب و سرسبز بودن گیاهان، مصرف می‌کند(Allen et al., 1998).

به طور کلی، روش‌هایی که برای تعیین تبخیرتعرق مرجع به کار می‌روند، به دو گروه روش‌های مستقیم و غیرمستقیم تقسیم می‌شود . در روش مستقیم میزان تبخیرتعرق بر اساس بیلان رطوبتی خاک و آب مصرفی گیاه در هر محل به صورت مستقیم اندازه‌گیری می‌شود. از جمله این روش‌ها می‌توان به لایسیمتر اشاره کرد که امکان اجرای آن به دلیل هزینه بالا و زمان بر بودن در همه شرایط برقرار نیست. در روش غیر مستقیم، تبخیرتعرق مرجع به کمک معادلات تجربی و تئوری محاسبه می‌شود. روش‌های تئوری مانند روش توازن انرژی معمولاً به چندین پارامترمحیطی وابسته‌اند که همه داده‌های مورد نیاز این معادلات اغلب در دسترس نیست. لذا در صورت کمبود داده و عدم نصب تجهیزات کافی برای اندازه‌گیری متغیرهای هواشناسی در ایستگاه‌ها، می‌توان از معادلات تجربی و نیمه تجربی استفاده کرد که می‌توانند تخمین مناسبی از تبخیرتعرق داشته باشند. بنابراین برای برخی شرایط، معادلات ساده تجربی مناسب‌تر از معادلات تئوری پیچیده هستند.

در حالت کلی مدل‌های تجربی را می‌توان در ۴ گروه دماپایه (دمایی) ، مبتنی بر تابش (تابشی)، مبتنی بر انتقال جرم و روش‌های ترکیبی طبقه‌بندی نمود. روش‌های دماپایه فقط به اندازه‌گیری دمای هوا نیاز دارند و این در حالی است که مدل‌های مبتنی بر تابش در کنار دمای هوا به متغیر تابش خورشیدی نیز جهت تخمین تبخیر و تعرق مرجع نیازمندند. روش‌های انتقال جرم نیز به کمک سرعت باد و فشار بخار هوا به تخمین ETO می‌پردازند و در نهایت روش‌های ترکیبی، ترکیبی از پارامترهای یادشده در ۳ گروه مدل‌های اخیر را جهت تخمین ETO به کار می‌برند (Djaman et al., 2015).

این مدل‌ها در عین سادگی استفاده دارای دو مشکل هستند. اول اینکه عمومیت ندارند و لازم است برای هر منطقه خاص واسنجی و صحت سنجی شوند. دوم اینکه برخی از این مدل‌ها نیز مانند روابط تئوری به اطلاعات زیادی نیاز دارند که ممکن است در همه جا موجود نباشد. برای واسنجی و معرفی مدل مناسب در هر منطقه، معمولاً از اطلاعات لایسیمتر و یا مدل Penman-Monteith- Fao 56 (PMF) به عنوان مدل مرجع استفاده می‌شود (Liu et al., 2017). ارزیابی دقت مدل‌ها در شرایط اقلیمی مختلف و معرفی مدل برتر همواره مورد توجه محققان قرار داشته است. از جمله (قمر نیا و همکاران، ۱۳۹۱) در تحقیقات خود نشان دادند که رابطه پنمن اصلاح شده، دقت مناسبی در تخمین تبخیر تعرق مرجع در اقلیم نیمه خشک دارد. (بابامیری و دین پژوه، ۱۳۹۳) روش Hargreaves و Linacre را به عنوان روش‌های مناسب جهت تخمین تبخیر تعرق مرجع در حوضه آبریز دریاچه ارومیه معرفی کردند.

(کهخا مقدم، ۱۳۹۷) نیز در تحقیقات خود دقت مدل‌های Snyder، Hargreaves، Turk و Dalton را در مقایسه با نتایج حاصل از مدل PMF تایید کردند.

(بهمن آبادی و کاویانی، ۱۳۹۹) نیز در تحقیقات خود نشان دادند که در اقلیم خشک و نیمه خشک مدل Hargreaves-Samaniو در اقلیم معتدل و مرطوب مدل Albrecht بهترین برآورد از تبخیر تعرق مرجع را در مقایسه با داده‌های حاصل از لایسیمتر دارد.

(شیری و کاظمی، ۱۴۰۱) به ارزیابی و مقایسه دقت مدل‌های Hargreaves-Samani، Makkink، Dalton، Priestley-taylor، Turc با نتایج مدل Penman-Monteith در منطقه‌ای با اقلیم خشک پرداختند. نتایج نشان داد که مدل Hargreaves-Samani عملکرد مطلوبی در برآورد تبخیرتعرق مرجع داشته است.

(Djaman et al., 2016) به بررسی دقت ۱۶ روش محاسبه تبخیر تعرق در دره رودخانه سنگال پرداختند و در نهایت روش‌های Valiantzas، Trabert، Romanenko، Schendel و Mahringer را به عنوان روش‌های برتر معرفی کردند.

(Rodrigues and Braga, 2021) به بررسی و ارزیابی دقت ۹ مدل مبتنی بر دما با نتایج مدل Penman-Monteith-FAO در ۱۴ مکان توزیع شده در یک منطقه با اقلیم گرم تابستانی مدیترانه‌ای در جنوب پرتغال پرداختند. نتایج نشان داد که مدل Hargreaves–Samani کالیبره شده عملکرد مطلوبی در برآورد تبخیرتعرق مرجع داشت.

(Abeysiriwardana et al., 2022) به ارزیابی و مقایسه دقت ۳ مدل مختلف تبخیرتعرق با نتایج مدل Penman-Monteith-FAO در سریلانکا پرداختند و نتایج بدست امده نشان داد که مدل Shuttleworth–Wallace عملکرد مطلوبی در برآورد تبخیرتعرق مرجع داشت.

(Wu et al., 2024) به ارزیابی دقت ۹ مدل تبخیرتعرق با مدل Penman-Monteith-FAO در چین پرداختند. نتایج نشان داد که مدل Dalton برای برآورد تبخیر تعرق در مقیاس روزانه تا هفتگی و مدل‌های ترکیبی و مدل مبتنی بر تشعشع خورشیدی برای برآورد تبخیر تعرق در مقیاس ماهانه کارایی بهتری دارند.

در مجموع نتایج حاصل از مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که مدل‌های تجربی نتایج متفاوتی را در شرایط مختلف ارائه می‌کنند و عدم قطعیت در انتخاب یک مدل مناسب که جایگزین روابط مرجع مانند PMF باشد، یک خلا تحقیقاتی را ایجاد کرده است. با توجه به اهمیت تخمین دقیق تبخیر تعرق در مدیریت منابع آب و در دسترس نبودن همه اطلاعات مربوط به متغیرهای هواشناسی و یا داده‌های لایسیمتری دربسیاری از مناطق و اقلیم‌های ایران، ارزیابی دقت معادلات ارائه شده بر اساس منطقه و اقلیم، می‌تواند اثر مطلوبی بر مصرف و مدیریت بهینه آب در بخش‌هایی مانند کشاورزی داشته باشد. لذا در پژوهش حاضر به ارزیابی دقت برخی از مدل‌های تجربی تخمین تبخیر تعرق مرجع ماهانه در مقایسه با مدل PMF و معرفی مناسب‌ترین مدل در اقلیم سرد و خشک شهرستان بافت در استان کرمان پرداخته شده است.

مواد و روش ها

الف) معرفی محدوده مطالعاتی

پژوهش حاضر به منظور مقایسه دقت ده مدل تجربی تخمین تبخیر تعرق مرجع در ایستگاه سینوپتیک بافت با ارتفاع بیشتر از ۲۰۰۰ متر از سطح دریا و با اقلیم سرد و خشک انجام شده است که برخی از مشخصات جغرافیایی و اقلیمی آن در جدول (۱) ارائه شده است. برای دریافت داده‌های مورد نیاز این پژوهش از اطلاعات موجود در سازمان هواشناسی کشور استفاده شد و داده‌های روزانه دمای میانگین (Tmean)، دمای کمینه (Tmin)، دمای بیشینه (Tmax)، سرعت باد (U)، ساعات آفتابی (n)، رطوبت نسبی میانگین (RHmean)، رطوبت نسبی کمینه (RHmin) و رطوبت نسبی بیشینه (RHmax) در بازه زمانی (۲۰۲۱-۱۹۹۱) گردآوری شد.

جدول۱- مشخصات جغرافیایی و اقلیمی ایستگاه مورد مطالعه

نام ایستگاه	ارتفاع از سطح دریا (m)	طول جغرافیایی (درجه)	عرض جغرافیایی(درجه)	اقلیم (بر اساس روش دومارتن گسترش یافته)
بافت	۲۲۸۰	۵۶/۵۸	۲۹/۳۳	خشک، سرد

ب)معرفی مدل‌های مورد استفاده

در پژوهش حاضر برای محاسبه تبخیر تعرق مرجع، از مدل توصیه شده Penman-Monteith-FAO به عنوان مدل استاندارد استفاده شد (رابطه ۱)

$$ET_o = \frac{0.408\,\Delta\,(Rn-G)+\gamma\frac{900}{T+273}u2\,(e_s-e_a)}{\Delta+\gamma(1+0.34\,u2)} \quad (۱)$$

در رابطه مذکور ETo تبخیر تعرق مرجع (mm day-1)، Rn تابش خالص ورودی به سطح گیاه (MJ m-2 day-1)، G شار گرمای خاک (MJ m-2 day-1)، Tmean میانگین روزانه دمای هوا (ºC)، u2 میانگین روزانه سرعت باد در ارتفاع دو متری (m s-1)، ea فشار بخار اشباع (KPa)، ea فشار بخار واقعی (KPa)، (es – ea)کمبود فشار بخار اشباع (KPa)، Δ شیب منحنی فشار بخار اشباع (KPa ºC-1) می‌باشد. همچنین دقت ده مدل تجربی تخمین تبخیر تعرق مرجع نیز مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت که روابط آن در جداول (۲و۳) ارائه شده است و با استفاده از روابط مذکور، تبخیر تعرق روزانه و سپس ماهانه محاسبه شد و دقت نتایج بدست آمده مورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۲- روابط دمایی و تابشی مورد استفاده برای تخمین تبخیر تعرق مرجع

گروه معادله	نام معادله	معادله	منبع
دمایی	Romanenko 1	$ET_O = 0.00006 \times (T_{mean} + 25)^2 \times (100 - RH)$	Romanenko (1961)
دمایی	Romanenko 2	$ET_O = 4.5 \times (1 + T/25)^2 \times (1 - e_a / e_s)$	Romanenko (1961)
تابشی	Abtew	$ET_O = \frac{1}{56} \times \frac{T_{\max} \times R_s}{\lambda}$	Abtew (1996)
تابشی	Jensen-Haise	$ET_O = (0.025T + 0.08)\frac{R_s}{\lambda}$	Jensen and Haise (1963)
تابشی	Tabari 2	$ET_O = -0.478 + 0.156R_s - 0.0112T_{mean} + 0.0733T_{\min}$	Tabari et al. (2011)

جدول ۳-روابط انتقال جرم و ترکیبی مورد استفاده برای تخمین تبخیر تعرق مرجع

گروه معادله	نام معادله	معادله	منبع
انتقال جرم	WMO	$ET_O = (0.1298 + 0.0934U_2)(e_a - e_s)$	WMO (1966)
انتقال جرم	Dalton	$ET_O = (0.3648 + 0.07223u_2) \times (e_a - e_s)$	Dalton (1802)
انتقال جرم	Rohwer	$ET_O = 0.44 \times (1 + 0.27u_2)(e_s - e_a)$	Rohwer (1931)
ترکیبی	Valiantzas 2	$ET_O = 0.0393R_s(T_{mean} + 9.5)^{0.5} - 0.19R_s^{0.6}\varphi^{0.15} + 0.078(T_{mean} + 20)(1 - \frac{RH}{100})$	Valiantzas (2013)

ترکیبی	Valiantzas 5	$ET_O = 0.051(1-\alpha)R_s(T_{mean}+9.5)^{0.5} - 0.188(T_{mean}+13)(R_s/R_a-0.194)(1-0.00015(T_{mean}+45)^2(\frac{RH}{100})^{0.5} -0.016R_s u^{0.7} + 0.0585(T_{mean}+17) u^{0.75}(((1+0.00043(T_{\max}-T_{\min})^2)^2)-RH/100)/(1+0.00043(T_{\max}-T_{\min})^2+0.0001z$	Valiantzas (2013)

ETo تبخیر تعرق مرجع (mm day-1)، Rn تابش خالص ورودی به سطح گیاه (MJ m-2 day-1)، Ra تشعشع خالص رسیده به سطح (MJ m-2 day-1)، RS تشعشع رسیده به سطح زمین (MJ m-2 day-1)، RH رطوبت نسبی (٪)، λ گرمای نهان تبخیر (MJ Kg-1 2.45)، G شار گرمای خاک (MJ m-2 day-1)، Tmean، Tmax و Tmin به ترتیب دمای میانگین، بیشینه و کمینه دمای هوا (ºC)، u2 میانگین روزانه سرعت باد در ارتفاع دو متری (m s-1)، ea فشار بخار اشباع (KPa)، ea فشار بخار واقعی (KPa)، es – ea کمبود فشار بخار اشباع (KPa)، Δ شیب منحنی فشار بخار اشباع (KPa ºC-1)

ج) معرفی شاخص های آماری جهت ارزیابی دقت مدل‌ها

به منظور ارزیابی دقت مدل‌ها، از شاخص‌های آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE) ، ضریب تبیین (R2) و ضریب کارایی نش – سانکلیف (NS) استفاده شد که روابط آن در ادامه ارائه شده است.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(ET_{pmp}-ET_o)^2}{n}} \quad (۲)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^{n}|ET_{pmp}-ET_o|}{n} \quad (۳)$$

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^{n}(ET_{pmp}-ET_{\overline{pmp}})(ET_o-ET_{\bar{o}})]^2}{\sum_{i=1}^{n}(ET_{pmp}-ET_{\overline{pmp}})^2 \sum_{i=1}^{n}(ET_o-ET_{\bar{o}})^2} \quad (۴)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(ET_{pmp}-ET_o)^2}{\sum_{i=1}^{n}(ET_o-ET_{\bar{o}})^2} \qquad -\infty \le NS \le 1 \quad (۵)$$

در روابط فوق، ETpmp و ETO به ترتیب تبخیر تعرق تخمین زده شده با مدل‌های تجربی و مقدار تخمین زده شده با مدل PMF و $ET_{\overline{pmp}}$ و $ET_{\bar{o}}$ مقادیر میانگین تبخیر تعرق با مدل‌های تجربی و مدل استاندارد و n تعداد کل داده‌ها می‌باشند. پس از محاسبه شاخص‌های آماری و جهت رتبه‌بندی و رنکینگ مدل های استفاده شده از روش TOPSIS به شرح زیر استفاده شد.

د) مدل تصمیم‌گیری چند معیاره TOPSIS

روش(TOPSIS(Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution در سال ۱۹۸۱ توسط Hwang and Yoon) ارائه شد. در این روش m گزینه به وسیله n شاخص مورد ارزیابی قرار می‌گیرند و هر مساله را می‌توان به عنوان یک سیستم هندسی شامل m نقطه در یک فضای n بعدی در نظر گرفت. این روش بر این اساس بنا نهاده شده که گزینه انتخابی باید کمترین فاصله را با راه حل ایده ال مثبت (بهترین حالت ممکن،Ai+) و بیشترین فاصله را با راه حل ایده ال منفی (بدترین حالت ممکن،Ai-) داشته باشد.

در پژوهش حاضر ۱۰ مدل به عنوان گزینه (m=10) و چهار شاخص آماری محاسبه شده به عنوان معیار (n=4) در نظر گرفته شد. در مرحله اول ماتریس تصمیم X با ابعاد ۴×۱۰ تشکیل شد که هر سطر نشان دهنده یک مدل و هر ستون نشان دهنده یک شاخص آماری است:

$$\begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{14} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{101} & \cdots & x_{104} \end{bmatrix} = X \qquad (۶)$$

سپس نرمال سازی داده‌ها به منظور حذف اثر مقیاس‌های متفاوت شاخص‌ها با روش نرمال سازی برداری انجام شد:

$$\frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{10} x_{ij}^2}} = r_{ij} \quad i = 1,2,\dots.10 \quad j = 1,2\dots.4 \qquad (۷)$$

سپس با توجه به اهمیت یکسان شاخص‌های آماری در این تحقیق، برای هر معیار وزن برابر در نظر گرفته شد (wj=0.25) و در نتیجه

$$r_{ij} \times w_j = v_{ij} \qquad (۸)$$

سپس راه حل ایده ال مثبت و منفی به شرح زیر محاسبه شد:

$$A^- = \{v_1^-, v_2^-, v_3^-, v_4^-\} \quad \text{و} \quad A^+ = \{v_1^+, v_2^+, v_3^+, v_4^+\} \qquad (۹)$$

برای شاخص‌های سودمند که هر چه بزرگتر باشند بهتر است (مانند R2,NSE) از رابطه (۱۰) و برای شاخص‌های هزینه‌ای که هر چه کوچکتر باشند بهتر است (مانند RMSE,MAE) از رابطه (۱۱) استفاده شد.

$$v_{ij}^- = min\{v_{ij}\} \quad v_j^+ = \max\{v_i\} \qquad (۱۰)$$

$$v_{ij}^- = \max\{v_{ij}\} \quad v_j^+ = \min\{v_i\} \qquad (۱۱)$$

سپس فاصله هر مدل از راه حل‌های مثبت و منفی بر اساس فاصله اقلیدسی محاسبه شد.

$$S^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{4}\left(v_{ij} - v_j^-\right)^2} \quad \text{و} \quad S^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{4}\left(v_{ij} - v_j^+\right)^2} \qquad i = 1,2,\dots m \qquad (۱۲)$$

پس از آن برای هر مدل ضریب نزدیکی به راه حل ایده ال ($\widetilde{S_i}$) به صورت زیر محاسبه شد.

$$\widetilde{S_i} = \frac{s_i^+}{s_i^+ + s_i^-} \qquad i = 1,2,\dots 10 \qquad (۱۳)$$

در نهایت مدل‌ها بر اساس مقدار $\widetilde{S_i}$ مرتب شدند و مدل با بیشترین مقدار $\widetilde{S_i}$ به عنوان دقیق‌ترین مدل معرفی شد. انجام محاسبات ذکر شده با کد نویسی در محیط نرم افزار Python 3.8 انجام شد.

نتایج و بحث

تبخیر تعرق مرجع ماهانه تخمین زده شده با مدل‌های مذکور با نتایج حاصل از رابطه PMF به عنوان روش استاندارد مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج این مقایسه که به کمک شاخص‌های آماری صورت گرفته است، در جداول (۷-۴) ارائه شده است. بررسی مقادیر بدست آمده نشان می‌دهد که بر اساس شاخص R2 در میان روابط تابشی مورد بررسی، بیشترین دقت در مدل Abtew با متوسط R2=0.61 برای ۶ ماه از سال و مدل Tabari 2 با متوسط R2=0.44 برای ۴ ماه سال مشاهده شد. در روابط انتقال جرم مورد بررسی بیشترین دقت در مدل های WMO و Rohwer مشاهده شد. به طوری‌که در ۸ ماه از سال مدل WMO با متوسط R2=0.95 و در ۴ ماه از سال مدل Rohwer با متوسط R2=0.94 به عنوان مدل‌های برتر مشاهده شدند. در روابط ترکیبی مورد بررسی در تمام ماه‌های سال رابطه Valiantzas 5 با متوسط R2=0.92 به عنوان بهترین مدل ترکیبی و مدل Romanenko 1 با متوسط R2=0.53 به عنوان بهترین مدل دمایی مشاهده شدند.

بر اساس شاخص RMSE در میان روابط تابشی مورد بررسی، بیشترین دقت در مدل Abtew با متوسط RMSE=49.25 mm.month-1 برای ۷ ماه از سال و پس از آن، مدل Tabari 2 با متوسط RMSE=14.48 mm.month-1 برای ۵ ماه از سال مشاهده شد. در میان روابط انتقال جرم مورد بررسی، بیشترین دقت در مدل Rohwer با متوسط RMSE=101.67 mm.month-1 برای ۱۱ ماه از سال مشاهده شد. در میان مدل‌های ترکیبی مورد بررسی، در ۶ ماه ازسال مدل Valiantzas 5 با متوسط RMSE=54.22 mm.month-1 و در ۶ ماه دیگر مدل Valiantzas 5 با متوسط RMSE=20.55 mm.month-1 انتخاب شد. در میان روابط دمایی مورد بررسی نیز در تمام سال مدل Romanenko 1 با متوسط RMSE=74.43 mm.month-1 به عنوان مدل برتر معرفی شد.

بر اساس شاخص NSE مدل Abtew در ۴ ماه از سال با متوسط NSE=-3.24 mm.month-1 و رابطه Tabari 2 در ۷ ماه از سال با متوسط NSE=-5.55 mm.month-1 به عنوان مدل برتر تابشی انتخاب شد. در میان روابط انتقال جرم مدل Rohwer در همه ماه‌های سال با متوسط NSE=-30.88 mm.month-1 انتخاب شد. مدل Valiantzas 2 در ۶ ماه از سال با متوسط NSE=-1.57 mm.month-1 و مدل Valiantzas 5 در ۶ ماه با متوسط NSE=-5.34 mm.month-1 انتخاب شد. رابطه Romanenko 1 نیز با متوسط NSE=-15.48 mm.month-1 به عنوان مدل برتر دمایی انتخاب شد.

بر اساس شاخص MAE نیز در ۸ ماه از سال مدل Abtew با متوسط MAE=39.61 mm.month-1 و در ۴ ماه از سال مدل Tabari 2 با متوسط MAE=9.97 mm.month-1 به عنوان مدل برتر تابشی انتخاب شد. در میان روابط انتقال جرم مدل Rohwer با متوسط MAE=100.97 mm.month-1 و در میان روابط دمایی مدل Romanenko 1 با متوسط NSE=73.54 mm.month-1 به عنوان مدل های برتر در تمام سال انتخاب شد. در میان روابط ترکیبی نیز مدل Valiantzas 2 با متوسط NSE=18.74 mm.month-1 در ۶ ماه سال و Valiantzas 5 با متوسط NSE=63.68 mm.month-1 در ۶ ماه سال انتخاب شدند.

جدول ۴ - معرفی مدل‌های برتر بر اساس شاخص R2

ماه	مدل تابشی	مدل انتقال جرم	مدل ترکیبی	مدل دمایی
ژانویه	Abtew(0.71)	Rohwer(0.96)	Valiantzas 5(0.96)	Romanenko1(0.85)
فوریه	Abtew(0.69)	Rohwer(0.97)	Valiantzas 5(0.96)	Romanenko1(0.86)
مارچ	Abtew(0.80)	Rohwer(0.98)	Valiantzas 5(0.98)	Romanenko1(0.89)
آوریل	Abtew(0.53)	WMO(0.94)	Valiantzas 5(0.93)	Romanenko1(0.69)
می	Tabari 2(0.48)	WMO(0.92)	Valiantzas 5(0.89)	Romanenko1(0.46)
ژوئن	Tabari 2(0.24)	WMO(0.96)	Valiantzas 5(0.86)	Romanenko1(0.27)
جولای	Abtew(0.46)	Rohwer(0.87)	Valiantzas 5(0.91)	Romanenko1(0.17)
آگوست	Tabari 2(0.48)	WMO(0.97)	Valiantzas 5(0.95)	Romanenko1(0.23)
سپتامبر	Abtew(0.49)	WMO(0.97)	Valiantzas 5(0.95)	Romanenko1(0.34)
اکتبر	J-H(0.885)	WMO(0.96)	Valiantzas 5(0.90)	Romanenko1(0.37)
نوامبر	Tabari 2(0.46)	WMO(0.94)	Valiantzas 5(0.91)	Romanenko1(0.50)
دسامبر	Tabari 2(0.6)	WMO(0.98)	Valiantzas 5(0.92)	Romanenko1(0.71)

جدول ۵ - معرفی مدل‌های برتر بر اساس شاخص RMSE

ماه	مدل تابشی	مدل انتقال جرم	مدل ترکیبی	مدل دمایی
ژانویه	Tabari 2(10.53)	Rohwer (42.32)	Valiantzas2(7.46)	Romanenko1(30.71)
فوریه	Tabari 2(12.22)	Rohwer (52.72)	Valiantzas2(12.74)	Romanenko1(22.28)
مارچ	Tabari 2(23.28)	Rohwer (83.23)	Valiantzas2(33.26)	Romanenko1(34.33)
آوریل	Abtew (38.34)	Rohwer (114.51)	Valiantzas5(53.34)	Romanenko1(44.44)
می	Abtew (48.72)	Rohwer (115.60)	Valiantzas5(8)	Romanenko1(84.16)
ژوئن	Abtew (52.62)	Rohwer (168.35)	Valiantzas5(70.43)	Romanenko1(129.61)
جولای	Abtew (63.55)	WMO (104.51)	Valiantzas5(66.99)	Romanenko1(103.33)
آگوست	Abtew (69.55)	Rohwer (177.21)	Valiantzas5(65.45)	Romanenko1(116.87)
سپتامبر	Abtew (47.03)	Rohwer (135.65)	Valiantzas5(61.15)	Romanenko1(114.88)
اکتبر	Abtew (24.96)	Rohwer (91.61)	Valiantzas2(47.82)	Romanenko1(99.05)
نوامبر	Tabari 2(13.26)	Rohwer (54.02)	Valiantzas2(14.31)	Romanenko1(63.72)
دسامبر	Tabari 2(13.15)	Rohwer (43.22)	Valiantzas2(8.74)	Romanenko1(52.85)

جدول ۶ - معرفی مدل‌های برتر بر اساس شاخص NSE

ماه	مدل تابشی	مدل انتقال جرم	مدل ترکیبی	مدل دمایی
ژانویه	Abtew(0.899)	Rohwer (0.509)	Valiantzas2(0.58)	Romanenko1(0.992)
فوریه	Tabari 2(-0.407)	Rohwer (-25.55)	Valiantzas2(-0.53)	Romanenko1(-3.67)
مارچ	Tabari 2(-0.292)	Rohwer (-15.52)	Valiantzas2(-1.64)	Romanenko2(0.996)
آوریل	Abtew (-4.2)	Rohwer (-45.11)	Valiantzas5(-9.07)	Romanenko1(-6.96)
می	Abtwe (-5.76)	Rohwer (-67.92)	Valiantzas5(0.81)	Romanenko1(0.91)
ژوئن	Tabari 2(-13.29)	Rohwer (-48.78)	Valiantzas5(-7.71)	Romanenko1(-28.50)

جولای	Tabari 2(-13.50)	WMO (-30.09)	Valiantzas5(-5.09)	Romanenko1(-22.08)
آگوست	Tabari 2(-11.07)	Rohwer (-32.65)	Valiantzas5(-3.72)	Romanenko1(-14.07)
سپتامبر	Abtew (-3.91)	Rohwer (-39.88)	Valiantzas5(-7.31)	Romanenko1(-28.32)
اکتبر	J-H (0.996)	Rohwer (-30.68)	Valiantzas2(-7.63)	Romanenko1(-36.03)
نوامبر	Tabari 2(-0.574)	Rohwer (-25.10)	Valiantzas2(-0.83)	Romanenko1(-35.31)
دسامبر	Tabari 2(0.86)	Rohwer (-8.86)	Valiantzas2(0.59)	Romanenko1(-13.75)

جدول ۷ : معرفی مدل‌های برتر بر اساس شاخص MAE

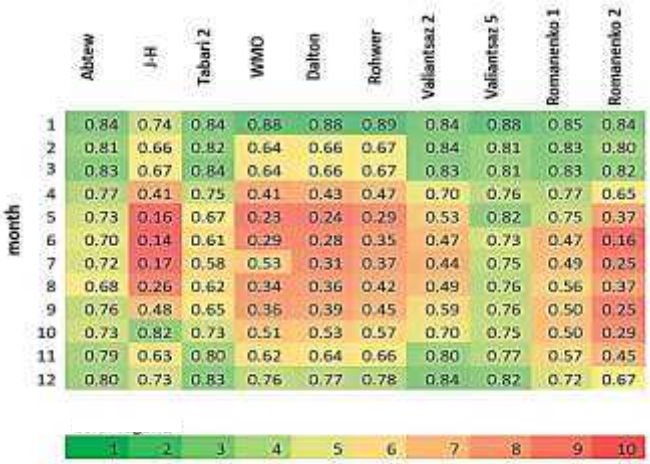
ماه	مدل تابشی	مدل انتقال جرم	مدل ترکیبی	مدل دمایی
ژانویه	Tabari 2(7.89)	Rohwer (41.37)	Valiantzas2(5.94)	Romanenko1(28.09)
فوریه	Tabari 2(10.43)	Rohwer (52.14)	Valiantzas2(11.09)	Romanenko1(19.52)
مارچ	Tabari 2(19.13)	Rohwer (81.82)	Valiantzas2(30.71)	Romanenko1(28.84)
آوریل	Abtew (36.55)	Rohwer (113.50)	Valiantzas5(52.99)	Romanenko1(42.90)
می	Abtew (46.65)	Rohwer (155.00)	Valiantzas5(66.70)	Romanenko1(80.25)
ژوئن	Abtew (48.15)	Rohwer (167.49)	Valiantzas5(69.85)	Romanenko1(125.45)
جولای	Abtew (57.60)	WMO (103.50)	Valiantzas5(66.49)	Romanenko1(126.04)
آگوست	Abtew (64.06)	Rohwer (175.85)	Valiantzas5(65.13)	Romanenko1(112.84)
سپتامبر	Abtew (42.14)	Rohwer (134.78)	Valiantzas5(60.97)	Romanenko1(112.49)
اکتبر	Abtew (21.87)	Rohwer (90.79)	Valiantzas2(45.54)	Romanenko1(96.59)
نوامبر	Tabari 2(11.28)	Rohwer (53.42)	Valiantzas2(12.34)	Romanenko1(61.37)
دسامبر	Tabari 2(10.28)	Rohwer (42.00)	Valiantzas2(6.85)	Romanenko1(48.20)

رتبه بندی مدل‌های بررسی شده در این پژوهش با استفاده از روش چند معیاره TOPSIS نیز مورد بررسی قرار گرفت که نمودار آن در شکل (۱) ارائه شده است. مقایسه امتیازات محاسبه شده نشان می‌دهد که در مجموع با در نظر گرفتن مقدار عددی ۴ شاخص آماری محاسبه شده، در ماه ژانویه مدل‌های Abtew (0.84) ، Rohwer (0.88) ، Valiantzas 5(0.88) و Romanenko1(0.85) بیشترین امتیاز را گرفته و به ترتیب به عنوان مدل‌های برتر نهایی از هر گروه روابط تابشی، انتقال جرم، ترکیبی و دمایی در این ماه معرفی شدند. در ماه فوریه مدل‌های Tabari2 (0.82) ، Rohwer (0.67) ،

Valiantzas2(0.83)، Romanenko1(0.83) بیشترین امتیاز را از هر گروه روابط مورد بررسی بدست اوردند. در ماه مارچ مدل‌های Tabari 2(0.83) ، Rohwer (0.67) ، Valiantzas2(0.83)، Romanenko1(0.83) بیشترین امتیاز را از هر گروه روابط مورد بررسی بدست اوردند. در ماه آوریل مدل های Abtew(0.77)، Rohwer (0.46) ، Valiantzas5(0.75) و Romanenko1(0.76) به عنوان مدل‌های نهایی برتر معرفی شدند. در ماه می مدل‌های Abtew (0.73) ، Rohwer (0.59) ، Valiantzas 5(0.82) و Romanenko 1(0.74) به عنوان مدل‌های برتر هر گروه معرفی شدند. در ماه ژوئن مدل‌های Abtew (0.70) ، Rohwer (0.34) ، Valiantzas 5(0.73) و Romanenko 1(0.47) به عنوان مدل‌های برتر انتخاب شدند.

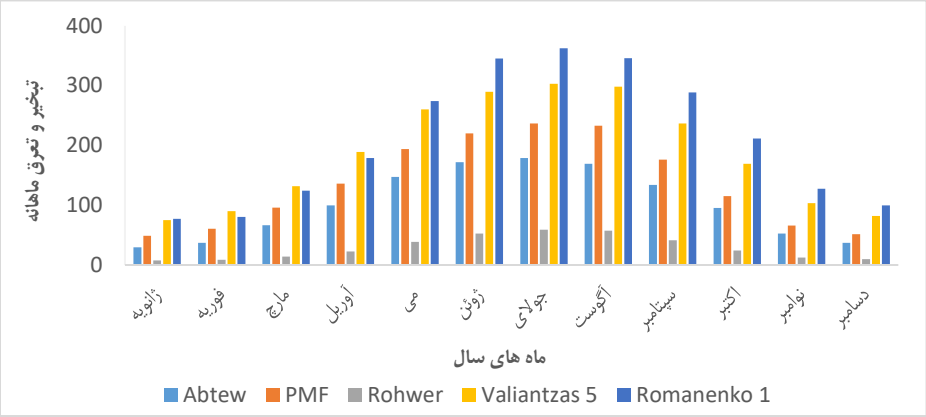
در ماه جولای مدل‌های Abtew (0.72) ، WMO(0.53) ، Valiantzas 5(0.75) و Romanenko 1(0.49) به عنوان مدل‌های برتر انتخاب شدند. در ماه‌های آگوست و سپتامبر مدل‌های Abtew (0.68 , 0.75) ، Rohwer (0.41, 0.45) ، Valiantzas 5(0.76 , 0.75) ، Romanenko 1(0.55, 0.50) به عنوان مدل‌های برتر از هر گروه در این ماه انتخاب شدند. در ماه اکتبر مدل‌های J-H (0.82) ، Rohwer (0.57) ، Valiantzas 5(0.75) و Romanenko 1(0.49) به عنوان مدل‌های برتر انتخاب شدند. در ماه‌های نوامبر و دسامبر نیز مدل‌های Tabari 2(0.8, 0.83) ، Rohwer (0.66, 0.77) ، Valiantzas 2(0.80 , 0.84) و Romanenko 1 (0.57, 0.72) به عنوان مدل‌های برتر نهایی بر اساس امتیاز روش TOPSIS معرفی شدند.

بررسی مقادیر ارائه شده در شکل (۱) نشان می‌دهد که از میان روابط تابشی بررسی شده، در اکثر ماه‌های سال مدل Abtew توانسته است تبخیر تعرق ماهانه را با دقت بیشتری نسبت به سایر روابط براورد نماید. همچنین در میان روابط انتقال جرم، مدل Rohwer در همه ماه‌های سال به جز جولای امتیاز بالاتری در مقایسه با سایر مدل‌های انتقال جرم مورد بررسی داشته است. در میان روابط ترکیبی نیز مدل Valiantzas 5 برتری قابل توجه در مقایسه با مدل Valiantzas 2 داشته و در میان روابط دمایی نیز ، برتری مدل Romanenko 1 نسبت به Romanenko 2 در تمامی ماه‌های سال مشهود است. بررسی نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که در مجموع مدل‌های مبتنی بر انتقال جرم و دما در اکثر ماه‌های سال به ویژه ماهای فصل تابستان و پاییز، دقت قابل قبولی در تخمین تبخیر و تعرق ماهانه نداشته‌اند.

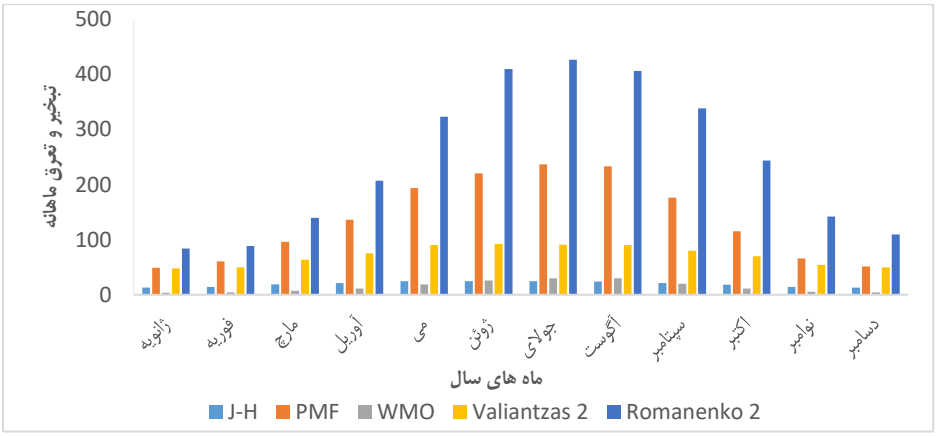


شکل ۱ - نمودار رتبه بندی مدل‌های مورد بررسی بر اساس روش TOPSIS

نمودارهای رسم شده در اشکال (۲و۳) نیز به ترتیب مقادیر تبخیر تعرق ماهانه تخمین زده شده با مدل‌هایی که از هر گروه، بیشترین و کمترین امتیاز را بر اساس روش TOPSIS بدست آورده‌اند، نشان می‌دهد. در همه ماه‌های سال کم برآوردی مقادیر تخمین زده شده توسط مدل Rohwer و بیش برآوردی مقادیر تخمین زده شده توسط مدل‌های گروه دمایی و ترکیبی مشاهده می‌شود که در ماه‌های فصل پاییز و زمستان از شدت بیشتری برخوردار است.



شکل ۲- مقادیر تبخیر تعرق ماهانه تخمین زده شده با مدل‌های دارای بیشترین امتیاز از هر گروه



شکل ۳- مقادیر تبخیر تعرق ماهانه تخمین زده شده با مدل‌های دارای کمترین امتیاز از هر گروه

(حیدری مطلق و همکاران، ۱۴۰۰) و (Jakimavičius et al.,2013) در تحقیقات خود نشان دادند که مدل‌های انتقال جرم، نزدیکی کمتری با مقادیر ثبت شده تبخیر تعرق دارند. همچنین (Kiafar et al., 2017) و(Usta and Setin, 2023) و Wu et al., 2024) در تحقیقات خود دقت مدل‌های ترکیبی و تابشی مورد بررسی را در مقایسه با سایر مدل‌ها به ویژه در مقیاس ماهانه تایید کردند که با نتایج این تحقیق سازگاری دارد. اما (Celestin et al., 2020) دقت مدل‌های مبتنی بر

انتقال جرم را مورد تایید قرار دادند که ممکن است به دلیل تفاوت در نوع اقلیم، بازه زمانی محاسباتی و یا در مقایسه با دقت سایر روابط انتخاب شده باشد و با نتایج این پژوهش همخوانی ندارد.

نتیجه گیری

در این پژوهش عملکرد ده مدل تجربی جهت تخمین تبخیر تعرق مرجع ماهانه با استفاده از داده‌های هواشناسی ثبت شده طی سال‌های (۲۰۲۱-۱۹۹۱) در ایستگاه سینوپتیک بافت در استان کرمان مورد ارزیابی قرار گرفت. برای مقایسه نتایج از ۴ شاخص آماری محاسبه شده و روش تصمیم‌گیری چند معیاره TOPSIS استفاده شد. نتایج بدست آمده نشان داد مدل‌های دمایی و انتقال جرم مورد بررسی از دقت کمتری در تخمین تبخیر تعرق ماهانه به ویژه در فصل های تابستان و پاییز در مقایسه با سایر مدل‌ها برخوردارند. از میان مدل‌های تابشی مورد بررسی، مدل Abtew و از میان مدل‌های ترکیبی مورد بررسی، مدل Valiantzas 5 با دقت مناسب در همه ماه‌های سال جهت تخمین تبخیر و تعرق ماهانه در اقلیم سرد و خشک منطقه قابل توصیه هستند.

منابع

بابامیری، ا.، و دین پژوه، ی. (۱۳۹۳). مقایسه چهار روش تخمین تبخیر و تعرق گیاه مرجع مبتنی بر درجه حرارت هوا در حوضه آبریز دریاچه ارومیه. علوم و مهندسی آبیاری، (۱) ۳۷، ۵۴-۴۳.

بهمن ابادی، ب.، و کاویانی، ع. (۱۳۹۹). برآورد تبخیر تعرق پتانسیل در اقلیم‌های مختلف ایران. تحقیقات آب و خاک ایران، (۱) ۶، ۱۴۹۹-۱۴۸۰.

حیدری مطلق، آ.، نصرالهی، ع.ح.، شریفی پور، م.، و ویسی، ش. (۱۴۰۰). ارزیابی مدل‌های مختلف برآورد تبخیر و تعرق مرجع در دشت الشتر. تحقیقات آب و خاک ایران، (۵)۵۲، ۱۴۲۱-۱۴۱۰.

شیری، ن.، و کاظمی، م. ح. (۱۴۰۱). واسنجی و ارزیابی پنج روش تخمین تبخیر- تعرق مرجع مبتنی بر تشعشع خورشیدی در استان یزد. دانش آب و خاک، (۱) ۲۸، ۱۲۹-۱۴۱.

عزیزی زهان، ع. (۱۳۹۵). بررسی اثر سطوح پتاسیم بر افزایش تحمل به خشکی و کارایی مصرف آب ارقام کلزا در شرایط گلخانه‌ای. گزارش نهایی سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، موسسه تحقیقات آب و خاک کرج، ص ۲۳.

قمر نیا، ه.، رضوانی، س.، و. فتحی، پ. (۱۳۹۱). ارزیابی و واسنجی مدل‌های تبخیر و تعرق گیاه مرجع با توجه به اثر دوره محاسباتی برای اقلیم نیمه خشک سرد. مدیریت آب و آبیاری، (۲)۲، ۳۷-۲۵.

کهخامقدم، پ. (۱۳۹۷). ارزیابی مدل‌های تبخیر تعرق گیاه مرجع برای اقلیم گرم و خشک (مطالعه موردی: ایستگاه سینوپتیک زاهدان). پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، (۱) ۲۵ ، ۳۱۷-۳۰۹.

8- Abeysiriwardana, H.D., Muttil, N., & Rathnayake, U. (2022). Acomparative study of potential evapotranspiration estimation by three methods with FAO Penman-Monteith method across Srilanka. Hydrology, 9(11), 206.

9- Abtew, W. (1996). Evapotranspiration measurements and modeling for three wetland systems in South Florida. Journal of the American Water Resources Association, 32(3), 465–473. https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1996.tb04044.x
10- Allen., R.G., Pereira, L.S., Raes, D. & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration – guidelines for computing crop water requirements. FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56. FAO, Rome.
11- Celestin, S., Qi, F., Li, R., Yu, T., & Cheng, W. (2020). Evaluation of 32 simple equations against the Penman-Monteith method to estimate the reference evapotranspiration in the Hexi Corridor, Northwest China. Water, 12(10):2772 .
12- Dalton, J. (1802) Experimental essays on the constitution of mixed gases: on the force of steam or vapour from water or other liquids in different temperatures, both in a torricelli vacuum and in air; on evaporation; and on expansion of gases by heat. Memoirs of the Literary and Philosophical Society of Manchester, 5, 536-602.
13- Djaman, K.B., Balde, A., Sow, A., Muller, B., Irmak ,S.K., N'Diaye, M., Manneh, B.D., Moukoumbi, Y., Futakuchi, K., & Saito, K. (2015). Evaluation of sixteen reference evapotranspiration methods under sahelian conditions in the Senegal River Valley. Journal of Hydrology- Regional Studies. 3: 139-159.
14- Djaman, K. Tabari, H. Blade, A.B. Diop. L, Futakuchi .K, & Irmac. S, (2016). Analyses, calibration and validation of evapotranspiration models to predict grass-reference evapotranspiration in the Senegal river delta. Journal of hydrology: Regional studies, 8:82-94.
15- Hwang, C.L. & Yoon, K. (1981). Multiple attribute decision making: methods and applications Springer-Verlag, New York.
16- Jakimavičius, D., Kriaučiūnienė, J., Gailiušis, B., & Šarauskienė, D. (2013). Assessment of uncertainty in estimating the evaporation from the Curonian Lagoon. Baltica, 26(2): 177-186.
17- Jensen, M.E., & Haise, H.R. (1963). Estimating evapotranspiration from solar radiation. Journal of the Irrigation and Drainage Division, 89: 15–41.
18- Kiafar, H., Tabari, H., & Trajkovic, S. (2017). Global comparison of 20 reference evapotranspiration equations in a semi-arid region of Iran. Hydrology Research, 50(1), 282–295. https://doi.org/10.2166/nh.2017.132
19- Liu, X., Xu, C., Zhong, X., Li, Y., Yuan, X., & Cao, J. (2017). Comparison of 16 models for reference crop Evapotranspiration against weighing Lysimeter measurement. Agricultural Water Management, 184: 145-155
20- Rohwer, C. (1931). Evaporation from free water surfaces (Technical Bulletin No. 271). U.S. Department of Agriculture.
21- Rodrigues, G.C., and Braga, R.P. (2021). Estimation of reference evapotranspiratin during the irrigation season using nine temperature based methods in hot summer mediterranean climate. Agriculture, 11:(2). 124
22- Romanenko, V. A. (1961). Computation of the autumn soil moisture using a universal relationship for a large area. Proc. of Ukrainian Hydrometeorological Research Institute, 3: 12-25.
23- Tabari, H., and Hosseinzadeh Talaee, P. (2011). Local calibration of the hargreaves and Priestley Taylor equations for estimating reference evapotranspiration in arid and cold climates of Iran based on the Penman-Monteith. journal of Irrigation and Drainage Engineering (ASCE), 16(10): 837-548.
24- Usta, S., & Çetin, S. (2023). Comparison of the performances of six empirical mass transfer-based reference evapotranspiration estimation models in semi-arid conditions. PeerJ, 11, e18549.

25-Valiantzas, J. D. (2013). Simplified forms for the standardized FAO56- Penman-Monteith reference evapotranspiration using limited weather data. journal of Hydrology, 505: 13-23.

26- Wen, X., Si, J., He, Z., Wu, J., Shao, H., & Yu, H .(2015) .Support-vector-machine-based models for modeling daily reference evapotranspiration with limited climatic data in extreme arid regions. Water resources management, 29(9): 3195-3209.

27- Wu, Y., Li, Q., Zhong, X., & Liu, X. (2024). Evaluating the accuracy of nine canopy resistance models in the estimating winter wheat evapotranspiration using the Penman-Monteith equation. Front Plant Sciense, 15:1470409

28- WMO. (1966). Measurement and estimation of evaporation and evapotranspiration.

Evaluating the Performance of Empirical Models for Estimating Monthly Reference Evapotranspiration in Cold and Arid Climates: A Case Study of Baft Synoptic Station

H. Kamalipour[1], S.Golestani Kermani[2]*, B.Bakhtiar[i3]

1- M.Sc. Student, Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

2*-Corresponding author, Assistant Professor, Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

3- Associate Professor, Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

corresponding Author Email: s.golestani@uk.ac.ir

Abstract

Proper water resource management depends on the accurate estimation of evapotranspiration, which is a key component of the hydrological cycle. Although standard methods such as the Penman-Monteith-FAO equation are widely used in most regions, simpler empirical methods that require fewer meteorological inputs and involve less complexity are often preferred for planning and modeling purposes. In this study, the performance of ten empirical models—including three radiation-based, three mass transfer-based, two combination, and two temperature-based models—was evaluated to estimate monthly evapotranspiration using daily meteorological data from the Baft synoptic station in Kerman Province over the period 1991–2021. Model performance was assessed using statistical indices including the coefficient of determination (R^2), root mean square error (RMSE), Nash–Sutcliffe efficiency (NSE), and mean absolute error (MAE). To rank the models, the TOPSIS multi-criteria decision-making method was applied. The results showed that the Abtew, Rohwer, Valiantzas 5, and Romanenko 1 models achieved the highest scores and were identified as the most suitable models within their respective categories. Overall, the accuracy of radiation-based and combination models was confirmed to be superior compared to the other model types.

Keywords: Cold and Arid Climate, Baft, Monthly Evapotranspiration, Multi-Criteria Decision Making (MCDM)

چشم اندازی از آینده تغییرات اقلیمی در ایران

مریم سادات جعفرزاده[۱]، مهدی شفقتی[۲]

۱- پژوهشگر پسا دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، گروه احیاء مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۲- معاون مدیر کل، دفتر کنترل سیلاب و آبخوان‌داری، سازمان منابع طبیعی و آبخیزداری کشور، تهران، ایران

m.s.Jaafarzadeh@ut.ac.ir

چکیده

مقدمه: در این مطالعه تغییر اقلیم و گسترش شهری و کشاورزی، تغییر الگوهای بارشی و کشاورزی، کشاورزی با رویکرد کشت محصولات مقاوم به خشکسالی، نقش دولت و بخش خصوصی در توسعه کشاورزی پایدار در شرایط حاضر، سیاست‌های کشاورزی کشور در انطباق با تغییرات اقلیمی، اقدامات آتی در جهت پایداری زراعی در مقابل تغییرات اقلیمی چشم‌انداز پیش رو با توجه به وضع موجود مورد بررسی قرار گرفت.

روش‌شناسی تحقیق: این پژوهش بر اساس بررسی برخی از اسناد، گزارشات و مطالعاتی که قبلا انجام شده و همچنان نیز در حال انجام هستند، با هدف تحلیل برخی چالش‌های موجود پیرامون مشکلات تغییرات اقلیمی در کشور صورت گرفته است.

نتایج: نتایج این بررسی نشان داد از علل اصلی عقب‌ماندگی بخش کشاورزی در کشورهای در حال توسعه نسبت به کشورهای توسعه یافته، این است که در کشورهای توسعه یافته بخش کشاورزی از سوی بخش صنعت، کاملاً مورد حمایت قرار می‌گیرد، اما در کشورهای در حال توسعه نه تنها چنین چیزی مصداقی ندارد، بلکه این بخش کشاورزی است که تا حدودی کاستی‌های بخش صنعت را جبران می‌نماید. این در حالی است که فناوری به تنهایی شاید قادر به کنترل یا تقلیل اثرات منفی تغییرات اقلیمی نباشد ولی ترکیب "فناوری" با "پایداری" می‌تواند بعنوان راهکاری مناسب عمل کند. بنابراین نیاز است رشد تکنولوژی‌ها در کشور از نوع فناوری کاهنده تولید CO_2 باشد تا حداقل منجر به تشدید شرایط نامناسب اقلیمی نگردد.

نتیجه‌گیری کلی: با توجه به شرایط موجود، طی سال‌های اخیر، تمرکز اکثر دولت‌ها بر حفظ و تقویت منابع طبیعی و منابع آبی کشور و همچنین رعایت الگوی کشت بوده است. در صورت اقدامات مناسب در راستای شرایط فعلی، برنامه‌ریزی

کاربردی، تهیه آمار و اطلاعات صحیح و کافی، بکارگیری نیروهای متخصص در جایگاه مناسب، توجه و جدیت در اجرای مصوبات، اختصاص اعتبار مناسب، تهیه و به روزرسانی ابزار و تکنولوژی‌های جدید و مناسب و... می‌توان از بروز رخدادهای نامناسب‌تر آتی پیشگیری و شرایط نامناسب فعلی را تا حدودی کنترل نمود.

کلید واژه‌ها: الگوی بارشی، تغییر اقلیم، توسعه شهری، کشاورزی پایدار.

مقدمه

تغییرات اقلیمی، منجر به افزایش دما، بارندگی غیرقابل پیش‌بینی، طوفان‌های مکرر و خشکسالی، از دست دادن تنوع زیستی و اختلال در اکوسیستم می‌شود. این تغییرات، تهدیدی جدی برای سلامت انسان، به دلیل در دسترس نبودن غذا و آب است (Karthik و همکاران، ۲۰۲۵). کشاورزی بخش پیشرو است که از طریق سهم قابل توجهی که در انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد، مسئول تغییرات اقلیمی جهانی است (Sharofiddinov و همکاران، ۲۰۲۵). تغییرات اقلیمی اثرات زیست محیطی کشاورزی را تشدید می‌کند. این تغییرات بر تولیدات زراعی هم اثر مثبت دارد و هم اثر منفی، اما تأثیر منفی آن بر کشاورزی قابل توجه است و اهمیت بیشتری دارد. از جمله یکی از اثرات تغییرات اقلیمی، پراکنش نامنظم مکانی و زمانی بارش‌ها می‌باشد. با افزایش بارندگی در برخی مناطق سیل و آسیب به ریشه و ساختار خاک و در نتیجه کاهش تولید مواد غذایی رخ می‌دهد. کاهش بارندگی نیز در برخی مناطق دیگر، منجر به خشکسالی می‌شود که با اثر منفی بر رشد و توسعه محصول، تولید مواد غذایی را کاهش می‌دهد. تأثیر منطقه‌ای بارندگی بر تولید پیچیده است و می‌تواند بر کل تولید مواد غذایی در کشور تأثیر بگذارد (Jiang و همکاران، ۲۰۲۴). مطالعات بسیاری در سطح ملی (پناهی و همکاران، ۱۴۰۰؛ بیرانوند و همکاران، ۱۴۰۱؛ لطفی قرانچای و همکاران، ۱۴۰۲؛ کریمی و حیدری، ۱۴۰۲؛ درخشنده و همکاران، ۱۴۰۲؛ حجازی‌زاده و همکاران، ۱۴۰۳؛ دیرمجائی و اکبری، ۱۴۰۴) و بین‌المللی (Droulia و Charalampopoulos، ۲۰۲۱؛ Rosa، ۲۰۲۲؛ Grigorieva و همکاران، ۲۰۲۳؛Yang و همکاران، ۲۰۲۴؛ Karthik و همکاران، ۲۰۲۵؛ Sharofiddinov و همکاران، ۲۰۲۵) در رابطه با تغییرات اقلیمی و بخش کشاورزی- منابع طبیعی انجام شده است.

در این مطالعه که حاصل یک فعالیت پژوهشی است، سعی شد با توجه به شرایط موجود، به برخی چالش‌هایی که در راستای تغییرات اقلیمی، محدودیت منابع آبی و متعاقبا امنیت غذایی پایدار به وجود آمده است پرداخته شود. بنابراین بررسی مختصری بر تغییر اقلیم و گسترش شهری و کشاورزی، تغییر الگوهای بارشی و کشاورزی، کشاورزی با رویکرد کشت محصولات مقاوم به خشکسالی، نقش دولت و بخش خصوصی در توسعه کشاورزی پایدار در شرایط حاضر، نقش فناوری‌های نوین در تقلیل اثرات منفی تغییرات اقلیمی بر کشاورزی، سیاست‌های کشاورزی کشور در انطباق با تغییرات اقلیمی و اقدامات آتی در جهت پایداری زراعی در مقابل تغییرات اقلیمی انجام گرفت.

مبانی نظری

تغییر اقلیم، گسترش شهری، کشاورزی

با گسترش شهرها، نیازهای غذایی خانواده‌ها نیز افزایش می‌یابد. وضعیت قشر ضعیف در مناطق شهری در شرایط کنونی با قیمت‌های بی‌ثبات مواد غذایی و بحران‌های مالی، سوختی و اقتصادی، ناپایدار است. قشر ضعیف شهری که اغلب در آسیب پذیرترین نقاط شهرها سکونت دارند و فاقد ظرفیت سازگاری با اثرات مرتبط با تغییرات اقلیمی می‌باشند، بیشترین ضربه را خواهند دید (Dubbeling، ۲۰۱۴) .آینده زمین‌های کشاورزی تحت تاثیر ترکیبی مسیرهای اجتماعی-اقتصادی مشترک و گسترش شهری می‌باشد (Sadian و Shafizadeh-Moghadam ، ۲۰۲۵). در حالی که تغییرات اقلیمی می‌تواند به اراضی کشاورزی در مقیاس وسیع آسیب برساند، گسترش شهری، باغات و اراضی با کشت آبی با کیفیت بالا را تهدید می‌کند و خطرات جدی برای امنیت غذایی و پایداری ایجاد می‌نماید. این بینش‌ها برای دولت‌ها و تصمیم گیرندگانی که خطرات آینده ناشی از تغییرات اقلیمی و تبدیل زمین به اراضی کشاورزی را ارزیابی می‌کنند، بسیار حائز اهمیت است. رشد و توسعه شهری و تغییرات اقلیمی، زمین‌های کشاورزی را تهدید می‌کند. کشت دیم حداقل به ۲۵۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر بارندگی نیاز دارد (Sadian و Shafizadeh-Moghadam ، ۲۰۲۵). از این رو تشدید تغییرات اقلیمی می‌تواند به اراضی زراعی و باغات در مقیاسی وسیع تر از گسترش شهری، آسیب برساند. گسترش شهری معمولاً با تبدیل کاربری مزارع و باغات مجاور با کیفیت بالا، رخ می‌دهد. در مقابل این چالش، کشاورزی شهری مطرح است (Lwasa و Dubbeling ، ۲۰۱۵). در شهرهای سراسر جهان، کشاورزی شهری که در اینجا به عنوان کشاورزی درون شهری و حومه شهری در نظر گرفته می شود، نقش مهمی را در پایدارتر کردن شهرها و تغذیه بهتر ایفا می کند. بنابراین حفظ و مدیریت پروژه‌های کشاورزی به عنوان بخشی از زیرساخت‌های سبز شهری، ضروری است .

از طرفی با وقوع کم آبی ناشی از کاهش بارش‌ها به دلیل تغییرات اقلیمی، در کشورهای پرجمعیت، رقابت فزاینده‌ای بین مصارف صنعتی، انرژی، شرب و استفاده کشاورزی از آب مشاهده می‌شود. هنگامی که یک کشور با کمبود آب مواجه است، دولت‌های مرکزی و محلی تمایل دارند استفاده از آب کشاورزی را به نفع مصارف صنعتی، انرژی و شرب، محدود کنند که پیامدهای منفی مهمی برای تولید ملی غذا خواهد داشت (UN Water، ۲۰۰۷). در همین حال، مقادیر فزاینده‌ای از فاضلاب در شهرها تولید می‌گردد که تا معمولا حد زیادی در رودخانه‌ها، دریاچه‌ها یا دریا دفع می‌شود و متعاقبا اثرات منفی مهمی بر سلامت عمومی و اکولوژی شهری، از جمله آلودگی آبهای زیرزمینی و آبهای شیرین پایین دست شهرها دارد (Dubbeling و De Zeeuw، ۲۰۱۱).

تغییر الگوهای بارشی و کشاورزی

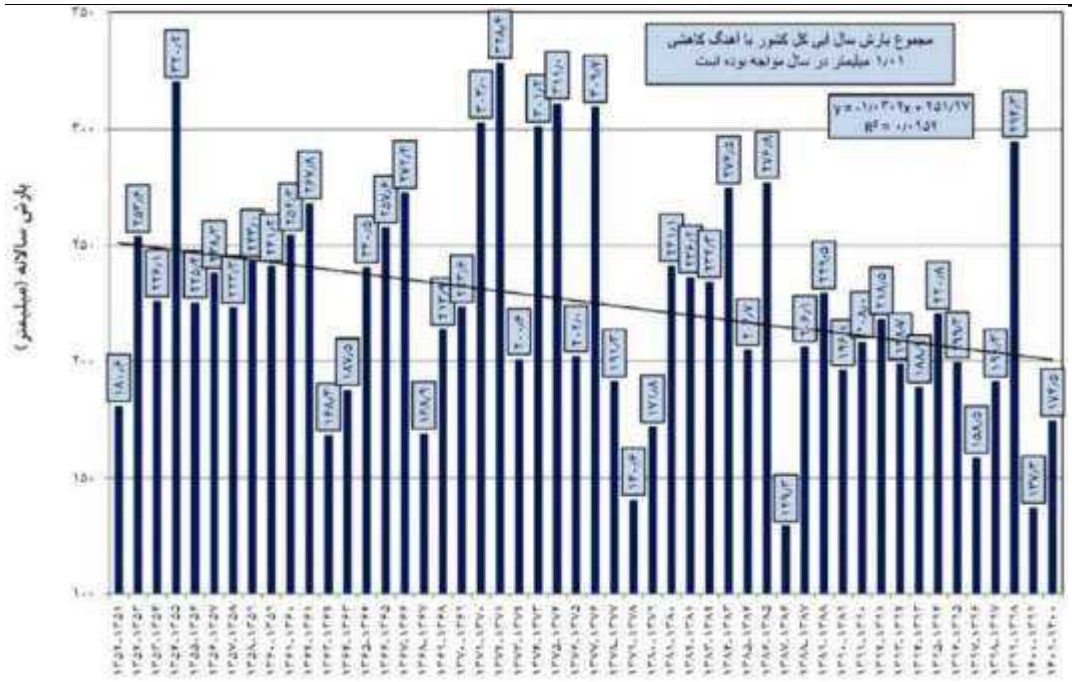
تغییرات اقلیمی بر شدت و فراوانی بارندگی بسیار تأثیرگذارند. مدل‌های اقلیمی کنونی نشان می‌دهند که افزایش میزان درجه حرارت، سیکل هیدرولوژی زمین را تشدید می‌کند و منجر به افزایش تبخیر می‌شود. با افزایش تبخیر، ممکن است طوفان‌های مکرر و شدیدتری رخ دهد که متعاقبا همچین رویدادهایی نیز منجر به تشدید خشکی برخی مناطق بویژه مناطق خشک و نیمه خشک می‌شوند. در نتیجه، چنین مناطقی ممکن است افزایش بارندگی و افزایش خطر سیل را نیز تجربه کنند. ایران نیز بعنوان کشوری با اقلیم خشک و نیمه خشک، با چنین معضلاتی درگیر است. هدف امنیت غذایی یک سنگ

بنای مهم و موضوع کلیدی برای توسعه پایدار جهانی است. در حال حاضر، تولید مواد غذایی در سراسر جهان پیشرفت قابل توجهی در ریشه کنی ناامنی غذایی و سوء تغذیه داشته است. با این حال، بسیاری از مردم به دلیل تأثیر عوامل مختلف مانند تغییرات اقلیمی شدید و تغییر الگوهای بارشی، درگیری‌های ژئوپلیتیکی در سال‌های اخیر هنوز با مشکلات تغذیه مواجه هستند. علاوه بر این، از دست دادن اراضی زراعی و توسعه شهرسازی، بر این اراضی تأثیر منفی داشته و فشار زیادی را بر جلوگیری از تخریب عملکردهای خدمات اکوسیستم و سازگاری با تغییرات اقلیمی وارد کرده است. این نیز به نوبه خود عدم قطعیت‌ها و چالش‌های جدیدی برای امنیت غذایی در کشور به همراه دارد. تغییرات اقلیمی و الگوهای بارشی باعث افزایش قیمت محصولات کشاورزی و متعاقباً افزایش واردات مواد غذایی و تاثیر منفی بر سطح خودکفایی غذایی کشور می‌شود.

تغییرات اقلیمی و الگوهای بارشی همچنین منجر به طولانی‌تر شدن فصل رشد محصولات زراعی نیز می‌شوند. پراکنش نامناسب زمانی و مکانی الگوهای بارشی ممکن است در منطقه‌ای سبب افزایش بارندگی و متعاقبا بروز سیل و آسیب به ریشه و ساختار خاک و در نتیجه کاهش تولید مواد غذایی شود. برعکس این حالت نیز ممکن است روی دهد به این صورت که کاهش بارندگی در برخی مناطق دیگر منجر به خشکسالی شود و با اثرگذاری منفی بر رشد و توسعه محصول، تولید مواد غذایی را کاهش دهد.

کشاورزی با رویکرد کشت محصولات مقاوم به خشکسالی

از آنجایی که مناطق بزرگ کشاورزی بیشتر در معرض کمبود آب قرار می گیرند، امنیت غذایی به ویژه در مناطقی که به کشاورزی دیم وابسته هستند در خطر است. محصولات مقاوم به خشکی راه حلی امیدوارکننده برای این موضوع ارائه می‌دهند و راهی برای حفظ بهره‌وری کشاورزی حتی در شرایط شدید خشکسالی ارائه می‌دهند. این محصولات یا به طور طبیعی تکامل یافته‌اند تا در آب و هوای خشک رشد کنند یا از نظر ژنتیکی اصلاح شده‌اند تا تحمل خود را در برابر خشکسالی افزایش دهند. همچنین این محصولات می‌توانند با وجود کاهش بارندگی، محصول پایداری تولید کنند و از تامین مواد غذایی مطمئن‌تر اطمینان حاصل کنند. بنابراین با توجه به شرایط کم آبی در کشور (شکل شماره ۱)، برنامه‌ریزی در این جهت می‌تواند در امنیت غذایی بسیار تاثیرگذار باشد. در شکل ۱ روند تغییرات بارش سال آبی کشور طی ۵۰ سال اخیر (از سال ۱۳۵۰ تا ۱۴۰۰) ارائه شده است که با توجه به این نمودار، میزان بارش‌ها در ۵۰ سال گذشته روند نزولی داشته و تفاوت‌های منطقه‌ای قابل توجهی نیز رخ داده است.



شکل ۱. روند تغییرات بارش سال آبی کشور طی ۵۰ سال اخیر (منبع، مرکز ملی اقلیم و مدیریت بحران خشکسالی، ۱۴۰۲)

دولت‌ها، مؤسسات تحقیقاتی و شرکت‌های خصوصی به‌طور فزاینده‌ای در توسعه و انتشار این محصولات برای مقابله با چالش‌های امنیت غذایی سرمایه‌گذاری می‌کنند. حرکت رو به جلو، ترکیبی از تکنیک‌های سنتی اصلاح نژاد، نوآوری‌های بیوتکنولوژیکی، و شیوه‌های کشاورزی پایدار کلیدی برای به حداکثر رساندن پتانسیل محصولات مقاوم به خشکی خواهد بود. در بسیاری از کشورهای در حال توسعه مانند ایران، کشاورزان ممکن است به دلیل موانع اقتصادی یا زیرساختی به بذرهای مقاوم به خشکی دسترسی نداشته باشند. دولت‌ها و سازمان‌های کشاورزی باید تلاش کنند تا اطمینان حاصل شود که کشاورزان خرده‌مالک می‌توانند این بذرها را به دست آورند و آموزش مناسب در جهت شیوه‌های صحیح کشت را دریافت کرده باشند. با ادامه نوآوری و حمایت از کشاورزان، این محصولات پتانسیل تغییر کشاورزی، تضمین امنیت غذایی و ارتقای پایداری زیست محیطی را دارند.

نقش دولت و بخش خصوصی در توسعه کشاورزی پایدار در شرایط حاضر

با طی بیش از حدود دو دهه از مباحث پیرامون توسعه پایدار، در تمامی پروژه‌های توسعه، صرفاً دیدگاه اقتصادی و ایجاد درآمد و بازده اقتصادی مد نظر بود. حمایت از کشاورزان یک نیاز اقتصادی نیست، بلکه مسئولیتی اجتماعی محسوب می‌شود که در راستای توسعه پایدار کشور نقش بسزایی دارد و کشاورزان باید از امکانات لازم بهره‌مند شوند تا بتوانند در تأمین امنیت غذایی کشور مؤثر باشند. از آنجایی که بین بخش کشاورزی و سایر بخش‌های اقتصادی کشور تفاوت‌های ساختاری قابل توجهی وجود دارد، شیوه خصوصی‌سازی در این بخش نیز با دیگر بخش‌ها متفاوت است. دولت در بخش‌های مختلف

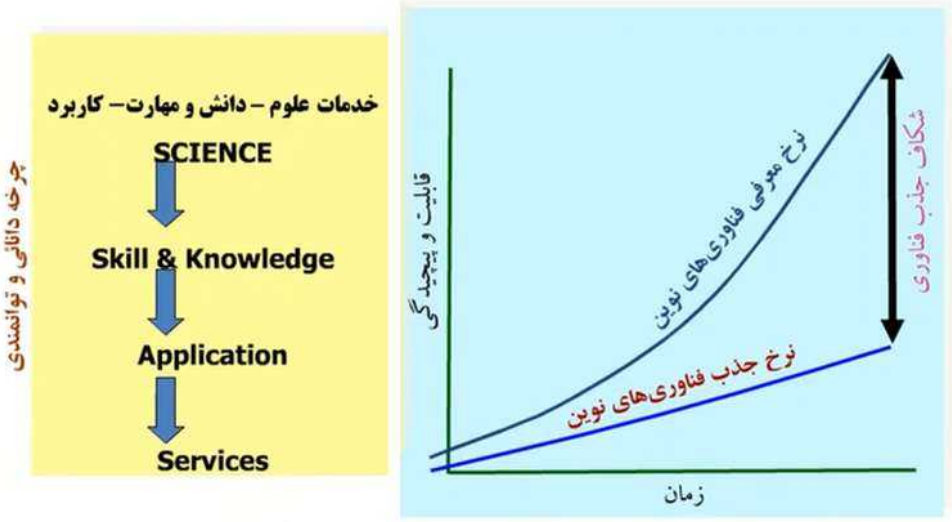
اقتصادی در اجرای سیاست‌های خصوصی‌سازی موفق‌تر از بخش کشاورزی بوده است. در این مدت عمده هدف دولت در اجرای تعدیل اقتصادی، قطع پرداخت یارانه و واگذاری فعالیت‌های دولتی به بخش خصوصی بوده و در بخش کشاورزی تنها به حذف یارانه اکتفا شده است. از علل اصلی عقب‌ماندگی بخش کشاورزی در کشورهای در حال توسعه نسبت به کشورهای توسعه یافته، این است که در کشورهای توسعه یافته بخش کشاورزی از سوی بخش صنعت، کاملاً مورد حمایت قرار می‌گیرد، اما در کشورهای در حال توسعه نه تنها چنین چیزی مصداقی ندارد، بلکه این بخش کشاورزی است که تا حدودی کاستی‌های بخش صنعت را جبران می‌نماید.

نقش فناوری‌های نوین در تقلیل اثرات منفی تغییرات اقلیمی بر کشاورزی

توسعه فناوری در چشم‌انداز آینده کشور جایگاه ویژه‌ای داشته و بسیار حائز اهمیت می‌باشد و بعنوان یکی از عوامل اصلی رشد اقتصادی، ارتقاء کیفیت زندگی و پیشرفت اجتماعی شناخته می‌شود. در دنیای مدرن تمام جنبه‌های زندگی انسان تحت تاثیر پیشرفت‌های فناوری قرار خواهد گرفت، بطوریکه بدون فناوری امکان پیشرفت در بسیاری از حوزه‌ها تقریبا غیر ممکن خواهد بود. کشاورزی، جنگلداری و کاربری زمین به طور مستقیم حدود ۱۸ درصد از انتشار گازهای گلخانه‌ای را تشکیل می‌دهند. با گسترش تجزیه و تحلیل به زنجیره کشاورزی-غذایی – (فرآوری، بسته بندی و...) - این رقم به ۲۵ درصد می‌رسد. علاوه بر این، طبق گفته دانشگاه Cornell (۲۰۲۱)، گرمایش جهانی از دهه ۱۹۶۰ تا کنون ۲۱ درصد بهره‌وری کشاورزی را کاهش داده است که نشان‌دهنده تاثیر گرمایش جهانی بر عملکرد کشاورزی و نتیجتا تضعیف امنیت غذایی می‌باشد (بررسی‌های تحقیقاتی دانشگاه Cornell، ۲۰۲۴).

سهم صرفا کشاورزی در انتشار گازهای گلخانه‌ای بطور مستقیم ۸.۵ درصد برآورد شده که ۱۴.۵ درصد بیشتر از تغییر کاربری زمین (عمدتاً جنگل زدایی در کشورهای در حال توسعه برای پاکسازی زمین برای تولید غذا) و همچنین متان تولید شده توسط حیوانات ناشی می‌شود (IPCC، ۲۰۱۸). فناوری اغلب به عنوان پاسخی برای بسیاری از مشکلات امروزی تلقی می‌شود، اما در حقیقت، تنها بخشی از راه حل و مکمل اقدامات دیگر است. فنآوری‌های حفاظت از منابع مانند کشاورزی حفاظتی، محصولات پوششی، مالچ پاشی، آبیاری قطره‌ای، آبیاری هوشمند مبتنی بر حسگرهای رطوبت خاک، برداشت آب باران، مدیریت مواد مغذی خاص سایت، نمودار رنگ برگ، کوددهی، و کشاورزی دقیق برای تغییر اقلیم حیاتی هستند. این فناوری‌ها با افزایش تولید مواد غذایی و جداسازی کربن خاک در مزرعه‌های مرسوم، پایداری طولانی مدت را تضمین می‌کنند (Karthik و همکاران، ۲۰۲۵). کشاورزی پیامدهای منفی بر تأثیرات تغییرات اقلیمی در کشور دارد و یک استراتژی متمرکزتر که هم از نظر اقتصادی و هم از نظر فنی از نظر اولویت‌ها برای استفاده از زمین، استفاده مؤثر از انرژی و تأمین غذا امکان‌پذیر است، به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و پایداری محیط‌زیست کمک می‌کند (Yang و همکاران، ۲۰۲۴). اگر کشاورزی و مشاغل مرتبط بتوانند بازده خود را افزایش دهند و در عین حال ضایعات و آسیب‌های زیست محیطی را به حداقل برسانند، برخی از اهداف توسعه پایدار سازمان ملل (SDGs) ازجمله به صفر رساندن گرسنگی؛ مصرف و تولید مسئولانه؛ کاهش اثرات منفی تغییرات اقلیمی و زندگی در شرایط خشکی محقق خواهد شد. فناوری به تنهایی

شاید قادر به کنترل یا تقلیل اثرات منفی تغییرات اقلیمی نباشد ولی ترکیب "فناوری" با "پایداری" می‌تواند بعنوان راهکار، مناسب باشد. بنابراین نیاز است تغییر به سمت کشاورزی پایدارتر و در مقیاس بزرگ انجام گیرد. رشد تکنولوژی‌ها در کشور باید از نوع فناوری کاهنده تولید CO2 باشد تا حداقل منجر به تشدید شرایط نامناسب اقلیمی نگردد. در این راستا می‌توان استفاده از سنسورهای رطوبت برای آبیاری دقیق را نام برد که استفاده از آب و انرژی را بهینه می‌کنند و کارایی فتوسنتز را افزایش می‌دهند (IPCC، ۲۰۱۸). همچنین می‌توان با استقرار حسگرهای اینترنت اشیا در سراسر یک مزرعه و اتصال به یک شبکه خصوصی یا شبکه تلفن همراه محلی، مزارع می‌توانند آب را کنترل کرده و سطوح مواد مغذی را در خاک آزمایش کنند. این تضمین می‌کند که کودها و مواد شیمیایی گران قیمت فقط در صورت لزوم برای افزایش عملکرد پراکنده می‌شوند (IPCC، ۲۰۱۸).



شکل (۲). چالش جذب فناوری در کشور (منبع Dataquest)

کشاورزان با اتخاذ شیوه‌های کشاورزی پایدار مانند تناوب زراعی، خاک‌ورزی حفاظتی و زراعت چوب، می‌توانند تأثیر مثبتی بر تنوع زیستی داشته و انعطاف‌پذیری اکوسیستم را ارتقا و میزان تولید CO2 را کاهش دهند. البته انتقال از شیوه‌های مرسوم به روش‌های پایدارتر تولید مواد غذایی، با موانع زیادی روبرو می‌باشد، از محدودیت‌های مالی گرفته تا دسترسی محدود به اطلاعات و منابع، و سیستم‌ها و چارچوب‌های قانونی سخت‌گیرانه، که بسیاری از اوقات می‌توانند حتی تطبیق این رویه‌ها را با مشکل مواجه کنند.

سیاست‌های کشاورزی کشور در انطباق با تغییرات اقلیمی

از مشکلات عمده و اساسی موجود در کشور، چند متولی بودن حوزه سیاست‌گذاری، علم و فناوری است. در این حوزه از جمله موارد لازم و مهم، اولویت‌بندی‌ها می‌باشد. به این منظور نیاز است در کشور هر منطقه‌ای بر اساس نیاز و پتانسیل‌های موجود، آمایش بررسی گردد. نظارت مداوم بر خشکسالی با تحلیل الگوهای بارندگی و دما، مدیریت پایدار منابع آب و

برنامه‌ریزی برای کشاورزی را ممکن می‌سازد. بعنوان مثال شناسایی منشأ و مسیر گردوخاک از طریق داده‌های هواشناسی، به کاهش تأثیرات منفی بر سلامت عمومی و اختلالات حمل‌ونقلی کمک شایانی می‌کند. پیش‌بینی دقیق توفان‌ها با استفاده از فناوری‌های پیشرفته (استفاده از تکنولوژی‌های روز مانند انواع ماهواره‌ها، نرم‌افزارهای تخصصی، هوش مصنوعی و مدلسازی عددی)، به تخلیه بهنگام مناطق پرخطر و کاهش تلفات منجر می‌گردد.

پایش هواشناسی نقشی کلیدی در سازگاری با تغییرات اقلیمی دارد و کمک می‌کند تا زیرساخت‌های مقاوم‌تر در برابر بلایای جوی طراحی شود. داده‌های هواشناسی به بهبود برنامه‌ریزی شهری و توسعه سیاست‌های محیط‌زیستی برای مقابله با تشدید مخاطرات طبیعی مانند سیلاب‌های ناگهانی می‌انجامند. همکاری بین‌المللی در پایش هواشناسی، امکان مقابله مؤثر با مخاطرات فرامرزی مانند تغییرات اقلیمی را فراهم می‌آورد. از جمله راهکارهایی که در جهت انطباق تغییرات اقلیمی با وضعیت منابع طبیعی و زراعی کشور هست می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

استفاده از فناوری‌های نوین از جمله هوش مصنوعی، اینترنت اشیاء، مدل‌های اقلیمی جدید و متناسب با شرایط کشور

بومی‌سازی مدل‌های پیش‌بنی منطقه‌ای (RCMها)

توجه به آمایش سرزمین و سیاستگذاری و توسعه بر اساس پتانسیل‌های اقلیمی

بکارگیری داده و اطلاعات و پایش منطقه‌ای تغییراقلیم و ارزیابی اثرات احتمالی

اتخاذ راهبردهای مناسب سازگاری

کاهش تلفات کشاورزی و مصرف بهینه آب انرژی در بخش‌های مختلف بویژه بخش کشاورزی (پرمصرف‌ترین و پرخطرترین بخش)

فرهنگ‌سازی عمومی و توجه لازم به منابع آلاینده (هوا، آب، خاک) و استفاده و بهره‌برداری صحیح

آگاهی‌بخشی و شبکه‌سازی برای کاهش تغییرات اقلیمی

توسعه کشاورزی هوشمند به اقلیم و توسعه سیستم‌های هشدار (هشدار سیل و خشکسالی)

اقدامات آتی در جهت پایداری زراعی در مقابل تغییرات اقلیمی

اجتناب از توسعه اراضی زراعی و باغات به هر قیمتی و در هر اقلیمی که تناسب کافی را ندارد (مثلا اصلاح الگوی کشت در یزد در رابطه با کشت هندوانه که محصول بسیار آب‌بری هست با محصولات کم مصرف‌تر و سازگارتر با کم‌آبی، جایگزین گردد، یا توسعه صنعت کاشی در این استان که یک صنعت آب‌بری بوده و برای این استان با توجه به کم‌آبی آن، مناسب نیست) می‌تواند در این راستا بسیار نتیجه‌بخش واقع شود. در این زمینه، مواردی که می‌توانند تاثیر چشم‌گیر و مثبتی برجای گذارند عبارتند از:

اجتناب از اصرار بر خودکفایی در زمینه تولید هر نوع محصولی در کشور (واردات برخی محصولات، با صرفه‌تر از تولید آنها می‌باشد) (جعفرزاده و شفقتی، ۱۴۰۲)

اصلاح و بررسی الگوی کشت، به روز رسانی آن بر اساس تغییرات اقلیمی

تمرکز بر بخش اجرای صحیح تصمیمات اتخاذی

توجه در جهت توسعه و استفاده از فناوری‌های نوظهور

توجه به آمایش سرزمین و همبستهای فراپایداری

استفاده از مطالعات و پژوهش‌های انجام شده دانشگاهی و پژوهشی در زمینه مطالعات اقلیمی و زراعی، به‌ویژه نتایج استفاده از مدل‌های مناسب

ارتباط بین سازمان‌های مربوطه در زمینه تهیه و جمع‌آوری داده‌های صحیح و به اشتراک‌گذاری آنها جهت دستیابی به دید جامع از شرایط موجود

برنامه‌ریزی برمبنای واقعیت و آنچه هست، نه صرفا محاسبات

بازیافت ضایعات زراعی و استفاده مناسب و حداکثری از آن

فرهنگ‌سازی در زمینه اهمیت و هزینه صرف شده برای تولید محصول جهت پیشگیری از مصرف نادرست آن در مقیاس کوچک و بزرگ

عدم اتلاف ذخایر محدود زیرزمینی به قیمت تولید محصولاتی در جهت صادرات

استفاده از روش‌های نوین زراعی و آبیاری

تهیه صندوق ضرر و زیان ناشی از تغییرات اقلیمی

تلاش در جهت رفع شکاف‌های موجود در آمار و ارقام اقلیمی و زراعی

اجبار تهیه گزارشات زودهنگام از مراجع مرتبط، از آخرین وضعیت موجود

نتیجه‌گیری

با توجه به شرایط موجود، طی سال‌های اخیر، تمرکز اکثر دولت‌ها بر حفظ و تقویت منابع طبیعی و منابع آبی کشور و همچنین رعایت الگوی کشت بوده و در این راستا اقدامات ویژه‌ای برای هر بخش و سازمان مربوطه تعریف و معین شده است. چنانچه وضعیت نه چندان مناسب فعلی و بحران‌های حاکم و تغییرات اقلیمی مورد توجه جدی قرار نگیرند، برنامه‌ریزی

کاربردی و متناسب با شرایط موجود در جهت پذیرش آنچه در واقع هست انجام نشود، آمار و اطلاعات صحیح و کافی تهیه نشود، از نیروهای متخصص در جایگاه مناسب استفاده نگردد، صرفا به ارائه مکتوبات و یکسری مصوبات که در حقیقت اجرا نمی‌شوند، اکتفا گردد، در جایی که باید اعتبار مناسب صرف نشود، در تهیه و به روزرسانی ابزار و تکنولوژی‌های جدید و مناسب کوتاهی شود، به آینده بهره‌برداری‌ها و مدیریت‌های نادرست بی اعتنایی شود، آینده‌ای بسیار وحشتناک و نه چندان بعید، در انتظار خواهد بود.

منابع

بیرانوند، ا.، گندمکار، ا.، عباسی، ع. و خداقلی، م. ۱۴۰۱. تحلیل آماری- سینوپتیکی بارش‌های سنگین منجر به سیلاب فروردین ۱۳۹۸ در حوضه آبریز درود بروجرد. مخاطرات محیط طبیعی، ۱۱ (۳۲)، ۱۶۹- ۱۸۸.

پناهی، ع.، حسینی، م.، خرم آبادی، ف. و قوی بنیاد، ف. ۱۴۰۰. بررسی روند تغییرات زمانی- مکانی بارش پاییزه شمال غرب کشور. پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، ۲ (۸)، ۶۷-۸۲.

جعفرزاده، م. س. و شفقتی، م. ۱۴۰۲. قابلیت اجرایی برخی راهکارها جهت عبور از بحران کم آبی در ایران. دوازدهمین همایش ملی سامانه‌های سطوح آبگیر باران، دانشگاه هرمزگان.

حجازی‌زاده، ز.، کربلایی دریی، ع. و کاظمی آذر، م. ۱۴۰۳. واکاوی اثر تغییر اقلیم بربارش‌های حدی در استان آذربایجان شرقی. جغرافیا (فصلنامه علمی انجمن جغرافیایی ایران)، ۲۲ (۸۳)، ۱-۲۰.

درخشنده، ع.، خورانی، ا. و رضازاده، م. ۱۴۰۲. روندیابی بارش در ایران بر اساس داده‌های .MERRA2 فیزیک زمین و فضا، ۴۹ (۳)، ۶۶۹-۶۸۳.

دیرمجائی، آ.، اکبری، م. ۱۴۰۴. مروری بر مطالعات شبیه‌سازی تغییر آب و هوا در ایران. پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، ۶ (۲۱)، ۲۳-۴۸.

کریمی، م. و حیدری، س. ۱۴۰۲. تغییرپذیری و روند تغییرات شدت-گستره‌ی ترسالی و خشکسالی در ایران. مخاطرات محیط طبیعی، ۱۲ (۳۶)، ۱۲۹-۱۵۰.

لطفی قرانچای، ش.، اکبری ازیرانی، ط.، شکیبا، ع.، ربانی، ف. و دشت بزرگی، آ. ۱۴۰۲. تحلیل سینوپتیک اثر کم فشارهای بریده در بارش سنگین ایران. جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۱۲ (۴)، ۲۰۵- ۲۳۲.

Droulia, F., & Charalampopoulos, I. (2021). Future climate change impacts on European viticulture: A review on recent scientific advances. Atmosphere, 12(4), 495.

Dubbeling, M. (2014). Urban agriculture as a climate change and disaster risk reduction strategy. UA Magazine, 27, 3-7.

Dubbeling, M., & De Zeeuw, H. (2011). Urban agriculture and climate change adaptation: ensuring food security through adaptation. In Resilient Cities: Cities and Adaptation to Climate Change-Proceedings of the Global Forum 2010 (pp. 441-449). Springer Netherlands.

Grigorieva, E., Livenets, A., & Stelmakh, E. (2023). Adaptation of agriculture to climate change: A scoping review. Climate, 11(10), 202.

IPCC, 2018a: Global Warming of 1.5°C IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5°C Above Pre-Industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)].

Jiang, S., Chen, S., Xiao, Q., & Fang, Z. 2024. Research on food security issues considering changes in rainfall. Scientific Reports, 14(1), 19698.

Karthik, M. N., Parasuraman, P., Thavaprakaash, N., Poornimmal, R., & Vincent, S. (2025). Resource Conservation Technologies for Mitigating Climate Change Impacts in Agriculture: A Review. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 1-17.

Larrea, N. 2024. Agricultural technology in the face of climate change. development bank of Latin America and the Caribbean. https://www.caf.com/en/blog/agricultural-technology-in-the-face-of-climate-change/

Lwasa, S., & Dubbeling, M. (2015). Urban agriculture and climate change. In Cities and Agriculture (pp. 210-235). Routledge.

Rosa, L. (2022). Adapting agriculture to climate change via sustainable irrigation: biophysical potentials and feedbacks. Environmental Research Letters, 17(6), 063008.

Sadian, A., & Shafizadeh-Moghadam, H. (2025). The future of agricultural lands under the combined influence of shared socioeconomic pathways and urban expansion by 2050. Agricultural Systems, 224, 104234.

Sharofiddinov, H., Islam, M., & Kotani, K. (2025). Adaptation indicator to climate change and farm sizes in agriculture: A reflection of farming culture and history. Ecological Indicators, 170, 112976.

UN Water and (FAO) United Nations Food and Agriculture Organisation (2007) Coping with water scarcity. UN Water, Available via /www.fao.org/nr/water/docs/escarcity.pdf

Yang, Y., Tilman, D., Jin, Z., Smith, P., Barrett, C. B., Zhu, Y. G., ... & Zhuang, M. (2024). Climate change exacerbates the environmental impacts of agriculture. Science, 385(6713), eadn3747.

مقایسه کارآیی الگوریتم‌های آموزشی شبکه عصبی مصنوعی در برآورد تبخیر-تعرق پتانسیل

مهسا حسنپورکاشانی [۱]، ساحل رسولی‌آذر[۲]، نازنین چمنیان[۲]

۱- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده علوم و فناوری کشاورزی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده علوم و فناوری کشاورزی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول: m.hkashani@uma.ac.ir

چکیده

در این پژوهش، مقادیر تبخیر-تعرق پتانسیل با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی در دو ایستگاه زابل و تهران با اقلیم متفاوت مدل‌سازی شدند. بدین منظور، از داده‌های هواشناسی متعددی مانند دمای حداقل و حداکثر، تشعشع خورشیدی، رطوبت، سرعت باد و ساعات آفتابی استفاده گردید. همچنین، الگوریتم‌های آموزشی متعددی برای اجرای مدل شبکه عصبی مصنوعی بکار برده شده و کارآیی آن‌ها با استفاده از چند معیار آماری مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که در ایستگاه نیمه‌خشک تهران بهترین الگوریتم آموزشی، الگوریتم trainlm با تعداد نرون ۶ در لایه پنهان با RMSE برابر ۰/۱۸۸ و R^2 برابر ۰/۹۸۲ است. ضعیف‌ترین الگوریتم در ایستگاه تهران نیز الگوریتم trainoss با تعداد ۶ نرون در لایه پنهان با RMSE برابر ۰/۲۱۹ و R^2 برابر ۰/۹۷۶ بود. در ایستگاه خشک زابل، الگوریتم trainlm با ۴ نرون در لایه پنهان و با RMSE برابر ۰/۱۲۹ و R^2 برابر ۰/۹۹۱ بهترین الگوریتم آموزشی بود. همچنین، الگوریتم traingdx با مقادیر RMSE برابر ۰/۲۲۶ و R^2 برابر ۰/۹۷۲ دارای کمترین دقت و کارآیی بود.

کلید واژه‌ها : تبخیر-تعرق، شبکه عصبی مصنوعی، الگوریتم‌های آموزشی، زابل، تهران.

۱- مقدمه

در فرآیند تبخیر، آب از مایع به گاز تبدیل شده و وارد جو می‌شود. تعرق نیز، فرآیندی است که در آن گیاهان بخار آب را از طریق منافذ کوچک در برگ‌های خود به نام روزنه به اتمسفر آزاد می‌کنند. همانطور که می‌دانیم، بخش کشاورزی بزرگترین مصرف‌کننده آب در بسیاری از کشورهای جهان است. تخمین زده می‌شود که در کل جهان ۷۱ درصد آب در بخش کشاورزی استفاده می‌شود. این میزان در کشورهای کم‌درآمد به ۸۰ یا ۹۰ درصد می‌رسد. امروزه رشد جمعیت از یک سو، نیاز بیش از پیش به منابع آب شیرین و کمبود بارش از سوی دیگر سبب شده است متخصصان به دو رویکرد تولید عمده آب و استفاده بهینه از منابع آبی توجه زیادی داشته باشند (بختیاری و همکاران، ۱۳۹۴). از طرفی ایران کشوری با متوسط ریزش‌های جوی ۲۵۰ میلی‌متر است و در زمره مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان طبقه‌بندی می‌شود (کرباسی، ۱۳۹۵). برنامه‌ریزی، بهینه‌سازی و شبیه‌سازی در حوزه منابع آب نیازمند شناسایی و برآورد صحیح پارامترهای مختلفی از جمله تبخیر و تعرق است. تبخیر-تعرق یک فرایند کلیدی تعادل آب و همچنین یک عنصر مهم از تعادل انرژی است. بنابراین برآورد دقیق آن نه تنها اهمیت حیاتی برای مطالعه تغییرهای اقلیمی و ارزیابی منابع آب دارد، بلکه دارای ارزش بسیار کاربردی در مدیریت آب زراعی، پیش‌بینی و نظارت بر خشک‌سالیِ توسعه و بهره برداری از منابع آبی موثر و غیره می‌باشد. معادله پنمن- مانتیث، تبخیر و تعرق پتانسیل (ET0) را از داده‌های هواشناسی به عنوان جایگزینی برای اندازه‌گیری مستقیم تبخیر و تعرق تقریب می‌کند. این معادله به‌طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد و توسط فائو برای مدل‌سازی تبخیر و تعرق بالقوه استخراج شده است. با این‌حال، استفاده از این معادله یا سایر معادلات تجربی نیازمند دسترسی به انواع مختلف داده‌های هواشناسی می‌باشد که می‌تواند باعث ایجاد مشکل در اجرای آن‌ها در برخی مناطق با کمبود داده شود. بمنظور حل این مشکل، امروزه مدل‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین مانند شبکه عصبی مصنوعی به‌طور گسترده‌ای در مطالعات مربوط به پیش‌بینی‌ها کاربرد گسترده‌ای پیدا کرده‌اند (رحیمی خوب، ۲۰۰۸). شبکه عصبی مصنوعی یک ابزار بسیار قوی در مدل‌سازی پدیده‌های غیرخطی و پیچیده است زیرا این شبکه از ساختار و عملکرد مغز انسان الهام می‌گیرد.

در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی در زمینه برآورد تبخیر و تعرق با استفاده از مدل‌های هوشمند انجام شده است. احمدزاده قره‌گویز و همکاران (۱۳۸۹) به برآورد تبخیر-تعرق مرجع در مناطق بسیار خشک ایران به کمک شبکه-های عصبی و سیستم عصبی فازی پرداختند. داده‌های مورد استفاده در این تحقیق داده‌های دما، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و سرعت باد در ارتفاع دو متری بودند. نتایج نشان داد که شبکه‌های عصبی عملکرد بهتری نسبت به روش‌های تجربی در هر سه ایستگاه کرمان، اصفهان و یزد داشت. نوری و همکاران (۱۳۹۲) تبخیر و تعرق پتانسیل را به کمک شبکه عصبی و مدل‌های تجربی ماکینگ، هارگریوز و بلانی کریدل در مشهد برآورد کردند. شبکه‌های مختلفی با سناریوهای گوناگون طراحی شدند. نتایج حاکی از برتری شبکه عصبی نسبت به مدل‌های تجربی بود. قربانی و

همکاران (۲۰۱۶)، مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی را برای برآورد تبخیر و تعرق در منطقه‌ای کشاورزی در ایران مورد استفاده قرار دادند. نتایج نشان داد که مدل شبکه عصبی نسبت به مدل‌های سنتی مانند روش‌های آماری، عملکرد بهتری در پیش‌بینی تبخیر و تعرق دارد. ژانگ و همکاران (۲۰۱۸)، از شبکه‌های عصبی مصنوعی برای برآورد تبخیر و تعرق استفاده نمودند. نتایج نشان داد که مدل شبکه عصبی نسبت به مدل‌های سنتی مانند روش پنمن-مانتیث، دقت بالاتری دارد و قادر است تغییرات زمانی و مکانی را بهتر پیش‌بینی کند. خسروی و همکاران (۲۰۱۹)، از مدل‌های ماشین یادگیری مانند درخت تصمیم و ماشین بردار پشتیبانی برای برآورد تبخیر و تعرق در مناطق خشک و نیمه‌خشک استفاده کردند. نتایج نشان داد که این مدل‌ها توانایی خوبی در پیش‌بینی تبخیر و تعرق در شرایط مختلف دارند و می‌توانند جایگزین مناسبی برای مدل‌های فیزیکی باشند. رنجبر و همکاران (۲۰۱۹)، مدل‌های ماشین یادگیری مانند درخت تصمیم و ماشین بردار پشتیبانی را برای برآورد تبخیر و تعرق در یک منطقه خشک و نیمه‌خشک مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که این مدل‌ها توانایی قابل توجهی در پیش‌بینی تبخیر و تعرق دارند و می‌توانند جایگزین روش‌های سنتی شوند. لی و همکاران (۲۰۲۰)، از مدل‌های شبکه‌های عصبی کانولوشنی برای برآورد تبخیر و تعرق استفاده نمودند. در نهایت، این روش توانست با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های هواشناسی، دقت قابل توجهی در پیش‌بینی‌ها به دست آورد. خسروی و همکاران (۲۰۲۰) استفاده از شبکه‌های عصبی عمیق را برای برآورد تعرق واقعی در یک منطقه کشاورزی انجام دادند. نتایج نشان داد که مدل‌های عمیق نسبت به مدل‌های ساده‌تر دقت بالاتری دارند و قابلیت بهتری در یادگیری الگوهای پیچیده دارند. علیزاده و همکاران (۲۰۲۱)، از الگوریتم‌های یادگیری عمیق و شبکه‌های عصبی پیشرفته برای برآورد تبخیر و تعرق در مناطق کشاورزی استفاده کردند. نتایج نشان داد که این مدل‌ها می‌توانند با دقت بالا، اثرات تغییرات اقلیمی و پارامترهای هواشناسی را در برآورد تبخیر و تعرق لحاظ کنند. محمدی و همکاران (۲۰۲۲) مدل‌های هوشمند مبتنی بر الگوریتم‌های ژنتیک و ماشین‌های یادگیری را برای برآورد تبخیر و تعرق در مناطق مختلف ایران مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که ترکیب الگوریتم‌های ژنتیک با مدل‌های هوشمند می‌تواند بهبود دقت برآورد را فراهم کند.

همانطور که از مطالعات پیشین مشخص است مدل شبکه عصبی مصنوعی عملکرد موفقیت‌آمیزی در برآوردهای تبخیر-تعرق نشان داده است. با وجود این، در این مطالعات عملکرد الگوریتم‌های مختلف آموزشی شبکه عصبی کمتر مورد بررسی واقع شده است. لذا در این تحقیق، به بررسی کارآیی چند الگوریتم آموزشی شبکه عصبی در دو اقلیم مختلف زابل (خشک) و تهران (نیمه‌خشک) پرداخته می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

شهر تهران با اقلیم گرم و نیمه‌خشک در ناحیه مرکزی ایران (شکل ۱) و در موقعیت جغرافیایی ۵۱ درجه و ۶ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۳۸ دقیقه طول شرقی و ۳۵ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۵۱ دقیقه عرض شمالی واقع شده است. این شهر دارای ارتفاع از ۱۰۵۰ متر تا ۱۸۰۰ متر از سطح دریاهای آزاد می‌باشد. میانگین دمای حداقل ماهانه و میانگین دمای

حداکثر ماهانه و میانگین بارندگی سالانه آن در طی سال‌های ۱۳۶۳ تا ۱۳۹۹ به ترتیب برابر ۱۵- و ۴۳ درجه سانتی‌گراد و ۲۴۶ میلیمتر است.

شهر زابل با اقلیم گرم و خشک در ناحیه جنوب شرق ایران (شکل ۱) و در موقعیت جغرافیایی ۳۱ درجه و ۲ دقیقه عرض شمالی و ۶۱ درجه و ۳۹ دقیقه طول شرقی واقع شده است. این شهر جزئی از حوضه آبخیز هامون است که دارای ارتفاع متوسط ۴۸۹/۲ متر از سطح دریاهای آزاد و مساحت ۳۴۴ کیلومترمربع می‌باشد. میانگین دمای حداقل ماهانه و میانگین دمای حداکثر ماهانه و میانگین بارندگی سالانه آن در طی سال‌های ۱۳۶۳ تا ۱۳۹۹ به ترتیب برابر ۲۲ و ۳۷ درجه سانتی‌گراد و ۷۳ میلیمتر است.

در پژوهش حاضر، داده‌ها و اطلاعات مربوط به دو ایستگاه هواشناسی کشور از سازمان هواشناسی کل کشور اخذ گردید. آمار و اطلاعات هواشناسی موجود شامل پارامترهای دمای میانگین، دمای کمینه، دمای بیشینه، میانگین رطوبت نسبی، رطوبت نسبی کمینه، رطوبت نسبی بیشینه، ساعات آفتابی و سرعت باد در مقیاس ماهانه می‌باشد. طول دوره آماری داده‌ها شامل ۳۴ سال می‌باشد.

دقت و عملکرد مدل‌های برآورد تبخیر و تعرق بر اساس شاخص‌های آماری ارزیابی می‌شوند. در این مطالعه، دو معیار ارزیابی شامل ریشه میانگین مربعات خطا (Root Mean Square Error- RMSE) و ضریب تعیین (Determination Coefficient- R^2) برای بررسی دقت مدل‌ها استفاده‌شده است:

(۱)

$$\mathbf{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - O_i)^2}{n}}$$

(۲)

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^{n}(P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^{n}(O_i - \bar{O})^2}} \right)^2$$

که در آن، P_i و O_i بترتیب امین مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی تبخیرتعرق پتانسیل، $\bar{P}$ و $\bar{O}$ بترتیب میانگین مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی تبخیرتعرق پتانسیل و n تعداد داده‌ها می‌باشد.



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه

۲-۲- مدل شبکه عصبی مصنوعی

شبکه‌های عصبی مصنوعی یک سیستم پردازشگر اطلاعات توده‌ای هستند که به صورت موازی قرار گرفته‌اند و عملکردی شبیه شبکه عصبی مغز انسان دارند. همان‌گونه که مغز انسان می‌تواند با توجه به مسائل قبلی و مسائل از پیش یادگرفته، مسائل جدید را تحلیل و تجزیه نماید. شبکه‌های عصبی نیز در صورت آموزش قادرند بر مبنای اطلاعاتی که به ازای آن‌ها آموزش دیده‌اند، جواب‌های قابل قبول ارائه دهند و نیز می‌توان از آن‌ها به طور نامحدود در ارائه جواب به اطلاعاتی که قبلاً با آن‌ها مواجه نبوده‌اند، استفاده نمود. حدود ۹۰ ٪ شبکه‌هایی که در مسائل هیدرولوژی کاربرد دارند از نوع شبکه‌های پیشرو و شبکه پرسپترون چندلایه هستند. ساختار این شبکه متشکل از سه لایه ورودی، پنهانی و خروجی است که روی هر یک از لایه‌ها نرون‌هایی برای پردازش اطلاعات وجود دارند. تعداد نرون‌های موجود در لایه ورودی و خروجی بستگی به نوع مسئله دارد ولی تعداد نرون‌های لایه پنهان با سعی و خطا به‌دست می‌آید. یکی از عواملی که در میزان دقت نتایج به‌دست آمده از شبکه عصبی و عملکرد آن نقش مهمی را ایفا می‌کند، توابع آموزشی شبکه عصبی می‌باشد. در این تحقیق، تعداد ۴ تابع آموزشی مختلف شامل trainlm، traingdx، trainscg و trainoss برای آموزش مدل شبکه عصبی در هر دو ایستگاه زابل و تهران بکار برده شدند. در ادامه هر یک از توابع فوق بطور کوتاه توضیح داده می‌شوند.

تابع آموزشی traingdx یک نوع الگوریتم آموزش شبکه‌های عصبی است که از خانواده الگوریتم‌های پس‌انتشار (Backpropagation) با نرخ یادگیری متغیر بهره می‌برد. این الگوریتم توسعه‌یافته الگوریتم traingd با نرخ یادگیری ثابت است و هدف از توسعه آن بهبود همزمان همگرایی و جلوگیری از گیرکردن در مینیمم‌های محلی است. این الگوریتم تا زمانی‌که وزن‌ها، ورودی شبکه و تابع انتقال، تابع مشتق داشته باشند می‌تواند هر نوع شبکه‌ای را آموزش دهد.

تابع آموزشی trainscg وزن‌ها و خطاهای شبکه را مطابق با روش گرادیان مزدوج (توأم) مقیاس شده (Scaled Conjugate Gradient) به‌روزرسانی می‌کند و طوری طراحی شده است که از جستجوی خطی زمان‌بر دوری کند. این الگوریتم بسیار پیچیده بوده و اساس کار آن ترکیب دو الگوریتم شیب توأم و لونبرگ مارکوآرت است. این الگوریتم برای آموزش شبکه‌های عصبی پرکاربرد است و به دلیل سرعت بالا و کارایی مناسب، در مسائل بهینه‌سازی و یادگیری ماشین مورد استفاده قرار می‌گیرد. از جمله ویژگی‌های مهم این الگوریتم، می‌توان به سرعت بالا، نیاز کم به تنظیم پارامترهای زیاد و مناسب برای مسائل با داده‌های بزرگ و شبکه‌های عمیق اشاره کرد.

تابع آموزشی trainoss (One step secant) یک روش شبه نیوتن با فضا و محاسبات کمتری است که در واقع پلی بین روش‌های شیب توأم و شبه نیوتن می‌باشد. این الگوریتم را می‌توان یک مصاحبه بین الگوریتم‌های شبه نیوتن و شیب توأم در نظر گرفت که معمولاً سریع‌تر و در تعداد تکرار کمتری همگرا می‌شود.

تابع آموزشی trainlm نوعی تابع آموزشی است که در آن وزن‌ها و خطاهای شبکه بر طبق الگوریتم بهینه‌سازی لونبرگ-مارکوارت به‌روزرسانی می‌گردد. trainlm که مخفف "Levenberg-Marquardt backpropagation" است، یکی از الگوریتم‌های آموزش شبکه‌های عصبی در نرم‌افزار MATLAB است. این الگوریتم برای آموزش شبکه‌های عصبی پرکاربرد است و به خصوص در مسائلی که نیاز به دقت بالا و سرعت آموزش بالایی دارند، موثر است. این الگوریتم به دلیل بهره‌گیری از حل معادلات خطی در هر تکرار، نسبت به سایر الگوریتم‌ها سریع‌تر است. در مجموع، trainlm یکی از بهترین گزینه‌ها برای آموزش سریع و دقیق شبکه‌های عصبی کوچک است، اما برای شبکه‌های بزرگ ممکن است نیاز به الگوریتم‌های دیگری باشد که حافظه کمتری مصرف کنند.

۳- نتایج و بحث

بمنظور پیش‌بینی تبخیر و تعرق در دو ایستگاه زابل و تهران، مدل شبکه عصبی مصنوعی با استفاده از الگوریتم‌های آموزشی trainlm، traingdx، trainscg و trainoss در محیط متلب اجرا گردید. بدین منظور، ابتدا داده‌های هواشناسی به دو قسمت ۸۰ درصد و ۲۰ درصد بترتیب برای آموزش و تست شبکه عصبی تقسیم‌بندی شده و نرمالیزه گردیدند. به منظور تعیین بهترین ترکیب ورودی از متغیرهای هواشناسی مختلف در مدل شبکه عصبی، از الگوریتم رلیف استفاده گردید و برای هر ایستگاه سه متغیر هواشناسی موثر در برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل انتخاب شد. بمنظور ارزیابی مقادیر برآوردی تبخیر و تعرق با الگوریتم‌های مختلف، ابتدا مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل با استفاده از معادله پنمن-مانتیث (به عنوان معادله مرجع) محاسبه شده و بعنوان مقادیر واقعی تبخیر و تعرق پتانسیل در نظر گرفته شدند. جدول (۱) مقادیر معیارهای عملکرد جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تعیین (R^2) را در هر دو ایستگاه زابل و تهران در مرحله تست مدل شبکه عصبی نشان می‌دهد. با توجه به جدول (۱)، مشخص می‌شود که در ایستگاه تهران بهترین الگوریتم آموزشی، الگوریتم trainlm با تعداد نرون ۶ در لایه پنهان با RMSE برابر ۰/۱۸۸ و R^2 برابر ۰/۹۸۲ است. ضعیف‌ترین الگوریتم در ایستگاه تهران نیز الگوریتم trainoss با تعداد ۶ نرون در لایه پنهان با RMSE برابر ۰/۲۱۹ و R^2 برابر ۰/۹۷۶ می‌باشد. در ایستگاه زابل،

الگوریتم trainlm با ۴ نرون در لایه پنهان و با RMSE برابر ۰/۱۲۹ و R^2 برابر ۰/۹۹۱ بهترین الگوریتم آموزشی است. همچنین، الگوریتم traingdx با مقادیر RMSE برابر ۰/۲۲۶ و R^2 برابر ۰/۹۷۲ دارای کمترین دقت و کارآیی می‌باشد. همانطور که انتظار می‌رفت الگوریتم trainlm در هر دو ایستگاه زابل و تهران بیشترین کارآیی را از خود نشان داد.

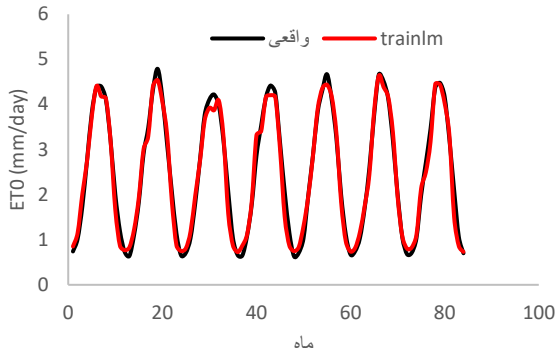
شکل ۲ مقادیر تبخیر و تعرق برآوردی توسط الگوریتم‌های مختلف را در برابر مقادیر واقعی آن در دو ایستگاه زابل و تهران نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، مشخص است که الگوریتم trainlm توانایی بالاتری نسبت به سایر الگوریتم‌ها در پیش‌بینی مقادیر حداقل و حداکثرهای تبخیر و تعرق در هر دو ایستگاه زابل و تهران دارد که در اکثر مطالعات انجام شده، بدلیل توانایی بالای این الگوریتم، از آن برای آموزش شبکه عصبی استفاده شده است. همچنین، بنظر می‌رسد عملکرد الگوریتم‌ها در ایستگاه نیمه‌خشک تهران بهتر از ایستگاه خشک زابل است که با نتایج حاصل از نقشی (۱۴۰۰) مطابقت دارد.

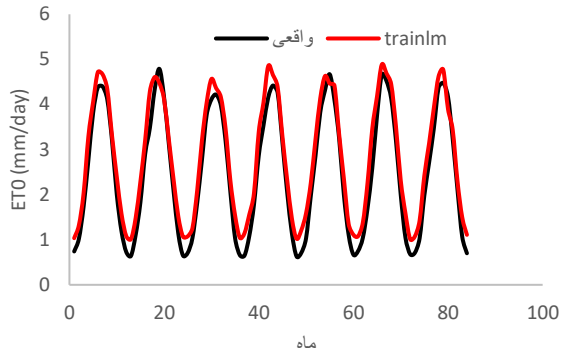
جدول ۱- مقادیر معیارهای عملکرد مدل شبکه عصبی مصنوعی با الگوریتم‌های آموزشی مختلف در دو ایستگاه تهران و زابل در مرحله تست

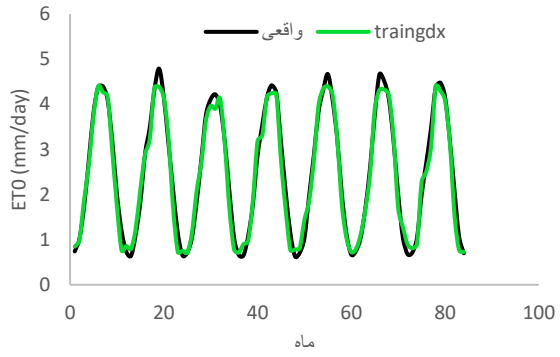
ردیف	الگوریتم آموزشی	ایستگاه	ساختار شبکه	بهترین ترکیب ورودی	RMSE	R^2
۱	TRAINLM	تهران	۳-۶-۱	تشعشع خورشیدی، ساعات آفتابی، رطوبت نسبی	۰/۱۸۸	۰/۹۸۲
		زابل	۳-۴-۱	تشعشع خورشیدی، ساعات آفتابی، دمای حداقل	۰/۱۲۹	۰/۹۹۱
۲	TRAINGDX	تهران	۳-۶-۱	تشعشع خورشیدی، ساعات آفتابی، رطوبت نسبی	۰/۲۱۶	۰/۹۷۸
		زابل	۳-۴-۱	تشعشع خورشیدی، ساعات آفتابی، دمای حداقل	۰/۲۲۶	۰/۹۷۲
۳	TRAINOSS	تهران	۳-۶-۱	تشعشع خورشیدی، ساعات آفتابی، رطوبت نسبی	۰/۲۱۹	۰/۹۷۶
		زابل	۳-۴-۱	تشعشع خورشیدی، ساعات آفتابی، دمای حداقل	۰/۱۳۳	۰/۹۹۰
۴	TRAINSCG	تهران	۳-۲-۱	تشعشع خورشیدی، ساعات آفتابی، رطوبت نسبی	۰/۲۱۶	۰/۹۷۷
		زابل	۳-۲-۱	تشعشع خورشیدی، ساعات آفتابی، دمای حداقل	۰/۱۶۰	۰/۹۸۶

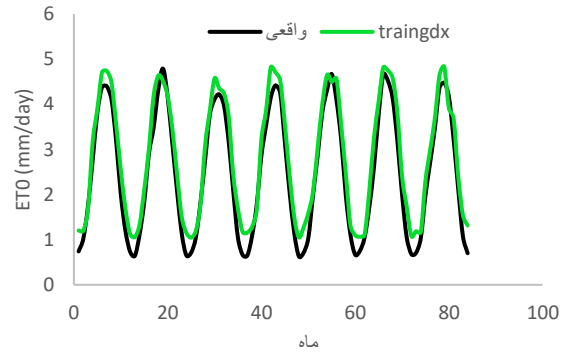
الف- ایستگاه تهران

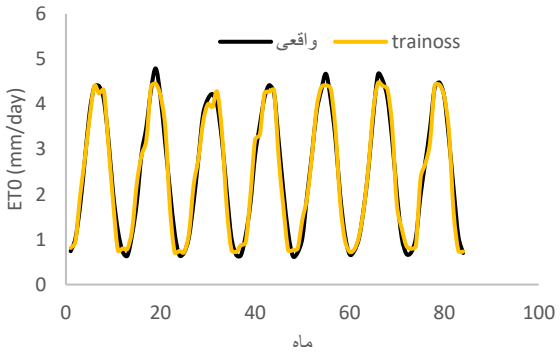
ب- ایستگاه زابل

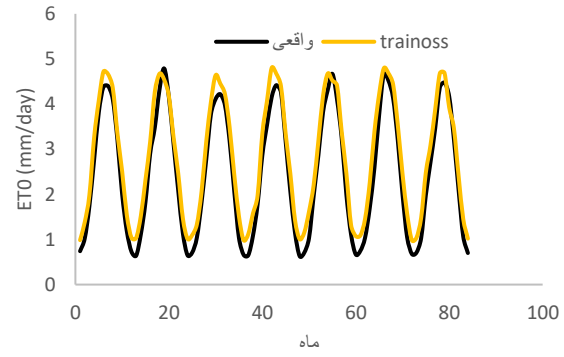

واقعی
trainlm
ET0 (mm/day)
ماه

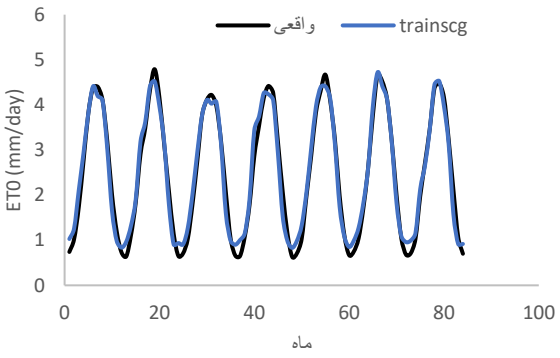

واقعی
trainlm
ET0 (mm/day)
ماه

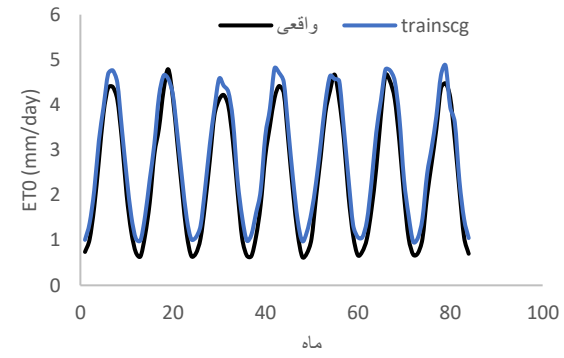

واقعی
traingdx
ET0 (mm/day)
ماه


واقعی
traingdx
ET0 (mm/day)
ماه


واقعی
trainoss
ET0 (mm/day)
ماه


واقعی
trainoss
ET0 (mm/day)
ماه


واقعی
trainscg
ET0 (mm/day)
ماه


واقعی
trainscg
ET0 (mm/day)
ماه

شکل ۲- مقایسه مقادیر تبخیر-تعرق پتانسیل واقعی و برآورد شده از الگوریتم‌های مختلف آموزشی شبکه عصبی مصنوعی در مرحله تست (الف) ایستگاه تهران، (ب) ایستگاه زابل

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، عملکرد چهار نوع الگوریتم آموزشی مدل شبکه عصبی مصنوعی پرسپترون چندلایه شامل الگوریتم‌های trainlm، traingdx، trainscg و trainoss در برآورد تبخیر و تعرق در دو اقلیم خشک و نیمه‌خشک ایران بررسی و ارزیابی شد. نتایج حاکی از آن بود که در هر دو ایستگاه، الگوریتم مارکوآرت-لونبرگ (trainlm) کارآیی بیشتری در برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل از خود نشان داد. همچنین، الگوریتم traingdx که نسبت به الگوریتم‌های دیگر، از ابتدایی‌ترین نوع الگوریتم‌ها است، توانایی نسبتا ضعیفی علی الخصوص در ایستگاه زابل داشته است. علاوه بر این، عملکرد الگوریتم‌ها در ایستگاه نیمه‌خشک تهران بهتر از ایستگاه خشک زابل بود که بیان‌گر تاثیر نوع اقلیم منطقه در عملکرد مدل‌های مورد مطالعه و دقت پیش‌بینی‌ها دارد.

منابع

احمدزاده قره گویز، ک.، میرلطیفی، س.م.، و محمدی، ک. (۱۳۸۹). مقایسه سیستم‌های هوش مصنوعی (ANN و ANFIS) در تخمین میزان تبخیر-تعرق گیاه مرجع در مناطق بسیار خشک ایران. آب و خاک، ۲۴ (۴).

بختیاری، ب.، محبی دهاقانی، ع.، و قادری، ک. (۱۳۹۴). برآورد تبخیر تعرق مرجع روزانه با حداقل داده‌های هواشناسی در اقلیم‌های نیمه خشک منتخب ایران. تحقیقات منابع آب ایران، ۱۱(۳)، ۱۳۱-۱۴۴.

کرباسی، م. (۱۳۹۵). پیش‌بینی تبخیر-تعرق مرجع هفتگی با استفاده از مدل ترکیبی موجک- فازی عصبی تطبیقی. پژوهش آب در کشاورزی، ۳۰(۱)، ۷۳-۸۷.

نقشی، ن. (۱۴۰۰). ارزیابی روش‌های مختلف برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل در شرایط اقلیمی مختلف. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم و فناوری کشاورزی، دانشگاه محقق اردبیلی.

نوری، س.، فلاح قالهری، غ.، و ثنایی نژاد، س.ح. (۱۳۹۲). مدل سازی تبخیر- تعرق گیاه پتانسیل با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی با حداقل متغیرهای اقلیمی در ایستگاه سینوپتیک مشهد. نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۲۰(۵)، ۱۶۳-۱۷۸.

Alizadeh, M., Mohammadi, M., & Mohammadi, M. (2021). Deep learning approaches for evapotranspiration estimation in agricultural regions. Computers and Electronics in Agriculture, 182, 105998.

Ghorbani, A., Gholami, A., & Khoshgoftarmanesh, A. H. (2016). Estimation of reference evapotranspiration using artificial neural network and adaptive neuro-fuzzy inference system. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 9(4), 80-86.
Khosravi, A., Bahrami, H., & AghaKouchak, A. (2019). Machine learning approaches for estimating reference evapotranspiration: A case study. Agricultural Water Management, 213, 107-118.
Khosravi, H., Zarei, M., & Sabet, S. (2020). Deep neural network approach for evapotranspiration estimation using meteorological data. Journal of Hydrology, 584, 124585.
Li, X., Wang, J., & Zhang, Y. (2020). Deep learning models for evapotranspiration estimation based on remote sensing data. Remote Sensing, 12(18), 2971.
Mohammadi, M., Kiani, A., & Azimi, M. (2022). Hybrid models of genetic algorithms and machine learning techniques for evapotranspiration estimation. Environmental Modelling & Software, 157, 105576
Rahimi Khoob, A. (2008). Artificial neural network estimation of reference evapotranspiration from pan evaporation in a semi-arid environment. Journal of Irrigation Science, 27, 35–39.
Ranjbar, A., Motevali, A., & Tahmasebi, R. (2019). Application of machine learning algorithms for estimating reference evapotranspiration. Theoretical and Applied Climatology, 137(3), 1385–1397.
Zhang, H., Li, Y., & Wang, Q. (2018). Application of artificial neural networks for estimating reference evapotranspiration. Journal of Hydrology, 562, 303-312.

Comparison of the effectiveness of artificial neural network training algorithms in estimating potential evapotranspiration

Mahsa Hasanpour Kashani[1], Sahel Rasouli Azar[2], Nazanin Chamanian

Associate Professor, Water Engineering Department, Faculty of Science & Technology of Agriculture, University od Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

M.Sc. Student, Water Engineering Department, Faculty of Science & Technology of Agriculture, University od Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

* Corresponding author: m.hkashani@uma.ac.ir

Abstract

In this study, potential evapotranspiration values were modeled using the artificial neural network at two stations (Zabol and Tehran) with different climate conditions. For this purpose, various meteorological data such as minimum and maximum temperature, solar radiation, humidity, wind speed and sunshine hours were used. Also, various training algorithms were used to implement the artificial neural network model and their efficiency was evaluated using several statistical criteria. The results showed that in the semi-arid Tehran station, the best training algorithm was the trainlm algorithm with the 6 neurons in the hidden layer and with an RMSE of 0.188 and R2 of 0.982. The weakest algorithm in the Tehran station was the trainoss

algorithm with the 6 neurons in the hidden layer and with an RMSE of 0.219 and R2 of 0.976. In the arid Zabol station, the trainlm algorithm with 4 neurons in the hidden layer and with an RMSE of 0.129 and R2 of 0.991 was the best training algorithm. Also, the traingdx algorithm had the lowest accuracy and efficiency with RMSE values of 0.226 and R2 of 0.972.

Keywords: Evapotranspiration, Artificial Neural Network, Training Algorithms, Zabol, Tehran.

مدل‌سازی تغییرات اقلیمی در مناطق خشک با هوش مصنوعی: مروری بر چالش‌ها، فرصت‌ها و مطالعات موردی در ایران

سید حسن علوی‌نیا[۱]

۱- استادیار ، دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری،گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

s.h.alavinia@kashanu.ac.ir

چکیده

تغییرات اقلیمی به عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های جهانی قرن حاضر، تأثیرات عمیقی بر محیط زیست، منابع طبیعی و اقتصاد کشورها، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک همچون ایران، گذاشته است. این تأثیرات شامل افزایش دما، کاهش بارش و بروز پدیده‌های حدی مانند خشکسالی و سیلاب است که مدیریت منابع و برنامه‌ریزی‌های کلان را با دشواری‌های زیادی مواجه می‌کند. در این مقاله، به بررسی کاربرد نوآورانه هوش مصنوعی (AI) در پیش‌بینی و شبیه‌سازی دقیق تغییرات اقلیمی در ایران، با تمرکز ویژه بر شهر کاشان به عنوان یک منطقه کلیدی با چالش‌های اقلیمی شدید، پرداخته می‌شود. ما از مدل‌های پیشرفته هوش مصنوعی مانند یادگیری ماشین (ML) و یادگیری عمیق (DL) برای تحلیل داده‌های اقلیمی بلندمدت استفاده می‌کنیم. این مدل‌ها به ما امکان می‌دهند تا با دقت بالایی روندهای آینده دما، بارش و سایر متغیرهای اقلیمی را پیش‌بینی کنیم. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که مدل‌های هوش مصنوعی، به‌خصوص شبکه‌های عصبی عمیق، می‌توانند الگوهای پیچیده و غیرخطی موجود در داده‌های اقلیمی را بهتر از روش‌های سنتی شناسایی کنند. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی‌ها، اثرات محسوس این تغییرات بر منابع آبی زیرزمینی و کشاورزی حساس منطقه کاشان را به وضوح نشان می‌دهد. این تحقیق نه تنها یک رویکرد جدید در تحلیل اقلیمی ارائه می‌دهد، بلکه نتایج آن می‌تواند به طور مستقیم در بهبود سیاست‌های مدیریتی، برنامه‌ریزی منابع آب و تقویت تاب‌آوری منطقه در برابر اثرات سوء تغییرات اقلیمی به کار گرفته شود.

کلید واژه‌ها: یادگیری ماشین، یادگیری عمیق، پیش‌بینی اقلیمی، مدل‌سازی، الگوریتم‌های هوش مصنوعی، داده‌های اقلیمی

مقدمه

تغییرات اقلیمی یکی از چالش‌های عمده‌ای است که در دهه‌های اخیر در سطح جهانی به سرعت در حال گسترش است. این تغییرات به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران، تأثیرات قابل توجهی بر محیط زیست، منابع آب، کشاورزی و اقتصاد خواهد داشت (Shayanmehr et al, 2024). ایران به‌دلیل موقعیت جغرافیایی خاص خود، دارای اقلیم‌های مختلفی از جمله مناطق خشک و نیمه‌خشک است که در معرض خطرات شدید تغییرات اقلیمی قرار دارند. در این میان، یکی از شهرهای ویژه‌ای که به‌دلیل ویژگی‌های خاص اقلیمی خود باید بیشتر مورد توجه قرار گیرد، کاشان است. پیش‌بینی و مدیریت تغییرات اقلیمی نیازمند تحلیل داده‌های پیچیده و غیرخطی است که با استفاده از روش‌های سنتی ممکن است دشوار باشد. هوش مصنوعی(AI42) ، به‌ویژه الگوریتم‌های یادگیری ماشین (ML43) و یادگیری عمیق(DL44) ، به‌عنوان ابزارهای قدرتمند در تحلیل داده‌های اقلیمی و پیش‌بینی تغییرات آن‌ها شناخته شده‌اند. این مدل‌ها قادر به شبیه‌سازی الگوهای اقلیمی پیچیده، پیش‌بینی رفتارهای آینده و ارزیابی اثرات تغییرات اقلیمی بر منابع طبیعی هستند (حبیبی و حسن‌پور، ۲۰۲۵).

هدف از این مقاله، بررسی کاربرد هوش مصنوعی در پیش‌بینی و شبیه‌سازی تغییرات اقلیمی در ایران و مناطق خشک به‌ویژه منطقه کاشان است. در این مقاله، مدل‌های مختلف هوش مصنوعی و کاربرد آن‌ها در شبیه‌سازی و پیش‌بینی تغییرات اقلیمی مورد بررسی قرار می‌گیرد و در نهایت، تأثیرات این تغییرات بر منابع آبی، کشاورزی و سایر بخش‌های اقتصادی و اجتماعی کاشان تحلیل خواهد شد.

تغییرات اقلیمی و اهمیت آن

تغییرات اقلیمی به تغییرات بلندمدت در الگوهای دما، بارش، رطوبت، باد و سایر ویژگی‌های اقلیمی گفته می‌شود که معمولاً طی دهه‌ها یا قرن‌ها رخ می‌دهند. این تغییرات می‌توانند ناشی از عوامل طبیعی نظیر فعالیت‌های آتشفشانی یا تغییرات در مدار زمین و یا از تأثیرات انسان‌ساز نظیر انتشار گازهای گلخانه‌ای باشند. در حال حاضر، تغییرات اقلیمی به‌طور عمده تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی قرار دارد و تغییرات در دما، بارش، و سایر پارامترهای اقلیمی باعث بروز بحران‌های مختلفی در کشورهای مختلف می‌شود (Knutti et al., 2017) . در ایران، تغییرات اقلیمی به‌شدت بر بخش‌های مختلف از جمله منابع آبی، کشاورزی و اکوسیستم‌ها تأثیر می‌گذارد. از جمله تهدیدات بزرگ می‌توان به کاهش بارش‌ها، افزایش دما، خشکسالی‌ها و تهدیدات ناشی از کاهش منابع آب اشاره کرد(Kim and Kaluarachchi, 2009) .

42- Artificial Intelligence

43 -Machine Learning

44- Deep Learning

هوش مصنوعی در مدل‌سازی اقلیمی

هوش مصنوعی به‌عنوان یک ابزار قدرتمند در پردازش داده‌های پیچیده، به‌ویژه در زمینه‌های پیش‌بینی و شبیه‌سازی اقلیمی به کار گرفته می‌شود. در این زمینه، مدل‌های مختلفی همچون یادگیری ماشین و یادگیری عمیق به‌طور گسترده استفاده می‌شوند که در ادامه به اختصار بیان می‌شوند.

یادگیری ماشین: الگوریتم‌های ML از داده‌های تاریخی برای شناسایی الگوها و پیش‌بینی الگوهای آینده استفاده می‌کنند. از این مدل‌ها می‌توان برای پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی مانند دما و بارش استفاده کرد (Godarzi et al, 2024) . یادگیری ماشین، به عنوان یکی از اولین رویکردهای AI، در مدل‌سازی اقلیمی کاربرد گسترده‌ای یافته است. از جمله مدل‌های محبوب ML می‌توان به ماشین‌های بردار پشتیبان (SVM45) و درخت‌های تصمیم‌گیری۴۶ اشاره کرد. این مدل‌ها به ویژه در پیش‌بینی متغیرهای منفرد مانند دما و بارش عملکرد قابل قبولی دارند (Dams et al., 2015). به عنوان مثال، در مطالعه‌ای که در مورد پیش‌بینی بارش در حوضه آبریز زاینده‌رود انجام شد، از مدل SVM برای پیش‌بینی بارش ماهانه استفاده شد و نتایج نشان از دقت بالای این مدل نسبت به روش‌های آماری سنتی داشت (Babaei et al., 2019). علاوه بر این، مدل‌های مبتنی بر یادگیری جمعی۴۷ مانند جنگل‌های تصادفی۴۸ و تقویت گرادیان۴۹ نیز به دلیل کاهش واریانس و بهبود دقت، در شبیه‌سازی اقلیمی مورد توجه قرار گرفته‌اند. این مدل‌ها با ترکیب نتایج چندین مدل ساده‌تر، به یک پیش‌بینی قوی‌تر و پایدارتر می‌رسند (de Magalhães et al, 2025).

یادگیری عمیق: در مقایسه با یادگیری ماشین، مدل‌های یادگیری عمیق دارای ظرفیت بیشتری برای شبیه‌سازی روابط پیچیده و غیرخطی در داده‌ها هستند. شبکه‌های عصبی پیچشی (CNN50) و شبکه‌های عصبی بازگشتی (RNN51) از جمله مدل‌های رایج در این زمینه هستند .(Chollet, 2021) این مدل‌ها به‌ویژه برای پیش‌بینی تغییرات اقلیمی در مقیاس‌های زمانی بلندمدت و در مناطق خاص کاربرد دارند.

45- Support Vector Machines

46- Decision Trees

47- Ensemble Learning

48- Random Forests

49- Gradient Boosting

50- Convolutional Neural Network

51- Recurrent Neural Network

یادگیری عمیق، به دلیل معماری‌های پیچیده‌تر و توانایی پردازش داده‌های حجیم و چندبعدی، انقلاب بزرگی در شبیه‌سازی اقلیمی ایجاد کرده است. شبکه‌های عصبی مصنوعی به عنوان یک مدل پایه، برای پیش‌بینی دما و بارش در مناطق خشک (مانند کاشان) بسیار مؤثر هستند. این شبکه‌ها می‌توانند روابط پیچیده بین متغیرهای مختلف اقلیمی را بدون نیاز به فرض‌های اولیه آماری، یاد بگیرند (Abhishek et al, 2012).

یکی از پیشرفته‌ترین مدل‌های DL برای تحلیل داده‌های سری زمانی، شبکه‌های عصبی تکرارشونده (RNN) و به خصوص زیرشاخه آن، حافظه کوتاه‌مدت-بلندمدت (LSTM52) است. این مدل‌ها به طور خاص برای پردازش داده‌های وابسته به زمان، مانند داده‌های روزانه یا ماهانه دما و بارش، طراحی شده‌اند و می‌توانند وابستگی‌های زمانی بلندمدت را در داده‌ها کشف کنند (Khokhar et al., 2023). به عنوان مثال، مدل LSTM می‌تواند با بررسی داده‌های بارش سال‌های گذشته، الگوهای خشکسالی را شناسایی کرده و پیش‌بینی دقیق‌تری ارائه دهد. مدل‌های دیگری مانند شبکه‌های عصبی پیچشی نیز در تحلیل داده‌های مکانی مانند تصاویر ماهواره‌ای و نقشه‌های اقلیمی برای شناسایی الگوهای فضایی تغییرات اقلیمی مورد استفاده قرار می‌گیرند (Salimi et al., 2019). ترکیب CNN و LSTM، که به آن CNN-LSTM گفته می‌شود، امکان تحلیل همزمان داده‌های مکانی و زمانی را فراهم می‌کند که برای شبیه‌سازی‌های اقلیمی بسیار ارزشمند است.

کاربردهای نوین و مدل‌های ترکیبی: توسعه مدل‌های ترکیبی۵۳ که نقاط قوت چندین مدل را با هم ترکیب می‌کنند، یکی از جدیدترین رویکردها در این زمینه است. برای مثال، ترکیب یک مدل فیزیکی اقلیمی با یک مدل DL می‌تواند دقت پیش‌بینی‌ها را به شدت افزایش دهد. این رویکرد به مدل‌های AI اجازه می‌دهد تا با استفاده از قوانین فیزیکی، پیش‌بینی‌های خود را تنظیم کنند و از انحرافات فاحش جلوگیری نمایند (Wang et al, 2025).

در نهایت، استفاده از تکنیک‌های توضیح‌پذیر هوش مصنوعی (XAI54) نیز در حال رشد است. این رویکرد به محققان کمک می‌کند تا بفهمند چرا یک مدل AI به یک نتیجه خاص رسیده است، که این امر برای اعتماد به نتایج و درک بهتر سیستم‌های اقلیمی بسیار حیاتی است (Adadi and Berrada, 2018).

هوش مصنوعی کاربردهای گسترده‌ای در پیش‌بینی تغییرات اقلیمی دارد. این کاربردها شامل پیش‌بینی دما، بارش، خشکسالی، و دیگر پدیده‌های اقلیمی است. مدل‌های ML و DL قادرند با تجزیه و تحلیل داده‌های تاریخی، تغییرات آینده اقلیم را با دقت بالایی پیش‌بینی کنند. به‌عنوان مثال، از مدل‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی دما و بارش در مناطق خشک مانند ایران استفاده شده است.(Golami Rostam et al., 2022)

52- Long Short-Term Memory

53- Hybrid Models

54- Explainable Artificial Intelligence

رویکردهای نوین هوش مصنوعی در شبیه‌سازی تغییرات اقلیمی

شبیه‌سازی تغییرات اقلیمی از جمله چالش‌های اصلی در علوم اقلیمی است که به‌ویژه در راستای پیش‌بینی و ارزیابی تأثیرات تغییرات اقلیمی بر جوامع انسانی، منابع طبیعی و کشاورزی اهمیت دارد. در این راستا، هوش مصنوعی و روش‌های یادگیری ماشین به‌طور فزاینده‌ای برای مدل‌سازی و شبیه‌سازی تغییرات اقلیمی در سطح جهانی و منطقه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند (Reichstein et al., 2019). این رویکردها با توانایی خود در کشف الگوهای پیچیده و غیرخطی، ابزارهای قدرتمندی برای تکمیل یا جایگزینی مدل‌های اقلیمی سنتی فراهم کرده‌اند. .

مدل‌سازی غیرخطی و پیچیده با یادگیری عمیق

یکی از چالش‌های اصلی در مدل‌های اقلیمی، پیچیدگی و عدم‌خطی بودن روابط میان متغیرهای مختلف اقلیمی است. مدل‌های هوش مصنوعی، به‌ویژه یادگیری عمیق و شبکه‌های عصبی، قادرند این روابط پیچیده و غیرخطی را به دقت شبیه‌سازی کنند. به‌عنوان مثال، استفاده از شبکه‌های عصبی چندلایه (MLP55) برای شبیه‌سازی اثرات تغییرات دما و بارش در مناطق مختلف نشان داده است که این مدل‌ها توانایی بالایی در پیش‌بینی و شبیه‌سازی فرآیندهای اقلیمی پیچیده دارند (Chen et al., 2024).

مدل‌های پیشرفته‌تر مانند شبکه‌های عصبی تکرارشونده و به خصوص حافظه کوتاه‌مدت-بلندمدت به طور خاص برای تحلیل داده‌های سری زمانی مانند داده‌های اقلیمی طراحی شده‌اند. این مدل‌ها با توانایی خود در حفظ اطلاعات گذشته، می‌توانند وابستگی‌های زمانی بلندمدت را در داده‌ها کشف کرده و پیش‌بینی‌های دقیق‌تری ارائه دهند (Xu et al., 2024). این ویژگی برای پیش‌بینی پدیده‌هایی مانند خشکسالی که به شرایط اقلیمی گذشته وابسته هستند، بسیار حیاتی است.

۲. بهینه‌سازی مدل‌ها با الگوریتم‌های تکاملی

الگوریتم‌های تکاملی، مانند الگوریتم ژنتیک (GA56)، برای جستجو و بهینه‌سازی پارامترهای مدل‌های اقلیمی به‌کار می‌روند. این الگوریتم‌ها به‌ویژه در یافتن بهترین پارامترهای ورودی برای مدل‌های شبیه‌سازی و پیش‌بینی تغییرات اقلیمی کاربرد دارند. آن‌ها به جای بررسی تمام حالات ممکن، با الهام از فرآیند انتخاب طبیعی، به صورت هوشمندانه به سمت راه‌حل‌های بهینه حرکت می‌کنند. به‌عنوان مثال، در یک مطالعه در ایران، از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی وزن‌ها و

55- Multilayer perceptron

56- Genetic Algorithm

بایاس‌های مدل‌های پیش‌بینی بارش در استان کردستان استفاده شد که منجر به بهبود چشمگیر دقت پیش‌بینی‌ها گردید (فقیه، ۱۳۸۹).

۳. یادگیری ماشین مبتنی بر داده‌های بزرگ[57]

در دهه‌های اخیر، استفاده از داده‌های بزرگ برای تحلیل تغییرات اقلیمی گسترش یافته است. به‌کارگیری الگوریتم‌های یادگیری ماشین مانند جنگل‌های تصادفی و شبکه‌های عصبی کانولوشنی به منظور تحلیل داده‌های اقلیمی از منابع مختلف، از جمله سنجش از دور و ایستگاه‌های اقلیمی، باعث شده است که این مدل‌ها دقت بالاتری در شبیه‌سازی تغییرات اقلیمی داشته باشند. داده‌های بزرگ به‌ویژه در شبیه‌سازی الگوهای بارش و دما در مناطق با تغییرات شدید اقلیمی، از جمله مناطق خشک و نیمه‌خشک، کاربرد دارند (Rolnick et al., 2022). شبکه‌های عصبی کانولوشنی به طور خاص برای پردازش داده‌های مکانی مانند تصاویر ماهواره‌ای و نقشه‌های اقلیمی طراحی شده‌اند و می‌توانند الگوهای فضایی تغییرات اقلیمی را با دقت بالایی شناسایی کنند (Yuan et al., 2025).

۴. پیش‌بینی تغییرات اقلیمی در مقیاس‌های مختلف

پیش‌بینی تغییرات اقلیمی یکی از اهداف اصلی در مطالعات اقلیمی است که از مدل‌های مختلف برای پیش‌بینی روندهای آینده تغییرات دما، بارش، خشکسالی و سایر پارامترهای اقلیمی استفاده می‌شود. در این راستا، هوش مصنوعی به‌ویژه در پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت نقش مهمی ایفا می‌کند که نمونه‌ای از آنها در ادامه بیان می‌گردد.

استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی بارش و دما: در تحقیقات اخیر، مدل‌های یادگیری ماشین به‌ویژه ماشین‌های بردار پشتیبانی و الگوریتم‌های درخت تصمیم برای پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این مدل‌ها به دلیل توانایی در مدل‌سازی روابط پیچیده بین داده‌های ورودی و خروجی، دقت بالاتری در پیش‌بینی این پارامترها دارند. به‌عنوان مثال، در مطالعه‌ای در استان همدان، از الگوریتم SVM برای پیش‌بینی میزان بارش فصلی استفاده شد که نتایج نشان‌دهنده دقت بالای این مدل در مقایسه با روش‌های آماری سنتی بود (کدخدا حسینی و همکاران، ۱۳۹۶).

مدل‌های پیش‌بینی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای: یکی دیگر از پیشرفت‌های اخیر در پیش‌بینی تغییرات اقلیمی، استفاده از داده‌های ماهواره‌ای برای تحلیل و پیش‌بینی تغییرات دما و بارش در مقیاس جهانی و منطقه‌ای است. استفاده از شبکه‌های عصبی کانولوشنی برای پردازش این داده‌ها توانسته است پیش‌بینی‌های دقیقی از تغییرات اقلیمی ارائه دهد. این روش‌ها به‌ویژه در پیش‌بینی وضعیت خشکسالی و سیلاب‌های ناشی از تغییرات بارش مؤثر بوده‌اند (Frame et al., 2024).

مدل‌های پیش‌بینی در مقیاس‌های مختلف: پیش‌بینی تغییرات اقلیمی در مقیاس‌های مختلف (کلان‌پایه، ملی و محلی) از دیگر چالش‌های اساسی در مطالعات اقلیمی است. مدل‌های هوش مصنوعی می‌توانند این پیش‌بینی‌ها را در مقیاس‌های

57- Big Data

مختلف انجام دهند. به‌عنوان مثال، در یک مطالعه در منطقه کاشان، از مدل‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی دما و بارش در مقیاس‌های ماهانه و سالانه استفاده شد و نتایج نشان‌دهنده توانایی بالای این مدل‌ها در ارائه پیش‌بینی‌های دقیق برای این منطقه بود (Rahdari et al., 2024).

ارزیابی و مدل‌سازی تغییرات اقلیمی

ارزیابی و مدل‌سازی تغییرات اقلیمی شامل شبیه‌سازی تأثیرات تغییرات اقلیمی بر محیط زیست و منابع طبیعی است. این فرآیند به‌ویژه برای برنامه‌ریزی‌های بلندمدت در زمینه مدیریت منابع طبیعی، کشاورزی و منابع آبی اهمیت دارد.

۱- مدل‌سازی اثرات تغییرات اقلیمی بر کشاورزی: مدل‌های هوش مصنوعی برای ارزیابی تأثیرات تغییرات اقلیمی بر کشاورزی و تولید محصولات مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند. این مدل‌ها می‌توانند با تجزیه و تحلیل داده‌های تاریخی و پیش‌بینی‌های اقلیمی، اثرات تغییرات دما و بارش بر عملکرد محصولات کشاورزی را شبیه‌سازی کنند. به‌عنوان مثال، در یک مطالعه در منطقه مرکزی ایران، از شبکه‌های عصبی مصنوعی برای شبیه‌سازی تأثیرات تغییرات اقلیمی بر تولید گندم استفاده شد که نتایج آن نشان‌دهنده کاهش تولید در صورت افزایش دما و کاهش بارش‌ها بود.(Ghodsi et al., 2012)

۲- مدل‌سازی منابع آب و خشکسالی: هوش مصنوعی در مدل‌سازی منابع آب و پیش‌بینی خشکسالی‌های ناشی از تغییرات اقلیمی به‌کار می‌رود. این مدل‌ها می‌توانند تأثیرات تغییرات اقلیمی بر منابع آبی، از جمله رودخانه‌ها و آب‌های زیرزمینی را شبیه‌سازی کنند. استفاده از مدل‌های شبکه عصبی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی خشکسالی در مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌ویژه در ایران بسیار کاربردی است. در یک مطالعه در منطقه یزد، از مدل‌های SVM برای پیش‌بینی خشکسالی‌های شدید در اثر تغییرات اقلیمی استفاده شد و نتایج نشان‌دهنده دقت بالای این مدل‌ها در پیش‌بینی خشکسالی‌ها بود.(Zahraie et al., 2011)

۳- ارزیابی مدل‌ها و بهبود دقت پیش‌بینی‌ها: ارزیابی دقت مدل‌های هوش مصنوعی در پیش‌بینی تغییرات اقلیمی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به‌طور معمول، ارزیابی مدل‌ها با استفاده از شاخص‌هایی مانند ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب تعیین (R^2) انجام می‌شود. به‌عنوان مثال، در یک مطالعه جهانی، از شبکه‌های عصبی برای پیش‌بینی تغییرات دما و بارش در مناطق مختلف استفاده شد که نتایج آن نشان‌دهنده دقت بالای مدل‌ها در شبیه‌سازی تغییرات اقلیمی بود (Lv et al., 2024).

مطالعه موردی: کاربرد هوش مصنوعی در تغییرات اقلیمی

استفاده از هوش مصنوعی در پیش‌بینی و شبیه‌سازی تغییرات اقلیمی به‌ویژه در مناطقی با شرایط خاص اقلیمی، می‌تواند به‌طور قابل توجهی به بهبود دقت پیش‌بینی‌ها و مدیریت منابع طبیعی کمک کند. در این بخش، چند مطالعه موردی از کاربرد هوش مصنوعی در پیش‌بینی و ارزیابی تغییرات اقلیمی در مناطق خشکاز جمله کاشان بررسی می‌شود.

۱- پیش‌بینی بارش و دما: در منطقه کاشان که با تغییرات دما و بارش‌های نامنظم مواجه است، استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی می‌تواند به پیش‌بینی دقیق‌تر این پارامترها کمک کند. به‌ویژه، با توجه به وجود تغییرات شدید در الگوهای بارش، شبکه‌های عصبی مصنوعی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین مانند جنگل‌های تصادفی به‌طور گسترده‌ای در پیش‌بینی بارش‌های سالانه و فصلی به‌کار گرفته شده‌اند. در یک مطالعه در این منطقه، استفاده از مدل‌های SVM برای پیش‌بینی بارش‌ها نشان داد که این مدل‌ها قادر به شبیه‌سازی دقیق تغییرات بارش در مقیاس‌های مختلف زمانی هستند (امیدوار و همکاران، ۱۴۰۱).

۲- در پژوهشی دیگر با هدف ارزیابی خشکسالی هواشناسی و هیدرژئولوژیکی در یزد، از الگوریتم‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی این شاخص‌ها استفاده شد. نتایج نشان داد که خشکسالی هیدروژئولوژیکی (افت سطح آب زیرزمینی) بسیار شدیدتر از خشکسالی هواشناسی (کمبود بارش) است. مهم‌ترین یافته تحقیق، همبستگی بسیار ضعیف بین بارش و سطح آب‌های زیرزمینی ($R^2 = 0.14$) بود که نتیجه می‌گیرد عامل اصلی تشدید بحران آب در منطقه، برداشت بی‌رویه از منابع زیرزمینی است و نه صرفاً کمبود بارش.

۳- مدیریت منابع آب و کشاورزی: هوش مصنوعی در مدیریت منابع آب و کشاورزی در منطقه کرمان به‌ویژه در انتخاب بهترین استراتژی‌های آبیاری و مدیریت بهره‌برداری از منابع آب کاربرد دارد. استفاده از مدل‌های یادگیری عمیق برای تحلیل داده‌های مرتبط با آبیاری و مصرف آب در کشاورزی به‌ویژه در مناطق خشک می‌تواند به کاهش هدررفت آب و افزایش بهره‌وری کمک کند. در یک تحقیق دیگر، از مدل‌های یادگیری ماشین برای تحلیل داده‌های رطوبت خاک و میزان مصرف آب در مزارع استفاده شد که نتایج آن بهبود کارایی سیستم‌های آبیاری را نشان داد.(Sayari et al., 2021)

تمرکز بر منطقه کاشان: پتانسیل‌ها و پیشنهادات

منطقه کاشان با ویژگی‌های اقلیمی خاص خود، به‌ویژه در زمینه تغییرات دما و بارش، به یک مدل جالب برای مطالعه تأثیرات تغییرات اقلیمی تبدیل شده است. با توجه به پتانسیل‌های مختلف این منطقه، هوش مصنوعی می‌تواند در بسیاری از جنبه‌ها به بهبود مدیریت منابع آبی و کشاورزی کمک کند.

۱- پتانسیل‌ها:

داده‌های تاریخی و ایستگاه‌های اقلیمی: منطقه کاشان دارای ایستگاه‌های اقلیمی متعددی است که داده‌های دقیقی از وضعیت دما، بارش و سایر پارامترهای اقلیمی فراهم می‌آورد. این داده‌ها می‌توانند به‌عنوان ورودی برای مدل‌های هوش مصنوعی جهت شبیه‌سازی و پیش‌بینی تغییرات اقلیمی استفاده شوند.

کشاورزی و منابع آب: با توجه به اینکه کشاورزی یکی از فعالیت‌های اصلی در منطقه کاشان است، به‌کارگیری هوش مصنوعی در بهینه‌سازی استفاده از منابع آب و پیش‌بینی وضعیت خشکسالی می‌تواند به بهبود بهره‌وری کشاورزی و کاهش خطرات ناشی از تغییرات اقلیمی کمک کند.

۲- پیشنهادات:

توسعه مدل‌های پیش‌بینی برای کشاورزی پایدار: پیشنهاد می‌شود که مدل‌های پیش‌بینی با استفاده از داده‌های مربوط به وضعیت کشاورزی و منابع آبی منطقه کاشان توسعه داده شوند. این مدل‌ها می‌توانند به کشاورزان کمک کنند تا استراتژی‌های بهینه‌تری برای آبیاری و کشت انتخاب کنند.

تقویت شبکه‌های نظارت و جمع‌آوری داده‌ها: تقویت شبکه‌های نظارتی به‌منظور جمع‌آوری داده‌های دقیق‌تر و به‌روزرسانی مدل‌ها، به‌ویژه در زمینه دما و بارش، می‌تواند به دقت پیش‌بینی‌ها کمک کند.

چالش‌ها، فرصت‌ها و چشم‌انداز آینده

۱- چالش‌ها:

دقت پیش‌بینی‌ها: یکی از چالش‌های اساسی در کاربرد هوش مصنوعی در تغییرات اقلیمی، دقت پیش‌بینی‌ها در مقیاس‌های مختلف است. مدل‌های هوش مصنوعی ممکن است در برخی شرایط مانند تغییرات ناگهانی اقلیمی و وقایع استثنایی مانند سیلاب‌ها و خشکسالی‌ها دقت کمتری داشته باشند.

داده‌های محدود: محدودیت داده‌های بلندمدت در بسیاری از مناطق، از جمله منطقه کاشان، یکی از چالش‌های اساسی در استفاده از هوش مصنوعی است. علاوه بر آن، کیفیت داده‌ها و عدم‌یکپارچگی در جمع‌آوری آن‌ها نیز می‌تواند تأثیر منفی بر دقت مدل‌ها داشته باشد.

پیچیدگی مدل‌ها: پیاده‌سازی و آموزش مدل‌های پیچیده هوش مصنوعی نیازمند توان محاسباتی بالایی است که در برخی موارد ممکن است برای مناطق با منابع محدود دشوار باشد.

۲- فرصت‌ها:

توسعه فناوری‌های پیشرفته: با پیشرفت‌های اخیر در حوزه هوش مصنوعی، فرصت‌هایی برای بهبود دقت و کارایی مدل‌ها وجود دارد. به‌ویژه، استفاده از داده‌های بزرگ و فناوری‌های جدید مانند پردازش ابری می‌تواند به بهبود مدل‌ها کمک کند.

همکاری‌های بین‌المللی: ایجاد همکاری‌های بین‌المللی برای به اشتراک‌گذاری داده‌ها و تجارب در زمینه مدل‌سازی تغییرات اقلیمی می‌تواند فرصت‌های جدیدی برای ارتقاء مدل‌های پیش‌بینی و ارزیابی تغییرات اقلیمی فراهم کند.

۳- چشم‌انداز آینده: چشم‌انداز آینده در استفاده از هوش مصنوعی در تغییرات اقلیمی به ویژه در مناطق خشک مانند کاشان، توسعه مدل‌های پیش‌بینی دقیق‌تر و بهینه‌سازی استفاده از منابع آبی و کشاورزی است. همچنین، انتظار می‌رود که تحقیقات در این زمینه منجر به توسعه ابزارهای هوش مصنوعی با کاربردهای گسترده‌تر برای کاهش تأثیرات تغییرات اقلیمی بر محیط زیست و جوامع انسانی شود.

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

استفاده از هوش مصنوعی در شبیه‌سازی و پیش‌بینی تغییرات اقلیمی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، مانند کاشان، می‌تواند به بهبود دقت پیش‌بینی‌ها و مدیریت منابع آبی و کشاورزی کمک کند. در این مقاله، نشان داده شد که هوش مصنوعی می‌تواند در ارزیابی و پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی مانند دما و بارش، پیش‌بینی خشکسالی و شبیه‌سازی تأثیرات تغییرات اقلیمی بر کشاورزی و منابع آبی مؤثر باشد.

پیشنهادات اصلی شامل توسعه مدل‌های پیش‌بینی برای کشاورزی پایدار، تقویت شبکه‌های نظارت و جمع‌آوری داده‌ها، و استفاده از فناوری‌های جدید برای بهبود دقت پیش‌بینی‌ها هستند. همچنین، به‌منظور کاهش چالش‌ها و بهبود کارایی مدل‌ها، همکاری‌های بین‌المللی و به‌کارگیری داده‌های بزرگ و منابع محاسباتی پیشرفته توصیه می‌شود.

منابع

امیدوار, کمال, تنی, نظام, ایزدی, محمد جواد. (۱۴۰۱). 'بررسی روند و پیش بینی بارش با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی در کاشان ,'کاوش های جغرافیایی مناطق بیابانی10.22034/grd.2022.17739.1522 .doi: 10(2), pp. 41-53 ,

فقیه همایون, ۲۰۱۰. ارزیابی کاربرد شبکه عصبی مصنوعی و بهینه سازی آن با روش الگوریتم ژنتیک در تخمین داده های بارش ماهانه (مطالعه موردی: منطقه کردستان).

کدخداحسینی, مصطفی, شامحمدی, شایان, میرعباسی نجف آبادی, رسول, نوذری, حامد. (۱۳۹۶). 'ارزیابی عملکرد شبکه‌های عصبی مصنوعی و ماشین بردار پشتیبان در بازسازی داده‌های ماهانه و فصلی بارش در ایستگاه‌های باران‌سنجی (مطالعه موردی: استان همدان) ,'پژوهش آب ایران.100-91 .pp ,(3)11 ,

Abhishek, K., Kumar, A., Ranjan, R. and Kumar, S., 2012, July. A rainfall prediction model using artificial neural network. In 2012 IEEE Control and System Graduate Research Colloquium (pp. 82-87). IEEE.

Adadi, A. and Berrada, M., 2018. Peeking inside the black-box: a survey on explainable artificial intelligence (XAI). IEEE access, 6, pp.52138-52160.

Babaei, M., Moeini, R. and Ehsanzadeh, E., 2019. Artificial neural network and support vector machine models for inflow prediction of dam reservoir (case study: Zayandehroud dam reservoir). Water Resources Management, 33(6), pp.2203-2218.

Chen, S., Feng, Y., Mao, Q., Li, H., Zhao, Y., Liu, J., Wang, H. and Ma, D., 2024. Improving the accuracy of flood forecasting for Northeast China by the correction of global forecast rainfall based on deep learning. Journal of Hydrology, 640, p.131733.

Chollet, F., 2021. Deep learning with Python. simon and schuster.

Dams, J., Nossent, J., Senbeta, T.B., Willems, P. and Batelaan, O., 2015. Multi-model approach to assess the impact of climate change on runoff. Journal of Hydrology, 529, pp.1601-1616.
de Magalhães, L.P., Sais, A.C. and Rossi, F., 2025. Research on Using Ensemble Models to Assess the Impacts of Climate Change on Agriculture Production: A Review. AgriEngineering, 7(7), p.219.
Frame, J.M., Nair, T., Sunkara, V., Popien, P., Chakrabarti, S., Anderson, T., Leach, N.R., Doyle, C., Thomas, M. and Tellman, B., 2024. Rapid inundation mapping using the US National Water Model, satellite observations, and a convolutional neural network. Geophysical Research Letters, 51(17), p.e2024GL109424.
Ghodsi, R., Yani, R.M., Jalali, R. and Ruzbahman, M., 2012. Predicting wheat production in Iran using an artificial neural networks approach. International Journal of Academic Research in Business and Social Sciences, 2(2), p.34.
Gholami Rostam, M., Sadatinejad, S.J. and Malekian, A., 2020. Precipitation forecasting by large-scale climate indices and machine learning techniques. Journal of Arid Land, 12(5), pp.854-864.
Goodarzi, M.R., Hashemipour, Z., Saremi, A. and Niazkar, M., 2024. Intercomparison of machine learning methods for statistical downscaling of daily temperature under CMIP6 scenarios: a case study from Iran. Journal of Hydroinformatics, 26(12), pp.3207-3223.
Habibi, S. and Tasouji Hassanpour, S., 2025. An Explainable Machine Learning Framework for Forecasting Lake Water Equivalent Using Satellite Data: A 20-Year Analysis of the Urmia Lake Basin. Water, 17(10), p.1431.
Khokhar, A., Talpur, S. and Memon, M., 2023. Comparative Analysis of LSTM, BILSTM and ARIMA for Time Series Forecasting on 116 years of Temperature and Rainfall Data from Pakistan. International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology, pp.350-357.
Kim, U. and Kaluarachchi, J.J., 2009. Climate change impacts on water resources in the upper Blue Nile River Basin, Ethiopia 1. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 45(6), pp.1361-1378.
Knutti, R., Rugenstein, M.A. and Hegerl, G.C., 2017. Beyond equilibrium climate sensitivity. Nature Geoscience, 10(10), pp.727-736.
Lv, Y., Tan, Y., Zeng, Y. and Wang, K., 2024. Research on Global Climate Change Prediction based on Machine Learning Model. In E3S Web of Conferences (Vol. 536, p. 01027). EDP Sciences.
Rahdari, M.R., Kharazmi, R., Rodrigo-Comino, J. and Rodríguez-Seijo, A., 2024. Spatial-Temporal Assessment of Dust Events and Trend Analysis of Sand Drift Potential in Northeastern Iran, Gonabad. Land, 13(11), p.1906.
Reichstein, M., Camps-Valls, G., Stevens, B., Jung, M., Denzler, J., Carvalhais, N. and Prabhat, F., 2019. Deep learning and process understanding for data-driven Earth system science. Nature, 566(7743), pp.195-204.
Rolnick, D., Donti, P.L., Kaack, L.H., Kochanski, K., Lacoste, A., Sankaran, K., Ross, A.S., Milojevic-Dupont, N., Jaques, N., Waldman-Brown, A. and Luccioni, A.S., 2022. Tackling climate change with machine learning. ACM Computing Surveys (CSUR), 55(2), pp.1-96.
Salimi, A.H., Masoompour Samakosh, J., Sharifi, E., Hassanvand, M.R., Noori, A. and von Rautenkranz, H., 2019. Optimized artificial neural networks-based methods for statistical downscaling of gridded precipitation data. Water, 11(8), p.1653.
Sayari, S., Mahdavi-Meymand, A. and Zounemat-Kermani, M., 2021. Irrigation water infiltration modeling using machine learning. Computers and Electronics in Agriculture, 180, p.105921.
Shakeri, R., Amini, H., Fakheri, F. and Ketabchi, H., 2023. Assessment of drought conditions and prediction by machine learning algorithms using Standardized Precipitation Index and Standardized Water-Level

Index (case study: Yazd province, Iran). Environmental Science and Pollution Research, 30(45), pp.101744-101760.
Shayanmehr, S., Henneberry, S.R., Ali, E.B., Sabouhi Sabouni, M. and Shahnoushi Foroushani, N., 2024. Climate change, food security, and sustainable production: a comparison between arid and semi-arid environments of Iran. Environment, Development and Sustainability, 26(1), pp.359-391.
Wang, X., Yang, J., Adie, J., See, S., Furtado, K., Chen, C., Arcomano, T., Maulik, R. and Mengaldo, G., 2025. CondensNet: Enabling stable long-term climate simulations via hybrid deep learning models with adaptive physical constraints. arXiv preprint arXiv:2502.13185.
Xu, J., Wang, Z., Li, X., Li, Z. and Li, Z., 2024. Prediction of daily climate using long short-term memory (lstm) model. International Journal of Innovative Science and Research Technology, pp.83-90.
Yuan, S., Liang, X., Lin, T., Chen, S., Liu, R., Wang, J., Zhang, H. and Gong, P., 2025. A comprehensive review of remote sensing in wetland classification and mapping. arXiv preprint arXiv:2504.10842.
Zahraie, B. and Nasseri, M., 2011, December. Basin scale meteorological drought forecasting using support vector machine (SVM). In International conference on drought management strategies in arid and semi arid regions. Muscat, Oman (pp. 1-16).

Modeling Climate Change in Arid Regions with Artificial Intelligence: A Review of Challenges, Opportunities, and Case Studies in Iran

Seyed Hassan Alavinia[1]

Assistant Professor, Department of Nature Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, University of Kashan, Kashan, Iran.

s.h.alavinia@kashanu.ac.ir

Abstract

Climate change, as one of the most critical global challenges of the current century, has profound impacts on the environment, natural resources, and economies of nations, particularly in arid and semi-arid regions such as Iran. These impacts include rising temperatures, declining precipitation, and the occurrence of extreme phenomena such as droughts and floods, which pose significant challenges to resource management and large-scale planning. This paper explores the innovative application of artificial intelligence (AI) in accurately predicting and simulating climate change impacts in Iran, with a special focus on the city of Kashan as a key region facing severe climatic challenges. We employ advanced AI models, including machine learning (ML) and deep learning (DL), to analyze long-term climatic data. These models enable us to predict future trends in temperature, precipitation, and other climatic variables with high precision. The findings of this study demonstrate that AI models, particularly deep neural networks, can identify complex and nonlinear patterns in climatic data more effectively than traditional methods. The simulation results clearly highlight the significant impacts of these changes on groundwater resources and the sensitive agricultural sector in Kashan. This research not only introduces a novel approach to climatic analysis but also provides actionable insights that can directly inform policy improvements in water resource management and enhance regional resilience against the adverse effects of climate change.

Keywords: Machine learning, Deep learning, Climate prediction, Modeling, AI algorithms, Climatic dat

واکاوی سری زمانی دمای روزهنگام کویر درانجیر طی دو دهه اخیر

فاطمه کاربخش[۱]، امیدرضا کریمی[۲]، ساناز معنوی پور[۳]، بهرخ بساک[۴]

۱- دانشجوی دکتری آب و هواشناسی دانشگاه یزد
۲- پژوهشگر آب و هواشناسی دانشگاه کردستان
۳- دکتری آب و هواشناسی دانشگاه محقق اردبیلی
٤- کارشناس ارشد آب و هواشناسی دانشگاه اصفهان

آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول (karbakhsh7738@gmail.com)

چکیده

دمای سطح زمین یکی از متغیرهای اساسی در مطالعات زیست محیطی است. از این رو بررسی سری زمانی آن می‌تواند گامی جهت آشکارسازی تغییرات محیطی هر منطقه باشد. یافته‌های سری زمانی میانگین سالانه نشان داد که به ترتیب بالاترین و پایین‌ترین دمای سطح کویر درانجیر طی دو دهه اخیر در سال ۲۰۲۱ و ۲۰۱۲ رخ داده است. بررسی‌های سری زمانی میانگین فصلی نیز نشان داد که به ترتیب بالاترین و پایین‌ترین دمای سطح طی دو دهه اخیر در فصل تابستان ۲۰۱۹ و زمستان ۲۰۱۲ اتفاق افتاده است. نتایج سری زمانی میانگین روزانه گویای آن است که بالاترین دمای سطح در ۲۷ جولای ۲۰۱۴ با مقدار ۶۲/۸ درجه سلسیوس و و پایین‌ترین دمای سطح در ۹ ژانویه ۲۰۰۵ با مقدار ۱۱- درجه سلسیوس رخ داده است. به نظر می‌رسد حوضه کویر درانجیر در این روزهای فرین دمایی شاهد گسترش سامانه‌های گرمایشی و سرمایشی وسیعی بوده باشد، که نیازمند پژوهشی جداگانه است.

کلید واژه‌ها: سری زمانی، دمای سطح زمین، مودیس، درانجیر

مقدمه

دمای هوا یکی از اساسی‌ترین عوامل برای شناخت نوع اقلیم و محیط طبیعی غالب یک مکان می‌باشد. معمولاً سنجش دما با استفاده از داده‌های هواشناسی (ارتفاع دو متری سطح زمین) انجام می‌گیرد. با این وجود استفاده از دمای سطح زمین (Land Surface Temperature) کاربردهای بیش‌تری دارد. بر اساس نتایج محققان، توزیع منطقه‌ای دمای سطح زمین به روشنی می‌تواند بیان‌گر تفاوت گرمایی سطح زمین باشد؛ به طوری که در نواحی مرکزی تبت، حداقل دمای سطح زمین در مناطق کوهستانی و توده‌های آبی و حداکثر دمای سطح در حوضه رودخانه‌ای در مقایسه با نواحی کوهستانی رخ داده است (Wen et al, 2003). در کشور آمریکا، منظره زمین و الگوهای دمای سطح زمین در فصل زمستان دارای رابطه خاصی بودند اما در سایر فصول روابط مشابهی از خود نشان داده‌اند. ارتباط مکانی میان دمای سطح زمین با انواع کاربری زمین- پوشش زمین در ناحیه دارای همپوشانی بالای ۵۰ درصد بوده است (Liu and Weng, 2008). این پارامتر علاوه بر به نمایش دمای حرارتی پوسته زمین، دمای احساسی یک محیط جغرافیایی خاص را نیز می‌تواند نشان دهد. با وجود تفاوت میان دمای سطح زمین با دمای هوا در لغت و متوسط‌های سنجشی اما دو متغیر مذکور ارتباط بالایی دارند و اختلاف میان آن‌ها صرفاً با توجه به پوشش زمین و وضعیت جوی آسمان مشخص می‌شود (Jin and Dickinson, 2010). یکی از موارد مهم و اصلی در کاربرد داده‌های ماهواره‌ای در تحقیقات آب وهوایی، برآورد دمای سطح زمین به عنوان یک متغیر برجسته در تعامل زمین- جو است (Li et al, 2013). تخمین دمای سطح زمین به وسیله روش‌های سنجش از دوری و با تفکیک مکانی- زمانی مناسب، اطلاعات ارزشمند و جدیدی را درباره بیلان انرژی سطح زمین، بیلان چرخه آب و انرژی، پیش‌بینی هوا، تغییر اقلیم و گرمایش جهانی نشان داده و کاربردهای این متغیر نیز در مواردی همچون هواشناسی، آب وهواشناسی و بررسی آثار آب وهوایی و محیطی پدیده جزیره گرمایی شهری در حال توسعه روزافزون می‌باشد (Kayet et al, 2016). در تحقیقی ارتفاع و انواع کاربری زمین بر تغییرات دمای سطح زمین در دامنه‌های رو به آفتاب تأثیرات آشکاری دارند اما در بخش سایبان دارای اثرات اندکی بودند (Peng et al, 2017). سنجش‌های مربوط به سطح زمین و آب‌وهوا، در ارائه اطلاعاتی مفید و ارزشمند از تغییرات مستمر و مهم زیست کره زمین، دارای قابلیت بسیار خوبی می‌باشند. دمای سطح زمین با توجه به تأثیرپذیری مستقیم از جریان‌های انرژی و آب در تبادل جوّ ـ زمین، اطلاعات مفید و مهمی از هر گونه تغییرات فیزیکی در پوشش سطح زمین و بیلان انرژی ارائه می‌دهد. اما دمای هوا فاقد این توانایی‌ها می‌باشد. همچنین دمای حداکثری سطح زمین، در مواردی از قبیل کاستن تغییرات فصلی دما، برجسته کردن الگوهای فرین آب‌وهوایی و تغییرات اساسی پوشش زمین قابلیت‌های مهمی از خود نشان داده است (Mildrexler et al, 2018). برخی محققان دیگر نیز در پژوهشی یک روند خطی وارونه و ثابت میان دمای سطح زمین و ارتفاع در همه فصول در شهر Jaipur هند گزارش دادند. علاوه بر این، میان ارتفاع و میانگین دمای سطح زمین همبستگی بالایی (R=۰/۷۳-۰/۸۷) گزارش شده است و دمای سطح زمین با تغییر ارتفاع به طور افقی ۳/۵ تا ۴/۶ و به طور عمودی ۵ تا ۱۰ درجه سلسیوس در هر هزار متر تغییر کرده است (Khandelwal et al, 2018). در کشور کنیا، به توانایی پایین متغیر دمای سطح زمین در پایش رخداد یخبندان اشاره شده است. بر اساس دیگر نتایج، دمای سطح زمین در صورتی ترکیب با متغیرهایی مانند شیب، سرعت باد و ارتفاع می‌تواند مناطق یخبندان را

دقیق‌تر شناسایی کند (Kotikot et al, 2018). در پژوهشی به قابلیت خوب تکنیک سنجش از دور در تخمین دمای سطح زمین به ویژه برای محیط‌های ناهموار و مرتفع مانند بلندی‌های هیمالیا اشاره شده است (Dar et al, 2019). مطالعه‌ای نشان داد که راستی‌آزمایی متغیر دمای سطح زمین، نمایان‌گر میزان خطای مطلق ۰/۳۷ کلوین برای مقادیر دمای روزانه و ۰/۷۴ کلوین برای مقادیر دمای شبانه بوده است (Ghent et al, 2019). بر اساس نتایج، دمای سطح زمین در میانه روز و حداکثر میزان خود اطلاعات بیش‌تر و مفیدتری را درباره در پراکنش انرژی ارائه می‌دهد که این مورد نقش کلیدی دمای حداکثری روزانه را نشان می‌دهد (Xu et al, 2019). دمای سطح زمین از لحاظ میکروکلیمایی و تشعشع انتقالی داخل جو، یکی از عوامل ضروری در برنامه‌ریزی ناحیه‌ای و منطقه‌ای است. به طوری که اهمیت زیادی در کنترل فرایندهای بیوفیزیکی و شیمیایی زمین دارد. در همین زمینه برآورد دقیق‌تر از دمای روزانه‌ی سطح زمین، کاربردهای قابل توجهی در مواردی از قبیل آثار جزیره گرمایی شهر، انتقال انرژی زمین- جو و تغییرات اقلیمی جهانی دارد (Xing et al, 2021).

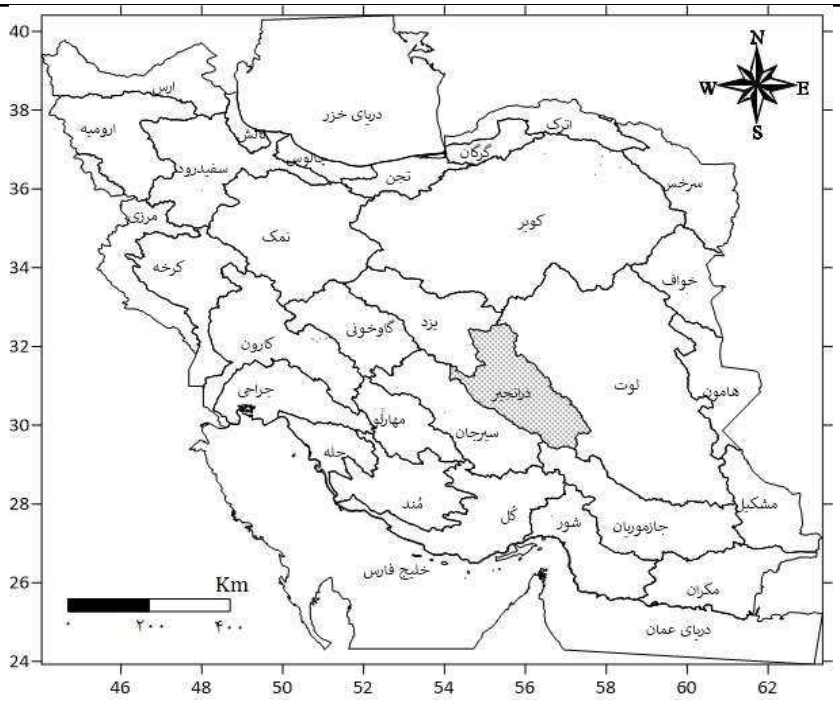
در ایران تحقیقات ارزشمندی درباره دمای سطح زمین به انجام رسیده است که به علت محدودیت حجم مقاله، ناچار به اشاره به چند مورد از آن‌ها هستیم. در یکی از این مطالعات، با استفاده از داده‌های سنجنده مودیس به بررسی تغییرات دمای سطح زمین طی دوره ۲۰۱۱-۲۰۰۰ پرداخته شد. نتایج حاکی از عدم افزایش متغیر مذکور در گستره‌های شهری مورد پژوهش بوده است. در همین زمینه، در پژوهشی همبستگی منفی میان دمای سطح زمین و پوشش‌گیاهی در شهر یزد مطالعه شده است. میزان این همبستگی در سال ۲۰۰۵ به میزان ۰/۷۳- و در سال ۲۰۱۵ به ۰/۹۱- افزایش یافته است (امیدوار و همکاران، ۱۳۹۹). بر اساس یافته‌ها تغییرات زمانی - مکانی برجسته‌ای در شیب دمای سطح زمین ایران گزارش شده است؛ این تغییرات وضعیت ناهمواری‌ها و و تغییرات کوتاه مدت اقلیمی نسبت داده شده است. تأثیرات بلندی‌ها و ارتفاعات و توده‌های آب در کاهش کلی دمای سطح زمین آشکار بوده است. اما سرزمین‌های پست و نواحی بیابانی، به علت غلبه خاک خشک، دارای شیب‌های دمایی مثبت بوده‌اند. به لحاظ ماهانه، در طول سال در بخش اعظم ایران غلبه با شیب‌های مثبت دمایی گزارش شده است. در صورتی که شیب های دمایی منفی صرفاً در دوره سرد سال و به ویژه بر بلندی‌های البرز و زاگرس حاکمیت داشته است (صلاحی و همکاران، ۱۳۹۵). یافته‌های مطالعه‌ای به عدم رخداد پدیده برف در مناطق با دمای سطح بیش‌تر از ۳۰ و بلندی‌های پایین‌تر از ۱۷۰۰ متر اشاره کرده است. همچنین، براساس دیگر یافته‌ها، دمای سالانه ۳۷ درجه سلسیوس به عنوان دمای مرز بارش برف در کشور ایران مشخص شده است و همچنین بیش‌ترین رخدادهای برف در نواحی دارای دمای سالانه سطحی صفر درجه سلسیوس گزارش شده است (مسعودیان و کیخسروی‌کیانی، ۱۳۹۶). در پژوهشی دیگر توزیع زمانی– مکانی دمای سطح زمین حوضه آبریز درانجیر طی دوره ۲۰۱۹-۲۰۰۳ مورد بررسی قرار گرفت. یافته‌ها نشان دادند که در حوضه مذکور، فصول زمستان و تابستان به ترتیب با دامنه‌های ۴۰-۵ و ۶۵-۳۵ درجه سلسیوس، سردترین و گرم‌ترین فصول سال را به خود اختصاص داده‌اند. همچنین نتایج بررسی ناهنجاری دمای روزهنگام حوضه مذکور، حاکی از افزایش ۰/۵ درجه‌ای در طی دوره‌ی آماری مورد بررسی بوده و به لحاظ فضایی نیز بیشینه آن در بخش‌های مرکزی و جنوبی حوضه رخ داده است (آباد و همکاران، ۱۴۰۰). در پژوهشی روند تغییرات زمانی- مکانی دمای سطح کویر درانجیر طی دوره ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۳ بررسی شد. نتایج روند دمای سطح زمین در

مقیاس فصلی نشان داد که در فصل زمستان‌های کویر درانجیر نسبت به گذشته گرمتر و برعکس تابستان‌های آن خنکتر شده است. همچنین نتایج در مقیاس سالانه نشان داد که در بستر رودخانه‌های سیریز و رفسنجان و ارتفاعات الاله‌زار روند دمای سطح زمین افزایشی و در سدهای احداث شده در جنوب کرمان و رفسنجان و چاله بافق روند دمای سطح زمین کاهشی است (مزیدی و همکاران، ۱۴۰۳). در پژوهش دیگری میانگین بلندمدت دمای سطح کویر درانجیر با داده‌های مودیس محاسبه شد. نتایج میانگین دمای سطح زمین در مقیاس فصلی نشان داد که بالاترین دمای سطح در نواحی پست به ویژه چاله بافق است که اثر ارتفاع کم بر دمای سطح حوضه کویر درانجیر را نشان می دهند. علاوه بر این نتایج گویای آن است که اختلاف شبانه روزی دمای سطح کویر درانجیر در دوره گرم سال(فصول بهار و تابستان) بیش از دوره سرد سال(فصول پاییز و زمستان) است. در مقیاس سالانه نیز نشان داد که میانگین دمای روزانه سطح ۴۰ درجه سلسیوس و میانگین دمای شبانه ۹ درجه سلسیوس است که در این صورت اختلاف شبانه روزی دمای سطح ۳۱ درجه خواهد بود. این اختلاف چشم گیر دمای شبانه روزی نشانه‌ای از اقلیم کویری منطقه را نشان می‌دهد (کاربخش و همکاران، ۱۴۰۴).

داده‌ها و روش‌ها

۱- منطقه مورد مطالعه

حوضه کویر درانجیر یکی از حوضه های بسته ایران است که در تقسیم‌بندی حوضه‌های آبریز ایران حوضه فرعی به شمار می‌رود و زیر مجموعه حوضه آبریز مرکزی است. این حوضه در عرض جغرافیایی ۲۹ تا ۳۳ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۵۴ تا ۵۸ درجه شرقی با مساحت ۵۸۵۰۸ کیلومتر مربع به عنوان حوضه آبریز مناطق جنوب یزد و شمال کرمان شناخته می‌شود (شکل ۱). این حوضه از جنوب به کوه‌های لاله زار و بیدخان و از شمال به کوه‌های راین و پلوار محدود می‌شود و دشت‌های کم شیب آن از جنوب شرق به شمال غربی امتداد یافته اند. رودهای اصلی این حوضه از کوه‌های کرمان سرچشمه می‌گیرند و به کویر درانجیر در غرب بافق می‌ریزند. با توجه به عدم پراکنش مناسب و کافی ایستگاه‌های هواشناسی زمینی در منطقه، استفاده از داده‌های ماهواره‌ای آسان‌ترین و کارآمدترین راه جهت هر گونه مطالعه محیطی می‌باشد. از طرف دیگر به دلیل بکر بودن و عدم انجام هرگونه مطالعه جامع روی این منطقه آشکارسازی تغییرات دمای سطح آن ضروری است. در دهه‌های اخیر گرمایش جهانی و خشکسالی‌های پیاپی باعث مشکلات زیست محیطی و دگرگونی عناصر آب و هوایی بویژه وضعیت حرارتی سطح منطقه شده که نیازمند پژوهشی در این زمینه است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوضه کویر درانجیر در ایران

۲- داده‌های مورد پژوهش

سنجنده مودیس بر روی دو ماهواره Terra و Aqua نصب شده است که به ترتیب در ۱۸ دسامبر ۱۹۹۹ و ۴ می ۲۰۰۲ توسط ناسا به فضا پرتاب شدند. این دو ماهواره هر روز دو بار از تمام سطح زمین تصویربرداری می‌کنند و داده‌هایی در ۳۶ باند طیفی (طول‌موج‌های ۱۴/۴-۰/۴ میکرومتر) با قدرت تفکیک مکانی ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متری برداشت می‌کنند. در این پژوهش داده‌های روزانه دمای سطح فراورده MOD11A1 با تفکیک مکانی ۱۰۰۰ متر در بازه زمانی ۲۰۰۳/۱/۱ تا ۲۰۲۲/۱۲/۳۱ خورشیدی به مدت ۷۳۰۵ روز از تارنمای مودیس استخراج شد (https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov). فرمت داده‌ها HDF بوده و بازه زمانی آن روزانه است که از تاریخ ۱۳۷۸/۱۲/۵ خورشیدی بر روی وبگاه ناسا در دسترس می‌باشد. همچنین مختصات این داده‌ها سینوسی است و حوضه آبریز درانجیر در مختصات ۵ و ۶ عمودی و ۲۲ افقی قرار دارد. داده‌های این سنجنده به صورت کاشی‌های جداگانه در ابعاد ۱۲۰۰*۱۲۰۰ کیلومتری در دسترس است و در مجموع دو کاشی گستره حوضه درانجیر را پوشش می‌دهد. با توجه به این دو کاشی پیرامون حوضه درانجیر را نیز در بر می‌گرفت، تنها داده‌هایی که درون مرز جغرافیایی درانجیر را پوشش می‌داد، استخراج گردید. از این رو یک ماتریس مکان- زمان به ابعاد ۷۳۰۵*۵۸۸۸۰ تهیه گردید که سطرهای آن تعداد یاخته‌های درون حوضه درانجیر و ستون‌ها زمان بر حسب روز را نشان می‌دهد. این ماتریس مبنای داوری این پژوهش قرار گرفت. بر

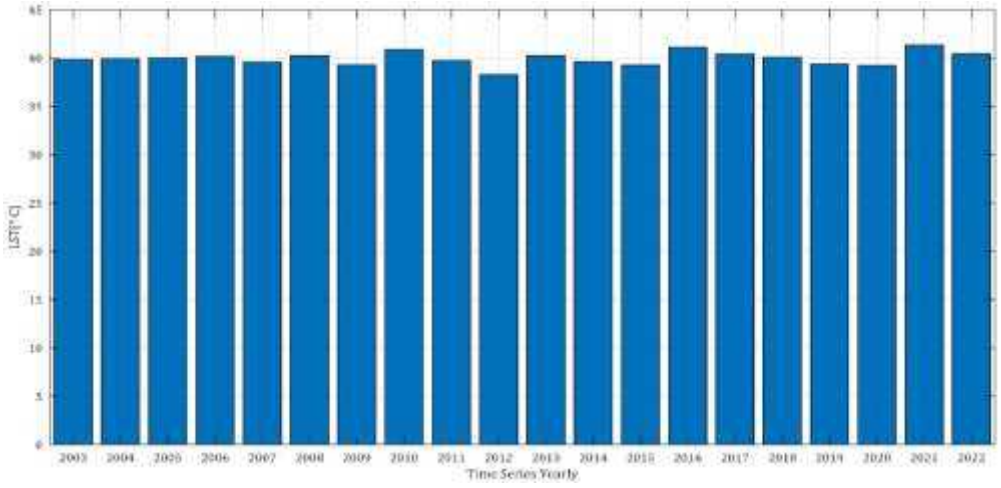
پایه رابطه (۱) میانگین دمای کویر درانجیر برای هر روز محاسبه گردید. این فرایند برای هر ماه، فصل و سال تکرار و در نهایت برای هر بازه، سری زمانی آن محاسبه گردید.

$$\bar{A}_i = \frac{\sum A_i}{n}$$

در این رابطه $\bar{A}_i$ میانگین دمای سطح درانجیر در هر روز، A_i مقدار دمای سطح هر پیکسل در هر روز و n تعداد مشاهدات آن روز می‌باشد.

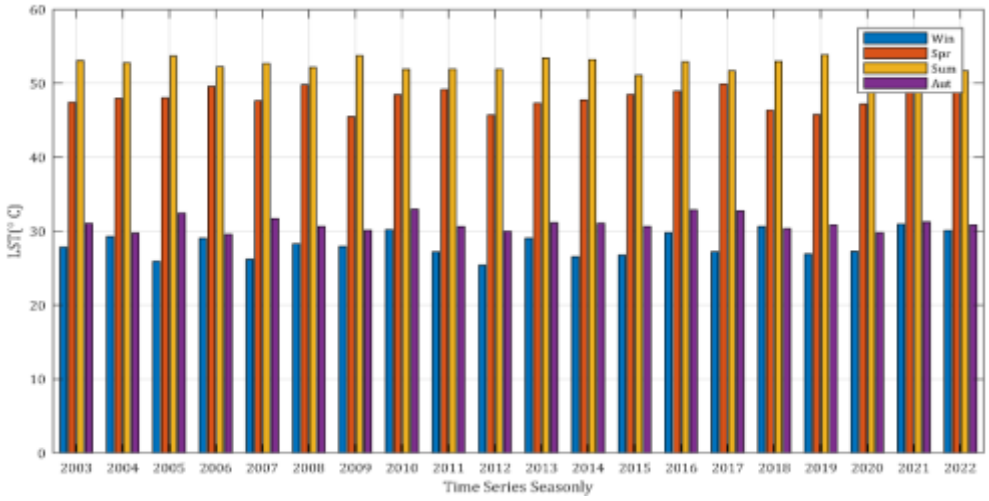
نتایج و بحث

برای پاسخ به این پرسش که تغییرات دمای سطح کویر درانجیر طی دو دهه اخیر چگونه بوده است، از سری‌های زمانی مختلف بهره گرفته شد. واکاوی سری زمانی سالانه نشان داد که در سال ۲۰۲۱ بالاترین دمای سطح در حوضه درانجیر رخ داده است. در این سال میانگین دمای سطح حوضه به ۴۱/۳ درجه سلسیوس رسیده است که در طول دوره مورد مطالعه بی‌سابقه بوده است. این بخش از پژوهش مطابق با پژوهش کفایت‌مطلق و همکاران (۱۴۰۳) می‌باشد. ایشان در پژوهشی سری زمانی دمای روزهنگام حوضه آبریز جازموریان را طی دو دهه اخیر بررسی کردند. نتایج سری زمانی سالانه نشان داد که بالاترین دمای سطح در سال ۲۰۲۱ رخ داده است. حداقل دمای روزهنگام سطح حوضه نیز در سال ۲۰۱۲ به حدود ۳۸ درجه سلسیوس رسیده است (شکل ۲). با توجه به سری زمانی سالانه، روند کلی دمای روزهنگام سطح زمین در حوضه آبریز درانجیر دارای روند افزایشی بوده است که به خصوص از سال ۲۰۱۲ به بعد، این افزایش مشهود بوده است. به طور کلی، میانگین تقریبی دمای سطح زمین در حوضه مذکور، حدود ۴۰ درجه سلسیوس است که خود نمایان‌گر حاکمیت اقلیمی کاملاً گرم و خشک می‌باشد.



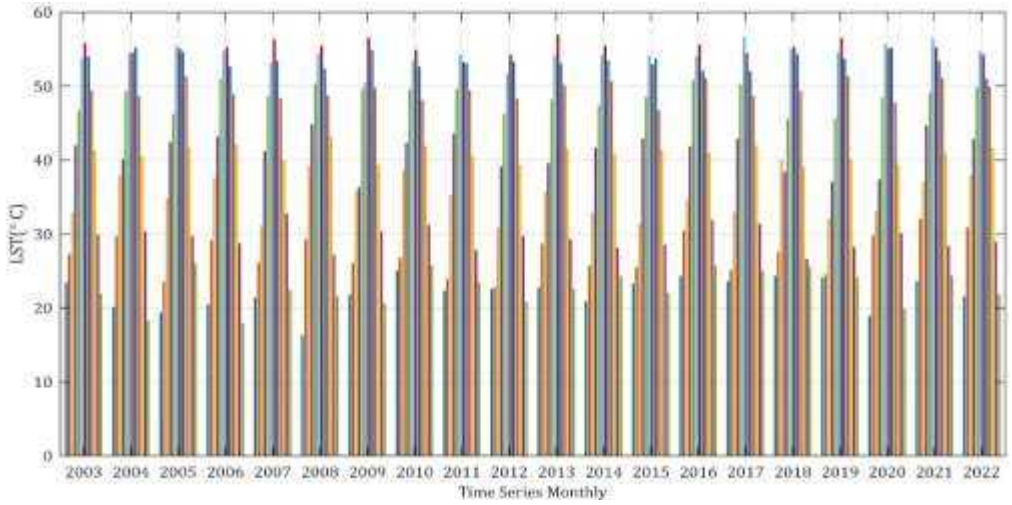
شکل ۲- سری زمانی سالانه دمای روزهنگام سطح حوضه درانجیر طی دوره ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۳

در شکل ۳ سری زمانی فصلی دمای روزهنگام سطح حوضه آبریز درانجیر نشان داده شده است. بر اساس شکل مذکور در فصل زمستان میانگین تقریبی دما در حوضه مذکور حدود ۲۸ درجه است اما با این وجود دارای افت و خیزهای قابل توجهی نیز بوده است. به طور مثال میانگین دمای سطح زمین در سال ۲۰۱۲ تا ۲۵ درجه سلسیوس نیز پایین آمده است. همچنین در طرف دیگر نیز در اوج خود در سال ۲۰۲۱ تا ۳۱ درجه سلسیوس نیز بالا رفته است. به طور کلی سری زمانی دمای روزهنگام فصل زمستان در حوضه آبریز درانجیر به خصوص در سال‌های پایانی حاکی از روند افزایشی می‌باشد. در فصل بهار دمای سطح زمین در حوضه مذکور افزایش قابل ملاحظه ای نسبت به فصول قبلی داشته است؛ به طوری که میانگین تقریبی آن تا مرز ۴۸ درجه سلسیوس رسیده است. در مورد این دمای روزهنگام بالا در این موقع از سال در این منطقه، می‌توان به دلایلی نظیر موقعیت جغرافیایی منطقه مذکور متأثر از گرمای پرفشار جنب حاره، خشکی کلی منطقه به دلیل فقدان پوشش‌گیاهی و وجود ماسه‌ها در مرکز منطقه اشاره کرد. در فصل تابستان که به عنوان گرم‌ترین فصل حوضه آبریز درانجیر شناخته می‌شود میانگین دمای این حوضه به روند افزایشی خود ادامه داده و به بالای ۵۲ درجه سلسیوس رسیده است. در تابستان با توجه به استیلای کامل گرما بر منطقه و مخصوصا سیستم پرفشار جنب حاره و همچنین خشکی کامل منطقه و عدم صعود هوا، رخداد دماهای روزهنگام بالا به عنوان یکی از ویژگی‌های ذاتی اقلیم این منطقه می‌باشد. البته فقط در زمان نفوذ سامانه تابستانه مونسون هند و بارندگی‌های ناشی از آن، دمای هوا کمی دچار کاهش می‌شود. بطور کلی سری زمانی فصلی دمای روزهنگام سطح حوضه درانجیر طی دو دهه اخیر نشان داد که تابستان ۲۰۱۹ بیشترین دمای روزهنگام سطح حوضه درانجیر رخ داده و به حدود ۵۴ درجه سلسیوس رسیده است. در فصل پاییز دمای سطح زمین در حوضه آبریز درانجیر نوسان کمی داشته و به طور کلی میانگین آن ۳۱ درجه سلسیوس بوده است (شکل ۳).

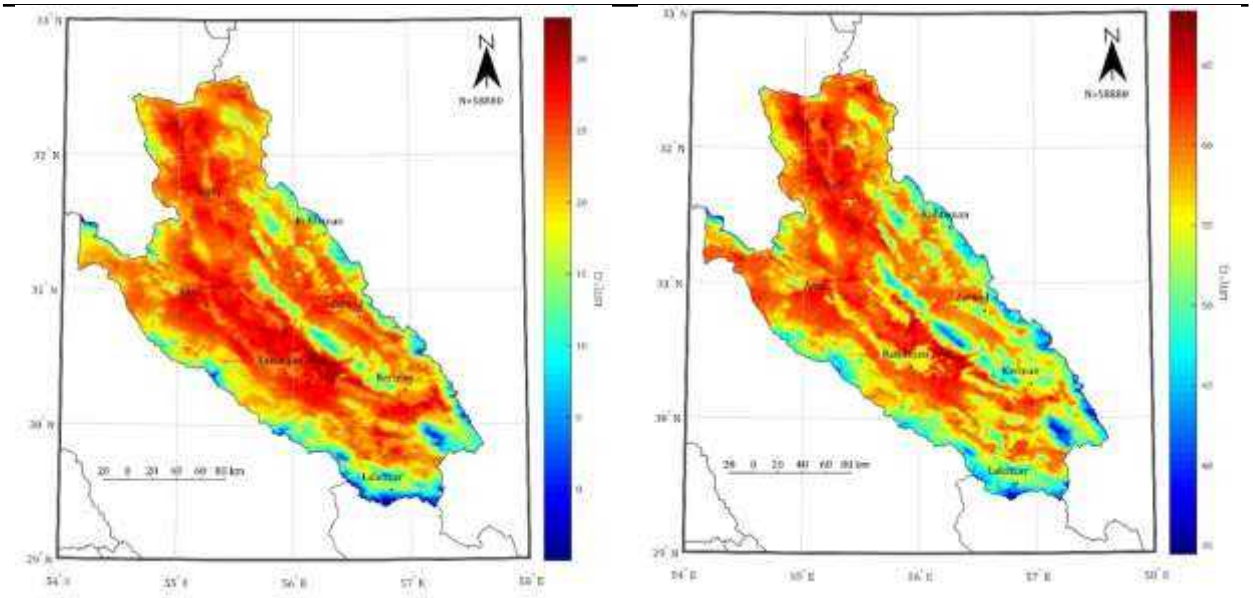


شکل ۳- سری زمانی فصلی دمای روزهنگام سطح کویر درانجیر طی دوره ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۳

شکل شماره ۴ سری زمانی ماهانه دمای روزهنگام سطح کویر درانجیر را نشان می‌دهد. با توجه به شکل مذکور، ماه ژانویه (دی ماه) با میانگین دمایی ۲۲ درجه سلسیوس بعنوان سردترین ماه سال شناخته می‌شود. در این ماه، سال ۲۰۰۷ کم‌ترین دمای روزهنگام با مقادیر ۱۶ درجه سلسیوس طی دو دهه اخیر رخ داده است و نکته جالب این که بعد از سال ۲۰۰۷ روند کلی دمای ژانویه افزایشی بوده است (بجز سال ۲۰۲۰). ماه فوریه با افزایش دما نسبت به ژانویه، به عنوان سومین ماه سرد سال شده است به طوری که حتی بیشینه دمایی آن در سال ۲۰۲۱ به ۳۲ درجه نیز رسیده است. ماه مارس نسبت به دو ماه قبل، تغییرات دمایی قابل توجهی پیدا کرده است؛ به طوری که رخداد دمای نزدیک به ۴۰ درجه (در سال ۲۰۱۸) به خوبی می‌تواند نمایان‌گر تأثیر ضعیف الگوهای زمستانی در منطقه مذکور و متعاقباً گرم شدن تدریجی هوا در این ماه باشد. اما ماه آوریل دارای افت و خیز دمایی کمتری شده و غالباً در میانگین دمایی ۴۱ درجه بوده است. ماه می را میتوان به عنوان ماه ورود به دوره گرم سال در نظر گرفت؛ از آن جهت که دما در این ماه افزایش قابل توجهی پیدا کرده و تقریباً در میانگین ۴۸/۵ درجه در نوسان بوده است. ماه‌های جولای و ژوئن به ترتیب با میانگین ۵۵ و ۵۴، به عنوان گرم‌ترین ماه‌های سال شناخته می‌شوند. میانگین دما در آگوست ماه ۵۳ درجه سلسیوس ثبت شده است. سپتامبر نیز با میانگین دمایی تقریباً ۵۰ درجه سلسیوس به عنوان آخرین ماه گرم سال مشخص شده است. اما ماه اکتبر از شرایط دمای گرمایی تقریباً دور شده است؛ به طوری که میانگین دمایی آن به زیر ۴۱ درجه نزول پیدا کرده است. در ماه نوامبر نیز روند تغییرات کاهشی دما ادامه داشته و میانگین دما به زیر ۳۰ درجه سلسیوس رسیده است. با تدوام کاهش دما و نزدیکی به دوره سال، ماه دسامبر با میانگین تقریبی دمای ۲۳ درجه سلسیوس، به عنوان یکی از ماه‌های سرد سال مشخص شده است. در ادامه میانگین دمای روزهنگام سطح کویر درانجیر در گرم‌ترین ماه (جولای ۲۰۱۳ مصادف با تیر ۱۳۹۲) و سردترین ماه (ژانویه ۲۰۰۷ مصادف با دی ماه ۱۳۸۵) طی دو دهه اخیر نشان داده شده است (شکل ۵).



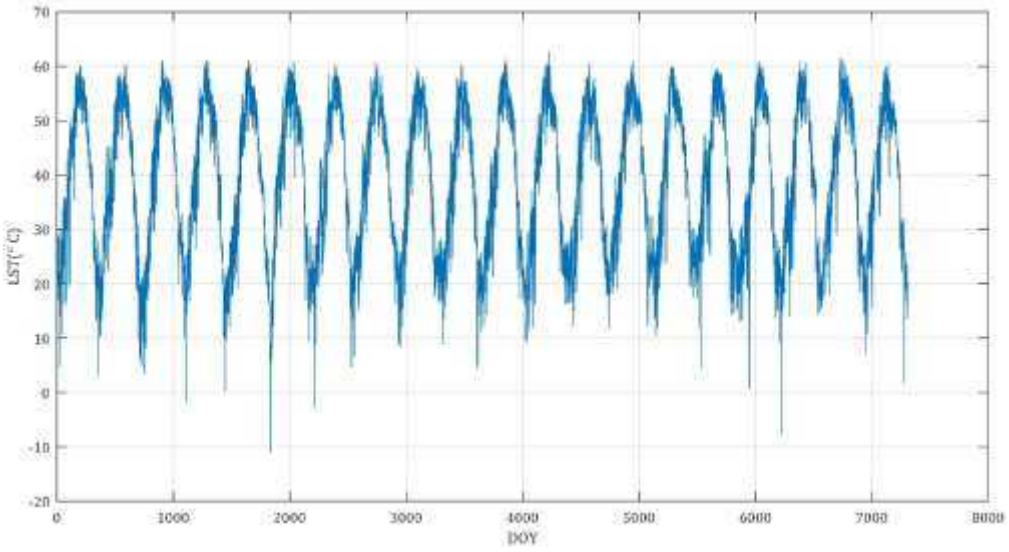
شکل ۴- سری زمانی ماهانه دمای روزهنگام سطح حوضه درانجیر طی دوره ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۳



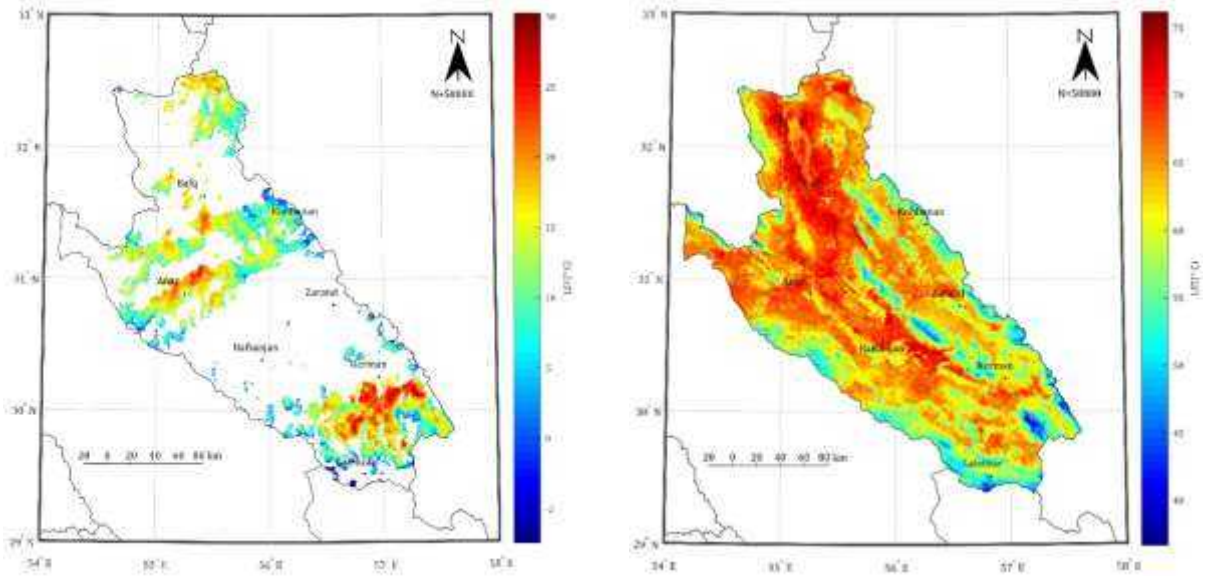
شکل ۵- میانگین دمای روزهنگام سطح کویر درانجیر طی دو دهه اخیر (سمت راست جولای ۲۰۱۳) و (سمت چپ ژانویه ۲۰۰۷)

در شکل ۶ سری زمانی روزانه دمای روزهنگام کویر درانجیر نشان داده شده است. بر اساس شکل، میانگین روزانه دمای سطح زمین در منطقه حدود ۴۰ درجه سلسیوس بوده است که با توجه به موقعیت جغرافیایی حوضه مذکور و نوع سیستم-های آب وهوایی مؤثر قابل توجیه می‌باشد. به طور خاص سیطره پرفشار جنب حاره در تابستان در این منطقه، باعث رخداد دماهای تابستانی بیشینه و متعاقباً افزایش میانگین دمای روزهنگام شده است. با توجه به شکل، دمای روزانه سطح کویر درانجیر در سال‌های ۲۰۱۶ و ۲۰۲۱ در اوج خود بوده است به طوری که مقدار آن به نزدیک ۶۰ درجه رسیده است. به لحاظ دمای کمینه روزهنگام نیز شرایط متفاوتی حاکم بوده است. هر چند در شکل زیر مقادیر زیر صفر درجه هم ثبت شده است، اما در این روزها بخش وسیعی از داده‌ها به دلیل وجود رطوبت زیاد، ابرناکی و ریزگردها توسط ماهواره برداشت نشده و دارای گپ آماری است (کفایت مطلق و همکاران، ۱۴۰۰). با این وجود نتایج گویای آن است که میانگین حداقل دمای روزانه منطقه بالای ۲۰ درجه سلسیوس بوده است که این با توجه به اقلیم خشک منطقه و همچنین موقعیت جغرافیایی خاص آن و نفوذ کم‌تر سیستم‌های آب‌وهوایی سرد به منطقه مذکور، قابل توجیه می‌باشد. البته بخش مهمی از رخدادهای دمای کمینه کویر درانجیر نیز به سبب وجود ارتفاعات بلند هزار و لاله‌زار می‌باشد که نقش یک جزیره سرمایی را در دل این منطقه گرم و خشک ایفا می‌کنند. اما نکته مهم و برجسته در این نمودار، روند افزایشی قابل توجه در سری زمانی دمای روزانه سطح زمین حوضه مذکور می‌باشد که به طور خاص در سال‌های پایانی مشهود شده است. مورد اخیر به خوبی می‌تواند تأثیرات خشکسالی‌های متعدد و تشدید خشکی منطقه و همچنین تغییر اقلیم و گرمایش جهانی را به خوبی نشان دهد. بطور کلی نتایج حاکی از آن است که دمای سطح حوضه گذشته از چرخه‌های منظم درون سالانه، دارای

بی‌نظمی‌های بین سالانه نیز است. نتایج نشان داد که یکی از ناهنجاری‌های بین سالانه نوار دمای سطح درانجیر در ۲۷ جولای ۲۰۱۴ (مصادف با ۵ مرداد ماه سال ۱۳۹۳) رخ داده است. در این روز میانگین دمای روزانه سطح حوضه درانجیر نزدیک به ۶۳ درجه سلسیوس می‌رسد که طی دو دهه اخیر بی سابقه بوده است (شکل ۷ سمت راست). یکی دیگر از روزهای فرین دمایی کویر درانجیر در ۵ ژانویه ۲۰۰۵ (مصادف با) با مقدار ۱۱- درجه سلسیوس رخ داده است (شکل ۷ سمت چپ).



شکل ۶- سری زمانی روزانه دمای روزهنگام کویر درانجیر طی دوره ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۳



شکل ۷- میانگین دمای روزهنگام سطح کویر درانجیر در ۲۷ جولای ۲۰۱۴ (سمت راست) و ۹ ژانویه ۲۰۰۵ (سمت چپ)

نتیجه‌گیری

در این پژوهش برای واکاوی سری زمانی دمای روزهنگام حوضه درانجیر از داده‌های روزانه محصولMOD11A1 سنجنده مودیس در فاصله زمانی ۲۰۰۳/۰۱/۰۱ تا ۲۰۲۲/۱۲/۳۱ با تفکیک مکانی ۱۰۰۰ متر استفاده شد. پس از انجام پردازش داده‌ها، سری زمانی دمای روزهنگام حوضه درانجیر در مقیاس سالانه، فصلی، ماهانه و روزانه محاسبه شد. نتایج سری زمانی سالانه نشان داد که حداکثر و حداقل دمای روزهنگام حوضه درانجیر با مقدار ۴۱ و ۳۸ درجه سلسیوس به ترتیب طی سال‌های ۲۰۲۱ و ۲۰۱۲ رخ داده است. نتایج سری زمانی فصلی نشان داد که در تابستان ۲۰۱۹ بالاترین مقدار میانگین دمای سطح حوضه درانجیر ثبت شده و به بیش از ۵۴ درجه سلسیوس رسیده است. حداقل دمای روزهنگام سطح حوضه درانجیر نیز در زمستان ۲۰۱۲ حدود ۲۵ درجه سلسیوس بوده است. نتایج سری زمانی ماهانه نشان داد که ژانویه بعنوان سردترین ماه حوضه شناخته می‌شود، بخصوص ژانویه ۲۰۰۷ کم‌ترین دمای روزهنگام با مقادیر ۲۲ درجه سلسیوس رخ داده است. حداکثر دمای روزهنگام هم با مقدار ۵۵ درجه سلسیوس در جولای ۲۰۱۳ دیده می‌شود. نتایج سری روزانه دمای روزهنگام حوضه درانجیر طی دو دهه اخیر حاکی از آن است که دمای روزهنگام حوضه درانجیر گذشته از چرخه‌های منظم درون سالانه، دارای بی‌نظمی‌های بین سالانه نیز است. بررسی‌ها نشان داد که یکی از ناهنجاری‌های بین سالانه سری زمانی دمای روزهنگام حوضه درانجیر در ۲۷ جولای ۲۰۱۴ مصادف با ۵ مرداد ۱۳۹۳ رخ داده است. در این روز میانگین دمای روزهنگام سطح حوضه درانجیر نزدیک به ۶۳ درجه سلسیوس می‌رسد که طی دو دهه اخیر بی سابقه بوده است. به نظر می‌رسد در این روز سامانه گرمایشی نیرومندی بسان پرفشار جنب حاره‌ای آزور در منطقه فعال بوده باشد که نیازمند پژوهشی جداگانه است. همچنین پیشنهاد نگارندگان آن است که به کمک داده‌های دورسنجی سری زمانی دمای شبانه‌روزی حوضه مورد نظر بررسی گردیده و ارتباط آن با سامانه‌های همدید فعال در حوضه واکاوی گردد.

منابع

آباد، ب. صلاحی، ب. رئیس پور، ک. مرادی، م. (۱۴۰۰). پایش ماهواره‌ای دمای روزهنگام سطح زمین حوضه آبریز درانجیر با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای، فصلنامه جغرافیای طبیعی، ۱۳(۵۲)، صص ۸۱-۶۳.

احمدی، م. داداشی رودباری، ع. ع. احمدی، ح. (۱۳۹۷). واکاوی دمای روزهنگام سطح زمین ایران مبتنی بر برون داد سنجنده‌ی MODIS. فصلنامه علوم محیطی، شماره ۱، صص ۶۸-۴۷.

امیدوار، ک. مویدفر، س. فاطمی، م. نارنگی فرد، م. (۱۳۹۹). ارزیابی ارتباط کاربری اراضی شهری و جزایر حرارتی، مطالعه موردی: شهر بیابانی یزد. جغرافیای طبیعی، ۱۳(۴۷)، صص ۱۷-۱.

صلاحی، ب. مرادی، م. مسعودیان، ا. (۱۳۹۵). بررسی شیب دمای سطح زمین در ایران با داده‌های روزهنگام مودیس. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۴۸ (۴)، صص ۵۳۲-۵۱۷.

کاربخش راوری، ف. مزیدی، ا. امیدوار، ک. ابراهیمی خوسفی، م. (۱۴۰۴). واکاوی میانگین بلندمدت دمای سطح زمین با داده های مودیس؛ مطالعه موردی: کویر درانجیر، فصلنامه علمی- پژوهشی اطلاعات جغرافیایی « سپهر», ۳۴(۱۳۴), ۷-۲۴.

کفایت مطلق، ا. ر. آباد، ب. معنوی‌پور، س. کاربخش راوری، ف. (۱۴۰۳). واکاوی سری زمانی دمای روزهنگام سطحِ حوضه آبریز جازموریان طی دو دهه اخیر، اولین همایش ملی جازموریان؛ چالشها و فرصتها، جیرفت.

کفایت مطلق، ا. ر. خسروی، م. مسعودیان، ا. (۱۴۰۰). واکاوی موانع برداشت/ دیدبانی سپیدایی آبی‌فام در ایران‌زمین. نشریه سنجش از دور و GIS ایران، ۱۳(۲)، صص ۲۳-۳۸.

مزیدی، ا. کاربخش راوری، ف. ابراهیمی خوسفی، م. امیدوار، ک. (۱۴۰۳). واکاوی روند تغییرات زمانی-مکانی دمای سطح کویر درانجیر.،کاوش های جغرافیایی مناطق بیابانی, ۱۲(۱), ۸۷-۱۰۲.

مسعودیان، ا. کیخسروی‌کیانی، م. ص. (۱۳۹۶). واکاوی نقش دمای سطح زمین در پراکنش پوشش برف در ایران به کمک داده‌های ماهواره‌ای. جغرافیا و توسعه، ۴۹، صص ۲۰۴-۱۸۹.

Dar, I., Qadir, J., and Shukla, A. (2019). Estimation of LST from multi-sensor thermal remote sensing data and evaluating the influence of sensor characteristics. Annals of GIS, 25(3): 263-281.

Ghent, D., Veal, K., Trent, T., Dodd, E., Sembhi, H., and Remedios, J. (2019). A new approach to defining uncertainties for MODIS land surface temperature. Remote Sensing, 11(9): 1021.

Jin, M., and Dickinson, RE. (2010). Land surface skin temperature climatology: benefitting from the strengths of satellite observations.Environ. Res. Lett, 5: 44004.

Kayet, N. Pathak, K. Chakrabarty, A., and Sahoo, S. (2016). Spatial impact of land use/land cover change on surface temperature distribution in Saranda Forest, Jharkhand. Modeling Earth Systems and Environment, 2(3):127. DOI 10.1007/s40808-016-0159-x.

Khandelwal, S., Goyal, R., Kaul, N., and Mathew, A. (2018). Assessment of land surface temperature variation due to change in elevation of area surrounding Jaipur, India. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 21(1): 87-94.

Kotikot, S. M., Flores, A., Griffin, R. E., Sedah, A., Nyaga, J., Mugo, R., and Irwin, D. E. (2018). Mapping threats to agriculture in East Africa: Performance of MODIS derived LST for frost identification in Kenya's tea plantations. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 72: 131-139.

https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/archive/allData.

Li, Z.L., Tang, B.H., Wu, H., Ren, H., Yan, G., Wan, Z. and Sobrino, JA. (2013). Satellite-derived land surface temperature: status and perspectives. Remote Sensing of Environment. 131: 14-37.

Liu, H., and Weng, Q. (2008). Seasonal variations in the relationship between landscape pattern and land surface temperature in Indianapolis, USA. Environmental Monitoring and Assessment, 144(1-3): 199-219.

Mildrexler, D. J., Zhao, M., Cohen, W. B., Running, S. W., Song, X. P., and Jones, M. O. (2018). Thermal anomalies detect critical global land surface changes. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 57(2): 391-411.

Peng, W., Zhou, J., Wen, L., Xue, S., and Dong, L. (2017). Land surface temperature and its impact factors in Western Sichuan Plateau, China. Geocarto International, 32(8): 919-934.

Wen, J., Su, Z., and Ma, Y. (2003). Determination of land surface temperature and soil moisture from Tropical Rainfall Measuring Mission/Microwave Imager remote sensing data. Journal of geophysical research: Atmospheres, 108(D2): ACL-2.

Xing, Z., Li, Z. L., Duan, S. B., Liu, X., Zheng, X., Leng, P., and Shang, G. (2021). Estimation of daily mean land surface temperature at global scale using pairs of daytime and nighttime MODIS instantaneous observations. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 178: 51-67.
Xu, T. He, X. Bateni, S.M. Auligne, T. Liu, S. Xu, Z. and Mao, K. (2019). Mapping regional turbulent heat fluxes via variational assimilation of land surface temperature data from polar orbiting satellites. Remote Sensing of Environment, 221:444 - 461.

Analysis of the time series of daytime LST in Daranjir desert during the last two decades

Fatemeh Karbakhsh[1], Omid Reza Karimi[2], Sanaz Manavipur[3], Behrokh Bosak[4]

Ph.D. student in Climatology, University of Yazd

Researcher in Climatology, University of Kurdistan

Ph.D. in Climatology, University of Mohaghegh Ardabili

MSc in Climatology, University of Isfahan

* Corresponding author: karbakhsh7738@gmail.com

Abstract

Land surface temperature is one of the fundamental variables in environmental studies. Therefore, examining its time series can be a step towards revealing environmental changes in each region. The findings of the annual average time series showed that the highest and lowest LST in the Daranjir Desert over the last two decades occurred in 2021 and 2012, respectively. The seasonal average time series also showed that the highest and lowest LST over the last two decades occurred in the summer of 2019 and the winter of 2012, respectively. The results of the daily average time series indicate that the highest LST occurred on July 27, 2014 with a value of 62.8 degrees Celsius and the lowest LST occurred on January 9, 2005 with a value of -11 degrees Celsius. It seems that the Daranjir Desert Basin has witnessed the expansion of extensive heating and cooling systems during these days of cold temperatures, which requires a separate study.

Keywords: Time series, Land Surface Temperature, MODIS, Daranjir.

سومین کنفرانس ملی آب و هواشناسی ایران (با محوریت تغییر اقلیم)
The 3rd National Conference on Climatology of Iran (Focusing on Climate Change)
ارومیه ۱۶ مهر ۱۴۰۴

واکاوی الگوی های دور پیوندی اقیانوس اطلس با بارش های شرق استان اصفهان (منطقه مورد مطالعه: کوهپایه، ورزنه و هرند)

کمال امیدوار [۱]* ، هاجر طوفانی کوپائی[۲]

۱- استاد اقلیم شناسی ،گروه جغرافیا ،دانشگاه یزد ،یزد، ایران

۲ - دانشجوی دکتری اقلیم شناسی ،دانشگاه یزد،یزد،

پست الکترونیک نویسنده مسئول:komidvar@yazd.ac.ir

چکیده

هماهنگی بین تغییرات زمانی دو نقطه دور از هم که عمدتا برای تغییرات فشار به کار می رود اصطلاحا پیوند از دور گفته می شود .در این پژوهش ،با هدف اشکارسازی روابط الگوی های پیوند از دور با بارش ماهانه ،سه ایستگاه های شرق اصفهان (کوهپایه ،هرند،ورزنه)با دو الگوی پیوند از دور(NAO,EA/WR) با استفاده از تحلیل همبستگی پیرسون و مدل رگرسیون گام به گام در دوره اماری (۲۰۰۶-۲۰۲۲) برای سنجش روابط استفاده شد .نتایج این پژوهش نشان داد که ارتباط معنی داری بین الگو ها و بارش منطقه وجود دارد .بارش ایستگاه کوهپایه در ماه می و ایستگاه ورزنه در ماه ژوئن همبستگی مثبت و معنی داری در سطح اطمینان ۹۵ درصد با شاخص NAO داشته است و ایستگاه های هرند و ورزنه در ماه نوامبر همبستگی مثبت و معنی داری در سطح اطمینان ۹۵ درصد با شاخص EA/WR داشته است . باتوجه به محاسبات انجام شده در تاخیر زمانی یک ماهه،سه ماهه،شش ماهه و نه ماهه بارش هیچ رابطه معنی داری در ایستگاه مورد مطالعه در هر دو شاخص الگوی پیوند از دور مشاهده نشده است .نتایج مدل رگرسیون گام به گام نشان داد که تاتیرگذار ترین شاخص ها بر بارش ایستگاه های کوهپایه،هرند، ورزنه . الگوی EA/WR که به عنوان موثرترین الگوی تغییرات بارش را توجیه می کند .

کلمات کلیدی: الگوی پیوند از دور ، بارش ، ضریب همبستگی پیرسون ، رگرسیون ،شرق اصفهان

۱-مقدمه

واژه پیوند از دور در زمینه الگوهای فرازونشیب های آب وهوایی توسط آنگستروم در سال 1935 میلادی معرفی شد؛ سپس برکنس در سال ۱۹۶۹ میلادی برای توصیف الگوی واکنش جوی به نیروی سطحی دورآن را به کار برد.در دهه ۱۹۹۰ میلادی توجه دوبارهای در الگوی های پیوند از دور بین نوسان های فشار تشریح شده توسط واکر و ناهنجاری های جهانی دورترشد.خصوصیات و علل جهانی انها با به کار بردن روش های تحلیل گوناگون فضایی جستجو گردید واطلس های پیوند ازدورمنتشرشد(امیدوار،۱۳۹۱). همانگونه که نوسان جنوبی اشکارترین الگوی پیوند نیمکره ی جنوبی است ،نوسان اطلس شمالی هم بارزترین الگوی دورپیوندی است که در تمام طول سال در نیم کره یشمالی فعال است .نوسان اطلس شمالی در واقع نماینده بادهای غربی بر روی اقیانوس اطلس در فاصله ی مدار ۴۰تا۶۰درجه است و دارای دو فاز مثبت و منفی است .اگر به هنگام کاهش ناهنجاری کم فشار ایسلند و سراسر شمالگان،پرفشار قوی تر از حد معمول در آزور ایجلد گردد،نوسانات اطلس شمالی در فاز مثبت قرار می گیرد ،در چنین وضعیتی افزایش اختلاف فشار،جریانات شدید جوی را به طرف شمال اطلس می راند و موجب ظهور زمستانی گرم و مرطوب در اروپا(به ویژه در اروپای شمالی)وشرایط سرد وخشک،در شمال کانادا و گرینلند می گردد.در فاز منفی نیز یک مرکزپرفشار ضعیفتر از حد معمول در نواحی جنب حاره ایجاد می شود در این هنگام کم فشار ناحیه ی ایسلند نیز ضعیف تر از حد معمول خود است بنابراین کاهش گرادیان فشار و به دنبال خود جریانات ضعی فتری را به همراه خواهد اورد ،در این وضعیت هوای مرطوب به سوی مدیترانه وهوای سرد به سمت شمال اروپا منتقل می شود (برومند وهمکاران ،۱۳۸۶).برخی از الگوی های پیوند از دور تاثیری که بر سامانه های تعیین کننده ی اقلیم نواحی دورتر ازجمله ایران دارند موجب بروز نوسان هایی در هوای کشور می شود (مسعودیان وهمکاران ،۱۳۹۰).نتایج واکاوی پیوند میان نوسان شمالگان و رخداد بارش در ایران نشانداد که احتمال رخداد بارش،هنگام نمایه مثبت شمالگان بیشترین است بدین ترتیب که شیو شدید فشاردر شرق اقیانوس اطلس ،ناوه کم عمقی را بر فراز شرق مدیترانه سبب می شود که همراه جریانات شمال سو،شرایط پویشی را برای ایجاد سامانه کم فشار در شرق مدیترانه فراهم می کند (حجتی و مسعودیان ،۱۳۹۷). بارش های پراکنده ی آسیای مرکزی و شمال چین که اغلب در ماههای سردسال به صورت برف ظاهر میشود، تحتتأثیر الگوی دریای شمال -خزر است که مستقیم است، چون NCP ارتباط آن با فاز مثبت در فاز مثبت آن ، فرود بلند ی در تراز500 هکتوپاسکال تشکیل میشود که آسیای میانه در جلو ی این ناو ه قرا ر میگیر د و انتقا ل رطوبت از دریای خلیج فارس به سمت مناطق خشکی دشت- های شمالی چین و آسیای میانه موجب وقوع بارندگی می شود.(کارواليو۵۸ وهمکاران ،۲۰۲۰). الگوی پیوند از دور،از ناهنجاری این الگوهای بزرگ مقیاس که دور از هم قرار دارند

58 Carvalho

،نشات گرفته و تغییراتی را در قلمرو های وسیع به وجود می اورد(بوئر۵۹وهمکاران ،۲۰۱۹). تحقیقات و مطالعات زیادی در خصوص الگوی های پیوند از دور و شاخصهای انجام گرفته است که در زیر به برخی از آنها اشاره شده است.

رضائیان (۱۳۹۴)در پژوهشی به عنوان چرخه زندگی فاز های مثبت و منفی N.A.Oو اثر ان بر تغییر کمیت های دینامیکی بر روی ایران در سال های ۱۹۵۰-۲۰۱۱ به نتیجه رسیدند که ،در روزهای اغازین تقویت N.A.O مثبت بی هنجاری دمایی منطقه اروپا ،به دلیل وجود چرخند برروی شمال اطلس و همچنین بی هنجاری دمایی خاورمیانه و ایران به دلیل وجود چرخند برروی شمال افریقا مثبت است .ولی به تدریج با تقویت N.A.O+ واچرخند اروپا تقویت شده و باعث کاهش دما برروی خاورمیانه و ایران می شود،ولی پریشیدگی مثبت برروی اروپا همچنان وجود دارد . فاطمی (۱۳۹۵) الگوی گردش جوی دوره های ترسالی و خشکسالی و ارتباط ان با شاخص های پیوند از دوردر ایران مرکزی را بررسی و نشان داد الگوی های اقیانوس ارام / امریکای شمالی (PNA) در استان اصفهان و الگوی اطلس شرقی (EA)و الگوی اطلس شرقی و روسیه غربی (EA/WR)در استان کرمان و الگوی حاره ای جنوب اقیانوس اطلس (TSA) و الگوی قطبی (POL) در استان یزد به عنوان موثر ترین الگو ها،تغییرات SPI سالانه را در ایران مرکزی توجبه می نماید . رزمجو و همکاران (۱۳۹۹)،رابطه بین شاخص نوسان اطلس شمالی با خشکسالی و ترسالی های ایران در دومقیاس ایستگاهی و منطقه ایمورد بررسی قرار دادند .ان ها ضریب همبستگی پیرسون برای ارتباط همزمان،تاخیر یک ماهه،دوماهه،سه ماهه استفاده کردند و نتایج ان هانشان داداین شاخص در یک رابطهخطی قادر به تبیین سهم بزرگی از تغییر پذیری خشکسالی و ترسالی های ایران چه در مقیاس ایستگاهی و چه در مقیاس منطقه ای نبوده است .لذا به مدلهای غیر خطی جهت مطالعه این روابط باید توجه شود . هلالی (۱۴۰۰)،همبستگی شاخص پیوند از دور بزرگ مقیاس با تبخیر و تعرق مر جع ماهانه ایستگاه های همدید ایران را با روش پیرسون و کریجینگ واکاوی نمودند و نشان دادند شاخص AMO جزء شاخص هایی بوده که بیشترین همبستگی مثبت و بیشترین فراوانی همبستگی های معنا دار با تبخیر و تعرق ،یعنی ۲۳ درصد ایستگاه های مورد مطالعه را داشته است .هم چنین گسترده ترین پراکنش مکانی همبستگی های معنا دار متعلق به غلظت دی اکسید کربن بوده بوده که بهجز در ماه های نوامبر ودسامبر در همه تاخیرهای زمانی و همه ماه های مورد به دست امده است . برزگری و همکاران (۱۴۰۱)،درمقاله ای به عنوان ارتباط سنجی بین متوسط دمای حوضه ابرقو-سیرجان و الگوی پیوند از دور اقیانوس اطلس از داده های روزانه واکاوی شده ERA-Interim باتوان تفکیک ۲۵.۰*۲۵.۰درجه طی مقطع زمانی ۱۹۷۹-۲۰۱۹ با استفاده از ازمون همبستگی پیرسون بررسیشد نتایج نشان داد ارتباط سنجی بین متوسط دمای حوضه والگوی های پیوند از دور که تنها الگوی NAO در ماه فوریه همبستگی معکوس در سطح معنیا داری ۹۵درصد با دمای حوضه داشته اند .الگوی AMO بیش ازسایر الگوها با متوسط دمای حوضه همبستگینشان داده وپس از ان به ترتیب الگوی های NTA،AMM،TNA،TSAبیشترین همبستگی را داشته اند. فروتن و همکاران (۱۴۰۲)،در مقاله ای به عنوان "اثر همزمانی شاخص های پیوند از دور NAOوAMO برتغییرپذیری دما و بارش شهرستان مجاور سبلان "در بازه زمانی ۲۰۰۹-۲۰۱۸ با استفاده از روش همبستگی پیرسون و

59 Boers

تحلیل همدیدی استفاده شد نتایج نشان داد دمای تمام ایستگاه ها در ماه های خرداد و مهر و بارش بهمن ماه ایستگاه اردبیل بیشترین همبستگی معنی دار مستقیمی در سطح اطمینان ۹۹ و۹۵ درصد با شاخصNAO داشته است. هارل۶۰ (۱۹۹۵)،روندهای دهه ای نوسانات اقیانوس اطلس شمالی را مورد بررسی قرار داد و بیان داشت در طول یک دهه گذشته شاخص NAO بیشتر در فاز مثبت بوده و باعثافزایش دما در فصل زمستان در سراسر اروپا و شرایط سر د سال در شمال غربی اقیانوس اطلس شده است و همچنین شرایط خشکی در جنوب اروپا و مدیترانه و وضعیت مرطوبی برای شمال اروپا و بخش هایی از اسکاندیناوی به وجود اورده است . ترکز ۶۱و ارلات (۲۰۰۵)، طی مطالعه های نشان دادند که بین تغییرات شاخص اطلس شمالی و بارش فصل زمستان یک همبستگی منفی قوی در ترکیه وجود دارد، بهطوریکه فاز منفی الگوی NAO همراه با کاهش دما و افزایش بارش در فصل زمستان و فاز مثبت آن سبب افزایش دما و پیدایش خشکسالی و کاهش بارش در زمستان سراسر ترکیه شده است. ماسی۶۲ و همکاران (۲۰۱۰) ،نشان دادند که جریان رودخانه سن طی دوره (۲۰۰۸-۱۹۵۰)از روند افزایشی معنی داری برخوردار بوده است با مقایسه میان تغییرات شاخص نوسان اطلس شمالی (NAO) وناهنجاری های جریان سالانه سن تشخیص داده شد که NAO و جریان سالانه روند بسیار مشابهی با هم داشته است ،با توجه به این مسئله نتیجه گرفتند که میان NAO و فرایند اب شناختی این منطقه رابطه احتمالی وجود دارد و تاثیر علائم NAO بردبی رودخانه سن قوی می باشد . . آریال و همکاران (۲۰۱۸) تغییرات بلندمدت وقوع سیل و بارندگی های شدید ناشی از چرخندهای حاره ای اطلس شمالی و همچنین نقش پدیده NAO در وقایع فرین را مطالعه کردند و نشان دادند که چرخندهای حاره ای اطلس مسئول رخداد سیل و بارندگی های شدید در بخش وسیعی از مناطق شرقی ایالت متحده آمریکا و سواحل خلیج مکزیک در فاز مثبت NAO هستند. به علاوه، بیشینه سالانه رخداد سیل در بیش از ٪۴۰ موارد در فلوریدا، جایی که شدت توفان ها با حرکت به سمت خشکی در این ناحیه کاسته میشود، قرار دارد. .باتوجه به اهمیت الگوی های پیوند از دور و ارتباط انها با پارامتر های اقلیمی به ویژه بارش در ایران و در نظر گرفتن مطالعات صورت گرفته ، هدف از این پژوهش بررسی بارش ماهانه ۳ ایستگاه شهرستان های شرق اصفهان پرداخته شده و ارتباط ان ها با دو شاخص ،مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است .

۲-موقعیت منطقه مورد مطالعه

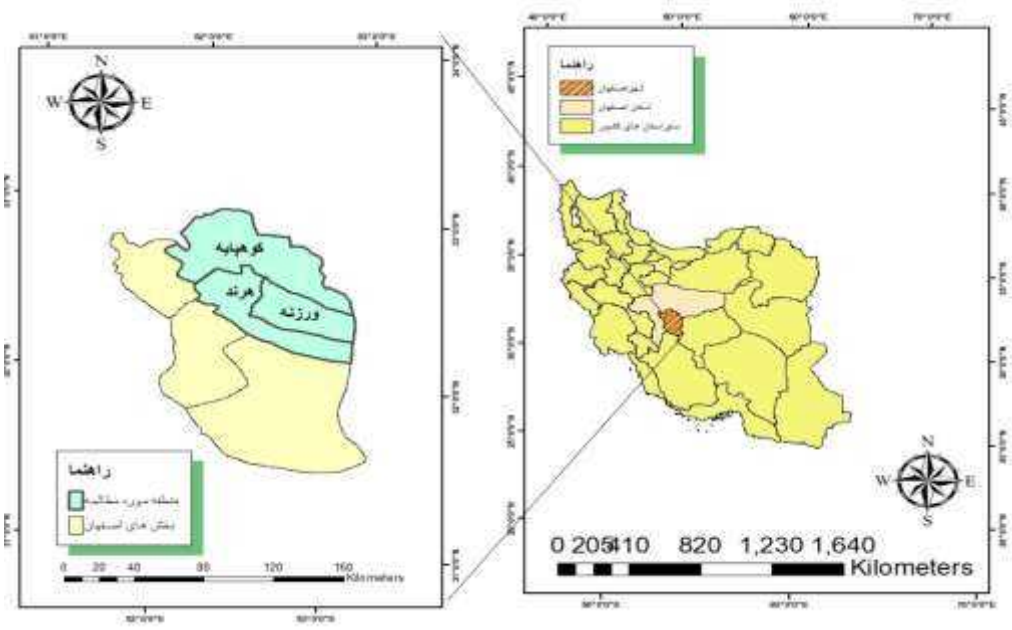
شهر کوهپایه ۷۰ کیلومتری شرق کلانشهر اصفهان قرار دارد این شهر از طرف شمال با اردستان ،از طرف جنوب ،با هرند ،از طرف شرق با نائین و از طرف غرب یا شهرستان اصفهان در ارتباط است .شهر ورزنه در ۱۰۵ کیلومتری مرکز شهر اصفهان گنجینه ای از انواع نگین های درخشان و چند رنگ استان اصفهان محسوب می شود این شهر در ۳۰کیلومتری تالاب بین المللی گاوخونی واقع شده است .ورزنه ،اخرین شهر ساحلی زایند رود به شمار می رود که تنها تالاب بین المللی

60 Hurrell

61 Turkes and Erlat

62 Massei et al

فلات مرکزی ایران و پایاب طولانی ترین رود خانه فلات مرکزی ایران زمین نیز در ان نزدیکی جای گرفته است .شهرستان ورزنه از شمال با شهرستان نائین و شهرستان کوهپایه،از شرق با استان یزد،از غرب با شهرستان هرند ،از جنوب با شهرستان جرقویه همسایه است .شهرستان هرند،مرکز شهرستان هرند در استان اصفهان است که در ۲۸ کیلومتری مرکز شهرستان ورزنه در شرق اصفهان واقع شده است . شکل (۱)موقعیت ایستگاه های منطقه مورد مطالعه را نشان می دهد .مشخصات ایستگاه های سینوپتیک مورد مطالعه در جدول شماره (۱)درج گردیده است.



شکل (۱):موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه

جدول (۱): مشخصات ایستگاهای همدید مورد مطالعه

ایستگاه ها	مشخصات ایستگاه ها		
	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا(متر)
کوهپایه	۵۲ ۴۵	۳۲ ۷۰	۱۷۵۰
ورزنه	۵۲ ۳۹	۳۲ ۲۵	۱۴۷۵
هرند	۵۲ ۴۳	۳۲ ۵۶	۱۵۴۴

۳-داده ها و روش ها

دراین تحقیق از دودسته داده ؛شامل داده های مربوط به بارش ماهانه ۳ ایستگاه سینوپتیک شرق استان اصفهان (جدول ۱)و داده های مربوط به الگوی پیوند از دور استفاده گردید .داده های بارش ماهانه در بازه ی زمانی۱۷ ساله (سال های ۲۰۰۶-۲۰۲۲)از سازمان هواشناسی اصفهان اخذگردید. همچنین داده های مربوط به شاخص نوسان اطلس شمالی (NAO) وشاخص (EA/WR) از پایگاه داده های مرکز ملی پیش بینی محیطی –مرکز ملی پژوهش جوی NCEP/NCAR وابسته به سازمان پژوهش های جوی و اقیانوسی ایالات متحده برداشت شد و با استفاده از رابطه (۱) به صورت استاندارد شده در امد .

رابطه (۱) $$Z = \frac{Pi - P}{SD}$$

Z=داده های نرمال شده برای هرماه

Pi = مقدار فشار میانگین سطح دریا برای هرماه

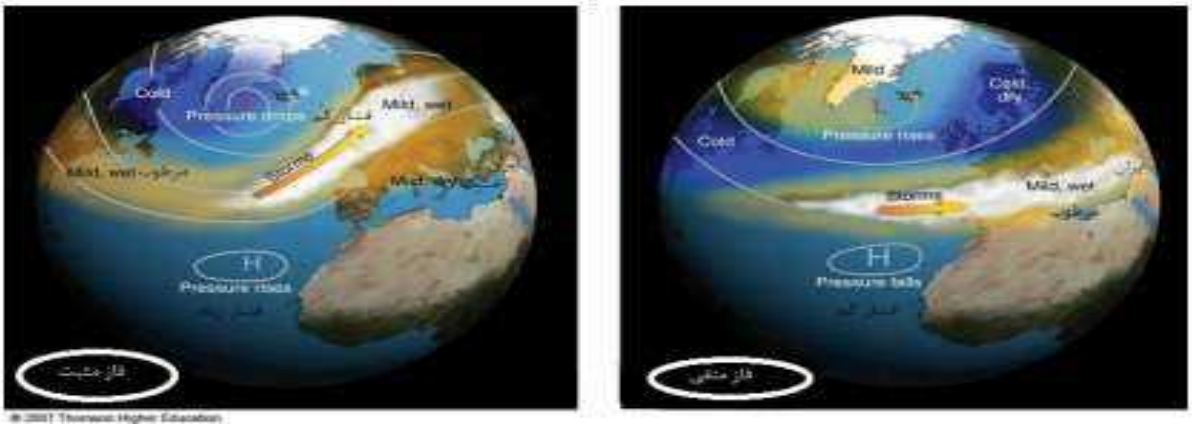
$\bar{P}$= مقدار فشار میانگین بلند مدت سطح دریا برای هر ماه

SD = انحراف معیار بلند مدت مقادیرفشار برای هر ماه

نوسان اطلس شمالی نیز آشکارترین الگوی پیوند از دور نیمکره شمالی به شمار میرود. نوسان اطلس شمالی (NAO)در واقع یک پدیده اقلیمی است که از تغییرات فشار سطح دریا بین کم فشار ایسلند و پرفشار آزورز در اقیانوس اطلس شمالی نتیجه می شود. گردش جوی در این منطقه از جهان به طور معمول یک تفاوت فشاری قوی بین دو کم فشار ایسلند و پرفشار آزورز، یکی در لبه شمالی اقیانوس اطلس شمالی، نزدیک به جزیره ایسلند، و دیگری در لبه جنوبی آن، نزدیک به جزایر آزورز، را نشان میدهد. این تفاوت فشاری باعث میشود که بادهای سطحی و سیستمهای بارانزای عرضهای میانه از غرب به شرق در امتداد اقیانوس اطلس شمالی، هوای گرم و مرطوب را به قاره اروپا انتقال دهند(هارل ،۱۹۹۵). عمومی ترین شاخص NAOبرپایه اختلاف فشار بهنجار شده سطح دریا بین این دومنطقه بنا نهاده شده که معادله ان بدین صورت است :

NAO Index = SLP(Azores High) – SLP(Iceland Low

شدت و تداوم این گردش جوی باعث شده است از این ویژگیهای فشاری به عنوان شاخص نوسان اطلس شمالی(NAO) نام رده شود. شاخص نوسان اطلس شمالی (NAO) دارای دو فاز مثبت و منفی می باشد؛ در طول فاز مثبت آن، فشار سطح دریا در مرکز کم فشار ایسلند پایین تر از مقدار میانگین و در پرفشار جنب حارهای آزورز بالا تر از میانگین میباشد.



اما در فاز منفی این شاخص دقیقاً عکس این شرایط قابل مشاهده است شکل (۲).

شکل (۲) الگوهای جوی بر روی اقیانوس اطلس شمالی در فازهای مثبت و منفی شاخص نوسان اطلس شمالی (NAO)(Beniston،۲۰۰۹)

در طول فاز مثبت، سیستم های بارانزای فصل زمستان در طی عبور از روی اقیانوس اطلس شمالی جهتی تقریباً شمال شرقی به خود میگیرند. این سیستمهای بارانزا با این جهت، هوای نسبتاً گرم را از اقیانوس اطلس شمالی به شمال غرب اروپا انتقال میدهند که نتیجه آن زمستانهای گرم و مرطوب برای این قسمت از اروپا و زمستانهای سرد و خشک برای مناطق جنوب اروپا و مدیترانه خواهد بود. اما در طول فاز منفی، با کاهش اختلاف فشار بین مرکز دو کم فشار ایسلند و پرفشار آزورز، سیستمهای بارانزای زمستانه ضعیف تر و فراوانی آنها نیز کاهش مییابد. عالوه بر این، سیستمهای بارانزا نیز تقریباً یک مسیر جنوبیتر را در مقایسه با فاز مثبت به خود میگیرند و هوای گرم و مرطوبتری را این بار به جنوب اروپا و مطقه مدیترانه انتقال میدهند که نتیجه آن قاعدتاً وقوع زمستانهای گرمتر و مرطوبتر برای این مناطق و زمستانهای سرد و خشک برای شمال اروپا خواهد بود (هارل،۱۹۹۵).

شاخص EA/WRبه شکل بی هنجاری ارتفاع شناخته میشود که بیشتر در عرض های میانی نمیکره شمالی با بزرگ ترین دامنه بی هنجاری در شرق اطلس شمالی و غرب روسیه ظهور می یابد .فاز مثبت این پدیده همراه با بی هنجاری ارتفاع مثبت روی اروپا و شمال چین و بی هنجاری ارتفاع منفی روی مرکز اطلس شمالی و غرب روسیه است .فاز منفی عکس فاز مثبت رفتار می کند .

۴-نتایج و بحث

۴-۱-رابطه الگوی های پیوند از دور NAO و EA/WR با استفاده از ضریب همبستگی :

یکی ازمشهورترین شیوه های اندازه گیری وابستگی بین دو متغیر کمی، محاسبه ضریب همبستگی پیرسون است .این شاخص توسط کارل پیرسون اماردان انگلیسی در سال ۱۹۰۰طی مقاله ای معرفی شد. همبستگی پیرسون یک روش مبتنی بر امار پارامتریک است که شدت و جهت رابطه دو متغیر را نشان می دهد. با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون ،ارتباط بین شدت بارش ایستگاه های مورد مطالعه و الگوی پیوند از دور ایستگاه های کوهپایه ؛ هرند، ورزنه در بازه زمانی (۲۰۰۶-۲۰۲۲) مورد محاسبه قرار گرفت . ضرایب همبستگی از نظر معنی دار بودن ازمون در سطح الفای ۰.۰۵ و۰.۰۱ بررسی گردید. درجدول (۲) همبستگی ماهانه الگوی پیوند از دور NAO و بارش های ایستگاه های منتخب استان اصفهان طی دوره اماری (۲۰۲۲-۲۰۰۶) در سطح الفای ۰.۰۵ درصد ارائه شده است که در ماه می ایستگاه کوهپایه و ماه ژوئن ایستگاه ورزنه در سطح الفای ۰.۰۵ همبستگی معنا داری داشته است. درجدول (۳) همبستگی ماهانه الگوی پیوند از دور EA/WA و بارش های ایستگاه های منتخب استان اصفهان طی دوره اماری (۲۰۲۲-۲۰۰۶) در سطح الفای ۰.۰۵ درصد ارائه شده است که در ماه نوامبر ایستگاه های هرند و ورزنه در سطح الفای ۰.۰۵ همبستگی معنا داری داشته است.

جدول(۲):ضرایب همبستگی بین نمایه NAO و بارش ایستگاه های مورد مطالعه طی دوره اماری (۲۰۰۶-۲۰۲۲)

ماه ها	زانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	جولای	اگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
ایستگاه												
کوهپایه	0.194	-۰.۴۲۶	۰.۱۳۸	۰.۲۹۵	۰.۵۰۸*	-۰.۱۶۳	-۰.۴۸۱	۰.۲۶۶	-۰.۱۹۹	۰.۴۳۹	۰.۱۲۷	-۰.۳۰۵
sig	۰.۴۵۵	۰.۰۸۹	۰.۵۹۸	۰.۲۵۱	۰.۰۳۷	۰.۵۳۳	۰.۰۵۱	۰.۳۰۳	۰.۴۴۳	۰.۰۷۸	۰.۶۲۸	۰.۲۳۳
هرند	۰.۱۷۹	-۰.۲۸۴	۰.۰۷۱	۰.۱۲۹	۰.۳۹۹	-۰.۳۰۴	-۰.۴۴۷	-۰.۱۳۴	-۰.۱۰۰	۰.۱۹۳	۰.۲۶۴	-۰.۳۳۲
sig	۰.۴۹۲	۰.۲۷۰	۰.۷۸۷	۰.۶۲۱	۰.۱۱۳	۰.۲۳۵	۰.۰۷۲	۰.۶۰۸	۰.۴۴۲	۰.۴۵۷	۰.۳۰۶	۰.۱۹۳
ورزنه	۰.۰۵۱	-۰.۱۵۰	۰.۲۰۴	۰.۱۴۸	۰.۲۷۰	۰.۵۶۹*	-۰.۴۰۸	-۰.۲۶۰	-۰.۱۴۶	۰.۱۹۶	۰.۱۸۸	-۰.۲۸۴
sig	۰.۸۴۶	۰.۵۶۷	۰.۴۳۲	۰.۵۷۱	۰.۲۹۵	۰.۰۱۷	۰.۱۰۴	۰.۳۱۳	۰.۵۷۵	۰.۴۵۰	۰.۴۷۰	۰.۲۷۰

جدول (۳):ضرایب همبستگی بین نمایه EA/WRو بارش ایستگاه های مورد مطالعه طی دوره اماری (۲۰۰۶-۲۰۲۲)

ماه ها	زانویه	فوریه	مارس	آوریل	می	ژوئن	جولای	اگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
ایستگاه												
کوهپایه	۰.۲۶۶	۰.۱۳۰	-۰.۲۳۲	۰.۰۷۴	-۰.۱۵۳	۰.۲۳۴	۰.۳۵۸	-۰.۱۷۷	-۰.۳۱۳	۰.۳۴۷	۰.۰۴۵۷	-۰.۰۴۴

sig	۰.۳۰۳	۰.۶۱۹	۰.۳۷۰	۰.۷۷۸	۰.۵۵۸	۰.۳۶۶	۰.۱۵۸	۰.۴۹۷	۰.۲۲۱	۰.۱۷۳	۰.۰۶۵	۰.۸۶۶
هرند	۰.۰۵۷	۰.۲۳۸	-۰.۳۲۳	-۰.۰۳۹	-۰.۰۷۰	۰.۳۱۵	۰.۴۴۲	۰.۴۲۲	-۰.۳۰۰	-۰.۰۸۲	۰.۵۹۵*	۰.۰۴۷
sig	۰.۸۲۹	۰.۳۵۷	۰.۲۰۶	۰.۸۸۱	۰.۷۹۰	۰.۲۱۸	۰.۰۷۶	۰.۰۹۱	۰.۲۲۹	۰.۷۵۳	۰.۰۱۲	۰.۸۵۶
ورزنه	۰.۰۲۹	۰.۲۶۱	-۰.۳۱۴	۰.۱۴۱	-۰.۲۸۳	۰.۴۱۷	۰.۳۱۸	۰.۳۵۴	-۰.۲۹۶	-۰.۰۰۴	۰.۵۷۹*	۰.۰۰۱
sig	۰.۹۱۱	۰.۳۱۱	۰.۲۱۹	۰.۵۸۹	۰.۲۷۰	۰.۰۹۶	۰.۲۱۳	۰.۱۶۴	۰.۲۴۸	۰.۹۸۹	۰.۰۱۵	۰.۹۹۸

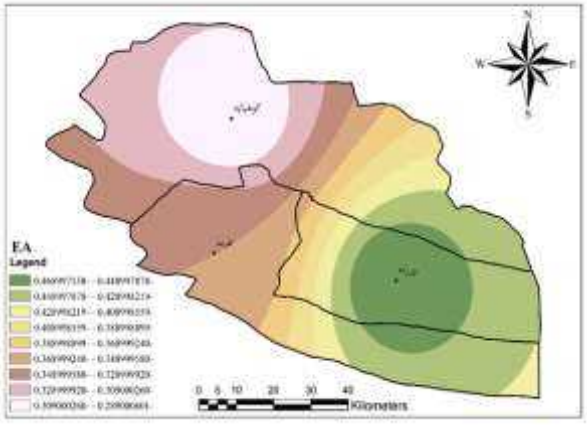
۴-۲-تحلیل رابطه بین الگوی پیوند از دور NAOوEA/WRبا تاخیر یک ماهه،سه ماهه،شش ماهه و نه ماهه بارش:

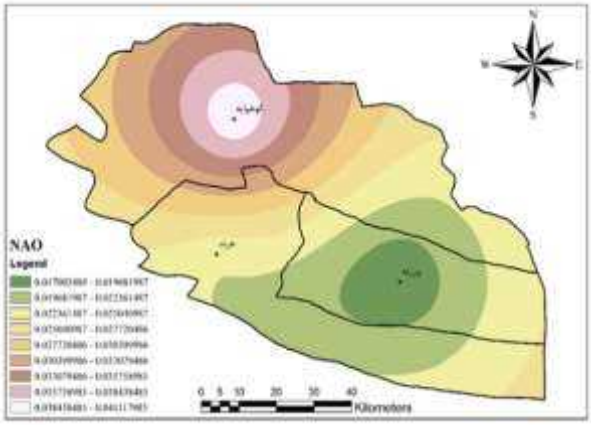
درجدول (۴) همبستگی با تاخیر زمانی یک ماهه ،سه ماهه ،شش ماهه ،نه ماهه الگوی پیوند از دور ANOو EA/WR بارش ایستگاههای کوهپایه،هرند و ورزنه طی دوره اماری (۲۰۲۲-۲۰۰۶)در سطح الفای ۰.۰۵ و ۰.۰۱ ارائه شده است . نتایج نشان داد که هیچ رابطه معناداری بین الگوی پیوند از دور و بارش در منطقه مورد مطالعه وجود ندارد . شکل (۲)نقشه پهنه بندی ضریب همبستگی الگوی پیوند از دور با تاخیر سه ماهه بارش میانگین ایستگاه ها را نشان می دهد همبستگی شاخص های الگوی پیوند از دور (NAO.EA/WA) و بارش ایستگاه های ورزنه و هرند دارای مقادیر بیشتری نسبت به ایستگاه کوهپایه می باشد .

جدول (۴):ضرایب همبستگی بین نمایه EA/WRو بارش ایستگاه های مورد مطالعه طی دوره اماری (۲۰۰۶-۲۰۲۲)

ایستگاه ها	بازه های زمانی	بارش			
		NAOشاخص		EA/WRشاخص	
		ضریب همبستگی	sig	ضریب همبستگی	sig
کوهپایه					
	تاخیر(۳)	۰.۰۸۰	۰.۷۶۰	-۰.۲۸۹	۰.۲۶۰
	تاخیر(۶)	-۰.۰۱۹	۰.۹۴۲	۰.۳۱۱	۰.۲۲۵
	تاخیر(۹)	-۰.۰۰۳	۰.۹۹۱	-۰.۱۴۷	۰.۵۷۴
هرند	تاخیر(۱)	-۰.۰۷۶	۰.۷۷۲	۰.۱۹۴	۰.۴۵۴

	تاخیر(۳)	۰.۰۰۶	۰.۹۸۶	-۰.۳۴۹	۰.۱۷۰
	تاخیر(۶)	-۰.۳۳۷	۰.۱۸۶	-۰.۰۳۶	۰.۸۹۰
	تاخیر(۹)	-۰.۱۸۲	۰.۴۸۴	-۰.۱۴۰	۰.۵۹۱
ورزنه	تاخیر(۱)	-۰.۰۶۳	۰.۸۱۰	۰.۱۲۸	۰.۶۲۶
	تاخیر(۳)	-۰.۰۰۵	۰.۹۸۳	-۰.۴۶۹	۰.۰۵۸
	تاخیر(۶)	-۰.۴۰۱	۰.۱۱۰	-۰.۱۳۱	۰.۶۱۶
	تاخیر(۹)	-۰.۱۷۶	۰.۵۰۰	-۰.۱۲۵	۰.۶۳۲





شکل ۲: نقشه پهنه بندی ضریب همبستگی الگوی های پیوند از دور با تاخیر سه ماهه بارش میانگین

۴-۳-رابطه الگوی پیوند از دور NAO,EA/WR با بارش از طریق تحلیل رگرسیون گام به گام:

ابتدا کلیه متغیرهای مستقل وارد مدل گردیده و مقادیر رگرسیون (R) و مجذور ان (R2) محاسبه شده است .هریک از محاسبات فوق جهت هر ایستگاه تهیه و نتایج استخراج شده است .مقادیر R2 که بین صفر و یک تغییر می کند،نشان دهنده میزان توجیه تغییرات بارش به وسیله الگوی های پیوند از دور است . این اماره نشان دهنده ی مقداری از تغییرات توجیه شده متغیر وابسته به وسیله ی الگوی های پیوند از دور است . این اماره نشان دهنده ی مقداری از تغییرات توجیه شده متغیر وابسته به وسیله ی متغیرهای مستقل است .هرچه مقدار ان به یک نزدیک باشد نشان دهنده درصد بالاتری از تغییرات توجیه شده به وسیله مدل می باشد .افزایش تعداد متغیرهای پیش بینی (مستقل) در مدل تنها می تواند مقدار R2 را افزایش دهد و در صورت خارج کردن برخی متغیرها مقدار ان بدون تغییر بماند در این مدل تمامی متغیرهای پیش بینی (مستقل)در هر مرحله مجدد مورد ازمون قرار گرفته تا از ورود متغیر های غیر ضروری (کم اثر)جلوگیری شود و نهایتا موثر ترین متغیرها مشخص گردند .در هر مرحله داخل شدن و خارج شدن با توجه به به سطح معنی داری انتخاب شده صورت می گیرد معمولا سطح معنی داری ۰.۰۵(۹۵درصد) و کمتر جهت ورودی و سطح معنی داری ۰.۰۱(۹۹ درصد) و بیشتر جهت خروج متغیرها مورد استفاده قرار می گیرد . با توجه به جدول (۵) تاتیرگذار ترین شاخص ها بر بارش ایستگاه به کمک رگرسیون گام به گام مشخص شد . بر اساس نتایج الگوی EA/WRدر سه ایستگاه کوهپایه ،هرند و ورزنه به عنوان موثرترین الگوی تغییرات بارش را توجیه می کند .

جدول (۴): نتایج حاصل از کاربرد مدل رگرسیون گام به گام بین شاخص الگوی پیوند از دور و بارش منطقه مورد مطالعه

متغیر مستقل	B شیب خط	Sig	R2	R	Constant ضریب ثابت
کوهپایه					
NAO	۰.۲۰۸	۰.۶۸۹	۰.۰۱۱	۰.۱۰۴	۰.۰۱۴
EA/WR	۰.۷۹۸	۰.۰۲۱	۰.۳۰۵	۰.۵۵۲	۰.۵۷۴

۵-بحث و نتیجه گیری

با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون ،ارتباط بین شدت بارش ایستگاه های مورد مطالعه و الگوی پیوند از دور ایستگاه های کوهپایه ؛ هرند، ورزنه در بازه زمانی (۲۰۰۶-۲۰۲۲) مورد محاسبه قرار گرفت . ضرایب همبستگی از نظر معنی دار بودن ازمون در سطح الفای ۰.۰۵ و۰.۰۱ بررسی گردید. همبستگی ماهانه الگوی پیوند از دور NAO و بارش های ایستگاه های منتخب استان اصفهان نشان داد که در ماه می ایستگاه کوهپایه و ماه ژوئن ایستگاه ورزنه در سطح الفای ۰.۰۵ همبستگی معنا داری داشته است و همچنین همبستگی ماهانه الگوی پیوند از دور EA/WA و بارش های ایستگاه های منتخب استان اصفهان ، در ماه نوامبر ایستگاه های هرند و ورزنه در سطح الفای ۰.۰۵ همبستگی معنا داری داشته است. تحلیل رابطه بین الگوی پیوند از دور NAOوEA/WR با تاخیر یک ماهه،سه ماهه،شش ماهه و نه ماهه بارش نشان داد که هیچ رابطه معناداری بین الگوی پیوند از دور و بارش در منطقه مورد مطالعه وجود ندارد . رابطه الگوی پیوند از دور NAO,EA/WR با بارش از طریق تحلیل رگرسیون گام به گام مشخص شد که الگوی EA/WRدر سه ایستگاه کوهپایه ،هرند و ورزنه به عنوان موثرترین الگوی تغییرات بارش را توجیه می کند .

منابع

۱-اسعدی اسکویی،ابراهیم و هلالی ،جلیل (۱۴۰۰).تحلیل همبستگی شاخص های پیوند از دور بزرگ مقیاس با تبخیر و تعرق مرجع ماهانه ایستگاه های همدید ایران.مجله تحقیقات اب وخاک ایران ،۱۶۴۴:۶-۱۶۲۹.

۲-اژدری معموره ،خاطره؛گندمکار،امیر؛ کبیری ،کیوان(۱۳۹۹). اشکارسازی تاثیرات انومالی های حرارتی ناشی از سیگنال های کلان مقیاس جوی –اقیانوسی در رخداد های سفید شدگی ابسنگ های مرجانی خلیج فارس .اقیانوس شناسی ،۴۳: ۶۱-۷۰.

۳-امیدوار، کمال (۱۳۹۱) .آبوهواشناسی دینامیک.یزد: انتشارات دانشگاه یزد.

۴-بزرگری،حامد؛گندمکار،امیر؛عباسی،علیرضا(۱۴۰۱). ارتباط سنجی بین متوسط دمای حوضه ابرقو –سیرجان و الگوی پیوند از دور اقیانوس اطلس.فصلنامه مدل سازی و مدیریت اب وخاک ،۴: ۲۷۰-۲۸۵.

۵-سبحانی،بهروز؛صلاحی،برومند؛گلدوست ،اکبر(۱۳۹۳).ارتباط شاخص اقلیمی NAO با مقادیر میانگین ،حداکثر وحداقل دمای ماهانه شمال غرب ایران .نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی،۱۴(۳۳):۷۵-۹۰.

۶-صلاحی ،برومند؛حاجی زاده ،زهرا (۱۳۹۲).تحلیلی بررابطه زمانی نوسان اطلس شمالی و شاخص های دمای سطحی اقیانوس اطلس با تغییر پذیری بارش و دمای استان لرستان .فصلنامه تحقیقات جغرافیایی ،۱۱۷:۳-۱۲۸.

۷-رضائیان،مهتاب؛محبالحجه،علیرضا؛احمدی،گیوی (۱۳۹۴).فرهنگ جغرافیا .نشریه پژوهش های اقلیم شناسی :بهارو تابستان –شماره ۲۱ و۲۲(علمی پژوهشی/ISC) از ۳ تا ۲۱.

۸-طرح بازنگری طرح تفصیلی شهر اصفهان (۱۳۹۳)،معاونت شهرسازی و معماری ،شهرداری اصفهان .

۹-عرفانیان، مریم، علیزاده، امین؛ انصاری، حسین، (۱۳۹۰)، بررسی الگوهای پیوند از دور موثر بر پارامترهای بارش و دما (مطالعه موردی: ایستگاه سینوپتیک مشهد)، نشریه آبیاری و زهکشی ایران، شماره ۲، جلد ۵، ص ۱۸۵-۱۷۶.

۱۰-فروتن ،مهدی؛زنیالی،بتول (۱۴۰۲). اثر همزمانی شاخص های پیوند از دور NAO و AMO برتغییرپذیری دما و بارش شهرستان مجاور سبلان.فصلنامه مطالعات علوم زیست،دوره هشتم ،شماره اول ،فصل بهار،سال ۱۴۰۲،صفحه ی ۵۸۶۸-۵۸۵۷.

۱۱-محمود آبادی، مهدی؛ امیدوار، کمال؛ مظفری، غلامعلی؛ مزیدی، احمد، (۱۳۹۷)، بررسی الگوهای پیوند از دور موثر بر شاخص‌های حدی بارش (مطالعه موردی: استان سیستان و بلوچستان)، پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز دانشکده علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، سال نهم، شماره ۱۷، ص ۲۹۲-۲۸۰.

12-Aryal, Y. N., Villarini, G., Zhang, W., & Vecchi, G. A. (2018). Long term changes in flooding and heavy rainfall associated with North Atlantic tropical cyclones: Roles of the North Atlantic Oscillation and El Niño-Southern Oscillation. J. Hydrol., 559, 698–710.

13-Beniston, M, 2009, Trends in joint quantiles of temperature and precipitation in Europe since 1901and projected for 2100. Geophysical Research Letters, No. 7, pp. 1- 6.

14-Boers, N., Goswami, B., Rheinwalt, A., Bookhagen, B., Hoskins, B. and Kurths, J., 2019. Complex networks reveal global pattern of extreme-rainfall teleconnections, Nature, v. 566(7744), p. 373-377.

15-Carvalho, M.J., Milton, S.F. and Rodríguez, J.M., 2020. Assessment of the teleconnection patterns affecting July precipitation in China and their forcing mechanisms in the Met Office Unified Model, Journal of Climate, v. 33(13), p. 5727-5742

16-Hurrell, J. W, 1995, Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperatures and precipitation. Science, No. 269 (5224), pp. 676-679.

17-López Moreno, J., -T.-L. (2011). Effects of the North Atlantic Oscillation (NAO) on combined temperature and precipitation winter modes in the Mediterranean mountains: Observed relationships and projections for the 21st century. Global and Planetary Change. 77(1–2), 62–76.

18-Lloyd-Hughes, Benjamin and Mark A. Saunders (2002), Seasonal prediction of European spring precipitation from El Nino-Southern oscillation and local sea-surface temperatures, Int. J. Climatol, 22: pp 1-14.

19-Turkes, M., & Erlat, E. (2005). Climatological responses of winter precipitation in Turkey to variability of the North Atlantic Oscillation during the period 1930-2001. Theoretical and Applied Climatology, 78, 33-46.

20-Zaroug, M. A. H., Giorgi, F., Coppola, E., Abdo, G. M. & Eltahir, E. A. B. (2014). Simulating the connections of ENSO and the rainfall regime of East Africa and the upper Blue Nile region using a climate model of the Tropics. Hydrol. Earth Syst. Sci, 18, 4311–4323. doi:10.5194/hess-18-4311- 2014 http//www.cpc.noaa.gov/data.

Analysis of the patterns of the Atlantic Ocean's connection with precipitation

in the east of Isfahan Province

Study area: Kouhpayeh, Varzaneh and Harand)(

Kamal Omidvar *[1], Hajar Toofani Kopaei [2]

1- Professor of Climatology, Department of Geography, Yazd University, Yazd, Iran

2-PhD student in Climatology, Yazd University, Yazd,Iran

* Corresponding author: Email

komidvar@yazd.ac.ir

Abstract

The coordination between the temporal changes of two distant points, which is mainly used for pressure changes, is called remote linkage. In this study, with the aim of revealing the relationships between remote linkage patterns and monthly precipitation, three stations in eastern Isfahan (Kuhpayeh, Harand, Varzaneh) with two remote linkage patterns (NAO, EA/WR) were used to measure the relationships using Pearson correlation analysis and a stepwise regression model in the statistical period (2006-2022). The results of this study showed that there is a significant relationship between the patterns and precipitation in the region. The precipitation of the Kuhpayeh station in May and the Varzaneh station in June had a positive and significant correlation at a 95% confidence level with the NAO index, and the Harand and Varzaneh stations in November had a positive and significant correlation at a 95% confidence level with the EA/WR index. According to the calculations made in the one-month, three-month, six-month and nine-month time lag of precipitation, no significant relationship was observed in the studied station in both indicators of the remote linkage pattern. The results of the stepwise regression model showed that the most influential indicators on the precipitation of the Kouhpayeh, Harand and Varzaneh stations. The EA/WR pattern, which justifies the most effective pattern of precipitation changes.

Keywords: Long-distance linkage pattern, precipitation, Pearson correlation coefficient, regression, East of

کاربرد الگوریتم‌های هوش مصنوعی در پیش‌بینی و مدیریت مخاطرات اقلیمی با تاکید بر امواج گرما در غرب ایران

آذر جلیلیان[1*]

۱- دانش آموخته دکتری اقلیم شناسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

حسن ذوالفقاری[2]

۲- دانشیار اقلیم شناسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

azar.jalilian17@gmail.com

چکیده

تغییرات اقلیمی موجب افزایش چشمگیر فراوانی و شدت امواج گرما در جهان و به‌ویژه در مناطق غربی ایران شده است. این پدیده تأثیرات قابل‌توجهی بر سلامت عمومی، کشاورزی و مصرف انرژی دارد و لزوم توسعه سیستم‌های پیش‌بینی دقیق و هشدار زودهنگام را آشکار می‌سازد. این پژوهش با استفاده از داده‌های روزانه دما، رطوبت نسبی و شاخص‌های اقلیمی در ایستگاه‌های هواشناسی پنج استان غرب ایران (کرمانشاه، همدان، ایلام، کردستان و لرستان) طی دوره ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۳ و داده‌های تکمیلی ماهواره‌ایERA5، مدل‌های Random Forest، LSTM و شبکه عصبی ساده انجام گرفته است. عملکرد مدل‌ها با شاخص‌های RMSE، MAE و Accuracy ارزیابی شد. نتایج نشان داد که مدل Random Forest با دقت ۹۲.۷٪ و کمترین خطا (RMSE=۱.۴۲) بهترین عملکرد را داشت. همچنین با استفاده از روش SHAP عوامل اصلی شکل‌گیری امواج گرما شناسایی شدند که دمای حداکثر روزانه (۳۷.۲٪)، رطوبت نسبی (۲۱.۴٪) و تابش خورشیدی (۱۶.۸٪) بیشترین تأثیر را داشتند. در نهایت، چارچوبی برای سیستم هشدار زودهنگام طراحی شد که می‌تواند ۵ تا ۷ روز قبل از وقوع امواج گرما، هشدارهای محلی ارائه دهد و در مدیریت بهینه منابع آب، انرژی و سلامت عمومی نقش مؤثری ایفا کند.

کلید واژه‌ها : الگوریتم‌های هوش مصنوعی، امواج گرما، جنگل تصادفی، SHAP، غرب ایران.

مقدمه

تغییرات اقلیمی یکی از مهم‌ترین چالش‌های جهانی قرن حاضر محسوب می‌شود و تأثیرات گسترده‌ای بر محیط زیست، اقتصاد و سلامت انسان دارد (IPCC، ۲۰۲۱). یکی از پیامدهای ملموس این تغییرات، افزایش فراوانی و شدت امواج گرما است که در بسیاری از مناطق جهان از جمله غرب ایران رخ می‌دهد. امواج گرما پدیده‌ای اقلیمی است که در آن دما برای چند روز متوالی به‌طور غیرعادی بالا می‌رود و می‌تواند باعث افزایش مرگ‌ومیر، بیماری‌های مرتبط با گرما، کاهش عملکرد محصولات کشاورزی و افزایش مصرف انرژی شود (Perkins & Alexander، ۲۰۱۳؛ Chen & Liu، ۲۰۲۰). در ایران، مناطق غربی به دلیل توپوگرافی خاص و قرارگیری در مسیر سامانه‌های مدیترانه‌ای و خشکسالی‌های فصلی، حساسیت بیشتری نسبت به امواج گرما دارند. استان‌هایی مانند کرمانشاه، ایلام، همدان، لرستان و کردستان، طی سال‌های اخیر شاهد افزایش تعداد روزهای با دمای شدید بوده‌اند که این موضوع نیازمند پیش‌بینی دقیق و برنامه‌ریزی مدیریتی است (Karimi et al، ۲۰۲۱). روش‌های سنتی پیش‌بینی دما و امواج گرما غالباً بر اساس مدل‌های آماری مانند رگرسیون خطی یا شاخص‌های ساده دمایی هستند که محدودیت‌هایی از جمله دقت پایین در پیش‌بینی رخدادهای شدید و کوتاه‌مدت دارند (Mahmoud & El-Shafie، ۲۰۱۹). در مقابل، الگوریتم‌های یادگیری ماشین از جمله Random Forest، XGBoost و شبکه‌های عصبی قادر به شناسایی الگوهای پیچیده و روابط غیرخطی میان متغیرهای اقلیمی هستند و امکان پیش‌بینی دقیق‌تر مخاطرات اقلیمی را فراهم می‌کنند (Breiman، ۲۰۰۱؛ Chen & Liu، ۲۰۲۰). مطالعات بین‌المللی نشان داده‌اند که استفاده از الگوریتم Random Forest می‌تواند دقت پیش‌بینی موج گرما را نسبت به مدل‌های آماری سنتی تا ۲۰–۳۰ درصد افزایش دهد و قابلیت کاربرد برای هشدارهای زودهنگام و مدیریت بحران را دارد (Hersbach et al، ۲۰۲۰). در واقع الگوریتم Random Forest یک الگوریتم یادگیری ماشینی است که برای مسائل طبقه‌بندی و رگرسیون استفاده می‌شود. این الگوریتم از ترکیب چندین درخت تصمیم (Decision Tree) برای ایجاد یک مدل قوی‌تر و مطمئن‌تر استفاده می‌کند. در ایران، با وجود برخی مطالعات محدود، پژوهش‌های کاربردی در زمینه پیش‌بینی موج گرما با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین در مناطق غربی کشور هنوز به‌طور کامل انجام نشده است (Rahimi et al، ۲۰۲۰). در این راستا، پژوهش حاضر با رویکردی نوآورانه، به بررسی و پیش‌بینی امواج گرما در استان‌های کرمانشاه، همدان، ایلام، کردستان و لرستان می‌پردازد. در این پژوهش با بهره‌گیری از الگوریتم‌های یادگیری ماشین شامل جنگل تصادفی، شبکه عصبی ساده و LSTM و با استفاده از داده‌های ایستگاهی و بازتحلیل، تلاش شده است چارچوبی عملیاتی برای پیش‌بینی دقیق و مدیریت مخاطرات امواج گرما در غرب ایران ارائه شود. این پژوهش علاوه بر ارائه یک مدل بومی‌سازی شده، می‌تواند مبنایی برای سیاست‌گذاری در حوزه مدیریت بحران، انرژی و سلامت عمومی قرار گیرد. امواج گرما به عنوان یکی از جدی‌ترین پیامدهای تغییر اقلیم در سطح جهانی، موضوع پژوهش‌های گسترده‌ای بوده است. Breiman(۲۰۰۱) با معرفی الگوریتم جنگل تصادفی (Random Forest) امکان مدل‌سازی غیرخطی پدیده‌های اقلیمی را فراهم نمود. پس از او، پژوهشگران از مدل‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی موج‌های گرما در مقیاس منطقه‌ای و جهانی بهره بردند. برای مثال Li (۲۰۲۲) با استفاده از داده‌های ERA۵ و الگوریتم‌های یادگیری ماشین توانست الگوی وقوع موج گرما در شرق آسیا را پیش‌بینی

کند. همچنین Miloshevich (۲۰۲۲) نشان داد که شبکه‌های عصبی عمیق به‌ویژه مدل LSTM در شناسایی روندهای بلندمدت امواج گرما کارایی بالایی دارند. پژوهش‌های Kumar (۲۰۲۳) در هند و Chen (۲۰۲۲) در چین نیز نشان دادند که ترکیب داده‌های ایستگاهی با داده‌های بازتحلیل می‌تواند دقت پیش‌بینی‌ها را افزایش دهد. در اروپا، پژوهش Zhang et al (۲۰۲۱) با استفاده از مدل‌های CNN و LSTM به نتایج دقیقی در پیش‌بینی شدت و مدت موج‌های گرما دست یافت. همچنین Lundberg و Lee (۲۰۱۷) با معرفی روش SHAP امکان تحلیل اهمیت متغیرها را فراهم کردند و بدین ترتیب درک بهتری از عوامل مؤثر بر موج‌های گرما ارائه شد. در ایران، بخش عمده‌ای از پژوهش‌ها به بررسی روند دما و تحلیل آماری امواج گرما اختصاص داشته است. محمدی (۲۰۲۲) روند افزایش روزهای بسیار گرم در استان‌های غربی ایران را بررسی کرد و نشان داد که در دهه اخیر تعداد روزهای داغ به طور معناداری افزایش یافته است. رضایی (۲۰۲۱) نیز در پژوهشی مشابه بر شدت و تداوم امواج گرما در ایلام و کرمانشاه تأکید داسته است. پژوهش‌های دیگری به آثار امواج گرما بر بخش‌های مختلف پرداخته‌اند. سادات (۲۰۲۳) اثر موج‌های گرما بر عملکرد محصولات کشاورزی در غرب ایران را بررسی نمود و کاهش محسوس عملکرد گندم را گزارش داد. میرزایی (۲۰۲۳) با تحلیل رابطه موج‌های گرما با مصرف انرژی در استان لرستان، افزایش تقاضای برق در دوره‌های گرم سال را نشان داد.

از نظر روش‌شناسی، تعداد محدودی از پژوهش‌های داخلی از هوش مصنوعی استفاده کرده‌اند. قاسمی (۲۰۲۲) با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی به پیش‌بینی امواج گرما در خوزستان پرداخت و نتایج مناسبی به دست آورد. مهدوی (۲۰۲۴) نیز الگوریتم‌های یادگیری ماشین را در پیش‌بینی امواج گرما در تهران آزمود و دقت مدل جنگل تصادفی را بالاتر از سایر الگوریتم‌ها گزارشکرد. با این حال، این مطالعات اغلب محدود به یک استان خاص بوده‌اند و پوشش منطقه‌ای گسترده‌ای نداشته‌اند. مرور ادبیات نشان می‌دهد که در سطح جهانی، به‌کارگیری الگوریتم‌های پیشرفته یادگیری ماشین و داده‌های بازتحلیل برای پیش‌بینی و تحلیل امواج گرما به سرعت در حال گسترش است (Li، ۲۰۲۲؛ Kumar، ۲۰۲۳؛ Zhang et al، ۲۰۲۱). در مقابل، پژوهش‌های داخلی ایران عمدتاً یا به بررسی‌های آماری و توصیفی محدود شده‌اند و یا در صورت استفاده از مدل‌های هوش مصنوعی، تنها در یک استان خاص اجرا شده‌اند.

هدف اصلی این پژوهش، پیش‌بینی و مدیریت مخاطرات ناشی از امواج گرما در غرب ایران با استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی است. برخلاف بسیاری از مطالعات پیشین که تمرکز آنها بر مناطق دیگر ایران یا کشورهای خارجی بوده، این مطالعه به طور ویژه استان‌های غربی ایران را مورد بررسی قرار می‌دهد. در این پژوهش از داده‌های ایستگاهی دقیق و پایگاه‌های داده ملی هواشناسی بهره گرفته شده و مدل‌های شبکه عصبی، LSTM و جنگل تصادفی برای پیش‌بینی کوتاه‌مدت و میان‌مدت امواج گرما به کار رفته است. علاوه بر پیش‌بینی، برای مدیریت مخاطرات، از مدل‌های قابل تفسیر مانند SHAP استفاده شده تا عوامل مؤثر بر شدت و فراوانی امواج گرما شناسایی شوند و نتایج برای تصمیم‌گیری مدیران و برنامه‌ریزان محلی کاربردی باشد. همچنین چارچوبی عملیاتی برای هشدار سریع و کاهش اثرات امواج گرما بر سلامت، کشاورزی و مصرف انرژی ارائه خواهد شد که نمونه‌ای نوآورانه و بومی‌سازی شده در حوزه مدیریت بحران‌های اقلیمی در ایران محسوب می‌شود.

روش پژوهش

این پژوهش با هدف پیش‌بینی و مدیریت امواج گرما در غرب ایران انجام شد. محدوده مورد مطالعه شامل پنج استان ایلام، کردستان، کرمانشاه، همدان و لرستان است که به دلیل موقعیت جغرافیایی و شرایط اقلیمی، در سال‌های اخیر با افزایش شدت و فراوانی امواج گرما مواجه بوده‌اند.

برای انجام پژوهش، داده‌های دما، رطوبت نسبی و فشار جوی روزانه از ایستگاه‌های هواشناسی رسمی سازمان هواشناسی کشور طی یک دوره ۱۰ ساله (۲۰۱۳ تا ۲۰۲۳) گردآوری شد. به منظور تکمیل و افزایش دقت، از داده‌های بازتحلیل ERA5 که دارای قدرت تفکیک مکانی و زمانی بالا هستند نیز استفاده گردید. داده‌های به‌دست‌آمده ابتدا مورد کنترل کیفیت، پاک‌سازی و نرمال‌سازی قرار گرفتند تا داده‌های گمشده یا دارای خطا اصلاح شوند. روزهایی که دما از صدک ۹۰ فراتر رفته بود، به عنوان روزهای موج گرما شناسایی و برچسب‌گذاری شدند. در نهایت، به منظور پیش‌بینی امواج گرما از سه الگوریتم پرکاربرد هوش مصنوعی استفاده شده است که عبارتند از:

الگوریتم جنگل تصادفی(Random Forest Algorithm):

جنگل تصادفی یکی از الگوریتم‌های پرقدرت یادگیری ماشین است که برای طبقه‌بندی (Classification) و رگرسیون (Regression)استفاده می‌شود. این روش یک مدل ensemble است؛ یعنی از ترکیب چندین مدل ساده‌تر (اینجا درخت تصمیم) استفاده می‌کند. الگوریتم توانایی مدل‌سازی روابط غیرخطی را دارد (Breiman، ۲۰۰۱).

شبکه عصبی ساده (Feedforward Neural Network):

شبکه عصبی ساده (یا پیش‌خور) ابتدایی‌ترین نوع شبکه عصبی است که داده‌ها فقط از ورودی ← لایه پنهان ← خروجی حرکت می‌کنند و بازخورد (feedback) یا چرخه‌ای در آن وجود ندارد. به منظور شناسایی الگوهای کوتاه‌مدت و پیش‌بینی شدت دمامورد استفاده قرار گرفته است (Valipour، ۲۰۲۳).

LSTM(Long Short-Term Memory):

LSTM یک نوع خاص از شبکه‌های عصبی بازگشتی (Recurrent Neural Network - RNN) است که برای کار با داده‌های ترتیبی (Sequential Data) مانند تحلیل سری‌های زمانی و شناسایی روندهای بلندمدت و تکرارشونده مانند موج گرما مورد استفاده قرار می‌گیرد (Miloshevich، ۲۰۲۲).

ارزیابی مدل‌ها

برای سنجش عملکرد مدل‌ها از شاخص‌های آماری متداول شامل ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین قدر مطلق خطا (MAE) و دقت (Accuracy) استفاده شد. همچنین به منظور افزایش قابلیت تفسیر نتایج، از روش SHAP (SHapley Additive exPlanations) برای شناسایی عوامل مؤثر بر وقوع امواج گرما (Lundberg & Lee، ۲۰۱۷) بهره گرفته شد. در نهایت، نتایج حاصل از این مدل‌ها علاوه بر مقایسه الگوریتم‌ها، برای طراحی چارچوب هشدار سریع امواج گرما در غرب ایران به کار گرفته شد.

نتایج و تحلیل‌ها

ارزیابی عملکرد مدل‌ها و مقایسه الگوریتم‌ها

به‌منظور پیش‌بینی روزهای موج گرما در استان‌های غربی ایران، سه الگوریتم جنگل تصادفی، LSTM و شبکه عصبی ساده مورد استفاده و ارزیابی قرار گرفتند. برای سنجش عملکرد مدل‌ها از شاخص‌های ارزیابی متداول شامل ریشه میانگین مربعات خطا، میانگین قدر مطلق خطا و دقت کلی استفاده شد. نتایج مقایسه در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول ۱. مقایسه عملکرد الگوریتم‌های پیش‌بینی امواج گرما بر اساس شاخص‌های ارزیابی (RMSE، MAE و Accuracy) در استان‌های غربی ایران

مدل پیش‌بینی	RMSE (°C)	MAE (°C)	دقت پیش‌بینی (٪)
Random Forest	1.42	1.08	٪92.7
LSTM	1.75	1.33	٪88.4
شبکه عصبی ساده	2.21	1.68	٪82.3

همان‌گونه که ارقام جدول نشان می‌دهد، الگوریتم جنگل تصادفی با دستیابی به مقدار کمترین خطای پیش‌بینی (RMSE = 1.42) و بیشترین دقت (Accuracy = 92.7%) بهترین عملکرد را در شناسایی و پیش‌بینی روزهای موج گرما در استان‌های غربی ایران داشته است. این برتری به دلیل توانایی مدل در شناسایی روابط غیرخطی میان متغیرهای اقلیمی و مدیریت داده‌های دارای نوسان است. همچنین با اینکه الگوریتم LSTM در تشخیص روندهای زمانی بلندمدت دما و شناسایی الگوهای فصلی عملکرد خوبی دارد، اما در پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت دقت کمتری نسبت به جنگل تصادفی داشته است. شبکه عصبی ساده نیز کمترین دقت را ارائه داد و برای پیش‌بینی‌های دقیق شرایط حاد اقلیمی مناسب نمی‌باشد. این نتایج نشان می‌دهد که ترکیب دو الگوریتم جنگل تصادفی و LSTM می‌تواند در توسعه سیستم‌های هشدار چندلایه بسیار اثربخش باشد. بر اساس یافته‌های جدول فوق، الگوریتم Random Forest با دستیابی به کمترین مقدار خطا و بیشترین میزان دقت، بهترین عملکرد را در پیش‌بینی وقوع امواج گرما نشان داد. این موضوع نشان می‌دهد که توانایی ذاتی

الگوریتم در مدل‌سازی روابط غیرخطی میان متغیرهای اقلیمی و قابلیت مدیریت داده‌های نامتوازن، موجب برتری آن نسبت به سایر مدل‌ها شده است. در مقابل، الگوریتم LSTM اگرچه در پیش‌بینی کوتاه‌مدت کمی ضعیف‌تر عمل کرده، اما در شناسایی الگوهای سری‌های زمانی بلندمدت و روندهای فصلی تغییرات دما، کارایی قابل‌توجهی داشته است. بنابراین، ترکیب خروجی‌های مدل جنگل تصادفی و LSTM می‌تواند راهکاری مؤثر برای توسعه سیستم‌های هشدار چندلایه در سطوح کوتاه‌مدت و میان‌مدت باشد.

تحلیل روند زمانی و مکانی امواج گرما

تحلیل داده‌های دوره ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۳ نشان داد که میانگین سالانه روزهای موج گرما در غرب ایران افزایش قابل‌توجهی داشته است. روند تغییرات در جدول ۲ به‌طور خلاصه نشان می‌دهد که طی این دوره، تعداد روزهای با دمای بالاتر از صدک ۹۰ به‌طور میانگین ۳۵٪ افزایش یافته است. داده‌های دوره مورد بررسی نشان داد که روزهای موج گرما در غرب ایران به طور میانگین افزایش یافته است و بیشترین رشد در استان‌های کرمانشاه (۴۵٪) و ایلام (۴۲٪) مشاهده شد. سال‌های ۲۰۱۷، ۲۰۲۰ و ۲۰۲۲ اوج وقوع امواج گرمای شدید را تجربه کردند. بررسی همبستگی‌ها نشان داد که این دوره‌ها همزمان با خشکسالی‌های گسترده و کاهش بارش‌های فصلی بوده‌اند. در استان‌های مرتفع‌تر مانند همدان، اگرچه شدت امواج گرما نسبتاً کمتر بود، اما تعداد روزهای متوالی با دمای بیش از ۴۰ درجه در مقایسه با یک دهه قبل افزایش یافته است. این نتایج نشان می‌دهد که ترکیبی از افزایش دمای پس‌زمینه اقلیم و نوسانات سامانه‌های جوی منطقه‌ای عامل اصلی تشدید امواج گرما در غرب کشور است (جدول ۲).

جدول ۲، میانگین افزایش روزهای موج گرما (۲۰۱۳–۲۰۲۳) در استان‌های غرب ایران

استان	میانگین سالانه روزهای موج گرما	درصد افزایش نسبت به سال ۲۰۱۳
کرمانشاه	18	٪45
ایلام	17	٪42
کردستان	15	٪33
همدان	13	٪28
لرستان	14	٪30

تحلیل اهمیت متغیرها با استفاده از SHAP

به منظور شناسایی متغیرهای اقلیمی کلیدی در شکل‌گیری و تشدید امواج گرما، از روشSHAP برای تحلیل مدل جنگل تصادفی استفاده شد. نتایج تحلیل اهمیت متغیرها در جدول (۳) ارائه شده است:

جدول ۳. رتبه‌بندی و اهمیت نسبی متغیرهای اقلیمی مؤثر بر وقوع و شدت امواج گرما بر اساس تحلیل SHAP در غرب ایران

رتبه	متغیر اقلیمی	اهمیت نسبی (٪)
۱	دمای حداکثر روزانه	٪37.2
۲	رطوبت نسبی	٪21.4
۳	تابش خورشیدی	٪16.8
۴	فشار سطح زمین	٪13.7
۵	اختلاف دمای شب و روز	٪10.9

بر اساس تحلیل SHAP، متغیر دمای حداکثر روزانه بیشترین تأثیر را (۳۷.۲٪) بر پیش‌بینی وقوع امواج گرما دارد. این یافته تأیید می‌کند که افزایش دمای روزانه عامل اصلی شکل‌گیری موج گرماست. پس از آن، رطوبت نسبی (۲۱.۴٪) به‌عنوان دومین عامل کلیدی شناسایی شد. به این معنا که حتی در شرایطی که دمای هوا متوسط باشد، رطوبت بالا می‌تواند باعث احساس گرمای شدیدتر شود و در ترکیب با دما، شدت و خطر موج گرما را تشدید می‌کند. متغیرهای تابش خورشیدی (۱۶.۸٪) و فشار سطح زمین (۱۳.۷٪) نیز نقش قابل‌توجهی در تغییرات دمای سطحی و شکل‌گیری سامانه‌های پرفشار گرم‌کننده دارند. در نهایت، اختلاف دمای شب و روز (۱۰.۹٪) نشان‌دهنده اهمیت پایداری دمای شبانه در بروز امواج گرمای مداوم و چندروزه است.

این تحلیل اهمیت استفاده از چندین متغیر اقلیمی در کنار یکدیگر را در بهبود دقت مدل‌های یادگیری ماشین نشان می‌دهد و تأکید می‌کند که شناسایی تعامل بین متغیرها می‌تواند به توسعه سیستم‌های هشدار زودهنگام کمک شایانی کند. بطور کلی نتایج نشان می‌دهد که دمای حداکثر روزانه مهم‌ترین متغیر تعیین‌کننده در وقوع روزهای موج گرماست؛ اما ترکیب دمای بالا با رطوبت نسبی متوسط تا زیاد، عامل اصلی بروز امواج گرمای شدید و خطرناک محسوب می‌شود. همچنین می‌توان گفت که افزایش تابش خورشیدی و تغییرات فشار سطح زمین نیز در ایجاد شرایط بی‌ثبات جوی نقش بسزایی دارند. این یافته‌ها حاکی از آن است که استفاده از چندین متغیر اقلیمی به‌صورت همزمان، به‌ویژه در مدل‌های یادگیری ماشین، می‌تواند موجب افزایش دقت پیش‌بینی شود.

چارچوب هشدار زودهنگام و مدیریت بحران

یکی از اهداف کلیدی این پژوهش، طراحی چارچوبی برای توسعه سیستم هشدار زودهنگام (Early Warning System) بر مبنای خروجی مدل جنگل تصادفی بود. این سیستم قادر است ۵ تا ۷ روز پیش از وقوع موج گرما، هشدارهای محلی برای استان‌های پرخطر صادر کند. در این پژوهش، بر اساس عملکرد برتر الگوریتم جنگل تصادفی با دقت ۹۲.۷٪، یک چارچوب سیستم هشدار زودهنگام طراحی شد که قادر است ۵ تا ۷ روز پیش از وقوع امواج گرما هشدارهای محلی و منطقه‌ای صادر کند. این سیستم با استفاده از داده‌های ایستگاهی و بازتحلیل ERA5، روزهای پرخطر را شناسایی کرده و با بهره‌گیری از روش SHAP، مهم‌ترین متغیرهای مؤثر شامل دمای حداکثر روزانه (۳۷.۲٪)، رطوبت نسبی (۲۱.۴٪) و تابش خورشیدی (۱۶.۸٪) را تعیین می‌کند. در صورت عبور احتمال وقوع موج گرما از ۷۰٪، هشدارها برای سازمان مدیریت بحران، بخش سلامت، کشاورزی و انرژی صادر می‌شود تا اقدامات پیشگیرانه از جمله مدیریت مصرف انرژی، زمان‌بندی آبیاری و آماده‌سازی مراکز درمانی انجام گیرد. این چارچوب می‌تواند نقش مهمی در کاهش خسارات انسانی، اقتصادی و زیست‌محیطی در استان‌های غربی ایران ایفا کند.

کاربردهای عملی نتایج این مدل در مدیریت بحران عبارت‌اند از:

شناسایی گروه‌های پرخطر شامل سالمندان، کودکان و بیماران قلبی-ریوی.

توسعه پروتکل‌های پزشکی اضطراری و گسترش اطلاع‌رسانی عمومی در مناطق در معرض خطر.

برنامه‌ریزی برای افزایش ظرفیت مراکز درمانی در دوره‌های بحرانی.

کمک به مدیریت زمان‌بندی آبیاری برای کاهش خسارت به محصولات حساس.

توسعه برنامه‌های سازگاری کشاورزی با تغییرات دمایی.

استفاده از مدل‌های مکمل برای پیش‌بینی تبخیر–تعرق مرجع و مدیریت مصرف آب.

پیش‌بینی افزایش پیک مصرف برق در دوره‌های موج گرما.

برنامه‌ریزی برای افزایش تاب‌آوری شبکه برق و کاهش خاموشی‌ها.

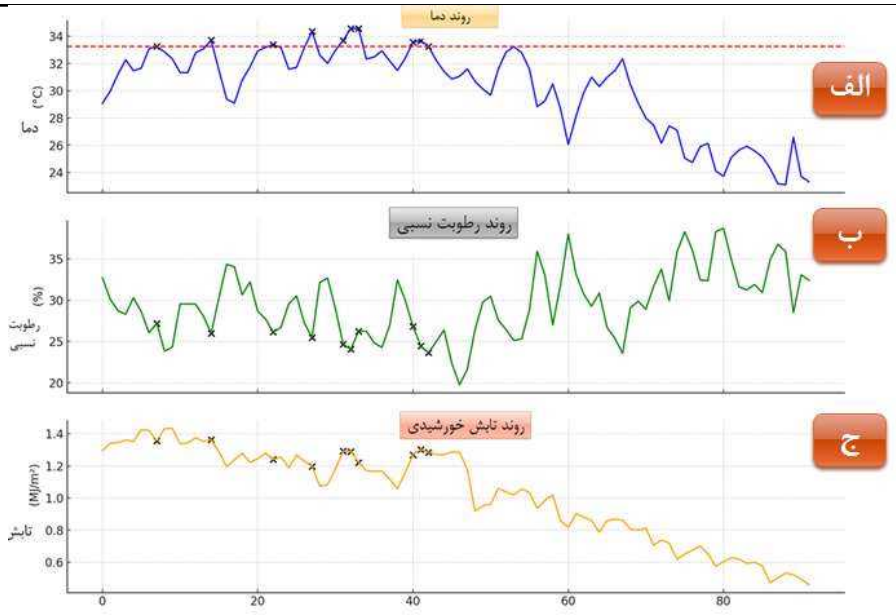
این چارچوب می‌تواند به عنوان یک مدل بومی‌سازی‌شده در غرب ایران به کار گرفته شود و امکان تصمیم‌گیری مبتنی بر داده را برای مدیران و سازمان‌های ذی‌ربط فراهم سازد. بطور کلی نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین، به‌ویژه جنگل تصادفی، می‌تواند دقت پیش‌بینی امواج گرما را به‌طور میانگین ۲۰ تا ۳۰ درصد نسبت به مدل‌های آماری سنتی افزایش دهد. تحلیل‌های SHAP نشان دادند که ترکیب متغیرهای دمایی، رطوبتی و تابشی، کلید شناسایی روندهای خطرناک اقلیمی در غرب ایران است. همچنین، روند افزایشی شدت و فراوانی امواج گرما در سال‌های اخیر، ضرورت توسعه سیستم‌های هشدار سریع و مدیریت فعال بحران‌های اقلیمی را بیش از پیش نمایان می‌سازد.

در نهایت به منظور بررسی دقت الگوریتم‌های مبتنی بر هوش مصنوعی، همبستگی میان داده‌های حاصل از ERA5 برای دوره مورد مطالعه در غرب ایران و نتایج حاصل از الگوریتم‌های هوش مصنوعی محاسبه شد. نتایج این محاسبات نشان می‌دهد که بین دما (M۲T) و رطوبت نسبی(RH) همبستگی منفی قوی(۰.۶۴-) وجود داشت. بین دما و حداکثر تابش خورشیدی(SSRD) همبستگی مثبت متوسط (۰.۵۵+) و بین رطوبت نسبی (RH) و حداکثر تابش خورشیدی همبستگی منفی ضعیف تا متوسط (۰.۳۷-) وجود دارد. بر اساس الگوریتم هوش مصنوعی، دمای حداکثر مهم‌ترین عامل امواج گرماست و نقش رطوبت نسبی دومین عامل بوده است که معمولاً رابطه معکوس با دما دارد.همچنین تابش خورشیدی اثر افزایشی روی دما داشته است. بنابراین این نتایج با نتایج حاصل از الگوریتم Random Forest و LSTM همخوانی و مطالقت دارد. در واقع دما هم در نتایج الگوریتم های هوش مصنوعی(37.2٪) و هم با بررسی داده‌های Netcdf (۴۵.۶٪) به عنوان مهم‌ترین عامل تشخیص داده شده است. رطوبت نسبی نیز در هر دو تحلیل، دومین عامل مهم به شمار می‌آید (با وزن نسبتاً نزدیک). در نهایت با اینکه تابش خورشیدی در هر دو تحلیل سومین عامل موثر در رخداد موج گرما است، اما در داده‌های NetCDF نقش قوی‌تری داشته است (۲۵.۲٪). بنابراین می‌توان گفت که داده‌های واقعی NetCDF تقریباً همان الگوی حاصل از الگوریتم‌های هوش مصنوعی را بازتولید کرده‌اند.

جدول ۴. مقایسه نتایج حاصل از الگوریتم های هوش مصنوعی و داده های Netcdf در غرب ایران

متغیر	نتایج الگوریتم‌های هوش مصنوعی	نتایج همبستگی حاصل از داده‌های Netcdf
دما (T2M)	٪37.2	٪۴۵.۶
رطوبت نسبی (RH)	٪۲۱.۴	٪۲۹.۳
تابش خورشیدی(SSRD)	٪۱۶.۸	٪۲۵.۲

همچنین به منظور ارائه دید جامع‌تری از امواج گرما، نمودار میانگین روندهای دما، رطوبت نسبی و تابش تهیه شده است (شکل ۱).



شکل ۱. نمودار میانگین روندهای دما (الف)، رطوبت نسبی (ب) و تابش(ج) در روزهای فصل تابستان در دوره مورد مطالعه (۲۰۱۳-۲۰۲۳) در غرب ایران

در نمودار فوق، خط آبی تغییرات میانگین روند دما در فصل تابستان در طول ۹۲ روز را نشان می‌دهد. خط قرمز نقطه‌چین، آستانه موج گرما (صدک ۹۰ ≈ ۳۳.۳ درجه سانتی‌گراد) و خط سبز رطوبت نسبی (هرچه پایین‌تر باشد، شرایط خشک‌تر و خطرناک‌تر) را نشان می‌دهد. خط نارنجی نیز، تابش خورشیدی نرمال شده را نمایش می‌دهد. نقاط سیاه رنگ، روزهایی هستند که موج گرما رخ داده است. در روزهای موج گرما (نقاط سیاه، دما بالا، رطوبت پایین و تابش بالاتر از میانگین می‌باشد که این ترکیب سه‌گانه، برای سلامتی خطرناک است. در واقع این نتایج همسو با همان نتایجی است که در این مقاله بر اساس الگویتم‌های هوش مصنوعی (دمای بالا، رطوبت پایین و تابش زیاد به عنوان عوامل کلیدی امواج گرما) شناسایی شده‌اند. در جدول ۵ نیز، میانگین متغیرهای مورد بررسی نمایش داده شده است.

میانگین متغیرهای دما، رطوبت نسبی و تابش (۲۰۱۳-۲۰۲۳) در غرب ایران

نوع روز	دما(°C)	رطوبت نسبی(%)	تابش خورشیدی(MJ/m2)
روزهای عادی	29.7	30.0	1.00
روزهای موج گرما	33.8	25.5	1.28

همانطور که در جدول دیده می شود، دما در موج گرما تقریباً ۴ درجه بالاتر از دما در روزهای عادی است. رطوبت نسبی نیز حدود ۵٪ کمتر (هوای خشک‌تر → شرایط سخت‌تر برای بدن و گیاه) و تابش خورشیدی نیز حدود ۲۸٪ بیشتر است

که عامل اصلی بالا رفتن دماست. این نتایج منطبق با الگوریتم های هوش مصنوعی (دمای بالا + رطوبت پایین + تابش زیاد = روزهای موج گرما) در شناسایی امواج گرما در غرب ایران است.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف پیش‌بینی و مدیریت امواج گرما در غرب ایران و با تمرکز بر استان‌های کرمانشاه، همدان، ایلام، کردستان و لرستان انجام شد. داده‌های اقلیمی روزانه طی یک دوره ۱۰ ساله با بهره‌گیری از منابع ایستگاهی و بازتحلیل ERA5گردآوری و پس از پیش‌پردازش، در سه الگوریتم جنگل تصادفی، شبکه عصبی ساده و LSTM به کار گرفته شد. یافته‌ها نشان دادند که در میان مدل‌های مورد استفاده، بعد از الگوریتم جنگل تصادفی، الگوریتم LSTM با دقت ۹۰ درصد و کمترین خطا (RMSE=2.0) بهترین عملکرد را در شبیه‌سازی روندها و شدت امواج گرما داشته اند. در واقع شبکه عصبی ساده نیز در پیش‌بینی شدت دما و الگوهای کوتاه‌مدت موفق بود و مدل جنگل تصادفی در شناسایی کلی روزهای داغ نتایج مناسبی ارائه داد. تحلیل اهمیت متغیرها با روش SHAP نیز نشان داد که دمای روزهای گذشته، رطوبت نسبی و فشار جوی سه عامل کلیدی در شکل‌گیری امواج گرما هستند. بر اساس این نتایج، می‌توان گفت که به‌کارگیری الگوریتم‌های مبتنی بر هوش مصنوعی به‌ویژه LSTM در مقیاس منطقه‌ای، چارچوبی عملیاتی و قابل اعتماد برای هشدار سریع و مدیریت مخاطرات ناشی از امواج گرما فراهم می‌سازد. این چارچوب می‌تواند در مدیریت مصرف انرژی، برنامه‌ریزی کشاورزی و کاهش اثرات بهداشتی ناشی از گرما مورد استفاده قرار گیرد. نوآوری اصلی این پژوهش در طراحی یک مدل بومی پیش‌بینی امواج گرما برای غرب ایران است. این مدل با ترکیب الگوریتم‌های جنگل تصادفی، شبکه عصبی ساده و LSTM و بر اساس داده‌های اقلیمی پنج استان غرب کشور اجرا شده است. علاوه بر این، آستانه تعریف موج گرما بر اساس شرایط محلی (صدک ۹۰ دما در هر ایستگاه) تعیین گردید و از روش SHAP برای شناسایی عوامل مؤثر ویژه منطقه استفاده شد. بدین ترتیب، چارچوب ارائه‌شده یک مدل بومی است که ضمن بهره‌گیری از توانمندی‌های هوش مصنوعی، به شرایط اقلیمی و نیازهای مدیریتی منطقه انطباق یافته و می‌تواند به‌عنوان سامانه هشدار سریع مورد استفاده دستگاه‌های اجرایی قرار گیرد.

پیشنهادها برای پژوهش‌های آینده

استفاده از دوره‌های زمانی طولانی‌تر و ترکیب داده‌های ماهواره‌ای مانند MODIS برای بهبود دقت مدل‌ها.

آزمون الگوریتم‌های ترکیبی (Ensemble Learning) برای ارتقای دقت پیش‌بینی.

تحلیل اثر سناریوهای تغییر اقلیم (RCPs) بر فراوانی و شدت امواج گرما در دهه‌های آینده.

توسعه سامانه‌های هشدار سریع بومی برای بهره‌برداری سازمان‌های هواشناسی و مدیریت بحران.

منابع

Breiman, L. (2001). Random forests. Machine Learning, 45(1), 5–32. https://doi.org/10.1023/A:1010933404324
Chen, Y., & Liu, Y. (2020). Application of machine learning models for heat wave prediction in China. Atmospheric Research, 240, 104933. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104933
Chen, T. (2022). Data preprocessing for climate datasets in machine learning applications. Journal of Atmospheric Data Science, 5(2), 45–60.
Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., et al. (2020). The ERA5 global reanalysis. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 146(730), 1999–2049. https://doi.org/10.1002/qj.3803
IPCC. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge University Press.
Karimi, P., Shafiee, S., & Azadi, P. (2021). Heat wave trends and impacts in western Iran. Journal of Environmental Studies, 47(3), 210–225.
Mahmoud, M., & El-Shafie, A. (2019). Machine learning applications for climate hazard prediction. Environmental Monitoring and Assessment, 191, 1–15. https://doi.org/10.1007/s10661-019-7214-0
Perkins, S., & Alexander, L. (2013). On the measurement of heat waves. Journal of Climate, 26, 4500–4517. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00383.1
Rahimi, M., Hashemi, H., & Fathi, A. (2020). Application of machine learning in heat wave prediction in Iran. Iranian Journal of Climatology, 22(1), 45–60.
Li, X. (2022). Machine learning applications for heatwave prediction using climate reanalysis data. Environmental Modelling & Software, 150, 105362.
Lundberg, S. M., & Lee, S. I. (2017). A unified approach to interpreting model predictions. Advances in Neural Information Processing Systems, 30.
Miloshevich, L. (2022). Convolutional neural networks for heatwave prediction. Climate Dynamics, 59(3–4), 1235–1250.
Mohammadi, R. (2022). Predicting heatwaves using machine learning algorithms in Iran. Atmospheric Research, 270, 106170.
Valipour, M. (2023). Deep learning approaches for reference evapotranspiration forecasting. Agricultural Water Management, 271, 108180.
Kumar, S. (2023). Heatwave prediction using ensemble machine learning approaches in India. Environmental Science & Policy, 140, 89–101.
Zhang, Y., Li, H., & Wang, J. (2021). Heatwave prediction in Europe using CNN and LSTM models. Climate Research, 79, 55–70.
Sadegh, M. (2023). Impact of heatwaves on wheat yield in western Iran. Journal of Agricultural Sciences, 18(2), 112–125.
Mirzaei, H. (2023). Relationship between heatwaves and electricity consumption in Lorestan, Iran. Energy Reports, 9, 403–415.
Rezaei, A. (2021). Heatwave intensity and duration analysis in Ilam and Kermanshah provinces. Iranian Journal of Climatology, 23(1), 33–48.

سومین کنفرانس ملی آب و هواشناسی ایران (با محوریت تغییر اقلیم)
The 3rd National Conference on Climatology of Iran (Focusing on Climate Change)
ارومیه ۱۶ مهر ۱۴۰۴

Application of Artificial Intelligence Algorithms in Forecasting and Managing Climate Risks with Emphasis on Heat Waves in Western Iran

Azar Jalilian*

PhD in Climatology, Razi University, Kermanshah

Hasan Zolfaghari

Associate Professor of Climatology, Razi University, Kermanshah

azar.jalilian17@gmail.com

Abstract

Climate change has significantly increased the frequency and intensity of heat waves in the world, especially in western Iran. This phenomenon has significant impacts on public health, agriculture, and energy consumption, and highlights the need to develop accurate forecasting and early warning systems. This research was conducted using daily data on temperature, relative humidity, and climate indicators at meteorological stations in five western Iranian provinces (Kermanshah, Hamadan, Ilam, Kurdistan, and Lorestan) during the period 2013 to 2023 and additional ERA5 satellite data, Random Forest, LSTM, and simple neural network models. The performance of the models was evaluated with RMSE, MAE, and Accuracy indices. The results showed that the Random Forest model had the best performance with an accuracy of 92.7% and the lowest error (RMSE=1.42). Also, using the SHAP method, the main factors of heat wave formation were identified, with daily maximum temperature (37.2%), relative humidity (21.4%), and solar radiation (16.8%) having the greatest impact. Finally, a framework for an early warning system was designed that can provide local warnings 5 to 7 days before the occurrence of heat waves and play an effective role in the optimal management of water, energy, and public health resources.

Keywords: Artificial intelligence algorithms, Heat Waves, Random Forest, SHAP, Western Iran.

پایش تغییرات غلظت گاز متان در ایستگاه‌های منتخب حوضه دریاچه ارومیه با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور

محمدرضا عزیززاده

استادیار گروه جغرافیا، دانشگاه پیام نور، صندوق پستی ۳۶۹۷-۱۹۳۹۶، تهران، ایران

آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول (m_azizzadeh@pnu.ac.ir)

چکیده

گاز متان یکی از مهم‌ترین گازهای گلخانه‌ای است که نقش کلیدی در تغییرات آب و هوای جهانی ایفا می‌کند. این گاز با داشتن پتانسیل گرمایش جهانی بسیار بالاتر از دی‌اکسید کربن در کوتاه‌مدت، تأثیر قابل‌توجهی برافزایش دمای کره زمین دارد. بررسی و فهم دقیق رفتار و اثرات گاز متان در جو، به‌عنوان یک گام اساسی در مدیریت و کاهش تغییرات آب و هوایی به شمار می‌آید. افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای به‌ویژه متان، یکی از عوامل اصلی تشدید تغییرات اقلیمی جهانی است که اثرات منفی گسترده‌ای بر دمای سطح زمین و الگوهای آب و هوایی دارد. در پژوهش حاضر، روند فضایی و زمانی انتشار گاز متان در حوضه آبریز دریاچه ارومیه طی بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۴ با استفاده از داده‌های سنجنده AIRS بررسی شد. نتایج نشان‌دهنده افزایش مستمر غلظت متان در ایستگاه‌های تبریز و ارومیه است که ناشی از ترکیبی از فعالیت‌های انسانی مانند کشاورزی، صنعتی و منابع طبیعی است. تحلیل نقشه‌های ماهانه انتشار، تمرکز بالای متان را در بخش شرقی و شمالی حوضه و کمترین مقادیر را در مرکز آن نشان داد. همچنین نوسانات فصلی و تأثیر شرایط اقلیمی بر این روند مشاهده‌شده است، به‌طوری‌که بیشترین میزان انتشار در فصل‌های سرد سال ثبت گردید. یافته‌ها اهمیت پایش مستمر گازهای گلخانه‌ای و توسعه راهکارهای مدیریتی و فناورانه برای کاهش انتشار متان در حفاظت از محیط‌زیست و کنترل تغییرات اقلیمی را برجسته می‌سازد.

کلیدواژه‌ها: گاز متان، روند زمانی، تغییرات اقلیمی، AIRS

مقدمه

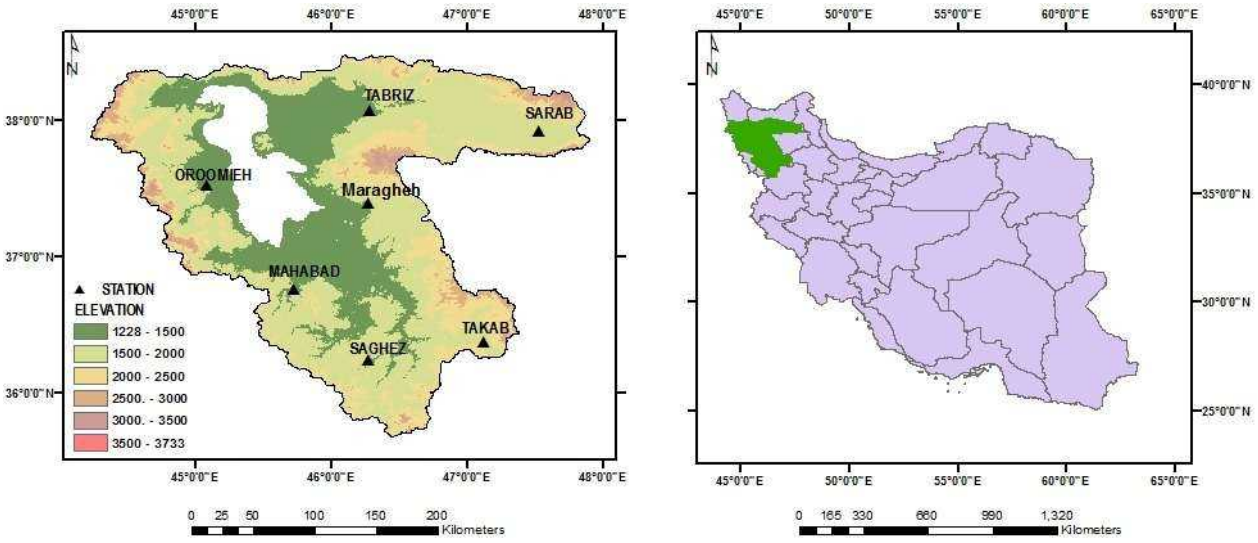
افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای در جو زمین به‌عنوان یکی از عوامل اصلی تغییرات اقلیمی شناخته می‌شود که اثرات گسترده‌ای بر دمای میانگین کره زمین و الگوهای آب و هوایی دارد. گازهای گلخانه‌ای ازجمله دی‌اکسید کربن (CO_2)، متان (CH_4)، اکسید نیتروژن و فلوروکربن‌ها با جذب و بازتاب انرژی حرارتی خورشید، موجب افزایش دمای سطح زمین می‌شوند و این پدیده که به «اثر گلخانه‌ای» معروف است، بدون آن حیات به شکل کنونی امکان‌پذیر نبوده. اما فعالیت‌های انسانی ازجمله سوختن سوخت‌های فسیلی، تغییر کاربری زمین و افزایش انتشار این گازها، باعث تشدید این اثر و درنتیجه تغییرات گسترده اقلیمی شده است که خود را به‌صورت افزایش دما، تغییر الگوهای بارش، ذوب یخ‌ها و افزایش سطح آب دریاها نشان می‌دهد. پژوهش‌های جدید نشان می‌دهد که طی دو دهه اخیر میانگین دمای زمین حدود ۱ درجه سانتی‌گراد افزایش‌یافته است و این روند در حال تشدید است. همچنین فناوری‌های نوین در زمینه کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای مانند ذخیره‌سازی کربن و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر نقش مهمی در کنترل و کاهش اثرات منفی این تغییرات دارند. به‌این‌ترتیب، درک عمیق‌تر و به‌روزرسانی مستمر دانش علمی پیرامون تأثیر گازهای گلخانه‌ای بر تغییرات اقلیمی، جهت تدوین سیاست‌های مؤثر و برنامه‌ریزی‌های جهانی برای مقابله با بحران اقلیمی ضروری است.

با توجه به اینکه اتمسفر زمین پدیده‌ای سیال است بنابراین گازهای موجود در جو زمین نیز توسط گردش جو و توده‌های هوا به سایر نقاط نیز منتقل‌شده و آسمان دیگر نقاط را نیز دستخوش تغییر و تحول می‌کند .بنابراین نمی‌توان گفت که تنها، جو مناطق صنعتی و آلوده دچار این تغییر و تحولات اقلیمی شده است. از این‌رو باید تمام کشورهای جهان به فکر کنترل و کاهش میزان انتشار این گازها باشند .کشور ما هم از این قاعده مستثنی نخواهد بود و باید به سمت کنترل و کاهش انتشار این گازها گام بردارد (دکامی، ۱۳۸۹). در گرمایش ناشی از گازهای گلخانه‌ای زمین، بیش از ۲۰ گاز دخالت دارند که سهم چند گاز بیش از بقیه است و منبع مهم انتشار آن‌ها نیز فعالیت‌های بشری می‌باشد. بیشترین تأثیرات گرمایش گلخانه‌ای به تغییرات اقلیم و تغییر در الگوهای بارندگی و دمای کره‌ی زمین مربوط است و اثرات این بی‌نظمی‌ها از هم‌اکنون آشکارشده است. یکی از این گازها متان می‌باشد که در اثر تجزیه بی هوازی مواد آلی(بقایای بدن موجودات در محیط مرطوب زنده) حاصل می‌شود. این مناطق شامل برکه‌ها، باتلاق‌ها و مرداب‌ها، مزارع برنج، مکان‌های دفن، نشخوار دام‌ها و نیز از موریانه‌ها حاصل می‌شود .تولید و مصرف نفت و گاز طبیعی و سوختن ناقص مواد آلی شامل سوختن زیست‌توده در نواحی حاره نیز از منابع قابل‌توجه تولید متان است. این گاز یکی از گازهای گلخانه‌ای به شمار می‌رود که سال‌های اخیر غلظت آن در حدود ۱ درصد در هرسال افزایش داشته است. بدون شک برای جلوگیری از تشدید آن باید در دنیا اقدامات لازم به عمل آید .شواهد نشان می‌دهد که افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای می‌تواند فراوانی بارش در بسیاری از مناطق جهان را افزایش دهد (فری و همکاران ۲۰۰۵). چرخه متان دارای تغییرات فصلی است؛ به‌طوری‌که این تغییرات به فصلی بودن منابع تولید (تالاب‌ها، مزار برنج و سوزاندن) و خروجی ناشی از واکنش اتمسفری این گاز بستگی دارد. منابع انتشار متان به سه دسته تقسیم می‌شود: بیوژنیک، ترموژنیک و پیروژنیک. منابع بیوژنیک شام تولید متان میکروبی در محیط‌های بی‌هوازی ازجمله

تالاب‌های طبیعی و مزار برنج، مخازن آب شیرین با اکسیژن محدود ازجمله سدها، سیستم گوارش نشخوارکنندگان و موریانه‌ها و شیراب محل دفن، فاضلاب، و کودهای حیوانی است. منابع ترموژنیک شام انفجارها و انتشار سوخت‌های فسیلی از زیر سطح زمین و آتشفشان های طبیعی است و منابع پیروژنیک شام احتراق ناقص سوخت‌های فسیلی است (کرسچک و همکاران، ۲۰۱۳). گاز متان به‌تنهایی مسئول بیش از ۱۸ درصد از گرمای تولیدشدهٔ ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای است (سازمان هواشناسی جهانی ۲۰۱۵) تغییر میزان متان از ppb ۷۰۰ به ppb ۱۸۰۸ بین سال‌های ۱۸۵۰ تا ۲۰۱۰ نشان‌دهندهٔ افزایش ۱۵۸ درصدی این گاز از دوران صنعتی شدن تاکنون بوده است (گو و همکاران،۲۰۱۳). روش‌های گوناگونی برای اندازه‌گیری گازهای گلخانه‌ای وجود دارد؛ از میان آن‌ها می‌توان به استفاده از پایگاه‌های زمینی، برج‌های بالن، کشتی‌ها، هواپیماها، بالن، و ماهواره اشاره کرد (اینو و همکاران، ۲۰۱۳). در زمینه پایش ماهواره گازهای گلخانه‌ای می‌توان به سنجده AIRS، SCIAMACHY، GOSAT و OCO-2 اشاره کرد (موسوی و همکاران، ۱۳۹۶). تا حال حاضر مطالعات متعددی در ارتباط با انتشار گاز متان صورت گرفته است. موسوی و همکاران (۱۳۹۶)به پایش تغییرات ماهانه و فصلی گاز متان با استفاده از داده‌های ماهواره GOSAT پرداخته‌اند. نتایج نشانگر آن است که طی دوره آماری موردمطالعه مقدار گاز متان به‌صورت افزایشی بوده است. بطوریکه افزایش حدود ۳۵ درصدی در ایران را نشان می‌دهد. همچنین مقادیر متان دارای تغییرات ماهانه بوده است. در پژوهشی تحت عنوان تحلیل اثر گاز گلخانه‌ای متان بر نوسانات بارش فصلی ایران (حجازی زاده و همکاران، ۱۳۹۹) با تحلیل داده‌های گاز متان در ایران نشان دادند که ارتباطی بین مقادیر بارش و گاز متان وجود دارد. بطوریکه با توجه به افزایش گازهای گلخانه‌ای، تحلیل داده‌های بارش نشانگر کاهش حدود ۳۰ میلی‌متری بارش در ایستگاه‌های جنوب ایران در بلندمدت بوده است. موسوی و همکاران (۱۳۹۶) به بررسی تغییرات غلظت گازهای گلخانه‌ای دی‌اکسید کربن و متان در ارتباط با متغیرهای محیطی در ایران را بررسی کرده‌اند. نتایج نشانگر آن است که با افزایش رطوبت، ارتفاع، و شاخص نرمال شده اختلاف پوشش گیاهی و کاهش دمای هوا مقدار غلظت گازهای دی‌اکسید کربن و متان کاهش پیداکرده است. در این مطالعه به اهمیت پوشش گیاهی در ارتباط با گازهای مذکور پرداخته‌شده است. در پژوهشی دیگر (محمدی و همکاران، ۱۴۰۲) به پایش و آشکارسازی گاز متان در شهر تهران پرداخته‌اند. نتایج نشانگر عدم تأثیرگذاری مقادیر دیگر گازها بر مقدار متان در زمان بررسی بوده است. همچنین جنوب تهران بیشترین گاز متصاعد شده متان را نشان می‌دهد که منشأ اصلی آن دفن زباله در محل مذکور بوده است. هاوسانگ و همکاران (۲۰۲۳) به بررسی الگوی زمانی و مکانی متان از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۱ با استفاده از مشاهدات GOSAT و TROPOMI پرداخته‌اند. نتایج نشان‌دهنده افزایش غلظت متان با رشد سالانه PPB ۸/۴ بوده است. یانکاژ ساداوارته همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور به انتشار گاز متان در استرالیا پرداخته‌اند. نتایج نشان داد که در دو موردمطالعه شده، تخمین‌های ماهواره‌ای به‌طور قابل‌توجهی بالاتر از گزارش‌های دستگاه‌های دولتی بوده است. ژاک و همکاران (۲۰۲۲) تجزیه‌وتحلیل انتشار گاز متان در چین را انجام داده‌اند. نتایج حاصله نشانگر آن بوده که غلظت گاز متان در تابستان نسبت به زمستان زیاد بوده است. با توجه به اهمیت موضوع پایش انتشار گاز متان ضروری می‌باشد. بدین منظور در پژوهش حاضر در حوضه دریاچه ارومیه به بررسی مکانی و زمانی آن پرداخته شد.

موقعیت جغرافیایی محدوده موردمطالعه

حوضه آبریز دریاچه ارومیه با وسعت حدود ۵۱۸۷۶ کیلومترمربع در شمال غرب ایران قرارگرفته و به‌وسیله بخش شمالی کوه‌های زاگرس، دامنه جنوبی کوه سبلان و دامنه‌های شمالی، غربی و جنوبی کوه سهند احاطه‌شده است. این حوضه از سمت شمال به حوضه آبریز رودخانه ارس، از سمت شرق به حوضه آبریز رودخانه سفیدرود و سیروان و از غرب به حوضه آبریز رودخانه زاب محدود گشته است شکل شماره (۱). در پژوهش حاضر دو ایستگاه تبریز و ارومیه به‌عنوان نماینده ایستگاه‌ها در محدوده موردنظر انتخاب گردید. بازه زمانی داده‌های مورداستفاده از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۴ به مدت ۲۱ سال می‌باشد. برای این منظور داده‌های ماهانه شب و روز مقادیر گاز متان با استفاده از سنجنده AIRS (ژرفاسنج مادون‌قرمز جوی در ماهواره آکوا) استخراج گردید. قدرت تفکیک مکانی تصاویر ۱ درجه در نظر گرفته‌شده است. همچنین تفکیک زمانی هم به‌صورت ماهانه بوده است. AIRS ابزاری است که هدف آن پشتیبانی از تحقیقات اقلیمی و بهبود پیش‌بینی آب‌وهوا است. ژرفاسنج مادون‌قرمز جوی AIRS، که در ۴ مه ۲۰۰۲ توسط ماهواره آکوا به مدار زمین پرتاب شد، داده‌های حیاتی برای نظارت بر جو زمین را فراهم می‌کند.



شکل شماره (۱): موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز دریاچه ارومیه

بحث و نتایج

افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای به‌ویژه گاز متان یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی در عصر حاضر محسوب می‌شود که تأثیر مستقیمی بر تغییرات آب‌وهوایی جهانی دارد. گاز متان به‌عنوان دومین گاز گلخانه‌ای مؤثر پس از دی‌اکسید، دارای پتانسیل گرمایش جهانی بسیار بالاتری است و افزایش غلظت آن در جو، باعث تقویت اثر گلخانه‌ای و

تشدید روند گرمایش زمین می‌شود. منابع انتشار گاز متان متنوع و شامل فعالیت‌های انسانی مانند کشاورزی، دامداری، استخراج سوخت‌های فسیلی و دفن زباله‌ها هستند، که همگی نقش قابل‌توجهی در افزایش غلظت این گاز دارند. بررسی دقیق این منابع و تأثیرات ناشی از افزایش گاز متان، برای تدوین راهکارهای مؤثر کاهش انتشار و مدیریت بهتر تغییرات اقلیمی ضروری است. بنابراین، مطالعه روند افزایش گاز متان و تحلیل اثرات آن بر تغییرات آب‌وهوایی می‌تواند به درک بهتر فرآیندهای اقلیمی و بهبود سیاست‌های زیست‌محیطی کمک کند.

نمودار ماهانه مقادیر گاز متان برای تبریز از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۴ (نمودار شماره ۱) نشان‌دهنده یک روند افزایشی مستمر در میزان انتشار یا غلظت این گاز در بازه زمانی موردنظر است. این روند افزایشی می‌تواند ناشی از عوامل متعددی باشد که در ادامه تفسیر می‌شود:

تأثیر فعالیت‌های انسانی: افزایش صنعت، کشاورزی، افزایش جمعیت و مصرف سوخت‌های فسیلی منجر به بالا رفتن میزان آزادسازی گاز متان شده است. به‌ویژه فعالیت‌هایی مانند استفاده از نفت و گاز طبیعی، دامداری صنعتی و دفع زباله‌های آلی در دفن گاه‌ها، منابع اصلی انتشار متان هستند.

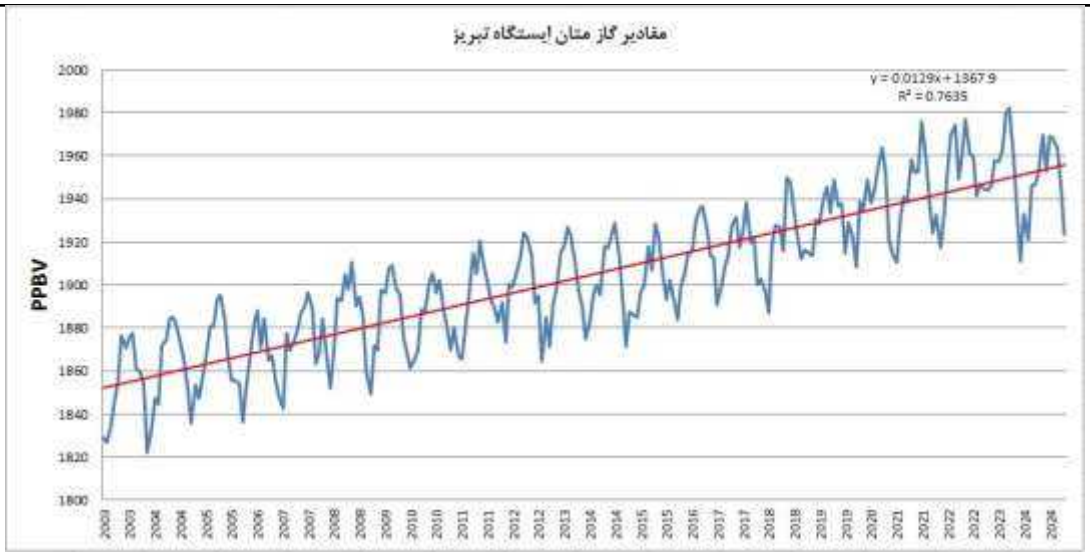
تغییرات اقلیمی: گرم‌تر شدن زمین می‌تواند باعث آزادسازی بیشتر گاز متان از منابع طبیعی مانند تالاب‌ها و سایر منابع زیستی شود.

بازخوردهای زیستی و زمین‌شناسی :شرایط گرم‌تر محیطی ممکن است فرآیندهای بیوشیمیایی و میکروبی را که تولید متان را تسریع می‌کنند، فعال‌تر کند. همچنین، برخی تغییرات زمین‌شناسی ممکن است در این بازه زمانی منجر به انتشار بیشتر این گاز شود.

پیامدهای زیست‌محیطی :افزایش مداوم گاز متان که یکی از گازهای گلخانه‌ای قوی است، می‌تواند به تسریع روند گرمایش جهانی و تغییرات اقلیمی کمک کند و اثرات منفی زیست‌محیطی گسترده‌ای به همراه داشته باشد.

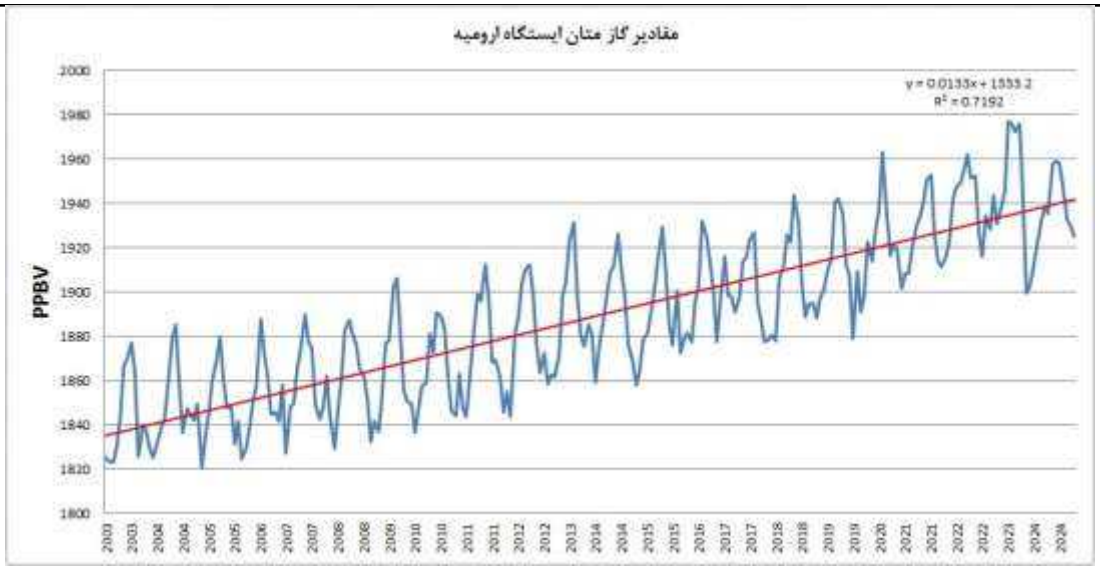
بنابراین، روند افزایشی مشاهده‌شده در نمودار، نشان‌دهنده افزایش مستمر منابع انتشار و/یا کاهش کارایی مدیریت و کنترل انتشار گاز متان طی دو دهه گذشته است و نیازمند توجه جدی در سیاست‌گذاری‌های زیست‌محیطی و اقدامات کاهش انتشار هست.

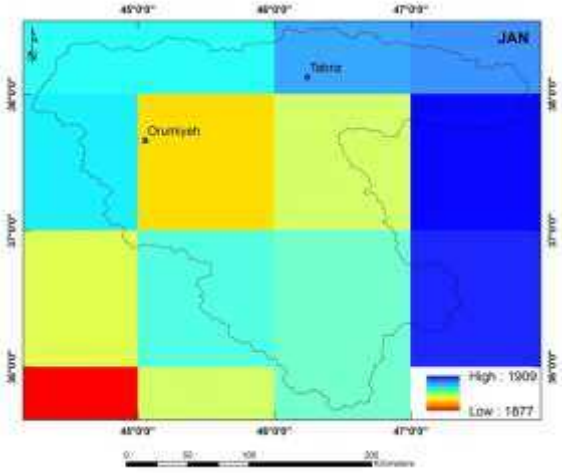
نمودار شماره (۱): مقادیر گاز متان ایستگاه تبریز دوره آماری ۲۰۲۴-۲۰۰۳

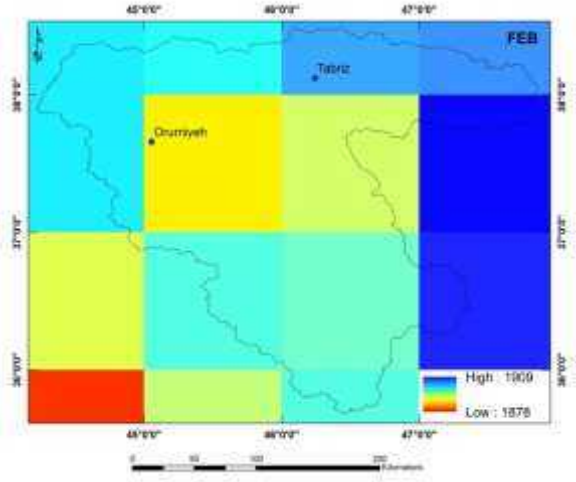


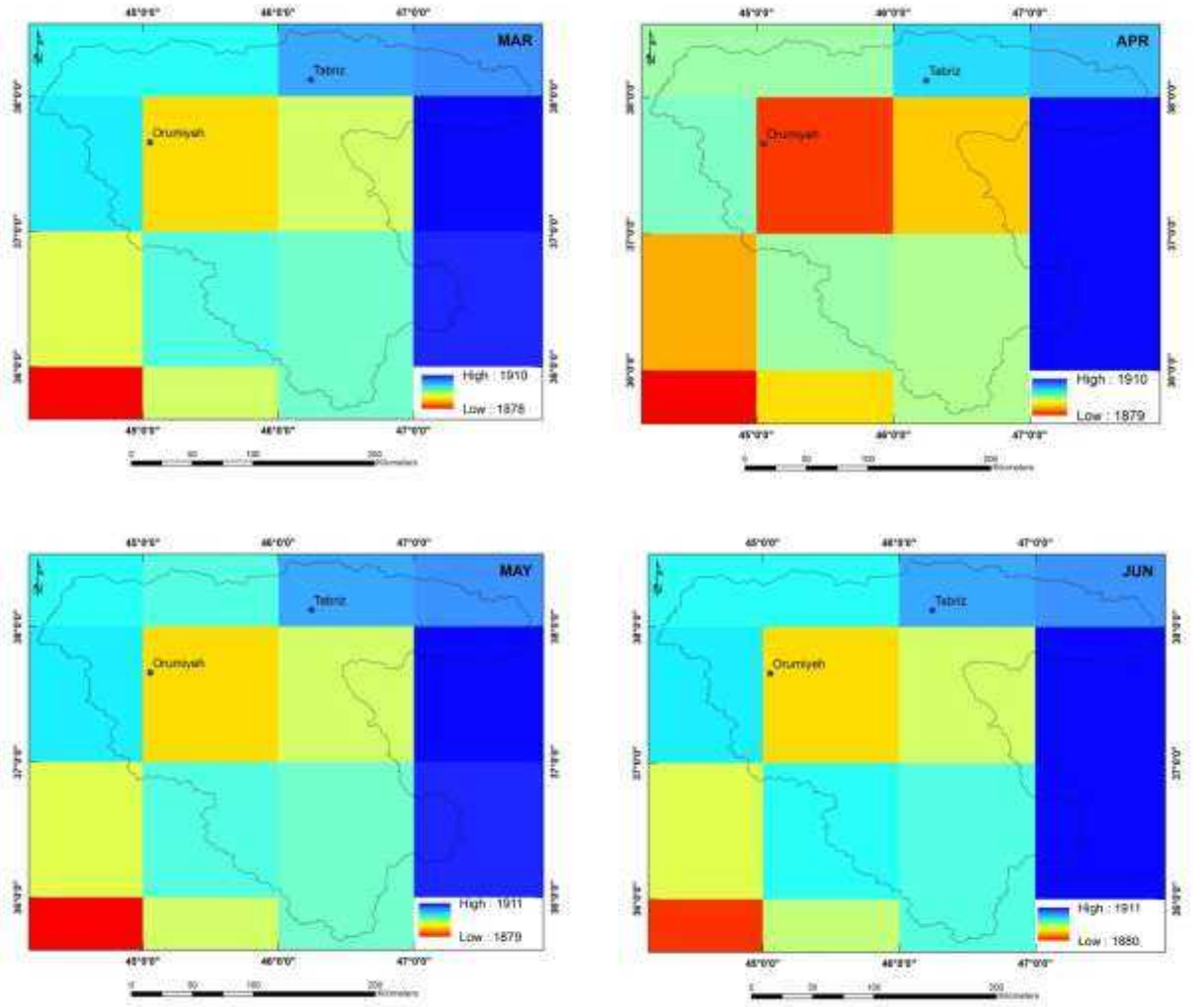
نمودار ماهانه انتشار گاز متان در ایستگاه ارومیه (نمودار شماره ۲) نشان‌دهنده یک روند کلی افزایشی در بازه زمانی موردبررسی است. کمترین مقدار انتشار متان در سال ۲۰۰۵ معادل ۱۸۲۰ واحد ثبت‌شده و این مقدار تا سال ۲۰۲۳ به ۱۹۸۰ واحد افزایش‌یافته است. این افزایش تدریجی می‌تواند ناشی از تغییرات متعددی باشد که شامل عوامل زیست‌محیطی، استفاده از منابع طبیعی، تغییر در الگوهای کشاورزی، رشد جمعیت و فعالیت‌های صنعتی منطقه است. افزایش انتشار متان در طول این سال‌ها اهمیت بالای پایش گازهای گلخانه‌ای را در منطقه به‌ویژه با توجه به تأثیرات مخرب این گاز در تغییرات اقلیمی برجسته می‌کند. همچنین، این روند می‌تواند هشداری برای تصمیم‌گیرندگان و مدیران محیط‌زیست باشد تا راهکارهای کنترل و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای را در اولویت قرار دهند. به‌طورکلی، تحلیل روند افزایشی نشان می‌دهد که بدون مداخلات مدیریتی مناسب و بهره‌گیری از فناوری‌های پاک، احتمال تشدید اثرات زیست‌محیطی وجود دارد که می‌تواند به تهدید سلامت انسانی و اکوسیستم‌های محلی منجر شود.

نمودار شماره (۲): مقادیر گاز متان ایستگاه ارومیه دوره آماری ۲۰۲۴-۲۰۰۳

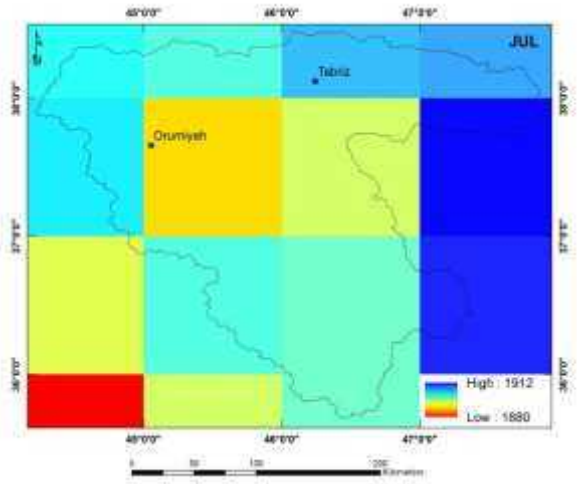

مقادیر گاز متان ایستگاه ارومیه
y = 0.0133x + 1553.2
R² = 0.7192
PPBV
2000
1980
1960
1940
1920
1900
1880
1860
1840
1820
1800
2003
2004
2005
2006
2007
2008
2009
2010
2011
2012
2013
2014
2015
2016
2017
2018
2019
2020
2021
2022
2023
2024

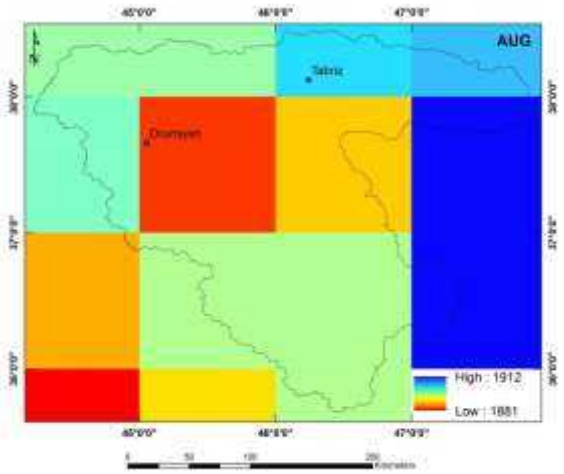

JAN
Tabriz
Orumiyeh
High : 1909
Low : 1877

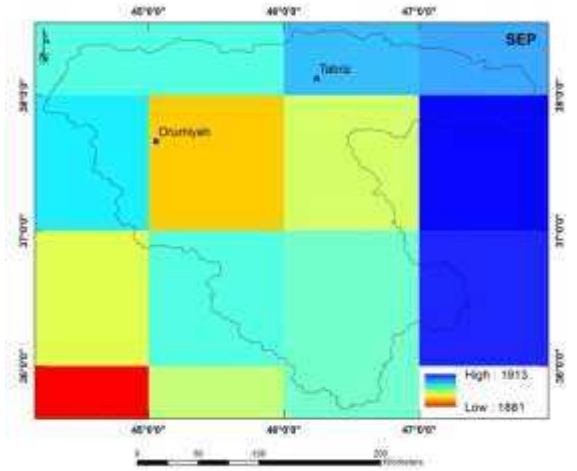

FEB
Tabriz
Orumiyeh
High : 1909
Low : 1878

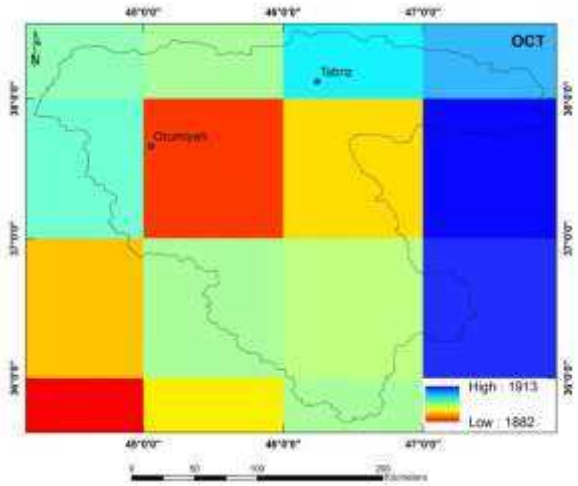


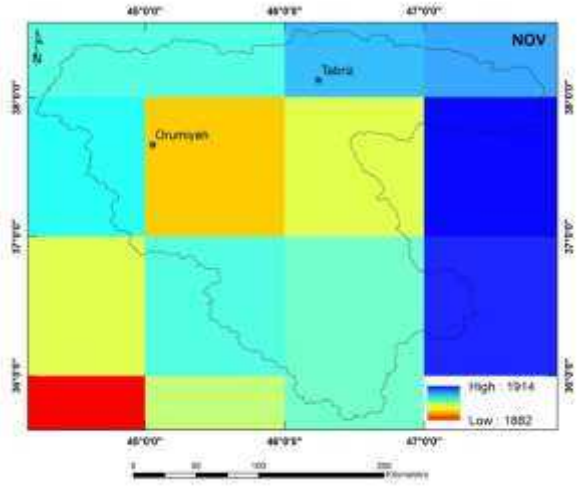
شکل شماره (۲): نقشه ماهانه مقادیر گاز متان طی دوره آماری ۲۰۲۴ -۲۰۰۳

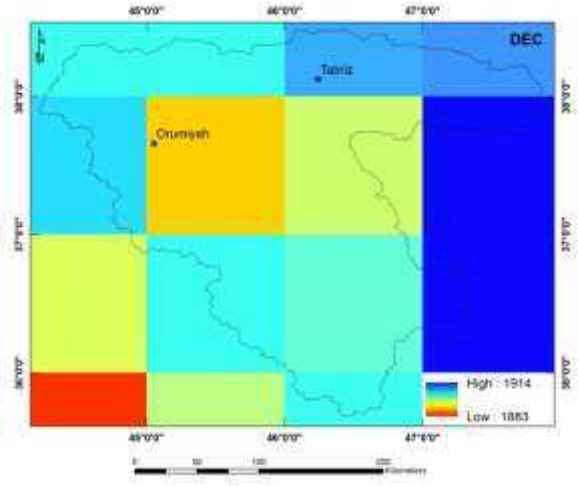

JUL
Tabriz
Orumiyeh
High : 1912
Low : 1880


AUG
Tabriz
Orumiyeh
High : 1912
Low : 1881


SEP
Tabriz
Orumiyeh
High : 1913
Low : 1881


OCT
Tabriz
Orumiyeh
High : 1913
Low : 1882


NOV
Tabriz
Orumiyeh
High : 1914
Low : 1882


DEC
Tabriz
Orumiyeh
High : 1914
Low : 1883

شکل شماره (۲): نقشه ماهانه مقادیر گاز متان طی دوره آماری ۲۰۲۴ -۲۰۰۳

نقشه‌های ماهانه (شکل شماره ۲) انتشار گاز متان ارائه‌شده، نمایانگر تغییرات فضایی و زمانی در میزان انتشار این گاز در حوضه موردمطالعه هستند. در ماه ژانویه مشاهده می‌شود که بیشترین مقدار انتشار متان برابر با ۱۹۰۹ و کمترین مقدار برابر با ۱۸۷۷ بوده است، که نشان‌دهنده وجود تفاوت مکانی قابل‌توجه در سطح حوضه است. ازنظر مکانی، بیشترین میزان انتشار در شرق حوضه مشاهده‌شده است، درحالی‌که مناطق مرکز حوضه کمترین مقادیر انتشار را به خود اختصاص داده‌اند. این توزیع فضایی می‌تواند به چندین عامل محیطی و جغرافیایی مرتبط باشد، ازجمله:

تفاوت‌های کاربری زمین یا پوشش گیاهی که بر فرایندهای تولید و انتشار متان تأثیرگذار است.

شرایط اقلیمی و دمایی متفاوت در قسمت‌های مختلف حوضه که ممکن است فعالیت‌های میکروبی تولیدکننده متان را تحت تأثیر قرار دهد.

ویژگی‌های زمین‌شناسی یا وجود منابع طبیعی مانند تالاب‌ها، باتلاق‌ها یا منابع انسانی انتشار گاز مانند مناطق کشاورزی و صنعتی.

این اختلاف مقادیر انتشار متان نشان‌دهنده عملکرد نامتوازن منابع تولید متان در داخل حوضه است و تحلیل دقیق‌تر آن می‌تواند به درک بهتر روندهای انتشار، اثرات زیست‌محیطی و مدیریت بهینه برای کاهش انتشار کمک نماید. همچنین، بررسی روند زمانی این نقشه‌ها، می‌تواند اطلاعات مهمی درباره تغییرات فصلی و اثرات عوامل اقلیمی فراهم آورد. برای ماه‌های مارس و آوریل نیز توزیع زمانی مشابهی دیده می‌شود، اما اختلاف جزئی یک ppbv در مقادیر حداقل وجود دارد که نشان‌دهنده تغییرات محلی کوچک در فعالیت منابع یا شرایط جوی است. نکته قابل‌توجه این است که در آوریل، ایستگاه ارومیه کمترین مقدار انتشار را نشان داده که می‌تواند به عوامل محلی مانند تغییرات دما، پوشش گیاهی یا الگوهای وزش باد مربوط باشد. ازنظر کلیت ماهانه، ماه‌های نوامبر و دسامبر بیشترین میزان انتشار گاز متان را به خود اختصاص داده‌اند، که این موضوع ممکن است به دلیل شرایط آب و هوایی خاص این ماه‌ها، مانند دمای پایین‌تر و استاتیک‌تر بودن جو، باشد که باعث تجمع بیشتر گاز متان در سطح شده است. در مقابل، ماه ژانویه با کمترین مقدار انتشار، شرایط خاصی را نشان می‌دهد که می‌تواند ناشی از کاهش فعالیت منابع یا تغییر در الگوهای جوی باشد. این نتایج نشان می‌دهد که انتشار گاز متان در حوضه موردمطالعه تحت تأثیر ترکیبی از عوامل جغرافیایی، منابع محلی و شرایط محیطی و اقلیمی قرار دارد و تحلیل این نقشه‌ها می‌تواند به درک بهتر روندهای انتشار و مدیریت منابع کمک نماید.

نتیجه‌گیری

نتایج تحلیل نقشه‌های ماهانه انتشار گاز متان در حوضه موردمطالعه نشان‌دهنده وجود الگوهای فضایی و زمانی معنادار است که تحت تأثیر عوامل محیطی، جغرافیایی و اقلیمی متنوع قرار دارد. تفاوت قابل‌توجه در میزان انتشار متان بین مناطق مختلف حوضه، به‌ویژه تمرکز بالای انتشار در بخش‌های شرقی و شمالی و مقادیر پایین‌تر در مرکز حوضه، بیانگر نقش مهم ویژگی‌های کاربری زمین، پوشش گیاهی و منابع طبیعی در تنظیم روندهای انتشار این گاز است. از سوی دیگر، روند افزایشی مستمر غلظت گاز متان در بازه زمانی دو دهه اخیر در ایستگاه‌های ارومیه و تبریز، نشان از افزایش تدریجی منابع انتشار و احتمالاً کاهش کارایی مدیریت‌های کنونی در کنترل این گاز دارد. این روند افزایشی متان با توجه به نقش آن به‌عنوان گازی با پتانسیل گرمایش جهانی بسیار بالا، هشداری جدی برای تشدید اثرات تغییرات اقلیمی و آسیب به اکوسیستم‌های محلی و سلامت انسانی محسوب می‌شود. بنابراین، نتایج حاصل تأکید می‌کند که پرداختن به منابع متنوع انتشار ازجمله فعالیت‌های کشاورزی، صنعتی، و تخریب زیست‌محیطی، و نیز توجه به تأثیرات اقلیمی و زیستی در تدوین سیاست‌های جامع مدیریت گاز متان ضروری است. درنهایت، پایش مداوم و به‌کارگیری فناوری‌های پاک، همراه با راهکارهای هدفمند کاهش انتشار، می‌تواند به کاهش اثرات مخرب این گاز کمک کند و نقش مهمی در کاهش روند افزایش گرمایش جهانی ایفا نماید.

منابع و مآخذ:

حجازی زاده. زهرا، پودینه. محمدرضا و طولابی نژاد. میثم (۱۳۹۶) تحلیل اثر گاز گلخانه‌ای متان بر نوسانات بارش فصلی ایران . جغرافیا (فصلنامه علمی پژوهشی و بین‌المللی انجمن جغرافیایی ایران)سال هجدهم، شماره ۶۶.

دکامی، ارشیا (۱۳۸۹)، اثر گازهای گلخانه‌ای، نشریه نفت و انرژی.

محمدی. مینا و آخوندزاده. مهدی منوچهر (۱۴۰۲) پایش و آشکارسازی گاز متان در شهر تهران در پلت فرم گوگل ارث انجین. نشریه علمی پژوهش‌های سنجش‌ازدور و اطلاعات مکانی، جلد ۱، شماره ۱، زمستان و بهار.

موسوی. سید محسن، فلاحتکار. سامره و فرج زاده منوچهر (۱۳۹۶) پایش تغییرات ماهانه و فصلی گاز متان با استفاده از داده‌های ماهواره GOSAT . پژوهش‌های جغرافیای طبیعی. دوره ۴۹. شماره ۲.

موسوی. سید محسن، فلاحتکار. سامره و فرج زاده منوچهر (۱۳۹۶) تغییرات غلظت گازهای گلخانه‌ای دی‌اکسید کربن و متان در ارتباط با متغیرهای محیطی در ایران. بوم‌شناسی کاربردی. سال ششم.

Frei, Christoph, Regina Schöll, Sophie Fukutome, Jürg Schmidli and Pier Luigi Vidalem(2005), Future change of precipitation extremes in Europ: an intercomparision of scenarios from Regional Climate models, Atmospheric and Climate Science, ETH, Zürich, Switzerlan

Guo, M.; Wang, X.F.; Li, J.; Yi, K.P.; Zhong, G.S.; Wang, H.M. and Tani, H. (2013a). Spatial distribution of greenhouse gas concentrations in arid and semi-arid regions: A case study in East Asia, Journal of Arid Environments, 91: 119-128.

Inoue, M.; Morino, I.; Uchino, O.; Miyamoto, Y.; Yoshida, Y.; Yokota, T. ... and Patra, P.K. (2013). Validation of XCO2 derived from SWIR spectra of GOSAT TANSO-FTS with aircraft measurement data, Atmospheric Chemistry and Physics, 13(19): 9771-9788.
Kirschke, S.; Bousquet, P.; Ciais, P.; Saunois, M.; Canadell, J.G.; Dlugokencky, E.J. ... and Cameron-Smith, P. (2013). Three decades of global methane sources and sinks, Nature Geoscience, 6(10): 813-823.
Sadavarte P, Pandey S, Maasakkers JD, Lorente A, Borsdorff T, Denier van der Gon H, et al. Methane emissions from superemitting coal mines in Australia quantified using TROPOMI satellite observations. Environmental Science & فنّاوری. 2021;55(24):16573-80.
Song H, Sheng M, Lei L, Guo K, Zhang S, Ji Z. Spatial and Temporal Variations of Atmospheric CH4 in Monsoon Asia Detected by Satellite Observations of GOSAT and TROPOMI. Remote Sensing. 2023;15(13):3389.
Zhang J, Han G, Mao H, Pei Z, Ma X, Jia W, et al. The spatial and temporal distribution patterns of XCH4 in China: New observations from TROPOMI. Atmosphere. 2022;13(2):177.

Monitoring changes in methane gas concentration at selected stations in the Lake Urmia basin using remote sensing data

Mohammad Reza Azizzadeh

Assistant Professor, Department of Geography, Payame Noor University, Tehran, Iran.

Corresponding author: Email (m_azizzadeh@pnu.ac.ir)

Abstract

Methane gas is one of the most important greenhouse gases that plays a key role in global climate change. This gas has a much higher global warming potential than carbon dioxide in the short term, significantly impacting the increase in Earth's temperature. Careful examination and understanding of the behavior and effects of methane in the atmosphere are essential steps in managing and mitigating climate change. The rising concentration of greenhouse gases, especially methane, is one of the main factors intensifying global climate change, causing widespread negative effects on surface temperature and weather patterns.In the present study, the spatial and temporal trends of methane emissions in the Urmia Lake basin from 2003 to 2024 were examined using AIRS satellite data. The results indicate a continuous increase in methane concentration at the Tabriz and Urmia stations, attributed to a combination of human activities such as agriculture, industry, and natural sources. Analysis of monthly emission maps revealed high methane concentrations in the eastern and northern parts of the basin, with the lowest values observed in the center. Seasonal fluctuations and the influence of climatic conditions on this trend were also observed, with the highest emission levels recorded during the cold seasons.These findings highlight the importance of continuous monitoring of greenhouse gases and the development of managerial and technological solutions to reduce methane emissions for environmental protection and climate change control.

Keywords: methane, trend, climate change, AIRS

نقش برنامه‌ریزی آب مجازی و الگوهای کشت کم‌مصرف در کاهش فشار هیدرولوژیکی حوضه بر دریاچه ارومیه در بحبوحه تغییرات اقلیمی

هادی سیاسر[۱]

۱- استادیار،دانشکده فنی ومهندسی ، دانشگاه پیام نور ،تهران، ایران

hadisiasar@pnu.ac.ir

چکیده

دریاچه ارومیه—ذخیره‌گاه زیست‌کره یونسکو و زمانی بزرگ‌ترین دریاچه آبِ شور خاورمیانه—در سه دهه‌ی اخیر با افت چشمگیر تراز آب و کاهش شدید مساحت روبه‌رو بوده است. هم‌زمان، برهم‌کنشِ تغییرات اقلیمی، توسعه‌ی کشاورزی آبی و ناکارآمدی آبیاری، فشار هیدرولوژیکی را در حوضه تشدید کرده است. با توجه به سهم بسیار بالای کشاورزی در مصرف آب و سهم نسبتاً اندک آن در تولید ناخالص داخلی، اصلاح الگوی کشت و مدیریت تقاضای آب به مثابه اهرم‌های کلیدی مطرح می‌شوند. این مرورِ روایت–نظام‌مند، ظرفیتِ دو راهبرد مکمل—برنامه‌ریزی آبِ مجازی (همسوسازی تجارت با کمیابی محلی آب) و گذار به الگوهای کشت کم‌مصرف (به‌همراه ارتقای بهره‌وری آبیاری)—را ارزیابی می‌کند. یافته‌ها نشان می‌دهد: هم‌راستاسازی سبد واردات/صادرات با ردپای آبِ محصولات، بازتنظیم سبد کشت بر مبنای بهره‌وری اقتصادی آب و اجرای سیاست‌های نهادیِ پشتیبان (حقوق آب، رهاسازی‌های زیست‌محیطی، قیمت‌گذاری حجمی) می‌تواند برداشت‌های درون‌حوضه‌ای را کاهش داده، تاب‌آوری اکولوژیک دریاچه را تقویت و معیشت کشاورزان را در مسیر پایداری حمایت کند. نقشه‌راهی مرحله‌بندی‌شده برای اجرا، پایش و ارزشیابی نیز پیشنهاد شده است.

کلید واژه‌ها: دریاچه ارومیه؛ آبِ مجازی؛ ردپای آب؛ الگوی کشت کم‌مصرف؛ بهره‌وری آب؛ حکمرانی منابع آب؛ پیوند آب–غذا–محیط.

مقدمه

دریاچه ارومیه—که زمانی بزرگ‌ترین پهنه آبِ شور خاورمیانه و یکی از ذخیره‌گاه‌های زیست‌کره یونسکو بود—در سه دهه اخیر با افت پیوسته تراز و کاهش چشمگیر مساحت مواجه شده و پهنه‌های وسیعی از بستر آن به دشت‌های نمکی بدل گردیده است؛ روندی که نشانه‌های آن به‌طور منظم در گزارش‌ها و پایش‌های میدانی ثبت شده و ماهیت یک نوسان کوتاه‌مدت طبیعی ندارد، بلکه برآیند فشارهای انسانی و اقلیمی انباشته در مقیاس حوضه است [۱, ۲, ۱۵, ۲۷]. این افول از یک‌سو تحت تأثیر تداوم خشکسالی‌های متوالی و تغییرپذیری اقلیم منطقه‌ای قرار دارد و از سوی دیگر با توسعه کشاورزی آبی، سدسازی در زیرحوضه‌ها، ناکارآمدی شیوه‌های آبیاری و سازوکارهای قیمتیِ ناتوان از مهار تقاضا تشدید شده است [۲–۴, ۱۶, ۲۰]. پیامدهای بحران صرفاً به کمیت آب محدود نمی‌شود؛ افزایش شوری و دگرگونی زیستگاه‌ها، به‌ویژه برای پرندگان مهاجر، و شکل‌گیری طوفان‌های گردوغبار نمکی از بستر خشک‌شده، کیفیت محیط‌زیست و سلامت عمومی جوامع پیرامونی را به‌طور معنادار تحت تأثیر قرار داده است.[1, 2, 25]

در پسِ این روند، یک نابرابری ساختاریِ شناخته‌شده میان الگوی مصرف آب و بازده اقتصادی نیز مشاهده می‌شود: کشاورزی با وجود سهم اندک در تولید ناخالص داخلی، اصلی‌ترین مصرف‌کننده منابع آب کشور است و همین ناهم‌ترازی، ضرورت گذار از پاسخ‌های صرفاً عرضه‌محور به اصلاحات تقاضامحور را برجسته می‌سازد [۳, ۴]. ادبیات علمی و سیاستی در چنین بستری دو اهرم مکمل را پیشنهاد می‌کند: نخست، راهبرد آبِ مجازی که با همسوسازی الگوی تجارت با کمیابی محلی آب و توجه به ردپای آبِ کالاها، بخشی از فشار برداشت درون‌حوضه‌ای را از طریق واردات هدفمند محصولات آب‌بر می‌کاهد [۵, ۷–۱۱, ۲۶, ۲۹]؛ و دوم، گذار به الگوی کشت کم‌مصرف که با بازتنظیم سبد محصولات به سوی گونه‌های کم‌نیاز آب و دارای بهره‌وری اقتصادی آب بالاتر، در کنار ارتقای فناوری‌های آبیاری و مدیریت مزرعه، به کاهش مؤثر تقاضای کشاورزی می‌انجامد [۳, ۵, ۱۲–۱۴, ۲۱]. چارچوب تحلیلی پیوند آب–انرژی–غذا–محیط (WEFE) در این میان اهمیت دارد؛ زیرا امکان می‌دهد آثار جانبی سیاست‌ها در سایر بخش‌ها شناسایی و از انتقال ناخواسته ریسک جلوگیری شود.[19, 21]

شواهد سناریونگار و مدل‌سازی نشان می‌دهد ترکیبِ هوشمندانه این دو اهرم—کاهش تقاضای مزرعه‌ای از مسیر اصلاح الگوی کشت و ارتقای کارایی آبیاری، همراه با جابه‌جایی بخشی از تولید آب‌بر به خارج از حوضه از مسیر آبِ مجازی—می‌تواند به کاهش معنادار برداشت‌ها در مقیاس حوضه و تقویت کارایی رهاسازی‌های زیست‌محیطی از سدها منجرشود [۵, ۱۴, ۲۱, ۲۷]. با این همه، پایداری نتایج در گرو پیش‌نیازهای نهادی و حکمرانی است: روشن‌سازی حقوق آب و سهم زیست‌محیطی دریاچه، استقرار قیمت‌گذاری حجمی/پلکانی برای آب کشاورزی، مدیریت برداشت‌های آب زیرزمینی، و مشارکت واقعی جوامع محلی در طراحی و اجرای سیاست‌ها؛ اموری که نیازمند هماهنگی بین‌بخشی میان نهادهای مسئول و سازوکارهای پاسخ‌گو و یادگیرنده در طول زمان است [۲, ۲۰, ۲۲, ۲۳]. این مقاله مروری بر همین مبنا، با اتکاء به شواهد موجود، ظرفیت‌ها و قیود هر دو اهرم را در حوضه دریاچه ارومیه واکاوی می‌کند و نقشه راهی برای اجرا و پایش پیشنهاد می‌دهد.

۲. چارچوب مفهومی

چارچوب مفهومی این پژوهش بر چهار « رویکردِ مکمل » استوار است: (۱) حسابداری جریان‌های آبِ مجازی به‌عنوان آب نهفته در زنجیره تولید–تجارت کالاها و خدمات؛ (۲) سنجش فشار و کارایی از رهگذر ردپای آب (Water Footprint, WF) و مؤلفه‌های آن؛ (۳) بازتنظیم الگوی کشت کم‌مصرف بر پایه بهره‌وری فیزیکی و بهره‌وری اقتصادی آب(EWP) ؛ و (۴) حکمرانیِ یکپارچه در قالب پیوند آب–انرژی–غذا–محیط (WEFE Nexus) برای پیشگیری از جابه‌جایی ناخواسته ریسک میان بخش‌ها و مقیاس‌ها. در این چارچوب، آبِ مجازی با کمی‌سازی آب «مستقیم/غیرمستقیمِ» مصرف‌شده در تولید هر واحد کالا، امکان همسوسازی هوشمندانه تجارت با کمیابی محلی آب را فراهم می‌کند—به‌ویژه از طریق واردات هدفمند کالاهای آب‌بر از مناطق پُرآب و پرهیز از تولید داخلیِ پرهزینه آبی .[7–11, 26, 29] ردپای آب، با تفکیک به سه مؤلفه آبی (برداشت از منابع سطحی و زیرزمینی)، سبز (بارشِ مؤثرِ ذخیره‌شده در خاک) و خاکستری (حجم آبِ لازم برای رقیق‌سازی آلاینده‌ها تا آستانه استاندارد)، تصویری کمّی از شدتِ مصرف و آلودگیِ ناشی از تولید در مقیاس‌های مزرعه، حوضه و ملی ارائه می‌کند و مبنایی برای مقایسه مکانی/بخشی و پایشِ روندها در گذر زمان فراهم می‌آورد. [۸, ۲۶]. در امتداد این سنجش، الگوی کشت کم‌مصرف به‌معنای انتخاب و چینش محصولاتی است که نیاز آبیِ کمتری دارند و در عین حال ارزش‌افزوده بیشتری به ازای هر واحد آب ایجاد می‌کنند؛ این رویکرد با ارتقای فناوری‌های آبیاری (قطره‌ای/بارانی)، مدیریت تبخیر–تعرق (مالچ، سایه‌انداز، بادشکن)، بهینه‌سازی تقویم کاشت و بهبود سلامت خاک هم‌افزا می‌شود [۳, ۱۲–۱۴, ۲۱]. در سطح سیاست، اتخاذ چارچوب WEFEکمک می‌کند تا اثرات متقابل سیاست‌های آب بر امنیت غذایی، نیاز انرژی (مثلاً پمپاژ/نمک‌زدایی) و وضعیت اکولوژیک شناسایی و بسته‌های سیاستیِ هم‌راستا طراحی شود؛ برای نمونه، تغییر الگوی کشت بدون اصلاح قیمت‌گذاری و حقوق آب می‌تواند به «اثر بازگشتی» مصرف بینجامد.[19, 21]

از دیدگاه عملیاتی، چهار اصل بر تصمیم‌سازی حاکم است :(الف) کفایت آبی :برآورد دقیق نیاز آبی خالص محصولات (ETc) و تلفات زنجیره؛ (ب) کارایی و بهره‌وری :تفکیک بهره‌وری فیزیکی (kg/m^3) از بهره‌وری اقتصادی آب (واحد ارزش/مترمکعب) برای انتخاب محصول؛ (ج) برون‌دادِ زیست‌محیطی :کنترل مؤلفه خاکستریِ WF از طریق کاهش نهاده‌های آلاینده؛ (د) سازگاری نهادی–بازاری :هم‌ترازی با قیمت آب/برق، رهاسازی‌های زیست‌محیطی، حقوق آب، و ابزارهای جبرانی برای معیشت. بدیهی است که اعتبار سنجش‌ها تابع «مرزبندی سامانه» (زمان/مکان)، کیفیت داده‌های هواشناسی–خاک–محصول و فروض مدل‌سازی است؛ بنابراین، تحلیل حساسیت و گزارش عدم‌قطعیت جزء جدایی‌ناپذیر این چارچوب‌اند [8, 21].

جدول ۱. واژگان کلیدی و کاربرد سیاستی/مدیریتی

اصطلاح	تعریف فشرده	واحد/نمایه سنجش	منابع داده متداول	کاربرد سیاستی/مدیریتی

راهنمای واردات/صادرات در مناطق کم‌آب؛ طراحی تعرفه/تعهدات تجارت[7–11, 26, 29]	تراز آب مزرعه–صنعت، داده‌های نهاده–ستانده	مترمکعب به‌ازای هر واحد (محصول)	آب مستقیم/غیرمستقیم مصرف‌شده در طول زنجیره تولید یک کالا/خدمت	آبِ مجازی
ارزیابی وابستگی/تاب‌آوری آبی ملی–حوضه‌ای[26, 29]	آمار تجارت کالا × ضرایب آبِ مجازی	مترمکعب در سال	وارداتِ آب مجازی − صادراتِ آب مجازی	تراز آبِ مجازی خالص
رتبه‌بندی محصولات/نقاط داغ؛ پایش فشار هیدرولوژیک[8, 26]	هواشناسی، خاک، کیفیت آب، کود/سم	مترمکعب به‌ازای هر هکتار	مجموع مؤلفه‌های آبی/سبز/خاکستری مرتبط با تولید/مصرف	ردپای آب کل (WF)
سقف‌گذاری برداشت؛ برنامه رهاسازی زیست‌محیطی[8]	دبی برداشت، ETcخالص	m^3	برداشت از منابع سطحی/زیرزمینی	WFآبی (Blue)
تطبیق تقویم کاشت/ژنوتیپ با بارش[8]	بارش، Kc، خاک	m^3	بارش مؤثر ذخیره‌شده در خاک	WFسبز (Green)
سیاست‌های کاهش نهاده و پایش کیفیت آب[8]	بار آلودگی، استاندارد کیفیت	m^3	آب لازم برای رقیق‌سازی آلاینده تا حد استاندارد	WFخاکستری (Grey)
معیار مهندسی کارایی آبیاری[21]	آمار عملکرد، ETc	kg/m^3	محصول/آب مصرفی	بهره‌وری فیزیکی آب
مبنای یارانه مشروط، انتخاب محصول/قرارداد خرید[10, 14]	قیمت/هزینه، عملکرد، آب	هزینه به‌ازای هر مترمکعب	ارزش افزوده/آب مصرفی	EWP (بهره‌وری اقتصادی آب)
کاهش تقاضای آبی؛ حفظ درآمد مزرعه[3, 12–14]	ماتریس ریسک بازار×ETc×EWP	—	چینش سبد محصول با نیاز آبی کمتر و EWP بالاتر	الگوی کشت کم‌مصرف
طراحی بسته سیاستی بدون اثرات جانبی منفی[19, 21]	مدل‌های تلفیقی	—	یکپارچه‌سازی پیامدهای آب–انرژی–غذا–محیط	پیوندWEFE

۳. روش‌شناسی مرور (Methodology)

این پژوهش به‌صورت یک مرور روایت–نظام‌مند طراحی شد تا شواهد علمی و سیاستی درباره نقش «آبِ مجازی» و «الگوی کشت کم‌مصرف» در کاهش فشار هیدرولوژیکی حوضه دریاچه ارومیه را گردآوری، ارزیابی و سنتز کند. تمرکز جغرافیایی بر حوضه ارومیه و تمرکز موضوعی بر راهبردهای مدیریت تقاضای آب در کشاورزی بود. سه پرسش محوری هدایت‌کننده مرور عبارت بودند از: (۱) آبِ مجازی و تنظیم تجارت چگونه می‌توانند برداشت‌های درون‌حوضه‌ای را کاهش دهند؟ (۲) کدام اصلاحات الگوی کشت و فناوری‌های آبیاری بیشترین صرفه‌جویی را ایجاد می‌کنند؟ (۳) چه پیش‌نیازهای نهادی–اقتصادی برای موفقیت این راهبردها ضروری است؟ برای پاسخ، جست‌وجوی نظام‌مند منابع در Google Scholar، Scopus و Web of Science انجام شد و گزارش‌های سازمانی معتبر (FAO، UNDPو اسناد ملی/حوضه‌ای) نیز بررسی گردید. ترکیب کلیدواژه‌های فارسی/انگلیسی شامل Lake Urmia/Urmia Lake، virtual water/water footprint، cropping

pattern/low-water-use crops، irrigation efficiency، policy/governance/restorationو Iran بود و وجستجو در منابع گردید. معیار ورود شامل ارتباط مستقیم با یکی از محورهای سه‌گانه، ارائه روش روشن (مدل‌سازی/سناریوسازی/تجربی/تحلیل سیاستی) و گزارش شاخص‌های مرتبط مانند ردپای آب(WF) ، بهره‌وری اقتصادی آب (EWP) و کارایی/راندمان آبیاری بود؛ اقلام فاقد روش یا فاقد ارتباط کافی کنار گذاشته شدند.

فرایند پالایش بدین‌صورت بود که عناوین و چکیده‌ها غربال و سپس متون کاملِ مشمول، به‌صورت مستقل بررسی شدند و اختلاف نظرها با اجماع رفع گردید. استخراج داده‌ها با فرم استاندارد شامل مکان و مقیاس مطالعه، روش/ابزار، شاخص‌های کلیدی، نوع مداخله، یافته‌های اصلی و محدودیت‌ها انجام شد. ارزیابی کیفیت، با تکیه بر چک‌لیست‌های متناسب (CASP/JBI)، شفافیت سؤال و روش، کفایت و منبع داده، روایی درونی/بیرونی، تناسب شاخص‌ها (WF، EWP، کارایی آبیاری)، کالیبراسیون/اعتبارسنجی مدل‌ها، تحلیل حساسیت و گزارش عدم‌قطعیت را مدنظر قرار داد و رتبه کیفی کلی (بالا/متوسط/پایین) در سنتز لحاظ شد. با توجه به ناهمگونی روش‌ها و مقیاس‌ها، سنتز شواهد به‌صورت روایی–تحلیلی انجام گرفت؛ ابتدا نقشه شواهد و جهت کلی اثر مداخلات بر برداشت‌های آبی و فشار هیدرولوژیک ترسیم شد و هرجا امکان داشت، دامنه اثر به‌صورت توصیفی (کم/متوسط/زیاد) بر پایه کیفیت مطالعه گزارش گردید، بی‌آن‌که فراتحلیل کمّی انجام شود.

برای شفاف‌سازی محدودیت‌ها، سه منبع اصلی تورش مورد توجه قرار گرفت: احتمال تورش انتشار به نفع موارد موفق، کمبود داده‌های خردِ مزرعه‌ای و اتکا به فروض مدل‌ها، و نااطمینانی اقلیمی/هیدرولوژیک و حساسیت نتایج به سناریوها [۲۰, ۲۱, ۲۷]. برای کاهش اثر این موارد، از چند منبع داده استفاده شد، فروض و مرز سامانه به‌روشنی گزارش گردید و عدم‌قطعیت‌ها صریحاً در تفسیر نتایج بازتاب یافت.

۴. روندها و شواهد تجربی

پایش‌های میدانی و گزارش‌های مستند از دهه‌های اخیر به‌روشنی نشان می‌دهد که تراز دریاچه ارومیه به‌صورت ممتد کاهش یافته، شوری آب افزایش پیدا کرده و پهنه‌های نمکیِ بستر گسترش یافته‌اند؛ مجموعه‌ای از نشانه‌هایی که بر شدت‌گرفتن فشار هیدرولوژیک در مقیاس حوضه دلالت دارد [۱, ۲, ۱۵, ۲۷]. ریشه‌های اصلی این وضعیت را باید در برهم‌نهیِ عوامل انسانی و اقلیمی جست: توسعه کشاورزی آبی و سدسازی در زیرحوضه‌ها، در کنار سازوکارهای قیمت‌گذاری ناکارا که سیگنال اصلاحی کافی برای مهار مصرف ارسال نمی‌کنند، چرخه برداشت‌های بیش از توان را پایدار کرده‌اند [۲–۴, ۱۶, ۲۰]. پیامدهای این روند صرفاً هیدرولوژیک نیست؛ دگرگونی زیستگاه‌ها و افت کیفیت زیستی برای پرندگان مهاجر از یک‌سو، و خیزش‌های گردوغبار نمکی و پیامدهای مرتبط با سلامت عمومی جوامع پیرامونی از سوی دیگر، ابعاد اکولوژیک و اجتماعی بحران را برجسته می‌کند.[1, 2, 25]

در پاسخ به این روندها، بدنه پژوهشیِ رو به رشدی نشان داده است که ترکیب سیاست‌های مدیریت تقاضا و تنظیم رژیم‌های رهاسازی می‌تواند اثر قابل‌ملاحظه‌ای بر تعدیل فشارها داشته باشد. مطالعات علّی و سناریونگار بر این نکته تأکید می‌کنند که کاهش برداشت‌های مزرعه‌ای از مسیر اصلاح الگوی کشت و ارتقای کارایی آبیاری، زمانی بیشترین کارایی را دارد که با رهاسازی‌های زیست‌محیطیِ هدفمند از سدها همراه شود؛ هرچند کالیبراسیون محلیِ مدل‌ها برای اطمینان از اعتبار نتایج ضروری است [۵]. در همین راستا، پژوهش‌های بهینه‌سازی مبتنی بر مفهوم آبِ مجازی نشان داده‌اند که بازتنظیم سبد محصولات به‌سوی گزینه‌های کم‌مصرف آب می‌تواند هم بهره‌وری آبیاری را به‌طور محسوس بهبود دهد و هم مصرف کل را کاهش دهد؛ با این ملاحظه مهم که اندازه اثر به قیمت‌های نسبی، ساختار بازار و ریسک‌های معاملاتی حساس است و بدون سیاست‌های پشتیبان ممکن است پایداری خود را از دست بدهد [۱۴]. فراتر از مطالعات موردی، چارچوب‌های ارزیابیِ راهبردهای صرفه‌جویی—که ابزارهای مزرعه‌ای، حوضه‌ای و ملی را به‌صورت منسجم نقشه‌برداری می‌کنند—به سیاست‌گذاران کمک می‌کند بسته‌هایی طراحی کنند که از «اثر بازگشتیِ مصرف» جلوگیری کرده و هم‌افزایی میان ابزارها را افزایش دهند [۲۱]. نهایتاً، پژوهش‌های سیاست و حکمرانی هشدار می‌دهند که حتی بهترین طرح‌های فنی، در غیاب سازوکارهای نهادیِ روشن (حقوق آب، قیمت‌گذاری حجمی/پلکانی، نظارت بر برداشت‌های زیرزمینی) و مشارکت معنادار جامعه محلی، با خطر اجراهای ناقص و بازدهی پایین مواجه‌اند؛ ازاین‌رو کیفیت حکمرانی و هم‌ترازی بین‌بخشی شرط لازم موفقیت به‌شمار می‌آید.[20, 22, 23]

۵ .برنامه‌ریزی آبِ مجازی(Virtual Water Planning)

برنامه‌ریزی آبِ مجازی به‌مثابه یک رویکرد مدیریتِ تقاضای آب، بر همسوسازی جغرافیای تولید با جغرافیای کمیابی آب تکیه دارد؛ بدین معنا که با تنظیم هوشمندانه سبد تجارت—افزایش وارداتِ هدفمندِ کالاهای آب‌بر از مناطق پُرآب و پرهیز از تولید داخلیِ پرهزینه آبی—فشار بر منابع محدودِ محلی کاهش می‌یابد و ظرفیت زیست‌محیطی حوضه برای احیا افزایش پیدا می‌کند [۷–۱۱, ۲۶, ۲۹]. مبنای این تنظیم، حسابداری آبِ مجازی و سنجش ردپای آب (WF) در کنار سنجه‌های اقتصادی است تا اطمینان حاصل شود که جابه‌جایی مکانیِ تولید، واقعاً به کاهش برداشت‌های آبی درون‌حوضه‌ای منجر می‌شود و صرفاً انتقال مشکل به مقیاس یا بخش دیگر نیست.[7–11, 26]

در سطح عملیاتی، اولویت‌بندی محصول برای واردات/تولید باید بر دو شاخص مکمل استوار باشد: نخست، سنجش شدتِ ردپای آب ـ با تأکید بر مؤلفه آبِ آبی (Blue WF)ـ به‌منظور برآورد فشار هیدرولوژیک بالقوه انجام می‌شود. این سنجه میزان اتکای مصرف به منابع آب سطحی و زیرزمینی را بازنمایی کرده و زمینه مقایسه مکانی–زمانی فشار وارده بر سامانه‌های آبی را فراهم می‌کند. دوم، بهره‌وری اقتصادی آب (EWP) به‌عنوان نسبت ارزش افزوده به واحد آب مصرفی که معیار کارایی اقتصادیِ تخصیص آب میان محصولات است [۱۰]. تلفیق این دو، امکان می‌دهد تا محصولاتِ «پرآب–کم‌ارزش» در الگوی تجارت به سمت واردات سوق داده شوند و محصولات «کم‌آب–باارزش» محور تولید داخلی قرار گیرند؛ هم‌زمان، سیاست‌های

مکملِ آبیاری کارا و اصلاح الگوی کشت در مزرعه از «اثر بازگشتیِ مصرف» جلوگیری می‌کند و صرفه‌جوییِ تجارت‌محور را تثبیت می‌سازد[26, 29] .

پیاده‌سازی موفق این راهبرد، نیازمند ابزارهای سیاستی هم‌راستا است: از یک‌سو، تعرفه‌ها و استانداردهای وارداتیِ هدفمند برای کالاهای آب‌بر، قراردادهای خرید تضمینی جهت اطمینان‌بخشی به تأمین داخلیِ محصولات کم‌مصرف آب، و نظام گزارش‌گریِ ردپای آب برای شفافیت زنجیره تأمین؛ و از سوی دیگر، اصلاحات نهادی در حکمرانی آب شامل تعیین سهم زیست‌محیطی دریاچه، قیمت‌گذاری حجمی/پلکانی آب کشاورزی و نظارت بر برداشت‌های زیرزمینی تا منفعتِ تجارتِ آبِ مجازی در سطح مزرعه نیز به کاهش واقعی برداشت ترجمه شود [۷–۱۱, ۲۶, ۲۹]. هم‌زمان، باید پیامدهای معیشتی و ریسک‌های قیمتی مدیریت شود؛ زیرا انتقال تولیدِ برخی اقلام به بیرون از حوضه می‌تواند درآمد کشاورزانِ وابسته به آن محصولات را متأثر کند. این ریسک‌ها با بسته‌های جبرانی و تنوع‌بخشی معیشت (یارانه‌های مشروط به عملکرد آبی، آموزش و ترویج تغییر کشت، تسهیلات سرمایه‌گذاری برای تبدیل به محصولات کم‌مصرف آب(و نیز ابزارهای پوشش نوسانات قیمت در بازارهای کالایی قابل مهار است[7] .

در نهایت، اثربخشی برنامه‌ریزی آبِ مجازی باید به‌صورت مستمر پایش و ارزیابی شود: سنجش تراز خالص آبِ مجازی (تفاضل واردات و صادرات برحسبWF)، رصدِ روند برداشت‌های درون‌حوضه‌ای و EWPسبد تولید، و تطبیق آن با تغییرات اقلیمی و بازارهای جهانی. تنها در چنین چارچوبی است که آبِ مجازی از یک مفهوم حسابداری صرف، به اهرم سیاستیِ قابل اتکا برای احیای هیدرولوژیک حوضه تبدیل می‌شود[26, 29] .

۶. الگوهای کشت کم‌مصرف و ارتقای آبیاری

با توجه به سهم بسیار بالای کشاورزی در برداشت آب و سهم پایین آن در تولید ناخالص داخلی، اصلاح الگوی کشت و ارتقای آبیاری اهرم‌های محوریِ مدیریت تقاضا در حوضه‌اند [۳, ۴]. شواهد منطقه‌ای نشان می‌دهد ترکیبِ جابه‌جایی سبد کشت به سوی محصولات کم‌نیاز آب همراه با کاربست سامانه‌های آبیاری کاراتر (قطره‌ای/بارانی) و بهینه‌سازی‌های زراعی (کاهش تبخیر، تقویم کاشت، بهبود خاک) می‌تواند به بهبود معنی‌دار کارایی و کاهش محسوس مصرف بینجامد [۱۲–۱۴, ۲۱]. در مطالعات بهینه‌سازی مبتنی بر آبِ مجازیِ حوضه نیز، ارتقای بهره‌وری آبیاری و کاهش مصرف کل گزارش شده است [۱۴]؛ بااین‌حال اندازه اثر به قیمت‌های نسبی و ساختار بازار و مهم‌تر از همه به پذیرش کشاورزان حساس است و بدون سیاست‌های پشتیبان، پایداری نتایج تهدید می‌شود [۲۱]. بنابراین، بسته اجرایی باید شامل حمایت‌های هدفمند و مشروط به عملکرد برای محصولات کم‌مصرف آب، تسهیلات نوسازی آبیاری و ترویج مزرعه‌محور باشد و هم‌زمان با قیمت‌گذاری حجمی/پلکانی آب و کنترل برداشت‌های زیرزمینی از «اثر بازگشتی مصرف» جلوگیری کند[3, 21] .

۷. سیاست‌ها و حکمرانی

پایه‌های اصلاحِ تقاضای آب در حوضه ارومیه مستلزم چارچوب نهادی شفاف و اجراپذیر است :تعیین و تضمین حقوق آب (از جمله سهم زیست‌محیطی دریاچه)، رهاسازی‌های زیست‌محیطیِ متناسب از سدها، قیمت‌گذاری حجمی/پلکانی آب کشاورزی برای ارسال سیگنال صرفه‌جویی، و کنترل مؤثر برداشت از چاه‌های عمیق و نیمه‌عمیق به‌کمک پایش و اعمال قانون[2, 3, 8, 20–23] .برنامه احیای دریاچه ارومیه (ULRP) زمانی می‌تواند اهداف محیط‌زیستی را با توسعه اجتماعی–اقتصادی هم‌راستا کند که هماهنگی بین‌بخشی میان وزارت نیرو، جهاد کشاورزی و سازمان حفاظت محیط‌زیست نهادینه شود و مشارکت معنادار جامعه محلی—از طریق شوراهای آب، تشکل‌های کشاورزی و مزرعه‌های نمایشی—در تصمیم‌سازی و اجرا تضمین گردد [۱۷, ۲۰, ۲۲, ۲۳]. در بُعد اجرایی، بسته سیاستی باید هم‌زمان سه محور را پوشش دهد: تنظیم رژیم‌های رهاسازی سدها و پایش آن بر حسب دبی/حجم رهاسازی، اصلاح قیمت آب و سنجش پیامد آن بر بهره‌وری آب مزرعه، و سامان‌دهی بازارهای محلی آب/تبادلات در کنار کنترل برداشت سرانه .مکمل این اقدامات، سیاست تجارتِ آبِ مجازی (واردات هدفمندِ کالاهای آب‌بر) با رصد پیوسته WFوارداتی و نیز یارانه‌های مشروط به عملکرد برای تجهیز سامانه‌های آبیاری کارا و افزایش درصد اراضی نوسازی‌شده است تا از «اثر بازگشتی مصرف» پیشگیری شود و صرفه‌جویی‌ها به کاهش واقعی برداشت درون‌حوضه‌ای ترجمه گردد[2, 3, 8, 20–23] .

۸. موانع پذیرش و پیشران‌ها

پذیرش راهبردهای تقاضامحور در حوضه ارومیه با مجموعه‌ای از قیود درهم‌تنیده مواجه است: در بُعد اقتصادی، سیگنال قیمتیِ ضعیفِ آب، انگیزه سرمایه‌گذاری در کارایی و نوسازی آبیاری را تضعیف می‌کند و بازگشت سرمایه پروژه‌های کارآمدسازی را نامطمئن می‌سازد [۳, ۲۳]. از منظر اجتماعی–فرهنگی، وابستگی معیشتی خانوارهای کشاورز به محصولات دیرینه و ترجیحات تاریخیِ الگوی کشت، هزینه تغییر را بالا برده و ریسک‌گریزی رفتاری را تشدید می‌کند [۱۸, ۲]. در سطح نهادی–بین‌بخشی، تکثر متولیان و هزینه‌های هماهنگی میان دستگاه‌ها و ذی‌نفعان، اجرای هم‌زمان چندین بسته سیاستی با افزایش پیچیدگی‌های هماهنگی، فرایند را دشوار و پرهزینه می‌سازد [۲, ۲۰]. افزون بر این، بُعد روان‌شناختی بحران—شامل فرسودگی اجتماعی و بی‌اعتمادی حاصل از طولانی شدن وضعیت و وعده‌های نافرجام—تمایل به مشارکت در برنامه‌های اصلاحی را کاهش می‌دهد[25] .

برای غلبه بر این موانع، باید پیشران‌های اجراییِ همسو فعال شوند: استفاده از یارانه‌های مشروط به عملکرد که پرداخت آن‌ها به بهبود شاخص‌هایی مانند بهره‌وری اقتصادی آب (EWP) و کاهش ردپای آب (WF) گره می‌خورد، انگیزه تغییر را در مزرعه واقعی می‌کند؛ خرید تضمینی محصولات کم‌مصرف آب ریسکِ قیمتیِ تغییر کشت را کاهش می‌دهد؛ بهره‌گیری از تلنگرهای رفتاری مانند گزارش‌های دوره‌ای کارایی آب به کشاورزان، با کاهش اصطکاک‌های تصمیم‌گیری، به نهادینه‌شدن تغییرات آرام و پایا در مدیریت آب کمک می‌کند؛ و آموزش و مزرعه‌های نمایشی با انتقال تجربه عملی، هزینه‌های یادگیری و خطا را پایین می‌آورد. این اقدامات وقتی بیشترین اثر را دارند که در قالب برنامه‌های ترویج مشارکتی و با پشتوانه نهادیِ پایدار پیاده شوند[18, 21–23] .

۹. نقشه‌راه اجرایی (پیشنهادی)

در افق کوتاه‌مدتِ ۱ تا ۲ سال، تمرکز بر اقدامات پایه‌ای و سریع‌الاثر است: تعیین و تضمین «سهم زیست‌محیطی» دریاچه در رژیم بهره‌برداری سدها، اجرای پایلوت «قیمت‌گذاری حجمی/پلکانی» آب کشاورزی در چند دشت منتخب، آغاز «واردات هدفمند» برای چند قلم کالای شدیداً آب‌بر به‌منظور کاهش فوری فشار برداشت درون‌حوضه‌ای، و تجهیز ۱۰ تا ۲۰ درصد از اراضی به سامانه‌های آبیاری کارا همراه با ترویج و آموزش مزرعه‌محور است . دستاورد مورد انتظار این مرحله، کاهش برداشت پایه و بهبود مشهود «بهره‌وری اقتصادی آب(EWP) » است. در افق میان‌مدتِ ۳ تا ۵ سال، برنامه با «تعمیم بازارهای محلی آب» و سازوکارهای تبادل، «بازتنظیم نظام‌مند سبد کشت» در دشت‌های اولویت‌دار بر مبنای ردپای آب و EWP، و گسترش پوشش آبیاری کارا و مدیریت مزرعه (تقویم کاشت، کاهش تبخیر، بهبود خاک) دنبال می‌شود تا کاهش معنادار «فشار هیدرولوژیک» در مقیاس حوضه تحقق یابد. نهایتاً در افق بلندمدتِ ۵ سال به بعد، محور کار «حکمرانی تطبیقی» است: پایش و بازتنظیم مستمر سیاست‌ها بر پایه داده‌های سنجش‌ازدور و میدانی، همسوسازی دائمی تجارت و الگوی کشت با چشم‌انداز اقلیمی و بازار، تثبیت حقوق آب و رهاسازی‌های زیست‌محیطی، و نهادینه‌کردن مشارکت جامعه محلی؛ تا پایداری تراز آب و حفظ «خدمات اکوسیستمی» دریاچه به‌صورت پایدار تضمین شود.

۱۰. پایش و ارزیابی

چارچوب پایش باید بر ترکیب مشاهدات میدانی و سنجش‌ازدور استوار باشد تا هم روند تغییرات کاربری اراضی و سطح زیر کشت و هم الگوی مصرف/برداشت آب در مقیاس حوضه با دقت و تداوم رصد شود. در بعد فضایی، استفاده دوره‌ای از داده‌های ماهواره‌ای (مانند سری‌های لندست) برای استخراج شاخص‌های پوشش/فنولوژی محصول، تبخیر–تعرق و تغییرات پهنه آبی دریاچه توصیه می‌شود؛ این برآوردها با اندازه‌گیری‌های میدانی (دبی‌سنجی ورودی‌ها، کنتورهای حجمی مزارع پایلوت، چاه‌نگاری و نمونه‌برداری کیفیت آب) کالیبره و اعتبارسنجی می‌گردد [۵]. نتایج در یک داشبورد شاخص‌های کلیدی تجمیع می‌شود که حداقل شامل این مؤلفه‌هاست :تراز خالص آبِ مجازی (WFوارداتی/صادراتی)، بهره‌وری آب/بهره‌وری اقتصادی آب در مزرعه، درصد اراضی تجهیزشده به سامانه‌های آبیاری کارا و حجم/دبی رهاسازی‌های زیست‌محیطی؛ برای هر شاخص «خط مبنا»، «هدف سالانه» و «آستانه هشدار» تعیین می‌شود تا تصمیم‌ها به‌صورت قاعده‌مند تحریک شوند[5] .

ارزیابی باید ادواری و تطبیقی باشد: هر سال یک مرور عملکرد برای سنجش پیشرفت نسبت به اهداف کمّی و هر سه تا پنج سال یک بازآرایی سیاستی بر مبنای سناریوهای اقلیمی و هیدرولوژیک به‌روز انجام گیرد؛ در این بازنگری، حساسیت نتایج به نااطمینانی بارش/دما، تغییر قیمت‌های نسبی محصولات و رفتار بازار لحاظ می‌شود و آزمون‌های «چه می‌شود اگر» برای بسته‌های سیاستی جایگزین اجرا می‌گردد [۲۱]. به‌موازات آن، رویه‌های گزارش‌دهی، شفافیت و راستی‌آزمایی (MRV) تعریف می‌شود: استانداردسازی پروتکل‌های اندازه‌گیری، کنترل کیفیت/اطمینان کیفیت داده‌ها(QA/QC) ، انتشار عمومی خلاصه شاخص‌ها، و سازوکار فیدبک با مشارکت ذی‌نفعان محلی برای تصحیح مسیرمی باشد . چنین چرخه یادگیرنده‌ای

تضمین می‌کند که صرفه‌جویی‌های حاصل از تجارت آبِ مجازی، اصلاح الگوی کشت و ارتقای آبیاری، به کاهش واقعی برداشت درون‌حوضه‌ای و بهبود پایدار وضعیت دریاچه ترجمه شود[5, 21] .

۱۱. محدودیت‌های شواهد

یافته‌های این مرور باید با احتیاط تفسیر شود، زیرا ناهمگونی روش‌شناختی میان مطالعات (تفاوت در مرزبندی سامانه، مقیاس مکانی–زمانی، فروض مدل و سنجه‌های کارایی) قابلیت مقایسه مستقیم نتایج را محدود می‌کند و بر دامنه تعمیم‌پذیری اثر می‌گذارد [۲۱]. علاوه‌براین، کمبود داده‌های خردمقیاس مزرعه‌ای—به‌ویژه درباره تبخیر–تعرق واقعی، راندمان مزرعه، و قیمت–هزینه‌های محلی—باعث اتکای بیشتر به برآوردها و پارامترهای انتقالی می‌شود و عدم‌قطعیت را در برآورد ردپای آب و بهره‌وری اقتصادی آب افزایش می‌دهد [۲۱]. از منظر اقتصاد سیاسی، حساسیت نتایج به قیمت‌ها، ساختار بازار و رژیم‌های تجاری بالاست و تغییرات نسبی قیمت/تعرفه می‌تواند جهت و بزرگیِ آثار پیش‌بینی‌شده را دگرگون کند؛ به‌ویژه در سناریوهایی که اثرات بازگشتی مصرف و تعاملات بین‌بخشی نادیده گرفته می‌شوند [۲۰, ۲۱]. در سطح شواهد، سوگیری انتشار (گزارش بیشترِ موارد موفق) و کیفیت ناهمسان اسناد خاکستری، ریسک برآورد خوش‌بینانه اثر سیاست‌ها را افزایش می‌دهد [۲۰]. همچنین ناایستایی اقلیمی و هیدرولوژیک—از جمله عدم قطعیت در بارش/دما و پاسخ حوضه—اعتبار بیرونی نتایج مدل‌های تاریخ‌مبنا را محدود می‌کند و نیازمند بازکالیبراسیون دوره‌ای سناریوهاست [۲۷]. مجموع این عوامل، نسبت دادن علّیِ تغییرات تراز و مصرف به مداخلات واحد را دشوار می‌سازد و احتمال «عوامل مداخله‌گرِ مشاهده‌نشده» را افزایش می‌دهد[20, 27] .

برای کاهش این محدودیت‌ها، توصیه می‌شود که مطالعات آتی به استانداردسازی شاخص‌ها و پروتکل‌های اندازه‌گیری، کالیبراسیون و تحلیل حساسیت شفاف، ترکیب داده‌های سنجش‌ازدور با پایش میدانی، استفاده از طرح‌های شبه‌تجربی/طولی در سطح مزرعه و بازنگری سناریوها بر مبنای اقلیمِ به‌روز متکی باشند؛ همچنین پیاده‌سازی سازوکار MRVو گزارش عدم‌قطعیت برای هر بسته سیاستی ضروری است تا قضاوت‌ها به‌جای نتایج نقطه‌ای، بر بازه‌های اعتماد استوار شوند [21, 27] .

۱۲. نتیجه‌گیری و توصیه‌ها

جمع‌بندی این مرور نشان می‌دهد که رویکردِ تقاضامحورِ «دوگانه»—یعنی پیوند برنامه‌ریزی آبِ مجازی با گذار به الگوی کشت کم‌مصرف—در قیاس با درمان‌های صرفاً عرضه‌محور (مانند توسعه سدها یا انتقال بین‌حوضه‌ای) برای حوضه‌های خشک و نیمه‌خشک کاراتر و تاب‌آورتر است؛ زیرا هم‌زمان بر کاهش برداشت‌های درون‌حوضه‌ای و ارتقای بهره‌وری اقتصادی آب در مقیاس مزرعه اثر می‌گذارد و خطر «قفل‌شدگی زیرساختی» را کاهش می‌دهد [۲, ۳, ۲۰]. همراستا با مدل‌سازی‌های پیش‌نگر که نقش تعیین‌کننده مدیریت تقاضا و رهاسازی‌های زیست‌محیطی را در بهبود تراز نشان می‌دهند [۵]، مطالعات

بهینه‌سازی مبتنی بر آبِ مجازی نیز گزارش کرده‌اند که بازتنظیم سبد کشت به‌سوی محصولات کم‌نیاز آب، به‌ویژه وقتی با سامانه‌های آبیاری کاراتر همراه شود، می‌تواند کاهش معناداری در مصرف و جهش محسوسی در بهره‌وری ایجاد کند—البته مشروط به آن‌که سیگنال‌های قیمتی و ابزارهای بازار از این گذار پشتیبانی کنند [۱۴, ۲۱]. این یافته‌ها با چارچوب‌های ارزیابی راهبردهای صرفه‌جویی سازگار است که تأکید می‌کنند بسته‌های سیاستی باید هم‌افزا طراحی شوند تا از «اثر بازگشتی مصرف» جلوگیری گردد [۲۱]. در مقابل، برخی روایت‌ها درباره روندهای طبیعی احیا هشدار می‌دهند که نسبت‌دادن بهبودهای مقطعی صرفاً به سیاست‌ها می‌تواند گمراه‌کننده باشد و نیاز به پایشِ دقیق و اعتبارسنجی مستقل را برجسته می‌کنند [۲۷]. در این میان، قوت رویکرد حاضر آن است که ابزار تجارت‌محور (آبِ مجازی) را با منطق مزرعه‌محور (EWP، ارتقای آبیاری و اصلاح کشت)و با اقتضائات حکمرانیِ بومی (حقوق آب، قیمت‌گذاری، مشارکت اجتماعی) تلفیق می‌کند؛ تلفیقی که هم با واقعیت اقتصادیِ سهم پایین کشاورزی در GDP و سهم بالای آن در برداشت آب سازگار است، و هم با ضرورت‌های احیای اکولوژیک دریاچه همخوانی دارد[3, 4, 20–23] .

راهبرد پیشنهادی در سطح اجرا، بسته‌ای یکپارچه و سازگار با شرایط محلی است؛ بدین‌ترتیب که تثبیت حقوق آب و حق‌آبهٔ زیست‌محیطی دریاچه در اولویت قرار می‌گیرد و قیمت‌گذاری حجمی با نرخ‌های پلکانی همراه با محدودسازی و رصد برداشت‌های زیرزمینی پیاده می‌شود تا اثر صرفه‌جویی‌ها در قالب کاهش واقعی برداشت‌ها تحقق یابد. [۲, ۳, ۲۰–۲۳]. دوم، همسوسازی تجارت با کمیابی آب از طریق واردات هدفمند محصولات آب‌بر و تنظیم سبد کشت بر مبنای ردپای آب و بهره‌وری اقتصادی آب تا تولید «پرآب–کم‌ارزش» از حوضه به بیرون منتقل و تولید «کم‌آب–باارزش» درون حوضه تقویت گردد [۹–۱۱, ۱۴, ۲۶, ۲۹]. سوم، تجهیز گسترده سامانه‌های آبیاری کارا و ترویج مزرعه‌محور با یارانه‌های مشروط به عملکرد (گره‌خورده به کاهش WF و افزایشEWP) برای پایدارسازی دستاوردها و مهار اثر بازگشتی [۳, ۲۱–۲۳]. چهارم، هماهنگی بین‌بخشی میان وزارت نیرو، جهاد کشاورزی و محیط‌زیست و مشارکت معنادار جامعه محلی در طراحی و اجرا برای ارتقای پذیرش و کارآمدی الزامی است [۱۷, ۱۸, ۲۰, ۲۲, ۲۳]. و پنجم، استقرار یک نظام پایش–گزارش‌دهی–راستی‌آزمایی (MRV) مبتنی بر ترکیب سنجش‌ازدور و اندازه‌گیری‌های میدانی، با بازنگری ادواری سیاست‌ها تحت سناریوهای اقلیمی و هیدرولوژیک به‌روز، برای داوری بی‌طرفانه میان نقش سیاست و نوسانات طبیعی و هدایت تطبیقی مسیر احیا ضروری است [۵, ۲۱, ۲۷]. به این ترتیب، رویکرد پیشنهادشده نه فقط از نظر نظری با بدنه پژوهش همخوان است، بلکه از نظر اجرایی نیز قابلیت پیاده‌سازی مرحله‌ای دارد و می‌تواند به‌صورت سنجش‌پذیر به کاهش فشار هیدرولوژیک و تقویت تاب‌آوری اکولوژیک و معیشتی در حوضه دریاچه ارومیه بینجامد.

منابع)

Doermann, L. (2023, October 9). Lake Urmia shrivels again. NASA Earth Observatory. https://earthobservatory.nasa.gov/images/151913/lake-urmia-shrivels-again

Rasooli, S., Keya, D. R., & Dawod, K. (2024). Lake Urmia crisis and possible solutions (pp. 1–16). Tishk International University. https://tishk.org/wp-content/uploads/2024/04/Rasooli-Keya-Dawod-2024.-Lake-Urmia-Crisis-and-Possible-Solutions.pdf

Fanack Water. (2021, August 9). Water challenges in Iran. https://water.fanack.com/iran/water-challenges-in-iran/

Hidropolitik Akademi Derneği. (n.d.). Water challenges of Iran. https://www.hidropolitikakademi.org/en/article/184/water-challenges-of-iran

Rahimi, A., & Breuste, J. (2021). Why is Lake Urmia drying up? Prognostic modeling with land-use data and artificial neural network. Frontiers in Environmental Science, 9, 603916. https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.603916

Naboureh, A., Li, A., Ebrahimy, H., Bian, J., Azadbakht, M., Amani, M., Lei, G., & Nan, X. (2021). Assessing the effects of irrigated agricultural expansions on Lake Urmia using multi-decadal Landsat imagery and a sample migration technique within Google Earth Engine. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 105, 102607. https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102607

Seven Seas Water Group. (2023, May 3). What is the significance of virtual water? https://www.sevenseaswater.com/what-is-the-significance-of-virtual-water/

acatech – National Academy of Science and Engineering. (2018). The virtual water and the water footprint concepts (acatech IMPULSE). https://en.acatech.de/publication/the-virtual-water-and-the-water-footprint-concepts/

Rasooli, S., Keya, D. R., & Dawod, K. (2024). Lake Urmia crisis and possible solutions (PDF, pp. 1–16). https://tishk.org/wp-content/uploads/2024/04/Rasooli-Keya-Dawod-2024.-Lake-Urmia-Crisis-and-Possible-Solutions.pdf

Yang, L., Yin, X., Gao, Z., Yang, B., Zhang, Y., Shao, Y., & Gao, T. (2025). Prioritizing crops for implementing a virtual water strategy that accounts for effects at an economic system scale in water-scarce regions. Journal of Hydrology, 629, 131015. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.131015 (نسخهٔ اولیه: SSRN No. 4960422)

Feizizadeh, B., Vadrevu, K. P., Naimi, B., & Lakes, T. (2022). Scenario-based analysis of the impacts of lake drying on food production in the Lake Urmia Basin. Scientific Reports, 12, 6608. https://doi.org/10.1038/s41598-022-10159-2

Lake Scientist. (2023, April 14). Research brief: Understanding the impact of lake drying on food production in the Lake Urmia Basin (summary of Feizizadeh et al., 2022). https://www.lakescientist.com/research-brief-understanding-the-impact-of-lake-drying-on-food-production-in-the-lake-urmia-basin/

United Nations Development Programme (UNDP). (2017). Government of Japan–UNDP partnership on Lake Urmia restoration. https://www.undp.org/iran/press-releases/government-japan-undp-partnership-lake-urmia-restoration

Yazdandoost, F., Razavi, H., & Izadi, A. (2022). Optimization of agricultural patterns based on virtual water considerations through integrated water resources management modeling. International Journal of River Basin Management, 20(4), 541–557. https://doi.org/10.1080/15715124.2021.1879093

Tehran Times. (n.d.). Lake Urmia’s area shrinks due to low rainfall. (خبر تحلیلی). (در صورت نیاز به تاریخ دقیق، لطفاً لینک/تاریخ را ارائه کنید.)

Faramarzi, N. (2012). Agricultural water use in Lake Urmia Basin, Iran (Master’s thesis). DiVA Portal. http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:548402/FULLTEXT01.pdf

Tehran Times. (2018, December 9). Agricultural water use fallen by 40% in Lake Urmia basin. https://www.tehrantimes.com/news/430449/Agricultural-water-use-fallen-by-40-in-Lake-Urmia-basin
Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2017). FAO participates in project to support Lake Urmia restoration. https://www.fao.org/iran/news/detail-events/en/c/1039805/
Nasrollahi, H., Shirazizadeh, R., Shirmohammadi, R., Pourali, O., & Amidpour, M. (2021). Unraveling the Water–Energy–Food–Environment Nexus for climate change adaptation in Iran: Urmia Lake Basin case-study. Water, 13(9), 1282. https://doi.org/10.3390/w13091282
Mirnezami, S. J., Molle, F., & Talebi Eskandari, S. (2024). Chronicle of a disaster foretold: The politics of restoring Lake Urmia (Iran). World Development, 182, 106713. https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2024.106713
[Bakhshianlamouki, E., Masia, S., Karimi, P., van der Zaag, P., & Sušnik, J. (2020). The Water-Saving Strategies Assessment (WSSA) framework: Development and application to the Urmia Lake Basin. Water, 12(10), 2789. https://doi.org/10.3390/w12102789
Conservation of Iranian Wetlands Project (CIWP). (n.d.). Local community participation for Lake Urmia restoration. https://ciwp.org.ir/local-community-participation-for-lake-urmia-restoration/
Madani, K., AghaKouchak, A., & Mirchi, A. (2019). A case study of the Urmia Lake Restoration National Committee (ULRNC): Lessons learned. Water Alternatives, 12(3), 1093–1111. http://www.water-alternatives.org/index.php/alldoc/articles/vol12/v12issue3/523-a12-3-22/file
Maleki, T., Koohestani, H., & Keshavarz, M. (2022). Can climate-smart agriculture mitigate the Urmia Lake tragedy in its eastern basin? Agricultural Water Management, 260, 107256. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107256
Schmidt, M., Gonda, R., & Transiskus, S. (2020). Environmental degradation at Lake Urmia (Iran): Exploring the causes and their impacts on rural livelihoods. GeoJournal, 85, 2149–2165. https://doi.org/10.1007/s10708-019-10084-9
Yale Environment Review. (2013, September 26). Virtual water flows and trade: The complex relationship between dependency and impact. https://environment-review.yale.edu/virtual-water-flows-and-trade-complex-relationship-between-dependency-and-impact
Nikraftar, Z., Sedighi, A., & Ehteshami, M. (2021). Lake Urmia restoration success story: A natural trend or a human-made miracle? Journal of Great Lakes Research, 47(5), 1401–1414. https://doi.org/10.1016/j.jglr.2021.07.007
United Nations Development Programme (UNDP). (n.d.). Story of a joint effort: Conservation of Iranian Wetlands Project. https://www.undp.org/iran/publications/story-joint-effort-conservation-iranian-wetlands-project
Wichelns, D. (2004). The policy relevance of virtual water can be enhanced by considering comparative advantages. Water Policy, 6(5), 421–437. https://doi.org/10.2166/wp.2004.0027

The Role of Virtual Water Planning and Low-Water-Use Cropping Patterns in Reducing Basin-Scale Hydrological Pressure on Lake Urmia Amid Climate Change

Hadi Siasar[1]

Assistant Professor, Payame Noor University (PNU).

* Corresponding author: hadisiasar@pnu.ac.ir

Abstract

Lake Urmia—once the largest hypersaline lake in the Middle East and a UNESCO Biosphere Reserve—has experienced a pronounced decline in water level and a drastic contraction in surface area over the past three decades. In parallel, the interplay of climate change, the expansion of irrigated agriculture, and inefficient irrigation practices has intensified hydrological pressure across the basin. Given agriculture's very high share of water consumption and its relatively modest contribution to GDP, cropping-pattern reform and demand-side water management emerge as critical levers. This narrative–systematic review assesses the potential of two complementary strategies: virtual water planning (aligning trade with local water scarcity) and a transition to low-water-use cropping patterns (coupled with improved irrigation efficiency). The findings indicate that realigning import/export baskets based on product water footprints, re-optimizing the crop mix using economic water productivity, and implementing supportive institutional policies (clear water rights, environmental flow releases, volumetric/tiers pricing) can reduce in-basin withdrawals, strengthen the lake's ecological resilience, and sustain farmers' livelihoods along a more sustainable pathway. A phased roadmap for implementation, monitoring, and evaluation is also proposed.

Keywords: Lake Urmia; virtual water; water footprint; low-water-use cropping pattern; water productivity; water resources governance; water–energy–food–environment nexus..

ارزیابی تغییر اقلیم بارش با استفاده از آنومالی و میانگین متحرک مطالعه موردی: شهرهای بلوچستان

چکاوک خواجه امیری خالدی[1]*، محمدرضا سالاری فنودی[2]

۱- استادیار گروه اقیانوس شناسی،دانشکده علوم دریایی،دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار

۲- رییس اداره هواشناسی سینوپتیک دریایی چابهار

*نویسنده مسئول: c.khajehamiri@cmu.ac.ir

چکیده

هدف از این تحقیق بررسی روند تغییرات اقلیم بارش چهار دهه گذشته شهرهای مهم بلوچستان با استفاده از از آنومالی و میانگین متحرک می باشد. در مقاله حاضر، با استفاده از سریهای زمانی بارش ۴۰ ساله ۱۹۸۳ تا ۲۰۲۲ از رسم نمودارهای آنومالی بارش و میانگین متحرک، پیش بینی و گسترش خشکسالی و ترسالی بلوچستان مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور داده های بارش ماهیانه، فصلی و سالانه ۱۰ شهر منطقه بلوچستان طی بازه زمانی ۲۰۲۳-۱۹۸۴ از پایگاه داده های سنجش از دوری PERSIANN استخراج شد. پس از تشکیل بانک داده ها، محاسبات آماری و شاخص های من کندال و شیب سنس تهیه شد. نتایج این مطالعه نشان داد که برای اکثر شهرهای منطقه تداوم ترسالی و خشکسالی ها مشابه بوده و طی سالهای اخیر از تداوم بیشتری برخوردار است مقایسه الگو و روند تغییرات میانگین ۳ ، ۵ و ۷ ساله بارش ۳۰ ساله را در منطقه بلوچستان نشان می دهد که بیشترین تغییرات بارندگی مربوط به میانگین سه ساله بوده است. میانگین بارش ۵ ساله در این مناطق روند تغییرات اقلیمی بارش کاهشی افزایشی را نشان می دهد. نمودار میانگین ۷ ساله در این مناطق نشان دهنده دوره های ترسالی و خشکسالی بلند مدت تری است.

کلید واژه‌ها: بلوچستان، ایران, انومالی، میانگین متحرک، بارش، من کندال

* مسئول مکاتبات: c.khjehamiri@cmu.ac.ir-

مقدمه

امروزه بحران آب در جهان به مسئله بسیار جدی بدل گردیده است، لذا براهمیت ضرورت منابع آبی کشور بیش از پیش افزوده شده، که مسلماً اجرای صحیح آن بدون شناخت و آگاهی دقیق و جامع از مسایل طبیعی حوضه های آبی کشور امکان پذیر نیست (منتظری و غیور، ۱۳۸۸). خشکسالی، حالتی نرمال و مستمر اقلیم است. اگر چه بسیاری به اشتباه آن را واقعه ای تصادفی و نادر می دانند. این پدیده تقریبا در تمامی مناطق اقلیمی رخ می دهد گرچه مشخصات آن از یک منطقه به منطقه دیگر کاملاً متفاوت است (احمدی، ۱۳۸۸). تغییرات اقلیمی اثرات قابل‌توجهی بر مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان، از جمله ایران، داشته است. این اثرات شامل افزایش ناهنجاری‌های دمایی، الگوهای نامنظم بارش و دوره‌های طولانی‌تر خشکسالی است. موقعیت جغرافیایی ایران در منطقه‌ای عمدتاً خشک، این کشور را به‌ویژه در برابر این تغییرات آسیب‌پذیر کرده است، به‌طوری‌که تغییرات بارش به‌طور مستقیم بر منابع آبی، کشاورزی و پایداری اجتماعی-اقتصادی تأثیر می‌گذارد. مطالعات نشان داده‌اند که در چند دهه اخیر، ایران شاهد افزایش ناهنجاری‌های دمایی و کاهش بارش بوده که منجر به وقوع خشکسالی‌های مکرر و شدیدتر شده است. برای مثال، تحلیل داده‌های اقلیمی بلندمدت از سال ۱۹۵۱ تا ۲۰۱۰ نشان‌دهنده ناهنجاری‌های فضایی-زمانی در بارش و تشدید شرایط خشکسالی در دوره‌های گرم‌تر است. این روندها اغلب با استفاده از روش‌های آماری مانند ناهنجاری (انحراف از میانگین بلندمدت) و میانگین متحرک برای هموارسازی نوسانات کوتاه‌مدت و شناسایی الگوهای بلندمدت در بارش و خشکسالی بررسی می‌شوند.

خشکسالی وابسته به عوامل و پارامترهای متفاوتی است که در این میان تحلیل داده های بارش از اهمیت ویژهای برخوردار است، چرا که بارندگی مهمترین متغیری است که تغییرات آن به طور مستقیم در رطوبت خاک، جریان های سطحی، تغییرات مخازن زیر زمینی آب و غیره منعکس می شود. از طرف دیگر در میان متغیرهای اقلیمی، بارش خصوصا در مناطق خشک و نیمه خشک جزء بی ثبات ترین آنها محسوب می شود (لشنیزند، ۱۳۸۰). در بین بلایایی طبیعی، بنا به عللی مانند گستردگی وسیع تر، در برگیرنده جمعیت بیشتر و دوره تداوم زیادتر از اهمیت بیشتری برخوردار است و ممکن است اثرات آن تا چندین سال پس از خاتمه آن نیز ادامه داشته باشد. خشکسالی یکی از پدیده های محیطی و بخش جدایی ناپذیر تغییرات اقلیمی می باشد. این پدیده در واقع از ویژگی اصلی و تکرار شونده اقلیم های مختلف بشمار می رود (زابل عباسی و همکاران، ۱۳۸۶). کشور ایران در عین گستردگی، در منطقه خشک و نیمه خشک جهان قرار رفته است و خشکسالی با شدت و ضعف های مختلف از ویژگی اصلی آب و هوایی آن محسوب می شود. در سالهای اخیر آثار زیان بار خشکسالی بر منابع آبی بسیار زیاد بوده است و پیش بینی می شود در خشکسالی های گسترده، بیش از ۶۰ درصد جمعیت روستاهای کشور ، محل زندگی خود را ترک و به شهرها مهاجرت کنند (احمدی، ۱۳۸۸). زارع ابیانه و همکاران(۱۳۸۳) وضعیت خشکسالی و روند آن در منطقه همدان را بر اساس شاخص های آماری مطالعه نمودند. میانگین متحرک یک مفهوم آماری است. در آمار منظور از میانگین متحرک، میانگینی است که از بخشی از داده‌های موجود گرفته می‌شود. در میانگین‌گیری هدف، حذف نویزها و تغییرات ناگهانی داده‌ها است. در اصطلاح به این کار هموار کردن یا Smoothing گفته

می‌شود. این عمل باعث می‌شود که داده‌ها را بتوان به دور از نویزها بررسی کرد و نتایج قابل قبولی از بررسی داده‌ها به دست آورد. در زمینه ایران، تحقیقات بر روی تغییرات بارش، نوسانات بین‌سالانه و دهه‌ای را برجسته کرده و مدل‌ها پیش‌بینی کرده‌اند که به دلیل گرمایش جهانی، ناهنجاری‌های بارش افزایش خواهد یافت. شاخص‌های افراطی بارش و دما در غرب ایران روند کاهشی در شدت بارش را نشان می‌دهند که با اثرات گسترده‌تر تغییرات اقلیمی همخوانی دارد. چارچوب‌های ارزیابی خشکسالی، از جمله شاخص استاندارد بارش (SPI) و معیارهای مبتنی بر ناهنجاری، به‌طور گسترده برای کمی‌سازی این تغییرات استفاده شده‌اند و نشان داده‌اند که روش‌های سنتی ممکن است خطرات ناشی از تغییرات سریع اقلیمی را دست‌کم بگیرند. مجموعه داده‌های سنجش از دور مانند PERSIANN و CHIRPS در مناطق با کمبود داده‌های زمینی برای محاسبه ناهنجاری‌ها و تحلیل روند بارش به کار گرفته شده‌اند. با تمرکز بر استان سیستان و بلوچستان و بویژه بلوچستان که یکی از خشک‌ترین مناطق ایران با بارش سالانه معمولاً کمتر از ۲۰۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر است، مطالعات بر آسیب‌پذیری بالای این منطقه در برابر خشکسالی تأکید دارند. این استان دوره‌های شدید خشکسالی را به‌ویژه از اواخر دهه ۱۹۹۰ تجربه کرده است، با رویدادهای قابل‌توجه در سال‌های ۲۰۰۲، ۲۰۰۶، ۲۰۰۸، ۲۰۱۵-۲۰۱۶، ۲۰۱۸ و ۲۰۲۱ که بیش از ۷۰ درصد منطقه را تحت تأثیر قرار داده‌اند. رویکردهای سنجش از دور کاهش ۵۰ تا ۸۰ درصدی زمین‌های قابل کشت را بین سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۲ به دلیل خشکسالی‌ها نشان داده‌اند که با کاهش بارش ناشی از تغییرات اقلیمی تشدید شده است. پیش‌بینی‌های مبتنی بر مدل‌های CMIP6 افزایش دما (تا ۲ تا ۴ درجه سانتی‌گراد) و کاهش بارش (۱۰ تا ۳۰ درصد) تا اواسط قرن را پیش‌بینی می‌کنند که شدت خشکسالی را افزایش خواهد داد. تحلیل داده‌های بلندمدت CHIRPS از ۱۹۸۱ تا ۲۰۲۰ الگوهای فضایی-زمانی خشکسالی را نشان می‌دهد، با میانگین‌های متحرک و ناهنجاری‌ها که دوره‌های خشک پایدار را در جنوب شرق ایران آشکار می‌کنند. علاوه بر این، مطالعاتی که از SPI و معیارهای تعادل آبی استفاده کرده‌اند، بر اقلیم خشک، بارش نامنظم و نیاز به استراتژی‌های سازگار تأکید دارند، زیرا ۸۵ درصد جمعیت منطقه به کشاورزی وابسته‌اند که در برابر این تغییرات بسیار آسیب‌پذیر است.

به‌طور کلی، تحقیقات پیشین زمینه‌ای برای ارزیابی‌های مبتنی بر ناهنجاری و میانگین متحرک در بلوچستان فراهم کرده و بر اهمیت یکپارچه‌سازی داده‌های ماهواره‌ای برای پیش‌بینی گسترش خشکسالی و اطلاع‌رسانی سیاست‌های مدیریت آب در شرایط عدم قطعیت اقلیمی تأکید دارند.

در تحقیق حاضر، با استفاده از سریهای زمانی بارش ۴۰ ساله ۱۹۸۳ تا ۲۰۲۲ از میانگین متحرک، پیش بینی و گسترش خشکسالی و ترسالی در سواحل(جنوبی و شمالی) دریای مکران مورد بررسی قرار گرفته است.

روش تحقیق

داده های بارش سالیانه از داده های سنجش از دور پایگاه پرشین در بازه زمانی ۲۰۲۲-۱۹۸۳ برای ۱۰ شهر منطقه بلوچستان تهیه شده است. ظهور تکنولوژی‌های ماهواره‌ای و افزایش توان محاسباتی رایانه‌ها (برای انجام محاسبات سنگین مدلسازی جو و اتصال آن به مدل‌های سطح زمین منجر به ارائه محصولات بارشی با توان تفکیک مکانی و زمانی بالا شده

است. این محصولات عمدتاً به صورت شبکه‌بندی هستند و اگرچه بر خلاف ایستگاه‌های بارانسنجی زمینی، دارای مشکل عدم پیوستگی مکانی و زمانی نمی‌باشند ولی عدم قطعیت‌هایی در تخمین بارش دارند که از جمله نقاط ضعف این پایگاه های داده محسوب می شوند.(Steiner et al., 2003; Hong et al., 2006; AghaKouchak et al.2009) . در پایگاه بارشی ارزشمند PERSIANN، از الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی و تصاویر بازتابش شده مادون قرمز توسط ماهواره‌های زمین مرجع برای تخمین میزان بارندگی استفاده، می‌شود. الگوریتم PERSIANN ابتدا براساس تصاویر مادون قرمز از ماهواره‌های زمین مرجع بود، سپس به نسخه جدید آن که در حال حاضر استفاده می‌شود، داده‌های مایکروویو نیز اضافه شد که این داده‌های جدید برای کالیبراسیون و تنظیم پارامترهای الگوریتم بکار می‌روند. مطالعات اعتبارسنجی نشان می‌دهند که تخمین های بارش بطور قابل توجهی توسط تنظیم داده‌های بدست آمده از مادون قرمز با اطلاعات مایکروویو، بهبود یافته‌اند. الگوریتم برآورد بارش PERSIANN بطور کاربردی از سال ۱۹۸۳ با پوشش سراسری از ۶۰ درجه شمالی تا ۶۰ درجه جنوبی، در دسترس می‌باشد.

این پایگاه بارشی شامل سه محصول مختلف با جزئیات زیر می باشد:

PERSIAN-CCS: توان تفکیک مکانی ۰،۰۴؛

PERSIAN-CDR: توان تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه و مقیاس زمانی ۱، ۳ و ۶ ساعته، روزانه و ماهانه برای بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۸۲۵درجه و مقیاس زمانی روزانه و ماهانه برای بازه زمانی ۱۹۸۳ تا ۲۰۱۸؛

PERSIAN: توان تفکیک مکانی ۰،۲۵درجه و مقیاس زمانی روزانه و ماهانه برای بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸.

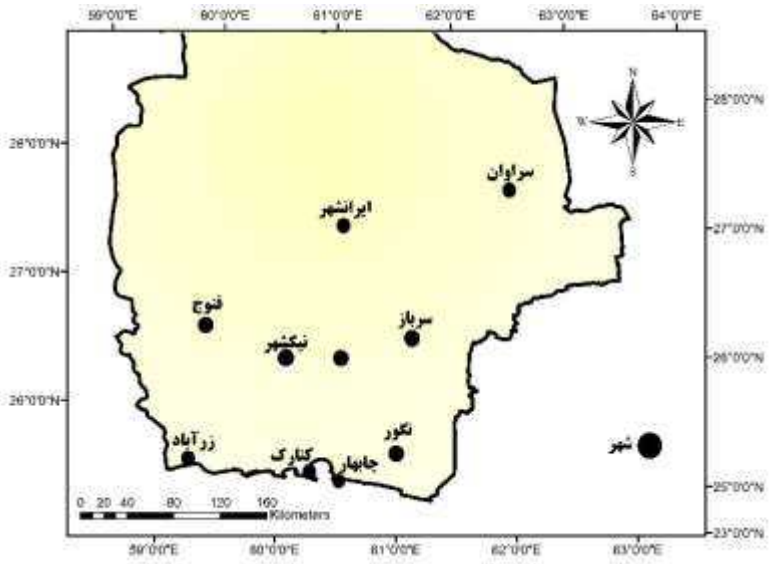
میانگین متحرک

یکی دیگر از روشهای بررسی دوره های ترسالی و خشکسالی استفاده از میانگین متحرک یا لغزان می باشد. چنانچه تغییرات بارش سالانه در طی یک دوره مشترک آماری در نظر گرفته شود؛ به دلیل تغییرات سالانه مقادیر بارش، بررسی روند تغییرات به راحتی انجام پذیر نمی باشد. روش میانگین متحرک با به کارگیری متوسط داده ها در یک دوره معین و تشکیل سری زمانی جدید، این نوسانات را کاهش و یا به عبارتی دیگر، این نوسانات را هموار می کند. بنابراین با حذف و یا کاهش نوسانات سالانه، روند تغییرات دراز مدت بارز میگردد. میانگین متحرک می تواند در پایه های زمانی مختلف محاسبه شود؛ که بستگی به طول آمار مورد بررسی و تغییرپذیری سری داده ها دارد. سازمان هواشناسی جهانی، میانگین متحرک ۵ ساله و ۷ ساله بارش را برای بررسی های مربوط به خشکسالی و ترسالی توصیه می کند. از این رو می توان با ترسیم منحنی میانگین متحرک بارش سالانه، روندهای ترسالی و خشکسالی را بررسی نمود. به طوری که بخش هایی از منحنی که بالاتر از مقدار عددی میانگین بارش سالانه، دوره ترسالی و بخش دیگری که پایین تر از آن باشد، بیانگر دوره خشکسالی است. در این پژوهش، نمودارهای میانگین های متحرک ۳ ، ۵ و ۷ ساله برای منطقه بلوچستان ترسیم گردید. در این روش

ابتدا میانگین بارندگی برای دوره های ۳ ، ۵ و ۷ ساله تعیین شده، سپس نمودار میانگین متحرک این دوره ها همراه با خط مربوط به متوسط میزان بارندگی ترسیم گردید تا دوره های خشک و مرطوب از یکدیگر تفکیک شوند.

محدوده مورد مطالعه

بلوچستان ایران منطقه‌ای است در جنوب شرقی فلات ایران که از کنار کویر کرمان تا مرزهای شرقی کشور سند گسترده شده است. در تحقیق حاضر بارش ده شهر اصلی منطقه بلوچستان مورد مطالعه قرار گرفته است(شکل ۱- جدول۱)



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه

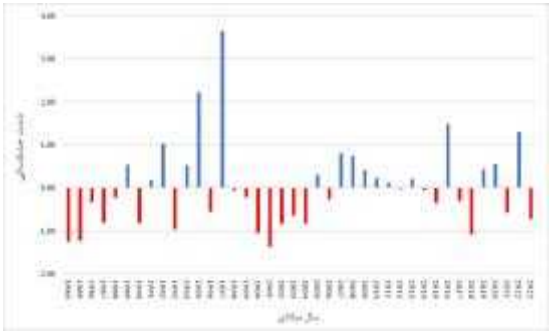
جدول۱- مشخصات شهرهای مورد مطالعه

ردیف	شهر	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا
۱	چابهار	۲۵/۲۸	۶۰/۶۲	۸
۲	کنارک	۲۵/۲۰	۶۰/۲۶	۱۰
۳	نگور	۲۵/۳۹	۶۱/۱۴	۲۰
۴	زرآباد	۲۵/۳۴	۵۹/۲۳	۳۰
۵	نیکشهر	۲۶/۱۴	۶۰/۱۳	۵۱۰
۶	قصرقند	۲۶/۰۸	۶۰/۵۱	۷۸۰
۷	سرباز	۲۶/۱۳	۶۱/۲۴	۵۰۰

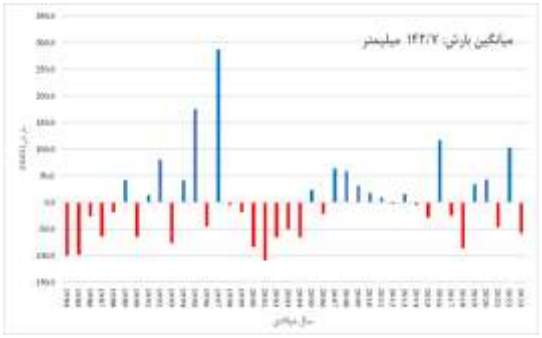
۸	فنوج	۲۶/۶	۵۹/۶۵	۱۸۵
۹	ایرانشهر	۲۷/۲۰	۶۰/۷۰	۵۹۹/۱
۱۰	سراوان	۲۷/۳۳	۶۲/۳۳	۱۱۸۲

یافته‌های تحقیق

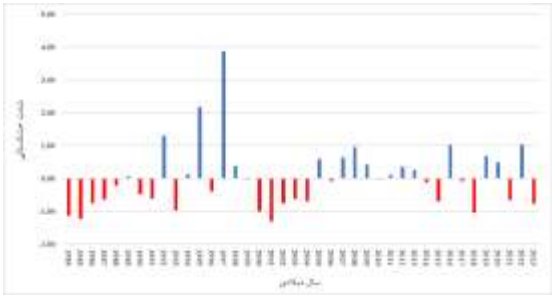
به منظور بررسی دقیق اقلیم بارش و دوره های خشکسالی و ترسالی منطقه بلوچستان نمودارهای انومالی و شاخص نمره استاندارد(Z) مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج حاصل(شکل ۲ تا ۲۵) نشان داد که برای اکثر شهرهای منطقه تداوم ترسالی و خشکسالی ها مشابه بوده و طی سالهای اخیر از تداوم بیشتری برخوردار است.



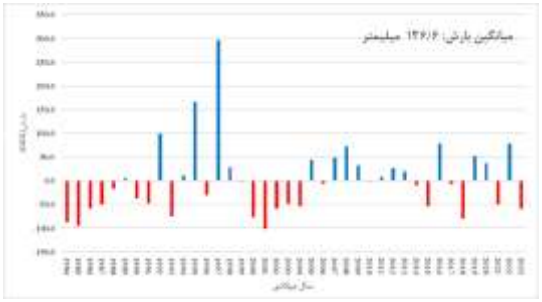
شکل۲- تغییرات شدت خشکسالی چابهار - شاخص نمره استاندارد(Z)



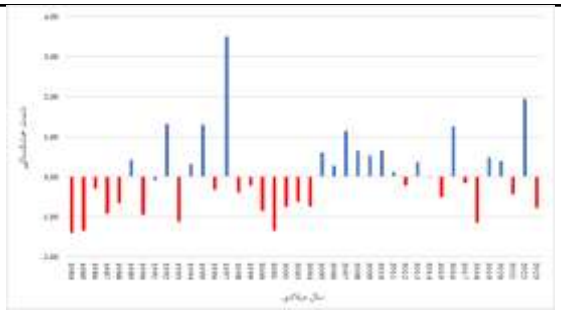
شکل ۳- آنومالی بارش سالیانه چابهار



شکل۴- تغییرات شدت خشکسالی کنارک - شاخص نمره استاندارد(Z)



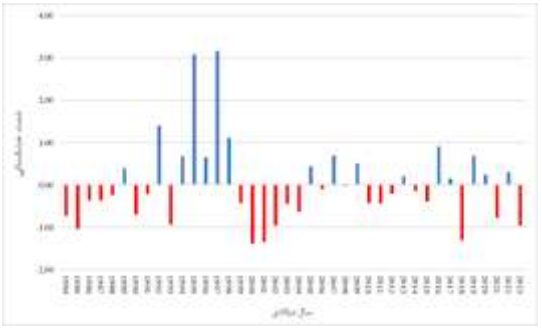
شکل ۵- آنومالی بارش سالیانه کنارک



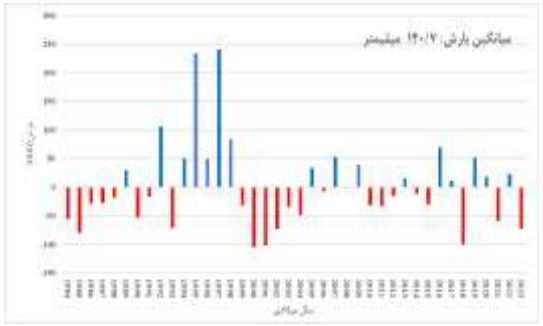
شکل۶- تغییرات شدت خشکسالی نگور - شاخص نمره استاندارد(Z)



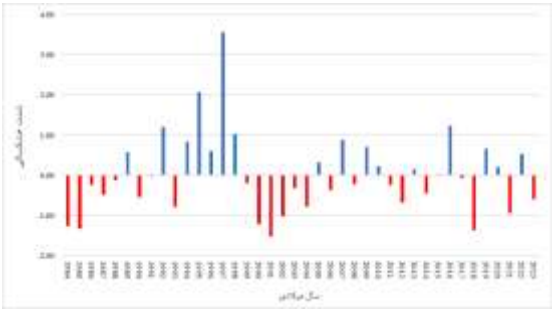
شکل ۷- آنومالی بارش سالیانه نگور



شکل۸- تغییرات شدت خشکسالی زرآباد - شاخص نمره استاندارد(Z)



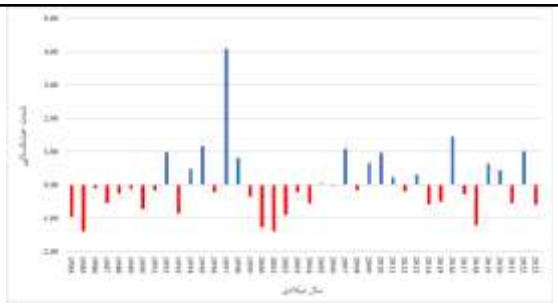
شکل ۹ آنومالی بارش سالیانه زرآباد



شکل۱۰- تغییرات شدت خشکسالی نیکشهر - شاخص نمره استاندارد(Z)



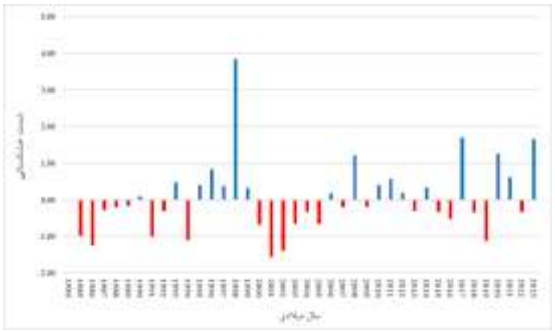
شکل ۱۱- آنومالی بارش سالیانه نیکشهر



شکل۱۴- تغییرات شدت خشکسالی قصرقند - شاخص نمره استاندارد(Z)



شکل ۱۵- آنومالی بارش سالیانه قصرقند



شکل۱۶- تغییرات شدت خشکسالی سرباز - شاخص نمره استاندارد(Z)



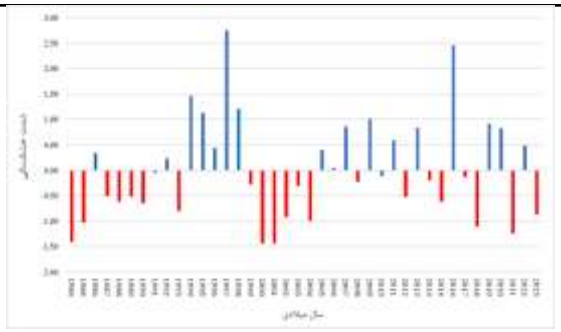
شکل ۱۷- آنومالی بارش سالیانه سرباز



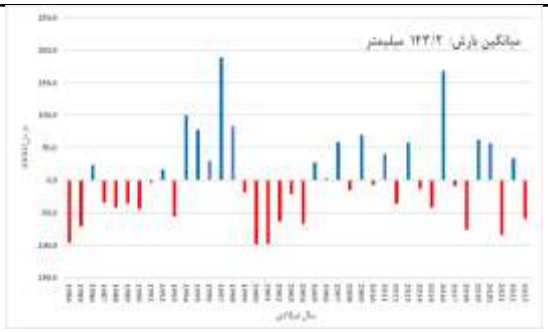
شکل۱۸- تغییرات شدت خشکسالی فنوج - شاخص نمره استاندارد(Z)



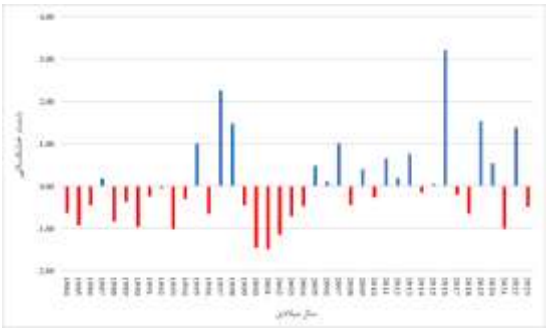
شکل ۱۹- آنومالی بارش سالیانه فنوج



شکل۲۰- تغییرات شدت خشکسالی ایرانشهر - شاخص نمره استاندارد(Z)



شکل ۲۱- آنومالی بارش سالیانه ایرانشهر

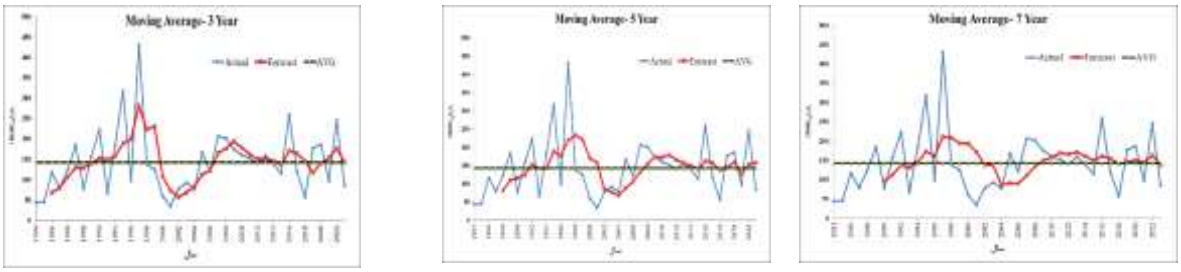


شکل۲۲- تغییرات شدت خشکسالی سراوان - شاخص نمره استاندارد(Z)

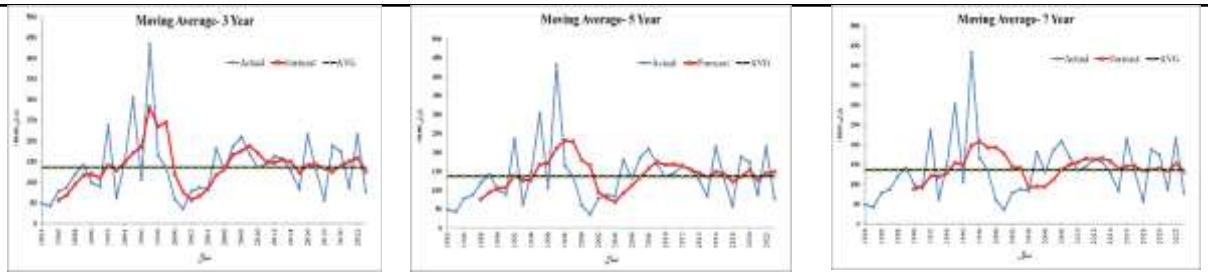


شکل ۲۳- آنومالی بارش سالیانه سراوان

شکل ۲۴ تا ۳۳ ، مقایسه الگو و روند تغییرات میانگین ۳ ، ۵ و ۷ ساله بارش ۴۰ ساله را منطقه بلوچستان نشان می دهد. بررسی این نمودارها نشان می دهد که بیشترین تغییرات بارندگی مربوط به میانگین سه ساله بوده است. میانگین بارش ۵ ساله در این مناطق روند تغییرات اقلیمی بارش کاهشی افزایشی را نشان می دهد. نمودارهای میانگین ۷ ساله در این مناطق نشان دهنده دوره های ترسالی و خشکسالی بلند مدت تری است.



شکل ۲۴ – نمودار میانگین بارش متحرک ۳، ۵ و ۷ سال در چابهار طی دوره آماری ۱۹۸۳ تا ۲۰۲۳



شکل ۲۵ – نمودار میانگین بارش متحرک ۳، ۵ و ۷ سال در کنارک طی دوره آماری ۱۹۸۳ تا ۲۰۲۳



شکل ۲۶ – نمودار میانگین بارش متحرک ۳، ۵ و ۷ سال در نگور طی دوره آماری ۱۹۸۳ تا ۲۰۲۳



شکل ۲۷ – نمودار میانگین بارش متحرک ۳، ۵ و ۷ سال در زرآباد طی دوره آماری ۱۹۸۳ تا ۲۰۲۳



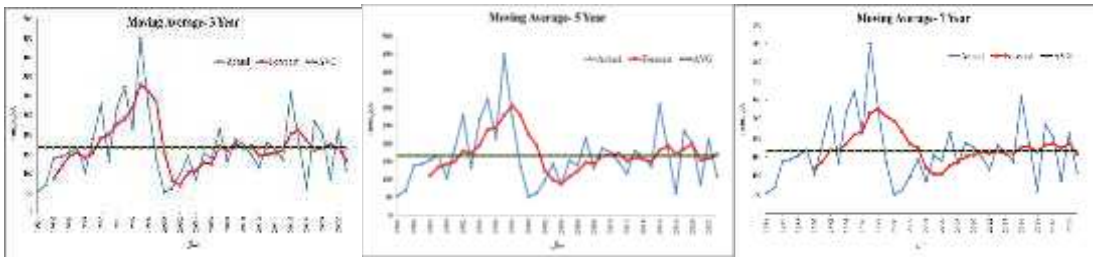
شکل ۲۸ – نمودار میانگین بارش متحرک ۳، ۵ و ۷ سال در نیکشهر طی دوره آماری ۱۹۸۳ تا ۲۰۲۳



شکل ۲۹ – نمودار میانگین بارش متحرک ۳، ۵ و ۷ سال در قصرقند طی دوره آماری ۱۹۸۳ تا ۲۰۲۳



شکل ۳۰ – نمودار میانگین بارش متحرک ۳، ۵ و ۷ سال در سرباز طی دوره آماری ۱۹۸۳ تا ۲۰۲۳



شکل ۳۱ – نمودار میانگین بارش متحرک ۳، ۵ و ۷ سال در فنوج طی دوره آماری ۱۹۸۳ تا ۲۰۲۳



شکل ۳۲ – نمودار میانگین بارش متحرک ۳، ۵ و ۷ سال در ایرانشهر طی دوره آماری ۱۹۸۳ تا ۲۰۲۳



شکل ۳۳ – نمودار میانگین بارش متحرک ۳، ۵ و ۷ سال در سراوان طی دوره آماری ۱۹۸۳ تا ۲۰۲۳

نتیجه‌گیری و پیشنهاد

مطالعه حاضر با هدف بررسی روند تغییرات اقلیمی بارش در شهرهای مهم منطقه بلوچستان ایران طی دوره ۴۰ ساله (۱۹۸۳-۲۰۲۲) با استفاده از روش‌های آنومالی و میانگین متحرک انجام شده است. این پژوهش با بهره‌گیری از داده‌های بارش ماهانه، فصلی و سالیانه استخراج‌شده از پایگاه داده PERSIANN و تحلیل‌های آماری مانند شاخص من‌کندال و شیب سنس، به ارزیابی دوره‌های خشکسالی و ترسالی پرداخته است. داده‌های بارش از پایگاه PERSIANN که از فناوری سنجش از دور و الگوریتم‌های شبکه عصبی مصنوعی برای تخمین بارش استفاده می‌کند، استخراج شده است. این پایگاه با توان تفکیک مکانی و زمانی مناسب، اطلاعات قابل اعتمادی برای تحلیل‌های اقلیمی ارائه می‌دهد، هرچند دارای عدم قطعیت‌هایی در تخمین بارش است. استفاده از میانگین‌های متحرک ۳، ۵ و ۷ ساله برای هموارسازی داده‌ها و حذف نویزهای سالیانه، امکان شناسایی روندهای بلندمدت خشکسالی و ترسالی را فراهم کرده است. شاخص‌های آماری مانند من‌کندال و شیب سنس برای بررسی روند تغییرات بارش و شناسایی الگوهای اقلیمی به کار گرفته شده‌اند. میانگین ۳ ساله بیشترین تغییرات بارش در این مقیاس مشاهده شده است، که نشان‌دهنده نوسانات کوتاه‌مدت در بارندگی است. میانگین ۵ ساله این مقیاس روندهای افزایشی یا کاهشی در تغییرات اقلیمی بارش را نشان می‌دهد، که می‌تواند به تغییرات تدریجی در الگوهای آب‌وهوایی اشاره داشته باشد. میانگین ۷ ساله این مقیاس دوره‌های بلندمدت‌تر خشکسالی و ترسالی را مشخص کرده و برای تحلیل روندهای اقلیمی طولانی‌مدت مناسب‌تر است. منطقه بلوچستان به دلیل موقعیت جغرافیایی در ناحیه خشک و نیمه‌خشک، به شدت تحت تأثیر تغییرات بارش قرار دارد. کاهش بارش در برخی دوره‌ها و افزایش تداوم خشکسالی‌ها نشان‌دهنده تأثیرات منفی تغییرات اقلیمی بر منابع آبی منطقه است. بلوچستان به دلیل قرارگیری در منطقه خشک و نیمه‌خشک ایران، با چالش‌های جدی در زمینه منابع آبی مواجه است. خشکسالی‌های مکرر و طولانی‌مدت می‌توانند اثرات مخربی بر کشاورزی، منابع آب زیرزمینی و مهاجرت جمعیت روستایی به شهرها داشته باشند. تحلیل‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که تغییرات بارش در این منطقه بی‌ثبات بوده و این بی‌ثباتی می‌تواند مدیریت منابع آبی را دشوارتر کند.

این پژوهش نشان داد که منطقه بلوچستان در چهار دهه گذشته شاهد تغییرات قابل‌توجهی در الگوهای بارش بوده است. تداوم دوره‌های خشکسالی و ترسالی، به‌ویژه در سال‌های اخیر، نشان‌دهنده تأثیرات عمیق تغییرات اقلیمی بر این منطقه

است. میانگین متحرک ۳ ساله نوسانات کوتاه‌مدت را برجسته کرده، در حالی که میانگین ۷ ساله برای شناسایی دوره‌های بلندمدت خشکسالی و ترسالی مناسب‌تر است. این یافته‌ها بر ضرورت پایش مستمر اقلیم منطقه و اتخاذ استراتژی‌های مدیریت منابع آبی تأکید دارند. با توجه به تداوم خشکسالی‌ها، اجرای طرح‌های بهینه‌سازی مصرف آب، مانند آبیاری قطره‌ای و احیای منابع آب زیرزمینی، ضروری است .استفاده از داده‌های به‌روز و فناوری‌های سنجش از دور برای پایش دقیق‌تر تغییرات اقلیمی توصیه می‌شود. با توجه به مهاجرت‌های احتمالی ناشی از خشکسالی، برنامه‌ریزی برای توسعه پایدار روستاها و جلوگیری از مهاجرت بی‌رویه به شهرها لازم است. بررسی تأثیر سایر متغیرهای اقلیمی (مانند دما و تبخیر) بر الگوهای بارش و خشکسالی می‌تواند درک جامع‌تری از تغییرات اقلیمی منطقه ارائه دهد. این مطالعه با ارائه تحلیل‌های دقیق و استفاده از روش‌های آماری مناسب، گامی مهم در راستای شناخت بهتر اقلیم بارش بلوچستان و ارائه راهکارهای مقابله با چالش‌های خشکسالی برداشته است.

منابع

-احمدی، ح (۱۳۸۸) تحلیل خشکسالی در شهرایلام براساس شاخص توزیع استاندارد و درصد نرمال، اولین همایش ملی بحران آب در کشاورزی .و منابع طبیعی، آبان ۱۳۸۸

انصافی مقدم.ط، (۱۳۸۲) ارزیابی چند شاخص خشکسالی اقلیمی و تعین مناسبترین شاخص در حوضه دریاچه نمک، فصلنامه علمی پژوهشی تحقیقات مرتع و بیابان ایران، ج ۱۴ ، ش ۲

جهانگیر، م.، محمدی، ع.، ۱۳۹۵ . مقایسه شاخص استاندارد بارش و نظام رتبه بندی تاپسیس به منظور ارزیابی وضعیت مخاطره خشکسالی در استان خوزستان. دانش مخاطرات، ۳ (، ۲ :) ۱۳۹-۱۲۵.

حسینی، الف، س.، ارغوانی، الف.، آزادی مبارکی، م.، محمدپور، ک (۱۳۹۰) پایش خشکسالی و روند آن در شهرستان سنندج، پنجمین همایش منطقه ای یافته های پژوهشی کشاورزی، دانشگاه کردستان، ۶ ص.

زابل عباسی، ف.، و همکاران (۱۳۸۶) بررسی و مقایسه شاخصهای خشکسالی در مشهد، اداره کل هواشناسی استان خراسان رضوی.

زارع ابیانه، ح و همکاران (۱۳۸۳) بررسی وضعیت خشکسالی و روند آن در منطقه همدان براساس شاخص های آماری خشکسالی، پژوهش و سازندگی در زراعت و باغبانی،ش ۶۴

کردوانی، پ.، .۱۳۷۱ منابع و مسائل آب ایران . تهران: انتشارات دانشگاه تهران.

لشنی زند، م.، .۱۲۸۰ پهنه بندی خشکسالی اقلیمی در استان لرستان با به کارگیری شاخصهای آماری. مجموعه مقاله های اولین کنفرانس ملی بررسی راهکارهای مقابله با بحران آب، دانشگاه زابل.

علیزاده، الف (۱۳۸۶) اصول هیدرولوژی کاربردی، انتشارات آستان قدس رضوی، چاپ ۲۲

فرج زاده، م (۱۳۸۴) خشکسالی از مفهوم تا راهکار، انتشارات سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح.

لشنی زند، م.، تلوری، ع (۱۳۸۰) بررسی خشکسالی اقلیمی و امکان پیشبینی آن در شش حوضه واقع درغرب و شمالغرب ایران، فصلنامه .تحقیقات جغرافیایی، ش ۷۲

مرید، س و همکاران (۱۳۸۴) طرح پایش خشکسالی استان تهران، شرکت سهامی مدیریت منابع آب، معاونت پژوهش و مطالعات پایه (طرح تحقیقات کاربردی).

مزیدی ، الف و همکاران(۱۳۸۸) بررسی سالانه و فصلی خشکسالی در نیمه غربی استان کرمان، همایش منطقهای بحران آب و خشکسالی ، ۳۱ اردیبهشت دانشگاه آزاد اسلامی رشت.

ملکی نژاد، ح.، کریمی، م.، بررسی شدت و فراوانی خشکسالی و تطابق زمانی آن در نیمه شمال و جنوب غرب ایران. پنجمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

Brunini, O., Pinto, S., Zullo, J., Barbano, M.B.P., Camargo, A., Rogerio., B., Pedro, M., Giuseppe, P., 2000. Drought Quantification And Preparedness In Brazil- The Exampele Of Sao Paulo State, Proceedings of an Expert Group Meeting, V. 1, p. 89-103.

Dracup, J.A., Lee, K.S., Paulson, E.G., Jr. 1980. On the definitions of droughts. Water Resources Research. 16: 2. 297-302.

Edvard, D., 1993., Spi Defined, Chapter 3 of Master's thesis, National Drought Mitigation center Mckee, T.B., Doseken, N.J., Kleist, J., 1995. "Drought Monitoring With Multiple Time Scales". In:Proc. 9th Conf. On Applied Climatology, January: 15-20,1995. American Meteorological Society, Massachusetts, 233-236 pp.

Gillete, H.P., 1950. A Creeping Drought Under Way. Water and Sewage Works. 97: 104-105.

Natale, H.K., Yew Gan, T., 2003. Drought Indices And Their Application To East Africa. International Journal of Climatology. 23: 26-33

Wolfgang Knorr, M.S., Arnell, N.W., Prentice, I.C., 2006. A Climate Change Risk Analysis For World Ecosystems. Physical and Biological Sciences, Environmental Sciences. 19 p.

Climate Change Assessment Using Anomalies and Moving Averages

Case Study: Balochistan Cities

Chakavak Khajehamiri Khaledi[1], Mohammad Reza Salari Fanoodi[2]

Assistant Professor, Department of Oceanography, Faculty of Marine Science, Chabahar Maritime University, Chabahar, Iran

Chabahar Marine Synoptic Meteorology Department, Chabahar, Iran

* Corresponding author: c.khajehamiri@cmu.ac.ir

Abstract

The aim of this research is to investigate the trend of climate change in the past four decades in major cities of Balochistan using anomaly and moving average. In the present article, using the 40-year precipitation time series from 1983 to 2022, the prediction and spread of drought and wet weather in Balochistan has been investigated by drawing anomaly and moving average graphs. For this purpose, monthly, seasonal and annual data of 10 cities in the Balochistan region during the period 1984-2023 were extracted from the PERSIANN remote sensing database. After forming the data bank, statistical calculations and Kendall and Slope Sense indices were prepared. The results of this study showed that for most cities in the region, the continuity of wet and dry periods is similar and has been higher than the continuity in recent years. The pattern and trend of changes in the 3, 5 and 7-year averages of 30-year rainfall in the Balochistan region shows that the most rainfall changes have been related to several years. The 5-year average in these regions shows a decreasing trend of climate change. The 7-year average graph in these regions shows longer periods of wet and dry periods.

Keywords: Balochistan, Iran, Anomalies , Moving Averages, Rainfall, Man Kendal

تأثیر تغییرات اقلیمی بر تولید خرما در جنوب استان سیستان و بلوچستان: تحلیل روند و راهکارهای سازگاری

راشد دهانی[۱]، کمال امیدوار[۲] * ، غلامعلی مظفری[۳]، ایمان روستا[۴]

۱- دانشجوی دکتری اقلیم شناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران
۲- استاد گروه جغرافیا ،دانشگاه یزد ،یزد، ایران
۳- استاد گروه جغرافیا ،دانشگاه یزد ،یزد، ایران
٤- دانشیار گروه جغرافیا ،دانشگاه یزد ،یزد، ایران

آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول (komidvar@yazd.ac.ir)

چکیده

کشاورزی به عنوان یکی از ارکان اصلی اقتصاد کشورها، شدیداً متأثر از شرایط آب و هوایی است. عوامل اقلیمی نقش تعیین‌کننده‌ای در رشد و بهره‌وری محصولات کشاورزی ایفا می‌کنند، به طوری که عملکرد مطلوب گیاهان تنها در دامنه‌های خاصی از این عوامل محقق می‌شود و خارج شدن از این محدوده به کاهش کمّی و کیفی محصول منجر می‌گردد. پدیده گرمایش جهانی به عنوان یکی از جدی‌ترین چالش‌های محیط زیستی عصر حاضر، با تغییر آستانه‌های اقلیمی، تحولات عمیقی در روند رشد و تولید محصولات کشاورزی ایجاد کرده است. در این پژوهش با استفاده از داده‌های دما، بارش، رطوبت نسبی و عملکرد خرما در شهرستان‌های ایرانشهر و سرباز طی دوره ده‌ساله (۱۴۰۱-۱۳۹۲) با استفاده از آزمون ناپارامتری من-کندال، روند تغییرات تحلیل شده است. یافته‌ها نشان از افزایش معنادار دما و رطوبت و همچنین تغییر الگوی بارش‌ها، به ویژه بارش‌های مونسونی تابستانه دارد که همزمانی آن با دوره بحرانی رسیدگی خرما، کاهش محسوس تولید را در هر دو شهرستان به همراه داشته است. در مجموع، تغییرات اقلیمی اخیر به عنوان تهدیدی جدی برای پایداری تولید خرما در منطقه شناسایی شده و اجرای راهکارهای سازگاری را ضروری ساخته است.

کلیدواژه‌ها: تغییرات اقلیمی، تولید خرما، استان سیستان و بلوچستان، آزمون من-کندال، راهکارهای سازگاری.

مقدمه

سیستم اقلیمی به عنوان مجموعه پیچیده‌ای از متغیرهای جوی در بازه‌های زمانی بلندمدت، تأثیر بسزایی در تعیین الگوهای حیات در هر ناحیه دارد (عزیزی، ۱۳۸۳). از اواخر قرن نوزدهم میلادی، شاهد دگرگونی‌های عمده در نظام اقلیمی کره زمین بوده‌ایم که موجب تحول در سامانه‌های بارشی، نوسانات دمایی و تغییرات فشار در پهنه‌های آبی شده است (گودرزی، ۲۰۱۱). در شرایط کنونی، چالش تأمین امنیت غذایی و تولیدات کشاورزی که ارتباط تنگاتنگی با تحولات اقلیمی دارد، به یکی از دغدغه‌های اصلی جامعه جهانی تبدیل شده است (کوزه‌گران و همکاران، ۱۳۹۶). پدیده تغییر اقلیم به تغییرات پایدار و معنادار در میانگین پارامترهای هواشناسی در مقیاس زمانی بلندمدت و در سطح منطقه‌ای یا جهانی اطلاق می‌شود (امیدوار و همکاران، ۱۳۹۲). از ویژگی‌های بارز این پدیده می‌توان به تغییر توزیع مکانی و زمانی عناصر جوی و افزایش تکرار پدیده‌های حدی اشاره کرد (WMO، ۱۹۹۸). بر مبنای یافته‌های هیئت بین‌الدولی تغییرات اقلیمی (IPCC)، شدت این تحولات در آینده افزایش خواهد یافت و پیش‌بینی‌ها حاکی از افزایش ۱.۴ تا ۵.۸ درجه‌ای دمای کره زمین تا پایان قرن حاضر است (کوتی، ۲۰۱۱). بخش کشاورزی به عنوان آسیب‌پذیرترین بخش در برابر نوسانات جوی، بیشترین تأثیرپذیری را از این تغییرات تجربه می‌کند (ملازهی و همکاران، ۱۴۰۳). نوسانات اقلیمی از طریق تأثیر بر دما، توزیع بارش‌ها و تغییر دوره‌های رشد گیاهان، بازدهی و میزان تولید محصولات زراعی و باغی را تحت الشعاع قرار می‌دهد (اشتاینر و پست، ۲۰۰۹). بر اساس تحلیل‌های انجام شده، در صورت عدم اجرای راهکارهای مؤثر برای تعدیل گرمایش جهانی، شاهد کاهش حدود ۱۶ درصدی تولیدات کشاورزی تا سال ۲۰۸۰ خواهیم بود (کلین، ۲۰۱۷). درخت خرما (Phoenix dactylifera) به عنوان یکی از محصولات استراتژیک مناطق گرمسیری، جایگاه ویژه‌ای در اقتصاد کشاورزی ایران دارد. آمارهای سال ۲۰۱۷ نشان می‌دهد ایران با تولید سالانه بیش از ۱.۳۵ میلیون تن، پس از مصر در رتبه دوم تولید جهانی این محصول قرار دارد (سقا و همکاران، ۱۴۰۲). در این میان، استان سیستان و بلوچستان با سهم ۱۸.۶ درصدی از کل تولید کشور، پیشتاز تولید خرما در ایران محسوب می‌شود (سالنامه آماری وزارت جهاد کشاورزی، ۱۴۰۲). تحولات اقلیمی اخیر شامل گرمایش جهانی، تغییر الگوهای بارشی و افزایش فراوانی پدیده‌های حدی، چالش‌های جدی برای باغداران خرما ایجاد کرده است. این تغییرات منجر به کاهش منابع آب زیرزمینی، طولانی‌تر شدن دوره‌های خشکسالی، اختلال در چرخه رشد طبیعی نخل و در نهایت تهدید معیشت هزاران خانوار کشاورز در منطقه شده است. مطالعات گسترده‌ای در سطح ملی و بین‌المللی به بررسی تأثیرات تغییرات آب‌وهوایی بر محیط طبیعی و بخش کشاورزی پرداخته‌اند. این پژوهش‌ها به‌وضوح نشان می‌دهند که تغییر اقلیم بر پارامترهای دما و بارش تأثیر گذاشته و پیامدهای قابل‌توجهی برای بخ سیستم اقلیمی به عنوان مجموعه پیچیده‌ای از متغیرهای جوی در بازه‌های زمانی بلندمدت، تأثیر بسزایی در تعیین الگوهای حیات در هر ناحیه دارد (عزیزی، ۱۳۸۳). از اواخر قرن نوزدهم میلادی، شاهد دگرگونی‌های عمده در نظام اقلیمی کره زمین بوده‌ایم که موجب تحول در سامانه‌های بارشی، نوسانات دمایی و تغییرات فشار در پهنه‌های آبی شده است (گودرزی، ۲۰۱۱). در شرایط کنونی، چالش تأمین امنیت غذایی و تولیدات کشاورزی که ارتباط تنگاتنگی با تحولات اقلیمی دارد، به یکی از دغدغه‌های اصلی جامعه جهانی تبدیل شده است (کوزه‌گران و همکاران، ۱۳۹۶). پری و همکاران (۲۰۰۴) در مطالعه‌ای پیش‌بینی کردند که تغییرات اقلیمی می‌تواند منجر به کاهش ۲۰-۵۰ درصدی تولید گندم دیم و ۱۰-۴۰ درصدی گندم آبی در سطح جهانی شود. اورلندی و

همکاران (۲۰۰۵) با مطالعه درختان زیتون نشان دادند که تغییرات اقلیمی موجب افزایش درجه‌روزهای رشد و انباشت گرمای بیشتر در گیاهان می‌شود. مطالعات منطقه‌ای نیز نتایج مشابهی را نشان می‌دهند. فینگر و اشمیت (۲۰۰۷) در فلات سوئیس پیش‌بینی کردند که تغییرات اقلیمی تا سال ۲۰۵۰ موجب افزایش عملکرد گندم و کاهش تولید ذرت دیم خواهد شد. پترسون و همکاران (۲۰۰۸) نیز تغییرات قابل‌توجهی در محدوده کشت گیاهان در قاره اروپا تحت تأثیر تغییر اقلیم گزارش کردند. در زمینه خرما، شعبانی و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از مدل‌های CMIP۵ و CLIMEX نشان دادند که تغییر اقلیم تهدید جدی برای کشت نخل خرما در مناطق گرمسیری مانند عربستان محسوب می‌شود. مطالعات اخیر مانند پژوهش آلبد و همکاران (۲۰۱۷) و آلموتاوا (۲۰۲۲) نیز حساسیت فزاینده نخل خرما به تغییرات اقلیمی را تأیید کرده‌اند.

در ایران نیز پژوهش‌های متعددی به بررسی اثرات تغییر اقلیم پرداخته‌اند. مظفری و همکاران (۱۳۹۲) با استفاده از مدل LARS-WG پیش‌بینی کردند که در استان سیستان و بلوچستان میانگین دمای سالانه حدود ۰.۳ درجه سلسیوس افزایش خواهد یافت. شمس‌الدینی و مزیدی (۱۳۹۴) نشان دادند که افزایش روزهای با دمای بالای ۴۵ درجه سانتی‌گراد موجب کاهش عملکرد نخل خرما و افزایش بیماری‌هایی مانند خشکیدگی خوشه می‌شود. مطالعات آینده‌نگر نیز نتایج هشداردهنده‌ای ارائه کرده‌اند. محبی (۱۳۹۸) پیش‌بینی کرد نیاز آبی نخیلات اهواز تحت سناریوهای ۴.۵RCP و ۸.۵RCP به میزان ۵ تا ۸ درصد افزایش خواهد یافت. حمیدیان‌پور و همکاران (۱۴۰۱) نیز نشان دادند که کیفیت اقلیمی مناسب برای کشت خرما در جنوب شرق ایران کاهش خواهد یافت. نخل خرما به عنوان محصول استراتژیک و پایه معیشت جوامع روستایی جنوب سیستان و بلوچستان، با تهدیدات جدی تغییرات اقلیمی مواجه است. افزایش دما، کاهش بارش‌ها و تغییر الگوهای آب‌وهوایی موجب کاهش عملکرد و کیفیت محصول شده‌اند (سقا و همکاران، ۱۴۰۲؛ گودرزی، ۲۰۱۱). با وجود حجم قابل‌توجه مطالعات در زمینه تغییر اقلیم و کشاورزی، تحقیقات محدودی به‌صورت خاص به اثرات تغییر اقلیم بر نخل خرما در جنوب استان سیستان و بلوچستان پرداخته‌اند. این در حالی است که این منطقه به‌عنوان قطب اصلی تولید خرما در کشور، آسیب‌پذیری بالایی در برابر تغییرات اقلیمی دارد. بنابراین، مطالعه حاضر با تمرکز بر شهرستان های ایرانشهر و سرباز به پر کردن این شکاف تحقیقاتی کمک خواهد کرد. لذا انجام پژوهش‌های علمی مبتنی بر شواهد و با به‌کارگیری روش‌های تحلیلی- میدانی به منظور تدوین راهکارهای سازگاری پایدار با این تغییرات اقلیمی، ضرورتی انکارناپذیر محسوب می‌شود.

مواد و روشها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه این پژوهش، شهرستان‌های ایرانشهر و سرباز در جنوب استان سیستان و بلوچستان است جدول ۱. شهرستان‌های ایرانشهر و سرباز ، با وجود مجاورت جغرافیایی، دارای ویژگی‌های اقلیمی متمایزی هستند. شهرستان ایرانشهر دارای اقلیم خشک و بیابانی گرم با تابستان‌های بسیار طولانی، گرم و سوزان و زمستان‌های کوتاه و معتدل است. بارش در این منطقه بسیار کم و عمدتاً محدود به فصل زمستان و بهار می‌باشد. در مقابل، شهرستان سرباز تحت تأثیر بادهای مرطوب

موسمی اقیانوس هند، دارای اقلیمی نیمه‌خشک با تابستان‌های گرم و مرطوب و زمستان‌های معتدل است. بارش در سرباز به‌طور قابل توجهی بیشتر از ایرانشهر بوده و غالباً به صورت رگبارهای شدید تابستانه ظاهر می‌شود. این تفاوت‌های اقلیمی، این دو شهرستان را به بستر مناسبی برای مطالعات تطبیقی در زمینه‌های محیط زیستی و کشاورزی تبدیل کرده است.

جدول ۱- مشخصات ایستگاه های منتخت

ردیف	موقعیت	عرض	طول	ارتفاع از سطح دریا (متر) ایستگاه سینوپتیک
۱	ایرانشهر	۲۷	۶۱	۵۹۱.۱
۲	سرباز	۲۶	۶۱	۴۰۶

در این بررسی، انتخاب شهرستان‌ها برمبنای دسترسی به داده های زراعی و داده های اقلیمی ماهانه ایسیتگاه‌های هواشناسی در دوره زمانی ۲۰۲۲ – ۲۰۱۳ انتخاب شده است .

داده هاو روش کار

برای انجام این تحقیق داده های اقلیمی شهرستان های ایرانشهر و سرباز شامل متوسط دما، بارش، رطوبت نسبی از سازمان هواشناسی استان سیستان و بلوچستان اخذ گردید. همچنین داده های مربوط به سطح زیر کشت، تولید و عملکرد محصول خرما از سازمان جهاد کشاورزی استان سیستان و بلوچستان به تفکیک هرشهرستان از سال ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۲ دریافت شد. سپس برای تحلیل روند عناصر اقلیمی و عملکرد محصول خرما از آزمون پارامتری و ناپارامتری من کندال استفاده شده. در آزمون های ناپارامتری فرض نرمال بودن داده ها وجود ندارد و می توان از آن برای داده هایی با مقادیر پرت نیز استفاده نمود اما از آزمون های پارامتری تنها زمانی استفاده می شود که داده ها دارای توزیع نرمال باشند و مقادیر پرت در داده ها وجود نداشته باشد.

آزمون من کندال

برای بررسی وجود یا عدم وجود روند در سری های زمانی از دو روش پارامتری و ناپارامتری استفاده می‌نمایند. روش‌های پارامتری عمدتا بر اساس رابطه رگرسیونی بین سری داده ها با زمان استوار می باشند. روش های ناپارامتری از کاربرد نسبتا وسیعتر و چشمگیرتری نسبت به روش های پارامتری برخوردارند. برای سری‌هایی که توزیع آماری خاصی بر آنها قابل برازش نیست و چولگی یا کشیدگی زیادی دارند، استفاده از روش های ناپارامتری مناسبتر است. آزمون من کندال یکی از پرکاربردترین روش های ناپارامتری تحلیل روند سری های زمانی به شمار می رود .آزمون من-کندال ابتدا توسط من ,1945). (Mann ارائه و سپس توسط کندال(Kendall , 1975) بسط و توسعه یافت .این روش بطور متداول و گسترده در تحلیل روند سری های هیدرولوژیکی و هواشناسی بکار گرفته می -شود (Lettenmaier et al., 1994). از نقاط قوت این روش می

توان به مناسب بودن کاربرد آن برای آن دسته از سری های زمانی که از توزیع آماری خاصی پیروی نمی کنند، اشاره نمود. اثر پذیری ناچیز این روش از مقادیر حدی که در برخی از سری های زمانی مشاهده می گردند نیز از دیگر مزایای استفاده از این روش است(Turgay and Ercan,2005). فرض صفر این آزمون بر تصادفی بودن و عدم وجود روند در سری داده ها داللت دارد پذیرش فرض یک (رد فرض صفر) دال بر وجود روند در سری داده ها می باشد.

مراحل انجام آزمون من کندال برای محاسبه روند به شرح زیر است :

الف) محاسبه اختالف بین تک تک مشاهدات با همدیگر و اعمال تابع عالمت و استخراج پارامتر sبه شرح زیر:

$$s = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^{n} \mathrm{sgn}(x_j - x_k) \qquad (۱)$$

که n تعداد مشاهدات سری، و x_j و x_k به ترتیب داده‌های j ام و k ام سری می‌باشند. تابع علامت sgn نیز به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\mathrm{sgn}(x_j - x_k) = +1 \qquad (xj\text{-}xk) > 0 \qquad (۲)$$

$$\mathrm{sgn}(x_j - x_k) = 0 \qquad (xj\text{-}xk) = 0$$

$$\mathrm{sgn}(x_j - x_k) = -1 \qquad (xj\text{-}xk) < 0$$

۲ - محاسبه واریانس S با توجه به حجم نمونه (<۱۰n یا ≤۱۰n) و وجود داده‌های تکراری

در مرحله بعد محاسبه واریانس S توسط یکی از روابط زیر محاسبه شد:

$$\mathrm{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i-1}^{m} t(t-1)(2t+5)}{18} \qquad n > 10 \qquad (۳)$$

$$\mathrm{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \qquad n < 10 \qquad (۴)$$

n: تعداد داده‌های مشاهده‌ای

m: تعداد سری‌هایی که در آن‌ها حداقل یک داده تکراری وجود دارد.

t: فراوانی داده‌ها با ارزش یکسان.

محاسبه آماره Z استاندارد شده برای تعیین معناداری روند

در نهایت نیز آماره Z به کمک یکی از روابط زیر استخراج می‌شود.

$$z = \frac{s-1}{\sqrt{\mathrm{var}(s)}} \qquad S > 0 \qquad (۵)$$

$$S = 0 \qquad z=0$$

$$S < 0 \qquad z = \frac{s+1}{\sqrt{var(s)}}$$

با فرض دو دامنه آزمون روند، فرضیه صفر در صورتی پذیرفته می‌شود که شرط زیر برقرار باشد:

$$|z| < z_{a/2} \qquad (۶)$$

نتایج آزمون به این صورت تفسیر می‌شود:

- اگر $|Z| \geq Z\alpha/2$، فرض صفر رد شده و وجود روند معنادار تأیید می‌شود

- مقدار مثبت Z نشان‌دهنده روند صعودی و مقدار منفی آن حاکی از روند نزولی است

- سطوح معناداری متداول ۹۵٪ و ۹۹٪ هستند (من، ۱۹۴۵؛ کندال، ۱۹۷۰).

نتایج و بحث

با توجه به نتایج آزمون من-کندال جدول ۳ عناصر اقلیمی (دما، بارش و رطوبت) و داده های کشاورزی (تولید خرما) در بازه زمانی ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۲ عناصر اقلیمی در هر دو شهرستان شهرستان روند افزایشی داشته‌اند این افزایش در مورد دما و بارش در ایرانشهر بسیار قویتر و معنادارتر بوده است. میزان تولید خرما در شهرستان های ایرانشهر، و سرباز یک روند کاهشی معناداری را نشان می دهند.

جدول ۳- آماره S من- کندال

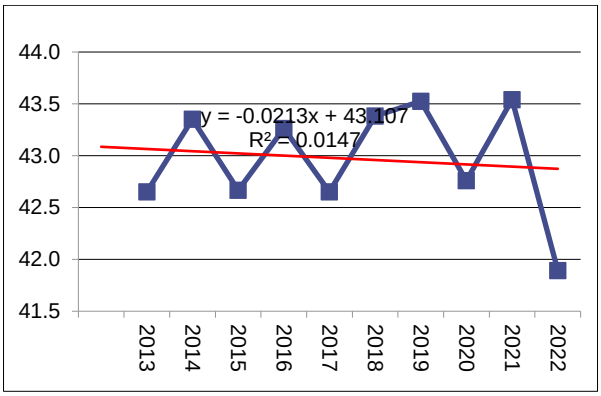
شهرستان	دما	بارش	رطوبت	خرما
ایرانشهر	↑۱۹	↑۲۴	↑۷	↓-۴
سرباز	↑۱۱	↑۱۹	↑۷	↓-۴

با تحلیل داده های اقلیمی(بارش، دما و رطوبت) و کشاورزی (تولید خرما) در بازه زمانی ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۲، در شهرستان های ایرانشهر و سرباز می‌توان به نتایج زیر دست یافت.

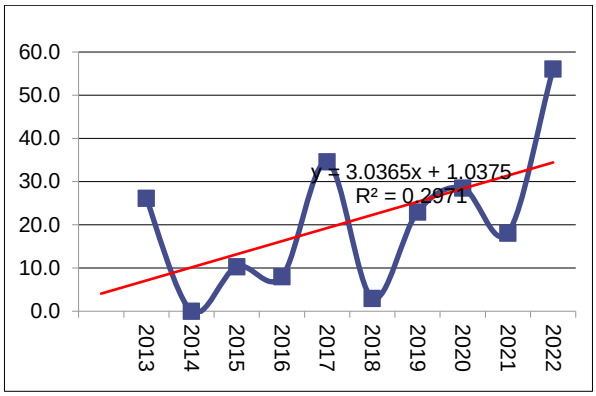
شهرستان ایرانشهر

نتایج حاصل از آزمون من-کندال (S = 24) و معادله روند(y = 3/0365x + 1/0375) روند افزایشی قوی در بارش مشاهده می‌شود. اما ضریب تعیین (R^2 = 0/2971) نشان می‌دهد تنها ۲۹.۷۱٪ از تغییرات توسط این روند خطی قابل توضیح است که حاکی از نوسانات قابل توجه در الگوی بارش است(شکل ۲). داده های دما با مقدار S=19 و معادله روند y = 2.5252x

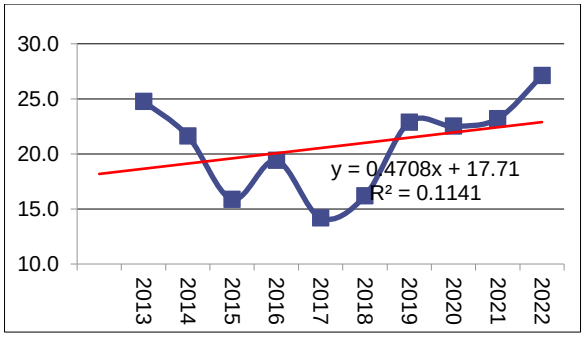
10.068 + افزایش مداوم دما را نشان می‌دهد. ضریب تعیین پایین (R^2=۰.۲۰۱۹) بیانگر آن است که تنها ۲۰.۱۹٪ از تغییرات دمایی از این روند خطی تبعیت می‌کند(شکل ۳). همچنین در داده های رطوبت نسبی شهرستان ایرانشهر با مقدار آماره S = ۷ و معادله روند y = 0.4027x + 19.547، روند افزایشی ملایمی مشاهده می‌شود. ضریب تعیین بسیار پایین (R^2=۰.۰۹۵۴) نشان می‌دهد که تنها ۹.۵۴٪ از تغییرات رطوبت توسط این روند قابل توضیح است(شکل ۴). عملکرد خرما با مقدار S= -۴ و معادله روند y = -1317.5x + 22729 کاهش مستمری را نشان می‌دهد. ضریب تعیین نسبتاً بالاتر (R^2=۰.۴۵۰۲) حاکی از آن است که ۴۵.۰۲٪ از کاهش عملکرد از یک روند سیستماتیک پیروی می‌کند(شکل ۵). افزایش همزمان تمامی پارامترهای اقلیمی (دما، بارش و رطوبت) نشان‌دهنده تغییر الگوی آب‌وهوایی منطقه است. با وجود افزایش بارش که می‌تواند اثرات مثبتی داشته باشد، افزایش شدید دما به عنوان عامل اصلی تهدیدکننده تولید خرما شناسایی می‌شود. کاهش عملکرد خرما علیرغم افزایش بارش، نشان‌دهنده غلبه اثرات منفی افزایش دما بر اثرات مثبت افزایش بارش است.



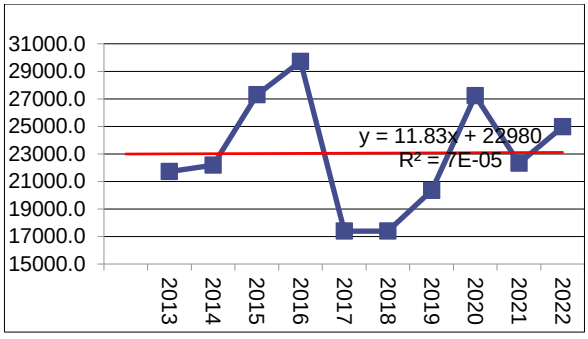
شکل ۲ روند تغییرات دمای تابستانه شهرستان ایرانشهر



شکل ۳- روند تغییرات بارش تابستانه شهرستان ایرانشهر



شکل ۴- روند تغییرات میانگین رطوبت تابستانه شهرستان ایرانشهر

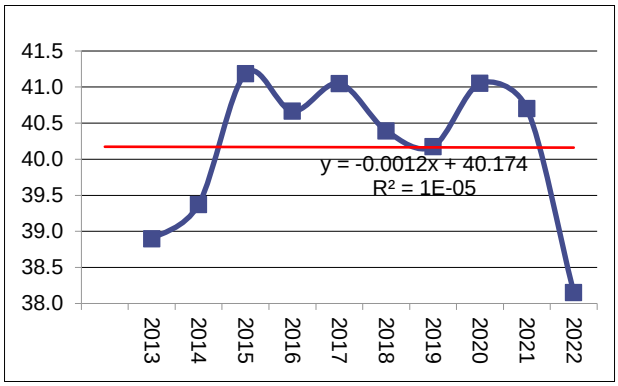


شکل ۵- روند تولید خرمادر شهرستان ایرانشهر

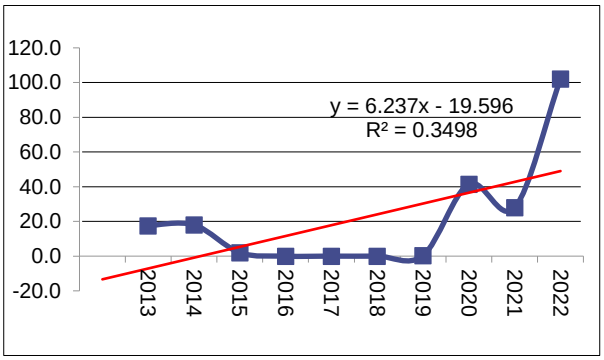
شهرستان سرباز

در بازه زمانی ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۲، شهرستان سرباز شاهد تغییرات اقلیمی معناداری بوده است که تأثیر مستقیمی بر عملکرد نخل خرما داشته است. تحلیل روند متغیرهای اقلیمی و تولید خرما نشان می‌دهد که افزایش دما و رطوبت همراه با تغییرات نامنظم بارش، به کاهش تدریجی عملکرد محصول منجر شده است. مطابق نتایج بدست آمده، دما با مقدار S = 11 روند افزایشی قوی داشته که می‌تواند موجب تنش گرمایی و افزایش تبخیر و تعرق شده باشد(شکل ۶). همزمان، میانگین رطوبت نسبی با معادله روند y = -0/2413x + 49/567 و ضریب تعیین بسیار پایین (R^2 = 0/0159) روند افزایشی ملایم اما نامنظمی را نشان می‌دهد(شکل ۷). این شرایط افزایشی دما و رطوبت می‌تواند محیط مناسبی برای شیوع آفات و بیماری‌های قارچی فراهم کند. از سوی دیگر، بارش تابستانه با معادله y = 6/237x - 19/596 و ضریب تعیین R^2 = 0/3498 روند افزایشی متوسطی داشته، اما پراکندگی داده‌ها (مقدار S= 19) نشان می‌دهد که این افزایش ثبات نداشته و با نوسانات زیادی همراه بوده است. چنین الگوی بارشی نامنظم می‌تواند چالش‌های جدی در مدیریت آبیاری و برنامه‌ریزی کشاورزی ایجاد کند(شکل ۸). در مقابل این تغییرات اقلیمی، عملکرد نخل خرما با معادله روند y = -1317/5x + 22729 و ضریب تعیین R^2 = 0/4502 روند کاهشی قوی را نشان می‌دهد (S=-4). این کاهش عملکرد که همزمان با افزایش دما و رطوبت رخ داده، نشان می‌دهد تغییرات اقلیمی تأثیر منفی بر تولید خرما داشته است. حدود ۴۵٪ از این کاهش را می‌توان با روند خطی توضیح داد که سهم قابل توجهی است(شکل ۹).

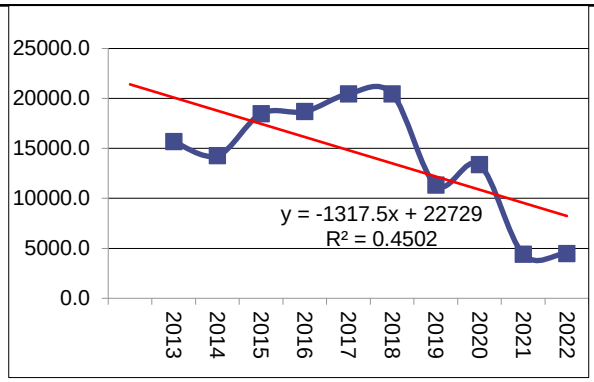
این یافته‌ها اهمیت سازگاری با تغییرات اقلیمی را در کشاورزی منطقه نشان می‌دهد. راهکارهایی مانند استفاده از ارقام مقاوم به گرمازدگی، بهبود سیستم‌های آبیاری، مدیریت بهینه آب و نظارت مستمر بر آفات و بیماری‌ها می‌تواند به کاهش خسارات کمک کند. همچنین توسعه مدل‌های پیش‌بینی برای بارش‌های نامنظم می‌تواند در برنامه‌ریزی بهتر کشاورزی مؤثر باشد. این مطالعه لزوم توجه جدی به تأثیرات تغییرات اقلیمی بر محصولات استراتژیک مانند خرما را نشان می‌دهد.

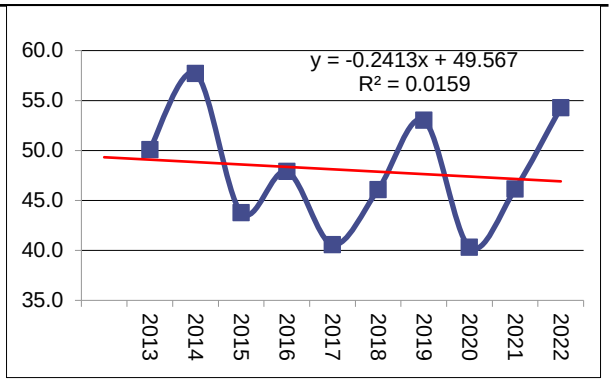


شکل ۶- روند تغییرات دمای تابستانه شهرستان سرباز



شکل ۷- روند تغییرات بارش تابستانه شهرستان سرباز





شکل ۸- روند تغییرات میانگین رطوبت تابستانه شهرستان سرباز شکل ۹- روند تولید خرمادر شهرستان سرباز

نوسانات شدید در داده‌های تولید از مقادیر بسیار بالا تا صفر می‌تواند نشان‌دهنده آسیب‌پذیری این محصول در برابر نوسانات محیطی باشد. این کاهش تولید می‌تواند به طور مستقیم یا غیرمستقیم تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله افزایش دما، تغییر در الگوی بارش، و یا افزایش رطوبت باشد. که همگی می‌توانند بر رشد، گرده‌افشانی و سلامت نخل خرما تأثیر بگذارند. نتایج نشان می‌دهد که در بازهٔ مطالعاتی ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۲، منطقه مورد مطالعه با افزایش معنادار دما و رطوبت و یک روند افزایشی ملایم اما بسیار پرنوسان در بارش مواجه بوده است. در همین بازه، تولید خرما روندی نزولی داشته که می‌تواند زنگ خطری برای بخش کشاورزی باشد.

این یافته‌ها بر لزوم اتخاذ راهبردهای سازگاری با تغییرات اقلیمی تأکید می‌کنند. راهکارهایی چون:

- استفاده از ارقام مقاوم به گرمازدگی و خشکی
- بهبود سیستم‌های آبیاری و مدیریت بهینه آب
- توسعه روش‌های هوشمند نظارت بر آفات و بیماری‌ها
- و برنامه‌ریزی برای تنوع بخشی به الگوی کشت

می‌تواند به کاهش آسیب‌پذیری بخش کشاورزی و به ویژه باغات خرما کمک شایانی کند. برای درک دقیق‌تر مکانیسم‌های این تأثیرات، انجام مطالعات همبستگی دقیق‌تر بین متغیرهای اقلیمی و عملکرد محصول در سال‌های آتی پیشنهاد می‌شود.

روند افزایشی دما باعث تبخیر و تعرق و استرس گرمایی می شود. روند افزایش بارش در منطقه باعث آبشویی خاک، افزایش رطوبت خاک و همچنین افزایش نسبی رطوبت افزایش خطر بیماری های قارچی را به دنبال دارد. مجموع عوامل یاد شده کاهش عملکرد نخل خرما را به دنبال دارد. این کاهش شدید محصول، نتیجه ترکیبی عوامل فوق است بارش‌های مونسونی

تابستانه مستقیماً به میوه آسیب زده‌اند. افزایش دما و رطوبت به غیرمستقیم از طریق تشدید تنش‌های محیطی و گسترش آفات و بیماری‌ها محصول را کاهش داده‌اند و اثر هم‌افزایی این عوامل از ظرفیت تحمل نخل خرما فراتر رفته است.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف تحلیل تأثیر تغییرات اقلیمی بر تولید خرما در شهرستان‌های انجام شد. یافته‌های تحقیق به وضوح نشان می‌دهد که منطقه در دهه اخیر (۱۴۰۲-۱۳۹۳) با تغییرات معناداری در پارامترهای اقلیمی مواجه بوده است. افزایش مداوم دما روند نامنظم و گاه شدید بارش‌های مونسونی و افزایش رطوبت نسبی مهم‌ترین این تغییرات هستند. نتایج حاصل از آزمون من-کندال حاکی از آن است که این دگرگونی‌های اقلیمی، تأثیر مستقیم و منفی بر عملکرد و تولید خرما داشته است. به طوری که در هر دو شهرستان ایرانشهر و سرباز ، یک روند نزولی معنادار در تولید این محصول استراتژیک مشاهده شد. مکانیسم اصلی تأثیرگذاری به همزمانی بارش‌های شدید تابستانه (مونسون) با دوره بحرانی رسیدگی و برداشت خرما مربوط می‌شود. این بارش‌ها علاوه بر آسیب فیزیکی مستقیم به میوه، با افزایش رطوبت محیط، شرایط را برای شیوع بیماری‌های قارچی و طغیان آفات فراهم می‌کند. از سوی دیگر، افزایش دما موجب تشدید تبخیر و تعرق و ایجاد تنش گرمایی در نخل‌ها شده است.

در مجموع، می‌توان اذعان داشت که تغییرات اقلیمی به یک تهدید جدی برای پایداری سیستم کشت نخل خرماو معیشت هزاران خانوار وابسته به آن در جنوب استان سیستان و بلوچستان تبدیل شده است. برای کاهش آسیب‌پذیری و انعطاف‌پذیری در برابر این تغییرات، اجرای راهکارهای سازگاری فعال از قبیل: معرفی و کشت ارقام مقاوم به رطوبت بالا و بیماری‌ها (مانند برحی و استعمران)، اجرای سیستم‌های آبیاری مدرن و مدیریت بهینه مصرف آب، مدیریت تلفیقی آفات (IPM)، هرس به موقع برای بهبود جریان هوا در تاج درخت، و استفاده از پوشش‌های محافظ در دوره رسیدگی میوه، اجتناب‌ناپذیر است. ادامه روند کنونی تغییرات اقلیمی بدون اجرای این راهکارها، می‌تواند خسارات جبران‌ناپذیری را به بخش کشاورزی منطقه وارد کند.

منابع

حمیدیان پور، م، نظری پور، ح، خسروی، م، وزیری مهر، م (۱۴۰۱). آینده‌نگری کشت خرما در مناطق خشک و فراخشک جنوب شرقی ایران بر اساس سناریوهای تغییر اقلیم، فصلنامه برنامه‌ریزی منطقه‌ای، سال۱۲، شماره۴۸، مرودشت:صص۳۱-۴۴.

سازمان جهاد کشاورزی استان سیستان و بلوچستان. (۱۴۰۲) آمار سطح زیر کشت، تولید و عملکرد محصول خرما

شمس الدینی، م مزیدی، ا،(۱۳۹۴)،بررسی تغییرات آب و هوایی و تاثیرات آن بر خرمای جیرفت،دومین کنفرانس ملی کشاورزی و توسعه،تهران،https://civilica.com/doc/۴۳۱۶۲۰

عزیزی، ق. (۱۳۸۳).تغییر اقلیم، تهران، انتشارات: قومس.

کوزه گران، س .(۱۳۹۶). پایش تغییراقلیم و تاثیر پارامترهای حدی اقلیمی بر تغییرات زمانی مکانی کشت و عملکرد زعفران در دوره های آتی، استاد راهنما: دکتر محمد موسوی بایگی، دانشگاه فردوسی.

گودرزی، م، فاتحی فر، آ. (۲۰۱۱). ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر متغیرهای هواشناسی و بارش‌های حداکثر تحت سناریوهای-جدید انتشار RCPدر حوضه آبریز آذرشهر. فصلنامه انسان و محیطزیست، صص-111. https://sid.ir/paper/1043193/fa 127

محبی، ع. (۱۳۹۸). بررسی اثر تغییر اقلیم بر نیاز آبی نخیلات در منطقه اهواز، نشریه پژوهش‌های حفاظت آب‌وخاک، جلد بیست و ششم، شماره چهارم، ۱۳۹۸، ۱۵۳- ۱۳۵. DOI: 10.22069/jwsc.2019016469.3176

مظفری، غ، تقی زاده، ز.، شفیعی، ش (۱۳۹۲). ارزیابی شرایط خشک‌سالی در استان سیستان و بلوچستان طی(۱۴۱۰-۱۳۹۱) با استفاده از ریزمقیاس نمایی داده‌های مدل گردش عمومی جو، فصلنامه علمی-پژوهشی مطالعات جغرافیایی دوره ۲۴ ،شماره ۹۳، بهار ۱۳۹۴، صفحات ۱۱۴-۱۰۱.

ملازهی، ع، نظری پور، ح و خسروی، م. (۱۴۰۳). راهبردها و محدودیت‌های سازگاری با تغییر اقلیم در میان نخل کاران جنوب شرق ایران .روستا و توسعه پایدار فضاdoi: 10.22077/vssd.2024.7553.1247

میدوار، ک، جوانشیری، ن، بابایان، ا. (۱۳۹۲). بررسی تغییر اقلیم در دوره ۲۰۳۰-۲۰۱۱میلادی در جنوب استان کرمان با استفاده از ریزمقیاس نمایی مدل GCM، نخستین کنفرانس ملی آب و هواشناسی، کرمان، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته.

Allbed A. Kumar L. and Shabani F. 2017. Climate change impacts on date palm cultivation in Saudi Arabia. The Journal of Agricultural Science. 155(8): 1203-1218.

Almutawa A. A. 2022. Date production in the Al-Hassa region, Saudi Arabia in the face of climate change. Journal of Water and Climate Change. 13(7): 2627-2647.

Cline, W. R. (۲۰۱۷) Global warming and agriculture: Impact estimates by country Peterson Institute.

Finger, R. and Schmid, S. 2007. Modeling agricultural production risk and the adaptation to climate change. Presentation at the EAAE seminar management of climate risks in agriculture. Berlin, Germany, july 5-6.

Kotir, J. H. (2011) Climate change and variability in Sub-Saharan Africa: a review of current and future trends and impacts on agriculture and food security. Environment, Development and Sustainability. 13(3): 587-605.

Orlandi, F.Ruga, L. Romano, B. Fornaciari, M. 2005. Oolive flowering as an indicator of local climatic change. Theoretical andApplied Climatology, 81: 169-176.

Parry, M., Rosenzweig, C., Inglesias, M., Fichernd, G., Livemore, M and Gischer, G. 2004. Effect of climate change on global environmental change, 14: 53-67.
Peterson AT, Stewart A, Mohamed KI, Arau´ jo MB (2008) Shifting Global Invasive Potential of European Plants with Climate Change. PLoS ONE 3(6):e2441. doi:10.1371/journal.pone.0002441.
Shabani F, Kumar L, Taylor S (2012) Climate Change Impacts on the Future Distribution of Date Palms: A Modeling Exercise Using CLIMEX. oS ONE 7(10) 1-12.
Steltzer, H. and Post, E. (2009) Seasons and life cycles. Science. 324(5929): 886-887

The Impact of Climate Change on Date Palm Production in Southern Sistan and Baluchestan Province: Trend Analysis and Adaptation Strategies

Rashed Dehani [1], Kamal Omidvar [2]*, Gholamali Mozafari [3], Iman Roosta [4]

1-PhD Student in Climatology, Yazd University, Yazd, Iran

2- Professor, Department of Geography, Yazd University, Yazd, Iran

3- Professor, Department of Geography, Yazd University, Yazd, Iran

4- Associate Professor, Department of Geography, Yazd University, Yazd, Iran

Email address of the corresponding author (komidvar@yazd.ac.ir)

Abstract

Agriculture, as a fundamental pillar of national economies, is highly influenced by climatic conditions. Climatic factors play a decisive role in the growth and productivity of agricultural crops, such that optimal plant performance is achieved only within specific ranges of these factors. Deviation from these ranges leads to a quantitative and qualitative decline in production. The phenomenon of global warming, as one of the most serious environmental challenges of the present era, has brought about profound transformations in the growth and production processes of agricultural products by altering climatic thresholds.In this study, using data on temperature, precipitation, relative humidity, and date yield in the counties of Iranshahr and Sarbaz over a ten-year period (2013-2022), the trends of changes were analyzed using the non-parametric Mann-Kendall test. The findings indicate a significant increase in temperature and humidity, as well as a change in precipitation patterns, particularly the summer monsoon rains. The concurrence of these rains with the critical ripening period of dates has led to a noticeable decrease in production in both counties. Overall, recent climate changes have been identified as a serious threat to the sustainability of date production in the region, making the implementation of adaptation strategies essential.

Keywords: Climate Change, Date Production, Sistan and Baluchestan Province, Mann-Kendall Test, Adaptation Strategies.

تعیین عوامل هواشناسی مؤثر بر عمق برف در شمال غرب ایران

حبیب شیری[۱]، سمانه ثابت قدم[۲] و مریم قرایلو[۲]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد هواشناسی، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران
۲- دانشیار، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران

آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول (Habib.shiri@ut.ac.ir)

چکیده

برف یکی از مهم‌ترین منابع تأمین آب سطحی و زیرزمینی در مناطق کوهستانی است و تغییرات آن می‌تواند آثار جدی بر مدیریت منابع آب داشته باشد. تعیین پارامترهای مؤثر بر برف در کاربردهای آب‌شناختی، اقلیمی و مدیریت منابع آب از اهمّیّت ویژه‌ای برخوردار است. هدف از پژوهش حاضر تعیین عوامل هواشناسی موثر بر عمق برف در شمال غرب ایران در دوره ۱۹۸۷ تا ۲۰۲۳ است. برای دستیابی به این هدف از داده‌های ۱۷ ایستگاه هواشناسی در استان‌های آذربایجان غربی، شرقی و اردبیل استفاده شده است. همچنین برای شناسایی عوامل مؤثر روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) به‌کار رفته است و شرایط حدی میزان برف با استفاده از داده‌های بازتحلیل نیز انجام شده است.

نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی نشان می‌دهد چهار مؤلفه اصلی در مجموع ۷۲ درصد از وردایی تغییرات عمق برف را توضیح می‌دهند. مؤلفه اوّل بیانگر نقش دما در میزان عمق برف است. مؤلفه دوّم شامل میزان ابرناکی، ساعات آفتابی و درصد رطوبت نسبی است. مؤلفه‌های سوّم و چهارم به ترتیب نقش باد و میزان بارش را بر عمق برف در شمال غرب کشور نشان می‌دهد. از میان این مؤلفه‌ها، دما (۲۶ درصد) و بارش (۱۲/۶ درصد) بیشترین تأثیر را بر عمق برف دارند. بررسی شرایط همدیدی در سال‌های حدی نشان داد که در زمستان ۱۹۹۲ با بیشینه عمق برف، نفوذ پرفشار سطحی و کاهش دما به کمتر از ۵- درجه سلسیوس، شرایط بارش سنگین و ماندگاری برف را فراهم کرده است؛ در حالی‌که در زمستان ۲۰۲۱ (با کمینه عمق برف)، افزایش ضخامت لایه‌های میانی و زیرین مانع نفوذ هوای سرد و تشکیل برف گسترده شده است. این نتایج نشان می‌دهد تغییرات همزمان دما و الگوهای بارشی، نقش کلیدی در کاهش تدریجی برف شمال غرب ایران دارند.

کلید واژه‌ها: تغییرات بلندمدت، عمق برف، تعداد روزهای برفی، شمال غرب ایران.

مقدمه

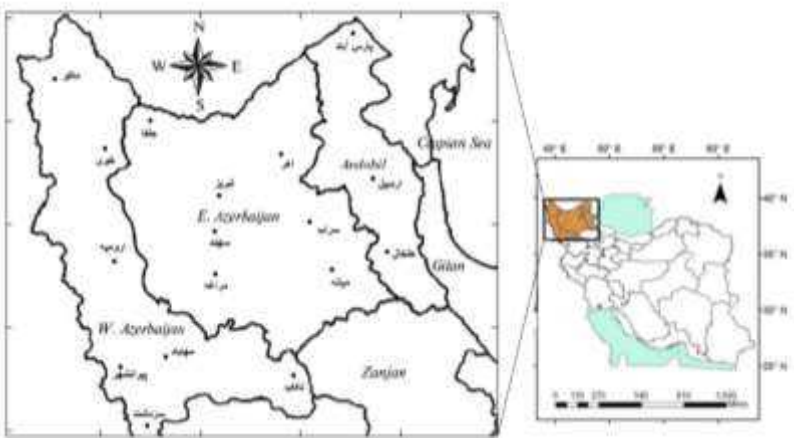
برف یکی از انواع بارش به‌ویژه در نواحی کوهستانی و مناطق مرتفع است (Domine et al., 2008) که به‌دلیل سپیدایی بالا در ترازمندی تابش جهانی اهمّیّت دارد (You et al., 2020). همچنین، برف یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر میزان ذخایر آبی و رواناب رودخانه‌ها می‌باشد (Wang et al., 2017). میزان برف که می‌تواند شامل عمق برف و پوشش برف باشد، یکی از مهمترین عوامل تأثیرگذار بر میزان ذخیره آبی، به‌ویژه در فصول گرم سال محسوب می‌شود. حداقل یک سومِ آب مصرفی جهت آبیاری باغ‌ها و زمین‌های کشاورزی در جهان از آب حاصل از ذوب برف تأمین می‌شود (Alhossaini Almodaresi et al., 2016). ذوب برف در مناطق کوهستانی طی فصل‌های بهار و تابستان، آب مورد نیاز بخش‌های مختلف شامل کشاورزی، صنایع و مصارف شهری را تأمین می‌کند (Ozdogan, 2011). از سوی دیگر، ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی برف شاملِ چگالی، عمق، محتوای آب، اسیدیته و مواد معدنی موجود در آن، اثرات قابل توجّهی بر کیفیّت آب‌های سطحی و زیرزمینی ایجاد می‌کند (Jarzyna et al., 2017). با توجه به این نکات، تعیین عوامل مؤثر بر عمق برف در کاربردهای آب‌شناختی، اقلیمی و مدیریّت منابع آب از اهمّیّت ویژه‌ای برخوردار است (Tedesco et al., 2015).

به‌دلیل وجود نوسانات سالانه در میزان برف به‌دلایل مختلف آب و هوایی، مناطق برف‌گیر بسیار آسیب‌پذیر هستند؛ به این معنا که با کاهش میزان بارش برف در بعضی سال‌ها، آب مورد نیاز حاصل از ذوب تدریجی برف تأمین نشده و بحران شدید کمبود آب به‌وجود می‌آید (Guang-Xi et al., 2020). تغییرپذیری برف می‌تواند به عوامل جوّی متفاوت مانند گردش کلّی جوّ، دمای هوا، میزان بارش، باد، تابش خورشیدی و ساعات آفتاب‌گیری مربوط باشد و از این‌رو تغییرات سالانه برف به‌خوبی منعکس‌کنندهٔ تغییرات کلی آب و هوایی در فصول سرد سال است (ارکیان و همکاران، ۲۰۱۴). نتایج مطالعات پیشین نشان می‌دهد که در پاسخ به گرمایش زمین، تعداد روزهای برفی، میزان و نوع بارش و همچنین عمق برف در بسیاری از مناطق جهان کاهش یافته است که این موضوع به‌عنوان خشکسالی برف شناخته می‌شود (Hatchet and Mc Evoy, 2018; Hatchet et al., 2022). از سوی دیگر، در برخی مناطق، افزایش پوشش برف رخ می‌دهد که می‌تواند منجر به انباشت برف، رخداد بهمن و یخبندان شود که درنتیجه خسارات جانی و مالی زیادی را موجب می‌شود (Ye et al., 2022). بنابراین، تعیین عوامل مؤثر بر عمق برف می‌تواند به درک درستی از این کمیت و نهایتاً کاهش خسارت‌های ناشی از آن منجر شود.

مواد و روش‌ها

۲-۱ منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در پژوهش حاضر شامل استان‌های آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی و اردبیل در شمال غرب ایران است که در (شکل ۱) نشان داده شده است. از ۱۷ ایستگاه هواشناسی همدیدی در این منطقه در بازه سال‌های ۱۹۸۷ تا ۲۰۲۳، برای مطالعه تغییرات ماهانه و بلندمدت عمق برف و تعداد روزهای برفی استفاده شده است.



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه. موقعیت ایستگاههای مورد استفاده در پژوهش در شکل مشخص شده است.

۲-۲ داده‌ها

داده‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر شامل سه دسته داده هستند:

متغیّرهای هواشناسی شامل میزان بارش، عمق برف، تعداد روزهای برفی، دمای هوا، فشار سطح دریا، ساعات آفتابی، سرعت باد، رطوبت نسبی، ابرناکی و دمای خاک از ایستگاه‌های همدیدی سازمان هواشناسی کشور در مقیاس ماهانه و در مکان‌های منتخب در شمال غرب ایران در بازه زمانی سال‌های ۱۹۸۷ تا ۲۰۲۳. برای تعیین نقش عوامل مؤثر بر تغییرات احتمالی برف، که به روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) انجام می‌شود از داده‌های مذکور به عنوان داده‌های ورودی استفاده می‌شود.

داده‌های بازتحلیل از شبکه جهانی NCEP/NCAR با تفکیک افقی ۲/۵ درجه شامل دمای هوا، فشارسطح دریا، رطوبت نسبی تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال، سرعت باد تراز ۱۰ متری، ابرناکی، بارش و ارتفاع ژئوپتانسیلی در ترازهای ۸۵۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال برای تحلیل فیزیکی و دینامیکی عوامل مؤثر در سال‌های حدی بیشینه و کمینه رخداد برف. این داده‌ها برای ترسیم نقشه‌های همدیدی در تحلیل شرایط حاکم بر بیشینه و کمینه عمق برف استفاده شده است.

داده‌های بارش از طرح اقلیم شناسی بارش جهانی (GPCP) با تفکیک افقی ۲/۵ درجه شامل بارش بر حسب میلیمتر بر روز در مقیاس ماهانه که برای تحلیل فیزیکی و دینامیکی عوامل مؤثر در سال‌های حدی بیشینه و کمینه رخداد برف و ترسیم نقشه‌های همدیدی برای تحلیل شرایط حاکم بر بیشینه و کمینه عمق برف استفاده شده است.

۲-۳ روش کار

الگوریتم اصلی کار برای اجرای پژوهش حاضر شامل مراحل زیر است:

بررسی کیفیّت داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌های همدیدی در ناحیه مورد مطالعه و همسان‌سازی زمانی داده‌ها برای ایستگاه-های مورد مطالعه و انتخاب دوره بلندمدت مشترک بین همه ایستگاه‌ها.

استانداردسازی داده‌ها و کاربست روش PCA برای واکاوی نقش عوامل مؤثر بر تغییرات عمق برف. روش PCA در ادامه توضیح داده می‌شود.

پس از تعیین عوامل مؤثر بر تغییرات عمق برف با استفاده از روش PCA، دو زمستان در طول دوره مورد مطالعه که دارای مقادیر حدیِ کمینه و بیشینه عمق برف هستند، شناسایی می‌شوند. عوامل هواشناسی و الگوهای همدیدی حاکم، با استفاده از داده‌های بازتحلیل به‌دقّت تحلیل و مقایسه شده تا عوامل بزرگ‌مقیاس تأثیرگذار بر عمق برف نیز تعیین شوند.

روش PCA یکی از روش‌های داده‌کاوی و روشی چند متغیّره است که هدف اصلی آن کاهش تعداد متغیّرهای مورد مطالعه و تعیین مؤلفه‌های اصلی مؤثر بر کمیت مورد مطالعه می‌باشد. با استفاده از این روش می‌توان متغیّرهای مستقل را با تعداد کمتری از متغیّرهای جدید که مؤلفه‌های اصلی نامیده شده و ناهمبسته‌اند، جایگزین نمود (Chen et al., 2018). در این روش، ضمن آنکه تعداد متغیّرها کاهش می‌یابد، مقدار وردایی موجود در داده‌های اصلی حفظ می‌شود. مؤلفه‌های ایجاد شده ترکیب خطی از متغیّرهای ورودی هستند (Lu et al., 2003). اوّلین PC موجب بیشترین تغییرات داده‌های اصلی است (Sousa et al., 2007).

شاخص KMO (Kayser-Meyer-Olkin) و آزمون بارتلت (Bartlett) روش‌هایی هستند که برای اطمینان از کافی بودن نمونه انتخاب شده در تحلیل عاملی اکتشافی مورد استفاده قرار می‌گیرند. انجام محاسبات مربوط به تحلیل عاملی اکتشافی به حجم بزرگی از داده‌ها نیازمند است. این دو آزمون، روش‌های علمی برای حصول اطمینان از کفایت نمونه منتخب می‌باشد. شاخص KMO معیاری برای مقایسه میزان همبستگی ساده و جزئی است که مقدار آن بین صفر و یک بوده و هر چقدر به یک نزدیکتر بوده و بیشتر از ۰/۵ باشد، اندازه نمونه مناسب است و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\mathrm{KMO} = \frac{\sum_{i=1}^{p}\sum_{j=1}^{p} {r^2}_{ij}}{\sum_{i=1}^{p}\sum_{j=1}^{p} {r^2}_{ij} + \sum_{i=1}^{p}\sum_{j=1}^{p} {a^2}_{ij}} \quad (۱)$$

در رابطه بالا، r_{ij} ضریب همبستگی ساده، a_{ij} ضریب همبستگی جزئی بین متغیّرهای i و j به شرط ثابت بودن سایر متغیّرها است. شاخص KMO با ضرایب همبستگی ساده رابطهٔ مستقیم و با ضرایب همبستگی جزئی رابطهٔ معکوس دارد. مقادیر بالاتر شاخص بیانگر دقّت محاسبات با استفاده از روش PCA است. اگر مقدار این شاخص بیش از ۰/۵ باشد، نشان‌دهندهٔ امکان اجرای PCA بر متغیّرهای ورودی است (Sherstha and Kazama, 2007).

در مرحله بعدی، متغیّرهای ورودی به شکلی استاندارد می‌شوند که دارای میانگین صفر و انحراف معیار یک باشند. استاندارد کردن داده‌ها باعث می‌شود که همه متغیّرها وزن یکسانی داشته باشند؛ بنابراین متغیّرهایی که بیشترین تغییرات را دارند، سهم بیشتری در تشکیل مؤلفه‌های اصلی به خود اختصاص نمی‌دهند. استاندارد کردن داده‌ها با استفاده از رابطه زیر انجام می شود:

$$Z = \frac{X-\mu}{\sigma} \quad (۲)$$

که Z معادل استاندارد شده مشاهدات، X مشاهدات خام ورودی، μ میانگین و σ انحراف معیار هر متغیّر است.

تحلیل نتایج

۳-۱ کاربست روش PCA

پیش از کاربرد روش PCA برای تحلیل مؤلفه‌های تأثیرگذار بر برف در منطقهٔ شمال غرب ایران، از آزمون شاخص KMO و ضریب بارتلت، که در بخش ۲-۳ معرفی شدند، برای ارزیابی مناسب بودن داده‌ها و اطمینان از کافی بودن نمونه‌های انتخاب شده در روش PCA استفاده شده است. همانطور که در بخش داده‌ها اشاره شد، ۱۱ متغیّر هواشناسی حاصل از ایستگاه‌های همدیدی مورد مطالعه برای توجیه تغییرات زمانی عمق برف به‌کار رفته‌اند که شامل دمای هوا، دمای خاک، تعداد روزهای برفی، ابرناکی، ساعات آفتابی، رطوبت نسبی، تندی و جهت باد، بارش، عمق برف و فشار هوا هستند. بر اساس مقادیر جدول ۱، شاخص KMO حدود ۰/۷۱ به‌دست آمده است که نشان دهندهٔ مطلوب بودن حجم نمونه برای انجام تحلیل مؤلفه‌های اصلی است. شاخص آزمون بارتلت نیز نشان می‌دهد که نتایج معنی‌دار هستند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که ماتریس همبستگی داده‌ها دارای اطلاعات معنی‌داری می‌باشد و شرایط لازم برای تحلیل مؤلفه‌های اصلی وجود دارد.

جدول ۱. نتایج آزمون شاخص KMO و ضریب بارتلت برای تعیین کفایت داده‌های نمونه. سطر اول، شاخص KMO جهت کفایت حجم نمونه، سطر دوم، آزمون بارتلت یا تقریب مجذور Chi و سطر سوم، درجه آزادی (Degree of Freedom) و سطر چهارم، سطح معنی‌داری آزمون (Significance) را نشان می‌دهد.

Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Sampling Adequacy.		708.0
Bartlett's Test of Sphericity	(Approx. Chi-Square)	607.12430
	Df	55
	Sig.	000.0

شاخص‌های آماری اولیّه و درصد وردایی هر یک از مؤلفه‌ها در جدول ۲ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، مقدار ویژه برای مؤلفه اوّل برابر با ۳/۴۳۰ می‌باشد. سایر مقادیر ویژه برای عوامل بعدی نیز در ستون کل آمده است. ستون میانی در مقادیر ویژه اولیّه، درصد وردایی (% of Variance) را مشخص می‌کند. مؤلفه اول ۳۱/۱۸۱ درصد از وردایی کل را مشخص می‌کند. چهار مؤلفه‌ای که مقدار ویژهٔ بزرگ‌تر از ۱ دارند، ۷۱/۸۴۰ درصد از وردایی کل را برآورد می‌کنند. در ستون مربوط به درصد تجمعی وردایی (Cumulative %)، هر چه مقدار به ۱۰۰ نزدیک‌تر باشد، تفسیر تغییرات با مؤلفه‌های اصلی بهتر صورت می‌گیرد. در جمع‌بندی جدول نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی می‌توان نتیجه گرفت که از داده‌های اولیّه، چهار مؤلفه اصلی استخراج می‌شود که PC1، PC2، PC3 و PC4 هستند. سهم هر یک از این مؤلفه‌ها به‌ترتیب عبارت از مؤلفه اول (PC1) با ۲۵/۷۰ درصد، مؤلفه دوم (PC2) با ۱۹/۰۴ درصد، مؤلفه سوم (PC3) با ۱۴/۵۰ درصد و مؤلفه چهارم (PC4) با ۱۲/۵۸ درصد از وردایی کل که در مجموع ۷۱/۸۴۰ درصد از وردایی کل را بر عهده دارند. این مقدار نشان می‌دهد که چهار مؤلفه اول بیشترین وردایی داده‌ها را توضیح می‌دهند و به‌طور معنی‌دار قادر به توصیف تغییرات موجود در داده‌ها هستند و برای کاهش ابعاد داده‌ها کافی هستند و بقیه مؤلفه‌ها تأثیر ناچیزی دارند. بنابراین این چهار مؤلفه به‌عنوان مؤلفه‌های اصلی انتخاب می‌شوند. مقادیر ویژه مربوط به مؤلفه‌های پنجم و بعدی کمتر از یک است، از این‌رو این مؤلفه‌ها در تحلیل نهایی در نظر گرفته نمی‌شود.

جدول ۲. شاخص‌های آماری اوّلیه و درصد وردایی محاسبه شده برای هر یک از مؤلفه‌های اصلی.

Total Variance Explained

Component	Initial Eigenvalues			Extraction Sums of Squared Loadings			Rotation Sums of Squared Loadings		
	Total	% of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %

1	3.430	31.181	31.181	3.430	31.181	31.181	2.828	25.708	25.708
2	1.846	16.783	47.964	1.846	16.783	47.964	2.095	19.045	44.753
3	1.539	13.989	61.953	1.539	13.989	61.953	1.595	14.502	59.255
4	1.088	9.887	71.840	1.088	9.887	71.840	1.384	12.585	71.840
5	0.908	8.252	80.092						
6	0.632	5.744	85.836						
7	0.556	5.053	90.889						
8	0.411	3.739	94.628						
9	0.285	2.594	97.222						
10	0.241	2.192	99.414						
11	0.064	0.586	100.000						

Extraction Method: Principal Component Analysis.

جدول ۳، ماتریس مؤلفه‌های PC1، PC2، PC3 و PC4 پس از اعمال چرخش وریمکس است که نشان دهندهٔ نقش هر یک از متغیّرهای هواشناسی مورد بررسی بر روی چهار مؤلفه اصلی است. معمولاً متغیّرهای با مقادیر همبستگی بیش از ۰/۶ به‌عنوان متغیّرهای تأثیرگذار در هر دسته انتخاب می‌شوند (Tsai et al., 2003). همانطور که مشاهده می‌شود، در دسته اوّل، متغیّرهای دمای هوا، دمای خاک و تعداد روزهای برفی و در دسته دوّم، متغیّرهای ساعات آفتابی، ابرناکی و رطوبت نسبی و در دسته سوّم، متغیّرهای تندی باد و باد بیشینه و در دسته چهارم، متغیّرهای عمق برف، بارش و فشار سطح دریا متغیّرهای تأثیرگذار هستند. بنابراین بر اساس نتایج به‌دست آمده، عوامل تأثیرگذار بر تغییرات عمق برف را بر اساس چهار عامل زیر می‌توان توجیه کرد:

الف) نقش دما. این مؤلفه به شدت با دما و دمای خاک همبستگی مثبت و با تعداد روزهای برفی همبستگی منفی دارد. این نتیجه که از مؤلفه اوّل به‌دست آمده است، رابطه معکوس میان عمق برف و دما را نشان می‌دهد. در این دسته، کاهش عمق برف با افزایش دمای میانگین عمق خاک و دمای هوا و همچنین کاهش تعداد روزهای برفی در منطقه همراه است که در تطابق با نتایج مطالعه اصغری سراسکانرود و همکاران (۱۴۰۰) است. بنابراین در جمع‌بندی نقش مؤلفه اوّل می‌توان گفت که در شرایط گرم، که با دما و دمای خاک بالا همراه است، عمق برف نیز کمتر است.

ب) نقش ابرناکی، ساعات آفتابی و درصد رطوبت نسبی. مؤلفه اصلی دوّم با پارامترهای رطوبت نسبی و ابرناکی همبستگی مثبت و با ساعات آفتابی رابطه معکوس دارد. در این دسته هیچ یک از این پارامترها به‌طور مستقیم با عمق برف در ارتباط نیست، افزایش میزان رطوبت نسبی و ابرناکی که باعث کاهش ساعات آفتابی و اُفت میزان انرژی خورشیدی دریافتی توسط سطح زمین، در طول روز می‌شود؛ موجب پایین ماندن دمای سطح و سرد بودن سطح زمین می‌گردد. این امر باعث کندتر شدن روند ذوب برف و طولانی‌تر شدن روزهای همراه با پوشش برف و افزایش تعداد روزهای برفی می شود. سپیدایی بالای برف نیز با کاهش انرژی خورشیدی دریافتی سطح زمین، این امر را شدت می‌بخشد. با توجه به ضرایب همبستگی، این مؤلفه تأثیر کمی بر عمق برف دارد.

ج) نقش باد. مؤلفه سوّم با پارامتر تندی باد رابطه مستقیم دارد. از آنجا که باد می‌تواند با انتقال برف از یک منطقه به منطقه دیگر باعث جابجایی سریع‌تر برف و کاهش عمق برف و تجمع آن در مبدأ و ایجاد کولاک و انباشت برف در مسیر حرکت شود، بنابراین انتظار می‌رود که وزش باد به صورت مستقیم روی عمق برف مؤثر باشد. افزایش تندی باد ممکن است برف را از یک منطقه به منطقه دیگر منتقل کند و باعث افزایش عمق برف شود که در مطالعهٔ (Dadic et al., 2010) بر این عامل تأکید شده است.

د) نقش بارش. در دسته چهارم عمق برف با پارامترهای فشار سطح دریا و میزان بارش مرتبط است. این مؤلفه تأثیر قابل توجهی بر عمق برف دارد. افزایش عمق برف با تغییرات میزان بارش رابطه مستقیم و با تغییرات فشار سطح دریا رابطه عکس دارد. کاهش فشار سطح دریا که غالباً با وجود کم فشار در ترازهای بالای جوّ همراه است، موجب همگرایی در سطح و حرکات صعودی می‌شود. بنابراین بر اساس انتظار افزایش بارش که در ماه‌های سرد سال عمدتاً به صورت برف می‌باشد، یکی از عواملی است که تغییرات سالانه عمق برف را توجیه می‌کند.

در جمع بندی نتایج می‌توان گفت که تحلیل مؤلفه‌های اصلی نشان می‌دهد که مؤلفه اول که شرایط گرمایی را نشان می‌دهد و مؤلفه چهارم که بیانگر شرایط بارشی است، بیشترین تأثیر را بر عمق برف دارند و به عنوان اصلی‌ترین واداشت‌های تغییرات بلندمدت عمق برف در منطقه مورد مطالعه محسوب می‌شوند. این تحلیل نشان‌دهندهٔ عوامل اصلی کنترل‌کنندهٔ تغییرات عمق برف در شمال‌غرب کشور است. لازم به اشاره است که متغیّرها علاوه بر نقش مستقیم خود بر تغییرات برف، گاهی نقش غیرمستقیم نیز دارند. همپوشانی متغیّرها در مؤلفه‌های مختلف نشان‌دهنده ماهیت پیچیده سامانه اقلیمی شمال‌غرب ایران است که در آن عوامل گرمایی، رطوبتی و دینامیکی به‌طور هم‌زمان بر تغییرات عمق برف مؤثر هستند.

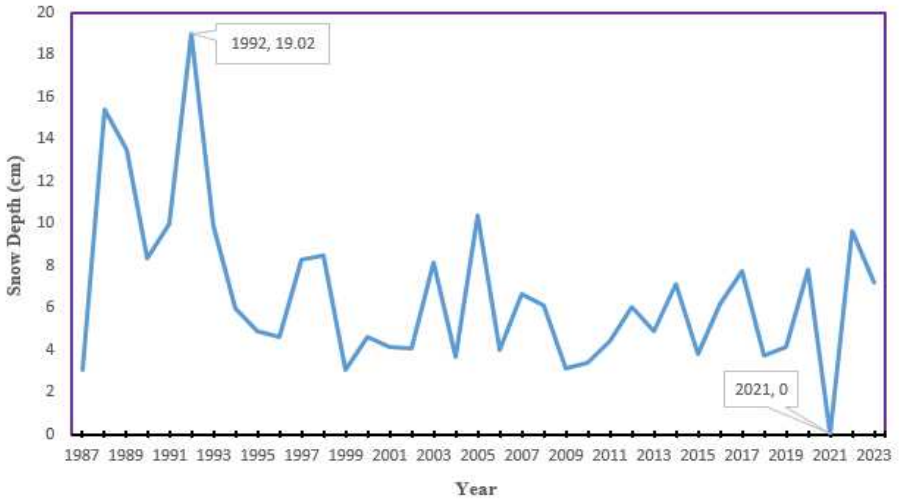
جدول ۳. ماتریس همبستگی مؤلفه‌ها برای تعیین عوامل مؤثر.

Rotated Component Matrix[a]

	Component			
	1	2	3	4
Temperature	**0.940**	-0.168	0.146	
Tsoil_m	**0.916**		0.186	0.104
Count_Snow Days	**-0.836**	0.210		0.150
Cloudy	0.163	**0.859**		0.123
Sunshine Duration	0.221	**-0.851**	0.194	
Relative Humidity	-0.422	**0.698**	-0.193	
Wind_max			**0.846**	
Wind Speed	0.180	-0.142	**0.805**	
Precipitation		0.178	0.111	**0.741**
Snow Depth	-0.325		0.213	**0.634**
Pressure_Sea level			0.197	**-0.612**

۳-۲ مطالعه سال‌های حدی عمق برف

برای تعیین سال‌های حدی دارای کمینه و بیشینه میزان عمق برف، در (شکل ۲) تغییرات بلندمدت سالانه عمق برف از سال ۱۹۸۷ تا ۲۰۲۳ نشان داده شده است. همانطور که در شکل به وضوح دیده می‌شود، سال ۱۹۹۲ به عنوان سالی با بیشترین میزان عمق برف در طول دوره مورد مطالعه با ۱۹/۰۲ سانتیمتر عمق برف و سال ۲۰۲۱ به‌عنوان سالی با کمترین میزان عمق برف با مقدار صفر در طول دوره مورد مطالعه است.



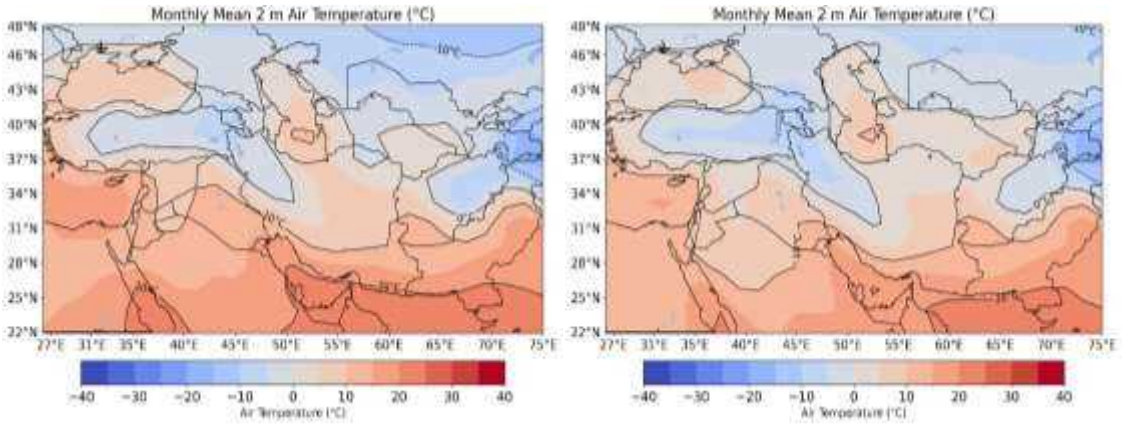
شکل ۲. تغییرات سالانه عمق برف در منطقه شمال غرب ایران در بازه سال‌های ۱۹۸۷ تا ۲۰۲۳. محور قائم، عمق برف بر حسب سانتیمتر و محور افقی سال را نشان می‌دهد.

همانطور که در بخش تحلیل مؤلفه‌های اصلی اشاره شد، نوسانات عمق برف عمدتاً توسط تغییرات دما، باد و هم‌چنین میزان بارش توجیه می‌شوند. در ادامه با بررسی دو مورد حدی بیشینه و کمینه عمق برف در دوره مطالعاتی، برخی عوامل همدیدی تأثیرگذار بر میزان عمق برف با جزئیات بیشتر بررسی می‌شود. این بررسی با استفاده از داده‌های باز تحلیل شبکه جهانی NCEP/NCAR و داده‌های بارش از طرح اقلیم شناسی بارش جهانی(GPCP) انجام می‌شود.

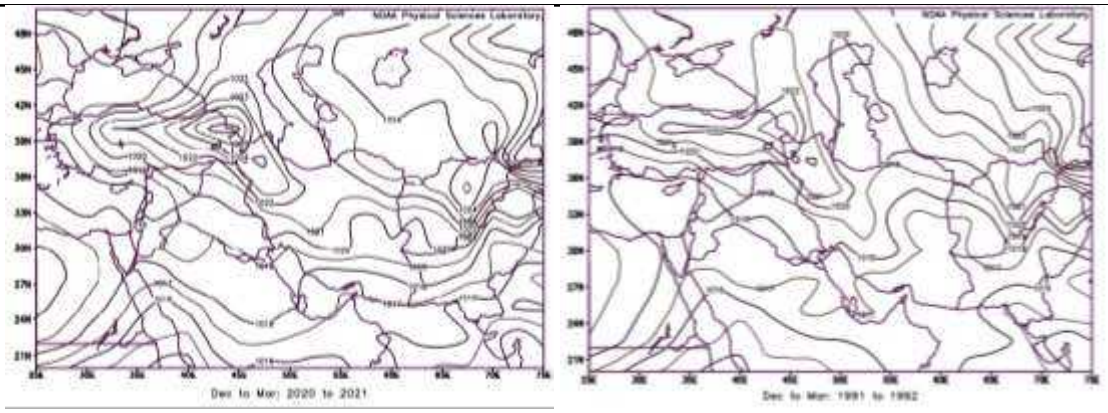
(شکل ۳)، توزیع مکانی دمای هوا در تراز دو متری در منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. (شکل ۳ الف) نشان می‌دهد که در زمستان سال ۱۹۹۲، با بیشترین عمق برف ، همه منطقه مورد مطالعه، در پهنه دمایی صفر تا ۵- درجه سلسیوس قرار گرفته است که از نظر دمایی شرایط برای بارش برف و ماندگاری آن مهیّا است و به بیشینه شدن عمق برف منجر می‌شود. اما در (شکل ۳ ب) که مربوط به زمستان سال ۲۰۲۱ با کمترین عمق برف است، گستره منطقه‌ای با دمای کمتر از ۵- درجه سلسیوس نسبت به سال ۱۹۹۲ کمتر است و حتی قسمتی از منطقه مورد مطالعه در شرق استان اردبیل در پهنه دمایی صفر تا ۵+ درجه واقع شده است که شرایط از نظر دمایی شرایط مناسبی برای بارش و ماندگاری برف نمی‌باشد.

در نقشه‌های توزیع فشار سطح دریا مربوط به زمستان سال ۱۹۹۲ (شکل ۳ ج)، منطقه شمال غرب ایران تحت تأثیر مرکز پرفشاری با هسته ۱۰۲۳ هکتو پاسکال در مرز مشترک شمالی ایران، ترکیه و نخجوان قرار گرفته است. نفوذ این پرفشار باعث تشدید جریان هوای سرد قطبی به سمت جنوب و کاهش قابل توجه دما (به کمتر از ۵- درجه سلسیوس: بر اساس شکل ۳ الف) در استان‌های آذربایجان غربی و شرقی شده است. همچنین نقشه توزیع فشار سطح در زمستان سال ۲۰۲۱ (شکل ۳ د) نشان می‌دهد که منطقه شمال غرب کشور ایران تحت تأثیر مرکز پرفشاری مستقر در مرز مشترک شمالی ایران و ترکیه با هسته ۱۰۲۶ هکتوپاسکال قرار دارد. مقایسه دو زمستان با کمینه و بیشینه عمق برف نشان می‌دهد که علیرغم اینکه در هر دو مقطع زمانی پرفشار در منطقه مورد مطالعه مستقر است؛ در زمستان سال ۱۹۹۲ مرکز پرفشار هسته ضعیف‌تری نسبت به زمستان ۲۰۲۱ دارد. حضور پرفشار قوی به دلیل پایداری بیشتر جوّ در زمستان ۲۰۲۱ مانع بارش برف و متعاقباً تجمع برف در شمال‌غرب ایران می‌شود. تفاوت‌های عمده در ساختار و موقعیت مراکز پرفشار و تغییرات دما، شرایط کم بارشی را در زمستان ۲۰۲۱ نسبت به زمستان ۱۹۹۲ و بقیه سال‌ها در طول دوره مورد مطالعه در منطقه حاکم کرده است.

(الف) (ب)



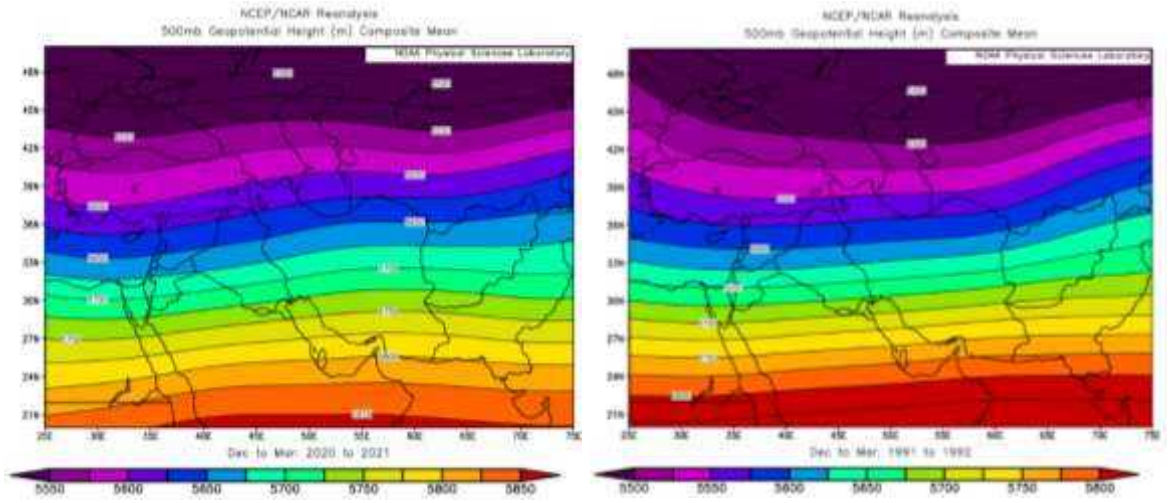
(ج) (د)



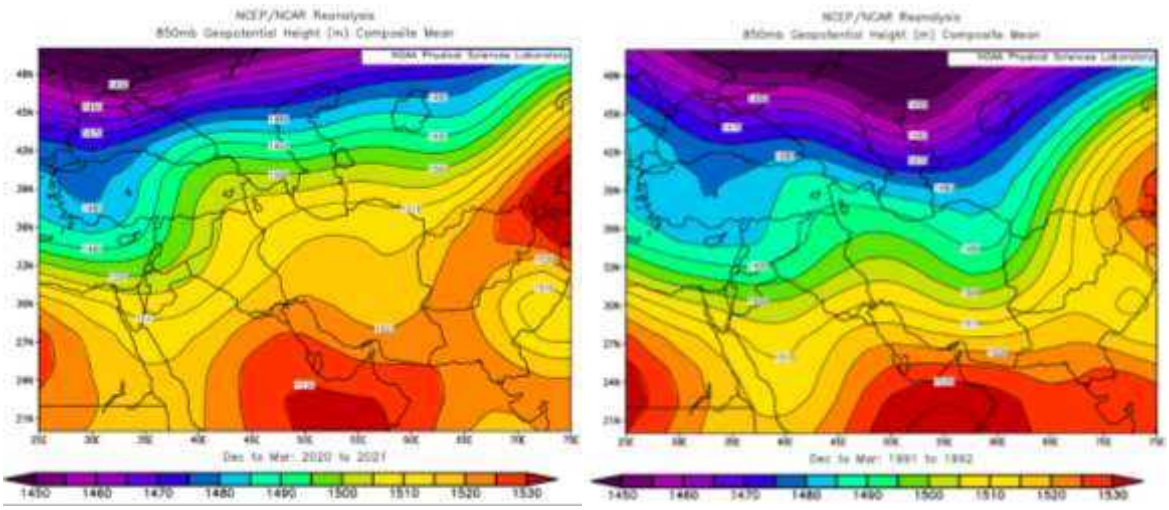
شکل ۳. میانگین دمای هوا در تراز دو متری از سطح زمین برحسب درجه سلسیوس (oC) (ردیف بالا) و فشار سطح دریا بر حسب هکتوپاسکال (ردیف پایین) برای ماه‌های دسامبر، ژانویه، فوریه و مارس برای زمستان (الف و ج) ۱۹۹۲ و (ب و د) ۲۰۲۱.

نقشه توزیع ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در سال ۱۹۹۲ برای منطقه مورد مطالعه در (شکل ۴ الف) نشان داده شده است. میانگین ماهانه ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکالی منطقه شمال غرب ایران به صورتی است که پربند ارتفاعی ۵۵۷۵ متر در عرض‌های پایین‌تر و پربند ارتفاعی ۵۵۰۰ متر در عرض‌های بالاتر قرار گرفته است. در نقشه‌های مربوط به زمستان سال ۲۰۲۱ (شکل ۴ ب)، میانگین ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال با ۵۶۵۰ متر ارتفاع در عرض‌های پایین منطقه تا ۵۶۰۰ متر در عرض‌های بالای منطقه را نشان می‌دهد. از سوی دیگر براساس توزیع ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال در زمستان ۱۹۹۲ (شکل ۴ ج) میانگین ماهانه ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال منطقه شمال غرب ایران ۱۴۸۵ تا حدود ۱۴۹۵ متر می‌باشد که با افزایش عرض جغرافیایی رو به کاهش است. در نقشه های مربوط به زمستان سال ۲۰۲۱ میانگین ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۸۵۰ هکتوپاسکالی ۱۵۰۰ تا ۱۵۱۰ متر نشان داده شده است (شکل ۴ د). مقادیر کم میانگین ارتفاع ژئوپتانسیلی ترازهای ۵۰۰ و ۸۵۰ هکتوپاسکال نشان‌دهندهٔ ضخامت کم لایه زیرین آنها است که کاهش ضخامت لایه جوّ، فرارفت هوای سرد در آن لایه را نشان می‌دهد (Holton and Hakim, 2013) و بیانگر نفوذ توده هوای سرد قطبی به لایه‌های میانی و زیرین جوّ است که موجب فراهم شدن شرایط مناسبی برای تشکیل برف می‌شود. بنابراین، در مقایسه ارتفاع ژئوپتانسیلی ترازهای ۵۰۰ و ۸۵۰ هکتوپاسکالی سال‌های حدی کمینه و بیشینه عمق برف، کم بودن مقادیر در زمستان سال ۱۹۹۲ نسبت به زمستان سال ۲۰۲۱ در هر دو تراز، نشان از ضخامت کمِ لایه‌های زیرین آن تراز بوده و نفوذ توده هوای سرد قطبی به لایه‌های میانی و زیرین جوّ را نشان می‌دهد. از سوی دیگر، ارتفاع ژئوپتانسیلی بالاتر در ترازهای ۵۰۰ و ۸۵۰ هکتوپاسکالی در زمستان ۲۰۲۱ نشان‌دهندهٔ ضخامت بیشتر لایه‌های جوّ و حضور هوای گرم‌تر در لایه‌های میانی و زیرین است. به دنبال این شرایط، با استقرار پرفشار قوی‌تر و ارتفاع ژئوپتانسیلی بالاتر نفوذ هوای سرد به منطقه محدود شده است. این عامل مانع تشکیل برف گسترده می‌شود که در تطابق با بیشینه بودن عمق برف و تعداد روزهای برفی در زمستان سال ۱۹۹۲ و کمینه بودن آنها در زمستان سال ۲۰۲۱ است.

(ب) (الف)



(د) (ج)

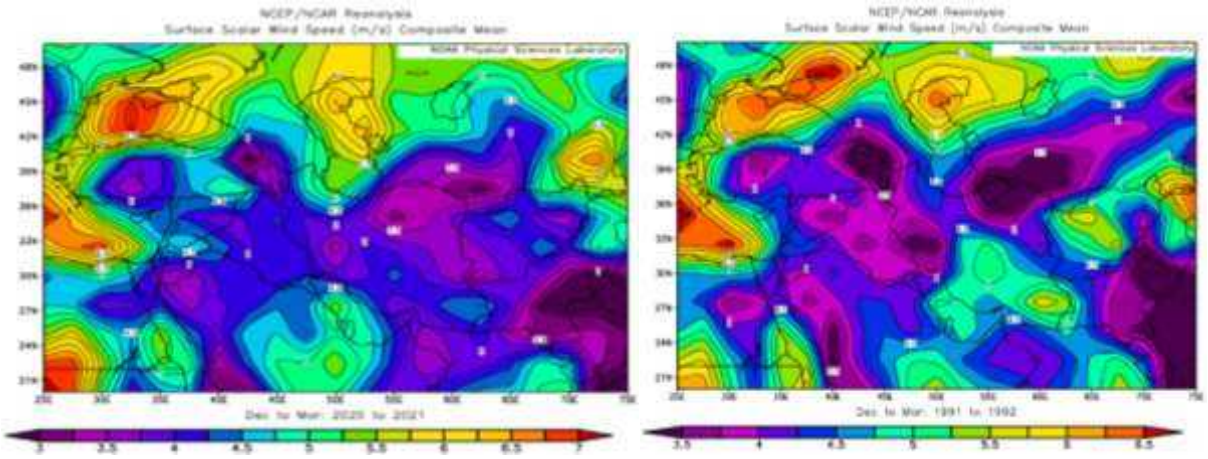


شکل ۴- مانند شکل ۳ ولی برای ارتفاع ژئوپتانسیلی در ترازهای ۵۰۰ و ۸۵۰ هکتوپاسکالی برحسب متر.

نقشه‌های تندی باد نزدیک سطح زمین نیز در (شکل ۵) نشان داده شده است. در منطقه شمال غرب ایران، میانگین سرعت باد برای زمستان ۱۹۹۲حدود ۳ الی ۴ متر بر ثانیه و برای زمستان سال ۲۰۲۱ حدود ۳/۵ الی ۵/۵ متر بر ثانیه است. مقایسه میانگین سرعت باد در دو سال حدی، نشان می‌دهد که در زمستان ۱۹۹۲ سرعت باد در شمال استان آذربایجان غربی

(مناطق نزدیک به مرکز پرفشار) با حدود ۳ متر بر ثانیه کمترین سرعت و در مناطق جنوبی استان اردبیل بیشترین مقادیر را دارد. در نقشه مربوط به زمستان سال ۲۰۲۱، در مناطق جنوبی استان اردبیل سرعت باد بیش از ۵ متر بر ثانیه است و در مناطق شمالی استان آذربایجان غربی، میانگین سرعت باد حدود ۳/۵ متر بر ثانیه است. سرعت باد کم و نزدیک به آرام در برخی مناطق شمال غرب در زمستان سال ۱۹۹۲ در تطابق با عمق برف بیشینه‌ای است که در این مناطق ثبت شده است و سرعت باد بیش از ۵ متر بر ثانیه نیز در تطابق با عمق برف کمینه در زمستان سال ۲۰۲۱ است و بیانگر نقش احتمالی باد در جابجایی برف از روی سطح است. سرعت پایین باد در سطح زمین موجب کاهش جابجایی برف روی سطح زمین شده و افزایش ماندگاری آن را به دنبال دارد. بنابراین سرعت بالای باد نزدیک سطح زمین می‌تواند موجب جابجایی سریع‌تر برف و کاهش تجمّع آن شود.

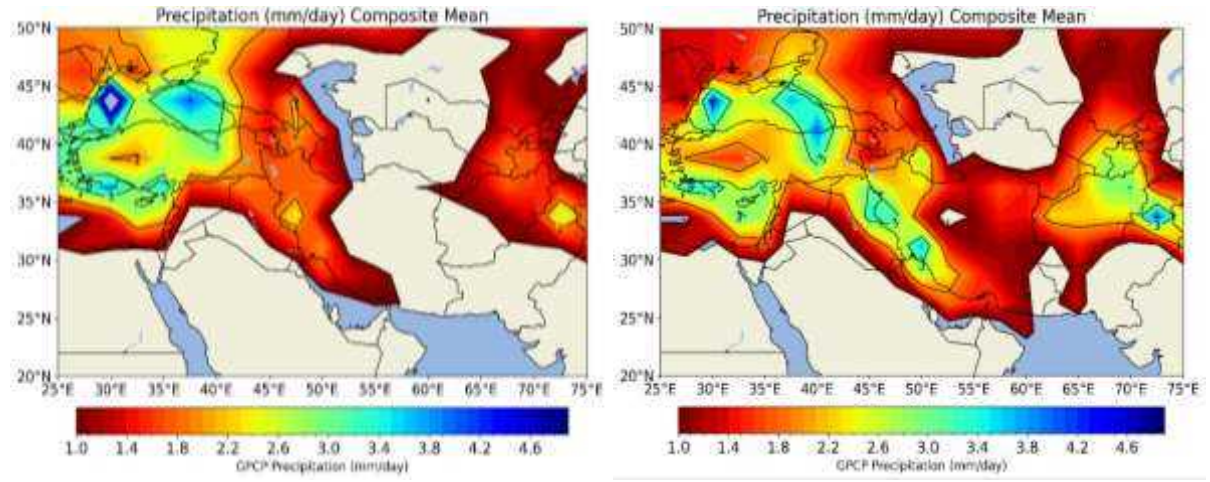
(الف) (ب)



شکل ۵ مانند شکل ۴ ولی برای سرعت باد تراز سطح زمین بر حسب متر بر ثانیه.

نقشه توزیع بارش منطقه مورد مطالعه به صورت میانگین ماه‌های سرد سال ۱۹۹۲ در (شکل ۶) الف نشان می‌دهد میانگین ماهانه میزان بارش در نواحی شمالیِ منطقه مورد مطالعه بیش از $\frac{mm}{day}$ ۱/۵ بوده و در نواحی جنوبی و غربیِ منطقه به‌ویژه برخی نواحی جنوبی استان آذربایجان غربی به بیش از $\frac{mm}{day}$ ۳ می‌رسد. همچنین در نقشه مربوط به زمستان ۲۰۲۱ (شکل ۶ ب)، میانگین بارش در منطقه شمال غرب ایران حدود ۱/۵ تا ۲ میلیمتر بر روز است. با مقایسهٔ میزان بارش در دو زمستان سال‌های ۱۹۹۲ و ۲۰۲۱ کاملاً مشهود است که میزان بارش در سال ۱۹۹۲ در مناطق جنوبی آذربایجان غربی بیشتر از سایر مناطق بوده و در برخی ایستگاه‌ها از جمله ایستگاه سردشت و پیرانشهر میزان بارش بالاتر از مقدار نرمال است. با توجه به اینکه دما هم در سال ۱۹۹۲ دارای مقادیر کمتری بوده بنابراین بخشی از این بارش می‌تواند به‌صورت برف باشد. بنابراین اثر همزمان دما و بارش می‌تواند منجر به بیشینه شدن عمق برف در این سال باشد.

(الف) (ب)



شکل ۴-۱۳. مانند شکل ۴-۷ ولی برای بارش بر حسب میلیمتر بر روز.

بنابراین، با توجه به پایین بودن دمای هوا و ثبت مقادیر کمینه دما در زمستان سال ۱۹۹۲، شرایط برای بیشینه شدن عمق برف فراهم بوده است. و همچنین با توجه به اینکه دمای هوا در زمستان سال ۲۰۲۱ نیز در اکثر نواحی منطقه شمال غرب دارای مقادیر بیشتر از صفر درجه سلسیوس بوده است، بنابراین در مجموع شرایط برای بارش به‌صورت مایع در ایستگاه‌های مورد مطالعه در این سال از نظر دمایی مهیّا بوده است.

جمع‌بندی نتایج این بخش و مقایسه آن با نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی نشان می‌دهد که تغییرات عمق برف در منطقه شمال غرب کشور، نه‌تنها حاصل تغییرات یک متغیّر منفرد، بلکه محصول هم‌زمانی تغییر در چند مؤلفه اصلی است. تفاوت‌های عمده در ساختار و موقعیت مرکزهای پرفشار، تغییرات ارتفاع ژئوپتانسیلی، دما و سرعت باد نقش کلیدی در تفاوت عمق و ماندگاری برف در شمال‌غرب ایران داشته‌اند. به‌طوری‌که برای نمونه زمستان ۱۹۹۲ با بیشینه عمق برف، حضور هسته پرفشار در عرض‌های بالا، همراهی آن با ارتفاع ژئوپتانسیلی کمتر در ترازهای بالاتر و نفوذ هوای سرد، موجب تقویت مؤلفه اول (عامل دما) و مؤلفه چهارم (عامل بارشی) شده است و در نتیجه، شرایط برای بارش برف سنگین و تجمّع و ماندگاری آن فراهم است. در مقابل، در زمستان ۲۰۲۱ تقویت پرفشار سطحی و تقویت پایداری با همراهی با ضخامت زیاد لایه‌های میانی جوّ باعث محدود شدن نفوذ هوای سرد و کاهش مؤثر مؤلفه اول (دما) شده و در نتیجه بارش برف و تجمّع آن محدود شده است.

نتیجه‌گیری

برای تعیین عوامل مؤثر بر عمق برف در بازه سال‌های ۱۹۸۷ تا ۲۰۲۳ در منطقه شمال‌غرب ایران از روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی استفاده شده است. بر اساس این روش نتایج نشان می‌دهد که چهار مؤلفه اصلی که دارای مقادیر ویژه بزرگ‌تر از یک هستند، در مجموع حدود ۷۲ درصد از وردایی کل را برآورد می‌کنند. بنابراین بر اساس نتایج، عوامل تأثیرگذار بر تغییرات عمق برف را بر اساس چهار عامل می‌توان توجیه کرد. عامل اوّل که بیانگر نقش دما در تغییرات عمق برف است مربوط به مؤلفه اوّل است. این مؤلفه به شدت با دما و دمای خاک همبستگی مثبت و با تعداد روزهای برفی همبستگی منفی دارد. این نتیجه رابطه معکوس میان عمق برف و دما را نشان می‌دهد. مؤلفه اصلی دوّم با پارامترهای رطوبت نسبی و ابرناکی همبستگی مثبت و با ساعات آفتابی رابطه معکوس دارد. در این دسته هیچ یک از این پارامترها به‌طور مستقیم با عمق برف در ارتباط نیست، افزایش میزان رطوبت نسبی و ابرناکی که باعث کاهش ساعات آفتابی و اُفت میزان انرژی خورشیدی دریافتی توسط سطح زمین، در طول روز می‌شود، موجب پایین ماندن دمای سطح و سرد بودن سطح زمین می‌گردد. این امر باعث کندتر شدن روند ذوب برف و طولانی‌تر شدن روزهای همراه با پوشش برف و افزایش تعداد روزهای برفی می شود. سپیدایی بالای برف نیز با کاهش انرژی خورشیدی دریافتی سطح زمین، این امر را شدت می‌بخشد. با توجه به ضرایب همبستگی، این مؤلفه تأثیر کمی بر عمق برف دارد. مؤلفه سوّم با تندی باد رابطه مستقیم دارد. از آنجا که باد می‌تواند با انتقال برف از یک منطقه به منطقه دیگر باعث کاهش عمق برف در مبدأ و ایجاد کولاک و انباشت برف در مسیر حرکت شود، بنابراین انتظار می‌رود که وزش باد به صورت مستقیم روی عمق برف مؤثر باشد. در نهایت مؤلفه چهارم ارتباط عمق برف با پارامترهای فشار سطح دریا و میزان بارش را نشان می‌دهد. افزایش عمق برف با تغییرات میزان بارش رابطه مستقیم و با تغییرات فشار سطح دریا رابطه عکس دارد. کاهش فشار در سطح، موجب همگرایی و تقویت حرکات صعودی می‌شود. بنابراین بر اساس انتظار افزایش بارش که در ماه‌های سرد سال عمدتاً به صورت برف می‌باشد، یکی از عواملی است که تغییرات عمق برف را توجیه می‌کند. از میان این مؤلفه‌ها، مورد اوّل که شرایط گرمایی را نشان می‌دهد و مؤلفه چهارم که بیانگر میزان بارش است، بیشترین تأثیر را بر عمق برف دارند.

در ادامه برای مطالعه دقیق‌تر عوامل مؤثر بر عمق برف، دو مورد حدی شامل روزهای با مقادیر بیشینه و کمینه عمق برف و تعداد روزهای برفی در دوره مورد مطالعه به‌ترتیب مربوط به سالهای ۱۹۹۲ و ۲۰۲۱ است، بررسی شده است. بررسی نقشه های توزیع دما، فشار، ارتفاع ژئوپتانسیلی، سرعت باد، رطوبت نسبی، ابرناکی و بارش در دو زمستان سال‌های حدیِ کمینه و بیشینه عمق برف در منطقه مورد مطالعه حاکی از آن است که در زمستان سال ۱۹۹۲، از نظر دمایی شرایط برای بارش برف و ماندگاری آن مهیّا بوده که به بیشینه شدن عمق برف منجر شده است. در زمستان ۲۰۲۱ با کمترین میزان عمق برف، گسترهٔ منطقه‌ای با دمای کمتر از صفر درجه سلسیوس (دماهای منفی) کمتر است و از نظر دمایی شرایط برای بارش برف و ماندگاری آن مناسب نمی‌باشد.

بررسی نقشه‌های میانگین ماهانه توزیع فشار نشان می‌دهد که در زمستان سال ۱۹۹۲، یک مرکز پرفشار با هسته حدود ۱۰۲۳ هکتوپاسکال در منطقه مستقر است که باعث تشدید جریان هوای سرد قطبی به سمت جنوب و کاهش قابل توجه دما به کمتر از ۵- درجه سلسیوس در استان‌های آذربایجان غربی و شرقی شده است. کاهش ارتفاع ژئوپتانسیلی در دو تراز فشاری ۵۰۰ و ۸۵۰ هکتوپاسکال نشان‌دهندهٔ ضخامت کم لایه زیرین آنها است که کاهش ضخامت، فرارفت هوای سرد در آن لایه است و بیانگر نفوذ توده هوای سرد قطبی به لایه‌های میانی و زیرین جوّ است که موجب همراهی زبانه‌های پرفشار به عرض‌های پایین‌تر و فراهم شدن شرایط مناسبی برای تشکیل برف می‌شود. در مقابل، در زمستان ۲۰۲۱ به‌عنوان سال حدی کمینه عمق برف، مرکز پرفشار سطح زمین با هسته قوی‌تر (حدود ۱۰۲۶ هکتوپاسکال) در شمال منطقه مستقر بوده و به‌علت ارتفاع ژئوپتانسیلی بالاتر در ترازهای ۵۰۰ هکتوپاسکالی (حدود ۵۶۵۰ متر) و ۸۵۰ هکتوپاسکالی (حدود ۱۵۰۰ متر) که نشان‌دهندهٔ ضخامت بیشتر لایه‌های جوّ و حضور هوای گرم‌تر در لایه‌های میانی و زیرین است، نفوذ هوای سرد به منطقه محدود شده است. این عامل مانع تشکیل برف گسترده می‌شود. همچنین در سال ۱۹۹۲، سرعت باد نزدیک سطح زمین نسبتاً ضعیف بوده که کاهش جابجایی برف روی سطح زمین و افزایش ماندگاری آن را به دنبال دارد. مقایسه نقشه‌های توزیع بارش در دو سال حدی نشان می‌دهد که میانگین ماهانه میزان بارش در زمستان سال ۱۹۹۲ در برخی نقاط حدود دو برابر میانگین آن در زمستان سال ۲۰۲۱ می‌باشد. بارش‌های تجمّعی در سال ۱۹۹۲ بیشتر در نواحی جنوبی استان آذربایجان غربی، به ویژه در ایستگاه‌های سردشت و پیرانشهر ثبت شده است. این بارش‌ها همراه با دمای پایین، شرایط را برای بارش برف پایدار و افزایش عمق برف فراهم کرده است. در مقابل، در سال ۲۰۲۱ دمای بالاتر و شرایط غالب بارش مایع منجر به عدم ماندگاری برف و کاهش عمق برف شده است. بنابراین، تفاوت‌های عمده در ساختار و موقعیت مرکزهای پرفشار، تغییرات ارتفاع ژئوپتانسیلی، دما و سرعت باد نقش کلیدی در تفاوت عمق و ماندگاری برف در شمال‌غرب ایران داشته‌اند و تغییرات عمق برف در منطقه شمال‌غرب کشور، نه‌تنها حاصل تغییرات یک متغیّر منفرد، بلکه محصول هم‌زمانی تغییر در چند مؤلفه اصلی و تفاوت در الگوهای همدیدی است.

منابع

اصغری سراسکانرود، صیاد، صفری، شیوا، ملانوری، الهام (۱۴۰۰). اندازه گیری عمق برف و ارزیابی ارتباط مؤلفه دما با ویژگی‌های برف در حوزه آبخیزداری لیقوان. پژوهش های حفاظت آب و خاک، ۲۸ (۴)، ۲۰۶ -۱۸۷.

Almodaresi, A., Hatami, A., & Sarkargar, J. (2016). Calculating the physical properties of snow, using differential radar interferometry and TerraSAR-X and MODIS images. Journal of RS & GIS for Natural Resources, 7(2), 59–75.

Arkian, F., Karimkhani, M., & Taheri, H. R. (2014). Variability and trends in the duration and depth of snow cover in Iran in thirty years. Journal of Earth Science & Climatic Change, 5(10), 5–10.

Chen, Y., Cheng, Q., Fang, X., Yu, H., & Li, D. (2018). Principal component analysis and long short-term memory neural network for predicting dissolved oxygen in water for aquaculture. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 34(17), 183–191.

Dadic, R., Mott, R., Lehning, M., & Burlando, P. (2010). Wind influence on snow depth distribution and accumulationover glaciers. J. Geophys. Res, 115. https://doi.org/10.1029/2009JF001261

Domine, F., Albert, M., Huthwelker, T., Jacobi, H.-W., Kokhanovsky, A. A., Lehning, M., Picard, G., & Simpson, W. R. (2008). Snow physics as relevant to snow photochemistry. Atmospheric Chemistry and Physics, 8(2), 171–208. https://doi.org/10.5194/acp-8-171-2008

Guang-Xi, Z. H. U., Cun-De, X. I. A. O., Bo, C. H. E. N., & Ying-Dong, Z. H. A. O. (2020). Spring snowmelt flood estimate in the upper Heihe River under climate change. Advances in Climate Change Research, 16(6), 667–678.

Hatchett, Benjamin J., & McEvoy, D. J. (2018). Exploring the origins of snow drought in the northern Sierra Nevada, California. Earth Interactions, 22(2), 1–13. https://doi.org/10.1175/ei-d-17-0027.1

Hatchett, Benjamin James, Rhoades, A. M., & McEvoy, D. J. (2021). Monitoring the daily evolution and extent of snow drought. https://doi.org/10.5194/nhess-2021-193

Holton, J. R., & Hakim, G. (2013). An introduction to dynamic meteorology: Volume 88 (5th ed). Academic Press, 389.

Jarzyna, K., Kozłowski, R., & Szwed, M. (2017). Chemical properties of snow cover as an impact indicator for local air pollution sources. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich.

Lu, W. Z., Wang, W. J., Wang, X. K., Xu, Z. B., & Leung, A. Y. T. (2003). Using improved neural network model to analyze RSP, NOx and NO2 levels in urban air in Mong Kok, Hong Kong. Environmental Monitoring and Assessment, 87(3), 235–254. https://doi.org/10.1023/a:1024819309108

Özdoğan, M. (2011). Climate change impacts on snow water availability in the Euphrates-Tigris basin. Hydrology and Earth System Sciences, 15(9), 2789–2803. https://doi.org/10.5194/hess-15-2789-2011

Shrestha, S., & Kazama, F. (2007). Assessment of surface water quality using multivariate statistical techniques: A case study of the Fuji river basin, Japan. Environmental Modelling & Software: With Environment Data News, 22(4), 464–475. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2006.02.001

Sousa, S., Martins, F., Alvimferraz, M., & Pereira, M. (2007). Multiple linear regression and artificial neural networks based on principal components to predict ozone concentrations. Environmental Modelling & Software: With Environment Data News, 22(1), 97–103. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2005.12.002

Tedesco, M., Brauns, E., Cipollina, A., Micale, G., Modica, P., Russo, G., & Helsen, J. (2015). Reverse electrodialysis with saline waters and concentrated brines: A laboratory investigation towards technology scale-up. Journal of Membrane Science, 492, 9–20. https://doi.org/10.1016/j.memsci.2015.05.020

Tsai, Y., Lin, Y., & Lee, S. (2003). Visibility variation with air qualities in the metropolitan area in southern Taiwan. Water, Air, and Soil Pollution, 144(1), 19–40.

Wang, C., Yang, K., Li, Y., Wu, D., & Bo, Y. (2017). Impacts of spatiotemporal anomalies of Tibetan Plateau snow cover on summer precipitation in eastern China. Journal of Climate, 30(3), 885–903. https://doi.org/10.1175/jcli-d-16-0041.1

Ye, T., Liu, W., Chen, S., Chen, D., Shi, P., Wang, A., & Li, Y. (2022). Reducing livestock snow disaster risk in the Qinghai-Tibetan Plateau due to warming and socioeconomic development. The Science of the Total Environment, 813(151869), 151869. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151869

You, Q., Wu, T., Shen, L., Pepin, N., Zhang, L., Jiang, Z., Wu, Z., Kang, S., & AghaKouchak, A. (2020). Review of snow cover variation over the Tibetan Plateau and its influence on the broad climate system. Earth-Science Reviews, 201(103043), 103043. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.103043

پیامدهای آبشاری خشک‌شدن دریاچه ارومیه بر امنیت غذایی در شمال‌غرب ایران: ارزیابی میان‌بخشی مبتنی‌بر رویکرد سیستمی

هادی سیاسر[۱]

۱- استادیار،دانشکده فنی ومهندسی ، دانشگاه پیام نور ،تهران، ایران

hadisiasar@pnu.ac.ir

چکیده

خشک‌شدن دریاچه ارومیه صرفاً یک فروکاهش هیدرولوژیک نیست، بلکه آغازگر آبشاری از پیامدهای محیطی–انسانی است که ارکان چهارگانه امنیت غذایی (موجودیت، دسترسی، بهره‌مندی و پایداری) را هم‌زمان تضعیف می‌کند. این پژوهش با طراحی آمیخته و هسته پویایی‌سیستم‌ها، زنجیره علت–معلولی «تراز دریاچه–کفه نمکی–گردوغبار شور–شوری خاک–بهره‌وری کشاورزی–سلامت و معیشت» را در مقیاس حوضه عملیاتی کرده است. داده‌های سنجش‌ازدور (Landsat/Sentinel برای سطح آب و کفه نمکی، MODIS/MAIACو Sentinel-5P/UVAI برای آئروسل)، بازتحلیل‌های اقلیمی (ERA5-Land، CHIRPS)، پایش‌های خاک و آب (EC، سدیمّیت)، و سری‌های کشاورزی–اجتماعی–سلامت گردآوری و به مدل تزریق شد. مدل با تقسیم زمانی آموزش/آزمون، کالیبراسیون چندهدفه و تحلیل حساسیت جهانی (Sobol/Morris)ارزیابی گردید و سپس چهار سناریو (تداوم وضع موجود، مدیریت برداشت و بهره‌وری آبیاری، پایبندی به آستانه تراز، و بسته ترکیبی با اصلاح الگوی کشت و مداخلات سلامت‌محور) شبیه‌سازی شد. یافته‌ها نشان داد عقب‌نشینی پهنه آبی و گسترش کفه نمکی با افزایش معنی‌دار AOD/UVAI و رخدادهای گردوغبار—به‌ویژه در شمال/شرق و جنوب/غرب حوضه—هم‌زمان است؛ شورشدگی پیش‌رونده خاک و افت آبخوان‌ها موجب کاهش عملکرد محصولات آب‌بر و شوری‌حساس و تضعیف درآمد روستایی شده و بروز اختلالات تنفسی را افزایش داده است. از نظر سیاستی، نگه‌داشتن تراز دریاچه دست‌کم روی ۱۲۷۲٫۵ متر شرط لازم مهار طوفان نمک است و باید به شاخص نتیجه‌محور حکمرانی تبدیل شود. سناریونگاری نشان داد تنها بسته‌های هم‌زمان—کاهش برداشت و بهبود کارایی آبیاری، پایبندی به آستانه تراز، اصلاح الگوی کشت و شبکه هشدار سلامت—توان شکستن حلقه‌های تقویتی بحران و ارتقای تاب‌آوری غذایی–محیطی شمال‌غرب ایران را دارند. این چارچوب، راهبردی عملیاتی برای پیوند علم و سیاست در احیای ارومیه ارائه می‌کند

کلید واژه‌ها: خشک‌شدن دریاچه ارومیه؛ امنیت غذایی؛ گردوغبار شور؛ پیوند آب–غذا–انرژی–محیط‌زیست(WFEE)

مقدمه

۱-۱ .پیش‌زمینه: بحران اکولوژیکی دریاچه ارومیه

دریاچه ارومیه—ثبت‌شده به‌عنوان ذخیره‌گاه زیست‌کره یونسکو و سایت رامسر—در دو دهه اخیر با افت تراز بی‌سابقه‌ای مواجه شده است؛ سطح آب به کمینه‌های تاریخی سقوط کرده و فاصله آن با بیشینه‌های دهه ۱۹۹۰ به چندین متر رسیده است. هم‌افزایی سیگنال‌های اقلیمی (کاهش بارش کارآمد، افزایش دما و تبخیر) با فشارهای انسان‌زاد (سدسازی بر آبراهه‌های تغذیه‌کننده، گسترش آبیاری و برداشت ناپایدار از آبخوان‌ها) چرخه آب حوضه را از تعادل خارج کرده و مکانیزم‌های بازخوردی تشدیدکننده را فعال ساخته است (Ghahfarokhi & Moradian, 2023; Wurtsbaugh & Sima, 2022; Barati, Dehghani Pour, & Sardooei, 2023). عقب‌نشینی پهنه آبی، کفه‌های نمکیِ گسترده‌ای را نمایان کرده که به‌منزله کانون‌های بالقوه انتشار گردوغبار شور عمل می‌کنند و مسیرهای انتقال ماده و انرژی میان جوّ، سطح و خاک را دگرگون می‌سازند(Boloorani et al., 2025; Feizizadeh et al., 2023) .

۱-۲ .طرح مسئله: تهدیدهای آبشاری علیه امنیت غذایی

خشک‌شدن دریاچه ارومیه یک «شوک سیستمی» است که پیامدهای آن از طریق پیوندهای محیط‌زیست–کشاورزی–جامعه به‌صورت آبشاری گسترش می‌یابد. افزایش رخداد طوفان‌های نمک و گردوغبار شور، شورشدگی تدریجی خاک‌های زراعی، افت کیفیت منابع آب سطحی و زیرزمینی و تغییرات ریزاقلیم محلی، به‌طور هم‌زمان چهار رکن امنیت غذایی—موجودیت، دسترسی، بهره‌مندی و پایداری—را تضعیف می‌کند(CFS/FAO, 2021) .در عمل، کاهش عملکرد و نوسان تولید محصولات شاخص، همراه با تنزل درآمد و قدرت خرید خانوارهای روستایی و افزایش بار بیماری‌های تنفسی مرتبط با ذرات معلق، به کاهش تاب‌آوری سیستم غذایی و تشدید نااطمینانی‌های بین‌سالی می‌انجامد (Feizizadeh et al., 2023; Afsari et al., 2024) .چنین پیکره‌ای از اختلالات، حکمرانی بخشی و واکنش‌های تک‌بعدی را ناکافی می‌سازد و ضرورت حرکت به‌سوی ارزیابی و مداخله میان‌بخشی را برجسته می‌کند(Barati et al., 2023) .

نوآوری این پژوهش در چند لایه و به‌صورت هم‌افزا شکل گرفته است. نخست، با یکپارچه‌سازی نظام‌مند داده‌های میان‌رشته‌ای—از سری‌های زمانی سنجش‌ازدور برای برآورد مساحت پهنه‌های آبی و کفه‌های نمکی و شاخص‌های ذره‌ای جو، تا بازتحلیل‌های اقلیمی، آمار عملکرد محصول، شاخص‌های معیشت و نماگرهای سلامت—چهار رکن امنیت غذایی (موجودیت، دسترسی، بهره‌مندی و پایداری) به مجموعه‌ای از شاخص‌های عملیاتی، قابل‌اندازه‌گیری و قابل‌رصد در مقیاس‌های زمانی–مکانی ایجاد شده است. این چارچوب، پایش پویا و مقایسه‌پذیر روندها را ممکن می‌سازد و بستر تحلیل علّی و ارزیابی اثربخشی مداخلات سیاستی را از سطح محلی تا مقیاس حوضه‌ای فراهم می‌کند. دوم، به‌کارگیری پویایی‌سیستم‌ها در چارچوب پیوند آب–غذا–انرژی–محیط‌زیست به‌گونه‌ای طراحی شده که حلقه‌های تقویتی و تعدیلی

بحران—از افت تراز دریاچه تا افزایش گردوغبار شور، شورشدگی خاک، افت عملکرد و افزایش برداشت آب زیرزمینی— به‌روشنی آشکار شوند و امکان ارزیابی سناریوهای آستانه‌محور، مانند تعیین حداقل تراز لازم برای پیشگیری از طوفان نمک، فراهم آید. سوم، با اتکا به کالیبراسیون متقاطع چندشاخصه (میان تراز آب، مساحت کفه نمکی، بار ذرات جوّ، شوری خاک، عملکرد محصول و نماگرهای سلامت و معیشت) و تحلیل حساسیت، متغیرهای اهرمی و ترکیب‌های سیاستی کم‌هزینه– پربازده شناسایی می‌شوند؛ به‌طوری‌که مدیریت تقاضای آب، بازآرایی الگوی کشت و اقدامات سلامت‌محور در روزهای گردوغبار شور در قالب یک بسته حکمرانی یکپارچه قابل اجرا گردد. در نهایت، با پوشش کل حوضه آبریز در بازه زمانی اواخر دهه ۱۹۹۰ تا امروز، امکان رصد هم‌زمان روند خشکیدگی و ظهور یا تشدید پیامدهای ثانویه در مقیاس‌های فصلی– سالانه و سنجش تعمیم‌پذیری نتایج مهیا می‌شود.

هدف اصلی مقاله ارائه یک ارزیابی میان‌بخشی مبتنی‌بر رویکرد سیستمی برای تبیین پیامدهای آبشاری خشک‌شدن دریاچه ارومیه بر امنیت غذایی شمال‌غرب ایران و پیشنهاد سناریوهای سیاستی کارآمد با هدف ارتقای تاب‌آوری سیستم غذایی منطقه است. به‌طور مشخص، این مطالعه می‌کوشد عقب‌نشینی پهنه آبی و گسترش کفه‌های نمکی را در بستر زمانی– مکانی پایش کند؛ پیوند میان تراز دریاچه، بار گردوغبار شور، شورشدگی خاک و عملکرد محصولات شاخص را برآورد و مدل‌سازی نماید؛ پیامدهای سلامت—با تمرکز بر اختلالات تنفسی—و دگرگونی‌های معیشتی را به‌مثابه ابعاد بهره‌مندی و دسترسی در چارچوب امنیت غذایی بسنجَد؛ و با توسعه یک مدل پویایی‌سیستم‌ها در قالب پیوند آب–غذا–انرژی– محیط‌زیست، سناریوهای سیاستی متفاوت—از تداوم وضع موجود تا کاهش برداشت و بهبود بهره‌وری آبیاری، پایبندی به آستانه‌های تراز ضد طوفان نمک و بسته‌های سلامت‌محور—را مقایسه کند. افزون بر این، با اجرای کالیبراسیون متقاطع، تحلیل حساسیت و ارزیابی عدم‌قطعیت، نقشه‌راه سیاستی مرحله‌بندی‌شده‌ای برای احیای دریاچه و تقویت پایداری و عدالت غذایی–محیطی در سکونتگاه‌های پیرامونی ارائه خواهد شد.

فصل ۲: مرور ادبیات و چارچوب نظری

۲-۱ .علل و پیامدهای زیست‌محیطی

بدنه پژوهش‌های اخیر درباره خشک‌شدن دریاچه ارومیه تصویری هم‌زمان اقلیمی–انسان‌زاد از فروکاست تراز آب ارائه می‌دهد: از یک‌سو، تغییرات دما و تبخیر–تعرق و کاهش بارش کارآمد، کسری ماندگار در تراز آبی ایجاد کرده‌اند و از سوی دیگر، توسعه آبیاری، سدسازی و برداشت‌های زیرزمینی، ورودی‌های دریاچه را به‌شدت محدود ساخته‌اند؛ تحلیل‌های تراز آب و «آب‌اندوخت حوضه» نشان می‌دهد که ترکیب این محرک‌ها، به‌ویژه طی دو دهه اخیر، روند خشکیدگی را شتاب داده است(Hadipour et al., 2024; Wurtsbaugh & Sima, 2022) .هم‌زمان، مدل‌سازی‌های هیدرودینامیک–انتقال شوری، پویایی آب‌های فوق‌شور ارومیه را با چارچوب‌های عددی (FVCOM/PHREEQC) صورت‌بندی کرده و نشان داده‌اند که افت تراز چگونه رژیم نمک‌زایی و لایه‌بندی را دگرگون می‌کند و آستانه‌های ناپایداری را نزدیک می‌سازد (Safaie & Jamaat, 2024) .یکی از پیامدهای کلیدی این فرایند، نمایان‌شدن کفه‌های نمکی و فعال‌شدن کانون‌های گردوغبار شور

است؛ ادبیات جدید با روش‌های سنجش‌ازدور محور–زمانی و تحلیل‌های آستانه‌ای، «حداقل ترازِ لازم برای پیشگیری از شکل‌گیری طوفان‌های نمک» را به‌عنوان شرط سیاستیِ صریح معرفی می‌کند (Boloorani, Sharif, Samany, Chehrenegar, & Amiraslani, 2025) .

پیامدهای زیست‌محیطی این تغییر رژیم تنها به فرایندهای فیزیکی–ژئومورفیک محدود نمی‌ماند و در سطح سامانه‌های انسانی بروز می‌کند. مطالعات مکانی–زمانی پیرامون شهرستان‌های مجاور دریاچه (مانند شبستر) افزایش بار بیماری‌های تنفسی و نشانگان مرتبط با مواجهه ذرات معلق شور را مستند کرده‌اند (Feizizadeh, Lakes, Omarzadeh, & Pourmoradian, 2023) .شواهد هم‌ارز از دریاچه‌های هم‌سنخ، به‌ویژه Great Salt Lake در ایالات متحده، نشان می‌دهد که گردوغبار بستر خشکیده می‌تواند از مسیرهای التهابی (فعال‌سازی گیرنده‌های TRP و TLR4 و استرس اکسیداتیو) بر سلامت اثرگذار باشد و هم‌زمان، حفظ/بازیابی تراز آب، بار گردوغبار و نابرابری‌های مواجهه را کاهش دهد (Cowley et al., 2025; Grineski et al., 2024) .این یافته‌ها—در کنار مدارک مربوط به تغییر پوشش/کاربری و شورشدگی پیش‌رونده خاک‌های کشاورزی پیرامونی—بر وجود «آستانه‌های تراز بحرانی» برای مدیریت ریسک محیط‌زیست–سلامت تأکید می‌گذارند و لزوم صورت‌بندی سیاست‌هایی را نشان می‌دهند که سطح آب دریاچه را به‌عنوان متغیرِ هدف پایش و کنترل کنند .

۲-۲ .امنیت غذایی در اقلیم‌های خشک

در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک ایران، امنیت غذایی به‌طور ساختاری «آب‌محور» است و فشارهای محیطی عمدتاً از مسیر کشاورزی به پیامدهای معیشتی و تغذیه‌ای ترجمه می‌شوند. چارچوب‌های پیوندیِ نوین—از پیوند آب–انرژی–غذا–زمین/اقلیم (WEFLC) در سطح ملی تا پیوند آب–غذا–انرژی–محیط‌زیست (WFEE) در مقیاس‌های حوضه‌ای—برای تحلیل حلقه‌های بازخوردی و ارزیابی سناریوهای انطباقی توسعه یافته‌اند و قابلیت «سیاست‌پژوهی» را از طریق شبیه‌سازی‌های پویایی‌سیستم‌ها ارتقا می‌دهند(Barati, Dehghani Pour, & Sardooei, 2023) .در مقیاس ارومیه، سنجش‌های مزرعه‌محورِ پیوند آب–غذا–انرژی (برای گندم، چغندرقند، گوجه‌فرنگی و ذرت) نشان می‌دهد که انتخاب الگوی کشت و فناوری آبیاری (ازجمله گذار به قطره‌ای) می‌تواند هم‌زمان کارایی مصرف آب و انرژی را افزایش دهد و ردپای کربن/آب را کاهش دهد، درنتیجه رکن «موجودیت» و «پایداری» امنیت غذایی را تقویت کند (Maarefi, Ashrafi, Ebrahimian, Dehghanisanij, & Sharifi, 2024) .این تصویر با شواهد کلان‌تر درباره اثرات کم‌آبی بر امنیت غذایی ایران همخوان است و بر حساسیت ویژه مناطق خشک نسبت به شوک‌های اقلیمی و کم‌آبی ساختاری تأکید می‌کند (Nikpey, 2025) .

از منظر پویایی‌های اجتماعی، «مسیر کشاورزیِ» پیوند تغییر اقلیم–امنیت غذایی–مهاجرت، سازوکار کلیدی انتقال فشار محیطی به تغییرات جمعیتی در مناطق کم‌آب معرفی شده است؛ کاهش تولید و درآمد روستایی، انگیزه‌های مهاجرت را افزایش می‌دهد و بازتوزیع جمعیت، خود می‌تواند حلقه‌های بازخوردی تازه‌ای در تقاضای آب/غذا ایجاد کند (Tuholske,

(Landro, & Anderson, 2024 .در این میان، چارچوب ارکان چهارگانه امنیت غذاییِ کمیته امنیت غذایی جهانی —(CFS/FAO)موجودیت، دسترسی، بهره‌مندی و پایداری—ابزار توصیف و پایش استانداردی فراهم می‌کند تا اثر خُرد–کلان سیاست‌ها بر پیامدهای نهایی غذا و تغذیه سنجش‌پذیر شود(CFS/FAO, 2021) .همگرایی این ادبیات نشان می‌دهد که در حوضه ارومیه، اتخاذ بسته‌های سیاستیِ هم‌زمان (مدیریت تقاضای آب، اصلاح الگوی کشت و اقدامات سلامت‌محور روزهای گردوغبار) ذیل رویکردهای پیوندی و آستانه‌محور، پیش‌شرط ارتقای تاب‌آوری امنیت غذایی است .

فصل ۲: مرور ادبیات و چارچوب نظری

۲-۱ .علل و پیامدهای زیست‌محیطی

پژوهش‌های اخیر درباره خشک‌شدن دریاچه ارومیه تصویر یک فروکاست «اقلیمی–انسان‌زاد» از تراز آب را ترسیم می‌کند: از یک‌سو کاهش بارش کارآمد و افزایش دما/تبخیر–تعرق کسری پایدار در موازنه آبی ایجاد کرده و از سوی دیگر سدسازی بر آبراهه‌های تغذیه‌کننده، توسعه آبیاری و برداشت‌های روزافزون از آبخوان‌ها ورودی‌های دریاچه را محدود کرده است. تحلیل‌های موازنه آب در مقیاس حوضه نشان می‌دهد هم‌افزایی این محرک‌ها—به‌ویژه در دو دهه اخیر—خشکیدگی را شتاب داده و رژیم هیدرولوژیک–شیمیایی دریاچه را به سمت ناپایداری سوق داده است (Hadipour et al., 2024; Wurtsbaugh & Sima, 2022) .هم‌زمان، مدل‌سازی‌های هیدرودینامیک–انتقال شوری برای آب‌های فوق‌شور ارومیه نشان می‌دهد افت تراز چگونه لایه‌بندی، نمک‌زایی و چرخش درونی را بازپیکربندی می‌کند و در نزدیکی آستانه‌های بحرانیِ ناپایداری قرار می‌دهد(Safaie & Jamaat, 2024) .پیامد مستقیم این تغییر رژیم، نمایان‌شدن کفه‌های نمکی و فعال‌شدن کانون‌های گردوغبار شور است؛ مطالعات سنجش‌ازدور محور–زمانی آستانه‌ای را برای «حداقل تراز لازم جهت پیشگیری از طوفان‌های نمک» صورت‌بندی کرده و آن را به‌مثابه قید سیاستی صریح برای احیاء پیشنهاد می‌کنند (Boloorani, Sharif, Samany, Chehrenegar, & Amiraslani, 2025).افزون بر فرآیندهای فیزیکی–ژئومورفیک، پیامدها در سطح سامانه‌های انسانی نیز آشکار شده‌اند: پایش مکانی–زمانی در شهرستان‌های پیرامونی (مثلاً شبستر) افزایش معنادار بیماری‌های تنفسی و نشانگان مرتبط با مواجهه ذرات معلق شور را گزارش کرده است؛ و مطالعات هم‌سنخ در Great Salt Lake (ایالات متحده) سازوکارهای التهابی–اکسیداتیو و نیز نقش حفظ/بازیابی تراز آب در کاهش بار گردوغبار و نابرابری‌های مواجهه را تأیید می‌کند(Feizizadeh, Lakes, Omarzadeh, & Pourmoradian, 2023; Cowley et al., 2025; Grineski et al., 2024) .این شواهد، وجود «آستانه‌های تراز بحرانی» برای مدیریت ریسک محیط‌زیست–سلامت را تقویت و ضرورت پایش و کنترل فعال سطح آب دریاچه را به‌عنوان متغیر هدف سیاستی برجسته می‌کند .

۲-۲ .امنیت غذایی در اقلیم‌های خشک

امنیت غذایی در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک ایران به‌طور بنیادی «آب‌پایه» است و تنش‌های محیطی عمدتاً از مسیر بخش کشاورزی به پیامدهای معیشتی و تغذیه‌ای سرریز می‌کند. رویکردهای پیوندی نوین—از پیوند آب–انرژی–غذا–

زمین/اقلیم (WEFLC) در مقیاس ملی تا پیوند آب–غذا–انرژی–محیط‌زیست (WFEE) در مقیاس حوضه—با تکیه بر پویایی‌سیستم‌ها، حلقه‌های بازخوردی بحران را آشکار و سناریوهای انطباقی را ارزیابی می‌کنند (Barati, Dehghani Pour, & Sardooei, 2023). شواهد مزرعه‌محور در حوضه ارومیه نیز نشان می‌دهد انتخاب الگوی کشت و فناوری آبیاری کارآمد (از جمله گذار به آبیاری قطره‌ای) می‌تواند هم‌زمان کارایی آب و انرژی را بهبود دهد، ردپای آب/کربن را کاهش دهد و ارکان «موجودیت» و «پایداری» امنیت غذایی را تقویت کند (Maarefi, Ashrafi, Ebrahimian, Dehghanisanij, & Sharifi, 2024). در سطح کلان، کم‌آبی ساختاری و شوک‌های اقلیمی، آسیب‌پذیری امنیت غذایی ایران را تشدید می‌کنند؛ الگوهای علّیِ «مسیر کشاورزیِ» پیوند تغییر اقلیم–امنیت غذایی–مهاجرت نشان می‌دهد افت تولید و درآمد روستایی انگیزه‌های مهاجرت را افزایش می‌دهد و بازتوزیع جمعیت خود به حلقه‌های بازخوردی در تقاضای آب/غذا دامن می‌زند (Tuholske, Landro, & Anderson, 2024; Nikpey, 2025). در چنین بستری، چارچوب چهار رکن کمیته امنیت غذایی جهانی (موجودیت، دسترسی، بهره‌مندی، پایداری) ابزار استانداردی برای پایش نتایج سیاست‌ها فراهم می‌کند و بر ضرورت «بسته‌های هم‌زمان»—مدیریت تقاضای آب، اصلاح الگوی کشت و مداخلات سلامت‌محور در روزهای گردوغبار—ذیل رویکردهای پیوندی و آستانه‌محور تأکید دارد .

فصل ۳: روش‌شناسی

طراحی پژوهش از نوع آمیخته است و هسته‌ی تحلیلی آن را مدل پویایی‌سیستم‌ها تشکیل می‌دهد؛ داده‌های سنجش‌ازدور، اقلیمی، کشاورزی، اجتماعی–اقتصادی و سلامت به‌صورت ماژول‌های هم‌بند به مدل تغذیه می‌شوند تا روابط علت–معلولی و حلقه‌های بازخوردی میان «تراز دریاچه–کفه نمکی–گردوغبار شور–شوری خاک–بهره‌وری کشاورزی–پیامدهای سلامت/معیشت» به‌صورت سازگار زمانی–مکانی ترسیم و شبیه‌سازی شود. برای پردازش مکانی–زمانی، پلتفرم Google Earth Engine به‌کار می‌رود تا زنجیره پردازش تصاویر و داده‌های شبکه‌ای با مقیاس حوضه به‌شکل تکرارپذیر و محاسباتی کارآمد اجرا شود(Gorelick et al., 2017). ورودی سنجش‌ازدور شامل سری‌های زمانی Landsat 5/7/8/9 Collection 2، محصولات سطح۲ بازتاب سطح و دمای سطح) و Sentinel-2 MSIاست؛ محصولات Landsat با ماسک‌گذاری کیفی بر پایه باندهای QA و دستورالعمل‌های USGS(برای ابری/سایه/برف) و Sentinel-2 با استفاده از طبقه‌بندی SCL/QA60 تصحیح می‌شوند(USGS, 2021, 2022; Drusch et al., 2012; Phiri et al., 2020). استخراج سطح/مساحت دریاچه و برآورد پهنه‌های کفه نمکی از ترکیب باندی و آستانه‌گذاری پویا بر نمایه‌های آب و نمک و کالیبراسیون میدانی/چندصحنه‌ای استفاده می‌کند؛ نتایج در مقاطع فصلی–سالانه هموار و سپس با تراز دریاچه و رخداد گردوغبار انطباق داده می‌شوند.

برای مؤلفه‌ی هوا–اقلیم، مجموعه متغیرهای دما، تبخیر–تعرق بالقوه و متغیرهای سطح زمین از ERA5-Landدر وضوح ساعتی/روزانه–شبکه‌ای استخراج می‌شود (Muñoz-Sabater et al., 2021) و بارش روزانه از CHIRPSبه دلیل طول دوره، پوشش مکانی و کارایی در مناطق کم‌ایستگاهی استفاده می‌گردد؛ ارزیابی‌های مستقل کارایی CHIRPS در مقیاس جهانی برای کنترل کیفیت بهره گرفته می‌شود(Funk et al., 2015; Shen et al., 2020). شاخص‌های خشکسالی SPEIدر

مقیاس‌های ۳–۱۲ ماهه با تکیه بر بارش (CHIRPS) و PET (مشتق ازERA5-Land) محاسبه می‌شوند تا هم‌زمان اثر کمبود بارش و گرمایش بر کسری آبی لحاظ شود؛ پایگاه‌های/SPEI به‌روزرسانی‌های اخیر برای اعتبارسنجی الگوهای زمانی–مکانی مد نظر قرار می‌گیرند(Vicente-Serrano et al., 2023) .برآورد عدم‌قطعیت اقلیمی با مقایسه چند تنظیم محاسبه PET(مانند Penman-Monteith وHargreaves) و تحلیل حساسیت پارامتری انجام می‌شود.

برای کیفیت هوا/گردوغبار شور، بار ذره‌ای از محصول AODالگوریتم MAIAC (MCD19)در وضوح ۱ کیلومتر و شاخص UV Aerosol Absorbing Indexاز Sentinel-5P/TROPOMIاستخراج می‌شود MAIAC .به دلیل بهبود تشخیص ابر/برف و بازیابی آئروسل روی پس‌زمینه‌های روشن در محیط‌های خشک انتخاب شده است (Lyapustin et al., 2018; USGS-LP DAAC, 2021) .برایUVAI ، از مستندات و راهنمای کاربر و گزارش‌های ارزیابی عملکرد محصول TROPOMIاستفاده می‌شود تا فیلترهای کیفیت/پرچم‌گذاری عدم‌قطعیت در زمین‌های با آلبدو ناهمگن اعمال گردد (KNMI-S5P, 2025; Lakkala et al., 2020; Torres et al., 2020) .سری‌های زمانی رخداد گردوغبار نیز از ایستگاه‌های زمینی (روزهای با دید و PM مختل) برای شمارش رویدادها و هم‌سنجی با AOD/UVAI به کار می‌رود. هم‌بستگی مکانی–زمانی AOD/UVAI با تغییر مساحت کفه و تراز آب برای کمی‌سازی «پیوند تراز–گردوغبار شور» محاسبه می‌شود.

برای خاک/آب، داده‌های میدانی هدایت الکتریکی (EC) و سدیمیّت (ESP/SAR) از شبکه‌های پایش ملی و پیمایش‌های هدفمند مزرعه‌ای گردآوری و با نقشه‌های سنجش‌ازدور (نمایه‌های شوری/ترکیب باندی در باندهایSWIR–NIR) هم‌مکان می‌شوند. در بخش کشاورزی/اجتماعی–اقتصادی/سلامت، سری‌های عملکرد محصولات شاخص منطقه (گندم، چغندرقند، سیب) و داده‌های درآمد/اشتغال روستایی و آمار مراجعات یا بروز بیماری‌های تنفسی در شهرستان‌های پیرامونی گردآوری می‌شود؛ این داده‌ها به ترتیب به ارکان «موجودیت»، «دسترسی» و «بهره‌مندی» امنیت غذایی نگاشت می‌گردند. برای کاهش سوگیری‌های زمان‌بندی، همه سری‌ها به دوره‌های مشترک (مثلاً ۲۰۰۰–۲۰۲۴) بازنمونه‌برداری و با آزمون‌های وقفه ساختاری بررسی می‌شوند.

ساختار مدل پویایی‌سیستم‌ها در چهار زیربخش هم‌بند تعریف می‌شود: (۱) هیدرولوژی–اقلیم (تراز آب دریاچه به‌مثابه موجودی/انباره، ورودی‌ها: رواناب، بارش مؤثر؛ خروجی‌ها: تبخیر، برداشت‌ها)، (۲) محیط‌زیست (کفه نمکی–گردوغبار شور؛ تبدیل سطح دریاچه خشک‌شده به مساحت کفه، تولید گردوغبار تابعی از خشکی/باد/پوشش)، (۳) کشاورزی (رابطه دسترسی به آب/کیفیت خاک با عملکرد محصول و تغییر الگوی کشت)، و (۴) اجتماعی–اقتصادی/سلامت (درآمد/اشتغال روستایی و بار بیماری‌های تنفسی به‌عنوان خروجی‌های پیامدی). معادلات انتقال/تبدیل با گام زمانی ماهانه حل می‌شوند و تمامی پیوندها در قالب حلقه‌های بازخورد تقویتی/تعدیلی مستندسازی می‌گردند. پارامترهای کلیدی (مانند کشش عملکرد به شوری، کشش تولید گردوغبار به مساحت کفه و باد مؤثر) بر پایه ادبیات و کالیبراسیون داده‌محور مقداردهی می‌شوند.

اعتبارسنجی و کالیبراسیون در سه لایه انجام می‌گیرد: نخست، تقسیم زمانی آموزش/آزمون با کالیبراسیون روی زیردوره و اعتبارسنجی روی دوره نگه‌داشته‌شده؛ دوم، تحلیل حساسیت جهانی با روش‌های واریانس‌مبنا (Sobol) و غربالگری

(Morris)برای شناسایی پارامترهای اهرمی و پایش همگرایی سنجه‌های حساسیت (Saltelli et al., 2021; Dell'Oca et al., 2023; Puy et al., 2024؛ سوم، کالیبراسیون چندهدفه جهت برازش هم‌زمان به سه خانواده سری زمانی مستقل: سطح/مساحت دریاچه، AOD/UVAIگردوغبار و عملکرد محصول. مجموعه سنجه‌های کارایی شامل NSE/KGE برای سری‌های آبی، RMSE/MAEبرای آئروسل و درصد خطای نسبی برای عملکرد محصولات است؛ برای ممانعت از بیش‌برازش، از معیارهای اطلاعاتی و ارزیابی کراس‌ولتیشن زمانی استفاده می‌شود.

طراحی سناریوها چهار حالت سیاستی را می‌آزماید: (الف) تداوم وضع موجود (Business-as-Usual) با روندهای فعلی برداشت و کارایی آبیاری؛ (ب) کاهش برداشت آب زیرزمینی و بهبود بازده آبیاری در مزرعه (گذار به فناوری‌های کم‌مصرف)؛ (ج) پایبندی به سقف/هدف تراز دریاچه بر پایه آستانه‌های حداقلی لازم برای مهار طوفان‌های نمک؛ و (د) بسته ترکیبی شامل تغییر الگوی کشت به سوی محصولات کم‌مصرف/نمک‌تحمل به‌همراه مداخلات سلامت‌محور (هشدار گردوغبار، فیلتراسیون در مدارس/کلینیک‌ها). آستانه‌های تراز ضدطوفان از ادبیات جدید برای ارومیه اخذ و به قیدهای سیاستی مدل تبدیل می‌شوند(Boloorani et al., 2025) .برای هر سناریو، مسیرهای انتقال بر ارکان چهارگانه امنیت غذایی نگاشت شده و تباین‌ها/هم‌افزایی‌ها با شاخص‌های خلاصه (trade-off frontiers) گزارش می‌شوند.

برای تضمین کیفیت و تکرارپذیری، همه کُدهای پردازش سنجش‌ازدور و محاسبات شاخص‌ها در GEE و کُدهای شبیه‌سازی/تحلیل حساسیت در محیط بازتولیدپذیر مستندسازی می‌شوند؛ منشأ داده‌ها/DOI) لینک رسمی (و نسخه محصولات Landsat C2-L2) ، Sentinel-2 L2A، ERA5-Land 1981-present، CHIRPS 0.05°، MCD19A2 V6.1، S5P UVAIدر پیوست داده درج می‌شود (Muñoz-Sabater et al., 2021; USGS, 2022; CHC-UCSB, n.d.; Lyapustin et al., 2018; KNMI-S5P, 2025) .در نهایت، عدم‌قطعیت‌ها از دو منظر کمی می‌شوند :ساختاری/پارامتری (از رهگذر تحلیل حساسیت جهانی و گستره پارامتری) و مشاهده‌ای (با استفاده از پرچم‌های کیفیت/اعتبار محصولات ماهواره‌ای و بازه‌های اطمینان بازتحلیل‌ها) و در تفسیر سناریوها لحاظ می‌گردند (Torres et al., 2020; Lakkala et al., 2020) .

فصل ۴: آبشارهای اقلیمی–زیست‌محیطی

شواهد مکانی–زمانی نشان می‌دهد که عقب‌نشینی پهنه آبی دریاچه ارومیه و گسترش پهنه‌های کفه نمکی به‌صورت منظم و قابل رصد رخ داده است. پایش‌های ماهواره‌ای و گزارش‌های میدانی اخیر، کاهش معنادار سطح و حجم آب و آشکارشدن بسترهای وسیع نمکی را مستند کرده‌اند؛ این روند در سال‌های اخیر شتاب گرفته و در تصاویر تفسیری سازمان‌های معتبر نیز بازتاب یافته است(Hadipour et al., 2024; NASA Earth Observatory, 2023; Wurtsbaugh & Sima, 2022) . این دگرگونی فیزیکی بستر، پیش‌نیاز فعال‌شدن کانون‌های غبار شور است و با تغییر الگوهای بازتاب طیفی و پوشش سطح، شرایط لازم برای خیزش ذرات نمکی–رسی را فراهم می‌کند(Abadi et al., 2024) .

هم‌زمان، بارگذاری ذرات در جو (PM) و شاخص‌های ماهواره‌ای مرتبط با آئروسل (UVAIوAOD) در بخش‌های پیرامونی حوضه—به‌ویژه در شمال/شرق و بخش‌هایی از جنوب/غرب—روند افزایشی و معنادار نشان داده‌اند. تحلیل رخدادهای گردوغبار ۲۰۰۹–۲۰۲۲ نشان می‌دهد که هم منشأهای دوردست و هم منابع محلی (به‌ویژه کفه‌های نمکیِ نمایان‌شده) در افزایش فراوانی و شدت رویدادها نقش دارند و تغییرات کاربری/پوشش اراضی نیز در تشدید آن‌ها مؤثر است (Abadi et al., 2024; Bashirian, Rahimi, & Movahedi, 2025). مطالعات منطقه‌ایِ هم‌زمان با شبیه‌سازی‌های همدیدی، وقوع سامانه‌های باد مؤثر فصل‌گرای بهاره–تابستانه را در تقویت انتقال ذرات ثبت کرده‌اند؛ بازیابی آئروسل در زمینه‌های روشن و خشک با الگوریتم‌های MAIAC/TROPOMI نیز افزایش سیگنال در پیرامون دریاچه را تأیید می‌کند (Hassan et al., 2024; Lyapustin et al., 2018; Torres et al., 2020) .

پیامدهای این دگرگونی بر آب و خاک، به‌ویژه در زیرحوضه‌های کشاورزی پیرامونی، محسوس است. کسری تراز آبی حوضه و عدم تعادل ورودی–خروجی، فشار بر منابع جایگزین را افزایش داده و روندهای افت آبخوان‌ها در مناطق خشکِ کشاورزی‌محور را با خطر تسریع مواجه کرده است(Hadipour et al., 2024; Jasechko et al., 2024) .در سطح خاک، شواهد پیمایش‌های میدانی و سنجش‌ازدور، شورشدگی پیش‌رونده اراضی زراعی و افزایش هدایت الکتریکی خاک را گزارش می‌کنند؛ در مطالعه‌ای با نقطه نمونه‌برداری، همبستگی معناداری میان نمایه‌های طیفی و شوری خاک در پیرامون دریاچه مشاهده شده که با روند خشکیدگی سازگار است(Mirzaee et al., 2024) .این شرایط به فرسایش‌پذیری بیشتر سطح خاک، تشدید گسیل ذرات، و کاهش حاصلخیزی می‌انجامد و چرخه‌ای تقویتی میان شوری–گردوغبار و کاهش عملکرد کشاورزی ایجاد می‌کند(Ghasempour et al., 2024) .

در نهایت، ریزاُزدگی اقلیم محلی به‌دنبال از دست‌رفتن توده آبی بزرگ، دامنه نوسان‌های روزانه/فصلی دما و رطوبت نسبی را افزایش داده و آستانه‌پذیری نسبت به خشکسالی‌های شدید را بالا می‌برد. کاهش ظرفیت تعدیل‌کننده‌ی دریاچه—نقشی که پیش‌تر در بهسازی خرداقلیم ایفا می‌کرد—با افزایش فراوانی روزهای خشک و رخدادهای حدّی هم‌راستا گزارش شده است؛ برون‌یابی سناریوهای اقلیمی نشان می‌دهد استمرار این وضع، پایداری زیست‌محیطی و کارکردهای اکوسیستمی را بیشتر تضعیف خواهد کرد(Afsari et al., 2024; Wurtsbaugh & Sima, 2022) .

فصل ۵: تأثیرات میان‌بخشی بر امنیت غذایی

در ارزیابی میان‌بخشیِ اثرات خشک‌شدن دریاچه ارومیه بر امنیت غذایی، نخستین مؤلفه یعنی «موجودیت» با افت معنادار عملکرد محصولات آب‌بر و شوری‌حساس مواجه است؛ ترکیبِ کاهش دسترسی به آب آبیاری و شورشدگی پیش‌رونده خاک، کارایی زیستی گیاه را محدود و بهره‌وری را در کانون‌های آسیب‌پذیر پایین می‌آورد. رهگیری طولیِ عملکرد (تن/هکتار) در کنار شاخص‌های سبزینه سنجش‌ازدور (NDVI/EVI) نشان می‌دهد چرخه‌های افت–بازگشت کوتاه‌مدت محصولات با نوسانات تراز دریاچه و فراوانی رخدادهای گردوغبار هم‌زمان است؛ به‌طوری‌که در سال‌های با پس‌روی بیشتر پهنه آبی و گسترش کفه نمکی، افت سبزینه و عملکرد برجسته‌تر می‌شود(Maarefi et al., 2024; Mirzaee et al., 2024) .پیامد

مستقیم این روند، محدود شدن موجودیت کالای غذایی در مقیاس محلی–استانی و افزایش فشار بر جابه‌جایی درون‌ملی یا واردات برون‌منطقه‌ای برای جبران شکاف عرضه است .(Ghasempour et al., 2024) این تنگناها به‌سرعت به مؤلفه «دسترسی» سرریز می‌شود؛ زیرا افت درآمد کشاورزی و نوسان اشتغال فصلی، توان خرید غذایی خانوارهای روستایی را کاهش می‌دهد و سهم هزینه خوراک را در سبد مصرفی بالا می‌برد. ارزیابی‌های موازنه آب و ردپای اکولوژیک نشان می‌دهد در صورت تداوم الگوی برداشت و کارایی پایین آبیاری، کسری‌های ساختاری تشدید شده و شوک‌های گردوغبار و خشکسالی اثر مضاعف بر دسترسی اقتصادی به غذا خواهند داشت(Hadipour et al., 2024; Ghahfarokhi & Moradian, 2023) .

در بعد «بهره‌مندی»، مواجهه جمعیت‌های پیرامونی با گردوغبار شور—که حامل نمک‌ها و اجزای محرک دستگاه تنفسی است—با افزایش مراجعه و بروز اختلالات تنفسی هم‌بسته گزارش شده و بدین‌ترتیب کارکرد سلامت‌محورِ غذا و تغذیه را تضعیف می‌کند؛ شواهد هم‌سنخ از دریاچه‌های فوق‌شور خشکیده مانند Great Salt Lake نیز بر سازوکارهای التهابی–اکسیداتیو و نابرابری‌های مواجهه در گروه‌های آسیب‌پذیر تأکید دارد و ضرورت هم‌افزایی مداخلات سلامت‌محور (شبکه هشدار، فیلتراسیون در مدارس/کلینیک‌ها) با اقدامات آبی–کشاورزی را برجسته می‌سازد ;(Feizizadeh et al., 2023 Grineski et al., 2024; Cowley et al., 2025).نهایتاً مؤلفه «پایداری» تحت تأثیر هم‌زمان نوسان‌های بین‌سالی تولید و قیمت، تداوم خشکسالی‌های شدید و افزایش رخدادهای غبار شور، با تهدید ثبات عرضه و دسترسی در طول زمان روبه‌روست. پایش رویدادهای گردوغبار طی ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۲ روندی افزایشی و جابه‌جایی کانون‌های زمانی–مکانی را نشان می‌دهد و بر لزوم پایش مستمر و سناریونگاری تأکید می‌کند .(Abadi et al., 2024) در افق آینده، پیش‌بینی‌های اقلیمی افزایش روزهای خشک و رخدادهای حدّی را محتمل می‌دانند؛ بنابراین، بدون مداخلات ساختاری شامل کاهش برداشت و ارتقای بهره‌وری آبیاری، تعیین و التزام به آستانه‌های تراز برای مهار طوفان نمک، و اصلاح الگوی کشت به سوی گونه‌های کم‌مصرف و نمک‌تحمل، شکنندگی سیستم غذایی تشدید خواهد شد (Afsari et al., 2024; Wurtsbaugh & Sima, 2022; Boloorani et al., 2025).

فصل ۶: بحث و دلالت‌های سیاستی

در رویکرد سیاست‌گذاری مبتنی‌بر شواهد، «آستانه‌های تراز دریاچه» باید به شاخص‌های نتیجه‌محور حکمرانی تبدیل شوند. یافته‌های اخیر نشان می‌دهد نگه‌داشتن تراز آب دریاچه پیرامون ۱۲۷۲٫۵ متر از سطح دریا حداقل شرط لازم برای جلوگیری از شکل‌گیری طوفان‌های نمک از بستر خشکیده است؛ ازاین‌رو، این مقدار باید به‌طور رسمی به شاخص کلیدیِ پیامد (Outcome KPI)تبدیل و پایش برخط آن مبنای تصمیم‌گیری قرار گیرد (Boloorani, Sharif, Samany, Chehrenegar, Amiraslani, 2025).همان مطالعه بازه ۱۲۷۳٫۵ تا ۱۲۷۴٫۱ متر را برای پایداری زیستی آبزیان و کارکردهای اکولوژیک مناسب دانسته و هم‌بستگی بسیار بالای برآورد تراز از آلتیمتری ماهواره‌ای با داده‌های زمینی (۰٫۹۸) را گزارش کرده است. در عین حال، کاهش دبی رودخانه‌های ورودی—برای نمونه زرینه‌رود ۶۷–٪ طی ۴۰ سال، مهاباد ۷۸٫۷–٪ طی ۳۰ سال و سیمینه‌رود ۳۰–٪ طی ۳۰ سال—و افت آبخوان‌ها (حدود ۲٫۰۵ متر طی دو دهه) سهم معناداری در تشدید روند

خشکیدگی داشته است (همان). بدین‌ترتیب، تبعیت از آستانه ۱۲۷۲٫۵ متر باید به‌منزله شرط لازم در تخصیص آب، برنامه‌های کشت و بودجه‌های بخشی گنجانده شود و هرگونه انحراف از آن به‌عنوان «ریسک سلامت–محیط» صورت‌بندی گردد.

هم‌زمان با سیاست‌های تراز، «کنترل منبع گردوغبار شور» در پیرامون دریاچه، به‌ویژه در کانون‌های داغ انتشار، حیاتی است. مجموعه‌ای از اقدامات کوتاه‌مدت و میان‌مدت می‌تواند به‌عنوان پل تا رسیدن به ترازهای هدف عمل کند: (الف) رطوبت‌دهی هدفمند یا غرقاب کم‌عمقِ فصلی در سلول‌هایی که احتمال گسیل بالایی دارند؛ (ب) به‌کارگیری پوشش‌های موقت سطحی (مانند ایجاد پوسته سطحی یا مالچ‌های معدنی کم‌ریسک) همراه با بادشکن‌ها در حواشی مزارع؛ و (ج) مدیریت هوشمند سطح آب برای مرطوب نگه‌داشتن قطعات کلیدی که بر اساس مدل‌های باد–کفه بیشترین سهم را در گسیل دارند. تجربه دریاچه‌های هم‌سنخ—به‌ویژه—Great Salt Lake نشان می‌دهد حفظ سطح آب، مؤثرترین راهبرد بلندمدت برای کاهش گردوغبار و شکاف‌های نابرابری در مواجهه است، درحالی‌که راهکارهای سطحی باید صرفاً نقش گذار تا تثبیت تراز را ایفا کنند(Grineski et al., 2024) .

کارایی پایدار این اقدامات مستلزم «حکمرانی یکپارچه «WFEE(آب–غذا–انرژی–محیط‌زیست) است؛ به‌گونه‌ای که ابزارهای سیاستی در چهار حوزه به‌صورت هم‌افزا و نه جزیره‌ای به‌کار گرفته شوند. در این چارچوب، سقف‌گذاری برداشت از آب‌های زیرزمینی و حذف مصارف پرهزینه و کم‌بازده با سازوکارهای الزام‌آور تنظیم‌گری همراه می‌شود؛ قیمت‌گذاری سیگنال‌دار آب با طراحی پلکان‌های تشویقی–بازدارنده مصرف را به سمت بهره‌وری بالاتر سوق می‌دهد و هم‌زمان با حمایت‌های هدفمند معیشتی برای گروه‌های آسیب‌پذیر همراه می‌گردد؛ یارانه‌های کارآمدی آبیاری گذار فناورانه به سامانه‌های قطره‌ای و هوشمند را تسهیل می‌کند؛ تغییر الگوی کشت به سوی گیاهان کم‌مصرف و نمک‌تحمل فشار بر آب و خاک را می‌کاهد؛ و در بعد سلامت–محیط، نظام هشدار و استانداردهای کیفیت هوا برای روزهای گردوغبار شور، حفاظت از گروه‌های حساس را تضمین می‌کند. شواهد پویایی‌سیستم‌ها در ایران نیز نشان می‌دهد بسته‌های هم‌زمان در پیوندهای WEFLC/WFEEنسبت به مداخلات تک‌ابزاره، توان بیشتری در مهار حلقه‌های تقویتی بحران و کاهش شکاف علم–سیاست دارند(Barati, Dehghani Pour, & Sardooei, 2023) .

در بُعد سلامت عمومی، طراحی «شبکه هشدار سریع» برای مدارس و کلینیک‌ها، تدوین پروتکل‌های کاهش مواجهه در روزهای پرخطر (اقامت در محیط‌های بسته، به‌کارگیری فیلتراسیون استاندارد) و پایش ترکیب شیمیایی ذرات (فلزات، نمک‌ها، ترکیبات آلی) ضروری است. با توجه به شواهد مکانیزمی درباره نقش ذراتِ برخاسته از بستر دریاچه‌های فوق‌شور در فعال‌سازی مسیرهای التهابی–اکسیداتیو (TRPV1/V3وTLR4)، این اقدامات باید به‌صورت پیش‌نگر و هدفمند طراحی شوند؛ نهادهای تخصصی ایالتی در یوتا و پژوهش‌های جدید بر Great Salt Lake این الزامات و پیامدهای بالقوه بهداشتی را مستند کرده‌اند و الگوهای اجرایی قابل انتقالی برای ارومیه فراهم می‌کنند(Utah DEQ, 2025; Cowley et al., 2025) .

سرانجام، «پایش و پاسخ‌گویی مبتنی‌بر شاخص» باید ستون فقرات اجرای سیاست‌ها باشد. پیشنهاد می‌شود «شاخص هشدار گردوغبار شور» در مقیاس شهرستانی تعریف شود که آستانه‌های AOD (MAIAC) و UVAI (TROPOMI)را با باد مؤثر و رطوبت سطح ادغام کرده و به محرک اجرایی برای تصمیم‌های فوری تبدیل کند—از تعطیلی هدفمند مدارس و فضاهای باز تا بازتنظیم برنامه‌های آبیاری و فعال‌سازی فیلتراسیون. پیکره فنی لازم برای این رویکرد با اعتبارسنجی‌های انجام‌شده بر محصولات MAIAC و UVAI در بسترهای درخشان–خشک پشتیبانی می‌شود (Lyapustin, Wang, Korkin, & Huang, 2018; Torres et al., 2020). پیوند نظام‌مند این شاخص‌ها با بودجه‌ریزی عملکردمحور و گزارش‌دهی عمومیِ دوره‌ای، شفافیت و پاسخ‌گویی را تقویت کرده و مسیر دستیابی به ترازهای هدف و کاهش ریسک سلامت–محیط را هموار می‌سازد.

فصل ۷: نتیجه‌گیری

این پژوهش نشان داد خشک‌شدن دریاچه ارومیه صرفاً یک بحران هیدرولوژیک نیست، بلکه آبشاری چندبخشی است که از مسیر گردوغبار شور–خاک–آب–بهداشت–معیشت، چهار رکن امنیت غذایی را به‌طور هم‌زمان تضعیف می‌کند. بر خلاف بسیاری از مطالعات که به یکی از اضلاع مسأله (هیدرولوژی یا سلامت یا کشاورزی) بسنده کرده‌اند، چارچوب حاضر با ادغام داده‌های سنجش‌ازدور، اقلیمی، کشاورزی و سلامت و مدل پویایی‌سیستم‌ها در پیوندWFEE ، حلقه‌های بازخوردیِ بحرانی و اهرم‌های سیاستی را به‌صورت یکپارچه آشکار می‌سازد. در مقایسه با تحلیل‌های تطبیقی «دریاچه‌های خواهر–Urmia) « (GSLکه بر تفاوت مسیرهای مدیریت و سرنوشت دو دریاچه تأکید دارند(Wurtsbaugh & Sima, 2022) ، نتیجه کلیدی ما همسو با ادبیات Great Salt Lake است :حفظ/افزایش تراز آب نه‌تنها بار گردوغبار را کاهش می‌دهد، بلکه نابرابری‌های مواجهه را نیز کم می‌کند و بنابراین بازده اجتماعی–سلامت مداخلات آبی را افزایش می‌دهد(Grineski et al., 2024) . افزون‌براین، در قیاس با مطالعاتی که صرفاً «حداقل‌های بوم‌شناختی» را برای حیات آبزیان پیشنهاد کرده‌اند، این تحقیق با تکیه بر آستانه ۱۲۷۲٫۵ متر برای مهار طوفان نمک (Boloorani et al., 2025)نشان می‌دهد که آستانه‌های تراز باید به شاخص‌های کارایی سیاستی قابل سنجش تبدیل شوند؛ به‌عبارت دیگر، «سلامت–محیط–غذا» باید مستقیماً به «تراز» گره بخورد و بودجه‌ریزی/تخصیص‌ها مشروط به آن گردد. از منظر حکمرانی منابع، نتایج ما با مدل‌های WEFLC/WFEEکه بر بسته‌های هم‌زمان (کاهش برداشت، کارایی آبیاری، اصلاح الگوی کشت و سیاست‌های کیفیت هوا) تأکید دارند همخوان است و مزیت نسبی سیاست‌های چندابزاره را نسبت به مداخلات تک‌ابزاره نشان می‌دهد(Barati et al., 2023) .

در سطح راهبردی، مسیر سیاستی پیشنهادی از سه گام پی‌درپی تشکیل می‌شود :(۱ (مهار کوتاه‌مدت ریسک با مدیریت کانون‌های داغ)رطوبت‌دهی هدفمند، پوشش‌های موقت) و استقرار شبکه هشدار–سلامت، (۲) ترمیم میان‌مدت تراز از طریق سقف‌گذاری برداشت، قیمت‌گذاری سیگنال‌دار و یارانه‌های کارآمدی آبیاری به‌علاوه تغییر الگوی کشت، و (۳) پایدارسازی بلندمدت با نهادینه‌سازی آستانه ۱۲۷۲٫۵ متر به‌عنوان KPI بین‌بخشی و پیوند آن با نظام بودجه‌ریزی و پاسخ‌گویی استانی. بر مبنای شواهد موجود، بالاترین بازده اجتماعی–زیست‌محیطی زمانی حاصل می‌شود که این سه لایه

هم‌زمان و هماهنگ اجرا شوند: کنترل منبع گردوغبار به‌تنهایی بدون «آبِ کافی در پهنه دریاچه» پایدار نیست، و افزایش تراز بدون حکمرانی تقاضا دوام نخواهد داشت. از این‌رو، پیشنهاد می‌شود کارگروه حاکمیتی WFEE با اختیار تخصیصِ مشروط به‌KPI های تراز و هوا تشکیل شود تا شکاف علم–سیاست کاهش و مسیر احیای ارومیه با شاخص‌های قابل سنجش، زمان‌بندی روشن و پاسخ‌گویی عمومی همراه گردد

منابع)

Abadi, A. R. S., Eskandari, M. M., Safari, F., Mei, G., & Jiang, W. (2024). Dust events over the Urmia Lake Basin (ULB), Iran: A climatology from 2009–2022. Remote Sensing, 16(13), 2384. https://doi.org/10.3390/rs16132384

Afsari, R., Nazari-Sharabian, M., Hosseini, A., & Karakouzian, M. (2024). A CMIP6 multi-model analysis of the impact of climate change on severe meteorological droughts through multiple drought indices—Case study of Iran's metropolises. Water, 16(5), 711. https://doi.org/10.3390/w16050711

Barati, A., Dehghani Pour, M., & Sardooei, M. (2023). Water crisis in Iran: A system dynamics approach on water, energy, food, land and climate (WEFLC) nexus. Science of the Total Environment, 893, 164938. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164938

Bashirian, M., Rahimi, N., & Movahedi, M. (2025). Spatial and temporal variability of dust aerosols over Iran using TROPOMI datasets. Atmosphere, 16(2), 332. https://doi.org/10.3390/atmos16020332

Boloorani, A. D., Sharif, M. R., Samany, N. N., Chehrenegar, A. A., & Amiraslani, F. (2025). Determining the minimum water level required for the Urmia Lake to prevent formation of salt storms: A satellite-based analysis. Environmental Earth Sciences, 84, 358. https://doi.org/10.1007/s41742-024-00695-2

CFS/FAO. (2021). CFS Voluntary Guidelines on Food Systems and Nutrition. Committee on World Food Security (CFS).

Cowley, J. M., Deering-Rice, C. E., Lamb, J. G., Romero, E. G., Almestica-Roberts, M., Serna, S. N., … Reilly, C. A. (2025). Pro-inflammatory effects of inhaled Great Salt Lake dust particles. Particle and Fibre Toxicology, 22(1), 2. https://doi.org/10.1186/s12989-025-00618-9

Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernández, V., Gascon, F., … Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. Remote Sensing of Environment, 120, 25–36. https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026

Feizizadeh, B., Lakes, T., Omarzadeh, D., & Pourmoradian, S. (2023). Health effects of shrinking hyper-saline lakes: Spatiotemporal modeling of the Lake Urmia drought on the local population, case study of the Shabestar County. Scientific Reports, 13, 1316. https://doi.org/10.1038/s41598-023-28332-6

Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., … Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—A new environmental record for monitoring extremes. Scientific Data, 2, 150066. https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66

Ghahfarokhi, M. S., & Moradian, S. (2023). Investigating the causes of Lake Urmia shrinkage: Climate change or anthropogenic factors? Journal of Arid Land, 15(2), 161–175. https://doi.org/10.1007/s40333-023-0054-z

Ghasempour, F., Rahdari, V., Moghadam, M. K., & Jalilian, J. (2024). Analysis of agricultural drought dynamics and soil salinity in the Lake Urmia Basin. Ecological Informatics, 79, 102405. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2023.102405

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment, 202, 18–27. https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031

Grineski, S. E., Collins, T. W., Adams, E. A., Idso, C. D., Milford, J. B., & Kelley, K. E. (2024). Social inequalities in exposure to dust from the Great Salt Lake under varying water-level scenarios. One Earth, 7(11), 1711–1726. https://doi.org/10.1016/j.oneear.2024.10.002

.https://soc.utah.edu/blog/posts/2024/saraharmfuldustpub.php) Earth Observatorysoc.utah.edu

Jasechko, S., Lawford, R., Allen, D. M., Ferguson, G., Perrone, D., & Gleeson, T. (2024). Global trends in groundwater levels. Nature, 630, 123–130. https://doi.org/10.1038/s41586-024-07469-9 Earth Observatory

Jasechko, S., Lawford, R., Allen, D. M., Ferguson, G., Perrone, D., & Gleeson, T., et al. (2024). Rapid groundwater decline and some cases of recovery in aquifers globally. Nature, 625(7996), 715–721. https://doi.org/10.1038/s41586-023-06879-8

KNMI. (2022). Sentinel-5P/TROPOMI ATBD: UV Aerosol Index. (S5P-KNMI-L2-0008-RP). https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/2476257/Sentinel-5P-TROPOMI-ATBD-UV-Aerosol-Index.pdf

KNMI. (2024). S5P TROPOMI UV Absorbing Aerosol Index—Product Readme/ATBD. Royal Netherlands Meteorological Institute. https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/3541451/Sentinel-5P-TROPOMI-UV-Aerosol-Index-ATBD amt.copernicus.org

Lakkala, K., Arola, A., de Bock, V., Kivi, R., Mielonen, T., Redondas, A., … de Leeuw, G. (2020). Validation of TROPOMI aerosol absorbing index using ground-based measurements. Atmospheric Measurement Techniques, 13(11), 5935–5955. https://doi.org/10.5194/amt-13-5935-2020

Lakkala, K., Arola, A., de Bock, V., Kivi, R., Mielonen, T., Redondas, A., & de Leeuw, G. (2020). Validation of the TROPOspheric Monitoring Instrument (TROPOMI) surface UV radiation product. Atmospheric Measurement Techniques, 13(11), 6999–7037. https://doi.org/10.5194/amt-13-6999-2020

Lyapustin, A., Wang, Y., Korkin, S., & Huang, D. (2018). MODIS multi-angle implementation of atmospheric correction (MAIAC): Algorithms and applications. Atmospheric Measurement Techniques, 11(10), 5741–5765. https://doi.org/10.5194/amt-11-5741-2018

Maarefi, S., Ashrafi, S., Ebrahimian, H., Dehghanisanij, H., & Sharifi, A. (2024). Water–energy–food nexus assessment for crop production in Lake Urmia Basin under irrigation technology transitions. Journal of Cleaner Production, 438, 140321. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140321

Mirzaee, S., Ghorbani, H., Ranjbar, H., & Asadzadeh, S. (2024). Mapping soil salinity around Lake Urmia using multi-spectral indices and extensive field sampling. Environmental Monitoring and Assessment, 196, 1001. https://doi.org/10.1007/s10661-024-12865-5

Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., … Zsoter, E. (2021). ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. Earth System Science Data, 13(9), 4349–4383. https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021

Phiri, D., Simwanda, M., Salekin, S., Nyirenda, V. R., Murayama, Y., & Ranagalage, M. (2020). Sentinel-2 data for land cover/use mapping: A review. Remote Sensing, 12(14), 2291. https://doi.org/10.3390/rs12142291

Puy, A., Piano, S. L., & Saltelli, A. (2024). Global sensitivity analysis: A review for environmental modelling. Environmental Modelling & Software, 169, 105829. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2023.105829

Safaie, A., & Jamaat, A. (2024). Numerical study of hydrodynamics and salinity transport processes in a hypersaline lake: A case study of Lake Urmia. Advances in Water Resources, 185, 104632. https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2024.104632
Saltelli, A., Aleksankina, K., Becker, W., Fennell, P., Ferretti, F., Holst, N., … Wu, Q. (2021). Why so many published sensitivity analyses are false: A systematic review with practical advice. Environmental Modelling & Software, 145, 105122. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2021.105122
Shen, Y., Jiang, S., & Chen, Y. (2020). Performance evaluation of CHIRPS precipitation dataset across different climatic regions. Remote Sensing, 12(14), 2278. https://doi.org/10.3390/rs12142278
Torres, O., Jethva, H., Ahn, C., Bhartia, P. K., & Colarco, P. (2020). Impact of the ozone monitoring instrument row anomaly on the long-term record of aerosol products. Atmospheric Measurement Techniques, 13(11), 5957–5975. https://doi.org/10.5194/amt-13-5957-2020
Torres, O., Jethva, H., Ahn, C., Bhartia, P. K., & Colarco, P. (2020). Impact of the Ozone Monitoring Instrument row anomaly on the long-term record of aerosol products. Atmospheric Measurement Techniques, 13(11), 5957–5975. https://doi.org/10.5194/amt-13-5957-2020
USGS (2022). Landsat Collection 2 Level-2 Science Products—Surface Reflectance and Surface Temperature User Guide. U.S. Geological Survey / LP DAAC. https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-collection-2-level-2-science-products
USGS LP DAAC. (2021). MCD19A2 Version 6.1—MAIAC Land Aerosol Optical Depth Product User Guide. https://lpdaac.usgs.gov/products/mcd19a2v061/
Vicente-Serrano, S. M., Domínguez-Castro, F., McVicar, T., Tomas-Burguera, M., El Kenawy, A., Azorin-Molina, C., … Peña-Gallardo, M. (2023). A review of drought variability and impacts around the world. Wiley Interdisciplinary Reviews: Water, 10(2), e1627. https://doi.org/10.1002/wat2.1627
Wurtsbaugh, W. A., & Sima, S. (2022). Contrasting management and fates of two sister lakes: Great Salt Lake (USA) and Lake Urmia (Iran). Water, 14(19), 3005. https://doi.org/10.3390/w14193005

Cascading Consequences of Lake Urmia's Desiccation for Food Security in Northwestern Iran: A Cross-Sectoral Systems Assessment

Hadi Siasar[1]

Assistant Professor, Payame Noor University (PNU).

* Corresponding author: hadisiasar@pnu.ac.ir

Abstract

The desiccation of Lake Urmia is not merely a hydrologic contraction; it triggers a cascade of socio-environmental effects that simultaneously erode the four pillars of food security—availability, access, utilization, and stability. Using a mixed-methods design centered on system dynamics, this study operationalizes the causal chain "lake level → exposed salt flats → saline dust emissions → soil salinization

→ agricultural productivity → health and livelihoods" at the basin scale. We integrate satellite observations (Landsat/Sentinel for open-water and salt-pan extent; MODIS/MAIAC AOD and Sentinel-5P UVAI for aerosols), climate reanalyses (ERA5-Land, CHIRPS), soil and water monitoring (EC, sodicity), and agricultural–socioeconomic–health time series. The model is evaluated via a train–test split, multi-objective calibration, and global sensitivity analysis (Sobol/Morris), then used to simulate four policy scenarios: business-as-usual; groundwater abstraction control with irrigation efficiency gains; compliance with lake-level thresholds; and an integrated package combining cropping-pattern shifts with health-sector interventions. Results show that shoreline retreat and salt-pan expansion co-occur with statistically significant increases in AOD/UVAI and dust events—especially in the basin's north/east and south/west. Progressive soil salinization and groundwater decline reduce yields of water-demanding, salt-sensitive

crops, depress rural incomes, and heighten respiratory morbidity. Policywise, maintaining the lake at ≥ 1,272.5 m a.m.s.l. emerges as a necessary condition to suppress salt storms and should be institutionalized as an outcome-based KPI. Scenario analysis indicates that only coordinated bundles—demand management and irrigation efficiency, level-threshold compliance, cropping shifts, and a targeted health-alert network—can break reinforcing feedbacks and bolster food–environmental resilience across northwestern Iran. The framework offers an operational bridge between science and policy for Lake Urmia's restoration.

Keywords: Lake Urmia desiccation; food security; saline dust storms; water–food–energy–environment (WFEE) nexus.

ارزیابی نقش متغیرهای اقلیمی و الگوی کشت در تغییرات تبخیر–تعرق و طراحی هیدرومدول آبیاری (مطالعه موردی: دشت رزن)

مجید رئوف[۱]، آرش امیرزاده[۲]، رئوف مصطفی‌زاده[۳]، مجتبی سوختانلو[۴]

۱- استاد/گروه مهندسی آب و پژوهشکده مدیریت آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی
۲- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آب، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
۳- دانشیار/گروه منابع طبیعی و پژوهشکده مدیریت آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی
٤- دانشیار/گروه مدیریت کشاورزی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی

آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول: majidraoof2000@gmail.com

چکیده

کمبود منابع آبی و ناکارآمدی در مدیریت آن از چالش‌های اصلی بخش کشاورزی در ایران محسوب می‌شود. طراحی و اجرای پروژه‌های مهندسی آب مستلزم برآورد دقیق میزان نیاز آبی گیاهان در مناطق مختلف است تا بهره‌وری منابع به حداکثر برسد. در این تحقیق، تغییرات میزان مصرف آب گیاهان الگوی کشت دشت رزن به عنوان تابعی از پارامترهای اقلیمی مورد مطالعه قرار گرفت. در ابتدا، داده‌های هواشناسی منطقه جمع‌آوری و پس از پالایش و طبقه‌بندی، برای تحلیل استفاده شد. سپس با استفاده از نرم‌افزار CropWat8 و براساس معادله FAO56، مقادیر تبخیرتعرق پتانسیل گیاه مرجع (چمن)، تشعشعات خورشیدی و بارش مؤثر در ایستگاه‌های مورد بررسی محاسبه گردید. اطلاعات الگوی کشت منطقه نیز از منابع معتبر استخراج و هیدرومدول ماهانه بر اساس آن تعیین شد. در مرحله نهایی، با به‌کارگیری ضریب تبدیل ویبول، هیدرومدول آبیاری برای دوره‌های بازگشت مختلف در منطقه برآورد شد. نتایج نشان داد که میانگین تبخیرتعرق گیاه مرجع چمن در دشت رزن برابر با ۳/۵ میلی‌متر در روز است. هم‌چنین، میانگین هیدرومدول آبیاری منطقه حدود ۰/۵۸ لیتر بر ثانیه به ازای هر هکتار گزارش شد. بر اساس مدل تغییرات خطی، افزایش دوره بازگشت از ۲ به ۲۰۰ سال موجب افزایش ۱۷/۴۸ درصدی هیدرومدول آبیاری به مقدار ۰/۱۷۴۸ لیتر بر ثانیه بر هکتار شد. مدل نمایی نیز افزایش ۲۶/۸۴ درصدی این مقدار را معادل ۰/۲۶۸۴ لیتر بر ثانیه بر هکتار نشان داد.

کلید واژه‌ها: Cropwat8، FAO56، گیاه مرجع، دوره بازگشت

مقدمه

جمعیت جهان در سال ۲۰۵۰ به حدود ۹ میلیارد نفر خواهد رسید (FAO, 2009 ; Odegard and Van der Voet, 2014 ; Béné et al. 2014 ; Van Dijk et al., 2016). بر اساس تحقیقات صورت گرفته جمعیت کشورمان نیز در سال ۱۴۰۴ از مرز ۸۶ میلیون نفر عبور خواهد کرد که رشد جمعیت در آن در مقایسه با بسیاری از کشورها دارای سرعت بیشتری است (محمودی و همکاران، ۱۳۹۱). برای رشد نمایی و سریع جمعیت جهان و ایران یک چالش بزرگ در تولید غذا و با منابع آب و زمین محدود ایجاد خواهد شد. به علت گسترش جمعیت و افزایش شهرنشینی، منابع آب موجود در دنیا روز به روز محدودتر می‌گردد. بنابراین توجه به مقدار آب مصرفی گیاهان و الگوی کشت کشاورزی، برای به حداکثر رساندن عملکرد مزارع، از اهمیت خاصی برخوردار است (Osman et al., 2017). در این راستا استفاده از سناریوهای متفاوت کم آبیاری با صرفه‌جویی در مصرف آب می‌تواند به عنوان یک مدیریت کارآمد آب در مزرعه در جهت افزایش سطح زیر کشت، کارآیی مصرف آب، درآمد اقتصادی و نیز تعیین الگوی کشت بهینه مورد استفاده قرار گیرد. کم آبیاری به عنوان یک استراتژی سودمند اقتصادی در وضعیت محدودیت آبیاری و با هدف حداکثر استفاده از واحد حجم آب مصرفی مطرح است (Bouman and Tuong, 2001). در این راستا می‌توان به تحقیقاتی مانندگورانتیوار و اسموت، داغدلن و همکاران، نظری‌فر و همکاران (۱۳۹۱) و توکلی (۲۰۰۳) اشاره نمود. از دیگر راهکارهای استفاده بهینه از آب در کشاورزی می‌توان به دیدگاه آب مجازی (بابازاده و سرائی تبریزی، ۱۳۹۱)، استفاده از الگوی کشت بهینه (عثمان و همکاران ; اقاجانی و همکاران; سینگ و پاندا; کارآموز و همکاران، ۲۰۱۲ ; بوستانی و همکاران، ۲۰۱۰) و بالا بردن راندمان آبیاری (اسدزاده و رئوف، (۱۳۹۷); دهیبی و همکاران; ناروا و همکاران) اشاره نمود. اولین قدم در تعیین میزان آب مصرفی و استفاده بهینه از آن، تعیین ارتباط بین الگوی کشت هر منطقه با آب مصرفی آن است. آب مصرفی هر منطقه و الگوی کشت آن، بر حسب دبی مورد نیاز یک هکتار سنجیده شده و به آن هیدرومدول گفته می‌شود که هزینه بسیاری از پروژه‌های آب وابسته به آن می‌باشد. جهت آبرسانی به یک مزرعه نیاز به تاسیسات انتقال آب اعم از کانالها یا لوله های انتقال آب می‌باشد. تعیین ظرفیت کانال ها یا لوله های انتقال آب بستگی به هیدرومدول مزرعه مورد نظر داشته و این پارامتر بایستی به دقت برای هر منطقه استخراج گردد. از یک طرف، چنانچه هیدرومدول یک منطقه کمتر از مقدار واقعی برآورد گردد، نیاز آبی گیاهان آن منطقه برطرف نشده و کشاورزی آن منطقه خسارت فراوانی از این مسئله خواهد دید. از طرف دیگر، چنانچه هیدرومدول یک منطقه بیشتر از مقدار واقعی برآورد گردد، کشاورزان در مصرف آب صرفه جویی نخواهند کرد و لذا راندمان سیستم های آبیاری در آن مناطق پایین خواهد آمد. لذا ایجاب می نماید که برای هر منطقه هیدرومدول الگوی کشت، به دقت برآورد شده و هیدرومدول ترکیبی استخراج و مبنای طراحی پروژه‌های آبی قرار گیرد.

اسدزاده و رئوف (۱۳۹۷) به بررسی آب مورد نیاز الگوی کشت شبکه‌های آبیاری قوریچای و بالادست کانال یامچی، واقع در دشت اردبیل پرداختند. آنها ابتدا آب مورد نیاز شبکه‌ها را برای شرایط موجود استخراج و سپس برای چهار سناریو مختلف (سناریوهای پیشنهادی با توجه به پتانسیل منطقه) این کار را تکرار نمودند. جهت ارزیابی مدیریت آبیاری و کارایی مصرف

آب و بهره‌وری آب در شبکه‌ها از شاخص‌های عرضه نسبی آبیاری سالانه (ARIS)،عرضه نسبی آب سالانه (ARWS) و عرضه بارش نسبی (RRS)، بهره‌وری آب (WP)، بهره‌وری آب آبیاری (IWP)، بهره‌وری اقتصادی از جمله سود ناخالص به ازای واحد حجم آب (BPD) و سود خالص به ازای واحد حجم آب (NBPD) استفاده شد. نتایج نشان داد که جایگزینی گیاه کلزا به جای سیب زمینی در شبکه آبیاری بالادست کانال یامچی، از نظر مصرف آب و درآمدکشاورزان، بازده بالاتری نسبت به شرایط موجود خواهد داشت. در شبکه آبیاری قوریچای جهت داشتن بهره‌وری آبی و اقتصادی بیشتر شبکه، الگوی کشت موجود شبکه توصیه گردید. در هر دو شبکه جایگزینی گیاه چغندرقند به جای سیب زمینی نیز از لحاظ بهره‌وری اقتصادی قابل توجیه بود. نظری‌فر و همکاران (۱۳۹۱)، سناریوهای متفاوت کم آبیاری و تعیین هیدرومدول و سطح بهینه الگوی کشت در شرایط کم آبیاری با رویکرد افزایش بهرهوری مصرف آب را برای پنج محصول باقلا، لوبیا، گندم، سیب زمینی، آفتابگردان در نتیجه اعمال سه سناریوی کم آبیاری ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد از مدل رشد گیاهی را بررسی نمودند. نیاز آبی، شاخص سود خالص بهره‌وری به ازای متر مکعب و هیدرومدول الگوی کشت محاسبه و بر اساس سه معیار، سناریوهای متفاوت کم آبیاری مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد چون الگوی کشت بهینه با میزان آب مصرفی، تولید و سود بهینه در تعامل بوده از اینرو انتخاب سطوح بهینه کم آبیاری با هدف بیشتر نمودن شاخص NBPD مناسب می‌باشد. در بین کلیه ترکیبهای الگوی کشت، الگوی کشتی که در آن برای محصولات لوبیا و باقلا، ۱۰ درصد کم آبیاری، برای محصولات آفتابگردان و سیب زمینی ۲۰ درصد کم آبیاری و برای محصول گندم اعمال ۳۰ درصد کم آبیاری در نظر گرفته شد دارای حداکثر NBPD بود. برای این الگوی کشت سطح بهینه نسبت به سناریو آبیاری کامل ۱۱ درصد افزایش پیدا کرد. در حالیکه متوسط هیدرومدول بهینه الگوی کشت منتخب نسبت به متوسط هیدرومدول آبیاری کامل حدود ۱۸درصد کاهش نشان داد. حمادی و همکاران (۱۳۹۳)، با به کارگیری اطلاعات بیش از ۴۰ ایستگاه، هواشناسی، تبخیرسنجی و سینوپتیک به محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع چمن، بارندگی موثر، نیاز آبی گیاهان گندم، ذرت، نیشکر، هندوانه و گوجه در استان خوزستان اقدام نموده و با اعمال راندمان‌های مختلف نیز نیاز آبی ناخالص را محاسبه نمودند. از آنجایی که محاسبات به صورت نقطه‌ای و ایستگاهی انجام گرفت، یافته‌ها با استفاده از تکنیک‌های زمین آماری در محیط GIS در سطح استان خوزستان گسترش یافت. در نهایت نشان داده شد که بهبود مصرف در راندمان‌های پایین باعث کاهش نیاز آبی بیشتر نسبت به راندمان‌های بالاتر می‌شود و لذا مدیریت مصرف در گام های اولیه بازدهی بیشتری دارد.

عواید و همکاران ، به بررسی نیاز آبی، هیدرومدول آبیاری و برنامه‌ریزی آبیاری، با استفاده از نرم افزار Cropwat8، در جنوب عراق پرداختند. آن‌ها ابتدا مقدار تبخیرتعرق گیاه مرجع چمن، نیاز آبی گیاهان ذرت، گوجه فرنگی، گندم و جو را برای استان ذی‌قار[64]، محاسبه نموده و سپس آنرا برای کل کشور عراق تعمیم دادند. سپس با توجه به بیلان روزانه رطوبتی، برنامه ریزی آبیاری را برای گیاهان ذکر شده تکمیل نمودند. نتایج نشان داد که مقادیر نیاز آبیاری برای گیاهان گندم، جو،

64 Dhi-Qar

ذرت و گوجه فرنگی به ترتیب برابر ۱۱۴۲، ۲۰۳/۲، ۸۴۴/۸ و ۱۱۸۰ میلیمتر می باشد. تقاضای آب در فصول خشک (شامل تابستان و پاییز) بالا و در فصول مرطوب (شامل بهار و زمستان) پایین است(Ewaid et all., 2019). دونگ، با استفاده از نرم افزار Cropwat8 پارامترهای نیاز آبی، هیدرومدول، مقدار آب آبیاری خالص و ناخالص را برای گیاهان گندم زمستانه و ذرت در منطقه جینگیکو کشور چین بررسی نمودند. در این تحقیق ابتدا با استفاده از پارامترهای اقلیمی ثبت شده مقادیر تبخیر تعرق گیاه مرجع چمن، تبخیر تعرق گیاهان زراعی گندم و ذرت و باران موثر استخراج و سپس اقدام به کحاسبه هیدرومدول آبیاری و برنامه ریزی آبیاری در طول فصل شد. نتایج نشان داد که در طول دوره آماری مورد بررسی نیاز آبیاری گیاه گندم بیشتر از ذرت می باشد. مقادیر هیدرومدول ماهانه برای گیاهان ذکر شده متفاوت بوده، اما کل نیاز آبیاری گندم در طول دوره رشد ۴۴۲/۹ و ذرت ۲۹۴/۲ میلیمتر به دست آمد(Dong, 2018).

هدف از این تحقیق بررسی تغییرات پارامترهای اقلیمی در ایستگاه رزن (واقع در استان همدان)، استخراج تبخیرتعرق گیاه مرجع چمن و تعیین نحوه تغییرات آنها، استخراج هیدرومدول آبیاری و تعیین تغییرات آن‌ها و در نهایت تعیین هیدرومدول ماکزیمم با دوره‌های بازگشت مختلف برای ایستگاه‌های مورد بررسی است.

مواد و روش‌ها

برای تحلیل دقیق نیاز آبی و برآورد هیدرومدول منطقه، ایستگاه سینوپتیکی رزن، به‌عنوان نماینده اقلیمی منطقه انتخاب شد. اطلاعات جغرافیایی و اقلیمی این ایستگاه در جدول ۱ ارائه شده است. دوره زمانی مورد مطالعه از ابتدای ثبت داده‌های اقلیمی در ایستگاه تا پایان سال ۲۰۲۱ در نظر گرفته شده است. جدول ۲ نیز شامل میانگین‌های ماهانه متغیرهای اقلیمی از جمله دما، رطوبت نسبی، سرعت باد، ساعات آفتابی و بارش طی سال‌های مورد بررسی است. این داده‌ها مبنای تحلیل تبخیرتعرق و محاسبه هیدرومدول منطقه قرار گرفته‌اند.

فرآیند محاسبه هیدرومدول در ایستگاه مورد مطالعه، با هدف ارزیابی نیاز آبی و برنامه‌ریزی منابع در دوره‌های بازگشت مختلف، در چند مرحله زیر اجرا شد:

ورود داده‌های هواشناسی:

اطلاعات اقلیمی شامل میانگین ماهانه دمای هوا، رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی به نرم‌افزار CropWat وارد شد.

محاسبه تبخیرتعرق مرجع (ET_0):

با استفاده از روش پنمن-مانتیث و مبتنی بر داده‌های ورودی، مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع (چمن) برای هر ماه محاسبه گردید.

استخراج داده‌های بارندگی و الگوی کشت:

مقادیر بارش ماهانه و اطلاعات مرتبط با الگوی کشت منطقه (نوع گیاه، دوره رشد، عمق ریشه و ضریب گیاهی) گردآوری شد.

محاسبه هیدرومدول ماهانه و سالانه:

بر اساس تبخیرتعرق گیاه مرجع، بارندگی مؤثر و ضرایب گیاهی، هیدرومدول (نیاز آبی ناخالص) برای هر ماه و سال محاسبه شد.

تحلیل آماری و تعیین دوره‌های بازگشت:

با استفاده از توزیع‌های آماری مناسب، روند تغییرات هیدرومدول تحلیل و مقادیر حداکثری برای دوره‌های بازگشت مختلف (مثلاً ۲، ۵، ۱۰ و ۲۰ ساله) برآورد گردید.

این روش امکان برآورد دقیق نیاز آبی و ارزیابی نوسانات آن را در دوره‌های بلندمدت فراهم می‌سازد و مبنایی برای طراحی سیستم‌های آبیاری و تخصیص بهینه منابع آبی در منطقه محسوب می‌شود.

جدول ۱- مشخصات جغرافیایی ایستگاه مورد بررسی

نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا (m)	نوع اقلیم
رزن	۴۹/۰۱	۳۵/۳۵	۲۶۳۰	نیمه خشک (دومارتن)

جدول ۲- میانگین ماهانه پارامترهای اقلیمی مورد بررسی در ایستگاه رزن

پارامتر	مقدار کمیت پارامتر
ابتدای دروه	۲۰۱۲
انتهای دوره	۲۰۲۱
T (°C)	۱۲/۳۷
RH (%)	۴۸/۵۴
U2 m(m/s)	۲/۳۴
n (hr/d)	۸/۳
(mm)	۲۵/۴۴

برای محاسبه هیدرومدول با دوره بازگشت (۲ تا ۲۰۰ سال) به‌صورت زیر عمل شد:

هیدرومدول‌های به‌دست آمده از طریق نرم‌افزار کراپ وات را به‌صورت صعودی مرتب شد

شماره‌گذاری داده‌های مرتب شده از کم به زیاد

محاسبه درصد احتمال (p)، دوره بازگشت (RP) و تبدیل ویبول (W) برای هریک از دوره‌های بازگشت مورد نظر به‌ترتیب با استفاده از روابط زیر

$$P = 1 - (m/(m_1 + 1)) \quad (۱)$$

$$RP = 100/P \quad (۲)$$

$$W = \log(-\log(P/100)) \quad (۳)$$

با به دست آمدن W برای هر هیدرومدول، نمودار این دوپارامتر نسبت به هم ترسیم و معادله بهترین خط برازش داده شده، استخراج شد. برای ایستگاه مورد نظر دو معادله خطی و نمایی برازش داده شد. با داشتن معادله خط، هیدرومدول برای دوره بازگشت های ۲، ۵، ۱۰، ۲۵ ، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ ساله استخراج شد.

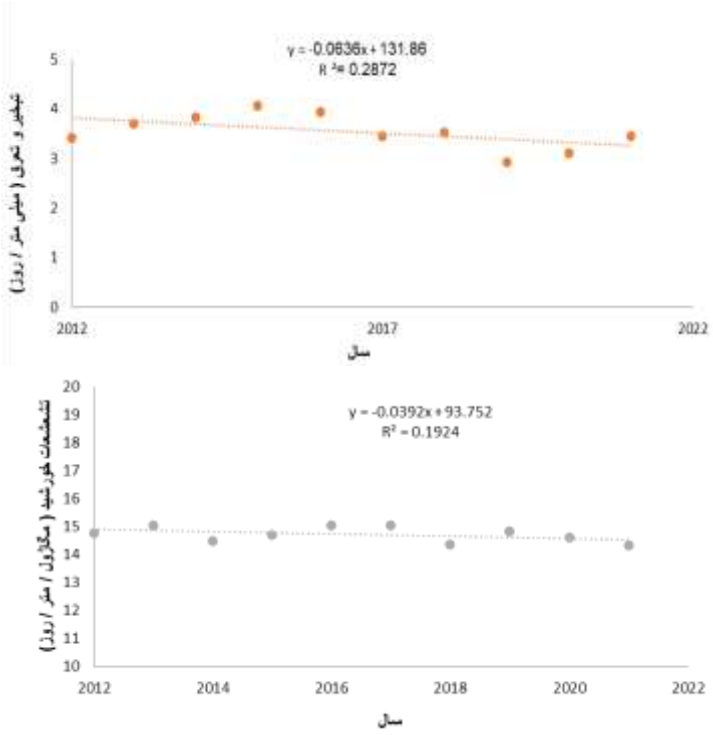
بحث و یافته‌ها

برای تحلیل اقلیم منطقه، ابتدا داده‌های هواشناسی شامل تشعشع خورشیدی، دما، رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی در دوره آماری مورد بررسی گردآوری شد. سپس با استفاده از نرم‌افزار CropWat، مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه مرجع (ET_0) به‌صورت ماهانه محاسبه گردید. در ادامه، نمودار تغییرات تشعشع خورشیدی و ET_0 طی سال‌های بررسی ترسیم شد تا روندهای اقلیمی و نوسانات فصلی مشخص گردد. این تحلیل، مبنای محاسبه هیدرومدول و برآورد دقیق نیاز آبی در منطقه مورد مطالعه قرار گرفت.

جدول ۳- الگوی کشت غالب (نوع گیاه و درصد مساحت تحت کشت) مورد استفاده برای رزن

نوع گیاه	درصد مساحت از کل الگوی کشت
گندم	۴۰
یونجه	۶
سیب‌زمینی	۲۰
گوجه‌فرنگی	۲۴
جو	۱۰
جمع (٪)	۱۰۰
منبع	جهاد کشاورزی استان رزن

شکل ۱ مقادیر تشعشعات خورشیدی و تبخیرتعرق گیاه مرجع (چمن) را که با استفاده از نرم‌افزار CropWat استخراج شده‌اند، نشان می‌دهد. مقدار تابش خورشیدی در ایستگاه رزن در بازه‌ای بین ۴/۱ تا ۲۷/۱ مگاژول بر متر مربع در روز متغیر است. میانگین تابش خورشیدی این ایستگاه برابر با ۱۴/۷۲ مگاژول بر متر مربع در روز می‌باشد. هم‌چنین، میانگین تبخیرتعرق گیاه مرجع چمن در این منطقه حدود ۳/۵ میلی‌متر بر روز است. بر اساس این داده‌ها، برنامه‌ریزی آبیاری برای تمامی محصولات الگوی کشت منطقه انجام شد و تعداد دفعات آبیاری هر گیاه با استفاده از نرم‌افزار CropWat استخراج گردید.

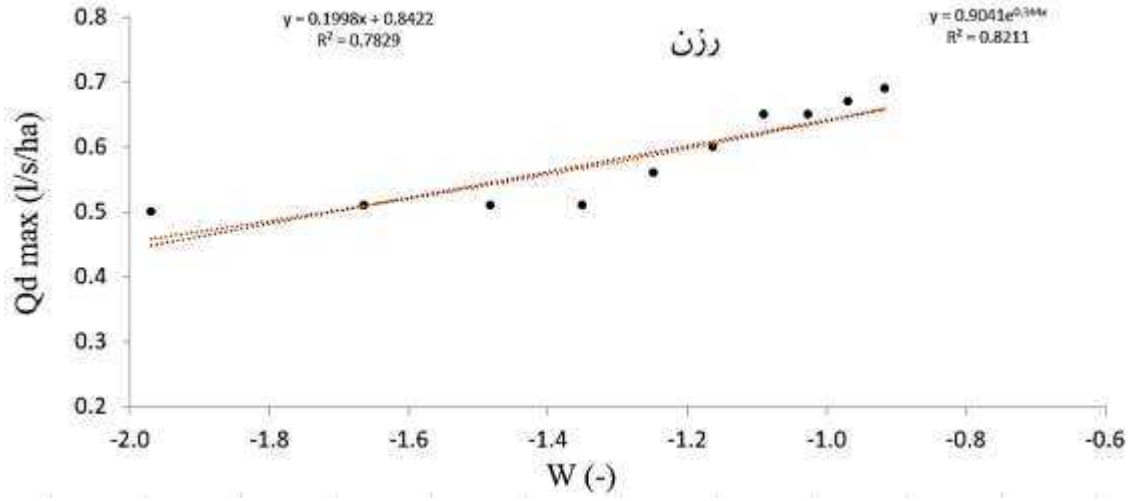


شکل ۱- تغییرات پارامترهای تشعشعات خورشیدی و تبخیرتعرق پتانسیل گیاه مرجع چمن در ایستگاه رزن

جدول ۴- مقادیر حداقل، حداکثر و متوسط حداکثر هیدرومدول سالانه در ایستگاه رزن

پارامتر	مقدار عددی کمیت (lit/s/ha)
حداقل حداکثر هیدرومدول سالانه	۰/۵
حداکثر حداکثر هیدرومدول سالانه	۰/۶۹
متوسط حداکثر هیدرومدول سالانه	۰/۵۸

مقادیر میانگین و حداکثر هیدرومدول سالانه مربوط به ایستگاه رزن در جدول ۴ ارائه شده است که بیش‌ترین مقدار آن برابر ۰/۵۵ لیتر بر ثانیه به ازای هر هکتار و کم‌ترین مقدار ۰/۴۵ لیتر بر ثانیه به ازای هر هکتار گزارش شده است. در شکل ۲، نمودار تغییرات هیدرومدول آبیاری (Qd) نسبت به پارامتر تبدیل ویبول (W) برای ایستگاه رزن ترسیم شده است. برای تهیه این نمودار، ابتدا مقادیر بیشینه هیدرومدول در سال‌های مختلف به صورت صعودی مرتب شدند و سپس احتمال وقوع هر مقدار و دوره بازگشت مربوط به آن محاسبه گردید. با استفاده از این داده‌ها، پارامترهای تبدیل ویبول استخراج شدند. برای مدل‌سازی رابطه بین ضریب تبدیل ویبول (W) و هیدرومدول آبیاری (Qd)، برازش‌های خطی و نمایی انجام شد و معادلات مربوط به هر مدل تعیین گردید. محور افقی نمودار نشان‌دهنده ضریب تبدیل ویبول است که بیانگر دوره بازگشت‌های آماری متنوع می‌باشد. در جدول ۵، مقادیر هیدرومدول بر اساس دوره‌های بازگشت ۲، ۵، ۱۰، ۲۵، ۵۰، ۱۰۰ و ۲۰۰ سال ارائه شده که می‌تواند به عنوان داده‌ای کلیدی در طراحی و مدیریت سیستم‌های آبیاری منطقه به کار گرفته شود.



شکل ۲- تغییرات هیدرومدول آبیاری به ازای تغییرات تبدیل ویبول (W) برای ایستگاه‌های مورد بررسی

جدول ۵- مقادیر هیدرومدول را به ازای دوره‌های بازگشت مختلف (لیتر بر ثانیه بر هکتار)

نوع تابع	ایستگاه	دوره بازگشت (سال)							میانگین
		۲	۵	۱۰	۲۵	۵۰	۱۰۰	۲۰۰	
خطی	رزن	۰/۷۳۸	۰/۸۱۱	۰/۸۴۲	۰/۸۷۱	۰/۸۸۸	۰/۹۰۲	۰/۹۱۴	۰/۸۵۲
نمایی	رزن	۰/۷۵۵	۰/۸۵۶	۰/۹۰۴	۰/۹۵	۰/۹۷۸	۱	۱/۰۲	۰/۹۲

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، تغییرات هیدرومدول آبیاری در ایستگاه رزن مورد بررسی قرار گرفت. میانگین هیدرومدول آبیاری در بازه سال‌های آماری موجود، برابر با ۰/۵۸ لیتر بر ثانیه به ازای هر هکتار محاسبه شد. برای طراحی سازه‌های ذخیره، انتقال و توزیع آب با دوره بازگشت حداقل ۵۰ سال در دشت رزن، مقدار هیدرومدول طرح باید حدود ۰/۸۸۸ لیتر بر ثانیه بر هکتار در نظر گرفته شود. وجود گیاهان پرمصرف مانند یونجه و باغات که به ویژه در فصول گرم نیاز آبی بالایی دارند، همراه با میزان کم بارش کل و بارش مؤثر پایین در منطقه، باعث افزایش هیدرومدول آبیاری شده است. بر اساس مدل تغییرات خطی، با افزایش دوره بازگشت از ۲ سال به ۲۰۰ سال و کاهش احتمال وقوع، هیدرومدول آبیاری تا ۰/۱۷۸۴ لیتر بر ثانیه بر هکتار (معادل۱۷/۸۴ درصد افزایش نسبت به میانگین) رشد کرد. هم‌چنین، طبق مدل تغییرات نمایی، در همین بازه دوره بازگشت، هیدرومدول آبیاری تا ۰/۲۶۸۴ لیتر بر ثانیه بر هکتار افزایش یافته است که معادل ۲۶/۸۴ درصد رشد نسبت به مقدار متوسط است. با توجه به مقادیر حداقلی به‌دست آمده از دو مدل خطی و نمایی، توصیه می‌شود که برای تخمین هیدرومدول آبیاری در دوره‌های بازگشت مختلف از این توابع استفاده گردد. از سوی دیگر، با در نظر گرفتن مدل خطی و دوره بازگشت ۲۰۰ سال، تغییرات هیدرومدول بیش‌تر از ۱۰ درصد مقدار میانگین است که نشان می‌دهد نوسانات هیدرومدول در بلندمدت چندان زیاد است. لذا پیشنهاد می‌شود که سازه‌های مربوط به ذخیره، انتقال و توزیع آب در دشت رزن با در نظر گرفتن دوره بازگشت‌های طولانی و احتمال وقوع کم طراحی و اجرا شوند تا پایداری سیستم تأمین آب در شرایط بحرانی تضمین گردد.

منابع

اسدزاده ،ح. و رئوف، م. ۱۳۹۷. مقایسه کارایی مصرف آب در سیستم های آبیاری بارانی و هیدروفلوم)مطالعه موردی: دشت اردبیل(. مدیریت آب و آبیاری. ۸ (۱): ۶۸-۵۵.

بابازاده ،ح. و سرائی تبریزی، م. ۱۳۹۱. ارزیابی وضعیت کشاورزی استان هرمزگان از دیدگاه آب مجازی. مجله پژوهش آب در کشاورزی. ۲۶ (۴): ۴۹۹-۴۸۵.

تفاخری ،س. و طاهری، ج. ۱۳۹۵. طراحی معماری همساز با اقلیم شهر مشهد. چهارمین کنگره بین المللی عمران، معماری و توسعه شهری. ۷ الی ۹ دی. دانشگاه شهید بهشتی.

حمادی، ک.، ذاکری حسینی ،ف.، حسین زاده ساداتی، م. و اله دین، س. ۱۳۹۳. برآورد نیاز آبی محصولات کشاورزی در استان خوزستان. دو فصلنامه تخصصی علوم و مهندسی آب. ۹: ۱۶-۷.

موحدی ،س.، حیدری ناصر آباد، ب.، هاشمی عنا، ک. و رنجبر ،ف. ۱۳۹۱. پهنه‌بندی نواحی اقلیمی استان خوزستان. فضای جغرافیایی. ۴: ۷۳-۶۴.

نشاط ،ع. و سجادی بمی، ی. ۱۳۹۵. پیش بینی تاثیر تغییر اقلیم بر فراسنج دما با استفاده از نرم افزار گردش عمومی جو HadCM3 (مطالعه موردی :کرمان و بم). مهندسی منابع آب. ۹: ۶۲-۵۱.

نظری فر،م.ه.، بهبهانی، م.ر. و مومنی، ر. ۱۳۹۱. ارزیابی سناریوهای متفاوت کم آبیاری و تعیین هیدرومدول و سطح بهینه الگوی کشت در شرایط کم آبیاری. علوم و مهندسی آبیاری. ۳۵ (۲): ۱۰۵-۹۱.

هدایتی دزفولی، ا. و کاکاوند، ر. ۱۳۹۱. پهنه‌بندی اقلیمی استان رزن. نشریه نیوار. ۷۶: ۷۳-۵۹.

Aghajani, A., Bidabadi,F. S., Joolaei,R. and Keramatzadeh, A. 2013. Managing cropping patterns agricultural crops of Three Counties of Mazandarn province of Iran. International Journal of Agriculture and Crop Sciences. 5: 596-611.

Béné, C. Barange,M., Subasinghe,R., Andersen,P., Merino,G., Hemre, G, I. and Williams,M. 2015. Feeding 9 billion by 2050–Putting fish back on the menu. Food Security.7(2): 261-274.

Bouman, B. A. M., van Keulen,H., van Laar, H. H. and Rabbinge,R. 1996. The school of de Wit' crop growth simulation models: a pedigree and historical overview. Agric. Syst. 52:171–198.

Boustani, F., Mohammadi,H. 2010. Determination of optimal cropping pattern due to water deficit: a case study in the South of Iran, Am. Eurasian J. Agric. Environ. Sci. 7: 591–595.

Dagdelen, N. Yilmaz,E., Sezgin, F. and Gurbuz,T. 2005.Water yield relation and water use efficiency of cotton and second crop corn in western Turkey. Agric.Water Manage, 82(1-2):63-85.

Dhehibi, B., Lachaal, L. and Elloumi,M. 2007.Measuring irrigation water use efficiency using stochastic production frontier: an application on citrus producing farms in Tunisia. Journal of Agricultural and Resource Economics.1, pp: 1-15.

Dong, Q. 2018. Study on the Crop Irrigation Water Requirement Based on Cropwat in Jinghuiqu Irrigation Area. ACMME, 394.

Ewaid, S. H., Ali Abed,S. and Al-Ansari,N. 2019. Crop Water Requirements and Irrigation Schedules for Some Major Crops in Southern Iraq. Water, 756: 1-12.

FAO, 2009. Food and Agriculture Organization of the United Nations. How to feed the World in 2050. http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/expert paper/How to Feed the World in 2050. Pdf. (accessed March 25, 2017).

Gorantiwar, S. D. and Smout,I.K. 2003. Allocation of scarce water resources using deficit irrigation in rotational systems. ASCE, J. Irrig. And Drain. Eng, 129(3): 155-163.

Karamouz M, Ahmadi B and Zahmatkesh Z, 2012. Developing an agricultural planning model in a watershed considering climate change impacts, J. Water Resour. Plann. Manage. 139: 349–363.

Mirzaei, S., Raoof, M., Ghasemi,A., Esmali,A., Etaati, H. and Moradnezhadi,M. 2014. Determination of a some simple methods for outlier detection in maximum daily rainfall (case study: Baliglichay Watershed Basin–Ardebil Province–Iran). Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences 3 (3): 110-117.

Naroua, I., Rodríguez Sinobas, L., & Sánchez Calvo, R. 2014. Water use efficiency and water productivity in the Spanish irrigation district¿ Río Adaja?. International Journal of Agricultural Policy and Research, 2(12), 484-491.

Odegard, I. Y. R. and Van der Voet,E. 2014. The future of food—scenarios and the effect on natural resource use in agriculture in 2050. Ecological Economics. 97: 51-59.

Osama, S., Elkholy, M. and Rawya Kansoh,M. 2017. Optimization of the cropping pattern in Egypt. Alexandria Engineering Journal. 56(4): 1-10.

Raoof, M. and Azizi,J. 2019. Reference Evapotranspiration Estimation Using Locally Adjusted Coefficient of Angstrom's Radiation Model in an Arid-Cold Region. JAST. 21(2): 487-499

Singh, A. and Panda,S.N. 2012. Development and application of an optimization model for the maximization of net agricultural return, Agric. Water Manage. 115: 267–275.

Tavakoli, A. 2003. The impact of deficit irrigation and nitrogen on yield and yiled components of wheat. Scientific Journal of Agriculture. 26(2): 75-87.

Van Dijk, M., Mandryk,M., Gramberger,M., Laborde,D., Shutes,L., Stehfest,E., Valin, H. and Zellmer,K. 2016. Scenarios to explore global food security up to 2050: Development process, storylines and quantification of drivers. LEI Wageningen UR.

Evaluation of the Role of Climatic Variables and Cropping Pattern in Evapotranspiration Variations and Irrigation Hydro-Module Design (Case Study: Razan Plain)

Majid Raoof[2], Arash Amirzadeh[1], Raoof Mostafazadeh[3], Mojtaba Sookhtanlou[4]

Proffessor, Department of Water Engineering and and Member of Water Management Research Center, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Ph.D Student., Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Associat Proffessor, Department of Natural Resources and Member of Water Management Research Center, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Associat Proffessor, Department of Agricultural Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

* Corresponding author: majidraoof2000@gmail.com

Abstract

Water resource scarcity and inefficiency in its management are considered to be the main challenges of the agricultural sector in Iran. Designing and implementing water engineering projects requires accurate estimation of water requirements of plants in different regions in order to maximize resource productivity. In this study, changes in water consumption of plants in the Qazvin plain cropping pattern were studied as a function of climatic parameters. Initially, meteorological data of the region were collected and, after filtering and classification, were used for analysis. Then, using CropWat8 software and based on the FAO56 equation, the potential evapotranspiration values of the reference plant (grass), solar radiation, and effective precipitation were calculated at the studied stations. Information on the region's cropping pattern was also extracted from reliable sources and the monthly hydromodule was determined based on it. In the final stage, by using the Weibull conversion factor, the irrigation hydromodule was estimated for different return periods in the region. The results showed that the average evapotranspiration of the grass reference plant in the Razan plain is 3.5 mm per day. Also, the average irrigation hydromodule of the region was reported to be about 0.58 liters per second per hectare. Based on the linear variation model, increasing the return period from 2 to 200 years resulted in a 17.48 percent increase in irrigation hydromodule to 0.1748 liters per second per hectare. The exponential model also showed a 26.84 percent increase in this value, equivalent to 0.2684 liters per second per hectare.

Keywords: Cropwat8, FAO56, reference plant, return period.

روندها و پیامدهای افزایش اثرات تجمعی تغییر اقلیم بر اکوسیستم‌های دریایی جهانی و جایگاه منطقه ای ایران

علی حقی وایقان[1*]، آذین احمدی[2]

۱- گروه اکولوژی و مدیریت ذخایر آبزیان، پژوهشکده آرتمیا و آبزی پروری، دانشگاه ارومیه
۲- گروه شیلات، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه گیلان، صومعه سرا، ایران
a.haghi@urmia.ac.ir

چکیده

تغییر اقلیم، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی قرن ۲۱ مطرح و پیامدهای آن در سیستم‌های دریایی و اقیانوسی به‌طور فزاینده‌ای آشکار می‌گردد. این اثرات در دهه‌های گذشته کمتر محسوس بودند، اما امروزه در سطوح علمی و اجتماعی به‌طور گسترده مورد شناسایی قرار گرفته‌اند. افزایش فشارهای انسانی، مجموعه‌ای از تنش‌ها و استرس‌های متنوع و ترکیبی را بر اکوسیستم‌های دریایی در سراسر جهان وارد کرده است. این مطالعه مروری با بهره‌گیری از ارزیابی‌های جهانی و مدل‌سازی اثرات تجمعی، نشان می دهد که اثرات انسانی بر اکوسیستم‌های دریایی تا سال ۲۰۵۰ بیش از دو برابر افزایش خواهد یافت.از ۱.۲ به ۲.۸ (با فاصله اطمینان ۹۵٪: ۲.۲-۳.۴) افزایش خواهد یافت و مناطق استوایی و قطبی بیشترین شدت فشارها را تجربه خواهند کرد. ایران با برخورداری از سواحل در خلیج فارس، دریای عمان و دریای خزر بخشی از این مناطق آسیب‌پذیر محسوب می‌شود و می‌تواند نقش محوری در کاهش اثرات تجمعی و حفاظت از اکوسیستم‌های دریایی در مقیاس منطقه‌ای و جهانی ایفا کند. بر این اساس، همسو با اهداف توسعه پایدار سازمان ملل متحد SDG13(اقدام اقلیمی) و SDG14 (حیات زیر آب)، ضروری است سیاست‌گذاران و مدیران اجرایی کشور راهبردهای مدیریتی سازگار و پایدار را در برنامه‌های توسعه ملی ادغام نمایند تا اثرات بلندمدت تغییر اقلیم کاهش یابد.

کلمات کلیدی: اکوسیستم‌های دریایی، اثرات تجمعی، تغییرات اقلیمی، مدیریت پایدار، ایران

مقدمه

اکوسیستم‌های دریایی نقش حیاتی در حفظ تنوع زیستی، تولید منابع غذایی و تنظیم شرایط اقلیمی دارند. فشارهای انسانی شامل صید بی‌رویه، توسعه صنعتی، آلودگی و تغییرات اقلیمی، تهدیدهای جدی برای این اکوسیستم‌ها ایجاد کرده‌اند. اثرات تجمعی این فشارها می‌توانند کاهش تنوع زیستی و خدمات اکوسیستمی را تسریع کنند. تغییر اقلیم به‌عنوان یکی از

تهدیدات عمده برای اکوسیستم‌های دریایی شناخته می‌شود. این تغییرات می‌توانند بر تولید اولیه و ترکیب گونه‌های ماهی تأثیر بگذارند. همچنین، تغییر اقلیم باعث تغییرات قابل‌توجهی در دما، سطح دریا، شوری و اکسیژن آب همراه است که می‌تواند بر اکوسیستم‌های دریایی و شیلات تأثیر بگذارد (Wabnitz et al., 2018). تغییر اقلیم یکی از مهم‌ترین تهدیدها برای اکوسیستم‌های دریایی و منابع شیلاتی است. گونه‌های تجاری از جمله ماهیان و میگوها که نقش حیاتی در اقتصاد جهانی و معیشت جوامع ساحلی دارند، به‌شدت تحت تأثیر تغییرات دما، شوری و اکسیژن محلول قرار می‌گیرند (Sharifian et al., 2023). بر اساس تجزیه و تحلیل فعالیت های صنعتی دریایی و سلامت اکوسیستم دریایی، سلامت اکوسیستم دریایی و زمینی باید حفظ شود. یکی از پدیده های اخیر که تاثیرات خود را هرروز نمایان تر می نماید بحث تغیرات اقلیم است. تغیر اقلیم اثرات متعددی روی اکوسیستم و منابع شیلاتی دارد (Mondal et al., 2023). ممکن است تاثیرات تغییر اقلیم در سطوح پایین و سپس در سطوح بالای زنجیره وارد شود و نهایتاً باعث تغیرات در ذخایر و بازگشت شیلاتی شود. بعنوان مثال، تغیرات اقلیم میتواند در جریانات دریایی، میزان تولید اولیه پلانکتونی، تولید مثل، رشد لاروی و تغذیه بالغین اثرات مخربی را داشته باشد (Vayghan and Lee, 2022). از اینرو، تغییرات اقلیمی می‌تواند بر ویژگی‌های فیزیکی و بیولوژیکی اکوسیستم‌های دریایی تأثیر بگذارد. یکی از اصل های توسعه اقتصاد دریامحور فعالیت های پایدار شیلاتی است که شامل صید و آبزی پروری میشود. طبق آخرین آمارها میزان تولیدات شیلاتی دریایی در سال ۲۰۲۰ میلادی تقریباً ۱۱۲ میلیون تن بوده که سهم صید ٪۷۰/۴ و سهم آبزی پروری ٪۲۹/۶ است(FAO, 2022). لذا اهمیت صید و صیادی در تامین پروتئین مورد نیاز انسان ها بسیار مورد اهمیت است. از اینرو، پرداختن به تاثیرات تغییر اقلیم روی منابع مورد بهره برداری دریایی اهمیت بسیار مهمی دارد. اخیراً سازمان ملل محد همچنین برای افزایش آگاهی و درک عام مردم درباره صید خُرد؛ تقویت روحیه تعامل و مشارکت میان ذیینفعان در جهت تسهیل دستیابی به اهداف توسعه پایدار (Sustainable Goals Development; SDGs) و همچنین جلب توجه و حساسیت هر چه بیشتر مدیران و سیاستگذاران، سال ۲۰۲۲ میلادی را تحت عنوان سال صید و آبزی پروری خُرد نامگذاری کرد. امروزه با کاهش تراکم و تنوع گونه ها در اکوسیستمهای آبی بسیاری از مناطق دنیا (به ویژه در کشورهای جهان سوم) در نتیجه فشار صید و تغییرات اقلیمی که باعث گسترش فقر در جوامع ساحل نشین و صیادی خُرد شده است، لزوم توجه و مدیریت پایدار آن بسیار ضروری تر از قبل است چرا که بالب افراد جوامع بومی ساحل نشین به صیادی به عنوان یک سنت ابا و اجدادی نگاه میکنند و برای آنها صیادی صرفاً یک شغل نیست بلکه سبک زندگی است و با از دست دادن آن دچار تناقضات متعدد اجتماعی و هویتی میشوند.

انتظار می‌رود فشارهای ناشی از فعالیت‌های انسانی به طور قابل توجهی افزایش یابد و اکوسیستم‌های دریایی را در سطح جهان تحت تأثیر قرار دهد. جهت برنامه‌ریزی برای آینده‌ای پایدار، باید توزیع اثرات تجمعی ناشی از فشارهای متعدد را پیش‌بینی کنیم. در اینجا ما اثرات تجمعی آینده فشار اقلیمی، خشکی، ماهیگیری و سایر فشارها را بر اساس مطالعات گذشته روی زیستگاه دریایی تحت دو سناریوی اقلیمی در اواسط قرن (حدود ۲۰۵۰) جمع بندی نموده ایم و یک نمونه از اثرات آن را در منابع شیلاتی آبهای جنوبی کشور مشخص نمودیم. پیش‌بینی می‌شود اثرات تجمعی در سطح جهان ۲.۲ تا ۲.۶ برابر افزایش یابد، که زیستگاه‌های ساحلی با اثرات بیشتری روبرو هستند اما مناطق فراساحلی، به ویژه در مناطق استوایی، با افزایش سریع‌تری روبرو هستند. علاوه بر این، بسیاری از کشورهای وابسته به منابع دریایی افزایش زیادی در اثرات خواهند داشت(Halpern et al., 2025). بنابراین نقش و جایگاه منطقه ای ایران برای تعدیل این اثرات بسیار حائز

اهمیت است. لذا، گنجاندن این نتایج در سیاست و مدیریت استراتژیک، از استفاده و حفاظت پایدارتر از اکوسیستم‌های دریایی و خدمات ارائه شده به مردم پشتیبانی خواهد کرد.

اکوسیستم‌های دریایی که ۹۷٪ از فضای قابل زیست کره زمین را تشکیل می‌دهند (Webb et al., 2023) و سالانه خدمات اکوسیستمی به ارزش ۲۴ تریلیون دلار ارائه می‌کنند(Costanza et al., 2023) ، پایه‌های حیات در کره زمین محسوب می‌شوند. این اکوسیستم‌ها نه تنها ۸۰٪ تنوع زیستی جهان را در خود جای داده‌اند، بلکه ۵۰-۸۰٪ اکسیژن جو را تولید کرده و سالانه ۲۵٪ از CO2 انتشار یافته توسط بشر را جذب می‌کنند .(IPCC, 2023) با این حال، نرخ تغییرات در این اکوسیستم‌ها به ۱۵ برابر سریع‌تر از ۵۵ میلیون سال گذشته رسیده است(Pörtner et al., 2023) ، که زنگ خطری برای بقای حیات در سیاره آبی است.

در میان فشارهای متعدد انسانی شامل صید بی‌رویه، آلودگی پلاستیکی (سالانه ۸ میلیون تن)، توسعه ساحلی و استخراج منابع، تغییر اقلیم به عنوان «تشدیدکننده بحران» عمل می‌کند .(Halpern et al., 2025) افزایش دمای اقیانوس‌ها (۰.۸۸ درجه سانتیگراد از ۱۸۵۰)، اسیدی شدن آب‌ها) کاهش pH به میزان ۰.۱-۰.۲ واحد (و کاهش اکسیژن محلول (۲٪ از ۱۹۶۰) سبب ایجاد «مناطق مرده» در ۴۵۰ نقطه از اقیانوس‌های جهان شده است .(Wabnitz et al., 2018; IPCC, 2023) این تغییرات زنجیره‌ای از واکنش‌ها را از سطح فیتوپلانکتون‌ها تا شکارچیان راس هرم غذایی ایجاد کرده که ثبات اکولوژیکی را به خطر انداخته است.(Vayghan and Lee, 2022)

صنعت شیلات با تولید سالانه ۱۷۹ میلیون تن (۱۱۲ میلیون تن از دریا) و ارزش ۴۰۱ میلیارد دلار، منبع اصلی پروتئین برای ۳.۳ میلیارد نفر (۴۰٪ جمعیت جهان) و معیشت مستقیم ۸۲۰ میلیون نفر است .(FAO, 2022) گونه‌های تجاری کلیدی مانند تون، ساردین و میگو که ۶۷٪ ارزش تجارت جهانی آبزیان را تشکیل می‌دهند، با جابجایی زیستگاه به میزان ۷۰-۲۵ کیلومتر در دهه به سمت قطبین مواجه‌اند .(Sharifian et al., 2023) پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که تا ۲۰۵۰، پتانسیل صید در مناطق استوایی تا ۴۰٪ کاهش خواهد یافت که امنیت غذایی ۸۴۵ میلیون نفر در کشورهای در حال توسعه را تهدید می‌کند.(Mondal et al., 2023)

مدل‌سازی‌های جدید نشان می‌دهد که اثرات تجمعی فشارهای انسانی بر اکوسیستم‌های دریایی تا ۲۰۵۰ بین ۲.۲ تا ۲.۶ برابر (با فاصله اطمینان ۹۵٪) افزایش خواهد یافت، با بیشترین شدت در مناطق استوایی (۳.۱ برابر) و قطبی (۲.۸ برابر) .(Halpern et al., 2025)این افزایش غیرخطی، نقاط بحرانی اکولوژیکی را فعال کرده که ممکن است منجر به فروپاشی ۳۵٪ از اکوسیستم‌های مرجانی و ۴۵٪ از ماهیگیری‌های تجاری تا پایان قرن شود. با این حال، مطالعات منطقه‌ای در خاورمیانه، به‌ویژه در حوضه‌های آبی ایران، محدود بوده و شکاف دانشی قابل توجهی وجود دارد.

ایران با ۵۸۶۰ کیلومتر خط ساحلی در سه اکوسیستم متمایز (خلیج فارس، دریای عمان، دریای خزر) و صید سالانه ۷۵۰ هزار تن آبزیان، نقش کلیدی در امنیت غذایی منطقه دارد. خلیج فارس به عنوان یکی از گرم‌ترین دریاهای جهان (افزایش دما ۳ برابر میانگین جهانی) و دریای خزر به عنوان بزرگترین دریاچه جهان (با کاهش سطح ۲.۵ متر در ۳۰ سال اخیر)، آزمایشگاه‌های طبیعی برای مطالعه اثرات شدید تغییر اقلیم هستند. موقعیت ژئوپلیتیک ایران و وابستگی ۲ میلیون نفر از جمعیت ساحلی به شیلات، ضرورت توسعه استراتژی‌های سازگاری ملی را دوچندان می‌کند.

بنابراین، این مطالعه با هدف ارائه ارزیابی جامع از اثرات تجمعی تغییر اقلیم بر اکوسیستم‌های دریایی با تمرکز بر جایگاه منطقه‌ای ایران انجام شده است. اهداف ویژه عبارتند از: (۱) کمّی‌سازی روند اثرات تجمعی تا سال ۲۰۵۰ در سه حوضه آبی

ایران؛ (۲) شناسایی گونه‌ها و مناطق آسیب‌پذیر کلیدی؛ (۳) ارزیابی پیامدهای اجتماعی-اقتصادی برای جوامع ساحلی؛ و (۴) ارائه راهکارهای سیاستی منطبق با SDG13 (اقدام اقلیمی) و SDG14 (حیات زیر آب). سوالات اصلی پژوهش شامل: آیا اثرات تجمعی در آب‌های ایران از میانگین جهانی بیشتر است؟ کدام گونه‌های تجاری بیشترین کاهش ذخایر را خواهند داشت؟ و چه مداخلات مدیریتی می‌تواند این اثرات را تا ۵۰٪ کاهش دهد؟

این مقاله در پنج بخش اصلی سازماندهی شده است. پس از این مقدمه، بخش دوم روش‌شناسی مرور سیستماتیک و مدل‌سازی اثرات تجمعی را تشریح می‌کند. بخش سوم نتایج را در سه مقیاس (جهانی، منطقه‌ای، ملی) با مطالعه موردی گونه‌های کلیدی ارائه می‌دهد. بخش چهارم به بحث پیرامون پیامدهای یافته‌ها برای سیاست‌گذاری و مدیریت می‌پردازد. نهایتاً، بخش پنجم با ارائه نقشه راه اجرایی و توصیه‌های عملیاتی برای ذی‌نفعان مختلف، مقاله را به پایان می‌رساند.

مواد و روش ها

یک تحقیق کیفی از طریق مروری بر منابع موجود انجام شد. این مطالعه بر مبنای مدل جهانی Halpern et al. (2025) طراحی شده است. برای درک بهتر یک نمونه از اثرات اقلیم بر یک گونه تون ماهیان مورد بهربرداری در آبهای جنوب کشور مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

داده‌های مورد استفاده شامل:

شاخص‌های صید(FAO, NOAA)

داده‌های آلودگی(UNEP)

تغییرات دما و اسیدیته آب دریا(NASA, CMIP6)

داده‌های ملی و منطقه‌ای از پژوهش‌های پیشین

روش تحلیل شامل:

ترکیب داده‌ها در مدل

کالیبراسیون مدل با داده‌های مشاهدات

پیش‌بینی روندها تا سال ۲۰۵۰ تحت سناریوهای اقلیمی و جمعیتی

تحلیل نقاط بحرانی و شدت فشار تجمعی در مقیاس جهانی و منطقه‌ای

۲.۱ .طراحی مطالعه

این پژوهش به صورت مطالعه مروری-تحلیلی با استفاده از مدل جهانی ارزیابی اثرات تجمعی (Halpern et al., 2025) انجام شد. مطالعه در دو بخش اصلی طراحی گردید: (۱) تحلیل روندهای جهانی و منطقه‌ای و (۲) بررسی موردی گونه تون هوور در آب‌های جنوبی ایران.

۲.۲ .گردآوری داده‌ها

داده‌های مورد نیاز از چهار منبع اصلی جمع‌آوری شد:

الف) داده‌های اقیانوس‌شناسی:

دمای سطح آب و کلروفیل از ماهواره MODIS ۲۰۲۴-۲۰۰۰

pH و اسیدیته از مدل‌هایCMIP6

پیش‌بینی‌های اقلیمی تحت سناریوهای RCP 4.5 وRCP 8.5

ب) آمار شیلاتی:

داده‌های صید از FAO و سازمان شیلات ایران ۲۰۲۳-۱۹۵۰

میزان صید بر واحد تلاش (CPUE) از ۱۵ بندر صیادی

ج) فشارهای انسانی:

آلودگی دریایی از پایگاهUNEP

توسعه ساحلی از تصاویر ماهواره‌ایLandsat

د) منابع علمی:

۸۲ مقاله معتبر از پایگاه‌هایWeb of Science ، Scopusو SID ۲۰۲۴-۲۰۱۸

۲.۳ .روش تحلیل اثرات تجمعی

مدل پایه :شاخص اثر تجمعی (CI) از ضرب سه عامل محاسبه شد:

شدت فشار محیطی (دما، آلودگی، صید)

حساسیت اکوسیستم (مرجانی، ساحلی، عمیق)

میزان مواجهه (توزیع مکانی)

کالیبراسیون :مدل با داده‌های ۱۲ ایستگاه پایش دریایی در خلیج فارس و دریای عمان تنظیم شد.($R^2 = 0.87$)

۲.۴ .مطالعه موردی تون هوور

برای درک بهتر اثرات تغییر اقلیم، گونه تون هوور به دلیل اهمیت اقتصادی (۳۵٪ صید تون‌ماهیان ایران) انتخاب شد:

تحلیل سری زمانی :۷۰ سال داده صید ۲۰۱۹-۱۹۵۰

شاخص‌های اقلیمی :۱۳ شاخص شاملENSO ، IODو دمای محلی

روش آماری :همبستگی متقابل و رگرسیون چندگانه

۲.۵ .پیش‌بینی آینده

تغییرات تا سال ۲۰۵۰ تحت دو سناریو محاسبه شد:

سناریوی خوشبینانه :کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای(RCP 4.5)

سناریوی بدبینانه :ادامه روند فعلی(RCP 8.5)

۲.۶ .تحلیل آماری

نرم‌افزارها) R :تحلیل آماری، مدل‌سازی

آزمون‌ها) Mann-Kendall :تحلیل روند، ANOVAمقایسه مناطق

سطح معناداری$p < 0.05$:

۲.۷ .محدودیت‌ها

کمبود داده‌های بلندمدت در دریای عمان
عدم قطعیت مدل‌های اقلیمی ٪۱۵±
دسترسی محدود به داده‌های دریای خزر

نتایج

ابعاد مختلف تغییر اقلیم:

ابعاد اجتماعی تغییر اقلیم :پژوهش‌های جرم‌شناختی (Mir Mohamad Tabar et al., 2020) نشان داده‌اند که فشارهای اقلیمی می‌تواند منجر به افزایش رفتارهای انحرافی مانند صید غیرقانونی شود.

تأثیر تغییر اقلیم بر صید :مطالعه علایی و همکاران (۱۳۹۹) نشان داد که افزایش دمای سطح دریا و تغییرات شاخص‌های محیطی بر میزان صید گونه‌های سطحزیان ریز در خلیج فارس و دریای عمان تأثیر مستقیم دارد.

تولید اولیه و آسیب‌پذیری گونه‌ها Nilsaz et al. (2024) :پیش‌بینی کردند که تغییر اقلیم موجب کاهش تولید اولیه و افزایش آسیب‌پذیری گونه‌های صیادی در شمال خلیج فارس خواهد شد.

تنوع زیستی در خلیج فارس Wabnitz et al. (2018) :هشدار دادند که تا سال ۲۰۹۰، ممکن است تا ٪۳۵ از تنوع گونه‌ای اولیه خلیج فارس از بین برود.

بطور اجمالی میتوان اثرات را در ۴ بخش خلاصه نمود:

افزایش فشارهای انسانی :تا سال ۲۰۵۰، فشارهای انسانی بین ۲.۲ تا ۲.۶ برابر افزایش خواهند یافت (شکل ۱).

نواحی آسیب‌پذیر :نواحی استوایی و قطبی بیشترین افزایش فشار را تجربه می‌کنند(شکل ۱).

اثرات بر تنوع زیستی :کاهش جمعیت گونه‌های شاخص و آسیب‌پذیری اکوسیستم‌های حساس(شکل ۲).

توزیع جغرافیایی فشار :مناطق ساحلی با فعالیت انسانی بالا بیشترین اثر تجمعی را خواهند داشت(شکل ۲).

در بررسی گونه تون هوور معمولی (بعنوان یک گونه تجاری مورد استحصال توسط ایران)، جهت بررسی نقش تغیر اقلیم بر روی نوسات صید طی ۷۰ سال گذشته (۱۹۵۰-۲۰۱۹) و با اعمال بیش از ۱۳ شاخص اقلیمی موثر مشخص شد ۴ شاخص نقش قابل توجهی در توضیح انحراف مدل دارند. بنابراین، در مدیریت و تعیین ذخایر این گونه در جهت اقتصاد دریاپایه پایدار می بایست تنش های توام تغیر اقلیم و تعادل صید در نظر گرفته شود (شکل ۳).

این شواهد نشان می‌دهد که ایران در مرکز یک منطقه بحرانی قرار دارد که اثرات تغییر اقلیم و فشارهای انسانی در آن هم‌افزایی می‌کنند.

جایگاه ایران در اثرات تجمعی جهانی

ایران با حدود ۲۵۰۰ کیلومتر ساحل در خلیج فارس، دریای عمان و دریای خزر بخشی از مناطق تحت فشار جهانی است:

خلیج فارس و دریای عمان :فعالیت‌های صنعتی، استخراج نفت و گاز، بنادر و صید بی‌رویه باعث افزایش فشار تجمعی نسبت به میانگین جهانی شده است.

دریای خزر :فشار تجمعی کمتر از خلیج فارس است، اما آلاینده‌های صنعتی و تغییرات اکولوژیکی تهدیدی برای گونه‌های بومی هستند.

ایران می‌تواند با اقدامات مدیریتی مناسب، نقش کلیدی در کاهش فشارهای تجمعی و حفاظت از اکوسیستم‌های دریایی منطقه‌ای و جهانی ایفا کند.

نقش و جایگاه ایران در اکوسیستم‌های دریایی جهانی

ایران با داشتن سواحل طولانی در خلیج فارس، دریای عمان و دریای خزر، سهم مهمی در تنوع زیستی و خدمات اکوسیستمی منطقه‌ای دارد. فشارهای انسانی مانند صید بی‌رویه، آلودگی نفتی و صنعتی، توسعه بنادر و تغییرات اقلیمی بر این مناطق اثرات قابل توجهی گذاشته‌اند. مطالعات نشان می‌دهند که:

خلیج فارس و دریای عمان

یشترین فشارها ناشی از فعالیت‌های نفتی و صنعتی، صید بی‌رویه و آلودگی پلاستیکی است. افزایش دما و اسیدیته آب‌ها تهدید جدی برای اکوسیستم‌های مرجانی و ماهیان منطقه ایجاد کرده است.

تولید اولیه در دوره زمانی ۲۰۰۰–۲۰۲۲ در مناطق مختلف ساحلی شمال خلیج‌فارس تغییرات قابل‌توجهی داشته است.

پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهند که تحت سناریوهای مختلف تغییر اقلیم، تولید اولیه در آینده کاهش خواهد یافت.

آسیب‌پذیری گونه‌های ماهی به تغییرات اقلیمی متفاوت است و برخی گونه‌ها بیشتر تحت تأثیر قرار خواهند گرفت.

پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهند که تا سال ۲۰۹۰، ممکن است تا ٪۳۵ از تنوع گونه‌ای اولیه در خلیج‌فارس کاهش یابد.

کاهش زیستگاه‌های مناسب برای گونه‌های دریایی در بخش‌های جنوبی و جنوب‌غربی خلیج‌فارس مشاهده می‌شود.

کشورهای بحرین و ایران بیشترین آسیب‌پذیری را نسبت به تغییرات اقلیمی در بخش شیلات دارند(Wabnitz et al 2018).

پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهند که زیستگاه‌های مناسب ماهیان تجاری تا ٪۸–۱۶ و زیستگاه‌های میگوها تا ٪۴–۱۲ کاهش می‌یابد.

گونه‌ها تمایل به جابه‌جایی به سمت عرض‌های بالاتر (مناطق خنک‌تر) دارند.

مناطق گرمسیری و نیمه‌گرمسیری بیشترین کاهش زیستگاه را تجربه خواهند کرد.

دریای خزر :کاهش جمعیت ماهیان تجاری مانند کیلکا و کاهش تنوع گونه‌های بومی به دلیل صید بی‌رویه و آلاینده‌های صنعتی مشهود است.

نقش ایران در سطح جهانی :ایران با توجه به موقعیت جغرافیایی و پوشش سواحل استراتژیک، نقش کلیدی در حفاظت از اکوسیستم‌های دریایی منطقه‌ای و کاهش فشارهای تجمعی بر اکوسیستم‌های جهانی دارد.

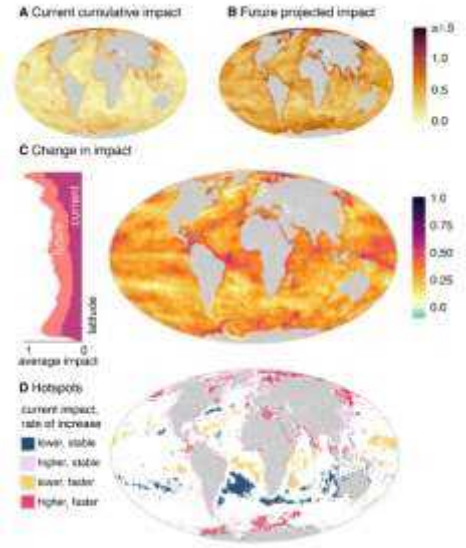
اقدامات پیشنهادی برای ایران:

ایجاد مناطق حفاظت‌شده دریایی در خلیج فارس، دریای عمان و دریای خزر برای حفظ تنوع زیستی و زیستگاه‌های بحرانی.

مدیریت پایدار صید با نظارت دقیق بر فعالیت‌های صیادی و جلوگیری از صید بی‌رویه گونه‌های کلیدی.

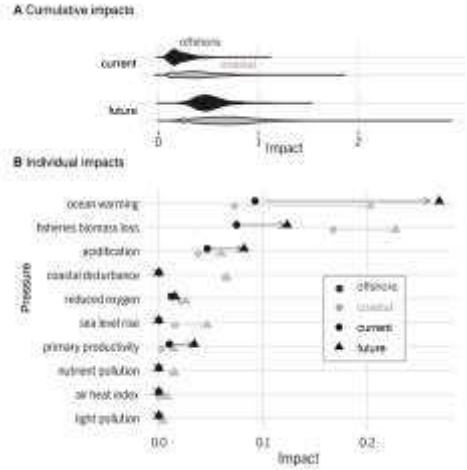
کاهش آلودگی‌های صنعتی و نفتی از طریق اجرای قوانین محیط زیستی و فناوری‌های نوین پاک‌سازی.

پایش و تحقیقات علمی به منظور جمع‌آوری داده‌های دقیق برای مدل‌سازی اثرات تجمعی و تدوین سیاست‌های

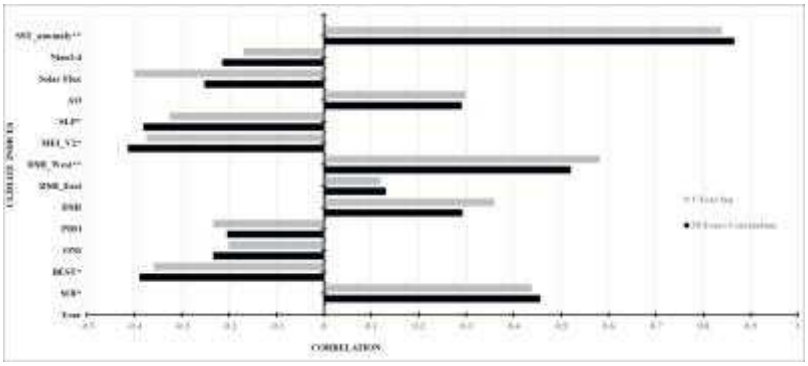


منطقه‌ای مؤثر .

شکل ۱: اثرات فشار تجمعی و انفرادی فعلی و آینده بر اکوسیستم‌های ساحلی و فراساحلی(Halpern et al., 2025).
(A) نمودار چگالی تخمین‌های سلول‌های رستری فراساحلی و ساحلی از اثرات تجمعی؛ (B) میانگین تخمین‌های اثرات فشار برای مناطق فراساحلی و ساحلی



شکل ۲: تأثیرات آینده بر زیستگاه‌های دریایی. اثرات تجمعی فعلی (ستون‌های باریک) و اثرات اضافی پیش‌بینی‌شده در آینده (ستون‌های ضخیم‌تر) به ازای هر زیستگاه برای SSP2-4.5 در سال‌های ۲۰۴۱-۲۰۶۰.



شکل ۳: همبستگی شاخص های اقلیمی و داده های صید ماهی هوور از سال ۱۹۵۰ الی ۲۰۱۹

ردیف	عنوان پژوهش	نویسندگان و سال	منطقه مطالعه	گونه‌ها / موضوع	روش‌شناسی	داده‌ها و ابزارها	نتایج کلیدی	پیامدها و پیشنهادات مدیریتی
1	Climate change, general strain and illegal fishing: An	Mir Mohamad Tabar et al., 2020	شهرستان فریدونکنار، ایران	صید غیرقانونی	پیمایشی، مدل‌سازی معادلات ساختاری	پرسشنامه از ۴۰۰ روستایی	۵۳٪ صید غیرقانونی، تغییر اقلیم و فشار عمومی	سیاست‌گذاری‌های مدیریت منابع طبیعی باید ابعاد اجتماعی تغییرات

	empirical test of Agnew's criminology of climate change theory in Iran						بیشترین تأثیر را دارند	اقلیمی را در نظر بگیرد
2	بررسی اثر تغییر اقلیم بر صید سطحزیان ریز در خلیج فارس و دریای عمان با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای	علایی و همکاران، ۱۳۹۹	بندر جاسک، بندر لنگه، قشم	ساردین و آنچوی	تحلیل آماری، داده‌های ماهواره‌ای	SST، Chl-a، PAR، داده‌های صیادی ۱۹۹۷–۲۰۱۹	افزایش دما بر CPUE تأثیر گذاشته، همبستگی مثبت با شاخص‌های محیطی	پایش مستمر محیط و مدیریت منابع صیادی لازم است
3	Predict the effects of climate change on primary production and vulnerability of fish species in coastal waters of the northern Persian Gulf	Khalfeh Nilsaz et al., 2024	شمال خلیج فارس	گونه‌های ماهی ساحلی	مدل VGPM ، پیش‌بینی اقلیمی	SST، Chl-a، داده‌های MODIS، RCP2.6/4.5/8.5	تولید اولیه کاهش، آسیب‌پذیری گونه‌ها متفاوت	مدیریت منابع و پایش محیطی برای کاهش اثرات تغییر اقلیم ضروری است
4	Climate change impacts on marine biodiversity, fisheries and society in the Arabian Gulf	Wabnitz et al., 2018	خلیج فارس	۵۵ گونه دریایی	مدل‌سازی زیست‌محیطی، ارزیابی اقتصادی	مدل‌های زیست‌محیطی، سناریوی RCP8.5	تا سال ۲۰۹۰، کاهش تا ۳۵٪ در تنوع گونه‌ای، بحرین و ایران بیشترین آسیب‌پذیری	اقدامات مدیریتی و حفاظتی فوری برای حفاظت از منابع دریایی و شیلات مورد نیاز است

5	Cumulative impacts to global marine ecosystems projected to more than double by midcentury	Halpern et al., 2025	جهانی	اکوسیستم‌های دریایی	مدل‌سازی مکانی-زمانی اثرات تجمعی	داده‌های صید، آلودگی، دما، اسیدیته	فشارهای انسانی تا ۲– ۲.۶ برابر افزایش	مدیریت پایدار و حفاظت از زیستگاه‌ها، پایش جهانی ضروری است
6	Too hot to handle? Marine climate change risks and opportunities for adaptation in the Gulf	Marine Science Blog, 2023	خلیج فارس	شیلات و اکوسیستم‌های دریایی	تحلیل روند تغییرات اقلیمی	داده‌های SST ، سطح دریا، زیستگاه‌ها	کاهش دما تا ۴.۳ درجه سانتی‌گراد، تهدید برای شیلات	نیاز به استراتژی‌های سازگاری و حفاظت از زیستگاه‌ها
7	Impacts of ocean warming on fish size reductions	Johansen et al., 2024	جهانی	ماهیان گرمسیری	مدل‌سازی فیزیولوژیکی	داده‌های اندازه‌گیری دما و اندازه ماهی	کاهش ۱۴– ۳۹٪ در اندازه ماهیان بزرگ	تهدید برای بهره‌برداری پایدار از منابع شیلات
8	Projected habitat preferences of commercial fish under climate change	Sharifian et al., 2024	خلیج فارس	ماهیان تجاری	مدل‌سازی زیست‌محیطی	داده‌های SST ، زیستگاه‌ها	کاهش زیستگاه‌های مناسب، کاهش پتانسیل صید	نیاز به مدیریت منابع و حفاظت از زیستگاه‌ها

جدول ۱: مقایسه پژوهش های انجام شده در سطح جهانی مرتبط با اقلیم در بر اکوسیستم‌های دریایی

بحث

تغییرات اقلیمی به‌عنوان یک عامل فشار اجتماعی، می‌تواند بر رفتارهای انسان تأثیر بگذارد. نظریه «فشار عمومی» اگنیو بیان می‌کند که تجربه فشارهای اجتماعی، می‌تواند افراد را به سمت رفتارهای انحرافی سوق دهد. نتایج نشان می‌دهد که تغییرات اقلیمی می‌تواند به‌عنوان یک عامل فشار اجتماعی، بر افزایش رفتارهای غیرقانونی مانند صید غیرمجاز تأثیرگذار باشد. این یافته‌ها اهمیت توجه به ابعاد اجتماعی تغییرات اقلیمی را در سیاست‌گذاری‌ها و برنامه‌ریزی‌های مرتبط با منابع طبیعی و محیط‌زیست نشان می‌دهد (Mir Mohamad Tabar et al., 2023). از سوی دیگر مطالعات نشان‌دهنده تأثیر تغییرات اقلیمی بر صید سطحزیان ریز در خلیج فارس و دریای عمان است(Alaei et al., 2020). افزایش دمای سطح آب

دریا و تغییرات در ویژگی‌های محیطی می‌تواند بر تولید اولیه و در نتیجه بر منابع صیادی تأثیر بگذارد. این یافته‌ها اهمیت پایش مستمر شرایط محیطی و مدیریت منابع دریایی را در مواجهه با تغییرات اقلیمی نشان می‌دهد. این یافته‌ها اهمیت توجه به ابعاد اجتماعی تغییرات اقلیمی را در سیاست‌گذاری‌ها و برنامه‌ریزی‌های مرتبط با منابع طبیعی و محیط‌زیست نشان می‌دهد. این تغییرات نشان‌دهنده تهدیدی جدی برای شیلات جهانی است؛ زیرا بسیاری از جوامع وابسته به منابع دریایی در مناطق گرمسیری و ساحلی قرار دارند. کاهش زیستگاه‌های مناسب می‌تواند درآمد و امنیت غذایی میلیون‌ها نفر را در معرض خطر قرار دهد.(Sharifian et al., 2023). در مناطق ساحلی ایران، تغییرات اقلیمی مانند کاهش منابع آب و تغییرات در منابع زیستی، می‌تواند فشارهایی ایجاد کند که منجر به صید غیرقانونی شود. افزایش فشارهای انسانی و تغییرات اقلیمی، تهدیدی جدی برای تنوع زیستی و امنیت غذایی جهانی به شمار می‌رود. ایران، به‌عنوان کشوری با موقعیت استراتژیک در سه حوزه آبی، هم در معرض اثرات این فشارها قرار دارد و هم می‌تواند با اتخاذ سیاست‌های پایدار، نقشی منطقه‌ای و جهانی ایفا کند. از این رو میتوان بعنوان جمع بندی بیان داشت که پژوهش های مختلف همواره بر نقش اعمال سیاست گذاری و اقدامات مدیریتی پایدار در جهت کاهش اثرات تغییر اقلیم در ابعاد جهانی تاکیده دارند (جدول ۱).

بطور کلی میتوان بیان داشت:

تغییرات اقلیمی به‌طور مستقیم بر پراکنش گونه‌های تجاری ماهی و میگو اثر می‌گذارد.

نیاز به سیاست‌های بین‌المللی برای مدیریت پایدار منابع شیلاتی و حفاظت از گونه‌های آسیب‌پذیر وجود دارد.

برنامه‌های سازگاری، شامل تغییر الگوهای بهره‌برداری و توسعه شیلات پایدار، باید در اولویت قرار گیرد.

از اینرو اقدامات کلیدی پیشنهادی شامل:

مدیریت پایدار صید و جلوگیری از صید غیرقانونی.

کاهش آلودگی‌های نفتی و صنعتی.

توسعه مناطق حفاظت‌شده دریایی.

پایش مستمر شرایط محیطی و مشارکت در مدل‌سازی‌های جهانی.

نتیجه‌گیری

نتایج نشان می‌دهد که فشارهای انسانی بر اکوسیستم‌های دریایی جهانی تا میانه قرن بیش از دو برابر خواهد شد. ایران، با داشتن سواحل گسترده در سه حوضه آبی مهم، می‌تواند از طریق سیاست‌های پایدار و اقدامات حفاظتی نقش مهمی در کاهش فشارها و حفاظت از تنوع زیستی ایفا کند.

منابع:

Alaei, A. , Payghambari, S. , Salarpouri, A. and Ghorbani, K. (2020). Effect of climate change on small pelagic fishes using satellite images in Persian Gulf and Oman Sea. *Journal of Fisheries*, *73*(3), 417-430. doi: 10.22059/jfisheries.2020.310406.1198

Wabnitz, C. C., Lam, V. W., Reygondeau, G., Teh, L. C., Al-Abdulrazzak, D., Khalfallah, M., ... & Cheung,

W. W. (2018). Climate change impacts on marine biodiversity, fisheries and society in the Arabian Gulf. *PloS one*, *13*(5), e0194537.
Sharifian, S., Mortazavi, M. S., & Mohebbi Nozar, S. L. (2023). The ecological response of commercial fishes and shrimps to climate change: Predicting global distributional shifts under future scenarios. *Regional Environmental Change*, *23*(2), 64.
Mondal, S., Ray, A., Osuka, K. E., Sihombing, R. I., Lee, M. A., & Chen, Y. K. (2023). Impact of climatic oscillations on marlin catch rates of Taiwanese long-line vessels in the Indian Ocean. *Scientific Reports*, *13*(1), 22438.

Vayghan, A. H., & Lee, M. A. (2022). Hotspot habitat modeling of skipjack tuna (Katsuwonus pelamis) in the Indian Ocean by using multisatellite remote sensing. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, *22*(9).

Halpern, B. S., Frazier, M., O'Hara, C. C., Vargas-Fonseca, O. A., & Lombard, A. T. (2025). Cumulative impacts to global marine ecosystems projected to more than double by midcentury. *Science*, eadv2906.
FAO., (2022). The State of World Fisheries and Aquaculture 2022. Towards Blue Transformation. Rome, FAO (266 pages). https://www.fao.org/3/cc0461en/cc0461en.pdf
Mir Mohamad Tabar, S. A., Mazlom Khorasani, M., & Noghani, M. (2023). Climate change, general strain and illegal fishing: An empirical test of Agnew's criminology of climate change theory in Iran. *The Social Science Journal*, *60*(4), 649-664.
Sharifian, S., Mortazavi, M. S., & Mohebbi Nozar, S. L. (2023). The ecological response of commercial fishes and shrimps to climate change: Predicting global distributional shifts under future scenarios. *Regional Environmental Change*, *23*(2), 64.
Wabnitz, C.C.C., Lam, V.W.Y., Reygondeau, G., Teh, L.C.L., Al-Abdulrazzak, D., Khalfallah, M., Pauly, D., Deng Palomares, M.L., Zeller, D., & Cheung, W.W.L. (2018). Climate change impacts on marine biodiversity, fisheries and society in the Arabian Gulf. PLOS ONE, 13(5), e0194537. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0194537
Webb, T. J., & Vanhoutan, K. S. (2023). The ocean's living space: Quantifying the size of Earth's marine biosphere. Science Advances, 9(15), eadg7357.
Costanza, R., de Groot, R., Braat, L., Kubiszewski, I., Fioramonti, L., Sutton, P., ... & Grasso, M. (2023). Twenty years of ecosystem services: How far have we come and where do we need to go in marine systems? Ecosystem Services, 61, 101530.
Pörtner, H. O., Scholes, R. J., Arneth, A., Barnes, D. K., Burrows, M. T., Diamond, S. E., ... & Val, A. L. (2023). Overcoming the coupled climate and biodiversity crises and their societal impacts. Science, 380(6642), eabl4881.
IPCC. (2023). Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report. Geneva: IPCC. https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

Trends and Consequences of Increasing Cumulative Impacts of Climate Change on Global Marine Ecosystems and the Regional Position of Iran

Ali Haghi Vayghan[1*], Azin Ahmadi

Department of Ecology & Aquatic Stocks Management, Artemia & Aquaculture Research Institute, Urmia University, Urmia, Iran.
Department of Fisheries, Faculty of Natural Resources, University of Guilan, Sowmeh Sara, Iran

* Corresponding author: a.haghi@urmia.ac.ir

ABSTRACT

Climate change, largely induced by anthropogenic activities, has emerged as one of the most pressing environmental challenges of the twenty-first century, with its consequences becoming increasingly evident in marine and oceanic systems. While these impacts were less perceptible in past decades, they are now widely acknowledged at both scientific and societal levels. Escalating human pressures have introduced diverse and compounding stressors to marine ecosystems worldwide. Drawing upon global assessments and cumulative impact modeling, this study projects that anthropogenic impacts on marine ecosystems will more than double by 2050, with tropical and polar regions expected to experience the greatest intensification of pressures. Situated along the Persian Gulf, the Gulf of Oman, and the Caspian Sea, Iran constitutes a critical part of these vulnerable regions and can play a pivotal role in mitigating cumulative impacts and promoting the conservation of marine ecosystems at both regional and global scales. In alignment with the United Nations Sustainable Development Goals (SDG 13: Climate Action and SDG 14: Life Below Water), it is essential that Iranian policymakers and executive authorities integrate adaptive and sustainable management strategies into national development agendas to reduce the long-term impacts of climate change.

Keywords: Marine ecosystems, Cumulative impacts, Climate change, Sustainable management, Iran.

تحلیل روند زمانی NDVI در جنگل‌های بلوط زاگرس مرکزی

محبوبه امیدی قلعه محمدی[۱]، تقی طاوسی[۲]، محمود خسروی[۳]، محسن حمیدیان پور[۴]، علی اصغر نقی پور [۵]

۱- دانشجوی دکتری، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران
۲- استاد، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران
۳- استاد، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران
٤- دانشیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران
٥- استادیار، گروه مهندسی طبیعت ، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین،دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران
t.tavousi@gep.usb.ac.ir

چکیده

شاخص سلامت جنگل که معمولاً در قالب کاهش یا افزایش تراکم تاج‌پوش تعریف می‌شود، به‌عنوان یکی از شاخص‌های کلیدی در ارزیابی مقاومت و تاب‌آوری درختان در برابر عوامل استرس‌زا شناخته می‌شود. در این پژوهش، برای پایش وضعیت جنگل‌های بلوط زاگرس مرکزی، روندهای بلندمدت شاخص تفاضلی نرمال‌شده پوشش گیاهی (NDVI) با تفکیک مکانی ۳۰ متر و در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ بر اساس تصاویر ماهواره‌ای Landsat استخراج شد. میانگین مقادیر NDVI ماه‌های سپتامبر و اکتبر به‌عنوان نمایه‌ای از سلامت لایه درختی به‌کار رفت تا اثر پوشش زیرآشکوب و تغییرات فنولوژیک کاهش یابد. نتایج نشان داد دماهای بیشینه و کمینه در دو دهه اخیر روندی افزایشی و معنادار داشته‌اند، در حالی‌که کاهش بارش از نظر آماری معنادار نبود. تغییرات NDVI حاکی از افت پوشش در سال‌های خشک مانند ۲۰۰۸ و ۲۰۱۱ و روند کلی صعودی در بلندمدت بود، به‌گونه‌ای که در سال‌های اخیر به بیشترین مقادیر خود رسید. این الگو بیانگر توان نسبی

سازگاری و بازیابی اکوسیستم بلوط است، اما تداوم گرمایش روزانه و کاهش بارش تهدیدی جدی برای پایداری آینده آن محسوب می‌شود. بر این اساس، مدیریت منابع طبیعی و اتخاذ راهبردهای سازگاری با تغییر اقلیم برای حفظ تاب‌آوری جنگل‌های زاگرس ضروری است.

کلید واژه: شاخص تفاضلی نرمال‌شده پوشش گیاهی(NDVI) ، پایش جنگل، بلوط، Landsat، زاگرس مرکزی.

مقدمه

جنگل‌ها بخش حیاتی از سامانه زمین هستند و نقش‌های چندمنظوره‌ای ایفا می‌کنند: جذب دی‌اکسیدکربن و انتشار بخار آب، ذخیره کربن، و ارائه خدمات اکوسیستمی ضروری. با این حال، از نظر جهانی، آن‌ها به‌شدت تحت تأثیر تغییر اقلیم قرار گرفته‌اند که شامل افزایش دما، تغییر الگوهای بارش، رویدادهای شدید آب و هوایی و شیوع آفات و بیماری‌ها است. این تنش‌های اقلیمی سلامت، ساختار و پویایی جنگل‌ها را تهدید می‌کنند، به‌ویژه در مناطق دارای آب و هوای مدیترانه‌ای که در حال حاضر به‌عنوان کانون‌های تغییر اقلیم شناخته می‌شوند (IPCC ,2021 ؛ Pereira, 2017). جنگل‌های زاگرس مرکزی به عنوان یکی از پهناورترین رویشگاه‌های جنگل‌های پهن‌برگ نیمه‌خشک ایران، نقش اکولوژیکی و اجتماعی مهمی ایفا می‌کنند. حدود ۲۳ درصد از مساحت این منطقه را جنگل پوشش داده است که بیش از ۹۵ درصد آن را گونه بلوط ایرانی (Quercus brantii)تشکیل می‌دهد (بهمن‌پور، ۱۳۹۴). بلوط ایرانی گونه غالب جنگلی زاگرس مرکزی است و عمدتاً در نواحی کوهستانی نیمه‌مرطوب تا نیمه‌خشک رشد می‌کند. این جنگل‌ها علاوه بر تأمین زیستگاه برای تنوع زیستی، در تثبیت خاک و تنظیم چرخه هیدرولوژیک نقش مهمی دارند (ثاقب طالبی، ۲۰۱۴). همچنین، جنگل‌های بلوط زاگرس از منظر اقتصادی و فرهنگی برای جوامع محلی اهمیت ویژه‌ای دارند و بخشی از میراث طبیعی کشور به شمار می‌روند (مروی مهاجر، ۱۳۸۴). با وجود اهمیت بالای این رویشگاه‌ها، در دهه‌های اخیر جنگل‌های زاگرس به دلایل مختلفی نظیر تغییر کاربری اراضی، چرای بیش از حد دام، بهره‌برداری شدید، آتش‌سوزی و عوامل محیطی به شدت تخریب شده‌اند (نقی پور و فرخ‌نیا، ۱۳۹۷). علاوه بر این، خشکیدگی درختان بلوط و افزایش شیوع آفات و بیماری‌ها مانند قارچ زغالی و پروانه جوانه‌خوار نیز به‌کرات گزارش شده است (میر ابولفتحی، ۱۰۱۳؛ پورهاشمی و همکاران، ۲۰۱۷). تغییرات اقلیمی، به‌ویژه گرمایش

تابستانی و کاهش رطوبت خاک، یکی از عوامل اصلی زوال جنگل‌های بلوط زاگرس محسوب می‌شود و توان باززایی گونه‌های بلوط را کاهش داده و روند زوال آن‌ها را تشدید می‌کند (Gu et al ،2022 ؛ ارسلانی، ۲۰۲۲). شاخص سلامت جنگل، که بیشتر در قالب «کاهش تراکم» یا «افزایش تراکم تاج‌پوش» بیان می‌شود، اغلب به‌عنوان شاخص کلیدی اولیه در کاهش مقاومت و تاب‌آوری درختان به‌کار می‌رود. کاهش تراکم می‌تواند نشانه‌ای از کمبود منابع، آفات یا عوامل استرس‌زای محیطی باشد، در حالی‌که افزایش تراکم بیانگر رشد قوی و شرایط مناسب‌تر است (Dobbertin et al, 2005) . در این راستا، فناوری سنجش از دور ابزاری ارزشمند برای پایش سلامت جنگل‌ها در مقیاس‌های زمانی و مکانی وسیع ارائه می‌دهد. از زمان پرتاب ماهواره Landsat 4 در سال۱۹۸۲، تصاویر این سری امکان تحلیل روندهای بلندمدت و مکانی با تفکیک مکانی ۳۰ متر را فراهم کرده‌اند و پایش دقیق جنگل‌ها را تسهیل می‌کنند (Kovalskyy et al, 2015). شاخص‌های پوشش گیاهی از جمله NDVI به‌طور گسترده برای پایش سلامت و بهره‌وری جنگل‌ها به‌کار رفته‌اند (Pettorelli et al, 2013). مطالعات متعددی نشان داده‌اند که روندهای بلندمدت پوشش بلوط در مناطق مختلف جهان تحت تأثیر عوامل اقلیمی و مدیریتی قرار دارند. برای مثال، در پرتغال حدود ۱۲ درصد از رویشگاه‌های بلوط طی سال‌های ۱۹۸۴–۲۰۱۷ روند کاهشی معنادار در سلامت و بهره‌وری نشان داده‌اند در این پژوهش از NDVI و تصاویر Landsat در محیط Google Earth Engine استفاده شده است (Aubard et al,2019). در زمینه پایش پوشش تاج درختان نیز، مطالعات نشان داده‌اند که مدل‌های تجربی مبتنی بر داده‌های Landsat و عکس‌های هوایی قادر به برآورد پوشش تاج درختان با تراکم کم تا متوسط هستند و شاخص‌هایی مانند NDVI قابلیت پیش‌بینی قابل قبولی ارائه می‌دهند (Carreiras et al, 2006). علاوه بر این، استفاده از سری‌های زمانی NDVI امکان تفکیک پوشش گیاهی چوبی و علفی را دارد. این روش همچنین قابلیت پایش وضعیت پوشش گیاهی قبل و پس از آتش‌سوزی را نیز فراهم می‌آورد (Helman et al,2015). به طور مثال مطالعه‌ای بر روی جنگل‌های بلوط‌چوب‌پنبه‌ای و بلوط‌زیتونی جنوب پرتغال نشان داد که بهره‌وری این جنگل‌ها طی ۱۵ سال گذشته کاهش یافته است، هرچند روندها برای درختان و درختچه‌ها متفاوت بوده و بیشترین وابستگی به تغییرات دما و رطوبت نسبی مشاهده شده است (Santos, 2016). پوشش تاجی درختان معمولاً بین ۱۰ تا ۵۰٪ متغیر است و برای تمرکز بر سیگنال لایه‌ی درختی، دوره‌هایی انتخاب می‌شوند که تضاد طیفی میان تاج درختان و زیرآشکوب حداکثر باشد. به طور مثال، این

رویکرد در پایش پوشش چوبی در اسرائیل و در تعدیل مقادیر NDVI دو سنجنده Landsat نیز به کار رفته است (Ju, 2016؛ Carreiras et al, 2006). بررسی بازتاب طیفی درختان (*Q. suber*)، علف‌ها و درختچه‌ها نشان داده است که پاسخ NDVI بلوط‌چوب‌پنبه‌ای نسبتاً ثابت باقی می‌ماند، در حالی که پوشش علفی به دلیل تغییرات فنولوژیک نوسانات قابل توجهی دارد و در ماه‌های ژوئیه و اوت به حداقل می‌رسد. بنابراین، سری‌های زمانی این مطالعه بر این دو ماه متمرکز خواهد بود. برای پیگیری روندهای بلندمدت گونه بلوط در منطقه زاگرس مرکزی، از ظرفیت‌های پلتفرم Google Earth Engine (GEE) استفاده شد (Gorelick et al, 2017). این پلتفرم دسترسی رایگان به مجموعه‌های گسترده‌ای از داده‌های برداری و رستری سراسر جهان را فراهم می‌کند. از این رو، استفاده از GEE در این مطالعه فرصتی مناسب برای ارزیابی کارایی و تناسب این پلتفرم با اهداف پردازش تصاویر و پایش جنگل فراهم نمود. با توجه به اهمیت اکولوژیکی و اقتصادی جنگل‌های بلوط زاگرس و تخریب گسترده این رویشگاه‌ها، هدف این مطالعه، ارزیابی روندهای زمانی پوشش گونه‌ی بلوط در زاگرس مرکزی و توسعه یک ابزار پایش مؤثر برای پژوهش و مدیریت جنگل‌ها است. برای این منظور، روندهای بلندمدت NDVI با تفکیک مکانی ۳۰ متر برای تمام مناطقی که دارای پوشش پایدار از جنگل‌های بلوط در زاگرس مرکزی هستند، استخراج شد و به عنوان شاخصی مناسب برای پایش سلامت و بهره‌وری جنگل در دوره‌ی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Landsat تحلیل گردید.

داده و روش‌ها

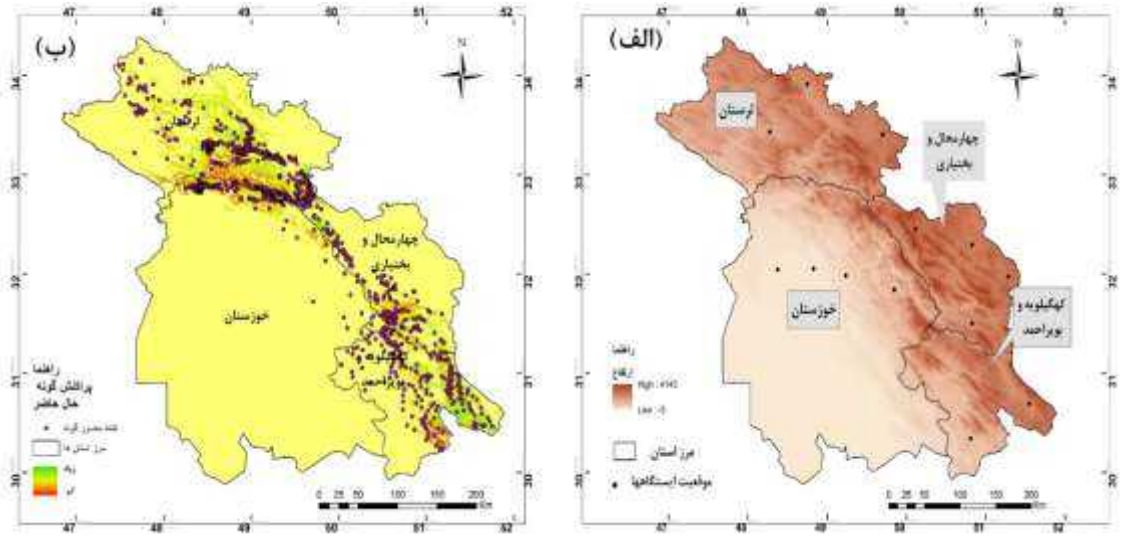
معرفی منطقه مورد مطالعه

زاگرس مرکزی در غرب ایران با روند شمال‌غربی– جنوب‌شرقی گسترده شده و عمدتاً از جنگل‌ها و مراتع پوشیده است. گونه غالب جنگل‌های این منطقه بلوط ایرانی (*Quercus brantii*) است که از مهم‌ترین ذخایر جنگلی کشور به شمار می‌رود. موقعیت خاص جغرافیایی و توپوگرافی، تنوع اقلیمی قابل‌توجهی را در این ناحیه ایجاد کرده است. بارش‌ها عمدتاً تحت تأثیر سامانه‌های مدیترانه‌ای و کم‌فشار سودان بوده و از مهر تا اردیبهشت بخش اصلی ریزش‌های جوی را رقم می‌زنند. میزان بارندگی سالانه بین ۳۵۰ تا ۱۰۰۰ میلی‌متر متغیر است و به‌طور میانگین حدود ۵۵۰ میلی‌متر گزارش شده است. این

منطقه یک‌سوم بارش‌های کشور را دریافت کرده و سرچشمه ۴۰ درصد رودخانه‌های اصلی ایران محسوب می‌شود. منطقه مورد مطالعه ما در زاگرس بین عرض‌های ۴۸ درجه و ۰۱ دقیقه تا ۵۰ درجه و۸۳ دقیقه طول شرقی و ۳۰ درجه و ۳۴ دقیقه و ۳۳ درجه و ۹۱دقیقه عرض شمالی از خط استوا قرار گرفته است (شکل ۱(الف)).

داده‌های نقاط حضور گونه

به‌منظور شناسایی مکان‌های حضور بلوط ایرانی در محدوده مورد بررسی، از نقشه تیپ‌های گیاهی تهیه شده توسط سازمان جنگل‌ها و مراتع کشور استفاده شد. سپس با بررسی‌های مستقیم میدانی نقاط حضور جوامع گیاهی صحت‌سنجی و ثبت گردیدند. برای جلوگیری از سوگیری، از هر واحد یک کیلومتر مربع تنها یک نقطه حضور انتخاب گردید (Zhang et al,2012). پس از این مرحله، محل‌های حضور گونه شناسایی و به ثبت رسیدند؛ با این شرط که نواحی مورد پذیرش باید حداقل یک لکه پیوسته از پوشش بلوط به مساحت یک کیلومتر مربع را شامل باشند. افزون بر این، فاصله میان نقاط برداشت شده دست‌کم یک کیلومتر تعیین شد تا از همپوشانی داده‌ها جلوگیری شود. رعایت این معیارها منجر به انتخاب ۳۲۲ نقطه حضور گونه گردید (شکل ۱ (ب)).



شکل۱- موقعیت منطقه مطالعاتی و ایستگاه‌های هواشناسی منتخب (الف) پراکنش گونه بلوط نقاط انتخابی در زاگرس مرکزی (ب)

داده‌های اقلیمی

در این پژوهش داده‌های روزانه ۱۳ ایستگاه سینوپتیک واقع در محدوده زاگرس مرکزی طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ از سازمان هواشناسی کشور دریافت شد. روند تغییرات دماهای کمینه و بیشینه در فصول سرد و گرم، و بارش در فصول خشک و تر در مقیاس‌های ماهانه، فصلی و سالانه تحلیل گردید. برای شناسایی روندها از آزمون ناپارامتریک من-کندال به‌دلیل مقاومت آن در برابر داده‌های پرت استفاده شد. همچنین، به‌منظور بررسی ارتباط میان متغیرهای اقلیمی و شاخص NDVI، ضریب همبستگی پیرسون محاسبه شد.

استخراج شاخص NDVI برای نقاط حضور گونه با استفاده از Google Earth Engine

برای بررسی تغییرات پوشش بلوط در زاگرس مرکزی، ۳۲۲ نقطه حضور گونه در نرم‌افزار Google Earth Engine (GEE) به‌عنوان مرجع استخراج NDVI به‌کار گرفته شد. تصاویر ماهواره‌ای Landsat، ۵، ۷، ۸ و ۹ در دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ استفاده گردید و به‌منظور کاهش اثر پوشش زیرآشکوب، میانگین ماه‌های سپتامبر و اکتبر مبنا قرار گرفت. تصاویر دارای پوشش ابری حذف و شاخص NDVI بر اساس رابطه استاندارد محاسبه شد. سپس میانگین مقادیر NDVI برای هر نقطه استخراج و در قالب جدول داده‌ای جهت تحلیل‌های آماری و مدل‌سازی آماده گردید.

نتایج و بحث

بررسی تغییرات روند پارامترهای اقلیمی در شرایط فعلی

تحلیل نمودارهای روندی متغیرهای اقلیمی نشان‌دهنده تغییرات قابل توجه دما و بارش در طول دوره مورد مطالعه است. در نمودارهای دمای فصول مختلف، روند افزایشی واضحی مشاهده می‌شود؛ به طور نمونه، نمودار بیشینه دمای فصل تابستان و زمستان نشان‌دهنده افزایش پیوسته دما از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ است. این افزایش همسو با نتایج همبستگی دماها است که همبستگی مثبت و معناداری بین بیشینه و کمینه دماهای فصول مختلف نشان می‌دهد. چنین روندی بیانگر گرمایش کلی منطقه و تأثیر احتمالی تغییرات اقلیمی بر دمای فصول است. بررسی داده‌های هواشناسی منطقه طی دو دهه‌ی اخیر نشان می‌دهد که روند تغییرات اقلیمی به‌طور آشکاری بر پارامترهای دمایی و بارش اثر گذاشته است. همان‌گونه که در

نمودار تغییرات دمای بیشینه مشاهده می‌شود، این متغیر دارای روندی افزایشی است؛ به‌طوری که از مقادیر حدود ۲۲ درجه سلسیوس در ابتدای دوره به بیش از ۲۴ درجه سلسیوس در سال‌های اخیر رسیده است. این روند افزایشی بیانگر شدت گرفتن گرمایش منطقه‌ای و افزایش دماهای روزانه است. در کنار آن، نمودار تغییرات دمای کمینه نیز روندی مشابه را نشان می‌دهد و مقادیر آن از حدود ۱۲ درجه در سال‌های ابتدایی دوره به بالای ۱۳.۵ درجه در سال‌های پایانی رسیده است. افزایش دماهای شبانه، همانند افزایش دماهای روزانه، می‌تواند نقش بسزایی در تشدید تنش‌های گرمایی و تغییر تعادل آبی- انرژی اکوسیستم‌ها داشته باشد. نمودارهای بارش فصول خشک و تر نشان‌دهنده الگوهای متفاوتی هستند. بارش فصل خشک روندی نسبتاً ثابت یا کمی کاهشی دارد، در حالی که بارش فصل تر روند افزایشی اندکی را نشان می‌دهد. این تغییرات بارشی در ترکیب با افزایش دما می‌تواند پیامدهای اکولوژیکی مهمی داشته باشد، از جمله تغییر در دسترسی آب برای گیاهان و تغییر زمان‌بندی فرآیندهای رشد. همچنین، همبستگی منفی بین دمای زمستان و بارش فصل تر در تحلیل همبستگی مشاهده شده است که ممکن است نشان‌دهنده کاهش بارش‌ها در سال‌هایی با دمای زمستان بالاتر باشد. روند نزولی بارش در شرایطی که دماهای بیشینه و کمینه هر دو رو به افزایش هستند، می‌تواند بیانگر شدت یافتن شرایط خشکی و تشدید اثرات تغییر اقلیم در منطقه باشد. کاهش بارش همراه با افزایش دما معمولاً منجر به کاهش رطوبت خاک، افزایش تبخیر و تعرق و در نهایت، محدود شدن منابع آب در دسترس گیاهان می‌شود. بررسی نتایج آزمون من–کندال برای داده‌های اقلیمی منطقه نشان می‌دهد که متغیرهای دمایی (حداکثر و حداقل) دارای روندی افزایشی و معنادار بوده، در حالی که تغییرات بارش گرچه نزولی است، اما از نظر آماری معنادار نیست. نتایج آزمون مان–کندال نشان داد که تغییرات دما در منطقه مورد مطالعه روندی صعودی و معنادار دارد. بیشینه دمای زمستان با آماره Z برابر ۲/۸۵ و سطح اطمینان ۹۵ درصد روند افزایشی معنادار را نشان می‌دهد. همچنین کمینه دمای تابستان و کمینه دمای زمستان هر دو دارای روند افزایشی معنادار در سطح اطمینان ۹۵ تا ۹۹ درصد هستند. بیشینه دمای تابستان با Z برابر ۵/۲۸ در سطح اطمینان ۹/۹۹ درصد بیشترین شدت روند افزایشی را نسبت به سایر پارامترهای دمایی دارد. به طور کلی نتایج نشان می‌دهد که حداقل و حداکثر دما در فصول مختلف به‌طور قابل توجهی در حال افزایش است که بیانگر گرمایش اقلیم منطقه می‌باشد. در مقابل، متغیرهای بارش روند مشخص و معناداری نشان ندادند. بارش فصل خشک با Z=۱/۲۷ گرچه دارای

شیب مثبت است، اما از نظر آماری معنادار نیست. بارش فصل تر نیز با Z منفی (۱/۰۲-) روند نزولی ضعیفی دارد، اما این کاهش نیز فاقد معنی‌داری آماری است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که بارش‌ها در منطقه دارای نوساناتی هستند اما روند قطعی و معناداری در آن‌ها مشاهده نمی‌شود. نتایج آزمون من–کندال تأیید می‌کند که منطقه تحت تأثیر گرمایش اقلیمی قرار گرفته و دماهای حداقل و حداکثر به طور معناداری در حال افزایش‌اند، در حالی که تغییرات بارش هرچند نزولی، فاقد معناداری آماری بوده و نشان‌دهنده الگوی ناپایدار و پرنوسان بارندگی در منطقه است. این نتایج در هماهنگی کامل با نمودارهای ترسیمی دما و بارش قرار دارد و شواهد روشنی از تشدید گرمایش منطقه‌ای در جنگل‌های زاگرس مرکزی ارائه می‌دهد (جدول ۱).

جدول ۱ نتایج آماره من–کندال برای بیشینه و کمینه دما و بارش سالانه ایستگاه‌های منتخب طی دوره ۲۰۲۳- ۲۰۰۰

Time series	Test Z	Signific.	Q	Qmin99	Qmax99	Qmin95	Qmax95
بیشینه دمای فصل زمستان	2.85	**	0.110	0.012	0.209	0.043	0.190
کمینه دمای فصل تابستان	3.25	**	0.048	0.009	0.090	0.020	0.078
بارش فصل خشک	1.27		0.027	-0.034	0.116	-0.018	0.091
کمینه دمای فصل زمستان	3.05	**	0.080	0.019	0.141	0.036	0.126
بیشینه دمای فصل تابستان	5.28	***	0.089	0.064	0.118	0.071	0.111
بارش فصل تر	-1.02		-0.535	-1.501	0.925	-1.151	0.502

بررسی تغییرات زمانی شاخص NDVI و تأثیرپذیری آن از بارش و دما در زاگرس مرکزی

بررسی روند تغییرات شاخص NDVI برای گونه بلوط در زاگرس مرکزی طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ نشان می‌دهد که این شاخص در بازه‌ای بین ۰/۲۲ تا ۰/۳۶ نوسان داشته است (شکل ۳). در سال‌های ابتدایی دوره (۲۰۰۰ تا ۲۰۰۷) مقدار NDVIدر محدوده ۰/۲۵ تا ۰/۲۸ قرار داشت که بیانگر تراکم متوسط پوشش گیاهی بود. در سال ۲۰۰۸ کاهش قابل توجهی مشاهده شد و NDVI به حدود ۰/۲۲ رسید؛ این افت شدید احتمالاً تحت تأثیر خشکسالی‌های شدید یا فشارهای انسانی مانند بهره‌برداری جنگلی رخ داده است. در سال‌های بعد (۲۰۰۹ تا ۲۰۱۲) نوساناتی دیده می‌شود، به‌گونه‌ای که شاخص پس از بهبود نسبی در سال ۲۰۱۰، دوباره در سال ۲۰۱۱ کاهش یافته و در سطحی پایین‌تر از میانگین قرار گرفته

است. از سال ۲۰۱۳ روند صعودی آشکاری آغاز شده و NDVI به مقادیر بالاتر از ۰/۳۰رسیده است. بیشترین مقدار شاخص در سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ مشاهده شد که به حدود ۰/۳۵ تا ۰/۳۶ رسید و بیانگر وضعیت مطلوب‌تر پوشش درختی بلوط در این سال‌ها است. هرچند در سال‌های ۲۰۲۱ و ۲۰۲۲ کاهش اندکی ثبت شد، اما شاخص دوباره در سال ۲۰۲۳ افزایش یافته و به سطح بالاتری از میانگین کل دوره رسیده است. به طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که اگرچه پوشش بلوط در زاگرس مرکزی در برخی سال‌ها تحت تأثیر عوامل اقلیمی و انسانی دچار افت شده است، اما روند بلندمدت شاخص NDVI صعودی بوده و بیانگر بهبود نسبی وضعیت پوشش درختی بلوط در منطقه است. این روند صعودی به‌ویژه پس از سال ۲۰۱۲، نشان‌دهنده پایداری و توان بازیابی اکوسیستم جنگلی بلوط در برابر فشارهای محیطی است. بررسی تغییرات اقلیمی طی سه دهه اخیر در زاگرس مرکزی نشان داد که الگوی دما و بارش تغییراتی چشمگیر و ناهمگون داشته است. نتایج آزمون من–کندال بیانگر آن است که کمینه دما در ایستگاه‌های مختلف روندی ناهمگون داشته و در برخی نقاط حتی کاهش معنی‌داری مشاهده شده است. این موضوع می‌تواند به تداوم وقوع سرمای شبانه در برخی مناطق کوهستانی و تأثیرپذیری از شرایط محلی مرتبط باشد. در مقابل، بیشینه دما روندی کاملاً منسجم و غالباً افزایشی داشته است؛ به‌گونه‌ای که در بسیاری از ایستگاه‌ها افزایش معنی‌دار و پایدار بیشینه‌های دما ثبت گردید. این یافته به وضوح نشان می‌دهد که گرمایش روزانه شاخص‌ترین تغییر اقلیمی اخیر در منطقه بوده است. برای بارش سالانه نیز اغلب ایستگاه‌ها روندی کاهشی را تجربه کرده‌اند، هرچند در اغلب موارد این کاهش از نظر آماری معنی‌دار نبوده است. به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که در دوره اخیر، منطقه با الگویی متشکل از افزایش بیشینه دما و کاهش نسبی بارش مواجه بوده است، در حالی که تغییرات کمینه دما بیشتر موضعی و کمتر منسجم بوده‌اند. نتایج حاصل از شاخص NDVI نیز مکمل این یافته‌ها است. روند بلندمدت NDVI از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ نشان می‌دهد که علی‌رغم نوسانات بین‌سالی و وقوع افت‌های مقطعی (مانند سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۱۱)، پوشش گیاهی بلوط در زاگرس مرکزی در مجموع روندی صعودی داشته و در سال‌های اخیر به بالاترین مقادیر خود رسیده است. این افزایش به‌ویژه از سال ۲۰۱۲ به بعد، هم‌زمان با تشدید روند افزایشی بیشینه دما و کاهش نسبی بارش رخ داده است. چنین الگویی حاکی از آن است که اکوسیستم جنگلی زاگرس در بازه کوتاه‌مدت توانسته است با شرایط جدید سازگار شود و حتی روندی رو به بهبود نشان دهد. با این حال، این بهبود لزوماً به معنای پایداری

بلندمدت نیست، چراکه افزایش بیشینه دما و احتمال کاهش بارش در سناریوهای شدید می‌تواند در آینده تهدیدی جدی برای استمرار این روند مثبت باشد. تغییرات اقلیمی اخیر، به‌ویژه گرمایش روزانه و کاهش نسبی بارش، در حال بازتعریف شرایط زیست‌محیطی زاگرس مرکزی هستند. اگرچه شاخص NDVI نشان‌دهنده بهبود نسبی پوشش جنگلی در دو دهه اخیر است، اما تداوم این روند در گرو مدیریت صحیح منابع طبیعی، کنترل فشارهای انسانی و همچنین کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در سطح جهانی خواهد بود. در غیر این صورت، افزایش شدید دما و تداوم خشکی می‌تواند پایداری پوشش گیاهی را تهدید کرده و فرآیند زوال جنگل‌های بلوط را تسریع نماید. نتایج آزمون من–کندال برای بارش سالانه نشان داد که طی دوره ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۳ اغلب ایستگاه‌ها روندی کاهشی را تجربه کرده‌اند، هرچند این کاهش در بیشتر موارد از نظر آماری معنی‌دار نبوده و تنها در ایستگاه الیگودرز در سطح اطمینان ۹۰ درصد تأیید گردید. این یافته نشان می‌دهد که الگوی بارش منطقه به سمت کاهش نسبی میل دارد، اما شدت و پایداری این کاهش در حدی نبوده که بتواند در همه ایستگاه‌ها به یک روند معنی‌دار تبدیل شود. از منظر اکولوژیکی، کاهش بارش سالانه به‌ویژه در مناطق کوهستانی زاگرس، به معنای محدودیت در منابع آبی در دسترس برای رشد و باززایی جنگل‌های بلوط است. با مقایسه نتایج بارش و شاخص NDVIمی‌توان رابطه‌ای دوگانه مشاهده کرد (شکل۴). در سال‌هایی که افت شدید بارش رخ داده (مانند ۲۰۰۸ و ۲۰۱۱)، شاخص NDVI نیز به کمترین مقادیر خود رسید و پوشش گیاهی دچار افت محسوسی شد. این همبستگی منفی بین کاهش بارش و کاهش NDVI نشان می‌دهد که در کوتاه‌مدت، بارش عامل تعیین‌کننده‌ای در سلامت و تراکم پوشش گیاهی است. در مقابل، از سال ۲۰۱۲ به بعد، علی‌رغم تداوم کاهش نسبی بارش، روند NDVI صعودی بوده و حتی به بیشترین مقادیر تاریخی خود در ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ رسید. این پدیده را می‌توان ناشی از سازگاری اکوسیستم بلوط با شرایط اقلیمی، بهره‌گیری از بارش‌های مؤثر در فصل رشد، و همچنین نقش احتمالی افزایش دمای بیشینه در طولانی‌تر کردن فصل رشد دانست. به بیان دیگر، بارش نقشی حیاتی در نوسانات سالانه NDVI دارد و افت‌های شدید شاخص اغلب در سال‌های کم‌بارش رخ داده است. اما در روند بلندمدت، پوشش گیاهی توانسته است تا حدی بر اثرات منفی کاهش بارش غلبه کند و مسیر رو به بهبودی را طی کند. با این حال، تداوم کاهش بارش در سناریوهای آینده، به‌ویژه اگر با افزایش بیشینه دما همراه باشد، می‌تواند خطر تشدید خشکی خاک، کاهش توان باززایی درختان بلوط، و در نهایت بازگشت روند نزولی NDVI

را به همراه داشته باشد. بنابراین، نقش بارش در پویایی NDVI را می‌توان در دو سطح تفسیر کرد:۱- **تأثیر کوتاه‌مدت :** نوسانات بین‌سالی بارش به‌طور مستقیم موجب افزایش یا کاهش NDVI می‌شود. سال‌های خشک، افت شدید NDVI و سال‌های پربارش، افزایش نسبی آن را به همراه دارند. ۲- **تأثیر بلندمدت :** اگرچه روند کلی NDVI در دو دهه اخیر صعودی بوده است، اما کاهش مداوم بارش در آینده می‌تواند این روند مثبت را تهدید کرده و پایداری جنگل‌های زاگرس را با خطر جدی مواجه سازد.



شکل ۲- روند تغییرات شاخص NDVI در جنگل‌های بلوط زاگرس مرکزی

بحث و نتیجه گیری

نتایج تحلیل داده‌های اقلیمی و پوشش گیاهی در زاگرس مرکزی طی سه دهه‌ی اخیر نشان داد که منطقه به‌طور آشکار تحت تأثیر تغییرات اقلیمی قرار گرفته است. روند افزایشی دماهای بیشینه و کمینه، که هر دو در آزمون من–کندال از نظر آماری معنادار بودند، بیانگر شدت گرفتن گرمایش منطقه‌ای و تغییر شرایط حرارتی اکوسیستم است. در مقابل، بارش سالانه علی‌رغم تمایل به کاهش، در اغلب ایستگاه‌ها فاقد معناداری آماری بود و این موضوع نشان می‌دهد که تغییرات بارش در منطقه الگوی ناپایدار و پرنوسانی دارد. این ناهمگونی در تغییرات بارش در حالی رخ می‌دهد که افزایش دما روندی پایدار و قطعی دارد و می‌تواند نقش اصلی را در تشدید خشکی و فشارهای اکولوژیکی ایفا کند. بررسی شاخص NDVI در دوره‌ی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ نیز مکمل یافته‌های اقلیمی بود. این شاخص اگرچه در سال‌های خشک (مانند ۲۰۰۸ و ۲۰۱۱) کاهش محسوسی را تجربه کرد، اما در بلندمدت روندی صعودی داشته و در سال‌های اخیر به بیشترین مقادیر خود رسیده است.

این امر نشان‌دهنده توان نسبی اکوسیستم بلوط برای سازگاری و بازیابی در برابر فشارهای اقلیمی و انسانی است. با این حال، تداوم گرمایش روزانه همراه با کاهش نسبی بارش، تهدیدی جدی برای پایداری پوشش گیاهی در آینده محسوب می‌شود. به بیان دیگر، بارش در کوتاه‌مدت نقش تعیین‌کننده‌ای در نوسانات NDVI دارد، در حالی که در مقیاس بلندمدت، سازگاری اکوسیستم توانسته اثرات بخشی از این تغییرات را تعدیل کند. در مجموع، یافته‌ها تأکید می‌کنند که زاگرس مرکزی در حال تجربه الگوی جدیدی از شرایط اقلیمی است که شاخص‌ترین ویژگی آن افزایش معنادار دماهای بیشینه است. این تغییر می‌تواند پیامدهای گسترده‌ای بر چرخه آب، تعادل انرژی و پایداری جنگل‌های بلوط داشته باشد. بنابراین، مدیریت صحیح منابع طبیعی، کنترل فشارهای انسانی، و به‌ویژه توجه به راهکارهای سازگاری و کاهش اثرات تغییر اقلیم، برای تداوم پایداری اکوسیستم‌های زاگرس ضروری است. در غیر این صورت، احتمال بازگشت روند نزولی پوشش گیاهی و تشدید فرآیند زوال جنگل‌های بلوط در آینده نزدیک وجود خواهد داشت.

منابع

بهمن پور، ه. (۱۳۹۴)، ارزیابی توان اکولوژیک زاگرس مرکزی، پروژه بین المللی حفاظت از تنوع زیستی در سیمای حفاظتی زاکرس مرکزی.

ثاقب‌طالبی، ک. ساجدی ت و پورهاشمی م. (۲۰۱۴)، جنگل‌های ایران: گنجینه‌ای از گذشته، امیدی برای آینده.

جزیرهایی، م. و ابراهیمی رستاقی ن. (۱۳۸۲)، بررسی شرایط خاک و پراکنش گونه‌های بلوط غرب ایران. مجله منابع طبیعی ایران، ۵۵(۲)، ۳۳–۴۵.

جزیرهایی ،م. و ابراهیمی رستاقی م. (۲۰۰۳)، جنگلداری در جنگل‌های زاگرس. انتشارات دانشگاه تهران.

مروی مهاجر م. (۱۳۶۹)، اثر آتش سوزی بر ترسیب کربن خاک و زیتوده گیاهی در مراتع نیمه استپی زاگرس مرکزی، حفاظت زیست بوم گیاهان، ۵(۱۰):۵۱-۳۹.

نقی پور برج، ع، حیدریان آقاخانی، م. سنگونی ح. (۱۳۹۷)، پیش‌بینی اثر تغییر اقلیم بر توزیع جغرافیایی بنه (*Pistacia atlantica*) در منطقه زاگرس مرکزی، حفاظت زیست بوم گیاهان; ۶ (۱۳) :۲۱۴-۱۹۷.

Arsalani, M., Grießinger, J., & Bräuning, A. (2022). Tree-ring-based seasonal temperature reconstructions and ecological implications of recent warming on oak forest health in the Zagros Mountains, Iran. *International Journal of Biometeorology*, *66*(12), 2553-2565.

Aubard, V., Paulo, J. A., & Silva, J. M. (2019). Long-term monitoring of cork and holm oak stands productivity in Portugal with Landsat imagery. Remote Sensing, 11(5), 525.

Carreiras, J. M., Pereira, J. M., & Pereira, J. S. (2006). Estimation of tree canopy cover in evergreen oak woodlands using remote sensing. Forest ecology and management, 223(1-3), 45-53.

Dobbertin, M. (2005). Tree growth as indicator of tree vitality and of tree reaction to environmental stress: a review. European Journal of Forest Research, 124(4), 319-333.

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote sensing of Environment, 202, 18-27.

Gu, H., Qiao, Y., Xi, Z., Rossi, S., Smith, N. G., Liu, J., & Chen, L. (2022). Warming-induced increase in carbon uptake is linked to earlier spring phenology in temperate and boreal forests. Nature Communications, 13(1), 3698.

Helman, D., Lensky, I. M., Tessler, N., & Osem, Y. (2015). A phenology-based method for monitoring woody and herbaceous vegetation in Mediterranean forests from NDVI time series. Remote Sensing, 7(9), 12314-12335.

IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge, UK: Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/

Jiang, Z., Huete, A. R., Chen, J., Chen, Y., Li, J., Yan, G., & Zhang, X. (2006). Analysis of NDVI and scaled difference vegetation index retrievals of vegetation fraction. Remote Sensing of Environment, 101(3), 366–378. https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.01.003

Ju, J., & Masek, J. G. (2016). The vegetation greenness trend in Canada and US Alaska from 1984–2012 Landsat data. Remote Sensing of Environment, 176, 1-16.

Kovalskyy, V., Roy, D. P., Zhang, X. Y., & Ju, J. (2012). The suitability of multi-temporal web-enabled Landsat data NDVI for phenological monitoring–a comparison with flux tower and MODIS NDVI. Remote Sensing Letters, 3(4), 325-334.

Mir Abolfathi, M. (2013). Outbreak of charcoal disease on Quercus spp and Zelkova carpinifolia trees in forests of Zagros and Alborz mountains in Iran. Iranian journal of plant pathology, 49(2), 257-263.

Paulo, J. A., Faias, S. P., Ventura-Giroux, C., & Tomé, M. (2015). Estimation of stand crown cover using a generalized crown diameter model: application for the analysis of Portuguese cork oak stands stocking evolution. iForest-Biogeosciences and Forestry, 9(3), 437.

Pereira, H., & Knapic, S. (2017). 2.7 Bark and cork. *Performance of Bio-based Building Materials*, 78-86.

Pettorelli, N. (2013). NDVI and environmental monitoring. The Normalized difference vegetation index.

Pourhashemi, M., Jahanbazi Goujani, H., Hoseinzadeh, J., Bordbar, S. K., Iranmanesh, Y., & Khodakarami, Y. (2017). The history of oak decline in Zagros forests. Iran Nature, 2(1), 37-30.

Santos, M. J., Baumann, M., & Esgalhado, C. (2016). Drivers of productivity trends in cork oak woodlands over the last 15 years. Remote Sensing, 8(6), 486.

Zhang, M. G., Zhou, Z. K., Chen, W. Y., Slik, J. F., Cannon, C. H., & Raes, N. (2012). Using species distribution modeling to improve conservation and land use planning of Yunnan, China. Biological Conservation, 153, 257–264.

Temporal Trend Analysis of NDVI in Oak Forests of the Central Zagros

Mahbubeh Omidi ghaleh Mohammadi[1], Taghi Tavousi[2], Mahmoud Khosravi[3], Mohsen Hamidianpour[4], Ali Asghar Naghipour[5]

PhD Student, Department of Physical Geography, Faculty of Geography and Environmental Planning, Sistan and Baluchestan University, Zahedan, Iran

Professor, Department of Physical Geography, Faculty of Geography and Environmental Planning, Sistan and Baluchestan University, Zahedan, Iran

Professor, Department of Physical Geography, Faculty of Geography and Environmental Planning, Sistan and Baluchestan University, Zahedan, Iran

Associate Professor, Department of Physical Geography, Faculty of Geography and Environmental Planning, Sistan and Baluchestan University, Zahedan, Iran

Assistant Professor, Department of Nature Engineering, Faculty of Natural Resources and Earth Sciences, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

*t.tavousi@gep.usb.ac.ir

Abstract

Forest health, typically evaluated through canopy density dynamics, represents a fundamental indicator of ecosystem resistance and resilience under climatic stressors. In this study, spatiotemporal trends of oak (Quercus brantii) forests in the central Zagros were quantified using the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) derived from Landsat 5, 7, 8, and 9 imagery (2000–2023) at 30 m spatial resolution. To minimize understory interference and phenological variability, mean NDVI values for September and October were analyzed. Climatic data from regional synoptic stations were assessed using the non-parametric Mann–Kendall test, revealing statistically significant upward trends in both maximum and minimum temperatures, whereas precipitation exhibited non-significant fluctuations. Time-series analysis of NDVI indicated canopy decline during drought years (e.g., 2008 and 2011), but an overall positive trajectory culminating in the highest values in recent years. These results suggest a relative adaptive capacity and recovery potential of oak ecosystems; however, the persistence of warming and unstable precipitation

regimes may intensify hydro-climatic stress and jeopardize long-term forest stability. Consequently, integrated forest management and climate-adaptive strategies are essential to sustaining the ecological resilience of the Zagros region.

Keywords: NDVI, remote sensing, climatic trends, canopy dynamics, oak forests, central Zagros.

تاثیر تغییر اقلیم بر نیازهای سرمایشی و گرمایشی در شهر خوی

عاطفه حسینی صدر[۱]، غلام حسن محمدی[۲]

۱- گروه جغرافیا، دانشگاه پیام نور، صندوق پستی ۳۶۹۷-۱۹۳۹۵، تهران، ایران
۲- دکتری آب و هواشناسی، سازمان هواشناسی کشور، اداره کل هواشناسی استان آذربایجان شرقی، تبریز، ایران
آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول (Sadr88@pnu.ac.ir)

چکیده

امروزه اثرات جانبی تغییر اقلیم، اکثر جنبه‌های زندگی انسان را تحت تاثیر قرار داده است. به طوری که گاهاً مطالعه تاثیرات مختلف تغییر اقلیم مهم‌تر از شناسایی و مطالعه بحث تغییر اقلیم است. بررسی تغییرات نیازهای سرمایشی و گرمایشی شهر خوی تحت تاثیر تغییر اقلیم انگیزه اصلی مطالعه حاضر بوده است. به این منظور داده‌های هواشناسی حداقل و حداکثر دمای روزانه در بازه زمانی ۳۰ ساله از سازمان هواشناسی اخذ گردید. پس از اطمینان از کیفیت داده‌ها با استفاده از روابط مربوطه نیازهای سرمایشی و گرمایشی به صورت روزانه برای ایستگاه خوی برآورد گردید. در ادامه از روش آماری من-کندال و سن استیمیتور جهت بررسی روند و آهنگ تغییرات نیازهای سرمایشی و گرمایشی استفاده شد. نتایج نشان دادند در طول دوره‌ی آماری بیشترین نیاز سرمایشی برای ماه جولای، و کمترین برای ماه سپتامبر بوده است. در مورد نیاز گرمایشی بیشترین مقدار برای ماه ژانویه و کمترین مقدار برای ماه ژوئن، جولای، آگوست و سپتامبر بوده است. همچنین سالهای ۱۹۹۲و۱۹۹۴کمترین مقدار و سال ۲۰۱۸ بیشترین مقدار را برای نیاز سرمایشی و سال ۲۰۱۰ کمترین مقدار و سال ۱۹۹۳ بیشترین مقدار نیاز گرمایشی را دارا هستند. بنابراین آنچه خروجی‌ها نشان می‌دهند، گویای روند رو به رشد نیاز به انرژی سرمایشی بالاخص در ماههای گرم سال و کاهش نیاز گرمایشی در دوره‌ی سرد سال می‌باشد.

کلید واژه‌ها: درجه-روز سرمایشی و گرمایشی، روند تغییرات اقلیمی، آزمون ناپارامتریک من-کندال، شهر خوی

مقدمه

گرمایش جهانی، تغییر اقلیم و پیامدهای آن بر زندگی و فرآیند توسعه در جوامع انسانی یکی از بزرگترین مسائل جامعه جهانی است که در دو دهه اخیر توجه بسیاری از محافل علمی و سیاسی جهان را به خود جلب کرده است. پیش بینی می‌شود تا دهه‌های آینده زمین شاهد رکورد بی سابقه گرم شدن باشد که علت اصلی این امر، رشد جمعیت و پیشرفت فن آوری و در نتیجه افزایش تقاضای جامعه برای حاملهای انرژی است، که در قرن اخیر بیش از ۴ درصد رشد داشته است. بررسی و شناسایی اثرات تغییر اقلیم بر بخشهای صنعتی، اقتصادی و اجتماعی جامعه و ارائه راهکارهای کارآمد به تصمیم گیرندگان و برنامه‌ریزان برای آمادگی مقابله با این تاثیرات بسیار حائز اهمیت است. میزان مصرف انرژی از مهمترین و چالش برانگیزترین ابعاد زندگی نوین امروزی است. محاسبه‌ی مقادیر درجه- روزهای سرمایش و گرمایش، به عنوان اطلاعات

پایه و اساسی در برآورد مقدار مصرف انرژی، برای گرم کردن ساختمان در فصل سرد و یا سرد کردن آن در فصل گرم سال به شمار می‌رود. مقدار نیاز به گرم کردن محیط در دوره‌ی سرد سال و سرد کردن آن در دوره‌ی گرم سال بر حسب تعریف، جمع تفاضل‌های میانگین روزانه‌ی دما از آستانه‌ی معین در دوره‌ی مشخصی از سال است و برحسب درجه-روز بیان می‌شود(خلیلی، ۱۳۷۸). درجه- روزهای سرمایشی و درجه-روزهای گرمایشی ، سختی آب و هوایی مناطق را نیز مشخص می‌کند و رابطه مستقیمی با تراکم جمعیت و وسعت نواحی مسکونی دارند. در تعریف دیگر درجه-روز عبارت است از اندازه¬گیری میانگین دمای هوا با استفاده از دمای آستانه که این آستانه‌های دمایی انتخاب شده برای محاسبه درجه-روز سرمایش و گرمایش بستگی به اهداف ویژه دارد. برای نمونه درجه-روز انتخابی برای آسایش انسان ۱۸درجه سانتیگراد می‌باشد(کدی اغلو و سن ۱۹۹۹). مطالعات گسترده‌ای در سطوح ملی، منطقه‌ای و جهانی انجام شده است که با انتخاب آستانه‌های دمایی منطبق بر هدف پژوهش و با استفاده از رابطه‌های ارائه شده، به محاسبه‌ی درجه-روز سرمایشی و گرمایشی پرداختند. بنسال وهمکاران (۲۰۰۱)، روند نیازهای گرمایشی درکانادا را با استفاده از داده های دمای کمینه و بیشینه، طی دوره ی آماری۱۹۰۰-۱۹۸۸ بررسی کردند. نتایج نشان داد که نیازهای گرمایشی در جنوب کانادا در حال افزایش است. فیالی (۲۰۰۲)، در مطالعه ای به توزیع فضایی درجه-روز در ایرلند پرداخت. او برای محاسبه این فراسنج، از آستانه‌های دمایی صفر، ۱۰/۵درجه سلسیوس استفاده کرد. نتایج مطالعه ایشان بیانگر افزایش نیاز سرمایشی وکاهش نیاز گرمایشی به ترتیب در فصل گرم و سرد سال است. ماتزاراکیس و همکاران (۲۰۰۴)، درجه-روز گرمایشی یونان را برای برآورد انرژی مصرفی مورد نیاز با استفاده از پایه‌ی دمایی۱۴ درجه سلسیوس مورد ارزیابی قراردادند و نقشه‌های فضایی آن را ترسیم کردند. کریستنسون و همکاران (۲۰۰۶)، با استفاده از درجه-روز، اثر گرم شدن هوای کره زمین بر انرژی مورد نیاز ساختمان ها را در سوئیس مورد بررسی قراردادند و با محاسبات سناریوهای آزمایشی معتقدند که با کاهش نیاز گرمایشی بین ۱۳ تا ۸۷ درصد، نیازهای سرمایشی شتاب مثبتی در طول قرن ۲۰ و ۲۱ پیداکرده است. لی و فانگ (۲۰۰۷)، به بررسی گرمایش جهانی و اثرات آن بر میزان انرژی مصرفی گرمایشی، با استفاده از میانگین‌های دمای روزانه و ماهانه ۵۹۰ ایستگاه هواشناسی در چین، در طی دوره‌ی آماری ۲۰ ساله(۲۰۰۴-۱۹۸۰) پرداختند. نتایج نشان داد میزان انرژی سوخت ذخیره شده و میزان کمتر مصرف برای فصول سرد سال ناشی از تغییرات اقلیم جهانی است. جیانگ و همکاران (۲۰۰۹)، به بررسی روند درجه روز گرمایش و سرمایش درشین جیانگ چین پرداختند. درا ین مطالعه داده‌های حداقل و حداکثر دمای روزانه‌ی ۵۱ ایستگاه، طی دوره‌ی زمانی ۲۰۰۴-۱۹۵۱تجزیه و تحلیل شد و برای محاسبه‌ی روند ماهانه و فصلی درجه-روز گرمایشی و سرمایشی، از آزمون آماری من کندال وروش رگرسیون خطی استفاده شد. نتایج به دست آمده نشان می دهد که با آستانه‌ی دمایی۱۸ درجه، میانگین درجه روز گرمایشی بین ۲۷۰۰تا۷۹۷۳ درجه روز و میانگین درجه روز سرمایش با آستانه دمایی۲۴ درجه، بین۴تا۷۹۲درجه روز است. درجه-روزهای گرمایشی در فصول زمستان پاییز روند کاهشی داشته است. این در حالی است که درجه-روزهای سرمایشی در۲۳تا۵۱ ایستگاه روند افزایشی داشته است. سکورا و همکاران (۲۰۱۱)، اثر تغییر اقلیم بر مصرف انرژی گرمایشی و سرمایشی را در نوار ساحلی اقیانوس اطلس مورد واکاوی قراردادند. مرشد (۲۰۱۲)، در پژوهشی به توسعه یک معادله برای محاسبه درجه-روز از داده های درجه حرارت روزانه از طریق بررسی رابطه بین درجه-

روز و درجه حرارت متوسط سالانه از ۵۵۱۱ نقطه در سراسر جهان، با استفاده روابط غیرخطی چندگانه پرداخت. نتایج نشان داد که رابطه بسیار قوی بین درجه حرارت سالانه و درجه -روز وجود دارد.

در پژوهشی حلیمی و همکاران(۱۳۹۳)، به ارزیابی و دقت سنجی درون یابی مکانی در برآورد نیازهای گرمایشی و سرمایشی ایران پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که این سه مدل درون یابی می تواند در شناسایی مناطق مختلف کشور از لحاظ نیازهای سرمایشی و گرمایشی به عنوان شاخص اقلیمی معرف پتانسیل مصرف انرژی مفید باشد. مسعودیان و همکاران(۱۳۹۳)، به واکاوی مکانی- زمانی میزان روند ماهانه درجه-روز گرمایش در ایران پرداختند و بر این باورند که در فصل بهار و پاییز روند مثبت نیاز گرمایشی در شمال کردستان و زنجان نمایان است. روند منفی نیز در چاله های داخلی، دامنه‌های زاگرس شمالی و جنوبی، کوهپایه های غرب شهرکرد، ارتفاعات ماکو و کوهپایه های غربی بجنورد مشاهده می شود. رمضانی گورابی و کاظم نژاد(۱۳۹۳)، میانگین مجموع درجه-روز گرمایش و سرمایش ماهانه، فصلی و سالانه استان گیلان را با آستانه دمایی بین۱۸/۳ الی ۲۳/۹ محاسبه کردند، نتایج حاصل از واکاوی نقشه ها در سطح منطقه، بیانگر بخش بندی گیلان به دو پهنه کلان اقلیمی هموار و ناهموار است، در نیمه گرم سال، بخش هموار استان نیازمند سرمایش بالاتری است. انتظاری و همکاران(۱۳۹۶)، به بررسی تحلیل شرایط زیست اقلیمی و درجه-روزهای نیاز گرمایشی و سرمایشی اسلام آباد غرب پرداختند و بر این باورند که واقع شدن این منطقه در اقلیم سرد و نیمه سرد، نیاز ۲۰۷ درجه-روز سرمایش و ۲۲۷ درجه-روز گرمایش را ضروری می داند. از آنجایی که میانگین مصرف انرژی در هر منطقه تا حد قابل توجهی منطبق بر نیازهای سرمایشی و گرمایشی در دوره های گرم سرد سال است و با توجه به اینکه شرایط تعییر اقلیم در آینده آستانه‌های دمایی را دستخوش تغییر خواهد کرد لذا الگوهای جدیدی از مصرف انرژی پدید خواهد آمد. هدف این پژوهش بررسی نیازهای سرمایشی و گرمایشی در شهر خوی است تا دورنمایی مشخص در اختیار برنامه‌ریزان بخصوص در حوزه انرژی قرار گیرد.

داده ها و روش ها

موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه شهر خوی است که در یک دشت هموار استقرار یافته است که توسط کوههای نسبتاً مرتفع احاطه شده اند. این شهر که در شمال استان آذربایجان غربی واقع شده است؛ طبق سرشماری سال۱۳۹۵ ۳۴۸/۶۶۴ نفر جمعیت دارد. شهر در موقعیت جغرافیایی ۴۴ درجه و ۲۹ دقیقه طول جغرافیایی و ۳۹ درجه و ۵۵ دقیقه عرض جغرافیایی واقع شده است. وسعت این شهر بالغ بر ۱۴۲۲ هکتار برآورد شده است.

در این پژوهش به واکاوی مکانی-زمانی بیلان انرژی مورد نیاز سرمایشی و گرمایشی با استفاده از آستانه دمایی ۲۴ درجه برای سرمایش و ۱۸ درجه برای گرمایش پرداخته می‌شود. داده‌های حداقل و حداکثر دمای ۳۰ ساله(۱۹۹۰-۲۰۲۰)، ایستگاه خوی از سازمان هواشناسی اخذ گردید و پس از محاسبه، نتایج به صورت نمودار و جدول ارائه گردید. در این پژوهش برای محاسبه درجه- روز سرمایشی از رابطه‌ی زیر استفاده شده است:

$$CDD = \sum_{i=1}^{n} (Tmean - Tbase)$$

که در آن؛ T_{mean} میانگین دمای هوای روزانه می باشد که به صورت $T_{mean}=(T_{max}+T_{min})/2$ تعریف می شود. و T_{min} و T_{max} به ترتیب حداقل و حداکثر دمای روزانه می باشند و T_{base} پایه ها و آستانه دمایی مورد استفاده برای محاسبه درجه-روز سرمایش است. محاسبه درجه- روز گرمایشی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$HDD = \sum_{i=1}^{n} (Tbase - Tmean)$$

همانند معادله پیشین در این معادله؛ T_{mean} نشان دهنده میانگین دمای روزانه و T_{min} و T_{max} به ترتیب حداقل و حداکثردمای روزانه می باشند و T_{base} پایه ها و آستانه دمایی مورد استفاده برای محاسبه درجه-روز گرمایش است.

در ادامه جهت بررسی روند تغییرات در نیازهای سرمایشی و گرمایشی از آزمون من- کندال استفاده شد. ابتدا مان (Mann) در سال ۱۹۴۵ این آزمون را ارائه کرد و سپس توسط کندال (Kendall) به‌صورت آزمون آماری بسط و گسترش یافت. این آزمون بدون توجه خطی یا غیرخطی بودن روند، جهت شناسایی معنی داری روند به لحاظ آماری هر سری زمان کاربرد دارد(هیرچ و لک ، ۱۹۸۴: ۷۲۹). فرض صفر این آماره بر عدم وجود روند و تصادفی بودن تغییرات فراسنج دلالت دارد. فرض مقابل یا فرض یک بر وجود روند دلالت دارد و بدین معنی است که Z به لحاظ آماری معنی‌دار است.

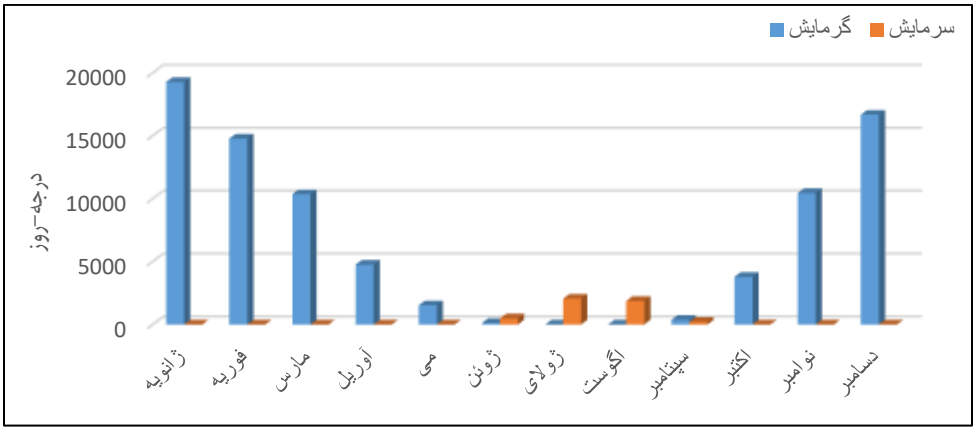
یافته های تحقیق

بررسی روند تغییرات میانگین دمای ماهانه و سالانه شهر خوی با استفاده از آماره من کندال برای دوره‌ی آماری ۳۰ ساله (۲۰۱۸-۱۹۸۸) مورد بررسی قرار گرفت که نتایج به صورت جدول ارائه گردید. همانگونه که از جدول(۱) مشخص است میانگین دمای ماهانه شهر خوی در ماههای فوریه، مارس، ژوئن، جولای، آگوست،دارای روند معنادار افزایشی و ماههای ژانویه، آوریل، می، اکتبر، نوامبر، دسامبر بدون روند افزایش معنادار هستند. همچنین میانگین دمای سالانه دارای روند افزایش معنادار است. بررسی نتایج بر روی داده‌های ماهانه نیاز سرمایشی و گرمایشی در شکل ۱ نشان می‌دهد که بیشترین نیاز سرمایشی برای ماه جولای و کمترین برای ماه سپتامبر است. در مورد نیاز گرمایشی بیشترین مقدار برای ماه ژانویه و کمترین مقدار برای ماه ژوئن، ژولای، آگوست و سپتامبر برآورد شده است.

جدول(۱): مقادیر آماری مان-کندال و سن استیمیتور برای میانگین دمای ماهانه و سالانه شهر خوی

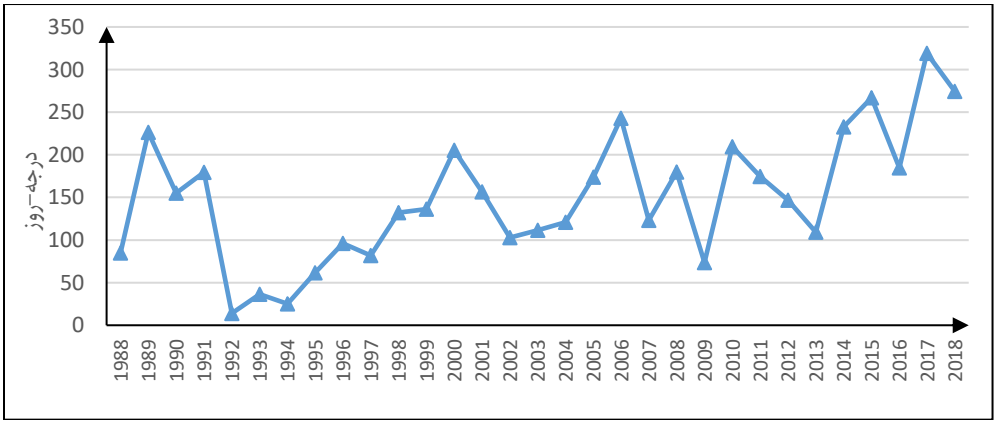
ماهها	میانگین	مان-کندال (z)	نوع روند	سن استیمیتور (Q_{med})
ژانویه	-۲/۰۶	۰/۷۳	بدون روند افزایش معنادار	۰/۰۵۰
فوریه	۱/۱۳	*۲/۳۱	روند افزایش معنادار	۰/۱۳۸
مارس	۷/۲۴	*۲/۲۱	روند افزایش معنادار	۰/۱۰۰
آوریل	۱۳/۰۶	۰/۱۵	بدون روند افزایش معنادار	۰/۰۱۱
می	۱۷/۳۹	۱/۲۶	بدون روند افزایش معنادار	۰/۰۳۳
ژوئن	۲۲/۳۷	**۲/۷۰	روند افزایش معنادار	۰/۰۸۸
جولای	۲۵/۷۵	**۲/۶۵	روند افزایش معنادار	۰/۰۸۳
آگوست	۲۵/۵۴	**۲/۵۹	روند افزایش معنادار	۰/۰۸۱
سپتامبر	۲۰/۸۴	*۲/۵۵	روند افزایش معنادار	۰/۰۶۷
اکتبر	۱۴/۲۳	۰/۴۶	بدون روند افزایش معنادار	۰/۰۱۱
نوامبر	۶/۷۶	۰/۷۳	بدون روند افزایش معنادار	۰/۰۲۵

۰/۰۰۰	بدون روند افزایش معنادار	۰/۰۷	۰/۶۳	دسامبر
۰/۰۳۷	روند افزایش معنادار	۲/۱۴*	۱۲/۷۴	سالانه
**معنی داری در سطح ۰/۰۱		*معنی داری در سطح ۰/۰۵		

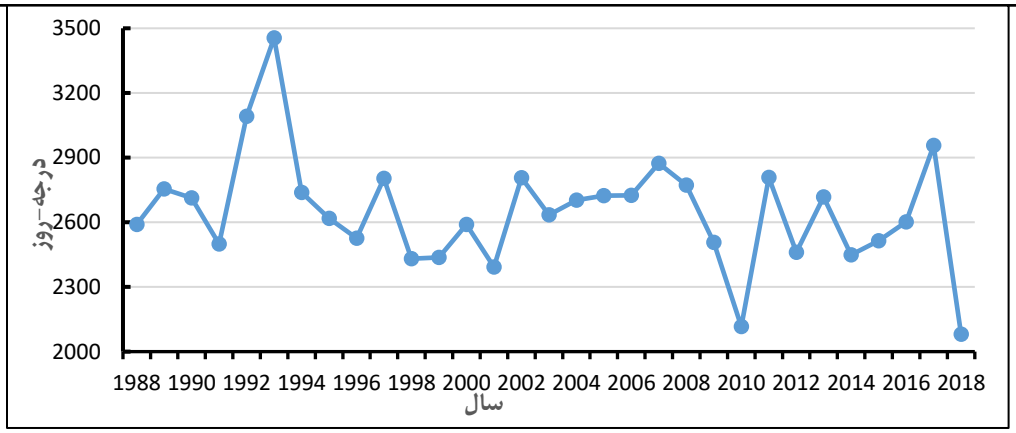


شکل(۱): میانگین ماهانه نیاز سرمایشی و گرمایشی شهر خوی

بررسی نتایج برای نیاز سرمایشی و گرمایشی با سالهای مختلف آماری ۳۰ ساله (۱۹۸۸-۲۰۱۸)، برای شهر خوی در شکل ۲و۳ نشان داده شده است. بر این اساس سالهای ۱۹۹۲و۱۹۹۴کمترین مقدار و سال ۲۰۱۸ بیشترین مقدار را برای نیاز سرمایشی نشان می‌دهد. در حالی که در مورد نیاز گرمایشی سال ۲۰۱۰ کمترین مقدار و سال ۱۹۹۳ بیشترین مقدار را نشان می‌دهد.



شکل(۲): نیاز سرمایشی سالانه شهر خوی با دوره‌ی آماری(۱۹۸۸-۲۰۱۸)



شکل(۳): نیاز گرمایشی سالانه شهر خوی با دوره‌ی آماری(۱۹۸۸-۲۰۱۸)

روند تغییر در نیازهای سرمایشی و گرمایشی ماهانه برای شهر خوی با استفاده از آماره من کندال نشان داد که نیاز سرمایشی در ماههای ژوئن، جولای، آگوست در سطح معنی داری (P-value=0.01-0.05) دارای روند افزایشی است و در ماه آگوست دارای روند افزایش غیرمعنادار و بقیه ماهها بدون روند افزایش یا کاهش هستند. همچنین نیاز گرمایشی در ماههای فوریه ومارس در سطح معنادار (P-value=0.05) دارای روند کاهشی، و ماههای جولای ، آگوست بدون روند افزایش یا کاهش معنادار و بقیه ماهها بدون روند کاهشی معنادار هستند. در ادامه روند تغییر سالانه نیاز سرمایشی و گرمایشی برای شهر خوی بررسی گردید که نتایج نشان می‌دهد که نیاز سرمایشی سالانه در سطح معنادار(P-value=0.01) دارای روند افزایشی و نیاز گرمایشی سالانه دارای روند کاهشی غیرمعنادار است.

جدول(۲): مقادیر آماری من کندال و سن استیمیتور برای نیازسرمایشی و گرمایشی شهر خوی (معنی داری در سطح۰/۰۱ و *معنی داری در سطح۰/۰۵ را نمایش می دهند)**

ماهها	درجه - روز گرمایشی				درجه – روز سرمایشی		
آماره‌ها	میانگین	مان-کندال (z)	سن استیمیتور (Qmed)	میانگین	مان-کندال (z)	سن استیمیتور (Q_{med})
ژانویه	۶۲۱/۶۷	-۰/۷۸	-۱/۶۴۲	۰	-	-
فوریه	۴۷۶/۶۲	*-۲/۳۵	-۳/۸۳۷	۰	-	-
مارس	۳۳۳/۸۸	*-۲/۲۱	-۳/۰۵۰	۰	-	-
آوریل	۱۵۳/۲۳	-۰/۰۳	-۰/۱۸۳	۰	-	-
می	۴۹/۳	-۱/۸۴	-۰/۷۵۶	۰	-	-
ژوئن	۳/۷۸	-۱/۵۷	-۰/۰۴۶	۱۵/۷۲	*۲/۶۹	۰/۵۷۴
جولای	-	-	-	۶۶/۴۲	*۲/۶۵	۲/۰۳۳
آگوست	-	-	-	۶۰/۴۸	**۳/۰۹	۲/۲۸۸
سپتامبر	۱۲/۰۶	-۰/۹۴	-۰/۱۲۹	۶/۸۶	۱/۸۶	۰/۱۲۹

اکتبر	۱۲/۰۶	-۰/۴۴	-۰/۲۸۶	۰	-	-
نوامبر	۱۲۱/۹۹	-۰/۸۲	-۰/۸۶۱	۰	-	-
دسامبر	۳۳۷/۲۶	-۰/۰۳	-۰/۰۷۸	۰	-	-
سالانه	۲۲۰/۶۸	-۰/۸۵	-۵/۱۰۷	۱۲/۴۸	**۳/۴۰	۵/۶۵۹

نتیجه گیری

یکی از موضوعات مورد توجه در زیست اقلیم برآورد و محاسبه مقادیر میانگین درجه-روز های نیاز به گرمایش و سرمایش است. عاملی که از آن به عنوان یکی از مهمترین اطلاعات پایه اصلی در برآورد مقدار مصرف انرژی مورد نیاز جهت گرم کردن ساختمان در فصل سرد یا سرد کردن آن در فصل گرم سال نام برد، اطلاعاتی که بهره گیری از آنها نتایج ثمربخشی را در برنامه ریزی و تصمیم گیری در بخش مصرف انرژی به دنبال دارد و مطمئناً در بازه های زمانی آینده تحت تاثیر شرایط تغییر اقلیم تفاوتهای فاحشی را تجربه خواهد نمود. در این تحقیق به منظور بررسی نیازهای سرمایشی و گرمایشی شهر خوی تحت تغییرات تغییرات میانگین دما بررسی گردید. با توجه به مقوله تغییر اقلیم نتایجی که از روابط مربوطه برای نیاز گرمایشی و نیاز سرمایشی به دست آمد حاکی از آن است که نیازهای سرمایشی افزایش و نیاز های گرمایشی کاهش پیدا کرده است. همچنین روند تغییرات ماهانه نیاز سرمایشی و گرمایشی طی دوره‌ی آماری ۳۰ ساله (۱۹۸۸-۲۰۱۸) برای شهر خوی بررسی گردید که نتایج نشان می‌دهد نیاز سرمایشی در ماههای ژوئن، جولای، آگوست در سطح معنی داری (p-value=0.01-0.05) دارای روند افزایشی ، ماه آگوست بدون روند افزایش معنادار و بقیه ماهها بدون روند افزایش یا کاهش هستند. همچنین نیاز گرمایشی در ماههای فوریه ومارس در سطح معنادار (p-value=0.05) دارای روند کاهشی، و ماههای جولای ، آگوست بدون روند افزایش یا کاهش معنادار و بقیه ماهها بدون روند کاهشی معنادار هستند. و در ادامه روند تغییرات سالانه نیاز سرمایشی و گرمایشی بررسی شد. بر این اساس نیاز سرمایش سالانه در سطح معنادار(p-value=0.01) دارای روند افزایشی و نیاز گرمایشی سالانه بدون روند کاهشی معنادار بوده است.

منابع

- انتظاری، علیرضا؛ احمدی، حمزه؛ کرمی، مختار؛ طالب، احمدی(۱۳۹۶). تحلیلی بر شرایط زیست اقلیمی و درجه-روزهای نیاز گرمایشی و سرمایشی شهر اسلام‌آباد غرب، جغرافیا و برنامه ریزی، شماره ۵۹، ۲۱-۱.
- حلیمی، منصور؛ تخت اردشیر، اشرف؛ بختی رستمی،شاه(۱۳۹۳). ارزیابی و دقت سنجی روش های درون یابی مکانی در برآورد نیاز های گرمایشی و سرمایشی ایران، پژوهش های اقلیم شناسی، شماره ۱۳ و۱۴، ۶۵-۵۵.
- خلیلی، علی(۱۳۷۸). تحلیل سه بعدی درجه روزهای گرمایش و سرمایش در ایران، تحقیقات جغرافیایی، شماره ۵۵ و ۵۴، ۱۸-۷.
- رمضانی گورابی، بهمن؛ کاظم‌نژاد، زهرا(۱۳۹۳). واکاوی اقلیم‌بندی مجموع میانگین نیاز گرمایش و سرمایش در قلمرو گیلان با تاکید بر مصرف گاز طبیعی خانوار، چشم‌انداز جغرافیایی، شماره ۲۵، ۱۶-۱.

- مسعودیان، سید ابوالفضل؛ ابراهیمی، رضا؛ یاراحمدی، الهام(۱۳۹۳). واکاوی مکانی-زمانی میزان روند ماهانه درجه روز گرمایش در قلمرو ایران زمین، جغرافیا و توسعه ناحیه ای، شماره ۲۳، ۱۵-۱.

Bonsal, B. R. Zhang, X. Vincent, l. A and hogg, W. D. (2001), Characteristics of Daily and Extreme Temperatures over Canada. American Meteorological Society. 1959-1976.

-Christenson, M., Manz, A. H. ,Gyalistras, D. ,(2006), Climate Warming Impact Degree-days and Building Energy Demand in Switzerland, Energy Conversion and Management , 47:671-686.

- Fealy, R., 2002, The Spatial Variation in Degree Days Derived from Locational Attributes for the 1961-1990 Period, International Journal of Climatology, Vol. 21, PP. 1-17.

- Jiang, F., Li, X., Wei, B., Ruji Hu, R. and Li, ZH., (2010), Observed Trends of Heating and Cooling Degree-days in Xinjiang Province, China, Theoretical and Applied Climatology, Vol. 97, PP. 349-360.

-Kadioglu, M. , Z. Sen , L. Gultekin. , (1999),Spatial Heating Monthly Degree-Days Features and Climatologic Patterns in Turkey, Theoretical and Applied Climatology,64:263-269.

- Li. Chean, Fang .XiuQi, LI. Shuai,(2007): Impacts of climate warming on heating energy consumption and southern boundaries of severe cold and cold regions in China, Springer: 2854-2858.

-Mourshed, M. , (2012), Relationship between annual mean temperature and degree-days , Energy and buildings , 54: 418-425.

-Sequera, P. , Rhone , O. , González, J. E. , Ghebreegziabher, A. T., Bornstein , R. , Lebassi , B., (2011), Impacts of climate changes in the Northern Pacific Coast on related regional scale energy demands. 5th International Conference on Energy Sustainability American Society of Mechanical Engineers, 249-257.

Trend Analysis of Heating and Cooling Degree-Days under Changing Climate in Khoy City

Atefeh Hoseini Sadr[1*], Gholam Hasan Mohammadi[2]

Department of Geography, Payame Noor University (PNU), PO BOX 19395-3697 Tehran, I. R. of Iran.
2- Ph.D. in Climatology, Iranian Meteorological Organization (IRIMO), East Azerbaijan Province Central
Bureau of Meteorology, Tabriz, Iran (Gh-Mohammadi@irimo.ir)

* Corresponding author: **Sadr88@pnu.ac.ir**

ABSTRACT

Today, climate change has affected many aspects of human life. So that studying the various impacts of climate change is more important than identifying the extent of climate change. The main objective of this study is to investigate changes in the cooling and heating needs in Khoy city under changing climate. For this purpose, meteorological data of minimum and maximum daily temperatures over a 30-year period were obtained from the Meteorological Organization. After ensuring the quality of the data, the daily cooling and heating degree-days for Khoy station were estimated using the relevant relationships. Then, the Mann-Kendall nonparametric approach and the Sen's Estimator slope method were used to examine the trend and

rate of change in cooling and heating degree-days. Results showed that highest cooling demand was in July, and the lowest in September. The highest heating demand was estimated for January. The lowest (highest) cooling (heating) degree-days were recorded in 1992 and 1994 (2018). The final results indicate an increasing trend in the cooling degree-days during the warm months, and conversely, the heating degree-days has a decreasing trend at the cold months.

Keywords: Heating and Cooling Degree-Days, Climate Change, Trend Analysis, Mann-Kendall, Kho

تحلیل دینامیکی توفان برف با استفاده از تاوایی پتانسیلی هوای مرطوب

فاطمه قرایلو[۱]، علیرضا محب‌الحجه[۲]، مریم قرایلو [۳] و محمد میرزائی [۳]

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد هواشناسی، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران
۲- استاد، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران
۳- دانشیار، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران
آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول (fgharaylou@ut.ac.ir)

چکیده

در این پژوهش، تحلیل دینامیکی یک توفان برف شدید با استفاده از شکل جدیدی از تاوایی پتانسیلی مبتنی بر دمای پتانسیلی آنتروپی مرطوب (θ_s)، که بر اساس فرمول‌بندی مارکوئت (۲۰۱۴) تعریف شده است، انجام می‌شود. θ_s گسترش صورت مرسوم دمای پتانسیلی است که برای مخلوطی از هوای خشک، بخار آب و فازهای مختلف آب معتبر می‌باشد. هدف از به‌کارگیری این شکل جدید از تاوایی پتانسیلی، ارتقای تحلیل دینامیکی و بهبود پیش‌بینی رویدادهای شدید جوّی است. در این راستا، توفان برف شدید تهران در هفتم و هشتم بهمن ۱۳۹۶ (۲۷ و ۲۸ ژانویه ۲۰۱۸) با مدل WRF و داده‌های ERA5با تفکیک افقی ۰/۲۵ درجه به‌عنوان شرایط مرزی و اولیه در دو حوزه تودرتو (۹ و ۳ کیلومتر) شبیه‌سازی شد. از طرحواره خردفیزیک موریسون برای پارامترسازی دقیق‌تر فرایندهای ابر استفاده شد. برای تحلیل ترمودینامیکی، تاوایی‌های پتانسیلی متناظر با دماهای پتانسیلی مرطوب (θ_s)، دمای پتانسیلی هم‌ارز (θ_e)، دمای پتانسیلی هم‌ارز اشباع (θ_{es}) و دمای پتانسیلی آب مایع (θ_l) بررسی شدند. در روز ۲۷ ژانویه، مقادیر منفی تاوایی پتانسیلی در لایه‌های زیرین نشان‌دهندهٔ امکان رخداد همرفت محلی و مقادیر مثبت در لایه‌های فوقانی بیانگر پایداری هستند. همچنین، تاوایی پتانسیلی هم‌ارز اشباع (SEPV) و تاوایی پتانسیلی هم‌ارز اشباع آب‌ایستایی (SHEPV) در لایه‌های زیرین مقادیر منفی شدیدی داشتند که بیانگر ناپایداری شرطی متقارن و احتمال وقوع همرفت مورب است. این ناپایداری در شکل‌گیری نوارهای بارشی میان‌مقیاس نقش دارد. همچنین، صورت جدید تاوایی پتانسیلی تصویری دقیق‌تر از ناپایداری‌های مرطوب در مناطق جبهه‌ای ارائه داد. در روز ۲۸ ژانویه، کاهش شدت و پراکندگی مقادیر منفی تاوایی‌ها نشانه‌ای از کاهش فعالیت‌های ناپایدار و ورود سامانه به مرحله پایانی بود.

کلیدواژه: توفان برف، تاوایی پتانسیلی آنتروپی مرطوب، WRF، موریسون، ERA5

مقدمه

تاوایی پتانسیلی (Potential vorticity; PV) کمیتی است که از نظر ریاضی به‌صورت ضرب داخلی بردار تاوایی مطلق و گرادیان دمای پتانسیلی تعریف می‌شود (Ertel, 1942). این کمیّت با دنبال کردن بسته‌ای از هوا در اثر فرایندهای بادررو و اصطکاک می‌تواند تغییر کند (Hoskins et al., 1985). یکی از نقاط عطف پیشینهٔ معرفی PV، مفهوم تاوایی پتانسیلی هم‌آنتروپی (Isentropic potential vorticity; IPV) بود. فرایند ترسیم PV هوای زبرین روی سطوح هم‌آنتروپی در ابتدا در تحقیقات Reed (1955) و Sanders and Reed (1953) ارائه شد. نقشه‌های IPV اوّلین بار توسط Obukhov (1964) و Danielsen (1967, 1968) برای سطوح هم‌آنتروپی ۳۰۰، ۳۰۵ و ۳۱۰ کلوین با رایانه ترسیم شدند. فواید و کاربردهای دیدگاه IPV را Hoskins et al. (1985) مورد بحث قراردادند. آنها نشان دادند که این مفهوم در اصل بر وارون‌پذیری میدان PV استوار است. Hoskins et al. (1985) پیشنهاد کردند که PV نه تنها میدان دینامیکی دیگری که بیانگر یک حرکت متوازن است را فراهم می‌کند، بلکه به‌سادگی همانند ردیاب شیمیایی پایستار در غیاب گرمای بادررو و نیروی اصطکاک در نظر گرفته شده است (Mofor and Lu, 2009). در نتیجه، سه خاصّیت مهم PV را می‌توان به این صورت در نظر گرفت: اصل وارون‌پذیری، اصل ناتراوایی و اصل پایستاری.

پیشرفت زیادی در درک و کاربرد PV از زمان گسترش آن با مقاله معروف Hoskins et al. (1985) برای جوّ کاملاً خشک حاصل شده است. به‌ویژه بخش اعظم این پیشرفت‌ها در دهه‌های گذشته معطوف به ارائهٔ PV در یک جوّ مرطوب بوده است (Mofor and Lu, 2009). در سال‌های بعد، PV به‌طور فزاینده‌ای در فرایابی میدان‌های جوّی به منظور درک حرکت‌های جوّی همدیدی و بزرگ‌مقیاس، نتایج شبیه‌سازی‌های عددی جوّ و گردش‌های اقیانوسی بزرگ‌مقیاس استفاده شد. با این حال، وقتی گرمای نهان در یک جوّ مرطوب در نظر گرفته می‌شود PV پایسته نیست. Bennetts and Hoskins (1979) ابتدا PV را با استفاده از دمای پتانسیلی هم‌ارز، θ_e، به‌جای θ به تاوایی پتانسیلی مرطوب (Moist potential vorticity; MPV) تعمیم دادند. Schubert et al. (2001) ثابت کردند که حذف جمله سیم‌لوله‌ای در معادله MPV منجر به پایستاری MPV در فرایندهای بی‌دررو مرطوب و بدون اصطکاک می‌شود. مفهوم MPV به‌صورت گسترده در مطالعات ناپایداری متقارن شرطی (Emanuel, 1983, 1988؛ Bennetts and Sharp (1982)؛ Shutts, 1990) و در تولید MPV در چرخندهای برون‌حاره‌ای (Cao and Cho, 1995) استفاده شده است.

مارکوئت (۲۰۱۴) صورت جدیدی از تاوایی پتانسیلی را با استفاده از دمای پتانسیلی آنتروپی مرطوب، θ_s (s برای آنتروپی مرطوب) به‌دست آورد. θ_s بر اساس آنتروپی ویژه برای مخلوطی از هوای خشک، بخار آب و آب چگالیده تعریف می‌شود و

ویژگی پایستاری آن حتی با تغییر ترکیب هوا حفظ می‌شود. براساس مطالعات تجربی، آنتروپی مرطوب در لایه مرزی سیاره‌ای تقریباً به‌طور کامل آمیخته می‌شود، به‌طوری که مقدار آن در این ناحیه مشابه با مقادیر مشاهده شده در هوای صاف و در مناطق ابری، به‌ویژه در بام ناحیه آمیختگی است (Marquet, 2011). ساختار PV مرطوب در وردسپهر زیرین مرتبط با مناطق جبهه‌ای است که دارای ناپایداری همرفت مورب می‌باشد. بنابر گفته Marquet (2014) استفاده از تاوایی پتانسیلی مرطوب در مطالعهٔ سامانه‌های جوّی مرطوب مزیت دارد. دلیل آن را مارکوئت کوچک‌تر بودن مقادیر منفی تاوایی پتانسیلی مرطوب از مقادیر منفی تاوایی پتانسیلی هم‌ارز و درنتیجه محدودتر بودن مناطق ناپایداری همرفتی در بررسی با داده‌های واقعی است. بررسی این مزیت احتمالی و جزئیات اختلاف صورت‌های مختلف تاوایی پتانسیلی در سامانه‌های قوی همراه با بارش سنگین موضوعی است که نیاز به پژوهش بیشتر دارد.

در سال‌های اخیر، همراه با گرم شدن زمین، فراوانی رویدادهای هواشناسی فرین مانند برف و باران شدید در ایران بیشتر شده که تلفات جانی و خسارت‌های مالی گسترده و به تبع آن مشکلات قابل توجه اقتصادی و اجتماعی به دنبال داشته است (زرین و داداشی رودباری، ۱۴۰۰). اگرچه پیش‌بینی دقیق این رویدادها برای بخش‌های مختلف مانند کشاورزی، منابع آب و جامعه اهمّیّت قابل توجهی دارد، ولی در عمل بسیار دشوار است. با توجه به آثار گوناگون رخداد چنین بارش‌ها، به‌ویژه در مناطق شهری بزرگ، مطالعه و تحلیل دقیق این رخدادها از جنبه‌های مختلف و از دیدگاه دینامیکی بسیار ضروری است. بدیهی است که این‌گونه تحلیل‌ها می‌تواند کمک بسزایی در پیش‌بینی دقیق‌تر این نوع از پدیده‌های فرین مانند توفان برف همراه داشته باشد.

هدف اصلی این تحقیق، کاربست تاوایی پتانسیلی و دمای پتانسیلی براساس فرمول‌بندی مارکوئت (۲۰۱۴) در تحلیل دینامیکی نمونه‌ای از پدیده‌های فرین مانند توفان برف می‌باشد. به این منظور برای تحلیل دینامیکی یک توفان برف از داده‌های بازتحلیل و مدل تحقیق و پیش‌بینی عددی وضع هوا (Weather Research and Forecasting model; WRF) استفاده می‌شود. همین‌طور صورت‌های مختلف تاوایی پتانسیلی محاسبه و برای تحلیل دینامیکی یک توفان برف انتخابی استفاده می‌شوند.

۲. داده‌ها و روش‌کار

۲. ۱ مورد مطالعاتی

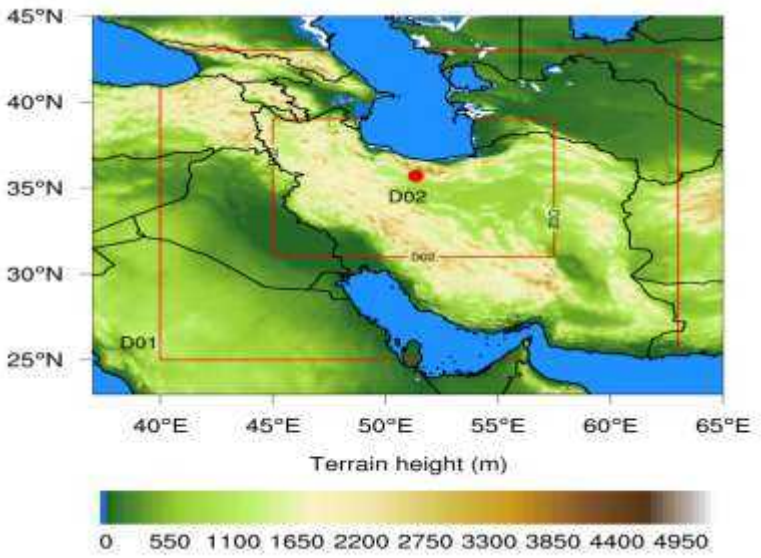
در تاریخ ۲۸ ژانویه ۲۰۱۸ برابر با هشتم بهمن ماه سال ۱۳۹۶ شمسی، یک توفان برف شدید در شهر تهران رخ داد. این رویداد موجب بروز ناپایداری‌های جوّی و کاهش دید افقی شد و با نفوذ سامانه‌های کم‌فشار و هوای سرد قطبی همراه بود (گزارش‌های سازمان هواشناسی کشور، ۱۳۹۶). این بارش سنگین برف که از شامگاه ۷ بهمن ماه تا بامداد ۹ بهمن ماه ادامه داشت، نه‌تنها بر حمل‌ونقل جاده‌ای اثرگذار بود بلکه منجر به تعطیلی مدارس، توقف فعّالیّت‌های اقتصادی و افزایش حوادث جوّی در سطح منطقه گردید. بر اساس گزارش‌های سازمان هواشناسی کشور، میزان برف در برخی مناطق تهران به بیش از ۱۵ سانتی‌متر رسید که همراه با وزش بادهای تند بود. این رویداد به‌عنوان یکی از نمونه‌های بارز ناپایداری‌های شدید زمستانی در منطقه تهران، بستری مناسب برای بررسی ساختار دینامیکی و ترمودینامیکی جوّ فراهم می‌آورد. در ادامه، با بهره‌گیری از مقادیر مختلف تاوایی‌های پتانسیلی به تحلیل دقیق این توفان پرداخته می‌شود. هدف از این بررسی، شناخت بهتر فرایندهای مؤثر در شکل‌گیری و تداوم این سامانه و همچنین مقایسه رفتار جوّ در سطوح مختلف قائم با استفاده از شاخص‌های دینامیکی و ترمودینامیکی است. این تحلیل می‌تواند به درک عمیق‌تری از نقش تاوایی‌های پتانسیلی در شناسایی ناپایداری‌ها و ارزیابی شدت سامانه‌های کمک کند.

۲. ۲ داده‌ها

در این مطالعه از دو مجموعه داده استفاده شده است. مجموعه اول، نسخهٔ پنجم داده‌های بازتحلیل جوّی ECMWF (ERA5) با تفکیک افقی ۰/۲۵ درجه در هر دو راستای مداری و نصف‌النهاری و فواصل زمانی ۶ ساعته که از آن به‌عنوان شرایط اولیه و مرزی برای شبیه‌سازیِ توفان برف انتخابی با مدل WRF استفاده شده است. مجموعه دوم شامل داده‌های ایستگاه‌های همدیدی امام‌خمینی و مهرآباد هستند که برای ارزیابی نتایج شبیه‌سازی به‌کار گرفته می‌شوند.

۲. ۳ پیکربندی اجرای مدل

در این مطالعه از نسخهٔ ۴.۳.۲ مدل WRF برای شبیه‌سازی عددی مورد مطالعاتی رخداد توفان برف تهران استفاده شده است. شبیه‌سازی‌ها در دو حوزه به‌ترتیب از بیرون به داخل با تفکیک افقی ۹ و ۳ کیلومتر (شکل ۱) و برای دو دوره ۳۰ ساعته طی روزهای ۲۷ و ۲۸ ژانویه ۲۰۱۸ انجام شد.



شکل ۱- موقعیّت حوزه‌های تودرتوی استفاده شده در مدل برای انجام شبیه‌سازی‌ها شامل حوزه اول با تفکیک افقی ۹ کیلومتر (D01) و حوزه دوم با تفکیک افقی ۳ کیلومتر (D02). ارتفاع کوهساری بر حسب متر با سایه‌روشن رنگی و موقعیّت فرودگاه مهرآباد با دایره قرمزرنگ مشخص شده است.

در این پژوهش، در اجرای مدل از طرحوارهٔ Morisson برای پارامترسازی خردفیزیک، طرحوارهٔ Dudhia (Dudhia, 1989) برای پارامترسازی تابش طول موج کوتاه، طرحوارهٔ RRTM (Mlawer et al., 1997) برای پارامترسازی تابش طول موج بلند، طرحوارهٔ پخش گرمایی (Dudhia, 1996) برای پارامترسازی فرایندهای سطح زمین، طرحوارهٔ YSU برای پارامترسازی فرایندهای لایه مرزی (Hong et al., 2006) و طرحوارهٔ کین-فریچ (Kain, 2002) برای پارامترسازی همرفت کومه‌ای استفاده شده است. لازم به ذکر است که به‌غیر از طرحواره خُردفیزیک، انتخاب طرحواره‌ها برای اجرای مدل بر اساس مطالعات پیشین بوده است (قریب و همکاران، ۲۰۲۴). علت استفاده از طرحوارهٔ Morisson به‌جای WSM3 برای پارامترسازی خُردفیزیک این است که در شبیه‌سازی بارش زمستانی، این طرحواره با بهره‌گیری از رویکرد دومؤلفه‌ای برای تقریباً تمامی هواآب‌ها (به‌جز آب ابر در نسخه معمول)، امکان پیش‌بینی هم‌زمان نسبت آمیختگی و غلظت عددی را فراهم می‌سازد که امکان افزایش دقّت مدل‌سازی فرایندهای خُردفیزیک و محاسبه کامل θ_s را فراهم می‌کند. در این پژوهش، به‌منظور تحلیل نتایج خروجی مدل، ۶ ساعت اول به عنوان زمان تنظیم (spin-up)، مورد استفاده قرار نگرفته است. برای درستی‌سنجی بارشِ شبیه‌سازی‌شده، بارش ۶ ساعته برحسب میلی‌متر حاصل از حوزهٔ دوم شبیه‌سازی مدل WRF با

داده‌های مشاهداتی بارش تجمعی ۶ ساعتهٔ ایستگاه‌های همدیدی فرودگاه‌های مهرآباد و امام خمینی در طول فعّالیّت توفان برف مقایسه می‌شود. این داده‌ها در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- بارش ۶ ساعته تجمعی مشاهداتی و مدل WRF برای ایستگاه‌های مهرآباد و امام خمینی در روزهای ۲۷ و ۲۸ ژانویه ۲۰۱۸.

نام ایستگاه	ارتفاع (متر)	زمان گزارش (UTC)	بارش مشاهداتی ۶ ساعته تجمعی (میلی‌متر)	بارش شبیه‌سازی‌شده ۶ ساعته تجمعی (میلی‌متر)
فرودگاه مهرآباد	۱۱۹۱	۰۶:۰۰ ۲۰۱۸/۱/۲۷	۰/۲	۰
		۱۲:۰۰ ۲۰۱۸/۱/۲۷	۵/۲	۲/۹
		۱۸:۰۰ ۲۰۱۸/۱/۲۷	۸/۲	۶/۸
		۰۰:۰۰ ۲۰۱۸/۱/۲۸	۱۷/۲	۸/۲
		۰۶:۰۰ ۲۰۱۸/۱/۲۸	۲۳/۲	۸/۴
فرودگاه امام خمینی	۹۹۰/۰۲	۰۶:۰۰ ۲۰۱۸/۱/۲۷	۰/۶	۰/۰۲
		۱۲:۰۰ ۲۰۱۸/۱/۲۷	۰/۸	۱/۵
		۱۸:۰۰ ۲۰۱۸/۱/۲۷	۸/۸	۷/۴
		۰۰:۰۰ ۲۰۱۸/۱/۲۸	۲۱/۸	۱۰/۲
		۰۶:۰۰ ۲۰۱۸/۱/۲۸	۴۳	۱۴/۶

۲. ۴ روش کار

برای بررسی و مقایسه‌ای جامع میان تاوایی‌های پتانسیلی و به منظور تحلیل دقیق ویژگی‌ها و تفاوت‌های هر یک از انواع تاوایی‌های پتانسیلی در شرایط مختلف ترمودینامیکی جوّ، تاوایی‌های پتانسیلی به صورت زیر بر اساس نوع دمای پتانسیلی مورد استفاده در محاسبهٔ آنها، معرفی کردیم:

PV: تاوایی پتانسیلی حاصل از دمای پتانسیلی خشک، θ

EPV: تاوایی پتانسیلی هم‌ارز حاصل از دمای پتانسیلی هم‌ارز، θ_e

SEPV: تاوایی پتانسیلی هم‌ارز اشباع حاصل از دمای پتانسیلی هم‌ارز اشباع، θ_{es}

HEPV: تاوایی پتانسیلی آب‌ایستایی حاصل از دمای پتانسیلی هم‌ارز، θ_e

SHEPV: تاوایی پتانسیلی آب‌ایستایی اشباع حاصل از دمای پتانسیلی هم‌ارز اشباع، θ_{es}

PVS: تاوایی پتانسیلی حاصل از دمای پتانسیلی مرطوب، θ_s

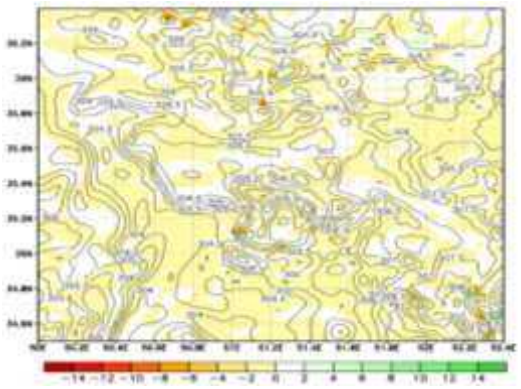
SPV: تاوایی پتانسیلی آنتروپی مرطوب حاصل از دمای پتانسیلی مرطوب، θ_s

۳. بحث و نتایج

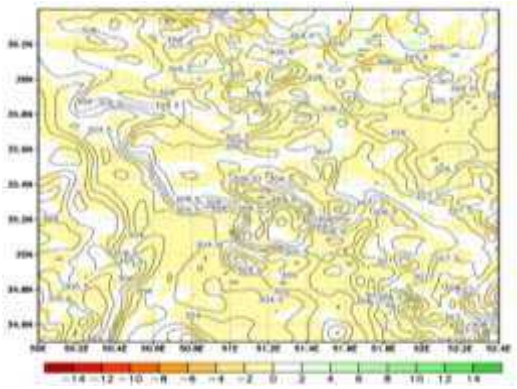
با توجه به تفاوت‌های بنیادی در تعریف و ساختار انواع تاوایی پتانسیلی، مقایسه‌ها به‌صورت دو به دو و بر اساس دمای پتانسیلی یکسان انجام می‌گیرد ((EPV و HEPV)، (SEPV و SHEPV) و (PVS و SPV)) تا امکان تحلیل دقیق‌تر فراهم شود. این رویکرد به ما اجازه می‌دهد تا تأثیر نوع دمای پتانسیلی بر رفتار و کاربرد هر تاوایی پتانسیلی را بررسی کنیم.

شکل ۲ مقایسه بین تاوایی‌های پتانسیلی مختلف در UTC ۱۸:۰۰ روز ۲۷ ژانویه در تراز ۶۰۰ هکتوپاسکال را نشان می‌دهد. تراز ۶۰۰ هکتوپاسکال که نمایانگر لایه میانی جوّ است، نقش مهمی در تشخیص ناپایداری‌ها دارد. شایان ذکر است که پربندهای دماییِ هر تاوایی پتانسیلی نیز در هر نمودار ترسیم شده است تا امکان بررسی هم‌زمان ساختار گرمایی و دینامیکی جوّ را فراهم کند. مقادیر منفی تاوایی پتانسیلی بیان‌گر ناپایداری و فعّالیّت سامانه در این مناطق می‌باشند (قریب و همکاران، ۲۰۲۴). EPV در شکل ۲-الف نشان داده شده است. تحلیل EPV در بررسی ناپایداری‌ها و آغازش پدیده‌های شدید جوّی مانند توفان‌های برف اهمّیّت ویژه‌ای دارد. همان‌طور که شکل ۲-الف نشان می‌دهد، مناطق با مقادیر منفی EPV متناظر با

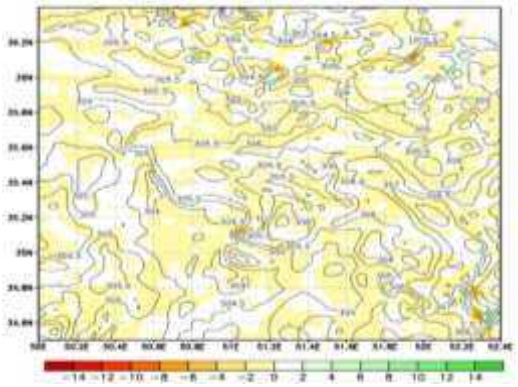
گرادیان‌های شدید دمایی است (پربندهای دمایی به‌هم فشرده‌تر هستند). همراهی رطوبت و کاهش دما در لایه‌های زیرین می‌تواند موجب همرفت عمیق و تشکیل ابرهای سرد شوند که زمینه‌ساز بارش برف است (Bellaire and Jamieson, 2013). از سوی دیگر، گرادیان‌های شدید EPV در این تراز، مطابق با نظریه تبدیل انرژی پتانسیل به انرژی جنبشی است که می‌تواند موجب تقویت چرخندزایی سطحی شوند (Hoskins et al., 1985). مناطقی با مقادیر منفیِ HEPV، SEPV و SHEPV در مکان‌های متناظر با مناطق دارای EPV منفی در شکل‌های ۲-ب، ۲-ج و ۲-د مشاهده می‌شود. اما شکل‌های ۲-ه و ۲-و که نمایانگر PVS و SPV هستند، کاملاً متفاوت بوده و مقادیر منفی و مثبت این تاوایی‌های پتانسیلی در نزدیک موقعیّت جغرافیایی محل رخداد توفان برف کاملاً مشهود است. با توجه به این که این شکل‌ها چند ساعت قبل از شروع رویداد توفان برف را نشان می‌دهند، مقادیر منفی و مهم این تاوایی‌های پتانسیلی (PVS و SPV) می‌توانند نشانه‌هایی از آغازش این پدیده شدید جوّی باشند.



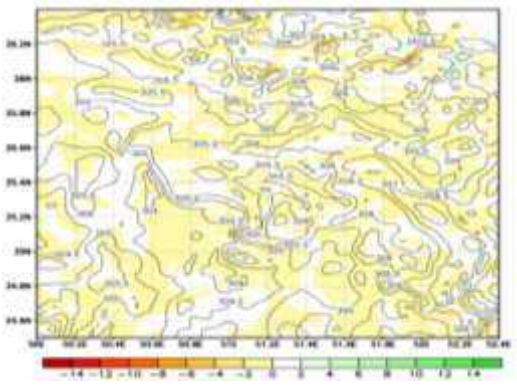
(الف)



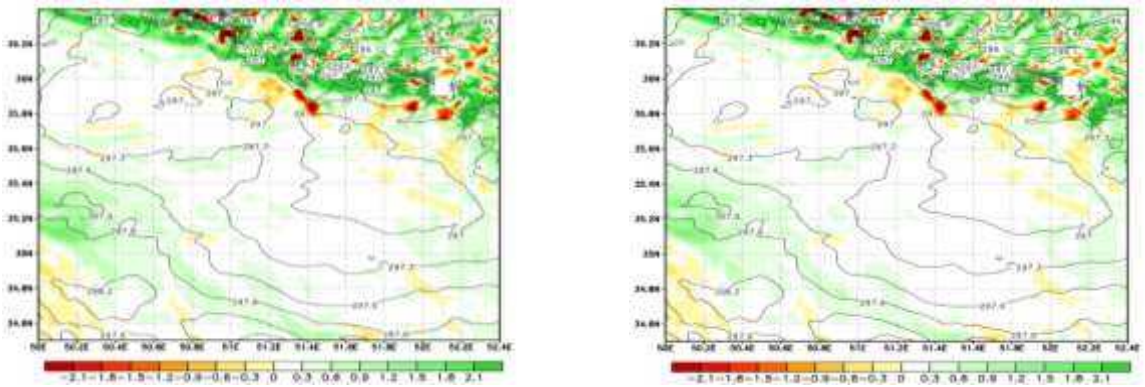
(ب)



(ج)



(د)

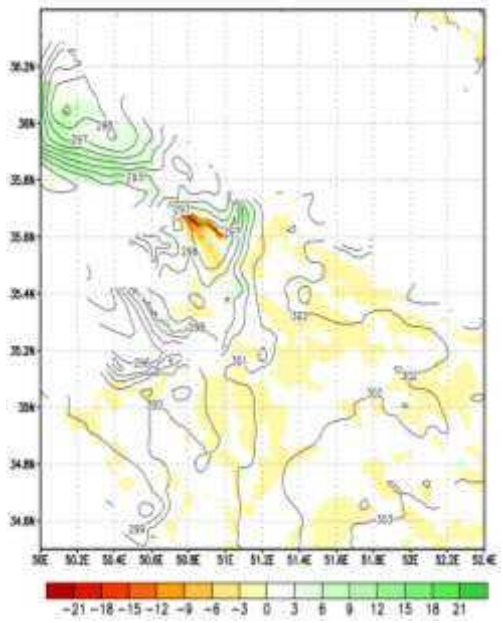


(ه) (و)

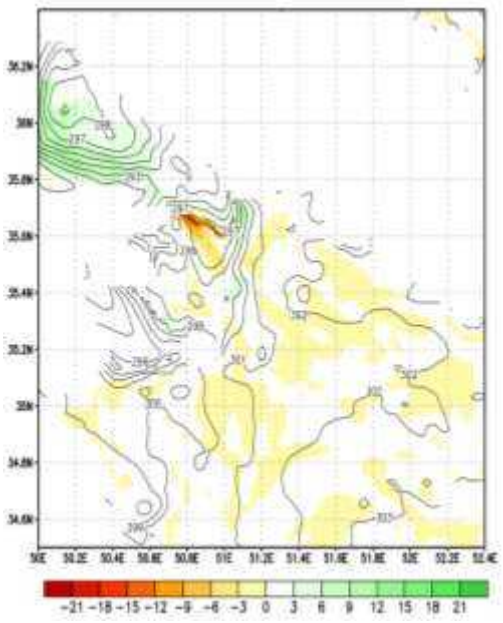
شکل ۲- مقایسه بین (الف و ب) EPV و HEPV، (ج و د) SEPV و SHEPV و (ه و و) PVS و SPV در ساعت ۱۸:۰۰ UTC روز ۲۷ ژانویه ۲۰۱۸ برای تراز ۶۰۰ هکتوپاسکال. در هر شکل پربندها نمایانگر دمای پتانسیلی مرتبط با تاوایی پتانسیلی مربوط به خود و سایه‌روشن رنگی نشان‌دهنده تاوایی پتانسیلی است.

مقایسه بین تاوایی‌های پتانسیلی مختلف در ۰۶:۰۰ UTC روز ۲۸ ژانویه در تراز ۶۰۰ هکتوپاسکال (شکل آورده نشده است) نشان می‌دهد که مقادیر منفیِ تاوایی پتانسیلی با مناطقی که پربندهای دمایی فشرده‌تر دارند، هم‌خوانی دارد. این موضوع در مورد SEPV و SHEPV بیشتر مشهود است. این امر نشان‌دهندهٔ حساسیت بالای این کمیّت‌ها به گرادیان‌های دمایی در شرایط اشباع و بیانگر آن است که تاوایی‌های پتانسیلی اشباع، مانند SEPV و SHEPV توانایی بیشتری در شناسایی نواحی ناپایدار و مستعد صعود در زمان رویداد توفان برف دارند. با این وجود، مقادیر منفی در PVS و SPV بیشتر از دیگر تاوایی‌های پتانسیلی در نزدیکی موقعیّت جغرافیایی شهر تهران (محل رخداد توفان برف) نمود دارد که نشان‌دهندهٔ شکل‌گیری نوار بارشی در این زمان در این منطقه می‌باشد.

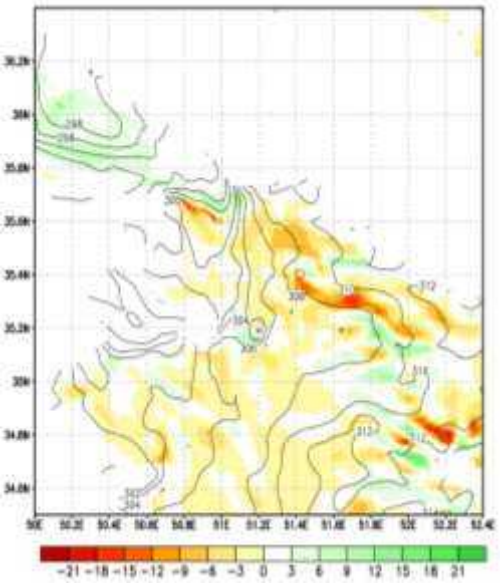
شکل ۳ مقایسه بین تاوایی‌های پتانسیلی مختلف در ۱۸:۰۰ UTC روز ۲۷ ژانویه در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال را نشان می‌دهد (لازم به ذکر است که ارتفاع منطقه تهران تقریباً با تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال برابر است). با توجه به این شکل، EPV و HEPV منفی با فشردگی پربندهای دمایی هم‌خوانی ندارند (شکل‌های ۳-الف و ۳-ب). مقادیر منفی مهمّ SEPV و SHEPV و گستردگی آنها در نزدیک منطقهٔ تهران به‌خوبی مشاهده می‌شود (شکل‌های ۳-ج و ۳-د). در مقابل، مقادیر منفیِ PVS و SPV منطبق با مناطق دارای فشردگی پربندهای دمایی است ولی مقادیر منفی این دو تاوایی پتانسیلی کوچک‌تر از دیگر تاوایی‌های پتانسیلی است (شکل‌های ۳-ه و ۳-و).



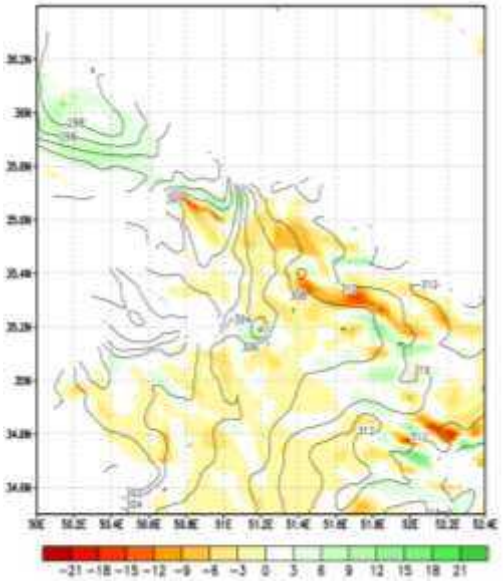
(الف)



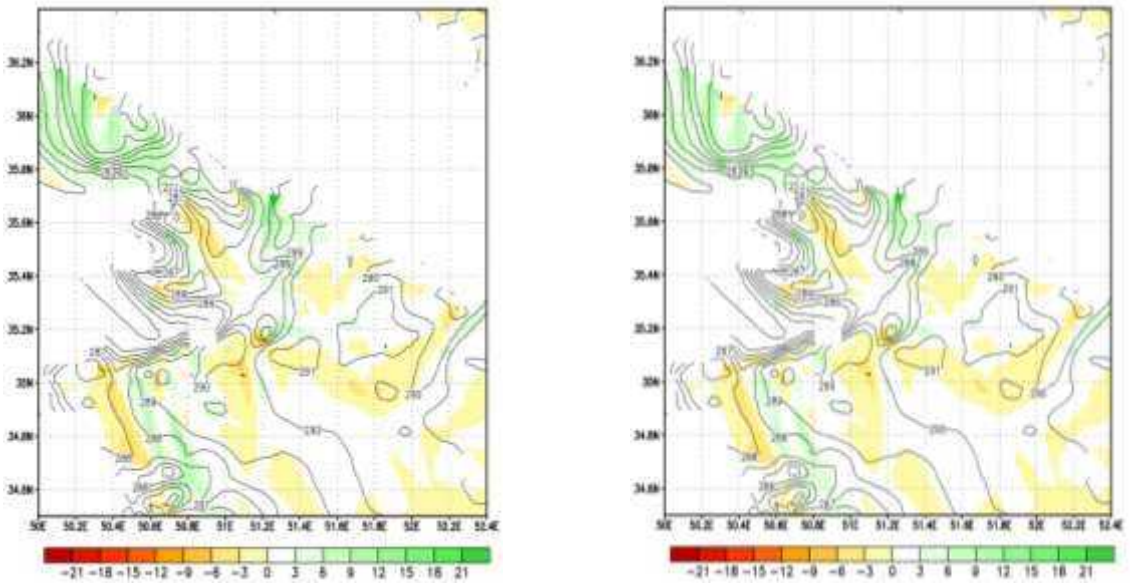
(ب)



(ج)



(د)



(و) (ه)

شکل ۳- مقایسه بین (الف و ب) EPV و HEPV، (ج و د) SEPV و SHEPV و (ه و و) PVS و SPV در ساعت ۱۸:۰۰ UTC روز ۲۷ ژانویه ۲۰۱۸ برای تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال. در هر شکل، پربندها نمایانگر دمای پتانسیلی مرتبط با تاوایی پتانسیلی مربوط به خود و سایه‌روشن رنگی نشان‌دهنده تاوایی پتانسیلی است.

مانند شکل ۳ این مقایسه در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال برای ۰۶:۰۰ UTC روز ۲۸ ژانویه انجام شد. در این تراز مقادیر منفی EPV و HEPV با فشردگی پربندها هم‌خوانی بهتری دارد (شکل آورده نشده است). همچنین مقادیر منفیِ SEPV و SHEPV کوچک‌تر از باقی تاوایی‌های پتانسیلی است و هیچ فشردگی دمایی در این تراز دیده نمی‌شود که می‌تواند به دلیل محاسبه این دو تاوایی پتانسیلی با دمای پتانسیلی هم‌ارز اشباع باشد که در این تراز اشباع رخ نداده است. PVS و SPV نیز نمایشی مانند تراز ۶۰۰ هکتوپاسکال دارند (شکل آورده نشده است).

۴. نتیجه‌گیری

بررسی جامع صورت‌های منتخب تاوایی پتانسیلی در ترازهای مختلف جوّ نشان داد که کمیّت‌هایِ EPV، HEPV، SEPV و SHEPV علی‌رغم کاربردهای نظری در تحلیل ناپایداری، در مطالعه موردی فعلی، در شناسایی مکانی ناپایداری‌ها چندان موفق نبودند. این کمیّت‌ها در بسیاری از موارد دارای ناهمخوانی‌هایی با ساختار گرمایی جوّ، فشردگی پربندهای دمای پتانسیلی و موقعیّت جغرافیایی رخداد توفان برف بودند. به‌علاوه، در برخی ترازها حتی مقادیر منفی تاوایی‌های پتانسیلی

پیش‌تر به‌کار برده شده فاقد ارتباط با پدیده بودند، به‌ویژه در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال، SEPV و SHEPV به‌دلیل وابستگی به شرایط اشباع، در مناطق زیراشباع، فاقد کارایی لازم هستند. در مقابل، کمیّت‌های PVS و SPV توانستند به‌نحو مؤثرتری نواحی ناپایدار، گرادیان‌های شدید دمایی و مناطق مستعد صعود را پیش از آغاز و در حین وقوع توفان برف شناسایی کنند. این کمیّت‌ها نه‌تنها با ساختار گرمایی جوّ هم‌خوانی بهتری داشتند، بلکه در نزدیکی موقعیّت جغرافیایی رخداد نیز مقادیر منفی قابل توجهی را نشان دادند که بیانگر آغازش شکل‌گیری نوار بارشی و فعّالیّت دینامیکی سامانه بود. در نیم‌رخ قائم نیز، PVS و SPV توانستند ساختار قائم ناپایداری را از لایه‌های زیرین تا لایه‌های میانی و بالایی به‌خوبی نمایش دهند، به‌طوری‌که مقادیر منفی در ترازهای پایین نشان‌دهنده ظرفیت برای رخداد همرفت و مقادیر مثبت در ترازهای بالا بیانگر پایداری و نفوذ احتمالی هوای پوشن‌سپهری بود. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که در تحلیل و پیش‌بینی پدیده‌های شدید جوّی مانند توفان برف، استفاده از SPV و PVS می‌تواند نسبت به سایر تاوایی‌های پتانسیلی برتری داشته باشد. این کمیّت‌ها با حساسیت بالا نسبت به گرادیان‌های دمایی، توانایی شناسایی نواحی ناپایدار و هم‌خوانی با ساختار دینامیکی جوّ، ابزارهای مؤثرتری برای مطالعات آینده در زمینه پیش‌بینی و پایش سامانه‌های جوّی شدید محسوب می‌شوند.

منابع

زرین، ا. و داداشی رودباری، ع. (۱۴۰۰). یادداشت تحلیلی: تأثیر تغییر اقلیم بر بارش‌های سنگین ایران با بکارگیری مدل همادی CMIP6، آب و توسعه پایدار، ۸ (۴)، ۱۱۹-۱۲۴.

Bellaire, S., & Jamieson, B. (2013). Forecasting the formation of critical snow layers using a coupled snow cover and weather model. *Cold Regions Science and Technology*, 94, 37-44.

Bennetts, D. A., & Hoskins, B. J. (1979). Conditional symmetric instability—a possible explanation for frontal rainbands. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 105(446), 945–962.

Bennetts, D. A., & Sharp, J. C. (1982). The relevance of conditional symmetric instability to the prediction of mesoscale frontal rainbands. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 108(457), 595-602.

Cao, Z., & Cho, H. R. (1995). Generation of moist potential vorticity in extratropical cyclones. *Journal of Atmospheric Sciences*, 52(18), 3263–3282.

Danielsen, E. F. (1967). Transport and diffusion of stratospheric radioactivity based on synoptic hemispheric analyses of potential vorticity. Pennsylvania State Uni.

Danielsen, E. F. (1968). Stratospheric–tropospheric exchange based on radioactivity, ozone and potential vorticity. *Journal of Atmospheric Sciences*, 25(3), 502–518.

Dudhia, J. (1989). Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 46(20), 3077-3107.

Dudhia, J. (1996, July). A multi-layer soil temperature model for MM5. In Preprints, The Sixth PSU/NCAR mesoscale model users' workshop (pp. 22-24). Colorado: Boulder.

Emanuel, K. A. (1983). The Lagrangian parcel dynamics of moist symmetric instability. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 40(10), 2368–2376.
Emanuel, K. A. (1988). Observational evidence of slantwise convective adjustment. *Monthly Weather Review*, 116(9), 1805–1816.
Ertel, H. (1942). Ein neuer hydrodynamischer Erhaltungssatz. Naturwissenschaften, 30(36), 543-544.
Gao, S., Ping, F., Li, X., & Tao, W. K. (2004). A convective vorticity vector associated with tropical convection: A two-dimensional cloud-resolving modeling study. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D14).
Gharib, A., Mirzaei, M., Ahmadi-Givi, F., & Mohebalhojeh, A. R. (2024). Analysis of the mesoscale structure of moist potential vorticity during an extreme event of snowstorm in Tehran. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 107, 101479.
Hong, S. Y., Noh, Y., & Dudhia, J. (2006). A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. Monthly weather review, 134(9), 2318-2341.
Hoskins, B. J., McIntyre, M. E., & Robertson, A. W. (1985). On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 111(470), 877–946.

Kain, J. S. (2004). The Kain–Fritsch convective parameterization: an update. Journal of applied meteorology, 43(1), 170-181.
Marquet, P. (2011). Definition of a moist entropy potential temperature: Application to FIRE-I data flights. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(656), 768-791.
Marquet, P. (2014). On the definition of a moist-air potential vorticity. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 140(680), 917-929.
Mlawer, E. J., Taubman, S. J., Brown, P. D., Iacono, M. J., & Clough, S. A. (1997). Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D14), 16663-16682.
Mofor, L. A., and Lu, C. (2009). Generalized moist potential vorticity and its application in the analysis of atmospheric flows. *Progress in Natural Science*, 19(3), 285–289.
Morrison, H. C. J. A., Curry, J. A., & Khvorostyanov, V. I. (2005). A new double-moment microphysics parameterization for application in cloud and climate models. Part I: Description. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 62(6), 1665-1677.
Reed, R. J., & Sanders, F. (1953). An investigation of the development of a mid-tropospheric frontal zone and its associated vorticity field. *Journal of Atmospheric Sciences*, 10(5), 338–349.
Reed, R. J. (1955). A study of a characteristic type of upper-level frontogenesis. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 12(3), 226–237.
Schubert, W. H., Hausman, S. A., Garcia, M., Ooyama, K. V., & Kuo, H. C. (2001). Potential vorticity in a moist atmosphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 58(21), 3148–3157.
Shutts, G. J. (1990). Dynamical aspects of the October storm, 1987: A study of a successful fine-mesh simulation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 116(496), 1315–1347.

سومین کنفرانس ملی آب و هواشناسی ایران (با محوریت تغییر اقلیم)
The 3rd National Conference on Climatology of Iran (Focusing on Climate Change)
ارومیه ۱۶ مهر ۱۴۰۴

Dynamic analysis of a snowstorm using moist-air potential vorticity

Fatemeh Gharaylou[1], Alireza Mohebalhojeh[2], Maryam Gharaylou[3], and Mohammad Mirzaei [3]

M.Sc. Graduate in Meteorology, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran
Professor, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran
Associate Professor, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran
* Corresponding author: fgharaylou@ut.ac.ir

ABSTRACT

In this study, a dynamic analysis of a severe snowstorm is conducted using a new form of potential vorticity based on moist entropy potential temperature(θ_s), as formulated by Marquet (2014). The θ_s variable is an extension of the conventional potential temperature (θ), reformulated in terms of entropy to make it valid for a mixture of dry air, water vapor, and various phases of water. The aim of employing this new form of potential vorticity is to enhance dynamic analysis and improve the prediction of severe atmospheric events. Accordingly, the intense snowstorm that struck Tehran on January 27 and 28, 2018 was simulated using the WRF model and ERA5 reanalysis data with a horizontal resolution of 0.25 degrees, applied to two nested domains with 9 km and 3 km resolution. The Morrison double-moment microphysics scheme was used for more accurate parameterization of cloud microphysical processes. For thermodynamic analysis, potential vorticities corresponding to moist potential temperatures (θ_s), equivalent potential temperature (θ_e), saturated equivalent potential temperature (θ_{es}), and liquid water potential temperature (θ_l) were examined. On January 27, negative potential vorticity values in the lower layers indicated the potential for local convection, while positive values in the upper layers reflected dynamic stability. Moreover, saturated equivalent potential vorticity (SEPV) and saturated hydrostatic equivalent potential vorticity (SHEPV) showed strong negative values in the lower layers, indicating conditional symmetric instability and the likelihood of slantwise convection. This type of instability plays a key role in the formation of mesoscale precipitation bands. Additionally, the new form of potential vorticity used in this study provided a more accurate depiction of moist instabilities in frontal zones. On January 28, the weakening and dispersion of negative potential vorticity values signaled a decline in unstable activity and the system's transition into its final stage.

Keywords: Snowstorm, moist entropy potential vorticity, WRF, Morrison, ERA5

Analysis of the variability of global teleconnection indices and their impact on the temperature of Yasuj as an indicator of climate change

Ashraf Asadi

Assistant Professor, Department of Geography, Payame Noor University (PNU), Tehran, Iran
Email: ashraf-asadi@pnu.ac.ir

ABSTRACT

This study aims to understand the variability of global teleconnection indices and their effects on seasonal and annual temperatures at the Yasuj synoptic station.The data used include monthly and annual mean temperatures obtained from the Iranian Meteorological Organization, along with monthly values of the NAO and ONI indices sourced from NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) for the statistical period 1987–2022.To identify abrupt shifts and regime changes in temperature patterns, two statistical methods were applied: the Standard Normal Homogeneity Test (SNHT) and the Buishand Range Test. Additionally, Pearson, Kendall's tau, and Spearman correlation coefficients were used to examine the relationship between selected teleconnection indices and seasonal temperatures.The results indicated that sudden and significant regime shifts were not confirmed in spring and annual temperature series, suggesting that changes in these periods are more gradual and composite in nature. The Buishand test revealed meaningful changes across all four seasons and in the annual mean temperature, with the most intense shifts occurring in winter and summer. The SNHT results also confirmed strong and significant changes in summer and winter, with both tests pointing to the early 21st century as the period of regime transition.Correlation analysis between the temperature series and the two global indices showed an inverse relationship between them and the seasonal and annual mean temperatures in Yasuj. Although the correlations were generally weak, the ONI index showed the most significant relationships in spring and autumn, while the NAO index exhibited meaningful correlations in winter and spring.

Keywords: Buishand Range Test, Standard Normal Homogeneity Test, NAO ,ONI , Yasuj.

Introduction

Climate change is no longer a distant threat or mere prediction it is a scientifically confirmed reality with observable consequences across the globe.Recent reports from the World Meteorological Organization (WMO) and the U.S. National Centers for Environmental Information (NOAA) indicate that the trend of global temperature rise has not only continued in recent years but has intensified. This phenomenon represents one of the most pressing environmental challenges of our time, directly and indirectly affecting human life, ecosystems, and natural resources.Climate change refers to long-term shifts in Earth's weather patterns, primarily driven by human activities such as the widespread use of fossil fuels, deforestation, and the emission of greenhouse gases. Since 1880, the global average temperature has increased by approximately 1.1°C, with the majority of this warming about 0.15 to 0.20°C per decade occurring since 1975. Projections from most global climate models suggest that temperatures may rise by an additional 1.5 to 3°C over the next century (Lindsey and Dahlman, 2025).

Rising temperatures have far-reaching impacts on precipitation patterns, agriculture, water resources, and human health. Tropical regions are experiencing more frequent and intense heatwaves, while temperate zones face longer warm seasons and increased dryness. These changes not only reduce agricultural productivity and heighten the risk of wildfires but also negatively affect both physical and mental health.

Iran has not been immune to these global temperature shifts. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) estimates that temperatures in the Middle East may rise by up to 2°C over the next 15 to 20 years, and by more than 4°C by the end of the century. Among Middle Eastern countries, Iran is projected to experience a 2.6°C increase in average temperature in the coming decades, indicating a rate of warming above the regional average (Mansouri Danneshvar et al., 2019).The effects of this phenomenon have become increasingly evident in Iran in recent years. Agriculture, due to its inherent sensitivity to climate conditions, is among the most vulnerable sectors. Agricultural output has declined due to droughts caused by rising annual maximum temperatures and reduced rainfall (Shahpari et al., 2023). These temperature changes pose serious challenges to farmers and the agricultural sector as a whole. To mitigate negative impacts and ensure the continuity of food production and security, effective management and adaptation strategies are essential.Given Iran's diverse climatic zones and its susceptibility to rising temperatures, understanding the current situation, associated risks, and potential opportunities underscores the importance of research in this field especially as global warming intensifies at international, regional, and national levels.

The aim of this article is to investigate temperature trends at the Yasuj meteorological station recognized as one of Iran's natural capitals and a hub for tourism and agriculture and to analyze their relationship with global teleconnection indices, specifically the North Atlantic Oscillation (NAO) and the Niño 3.4 index (NINO3.4).

Numerous studies have previously investigated climate and temperature changes in Iran and around the world. Bahrawandi et al. (2021) identified climatic fluctuations at the Khorramabad station using the SNHT method. Fakhri (2024) analyzed temperature variations across Iran using CRU gridded data and quantitative

methods, assessing both the risks and opportunities associated with these changes. Rahmdel et al. (2022) conducted an exploratory analysis of temperature and precipitation series from meteorological stations across the country, identifying two to three changepoints in the time series using the SNHT test. Alizadeh Choubari and Najafi (2017) applied the Buishand method to detect shifts in temperature and precipitation parameters across various regions of Iran, identifying significant increases in temperature series during the 1980s and 1990s. Mortezapour et al. (2020) evaluated the performance of homogeneity tests including Cumulative Deviations Test (CDT), Worsley, Standard Normal Homogeneity Test (SNHT), Pettit, and Buishand on temperature, precipitation, and pressure data from Rasht station. They concluded that when potential changes occur near the midpoint of a time series, the Pettit and Buishand methods provide more accurate estimates of the changepoint timing. Yameogo (2024) found that seasonal cycles of maximum temperature in Burkina Faso showed no clear trend, unlike minimum temperature. Temperature anomalies in the 1980s, 2000s, and 2020s were confirmed using Spearman, Mann-Kendall, and NHST tests. Addou et al. (2024) identified changepoints in monthly mean temperature in the Moulouya Basin using Buishand and Sen's slope analysis. Their results indicated rapid trends in May and July, with significant changepoints occurring around the year 2000, particularly in summer months. Venkatesh Gaddikeri et al. (2024) used Buishand and SNHT tests to detect trends and changepoints in meteorological variables in the New Bhupania region. Their study revealed that the changepoint for maximum temperature occurred in 1998, and for minimum temperature in 1997.Most previous research on the impact of teleconnection indices such as NAO and ENSO has focused on precipitation, with relatively few studies examining temperature. Azizi et al. (2014) investigated the simultaneous effects of NAO and the Southern Oscillation Index (SOI) on Iran's climate. They found that when the behavior of these two indices is not aligned (i.e., they act in opposite directions) and are in extreme phases, their influence on Iran's climate is most pronounced. For example, during a negative SOI and positive NAO phase, the Siberian and Azores high-pressure systems, along with the Icelandic low, are strengthened relative to long-term averages leading to the intrusion of the Siberian high into Iran and a subsequent drop in temperature. Al-Asadi & Hassan (2023) analyzed the correlation between NAO and SOI and Iraq's climate, identifying four instances of simultaneous behavior during selected years that recorded the highest variability. Research et al. (2025) examined the influence of NAO and ENSO teleconnection patterns on the frequency and intensity of atmospheric rivers in Iran, confirming that the occurrence rates during neutral phases of SOI and NAO were 55.81% and 67.11%, respectively. Hosseini et al. (2022) studied the impact of the NAO index on precipitation in Iran, observing the strongest positive correlations in autumn and winter, and the most significant negative correlations in spring and summer across various regions of the country.

Data and Methodology

Study Area

Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad Province, located in southwestern Iran, covers an area of approximately 15,505 square kilometers. Geographically, it lies between 29°56′ to 31°29′ north latitude and 49°53′ to 51°53′ east longitude from the Greenwich meridian. The provincial capital is the city of Yasuj (Figure 1). The province features highly varied topography, with its highest elevation reaching 4,409 meters above sea level at Mount Dena. Due to the steep topographic gradient, moving from the northeast to the southwest of the province results in a decrease in elevation and humidity, accompanied by an increase in temperature and

aridity. These elevation differences, along with variations in temperature and precipitation, have created two distinct climatic zones within the province: a cold region and a warm region. The cold zone has an average elevation exceeding 2,000 meters and spans nearly 6,500 square kilometers. In this zone, average air temperatures fluctuate between −13°C and 39°C (Statistical Center of Iran, 2021).



Figure 1- Geographical location of Kohgiluyeh and Boyer Ahmad provinces in Iran and the location of Yasuj and the map of elevation changes in the province

Yasuj, the capital of Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad Province, is located in southwestern Iran within the province's elevated and cold climatic zone.With a population exceeding 300,000, Yasuj is recognized as one of Iran's "natural capitals" due to its rich ecological features. The city lies near the Dena mountain range, which serves as the source of several major rivers in Iran, including the Karun River.The average annual temperature in Yasuj is approximately 15°C. The lowest temperatures typically occur in January (around 5°C), while the highest are recorded in August (27.1°C) (Table 1).

Table 1: Average temperature of Yasuj station during the years 1987-2022

Seasons		**Spring**			**Summer**			**Autumn**			**Winter**		**Annual**
Month	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Feb	Jan	**15**
Mean Temperature	5.2	9.4	16.3	22.1	26.2	27.1	24.5	19.3	13.8	9	5	2.9	

Data

The meteorological time series data used in this study include monthly and annual mean temperatures recorded at the Yasuj synoptic station, obtained from the Iranian Meteorological Organization for the period 1987–2022. Additionally, monthly time series data for global teleconnection indices namely the North Atlantic Oscillation (NAO) and the Oceanic Niño Index (ONI) were acquired from the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) for the same statistical period (1987–2022).For analyzing the ENSO phenomenon, the ONI (Oceanic Niño Index) is commonly used. This index reflects the three-month running average of sea surface temperature anomalies in the Niño 3.4 region of the east-central tropical Pacific. According to studies conducted on Iran's climate, ONI has shown the most significant influence on the country's weather patterns. NOAA defines El Niño conditions as being present when the ONI value in the Niño 3.4 region is +0.5°C or higher, indicating that sea surface temperatures are at least 0.5°C (0.9°F)

warmer than the long-term average. Conversely, La Niña conditions are identified when the ONI is 0.5°C or lower, meaning the region is at least 0.5°C cooler than average.

Methodology

To examine sudden jumps and identify the point of change and jump in the time series of temperature data, two statistical methods were used: Standard Normal Homogeneity Test (SNHT) and Buishand Range Test. To identify the correlation between the linkage indices from the selected period and seasonal temperature, Pearson's correlation coefficient, Kendall's tau, and Spearman's correlation coefficient were also used.

Standard Normal Homogeneity Test (SNHT)

SNHT is a parametric test used to detect abrupt or linearly developing differences. Hawkins (1977) presented a formulation of a testing method that was subsequently developed into SNHT and applied to climatological series by Alexandersson (1984, 1986). The SNHT is related to a curve fitting technique using the least squares principle (Alexandersson and Moberg, 1997, hereafter AM, 1997).
SNHT uses a normalised series of the ratios/differences, Zi, defined as

$$Z\ (Q\ Q)\ /\ ii\ Q = -\ \sigma \quad (1)$$

where Q is the sample mean value and σQ the sample standard deviation of the ratio/difference Qi at time step i (denoted in many climatological applications as one year). In the following discussion
, "year" will be used instead of "time step" or "unit time", although the time step is by no means restricted to one year. After assuming that a Normal distribution describes Zi, N, the null hypothesis for all variants of SNHT is:
H0 : Zi ∈ N(0,1) i ∈{ } 1,..., n
i.e., the whole series is homogeneous. All values in the normalised series of ratios/differences are normally distributed with a mean value equal to zero and standard deviation equal to one.
The final test statistic (T), used to determine the existence of a changepoint, is the maximum value of TkT_kTk across all possible points kkk. Typically, to avoid unstable results at the very beginning and end of the series, points kkk are examined within a specific range (e.g., from k=1to n−1), though sometimes the first and last 5-10% of the series are excluded from the search for greater stability.
$T=\max_{1} \le k < n(T_k)$
• If T value is greater than 8 → significant change with significance level of about $p < 0.05$
• If T value is greater than 10 → strong change with $p < 0.01$
• If T value is greater than 12 → very strong change with

Buishand Range Test

This approach was proposed by Buishand in 1982. It applies to normal distributions and assumes no change in the variance of the distribution. Assume an a priori uniform distribution for the position of the change point. The adjusted partial sum (S_k), i.e., the cumulative deviation from the mean for the k^{th} observation of a series $x_1, x_2, x_3, \ldots, x_k, \ldots, x_n$ with mean $\bar{x}$, can be calculated using the following equation:

$$S_k = \sum_{i=1}^{k} (x_i - \bar{x}) \quad (2)$$

A series can be homogeneous, with no change point, if $S_k \cong 0$, because in a random series, the deviation from the mean will be distributed on either side of the series mean.Te signifcance of the change can be assessed by calculatingthe adjusted revaluation range (R) using the following equation:

$$\boldsymbol{R = Max(S_k) - Min(S_k)} \quad \textbf{(3)}$$

$$\boldsymbol{Q = Max|S_k|} \quad \textbf{(4)}$$

Large values of Q indicate a change in the mean. In this test, if the value of Q is greater than 1.36, it indicates a change and jump in the time series.

Pearson Correlation, Spearman Rank Correlation, and Kendall's Tau Rank Correlation

Pearson Correlation, Spearman Rank Correlation, and Kendall's Tau Rank Correlation are all methods used to measure the strength and direction of relationships between variables.

Pearson r correlation is widely used in statistics to measure the degree of the relationship between linear related variables. Where: r = Pearson r correlation coefficient N = number of value in each data set.

$$\boldsymbol{r = \frac{N\sum xy - \sum(x)(y)}{\sqrt{[N\sum x^2 - \sum(x^2)][N\sum y^2 - \sum(y^2)]}}} \quad \textbf{(5)}$$

Kendall rank correlation is a non-parametric test that measures the strength of dependence between two variables.

The Kendall Tau test does not require a normal frequency distribution or linearity of the data behavior, and it is very robust against outliers (for example, data that has high stretch, such as rainfall data) and data that deviates significantly from linear behavior

$$\boldsymbol{\tau = \frac{\text{Agreeing pairs of numbers} - \text{disagreeing pairs of numbers}}{\frac{1}{2}n(n-1)}} \quad \textbf{(6)}$$

$$\mathbf{Z_\tau} = \frac{\boldsymbol{\tau - \mu\tau}}{\boldsymbol{\sigma\tau}} \quad \textbf{(7)}$$

$$\boldsymbol{\tau\,\sigma} = \frac{\sqrt{2\,(2n+5)}}{9n(n-1)} \quad \textbf{(8)}$$

$$\boldsymbol{\mu\tau = 0} \quad \textbf{(9)}$$

n: Total number of statistical years

Zα/2: The value of the critical coefficient based on the significance level and 95% probability, which is 1.96

Spearman rank correlation is a non-parametric test that is used to measure the degree of association between two variables. It was developed by Spearman, thus it is called the Spearman rank correlation. Spearman rank correlation test does not assume any assumptions about the distribution of the data and is the appropriate correlation analysis when the variables are measured on a scale that is at least ordinal.

$$\rho = 1 - \frac{6\sum d_i^2}{n(n^2-1)} \quad (10)$$

Where: ρ= Spearman rank correlation di: the difference between the ranks of corresponding values Xi and Yi n= number of value in each data set.

Results

Statistical tests SNHT and Buishand were applied to the monthly mean temperature time series, analyzed seasonally and annually. Table 2 presents the results of the SNHT test, which is particularly sensitive to gradual changes in the data.

According to Table 2, no significant trend was observed during autumn. However, temperature changes in spring were statistically significant, while winter showed sharp fluctuations and summer exhibited a strong and increasing trend. The timing of these regime shifts occurred in the early 1990s for winter and spring, and from 2006 onward for summer.

Table 2: The result of Standard Normal Homogeneity Test (SNHT)

Season	Spring	Summer	Autumn	Winter	Annual
Mean T(μ)	19.2	25.1	10.3	5.8	**15.1**
STDEV(σ)	1.1	0.65	0.86	1.3	**0.69**
SNHT	9.3	13	6.8	10.1	**6.5**
Change Point	1995	2006	2001	1992	**1995**
Sig	0.01	0.001	0.001	0.001	**0.001**

The Buishand Range Test is a key statistical method in climatology, particularly useful for assessing the homogeneity of time series data such as temperature or precipitation. This test is designed to detect sudden shifts in the mean of a dataset, and its interpretation depends on the normalized test statistic (Q) and the significance level (p-value). Table 2 presents the results of the Buishand test. An analysis of seasonal temperature variations in Yasuj using this method reveals statistically significant changes across all four seasons, as well as in the annual mean temperature. These changes are most pronounced in winter and summer. The identified changepoints generally correspond to the late 20th century and the early years of the 21st century, specifically from the year 2000 onward(table 3).

Table 3: The result of Buishand Range Test

Season	Spring	Summer	Autumn	Winter	Annual
Mean T(μ)	19.2	25.14	10.3	5.65	**15.1**
STDEV(σ)	1.077	0.65	0.86	1.29	**0.69**
Buishand Range (R)	9.27	13.004	6.85	10.12	**6.51**
(Q)	9.24	12.95	6.8	9.4	**6.5**
Change Point	1995	2006	2001	1992	**1995**
P value	p > 0.10	p ≈ 0.03–0.05	p ≈ 0.05–0.10	p > 0.10	**p > 0.10**

Studies have shown that ENSO significantly influences Iran's temperature, particularly in the NINO 1.2 and NINO 3 regions, with a lag of approximately 3 to 6 months. To analyze ENSO, researchers commonly use the Oceanic Niño Index (ONI), which represents the three-month running average of sea surface temperature anomalies in the NINO 3.4 region. As indicated in the table, all three correlation tests Pearson, Kendall's

tau, and Spearman reveal a more significant relationship between ONI and seasonal temperatures in spring and autumn. Interestingly, this teleconnection index exhibits an inverse relationship with the temperature in Yasuj. Specifically, during the negative phase of ONI (La Niña conditions), temperatures in Yasuj tend to rise, whereas in the positive phase (El Niño years), temperatures tend to decrease. This inverse pattern may be attributed to increased cloudiness and precipitation during El Niño phases, which can suppress surface temperatures in the study area. However, the overall correlation is weak, and no significant relationship was found between ONI and temperatures in summer and winter.

Table 4: Correlation coefficient values of ONI index during the years 1987-2022 with temperature at Yasuj station

		Spring	Summer	Autumn	Winter	Annual
Pearson	**Correlation Cofficient**	-0.361	-0.092	-0.372	-0.073	**-0.278**
	Sig	0.031	0.592	0.026	0.674	**0.101**
Kendall 's tau_b	**Correlation Cofficient**	-0.267	-0.90	-0.285	-0.013	**-0.204**
	Sig	0.023	0.445	0.015	0.913	**0.081**
Spearman's rho	**Correlation Cofficient**	-0.364	-0.132	-0.388	-0.041	**-0.30**
	Sig	0.029	0.443	0.019	0.811	**0.076**

The NAO index, which reflects the pressure difference between the Azores High and the Icelandic Low, significantly influences precipitation and temperature patterns in Iran. Studies have shown that the positive phase of NAO, characterized by a strengthened Azores High, typically leads to warmer and drier conditions in Iran due to the dominance of warm and dry airflows. Conversely, the negative phaseassociated with an intensified Icelandic Low generally results in cooler temperatures and increased precipitation across the region. Correlation analysis between the NAO index and temperature in Yasuj, as presented in the table, was conducted using three statistical tests: Pearson, Kendall's tau, and Spearman. The strongest correlation was observed during winter, where a weak but statistically significant negative relationship was confirmed by all three tests. No meaningful correlation was found for the other seasons or for annual mean temperature.

Table 5: Correlation coefficient values of NAO index during the years 1987-2022 with temperature at Yasuj station

		Spring	Summer	Autumn	Winter	Annual
Pearson	**Correlation Cofficient**	0.18	0.032	-0.187	-0.447	**-0.288**
	Sig	0.0294	0.853	0.276	0.006	**0.088**
Kendall 's tau_b	**Correlation Cofficient**	0.102	-0.07	-0.152	-0.254	**-0.146**
	Sig	0.383	0.549	0.191	0.029	**0.21**
Spearman's rho	**Correlation Cofficient**	0.152	-0.099	-0.221	-0.347	**-0.211**
	Sig	0.377	0.566	0.196	0.038	**0.217**

The year 2010 marked a strong El Niño event, which coincided with a notable rise in global temperatures. During that year, the temperature in Yasuj exceeded 16°C, and the SNHT test identified it as a regime shift

point. In subsequent years, weak to moderate El Niño phases and predominantly positive NAO conditions prevailed, aligning with increased winter and annual temperatures across Iran. Temperature changes in Yasuj since 2010 particularly in winter and on an annual scale have corresponded with warm phases of ENSO and positive NAO. From 2010 onward, annual temperatures have remained above the long-term average in most years. This correlation suggests that global climate indices such as ENSO and NAO, especially in recent years and in the context of global warming, may play a significant role in shaping regional climate variability in Iran.

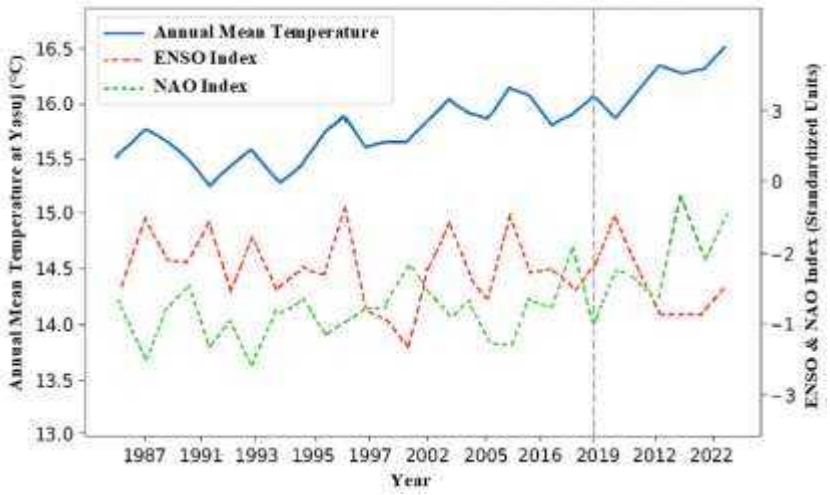


Fig 2: Time series of annual average temperature of Yasouj station and global ONI and NAO indices

Conclusion

Statistical analysis of the monthly mean temperature time series in Yasuj, using SNHT and Buishand tests, revealed significant climatic changes beginning in the late 20th century and intensifying after 2006. The most pronounced changes were observed during winter and summer. Correlation analysis between Yasuj's temperature and global climate indices ONI and NAO showed generally weak relationships throughout the time series. This weak correlation suggests that regional temperature increases are more closely linked to local factors such as deforestation, industrial expansion, urban development, and rising greenhouse gas emissions. In recent years, however, coinciding with global warming and several strong El Niño events, these indices have played a more noticeable role in regional temperature increases. Overall, since 2010, annual temperatures in Yasuj have remained above the long-term average in most years, aligning with warm phases of ENSO and positive NAO conditions.

References

Addou,R., Khalid,O., Nir,K., Hanchane,M., Ridouane,K., Boucha,E.& Imad,A., (2024). Statistical Analysis for the Detection of Change Points and the Evaluation of Monthly Mean Temperature Trends of the Moulouya Basin (Morocco). Advances in Meteorology. Vol 2024,1-16

Alizadeh-Choobari, O., Najafi, M. S. (2017). Trends and changes in air temperature and precipitation over different regions of Iran. *Journal of the Earth and Space Physics*, *43*(3), 569-584.Azizi, G., Chehreara, T., & Safarrad, T. (2014). Simultaneous Effects of NAO and SOI Phases on Iran's Climate. *Geography and Environmental Sustainability*, *4*(3), 43-56.

Alexandersson, H. (1984). A Homogeneity Test Based on Ratios and Applied to Precipitation. Report 79,

Department of Meteorology, Uppsala, Sweden, 55 pp. (PhD dissertation) Alexandersson, H., 1986. A homogeneity test applied to precipitation data. J. Climatol., 6, 661-675.

Alexandersson, H., Moberg,A. (1997) Homogenization of Swedish temperature data. Part I: Homogeneity test for linear trends. Int. J. Climatol., 17, 25-34.

Baharvandi, K. , Khorshiddoust, A. M. and Nassaji Zavareh, M. (2021). The Clarification of Climactic Fluctuations through SNHT Method (Case Study: Khorramabad Station). *Journal of Geography and Planning*, *25*(75), 51-63.

Buishand, T. A. (1982). Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. Journal of Hydrology 58, 11-27.

Fakhri, M. (2024). Investigating the Condition of Iran's Temperature Changes Compared to the Past Long-Term Climatic Standard Period. *Journal of Drought and Climate change Research*, *2*(3), 17-32.

Hosseini, Sayyed Mohammad & Kashki, Abdolreza & Karai, Mukhtar. (2022). Analysis of the North Atlantic Oscillation Index and rainfall in Iran. Modeling Earth Systems and Environment. 8. 1-10.

Hawkins, P.M.(1977) Testing a sequence of observations for a shift in random location. J. Am. Statist. Assoc., 73, 180-185.

https://amar.org.ir/

https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI.shtml

https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-variability-oceanic-nino-index

https://psl.noaa.gov/data/20thC_Rean/timeseries/monthly/NAO/

Lindsey, R. , Dahlman, L.(2025) Climate change: global temperature report,NOAA, Climate.gov

Mansouri Daneshvar, M.R., Ebrahimi, M. & Nejadsoleymani, H.(2019) An overview of climate change in Iran: facts and statistics. *Environ Syst Res* ,vol **8**, issues 7 , 1-10.

Mortezapoor, S. , Asadi Oscouei, E. & Abasi, F. (2020). Evaluation of Some Homogeneity Tests on Mutation Detection in Climatic Data, Case Study: Rash Station. *Nivar*, *44*(108-109), 12-32.

Pazhouhesh, F. , Nasr Esfahani, M. A. & Ghasemi, A. R. (2025). The Effects of NAO and ENSO on the frequency and intensity of Atmospheric Rivers in Iran. *Iranian Water Researches Journal*, *19*(1), -. doi: 10.22034/iwrj.2025.15062.2655

Rahmdel, M. , Javanshiri, Z. & Sanaei Nejad, S. H. (2022). Exploratory Analysis and Detection of In-homogeneities in Temperature and Precipitation Series of Meteorological Stations in Iran (Period 1959-2018). *Iranian Journal of Geophysics*, *16*(1), 213-233.

Shahpari,G., Ashena,M., Martinez-Cruz,A.,& León,D.G.(2023). Implications for Iranian economy from climate change effects on agriculture a static computable general equilibrium approach.Theorectical and Applied Climatology,153(3-4),1221-1235.

Venkatesh G., Sarangi,A., Singh, Malkhan,D.K., Rajput,J.& Kushwaha,N.L.(2024) Trend and change-point analyses of meteorological variables using Mann–Kendall family tests and innovative trend assessment techniques in *New Bhupania* command (India). *Journal of Water and Climate Change* , 15 (5).

Hassan, M., Al-Asadi, K. (2023). Synchronous Impact of the North Atlantic Oscillation (NAO) and Southern Oscillation Index (SOI(Poles on Temperature and Rain Over Iraq. Israa University Journal for Applied Science. 7. 290-302.

Yaméogo, J. (2024). Changes in the seasonal cycles of extreme temperatures in the Sudano-Sahelian domain in West Africa: a case study from Burkina Faso. Meteorology Hydrology and Water Management.12(2)

سومین کنفرانس ملی آب و هواشناسی ایران (با محوریت تغییر اقلیم)
The 3rd National Conference on Climatology of Iran (Focusing on Climate Change)
ارومیه ۱۶ مهر ۱۴۰۴

بررسی اثرات تغییر اقلیم بر پارامترهای اقلیمی شهر سقز با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG بر مبنای گزارش ششم IPCC

یاشار محمدی [۱]، ابراهیم مسگری [۲]

۱- دانشجو دوره دکتری مهندسی عمران گرایش محیط زیست، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۲- دکتری اقلیم شناسی، دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی،دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

نویسنده مسئول: yasharm669@gmail.com

چکیده

تغییر اقلیم یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی قرن حاضر است که پیامدهای گسترده‌ای بر منابع آب، کشاورزی، سلامت و پایداری اکوسیستم‌ها برجای می‌گذارد. افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای ناشی از فعالیت‌های انسانی طی دهه‌های اخیر، سبب تغییرات آشکار در میانگین دما و الگوهای بارش در مقیاس جهانی و منطقه‌ای شده است. ایران با اقلیم نیمه‌خشک و آسیب‌پذیری بالا در برابر تغییرات دما و بارش، از مناطق حساس جهان محسوب می‌شود. استان کردستان و شهرستان سقز نیز با اقلیم کوهستانی، بارندگی‌های عمدتاً زمستانی و وابستگی بالا به منابع آبی، در معرض تهدیدهای ناشی از تغییر اقلیم قرار دارند. این پژوهش با هدف بررسی اثرات تغییر اقلیم در شهرستان سقز انجام شد. برای این منظور از مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری LARS-WG و داده‌های مدل‌های گردش عمومی جو (GCMs) گزارش ششم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC AR6) تحت سناریوهای مختلف انتشار استفاده گردید. داده‌های روزانه بارش و دما از ایستگاه سینوپتیک سقز برای دوره پایه استخراج و پس از کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل، برای شبیه‌سازی آینده به‌کار گرفته شد. نتایج نشان داد افزایش دما در تمامی سناریوها قطعی است و تغییرات بارش فصلی می‌تواند پیامدهای مهمی برای منابع آب و کشاورزی منطقه به همراه داشته باشد.

کلید واژه‌ها : ریز مقیاس‌نمایی، تغییر اقلیم، LARS-WG، گزارش ششم، سقز.

مقدمه

تغییر اقلیم به‌عنوان یکی از چالش‌های اصلی قرن بیست و یکم شناخته می‌شود که پیامدهای گسترده‌ای بر سیستم‌های طبیعی و انسانی دارد [۱,۲]. افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای ناشی از فعالیت‌های انسانی، به‌ویژه پس از انقلاب صنعتی، موجب افزایش دمای میانگین سطح زمین، تغییر در الگوهای بارش و بروز پدیده‌های حدی نظیر خشکسالی و سیلاب شده است [۳,۴]. بر اساس گزارش ششم هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC AR6، 2021) روند گرمایش جهانی نه‌تنها ادامه خواهد داشت، بلکه اثرات آن در مقیاس‌های منطقه‌ای نیز با شدت بیشتری نمایان خواهد شد [۱] .

ایران به دلیل موقعیت جغرافیایی خاص، اقلیم نیمه‌خشک و وابستگی بالای فعالیت‌های اقتصادی به منابع آب و خاک، از جمله کشورهایی است که در برابر تغییر اقلیم بسیار آسیب‌پذیر است [۵,۶]. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که در بخش‌های مختلف ایران تغییرات قابل توجهی در دما و بارش طی دهه‌های اخیر رخ داده و این روند در آینده نیز ادامه خواهد داشت [۷–۹]. استان کردستان و شهرستان سقز نیز به‌عنوان بخشی از زاگرس غربی، با اقلیم کوهستانی و وابستگی بالا به منابع آبی سطحی و زیرزمینی، از مناطق حساس به تغییرات اقلیمی محسوب می‌شوند. [۱۰]

از سوی دیگر، خروجی مدل‌های گردش عمومی جو (GCMs) که در مقیاس جهانی عمل می‌کنند، به دلیل تفکیک مکانی پایین (حدود ۱۰۰ تا ۲۵۰ کیلومتر) و خطاهای ناشی از هموارسازی، برای تحلیل‌های محلی مناسب نیستند [۱۱,۱۲]. بنابراین، برای مطالعه اثرات تغییر اقلیم در مقیاس‌های خرد و محلی، استفاده از روش‌های ریزمقیاس‌نمایی ضروری است. روش‌های ریزمقیاس‌نمایی به دو دسته آماری و دینامیکی تقسیم می‌شوند [۱۳]. روش دینامیکی با استفاده از مدل‌های اقلیم منطقه‌ای (RCMs) انجام می‌شود و نیازمند محاسبات سنگین و داده‌های گسترده است، در حالی که روش آماری با ایجاد روابط آماری بین داده‌های مشاهداتی و خروجی مدل‌های بزرگ‌مقیاس، ساده‌تر و رایج‌تر است.[۱۴]

در میان روش‌های آماری، مدل LARS-WG (Long Ashton Research Station Weather Generator) یکی از پرکاربردترین ابزارها در مطالعات تغییر اقلیم است. این مدل قادر است داده‌های روزانه بارش، دمای حداقل و حداکثر، و تابش خورشیدی را با استفاده از توزیع‌های احتمالی و الگوریتم‌های تصادفی شبیه‌سازی کند. [۱۵] LARS-WG در مطالعات بسیاری در ایران و جهان به‌کار گرفته شده و نتایج آن دقت قابل قبولی را برای ریزمقیاس‌نمایی داده‌های اقلیمی نشان داده است [۱۶–۱۹].

با توجه به اهمیت موضوع، هدف این پژوهش بررسی اثرات تغییر اقلیم بر الگوهای دما و بارش در شهرستان سقز با استفاده از داده‌های گزارش ششم IPCC و ریزمقیاس‌نمایی توسط مدل LARS-WG است.

برخی از تحقیقات پیشین در زمینه تولید داده‌های هواشناسی و مقایسه مدل‌های معتبر ریزمقیاس نمایی، در ادامه آورده شده است.

در پژوهشی، نحوه عملکرد مدل‌های LARS-WG و SDSM (جزء معتبرترین ابزارهای ریزمقیاس گردانی در حال حاضر) در شبیه‌سازی تغییرات دما و بارش در حوضه آبریز دریاچه ارومیه تحلیل شد. ایستگاه‌های هواشناسی مورد بررسی شامل چهار ایستگاه سینوپتیک سقز، تبریز، خوی و ارومیه می‌باشد که دارای آمار کامل در دوره پایه (۱۹۹۰-۱۹۶۱) بوده‌اند.

مطابق با نتایج حاصله، مدل LARS-WG در شبیه‌سازی دوره‌ای بارش از کارایی بهتری برخوردار بوده و دارای سادگی و سرعت عملکرد بیشتری نسبت به مدل SDSM است[۲۰].

در تحقیق دیگری که به‌منظور بررسی و تحلیل اثرات تغییر اقلیم بر روی دما و بارش حوضه شهر چایی ارومیه و همچنین لحاظ‌کردن عدم قطعیت مربوط به مدل‌های گردش عمومی جو و سناریوهای آن با مدل آماری LARS-WG ریزمقیاس انجام پذیرفت، نتایج نشان داد که بارش دوره آتی ۹ میلی‌متر کاهش خواهد یافت و این در حالی است که دمای حداقل ۱/۰۵ و دمای حداکثر ۰/۸۷ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد یافت. نکته قابل‌توجه، برهم‌خوردن توزیع زمانی بارش و افزایش دما است که احتمالاً تبعات منفی آن بیش از کاهش بارش خواهد بود [۲۱].

در پژوهشی، امواج گرمایی شهرستان زنجان در دو بازه زمانی ۱۴۰۹-۱۳۹۰ و ۱۴۴۴-۱۴۲۵ توسط نرم‌افزار WG-LARS پیش‌بینی شد. موج‌کوتاه گرمایی در هر دو بازه روند افزایشی داشته است و بیشترین فراوانی موج‌کوتاه گرمایی در بازه زمانی اول در ماه‌های خرداد و تیر قرار دارد و در بازه زمانی دوم، فراوانی امواج کوتاه گرمایی در ماه‌های فروردین و اردیبهشت بیشتر شده و در نتیجه باتوجه‌به پیش‌بینی انجام‌گرفته در مدل LARS-WG، بر تعداد روزهای گرم افزوده می‌شود [۲۲] .

در پژوهشی برای اصلی‌ترین جزء چرخه هیدرولوژی که بارش می‌باشد به ارزیابی ۱۱ مدل GCMs از CMIP6 در شبیه‌سازی و پیش‌نگری تغییرات آن در منطقه MENAP تحت سه سناریوی واداشت اجتماعی - اقتصادی (SSP) در دوره (۲۰۵۰-۲۰۲۱) نسبت به دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۸۵) پرداخته شد. نتایج حاصل از ارزیابی عملکرد مدل‌های GCMs با استفاده از تکنیک‌های آماری نشان داد که از میان مدل‌های مورد بررسی، مدل MPI-ESM1-2-HR در سطح منطقه از دقت بیشتری نسبت به سایر مدل‌ها در شبیه‌سازی بارش برخوردار است. نتایج حاصل از پیش‌نگری تغییرات بارش نیز نشان داد که بارش به جز برخی مناطق همچون مناطق ساحلی دریای سیاه، مدیترانه و دریای سرخ و همچنین مناطق کوهستانی و مرتفع در شرق منطقه موردمطالعه در سایر مناطق کاهش پیدا خواهد کرد که بیشترین میزان کاهش آن نیز مربوط به کشورهای خاورمیانه از جمله ایران، عراق و سوریه و کشورهایی همچون افغانستان، مراکش، الجزایر و سودان است . در مجموع باتوجه‌به سناریوهای مختلف، در بیشتر پهنه موردمطالعه میزان بارش در دوره آینده نسبت به دوره پایه کاهش خواهد یافت [۲۳].

در مطالعه‌ای اثر تغییر اقلیم بر بارش و دمای حداقل و حداکثر روزانه را در ۴ ایستگاه در سمنان پیش‌بینی کردند. در این مطالعه، خروجی‌های مدل HadCM3 تحت سه سناریوی A2 ، B1و A1B از سری SRES برای دوره زمانی (۲۰۳۰-۲۰۱۱) توسط مدل LARS-WG ریزمقیاس شد. نتایج حاکی از این است که به‌طورکلی سناریوهای مورداستفاده در مدلHadCM3 ، قابلیت بالایی در شبیه‌سازی سری‌های زمانی متغیرهای هواشناسی در این استان را دارا می‌باشد و انطباق و همپوشانی نسبتاً بالایی بین داده‌های مشاهداتی در دوره پایه با داده‌های شبیه‌سازی‌شده در آینده وجود دارد؛ اما سناریوی A1B در اغلب ایستگاه‌های مورد بررسی، توانمندی چشمگیرتری در شبیه‌سازی داده‌ها به‌ویژه در سه‌ماهه زمستان و بهار دارد.

همچنین نتایج نشان داد که بیشترین میزان بارش مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده توسط سناریوها مربوط به ماه مارس و بیشترین دمای کمینه و دمای بیشینه از آن جولای است [۲۴].
پژوهشی جهت پیش‌بینی تغییرات پارامترهای اقلیمی در دریاچه اوان انجام شده که از روش ریزمقیاس نمایی خروجی مدل‌های گردش عمومی جو با استفاده از مدل LARS-WG استفاده گردیده و تحلیل‌های لازم بر روی نتایج آن صورت پذیرفت. پس از انتخاب مدل گردش عمومی جو و سناریوی منطبق‌تر با شرایط اقلیمی منطقه، خروجی‌های مدل منتخب با دورهٔ پایه مقایسه شدند تا روند تغییرات آنها مشخص گردد. نتایج حاکی از کاهش میانگین بارندگی (۳۹/۹ میلیمتر)، افزایش دماهای کمینه و بیشینه (۰/۴ درجه سانتیگراد) و افزایش تعداد روزهای تر (۷ روز) و تعداد روزهای یخبندان (۵ روز) است. همچنین تعداد روزهای خشک (۷ روز) و تعداد روزهای داغ (۵ روز) در دوره اقلیمی ۲۰۳۰-۲۰۲۰ کاهش خواهد یافت [۲۵].

مواد و روش‌ها

۱-منطقه مورد مطالعه

شهرستان سقز در شمال‌غرب استان کردستان واقع شده و دارای مختصات جغرافیایی حدود ´۳۶°۱۴ تا ´۳۶°۳۰ عرض شمالی و ´۴۶°۱۰ تا ´۴۶°۳۰ طول شرقی است. ارتفاع متوسط این شهر حدود ۱۵۰۰ متر از سطح دریاست. سقز دارای اقلیم کوهستانی با زمستان‌های سرد و تابستان‌های معتدل بوده و میانگین بارندگی سالانه آن حدود ۴۰۰ تا ۵۰۰ میلی‌متر است [۱۰]. بخش قابل‌توجهی از بارش‌ها در فصول پاییز و زمستان رخ می‌دهد و در تابستان اغلب خشک است. این شرایط باعث می‌شود منطقه نسبت به تغییرات اقلیمی، به‌ویژه در حوزه کشاورزی و منابع آب، حساس باشد.

۲- داده‌های مورد استفاده

داده‌های مشاهداتی شامل داده‌های روزانه دمای حداقل، دمای حداکثر ، بارش و میزان تشعشع آفتاب از ایستگاه سینوپتیک سقز برای دوره پایه (۱۹۸۵–۲۰۱۴) استخراج شد. داده‌های مدل‌های اقلیمی نیز خروجی مدل‌های گردش عمومی جو از گزارش ششم IPCC تحت سناریوهای مختلف مسیرهای اجتماعی–اقتصادی (SSPs) شامل SSP1-2.6 و SSP5-8.5 است. [۱]

۳- روش ریزمقیاس‌نمایی

فرایند ریزمقیاس‌نمایی در سه مرحله زیر انجام شده است

کالیبراسیون مدل که LARS-WG در این مرحله، داده‌های مشاهداتی روزانه از ایستگاه سقز به مدل داده شد تا پارامترهای آماری بارش و دما استخراج شوند .[۱۵]

اعتبارسنجی مدلکه با تولید داده‌های مصنوعی توسط مدل و مقایسه آن با داده‌های واقعی دوره پایه، دقت مدل ارزیابی شد. شاخص‌هایی نظیر میانگین، انحراف معیار و آزمون کولموگروف–اسمیرنوف برای بررسی تفاوت داده‌های شبیه‌سازی‌شده و مشاهداتی استفاده شدند[۱۷،۱۸]

اجرای سناریوهای آینده :داده‌های اقلیمی آینده بر اساس سناریوهایSSP ها به مدل داده شد و تغییرات دما و بارش در بازه‌ی میان‌مدت (۲۰۲۱–۲۰۵۰) بررسی شدند [۵،۶،۱۹]

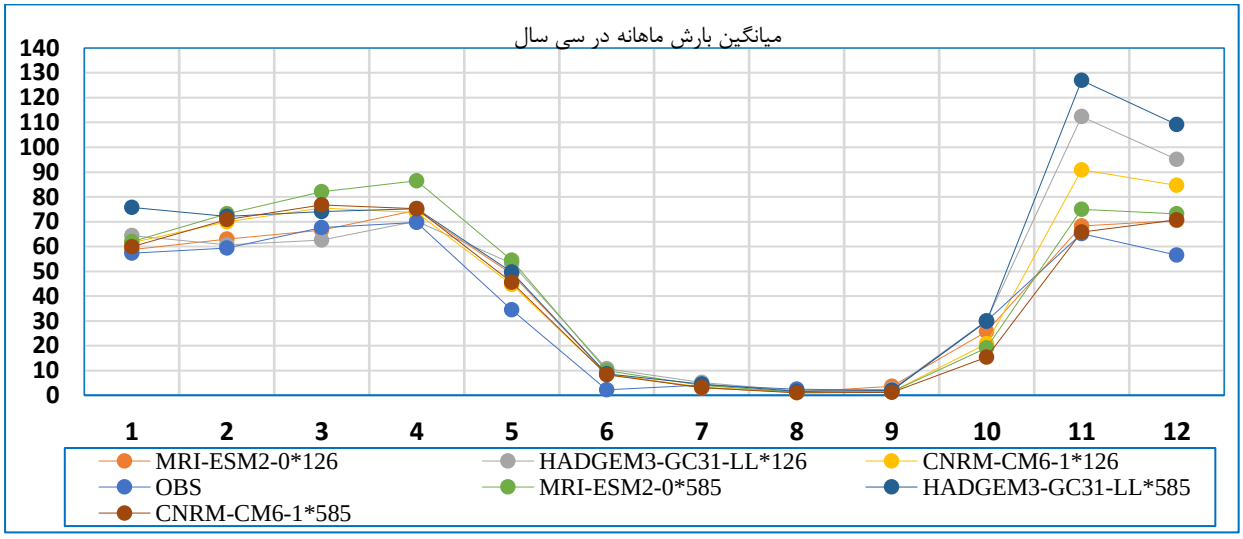
۴- شاخص‌های مورد بررسی

برای تحلیل اثرات تغییر اقلیم، شاخص‌های اقلیمی زیر مورد بررسی قرار گرفتند
تغییرات میانگین دمای حداقل و حداکثر سالانه و فصلی.
تغییرات مجموع بارش سالانه و فصلی.
بررسی تغییر در رخداد پدیده‌های حدی (مانند روزهای خشک متوالی یا بارش‌های سنگین روزانه) [۱۴،۱۹]

همچنین برای انجام این پژوهش، داده‌های اولیه هواشناسی از سایت سازمان هواشناسی کشور تهیه گردید. این داده‌ها در مقیاس روزانه بوده و چنانچه داده‌ای مفقود بود از عدد ۹۹- بجای آن استفاده شد. پس از مرتب‌سازی و آماده‌سازی داده‌ها، از سه مدل HADGEM3-GC31-LL ، MRI-ESM2-0 و CNRM-CM6-1 گزارش ششم ، بهره‌برداری شد. همچنین باتوجه به میزان واداشت تابشی، از دو سناریو خوش‌بینانه (SSP 126) و خیلی بدبینانه (SSP 585) استفاده شده است.

نتایج اصلی

پیش‌بینی‌های اقلیمی آینده بر اساس دو سناریوی خوشبینانه و بدبینانه در دوره پایه ۱۹۸۵-۲۰۱۴ با دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ ایستگاه هواشناسی سینوپتیک سقز مقایسه شد. (اشکال ۱تا۴)



شکل۱- میانگین بارش ماهانه شبیه سازی شده و پایه

در ماه‌های زمستان (دی، بهمن، اسفند): بارش در مشاهدات (OBS) در آذر و دی به اوج می‌رسد. مدل HADGEM3-GC31-LLتحت سناریوی SSP5-8.5 بیشترین افزایش بارش را در دی و آذر نسبت به مشاهدات نشان می‌دهد (بیش از ۱۲۰ میلی‌متر در دی). مدل‌ها به طور کلی بارش زمستان را بیشتر از مشاهدات پیش‌بینی کرده‌اند.

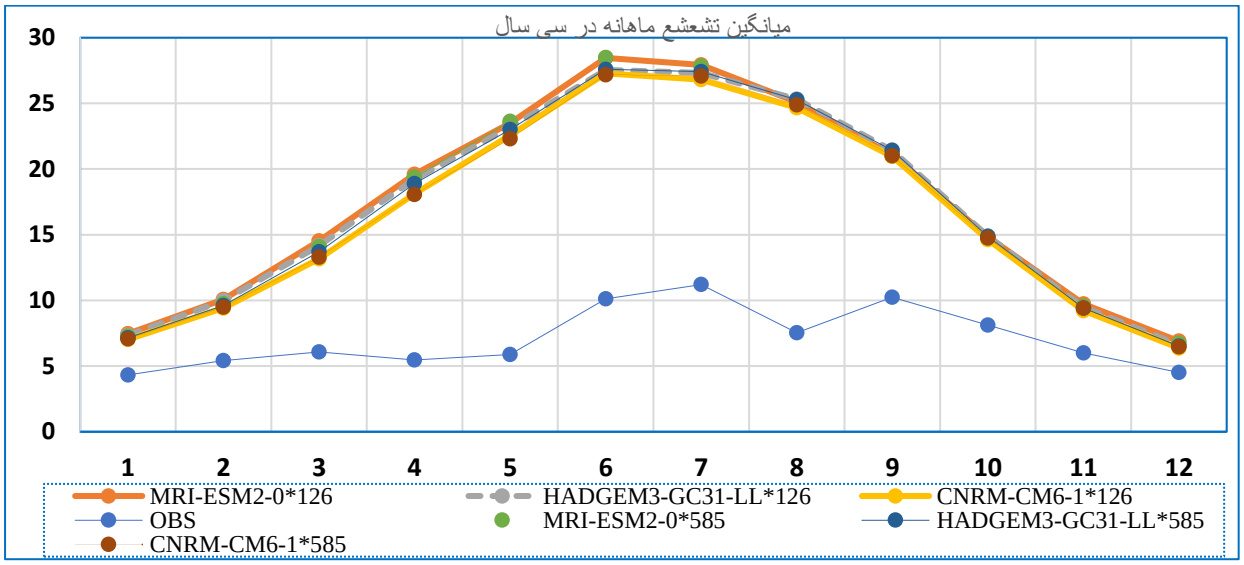
ماه‌های بهار (فروردین تا اردیبهشت):همه مدل‌ها روند مشابه مشاهدات را نشان می‌دهند اما مقدار بارش در مدل‌ها کمی بیشتر از داده‌های واقعی است (به‌خصوص MRI-ESM2-0 تحت SSP5-8.5 که بارش به حدود ۸۵ میلی‌متر در فروردین می‌رسد). این موضوع می‌تواند بیانگر تقویت بارش‌های بهاری در سناریوهای آینده باشد.

ماه‌های تابستان (خرداد تا شهریور): تقریباً همه مدل‌ها مقدار بارش بسیار کمی (زیر ۱۰ میلی‌متر) را شبیه‌سازی کرده‌اند که با داده‌های مشاهداتی همخوانی دارد. این نشان می‌دهد که تغییر اقلیم تأثیر چندانی بر الگوی خشک تابستانی منطقه ندارد.

در ماه‌های پاییز (مهر و آبان): در داده‌های مشاهداتی، بارش پاییز نسبتاً ملایم افزایش می‌یابد. مدل‌ها خصوصاً در سناریوی SSP5-8.5افزایش قابل‌توجهی نسبت به مشاهدات نشان می‌دهند (مثلاً HADGEM3 در آبان حدود ۷۰ میلی‌متر در مقابل حدود ۶۰ میلی‌متر مشاهداتی).

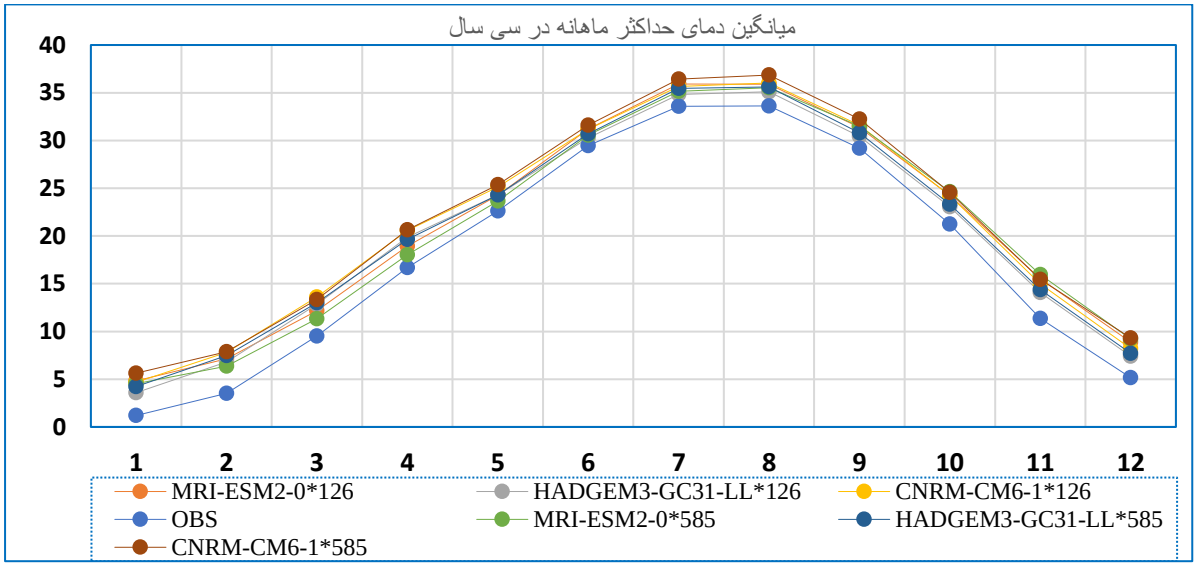
در کل، مدل‌ها نسبت به داده‌های مشاهداتی تمایل به بیش‌برآورد بارش در زمستان و بهار دارند. در تابستان تغییر چندانی مشاهده نمی‌شود و دوره خشک حفظ شده است. در پاییز، مدل‌ها افزایش بارش نسبت به دوره پایه را شبیه‌سازی می‌کنند.

تفاوت بین سناریوی کم‌انتشار (۱۲۶) و پُرانتشار (۵۸۵) بیشتر در شدت بارش‌های پاییز و زمستان دیده می‌شود، به طوری که سناریوی ۵۸۵ بارش‌های سنگین‌تری را نشان می‌دهد.



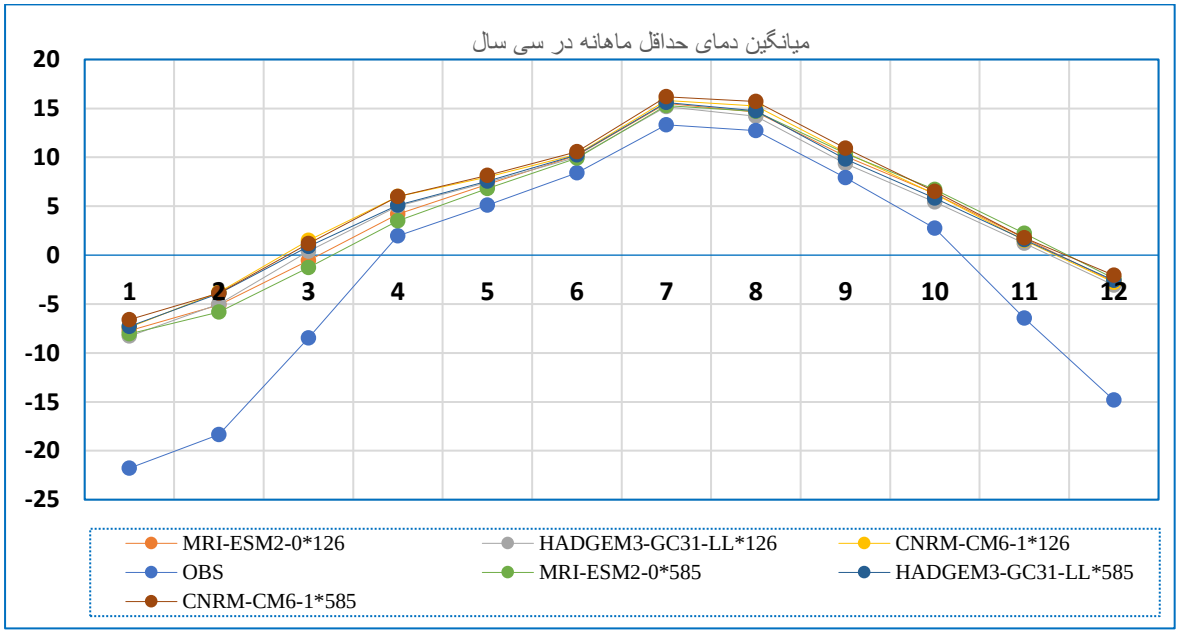
شکل۲- میانگین تشعشع آفتاب ماهانه شبیه سازی شده و پایه

داده‌های مشاهداتی (OBS) مقدار تشعشع را در محدوده‌ای بسیار پایین‌تر (حدود ۴ تا ۱۱ $MJ/m^2/day$) نسبت به مدل‌ها نشان می‌دهند. مدل‌ها یک الگوی منظم و صعودی از زمستان تا تابستان (دی تا تیر) و سپس نزولی تا آذر را شبیه‌سازی کرده‌اند که قله آن در تیرماه حدود 27–28 $MJ/m^2/day$است. همچنین مقدار تشعشع در مدل‌ها تقریباً دو تا سه برابر بیشتر از مقادیر مشاهداتی است. این اختلاف در همه ماه‌ها دیده می‌شود، اما در ماه‌های تابستان (خرداد تا مرداد) شدت بیشتری دارد. در بررسی سناریوهای اقلیمی اختلاف زیادی بین دو سناریو دیده نمی‌شود؛ هر دو سناریو الگوی تقریباً مشابهی را نشان می‌دهند. این مسئله بیانگر آن است که تغییرات انتشار گازهای گلخانه‌ای در این مدل‌ها تأثیر چندانی بر میانگین تشعشع شبیه‌سازی‌شده نداشته و بیشترین تفاوت ناشی از ساختار مدل‌ها در مقایسه با داده‌های واقعی است. همچنین در همه ماه‌ها، مدل‌ها مقدار تشعشع خورشیدی بیشتری از مقادیر مشاهداتی ارائه می‌دهند. اوج تشعشع در تیرماه است و کمترین مقدار در دی و بهمن دیده می‌شود.



شکل۳- میانگین دمای حداکثر ماهانه شبیه سازی شده و پایه

هر دو داده مشاهداتی و مدل‌ها روند مشابهی دارند: افزایش دما از زمستان به تابستان (دی تا مرداد) و اوج دما در تیر و مرداد (حدود ۳۶–۳۸ درجه در مدل‌ها، در حالی که مشاهدات حدود ۳۴–۳۵ درجه نشان می‌دهد) همچنین کاهش مجدد دما از شهریور به زمستان. در همه ماه‌ها، مدل‌ها دمای حداکثر را بالاتر از داده‌های واقعی شبیه‌سازی کرده‌اند. این اختلاف در ماه‌های زمستان (دی و بهمن) و تابستان (تیر و مرداد) بیشتر مشهود است. در زمستان، مدل‌ها حدود ۲–۳ درجه گرم‌تر از مقادیر مشاهداتی هستند. در تابستان، اختلاف به حدود ۲–۴ درجه می‌رسد. در بررسی تفاوت بین سناریوها (۱۲۶ در برابر ۵۸۵) سناریوی SSP5-8.5 (انتشار بالا) دماهای حداکثر بیشتری نسبت به SSP1-2.6 شبیه‌سازی کرده است. این اختلاف بیشتر در ماه‌های گرم (خرداد تا شهریور) قابل توجه است. مدل‌ها به‌طور کلی دارای بیش‌برآورد (Overestimation) دمای حداکثر هستند. افزایش دما در سناریوی ۵۸۵ نسبت به ۱۲۶ نشان می‌دهد که در صورت تداوم روند انتشار گازهای گلخانه‌ای، شدت گرمایش در آینده بیشتر خواهد شد. بیشترین تأثیر تغییر اقلیم در فصل تابستان مشاهده می‌شود که احتمالاً پیامدهایی مانند افزایش نیاز آبی، تشدید تبخیر و کاهش کارایی محصولات کشاورزی را به دنبال خواهد داشت. مدل‌ها نسبت به داده‌های مشاهداتی، دمای حداکثر را بالاتر شبیه‌سازی کرده‌اند. سناریوی SSP5-8.5 افزایش بیشتری نسبت به SSP1-2.6 دارد. اوج اختلاف در تابستان است که می‌تواند هشدار مهمی برای اثرات تغییر اقلیم در آینده باشد.



شکل۱- میانگین دمای حداقل ماهانه شبیه سازی شده و پایه

تمام مدل‌ها روند فصلی دمای حداقل را به خوبی نشان می‌دهند - کاهش دما در ماه‌های سرد (دی‌ماه به بعد) و افزایش در ماه‌های گرم. در ماه‌های سرد سال (بخصوص دی و بهمن) برخی مدل‌ها مانند HADGEM3-GC31-LL دمای حداقل را پایین‌تر از مشاهدات برآورد کرده‌اند. دقت در ماه‌های گرم :در ماه‌های گرم سال (اردیبهشت تا مهر) مدل‌ها به داده‌های مشاهداتی نزدیک‌تر هستند.

تحلیل اثر سناریوهای مختلف

الف) سناریو ۵۸۵ - (SSP5-8.5) انتشارات بالا : در اکثر ماه‌ها، مدل‌ها تحت این سناریو دمای حداقل بالاتری را نسبت به سناریو ۱۲۶ پیش‌بینی می‌کنند. این تفاوت بخصوص در ماه‌های سرد سال مشهودتر است، که نشان‌دهنده تأثیر بیشتر تغییرات اقلیمی بر تعدیل سرمای زمستانه است.

ب) سناریو ۱۲۶ - (SSP1-2.6) انتشارات پایین : پیش‌بینی‌های دمایی در این سناریو به داده‌های مشاهداتی نزدیک‌تر است. این سناریو افزایش کمتری در دمای حداقل نشان می‌دهد، بخصوص در ماه‌های گرم سال.

ماه‌های سرد (دی تا اسفند): مدل‌ها تحت سناریو ۵۸۵ افزایش محسوس‌تری در دمای حداقل نشان می‌دهند. این می‌تواند نشان‌دهنده کاهش روزهای یخبندان و تعدیل سرمای زمستانه تحت تأثیر تغییرات اقلیمی باشد.

ماه‌های گرم (فروردین تا مهر): افزایش دمای حداقل در تمام مدل‌ها مشاهده می‌شود، اما این افزایش تحت سناریو ۵۸۵ بارزتر است. این موضوع می‌تواند بر افزایش شب‌های گرم و تأثیر بر سلامت عمومی و مصرف انرژی دلالت داشته باشد.

بررسی عملکرد مدل‌های مختلف

MRI-ESM2-0 در هر دو سناریو رفتار نسبتاً مشابهی دارد، اما تحت سناریو ۵۸۵ افزایش دمای بیشتری نشان می‌دهد.

CNRM-CM6-1 تمایل به پیش‌بینی دمای حداقل بالاتر در ماه‌های سرد دارد.

HADGEM3-GC31-LL در ماه‌های سرد، پیش‌بینی‌های سردتری نسبت به سایر مدل‌ها دارد.

نتیجه‌گیری نهایی

تأیید تغییرات اقلیمی :تمام مدل‌ها افزایش دمای حداقل را در آینده پیش‌بینی می‌کنند.

اثر سناریوهای انتشار :سناریوی SSP5-8.5 منجر به افزایش بیشتر دمای حداقل می‌شود، بخصوص در ماه‌های سرد.

اهمیت کاهش انتشارات :تفاوت بین سناریوها اهمیت اقدامات تغییرات اقلیمی را نشان می‌دهد.

کاربردهای عملی :این نتایج برای مدیریت کشاورزی، منابع آب، برنامه‌ریزی انرژی و سلامت عمومی حائز اهمیت است.

این تحلیل نشان می‌دهد که نرم‌افزار لارس ابزار مناسبی برای شبیه‌سازی تغییرات دمای حداقل و ارزیابی سناریوهای مختلف اقلیمی است.

منابع

IPCC. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
Pachauri, R. K., & Meyer, L. A. (Eds.). (2014). *Climate change 2014: Synthesis report*. IPCC.
Trenberth, K. E., Dai, A., van der Schrier, G., Jones, P. D., Barichivich, J., Briffa, K. R., et al. (2014). Global warming and changes in drought. *Nature Climate Change, 4*(1), 17–22.
Diffenbaugh, N. S., & Field, C. B. (2013). Changes in ecologically critical climate in the 21st century. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 110*(23), 9157–9162.
Rahimi, J., Khalili, A., & Abbaspour, K. (2011). Climate change impact assessment on hydrology of Karkheh River Basin, Iran. *International Journal of Climatology, 31*(1), 210–223.

Abbaspour, K. C., Faramarzi, M., Ghasemi, S. S., & Yang, H. (2009). Assessing the impact of climate change on water resources in Iran. *Water Resources Research, 45*(10), W10434.
Soltani, A., Hoogenboom, G., Bannayan, M., & Ghasemi, R. (2007). Assessing climate change impacts on wheat production in Iran using a simulation model. *Climatic Change, 80*(3–4), 411–433.
Zarrin, A., Ghaemi, H., Azadi, M., & Owlad, E. (2011). The effect of climate change on precipitation patterns in Iran. *Theoretical and Applied Climatology, 103*(3–4), 307–318.
Tabari, H., Abghari, H., & Hosseinzadeh Talaee, P. (2012). Temporal trends and spatial characteristics of drought and rainfall in Iran. *Hydrological Processes, 26*(22), 3351–3361.
Iranian Meteorological Organization (IRIMO). (2021). *Annual climatological reports of Saqqez synoptic station (1990–2020)*. IRIMO.
Giorgi, F., & Mearns, L. O. (1991). Approaches to the simulation of regional climate change: A review. *Reviews of Geophysics, 29*(2), 191–216.
Christensen, J. H., Hewitson, B., Busuioc, A., Chen, A., Gao, X., Held, I., et al. (2007). Regional climate projections. In *Climate change 2007: The physical science basis* (pp. 847–940). Cambridge University Press.
Wilby, R. L., & Wigley, T. M. L. (1997). Downscaling general circulation model output: A review of methods and limitations. *Progress in Physical Geography, 21*(4), 530–548.
Fowler, H. J., Blenkinsop, S., & Tebaldi, C. (2007). Linking climate change modelling to impacts studies: Recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. *International Journal of Climatology, 27*(12), 1547–1578.
Semenov, M. A., & Barrow, E. M. (2002). *LARS-WG: A stochastic weather generator for use in climate impact studies. User manual*. Rothamsted Research.
Semenov, M. A., & Stratonovitch, P. (2010). Use of multi-model ensembles from global climate models for assessment of climate change impacts. *Climatic Research, 41*(1), 1–14.
Mahmood, R., & Babel, M. S. (2013). Evaluation of SDSM and LARS-WG for simulation of climate change scenarios in the Jhelum River basin, Pakistan. *Climatic Research, 57*(2), 119–135.
Qian, B., Corte-Real, J., & Xu, H. (2004). Evaluating daily climate variables from general circulation models for climate change impact assessment. *Climatic Research, 26*(1), 47–62.
Khan, M. S., Coulibaly, P., & Dibike, Y. (2006). Uncertainty analysis of statistical downscaling methods. *Journal of Hydrology, 319*(1–4), 357–382.
Jahanbakhsh Asl, S., Khorshid-Doust, A., Alinajad, M., & Pourasghar, H. (2016). [The impact of climate change on temperature and precipitation considering model and scenario uncertainties (Case study: Shaharchai Basin, Urmia)] *Hydrogeomorphology, 3*(7), 107–122. (in Persian)
Salahi Broomand, A., & Ghodrati, Z. (2018). [Prediction and analysis of heat waves in Zanjan city using LARS-WG and Baldi index]. (in Persian)
Mesgari, E., Hosseini, S. A., Hemmesy, M. S., Houshyar, M., & Partoo, L. G. (2022). Assessment of CMIP6 models' performances and projection of precipitation based on SSP scenarios over the MENAP region. *Journal of Water and Climate Change, 13*(10), 3607–3619.
Hejazizadeh, Z., Hosseini, S. M., & Karbalaee Dorei, A. (2015). The simulation of climate change in Semnan province with scenarios of atmospheric general circulation model (Hadcm3). *Journal of Geography and Environmental Hazards, 4*(3), 1–24.
Kazemi Rad, L., & Modaberi, H. (2023). Evaluation of climatic parameters in Evan Lake affected by climate change. *Journal of Environmental Science Studies, 8*(3), 6936–6942.

Khoorani, A., & Jamali, Z. (2016). Effects of climate change on drought duration and severity in arid and semi-arid stations (Bandarabbass and Shahrekord), based on HADCM3 model. *Geography and Planning*, *20*(57), 115–131.

The assessment of climate change impacts on climatic parameters of Saqqez city using LARS-WG downscaling based on the IPCC Sixth Assessment Report

Yashar mohammadi [1], Ebrahim mesgari[2]

Ph.D. Candidate in Civil Engineering (Environmental Engineering), Faculty of Engineering, University of Urmia, Urmia, Iran
Ph.D. in Climatology, Faculty of Geography and Environmental Planning, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran
* Corresponding author: yasharm669@gmail.com

ABSTRACT

Climate change is one of the most critical environmental challenges of the present century, leaving widespread impacts on water resources, agriculture, health, and ecosystem sustainability. The increase in greenhouse gas concentrations caused by human activities over recent decades has led to significant changes in mean temperature and precipitation patterns at both global and regional scales. Iran, with its semi-arid climate and high vulnerability to temperature and precipitation changes, is considered one of the sensitive regions of the world. Kurdistan Province and Saqqez County, with a mountainous climate, predominantly winter precipitation, and strong dependence on water resources, are also exposed to the threats of climate change. This study was conducted to assess the impacts of climate change in Saqqez County. For this purpose, the statistical downscaling model LARS-WG and data from General Circulation Models (GCMs) of the Intergovernmental Panel on Climate Change Sixth Assessment Report (IPCC AR6) under different emission scenarios were employed. Daily precipitation and temperature data from the Saqqez synoptic station were extracted for the baseline period and, after calibration and validation of the model, were applied for future simulations. The results indicated that temperature increase is inevitable under all scenarios, and seasonal precipitation changes may have significant implications for the region's water resources and agriculture.

Keywords: Downscaling, Climate Change, LARS-WG, Sixth Assessment Report, Saqqe

بررسی تغییرات بارش‌های فرین در حوضه دریاچه ارومیه در بازه زمانی ۲۰۲۴-۱۹۹۵

نرگس صالح[۱]، مریم قرایلو[۲]، مجید مزرعه فراهانی[۳] و اصغر بهلولی[۴]

۱- دانشجوی دکتری هواشناسی، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران
۲- دانشیار، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران
۳- دانشیار، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران
٤- استادیار، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران
آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول (nargess.saleh@ut.ac.ir)

چکیده

دریاچه ارومیه و مناطق پیرامون آن از مناطق حساس اکولوژیکی ایران است که تغییر در بارش‌های فرین می‌تواند پیامدهای جدی برای مدیریت منابع آب و افزایش خطر وقوع سیلاب‌ها در این منطقه به‌همراه داشته باشد. در این پژوهش با استفاده از داده‌های بازتحلیل ERA5 با تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه طی سال‌های آبی ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۴، تغییرات شدت و فراوانی روزهای بارش فرین بررسی شد. شاخص شدت به‌صورت R95p (جمع بارش روزهای بالاتر از صدک ۹۵ روزهای تَر با آستانه ۱ میلی‌متر در هر سال) و فراوانی به‌صورت نسبت روزهای فرین محاسبه شد. داده‌ها در مقیاس سالانه، فصلی تحلیل و برای چهار ایستگاه اطراف دریاچه با روش درون‌یابی استخراج شد. روندها با رگرسیون خطی ساده بر حسب میلی‌متر/دهه و روز/دهه محاسبه و در سطح اطمینان ۹۵ درصد ارزیابی شدند. نتایج نشان داد که روندها به‌طور کلی ناهمگن و عمدتاً معنی‌دار نیستند؛ با این حال زمستان بیشترین پیوستگی مکانی را داشته و در برخی نقاط افزایش معنی‌دار شدت بارش‌های فرین مشاهده شد. در مقابل، تغییرات فراوانی محدود و پراکنده باقی ماند. بررسی سری‌های زمانی ایستگاه‌ها نیز نوسانات بین‌سالی را بدون روند یکنواخت قوی، تأیید کرد. در مجموع، شواهدی از افزایش شدت بارش‌های سنگین زمستانی به‌دست آمد، اما تغییرات فراوانی کمتر قابل اتکا بود. این نتایج با ارائه تصویری چندمقیاسی از بارش‌های فرین می‌تواند مبنایی برای ارزیابی آسیب‌پذیری و تدوین راهبردهای سازگاری در حوضه ارومیه فراهم سازد.

کلید واژه‌ها : بارش فرین، شاخص R99p، روند، دریاچه ارومیه، ERA5.

مقدمه

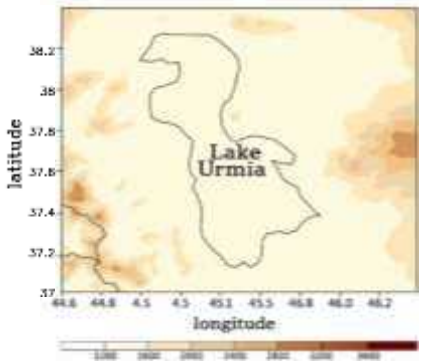
بارش‌های فرین در اقلیم نیمه‌خشک ایران نقشی تعیین‌کننده در بروز سیلاب و ایجاد تنش بر منابع آب دارند و حوضه دریاچه ارومیه از این نظر بسیار حساس است. بااین‌حال، شواهد موجود درباره جهت و شدت تغییرات یکنواخت نیست. عزیززاده و جوان (۲۰۱۸) افزایش روزهای خشک متوالی و کاهش شاخص‌های بارش سنگین را گزارش کرده‌اند. جوان و همکاران (۲۰۲۳) نیز بر پایه خروجی‌های CMIP5، کاهش شاخص‌های فرین و تشدید خشکی تا پایان قرن را نشان داده‌اند. در مقابل، فکور و همکاران (۲۰۲۵) با داده‌های ERA5 از افزایش معنی‌دار رخدادهای سنگین -به‌ویژه در پاییز- و احتمال رخداد سیلاب ناگهانی خبر داده‌اند و موسوی و همکاران (۲۰۲۴) به نقش تقویتی دریاچه ارومیه در همرفت تابستانه شرق حوضه اشاره کرده‌اند. این ناهمخوانی‌ها-برآمده از تفاوت مقیاس‌ها و داده‌ها- ضرورت یک ارزیابی نظام‌مند و چندمقیاسی از فراوانی و مقدار بارش‌های فرین را در شمال‌غرب ایران برجسته می‌کند. پژوهش حاضر با تکیه بر داده‌های ERA5 و شاخص‌های صدکی (P95، R95p)، روندهای ۱۹۹۵–۲۰۲۴ را در مقیاس‌های سالانه–فصلی–ماهانه بررسی می‌کند تا مبنایی برای مدیریت خطرپذیری و برنامه‌ریزی منابع آب در حوضه ارومیه را فراهم سازد.

مواد و روش ها

منطقه مورد مطالعه

دریاچه ارومیه که بزرگ‌ترین دریاچه ایران است و در سال‌های اخیر سطح آب آن دستخوش تغییرات فراوانی شده از اهمّیّت بالایی برخوردار است. این دریاچه در شمال غرب ایران و در محدودهٔ جغرافیایی ۴۴/۳۳ درجه تا ۴۷/۵۳ درجه شرقی و ۳۵/۴۰ درجه تا ۳۷/۲۹ درجه شمالی قرار دارد. این دریاچه بین دو استان آذربایجان غربی و آذربایجان شرقی گسترده شده است و در ارتفاعی حدود ۱۲۷۳ متر از سطح دریا واقع شده است. حدود سه دهه پیش، این دریاچه با مساحت تقریبی حدود ۵۲۰۰ کیلومتر مربع، دومین دریاچه بزرگ فوق اشباع از نمک جهان بود. این دریاچه، با بیشینه عمق حدود ۱۶ متر، در دسته دریاچه‌های کم‌عمق قرار دارد. علاوه بر این، این دریاچه، حوزه آب‌شناختی بسته و بدون خروجی است و سطح آب این دریاچه فقط توسط جریان‌های ورودی، مقدار بارش و تبخیر سطحی تنظیم می‌شود (ایمانی فر و محبی، ۲۰۰۷). مطالعات نشان می‌دهد که مساحت دریاچه در دهه‌های اخیر تا ۸۸٪ کاهش یافته و هم‌زمان با افزایش دما و کاهش بارندگی، ظرفیت گرمایی و تراز آبی آن به شدت اُفت کرده است (آقاکوچک و همکاران، ۲۰۱۵). از سال ۱۹۹۵ بیش از ۳۰۰۰ کیلومتر مربع از پهنه آبی خشک شده و جای خود را به رسوبات و ماسه داده است که تغییرات قابل‌توجهی در دما، تبخیر و ویژگی‌های سطح زمین ایجاد کرده است (سیادت موسوی و سیدعلی‌پور، ۲۰۱۹).این حوضه حدود ۵۵٪ پوشش مرتعی و ۳۰٪ اراضی کشاورزی دارد و نزدیک به ۶۰٪ اقتصاد منطقه بر کشاورزی متکی است (داورپناه و همکاران، ۲۰۲۱). طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ سطح باغ‌های آبی بیش از ۶۸ هزار هکتار افزایش یافته و در کنار توسعه سدسازی و کاهش بارش، از عوامل اصلی اُفت سطح آب دریاچه بوده است (خزائی و همکاران، ۲۰۱۹). در نتیجه سطح آب بیش از ۶ متر نسبت به اوج تاریخی و حدود ۳ متر پایین‌تر از سطح اکولوژیک کاهش یافته است. علاوه بر این، در فاصله ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۵ میزان تبخیر اراضی کشاورزی (۵۱۱۰ میلیون مترمکعب) از مجموع تبخیر سطح دریاچه و پهنه‌های نمکی اطراف (۳۸۶۸ میلیون

مترمکعب) بیشتر بوده است (توریان و همکاران، ۲۰۱۵؛ خزائی و همکاران، ۲۰۱۹). شکل ۱ محدوده مورد مطالعه در این تحقیق را نمایش می‌دهد.



شکل ۱- نقشهٔ ارتفاع از سطح دریا در منطقه مورد مطالعه با استفاده از نوار رنگی (برگرفته از کار بهروش و همکاران، ۲۰۲۰)

داده‌ها

در این پژوهش از داده‌های بازتحلیل ERA5، محصول مرکز اروپایی پیش‌بینی میان‌مدت هواشناسی (ECMWF) استفاده شد. ERA5 نسل جدید بازتحلیل‌های اقلیمی است که در مقایسه با نسخه‌های پیشین مانند ERA-Interim، دارای تفکیک زمانی و مکانی بالاتر و همگنی بیشتر در سطح جهانی است (Hersbach et al., 2020). این داده‌ها با تفکیک افقی ۰/۲۵°×۰/۲۵° و گام زمانی ساعتی ارائه می‌شوند و متغیّر بارش سطحی تجمعی (tp) پس از تبدیل به میلی‌متر و تجمیع روزانه، به‌عنوان متغیّر پایه در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفت. انتخاب ERA5 به دلیل دقّت بالا، دسترس‌پذیری رایگان و پوشش یکنواخت مکانی آن در مناطق فاقد شبکه مشاهداتی متراکم انجام شد.

روش انجام کار

به منظور محاسبه شاخص فرین R95p (بارش تجمعی روزهایی که بارش روزانه از صدک ۹۵ فراتر رفته است) و بررسی روندهای مرتبط، دوره مرجع ۳۰ ساله (دسامبر ۱۹۹۴ تا نوامبر ۲۰۲۴) در نظر گرفته شد. انتخاب بازهٔ ۳۰ ساله مطابق توصیه‌های سازمان جهانی هواشناسی (WMO) برای استانداردسازی مطالعات اقلیمی است. در این چارچوب، سال‌ها به‌صورت سال آبی تعریف شدند؛ بدین معنی که دسامبر هر سال به سال بعد منتسب گردید (برای مثال، دسامبر ۱۹۹۴ همراه با ژانویه و فوریه ۱۹۹۵ به‌عنوان زمستان سال آبی ۱۹۹۵ در نظر گرفته شد (Hersbach et al., 2020).

برای تحلیل تغییرات صدک ۹۵ در طول زمان، نقشه‌های سالانه و فصلی ترسیم شدند. همچنین به‌منظور بررسی دقیق‌تر درصد فراوانی روزهای فرین، چهار ایستگاه شاخص در محدوده حوضه انتخاب شد. از آنجا که مختصات ایستگاه‌ها دقیقاً بر روی نقاط شبکه ERA5 منطبق نیستند، داده‌ها با استفاده از روش درون‌یابی Bilinear از شبکه به مختصات ایستگاه‌ها منتقل شدند. این روش با وزن‌دهی معکوس فاصله به چهار نقطه مجاور شبکه، برآورد مناسبی از مقدار متغیّر در مکان ایستگاه ارائه می‌دهد و از روش‌های متداول در پژوهش‌های اقلیم‌شناسی مبتنی بر داده‌های بازتحلیل است. مختصات

ایستگاه‌های مورد بررسی در جدول ۱ آمده‌اند.

جدول۱- مختصات شهرهای مورد بررسی

ایستگاه	عرض جغرافیایی (درجه)	طول جغرافیایی (درجه)	ارتفاع از سطح دریا (متر)
شبستر	۳۸/۱۸	۴۵/۷۰	۱۴۰۰
مراغه	۳۷/۲۴	۴۶/۱۵	۱۴۷۷
نقده	۳۷	۴۵/۴۷	۱۳۳۰
ارومیه	۳۷/۵۵	۴۵/۰۸	۱۳۳۲

شاخص R95p

برای بررسی رخدادهای بارش حدی، شاخص R95p محاسبه شد. این شاخص مجموع بارش روزهایی است که بارش آنها از صدک ۹۵ بارش روزانه در دوره مبنا (۱۹۹۵–۲۰۲۴) بیشتر باشد. صدک ۹۵ تنها بر اساس داده‌های روزهای مرطوب در دوره مبنا محاسبه می‌شود و در کل بازه زمانی به صورت آستانه‌ای ثابت باقی می‌ماند. این روش امکان مقایسه مستقیم تغییرات مقدار بارش‌های فرین را در طول زمان فراهم می‌سازد و با استانداردهای جهانی ETCCDI سازگار است (Donat et al., 2013 ؛Alexander et al., 2006).

اگر $RR_{w,j}$ مقدار بارش روزانه در روز w از سال j باشد و RR_{95}^{ref} صدک ۹۵ بارش روزانه (در روزهای مرطوب دوره مبنا) باشد، آنگاه:

$$R95_{p_j} = \sum_{\substack{w \in year\ j \\ RR_{w,j} > RR_{95}^{ref}}} RR_{w,j} \qquad (۱)$$

که در آن $R95_{p_j}$ مجموع بارش سالانه برای تمام روزهای مرطوب در سال j هست که در آن روزها مقدار بارش از حد صدک ۹۵ در دوره مبنا فراتر رفته باشد.

به منظور درک بهتر تغییرات شدت بارش‌های حدی، علاوه بر R95p استاندارد، صدک ۹۵ بارش روزانه به صورت متغیّر نیز محاسبه شد. در این رویکرد:

برای هر سال، صدک ۹۵ بارش روزانه (تنها بر اساس روزهای مرطوب همان سال) محاسبه گردید. برای هر فصل، صدک ۹۵ بارش روزانه در کل بازه ۳۰ ساله به‌دست آمد؛ بنابراین برای هر فصل یک آستانه جداگانه به‌دست آمد (بهار، تابستان، پاییز، زمستان). اگر $RR_{95}(j)$ صدک ۹۵ روزهای مرطوب در سال j باشد، آنگاه شاخص سالانه $R95_p$ برای سال j به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$R95_{p_j}^{annual} = \sum_{\substack{w \in year\ j \\ RR_{w,j} > RR_{95}(j)}} RR_{w,j} \quad (۲)$$

که در آن $RR_{w,j}$ مقدار بارش روزانه روز w از سال j است.

اگر $R99_{95}^{season}$ صدک ۹۵ بارش روزانه در یک فصل خاص طی کل دوره مبنا باشد، آنگاه شاخص $R95_p$ فصلی برای سال j به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$R95_{p_{season\ j}} = \sum_{\substack{w \in season\ of\ year\ j \\ RR_{w,j} > RR_{95}^{season}}} RR_{w,j} \quad (۳)$$

این روش امکان تحلیل تفکیکی سهم بارش‌های حدی در هر فصل را فراهم می‌کند و برای کشوری مانند ایران که تفاوت اقلیمی فصل‌ها بارز است، بسیار کاربردی است. این تحلیل امکان ارزیابی جابجایی آستانه رخدادهای حدی در طول زمان و فصول مختلف را فراهم می‌سازد که مکمل بررسی شاخص R95p خواهد بود (Donat et al., 2013 ؛Zhang et al., 2011).

به این ترتیب، دو رویکرد موازی در این پژوهش دنبال شده است:

۱. استفاده از تعریف استاندارد R95p برای مقایسه مستقیم با مطالعات بین‌المللی.

۲. محاسبه صدک متغیّر ۹۵ برای هر سال و فصل به منظور آشکارسازی تغییرات بالقوه در سطح آستانهٔ رخدادهای حدی.

روند تغییرات شاخص‌ها

به‌منظور برآورد روند تغییرات مقدار و فراوانی بارش‌های فرین، از رگرسیون خطی حداقل مربعات (OLS) بر روی سری زمانی سالانه/فصلی/ماهانه شاخص‌ها در دوره ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۴ استفاده شد. شیب خط به‌عنوان آهنگ تغییرات در مقیاس هر دهه محاسبه شد. معنی‌داری آماری روندها بر اساس آزمون t برای شیب رگرسیون و در سطوح اطمینان ۹۵٪ (p-value≤0.05) مورد ارزیابی قرار گرفت.

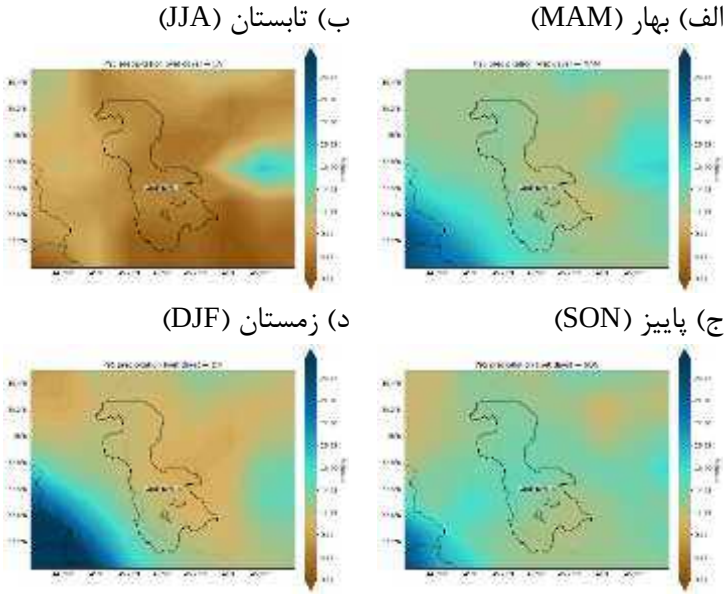
علاوه بر نقشه‌های مکانی، برای چهار ایستگاه منتخب در محدوده حوضه، نمودارهای زمانی نیز ترسیم شد. در این نمودارها، تغییرات مقدار صدک ۹۵ (p95) در هر سال آبی و همچنین درصد فراوانی روزهای با بارش فرین طی دوره ۳۰ ساله نشان داده شد. محاسبه این مقادیر به این صورت انجام گرفت که ابتدا آستانه ثابت صدک ۹۵ در بازه مرجع تعیین شد و سپس در هر سال تعداد روزهایی که بارش آن‌ها از این آستانه بیشتر بوده محاسبه شدند. نسبت این روزها به کل روزهای فرین دوره به‌عنوان درصد فراوانی و مجموع بارش‌های فراتر رفته به‌عنوان شدت شاخص R95p در هر سال گزارش شد.

نتایج

صدک ۹۵ بارش

تحلیل صدک ۹۵ بارش روزهای تَر (شکل ۲) نشان داد که بیشترین شدت بارش‌های فرین در زمستان و بهار رخ می‌دهد و در تابستان به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد. در پاییز نیز الگو مشابه زمستان اما با شدت کمتر است. این نتایج با نقش

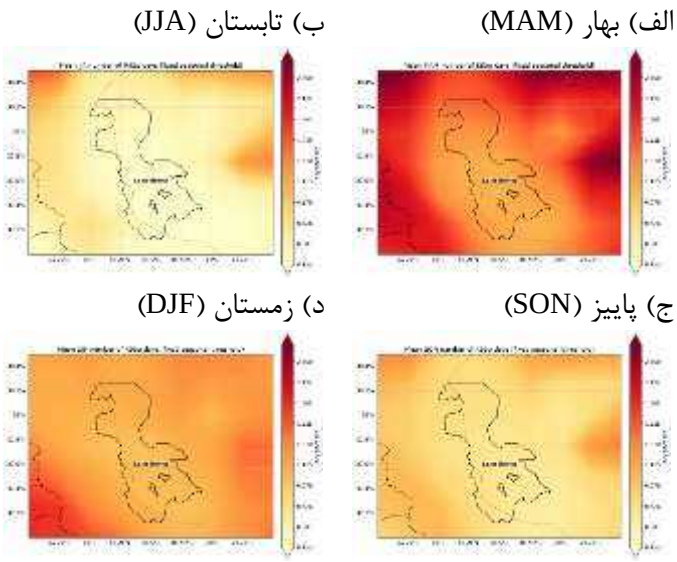
سامانه‌های مدیترانه‌ای و پرفشار جنب‌حاره‌ای در شکل‌گیری بارش‌های شدید در شمال‌غرب ایران سازگار است (Tabari & Willems, 2018). ناهمگنی مکانی پیرامون دریاچه عمدتاً به توپوگرافی وابسته است، هرچند احتمال اثر تعدیل محلی دریاچه نیز مطرح بوده و نیازمند مطالعات تکمیلی است (Steenburgh et al., 2000).



شکل ۲- صدک ۹۵ بارش منطقه در دوره زمانی مورد مطالعه (۱۹۹۵-۲۰۲۴) در فصول مختلف بر حسب میلی‌متر برای الف) بهار، ب) تابستان، ج) پاییز و د) زمستان

نمایش فراوانی بارش فرین

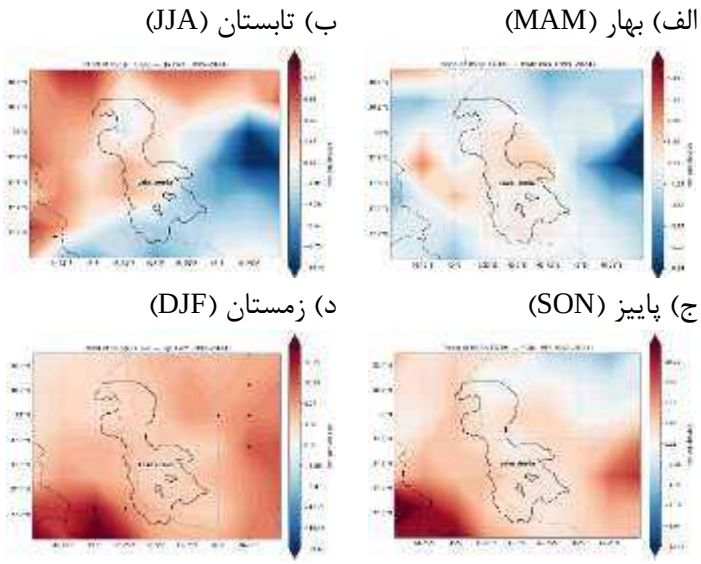
میانگین تعداد روزهای بارش فرین (R95p) در حوضه دریاچه ارومیه (شکل ۳) نشان داد که بیشترین رخداد در بهار (بیش از ۲ روز در هر فصل) و سپس زمستان اتفاق می‌افتد، در حالی‌که در تابستان و پاییز مقدار آن به‌طور محسوسی کمتر است. این الگو با نقش سامانه‌های مدیترانه‌ای در فصول سرد و خشک‌بودن
تابستان‌های منطقه تحت سلطه پرفشار جنب‌حاره‌ای مطابقت دارد. همچنین با مطالعات معتمدی و همکاران (۲۰۲۳) درباره افزایش نوسان‌های تَر و خشک و تمرکز رخدادهای شدید در فصول سرد همخوان است. مطالعه مهبد (۲۰۲۱) نیز کاهش نسبی فراوانی رخدادهای فرین در بهار را گزارش کرده، هرچند این کاهش در کل منطقهٔ ایران معنی‌دار نبوده است.



شکل ۳- میانگین فصلی فراوانی رخدادهای بارش فرین در دوره مورد مطالعه برای الف) بهار، ب) تابستان، ج) پاییز و د) زمستان

روند تغییرات مجموع سالیانه بارش فرین

روند رگرسیونی مجموع بارش‌های فرین (R95pTOT) طی ۱۹۹۵–۲۰۲۴ (شکل ۴) نشان داد که زمستان دارای روند افزایشی معنی‌دار به‌ویژه در جنوب و غرب حوضه است، در حالی که بهار روند کاهشی غیرمعنی‌دار دارد.



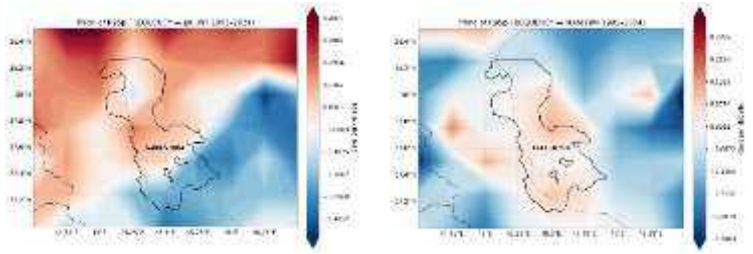
شکل ۴- روند رگرسیونی مجموع بارش‌های فرین (R95pTOT) طی ۱۹۹۵–۲۰۲۴ در فصول مختلف. نقاط معرف معنی‌داری اماری ۹۵٪ می‌باشند.

در تابستان و پاییز تغییرات پراکنده و عمدتاً فاقد معنی‌داری آماری مشاهده شد. این نتایج با یافته‌های پیشین مبنی بر افزایش بارش‌های شدید زمستانی و کاهش بارش‌های بهاری در شمال‌غرب ایران همخوان است (مدرس و سرحدی، ۲۰۱۱؛ رحیمی و فاطمی، ۲۰۱۹).

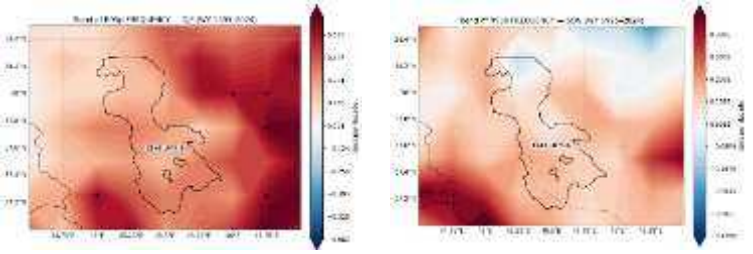
روند تغییرات فراوانی بارش فرین

روند رگرسیونی فراوانی روزهای فرین (R95pD) طی ۱۹۹۵–۲۰۲۴ (شکل ۵) نشان داد که زمستان دارای روند افزایشی معنی‌دار در بخش‌های جنوب غرب و شرق حوضه است که با نتایج فکور و همکاران (۲۰۲۵) و گیمه‌چی و همکاران (۲۰۲۵) همخوانی دارد، در حالی‌که بهار روند کاهشی معنی‌داری ندارد که با یافته‌های مهبد (۲۰۲۱) در توافق است. تغییرات تابستان و پاییز عمدتاً پراکنده و فاقد معنی‌داری آماری است که احتمالاً به کمبود رخداد در این فصل‌ها بازمی‌گردد. این نتایج با مطالعات قبلی که افزایش رخدادهای بارش سنگین زمستانی و کاهش بارش‌های بهاری در شمال‌غرب ایران را گزارش کرده‌اند همخوان است.

(بهار MAM) (تابستان JJA)



(پاییز SON) (زمستان DJF)



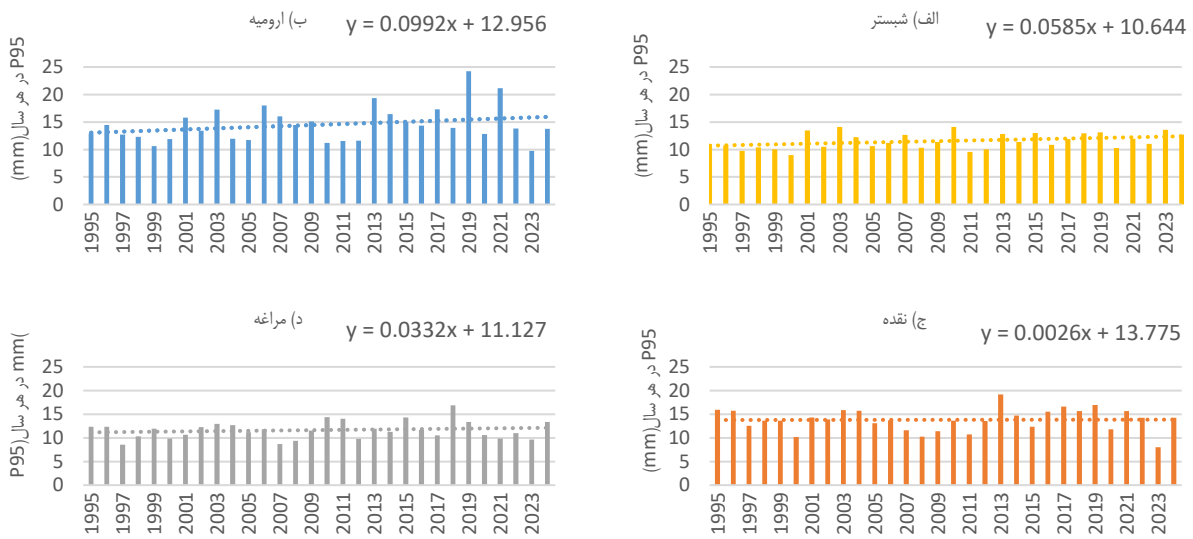
شکل ۵ - روند رگرسیونی فراوانی روزهای فرین (R95pD) طی ۱۹۹۵–۲۰۲۴. نقاط معرف معنی‌داری آماری ۹۵٪ هستند.

بررسی صدک ۹۵، R95p و درصد فراوانی رخدادهای فرین برای هر سال در ایستگاه‌های منتخب

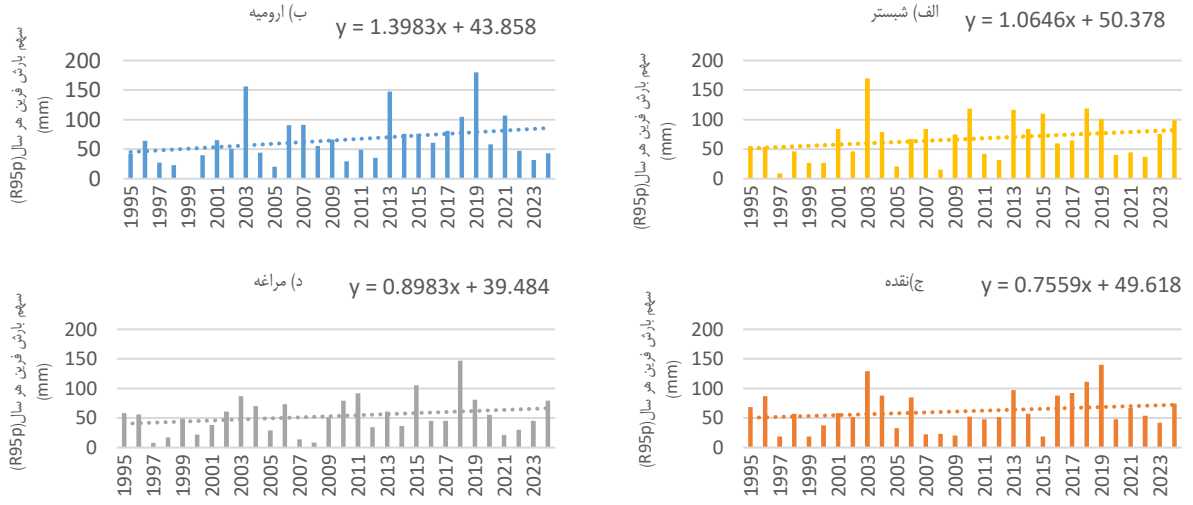
سری‌های سالانه صدک ۹۵ بارش روزانه (P95) برای چهار ایستگاه پیرامون دریاچه ارومیه طی ۱۹۹۵–۲۰۲۴ (شکل ۶) همگی خط روند مثبتی را نشان می‌دهند. ارومیه بیشترین افزایش، سپس شبستر، مراغه و نقده، افزایش ملایم‌تری دارند. نوسان‌های بین‌سالی بزرگ است، زیرا P95 هر سال بر مبنای روزهای تَر همان سال برآورد شده است. این الگو با شواهد جهانی و منطقه‌ایِ شدیدتر شدن بارش‌های حدی در بسیاری از نواحی (IPCC AR6, Ch.11؛Westra et al., 2013) و با مطالعات ایران که برای شمال غرب در فصول سرد/بهار افزایش شدت وقایع سنگین یا تغییرپذیری زیاد را گزارش کرده‌اند، سازگار است (مدرس و سرحدی، ۲۰۱۱؛ رحیمی و فاطمی، ۲۰۱۹؛ Zittis et al., 2021).

نتایج سری‌های سالانه (شکل ۷) نشان داد که سهم بارش‌های فرین (R95p) در چهار ایستگاه پیرامون دریاچه ارومیه طی ۱۹۹۵–۲۰۲۴ روند افزایشی داشته است. این روند در ایستگاه‌های ارومیه و شبستر پررنگ‌تر است، در حالی‌که نقده و مراغه نیز افزایش ملایم‌تری نشان می‌دهند. این یافته‌ها با مطالعات پیشین دربارهٔ افزایش سهم رخدادهای بارش شدید در شمال‌غرب ایران (مهبد، ۲۰۲۱؛ فکور و همکاران، ۲۰۲۵؛ گیمه چی و همکاران، ۲۰۲۵) و گزارش‌های جهانی دربارهٔ افزایش نسبت بارش‌های حدی به بارش کل در مناطق خشک (Donat et al., 2016؛ تبری،۲۰۲۰) همخوان است.

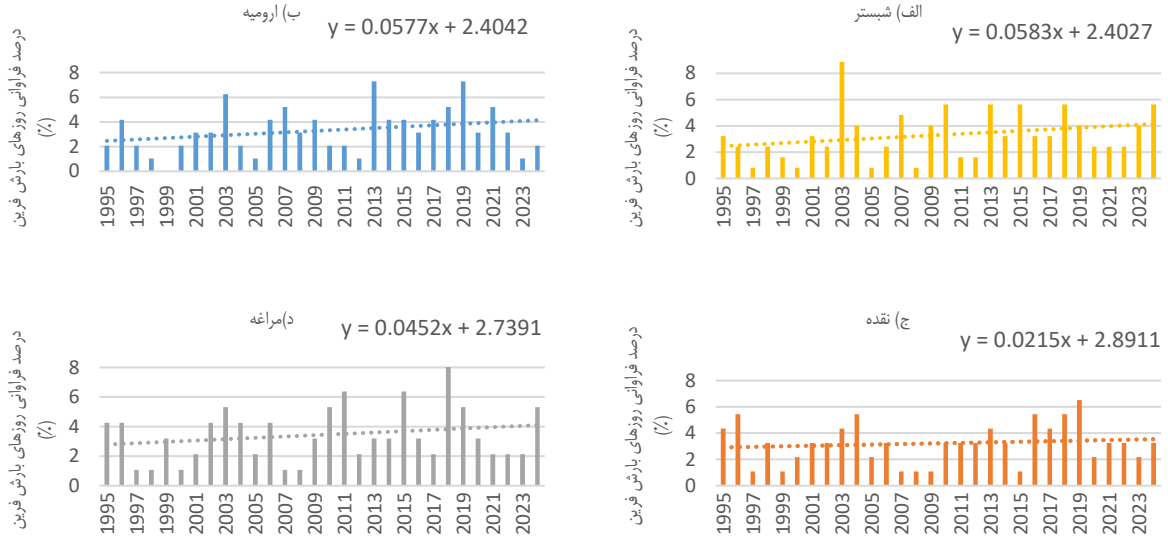
نتایج بررسی درصد فراوانی رخدادهای فرین (شکل ۸) در چهار ایستگاه مورد مطالعه (ارومیه، شبستر، مراغه و نقده) نشان می‌دهد که درصد فراوانی روزهای فرین(R95p days) طی ۱۹۹۵–۲۰۲۴ روندی افزایشی دارد. این افزایش در ایستگاه‌های شبستر و مراغه چشمگیرتر است. نتایج با مطالعات پیشین (مهبد، ۲۰۲۱؛ فکور و همکاران، ۲۰۲۵؛ Donat et al., 2016؛ Tabari & Willems, 2018) همخوان بوده است.



شکل ۶- نمودار صدک ۹۵ بارش هر سال (۱۹۹۵-۲۰۲۴) برای ۴ ایستگاه بر حسب میلی‌متر برای الف) شبستر، ب) ارومیه، ج)نقده و د) مراغه. خط چین معرف روند خطی می‌باشد.



شکل ۷ - نمودار R95p برای هر سال در ۴ ایستگاه بر حسب میلی‌متر برای الف) شبستر، ب) ارومیه، ج) نقده و د) مراغه. خط چین معرف روند خطی می‌باشد.



شکل ۸- نمودار درصد فراوانی روزهای بارش فرین (٪) برای هر سال در ۴ ایستگاه برای الف) شبستر، ب) ارومیه، ج)نقده و د) مراغه. خط چین معرف روند خطی می‌باشد.

بحث و نتیجه‌گیری

تحلیل شاخص‌های فرین بارش(P95، R95p و فراوانی P95) در حوضه دریاچه ارومیه طی دوره ۱۹۹۵–۲۰۲۴ نشان داد که رخدادهای بارش فرین الگوی مکانی و فصلی متنوعی دارند. بیشینه مقادیر صدک ۹۵ بارش در فصول سرد، به‌ویژه زمستان و بهار مشاهده شد و در تابستان به حداقل رسید. این الگو یکدست نبود و در برخی سال‌ها و نواحی پراکندگی قابل توجهی ثبت گردید که اهمّیّت نوسانات بین‌سالی را برجسته می‌کند. از نظر فراوانی، روزهای فرین عمدتاً در زمستان و بهار متمرکز بودند، در حالی‌که تابستان و پاییز سهم اندکی داشتند.

روندهای رگرسیونی نشان داد که تنها در زمستان روند افزایشی شدت بارش‌های فرین (R95p) از نظر آماری در سطح ۹۵ درصد معنی‌دار بوده است؛ به‌ویژه در نواحی جنوب و غرب حوضه. در سایر فصل‌ها الگوها پراکنده یا کاهشی بودند و عمدتاً به سطح معنی‌داری نرسیدند. این یافته با مطالعات ملی و جهانی (رحیمی و فاطمی، ۲۰۱۹؛ معتمدی و همکاران، ۲۰۲۳؛ تبری، ۲۰۲۰؛ Donat et al., 2016) همخوان است که نشان داده‌اند تغییر اقلیم بیشتر در فصول سرد خود را به شکل افزایش شدت بارش‌های حدی نشان می‌دهد. بررسی سری‌های زمانی چهار ایستگاه (ارومیه، شبستر، مراغه و نقده) نیز این الگو را تأیید کرد. در ایستگاه‌های ارومیه و شبستر سهم روزهای فرین روند افزایشی بارزتری داشت، در حالی‌که نقده و مراغه تغییرات ملایم یا نوسانی نشان دادند. این امر بیانگر آن است که حتی در صورت ثبات بارش سالانه، ساختار بارش به سمت تمرکز در رخدادهای شدیدتر در حال تغییر است. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که زمستان طی سه دهه اخیر نقش اصلی در افزایش بارش‌های فرین در حوضه دریاچه ارومیه داشته و تنها در این فصل روندهای افزایشی معنی‌دار

مشاهده شده است. سایر فصل‌ها تغییرات پراکنده و غیرقطعی نشان دادند. بنابراین، مدیریت منابع آب و کاهش ریسک سیلاب در منطقه باید بر پایه شواهد محلی و فصلی برنامه‌ریزی شود، زیرا تغییرات اقلیم الزاماً یکنواخت نبوده و اثر آن در فصل‌ها و نواحی مختلف متفاوت است.

منابع

AghaKouchak, A., Norouzi, H., Madani, K., Mirchi, A., Azarderakhsh, M., Nazemi, A., ... & Hasanzadeh, E. (2015). Aral Sea syndrome desiccates Lake Urmia: call for action. *Journal of Great Lakes Research*, *41*(1), 307-311.

Alexander, L. V., Zhang, X., Peterson, T. C., Caesar, J., Gleason, B., Klein Tank, A. M. G., ... & Vazquez-Aguirre, J. L. (2006). Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *111*(D5).

Azizzadeh, M. R., & Javan, K. (2018). Temporal and spatial distribution of extreme precipitation indices over the lake Urmia Basin, Iran. *Environmental Resources Research*, *6*(1), 25-40.

Davarpanah, S., Erfanian, M., & Javan, K. (2021). Assessment of climate change impacts on drought and wet spells in Lake Urmia Basin. *Pure and Applied Geophysics*, *178*(2), 545-563.

Donat, M. G., Alexander, L. V., Yang, H., Durre, I., Vose, R., Dunn, R. J., ... & Kitching, S. (2013). Updated analyses of temperature and precipitation extreme indices since the beginning of the twentieth century: The HadEX2 dataset. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *118*(5), 2098-2118.

Donat, M. G., Alexander, L. V., Herold, N., & Dittus, A. J. (2016). Temperature and precipitation extremes in century-long gridded observations, reanalyses, and atmospheric model simulations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *121*(19), 11-174.

Eimanifar, A., & Mohebbi, F. (2007). Urmia Lake (northwest Iran): a brief review. *Saline systems*, *3*(1), 5.

Fakour, P., Ustrnul, Z., & Wypych, A. (2025). Risk assessment of extreme precipitation in northwest Iran in the light of changing climate. *International Journal of Climatology*, e8854.

Gimechi, S., Mostafazadeh, R., & Alimohamadian, L. (2025). Analysis of extreme precipitation trends and probability distributions across return periods in northwest Iran. *Geografický časopis/Geographical Journal*, *77*(1), 43-55.

Javan, K., Movaghari, A., & Park, J. S. (2023). Projected changes in extreme precipitation indices over the Lake Urmia basin in Iran. *Journal of Water and Climate Change*, *14*(8), 2564-2582.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., ... & Thépaut, J. N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly journal of the royal meteorological society*, *146*(730), 1999-2049.

Khazaei, B., Khatami, S., Alemohammad, S. H., Rashidi, L., Wu, C., Madani, K., ... & Aghakouchak, A. (2019). Climatic or regionally induced by humans? Tracing hydro-climatic and land-use changes to better understand the Lake Urmia tragedy. *Journal of hydrology*, *569*, 203-217.

Mahbod, M., & Rafiee, M. R. (2021). Trend analysis of extreme precipitation events across Iran using percentile indices. *International Journal of Climatology*, *41*(2), 952-969.

Modarres, R., & Sarhadi, A. (2009). Rainfall trends analysis of Iran in the last half of the twentieth century. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *114*(D3).

Motamedi, A., Gohari, A., & Haghighi, A. T. (2023). Three-decade assessment of dry and wet spells change across Iran, a fingerprint of climate change. *Scientific Reports*, *13*(1), 2888.

Mousavi, H., Dehghanipour, A. H., Ferreira, C. S., & Kalantari, Z. (2024). Investigating the Impact of Large Lakes on Local Precipitation: Case Study of Lake Urmia, Iran. *Water*, *16*(9), 1250.
Rahimi, M., & Fatemi, S. S. (2019). Mean versus extreme precipitation trends in Iran over the period 1960–2017. *Pure and Applied Geophysics*, *176*(8), 3717-3735.
Siadatmousavi, S. M., & Seyedalipour, S. A. (2019). Seasonal variation of evaporation from Hypersaline Basin of Lake Urmia. In *Lake Urmia: a hypersaline waterbody in a drying climate* (pp. 9-25). Cham: Springer International Publishing.
Steenburgh, W. J., Halvorson, S. F., & Onton, D. J. (2000). Climatology of lake-effect snowstorms of the Great Salt Lake. *Monthly Weather Review*, *128*(3), 709-727.
Tabari, H., & Willems, P. (2018). More prolonged droughts by the end of the century in the Middle East. *Environmental Research Letters*, *13*(10), 104005.
Tabari, H. (2020). Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability. *Scientific reports*, *10*(1), 13768.
Tourian, M. J., Elmi, O., Chen, Q., Devaraju, B., Roohi, S., & Sneeuw, N. (2015). A spaceborne multisensor approach to monitor the desiccation of Lake Urmia in Iran. *Remote Sensing of Environment*, *156*, 349-360.
Westra, S., Alexander, L. V., & Zwiers, F. W. (2013). Global increasing trends in annual maximum daily precipitation. *Journal of climate*, *26*(11), 3904-3918.
Zhang, X., Alexander, L., Hegerl, G. C., Jones, P., Tank, A. K., Peterson, T. C., ... & Zwiers, F. W. (2011). Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, *2*(6), 851-870.
Zittis, G., Bruggeman, A., & Lelieveld, J. (2021). Revisiting future extreme precipitation trends in the Mediterranean. *Weather and Climate Extremes*, *34*, 100380.

Assessment of Extreme Precipitation Variability in the Lake Urmia Basin During the Period 1995–2024

Nargess Saleh[1], Maryam Gharaylou[2], Majid Mazraeh Farahani[3], Asghar Bohluly[4]

Ph.D. Candidate in Meteorology, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran
Associate Professor, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran
Associate Professor, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran
Assistant Professor, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran

* Corresponding author: nargess.saleh@ut.ac.ir

ABSTRACT

Lake Urmia and its surroundings are ecologically sensitive, where shifts in precipitation extremes bear directly on water-resources management and flood risk. Using ERA5 reanalysis at 0.25° resolution for water years 1995–2024 (December–November), we quantified changes in the intensity and frequency of extreme-precipitation days. Intensity was defined as R95p—the annual sum of precipitation on days exceeding the

wet-day 95th percentile (wet day ≥ 1 mm); frequency as the fraction of extreme days. Fields were analyzed at annual, seasonal, and monthly scales and bilinearly interpolated to four peripheral stations. Linear trends (ordinary least squares) were estimated in mm decade^{-1} and days decade^{-1}, and assessed at the 95% confidence level. Overall, trends are spatially heterogeneous and often non-significant; however, winter exhibits the most spatially coherent signal, with statistically significant increases in R95p in parts of the basin, while changes in frequency remain limited and patchy. Station time series corroborate strong interannual variability without pronounced monotonic trends. Collectively, the evidence points to an intensification of heavy winter precipitation—rather than a widespread rise in the number of extreme days—providing a multiscale basis for risk assessment and seasonally targeted adaptation in the Urmia basin.

Keywords: Extreme Precipitation, R95p Index, Urmia Lake, ERA5

اثرات تغییرات اقلیم بر سلامت در ایران

زهرا عمادی[۱]، مهربان صادقی[۲]

۱- گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی شهرکرد، شهرکرد، ایران
کمیته تحقیقات و فناوری دانشجویی، دانشگاه علوم پزشکی شهرکرد، شهرکرد، ایران
۲- گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی شهرکرد، شهرکرد، ایران
Zahra.emadi1987@yahoo.com

چکیده

تغییرات اقلیمی یکی از تهدیدات جدی سلامت در دنیای امروز می‌باشد. شناسایی اثرات نامطلوب آن بر سلامت در کشورهای مختلف مخصوصا کشورهای توسعه یافته چون ایران الزامی است. متاسفانه کشور ایران به دلیل عدم وجود ساختارهای مناسب برای مقابله با تغییرات اقلیمی در این زمینه بسیار آسیب‌پذیر است. در مطالعه حاضر، اثرات نامطلوب تغییرات اقلیمی برسلامت انسان‌ها در ایران مورد بررسی قرار گرفته است. کلیه مقالات در پایگاه‌های داده معتبر علمی جستجو و استفاده شده‌اند. نتایج مطالعات نشان داد که اثرات مرتبط با سلامت تغییرات اقلیمی شامل اثرات مستقیم و غیر مستقیم میباشد. اثرات مستقیم عبارتند از اثرات حاصل از بلایای طبیعی چون سیل که منجر به طیف وسیعی از بیماری‌ها میگردد. از طرفی دیگر اثرات غیرمستقیم اشاره به بیماری‌های غیرواگیردار و واگیردار (بیماری‌های قلبی-عروقی، تنفسی، روانی، و سرطان)، بیماری منتقله از آب و غذا (سالمونلا و دیسانتری)، و بیماری منتقله از حشرات (مالاریا و تب کریمه کنگو) دارد. افزایش دما به عنوان یکی از شاخص‌ترین پارامترهای تغییر اقلیمی نقش بسزا و موثری در افزایش نرخ ابتلا به این بیماری‌ها دارد. لذا با توجه به اثرات زیانبار تغییرات اقلیمی بر سلامت افراد در ایران، ضرورت تدوین برنامه‌های پیشگیرانه برای کاهش اثرات مذکور توسط متخصصان حوزه محیط‌زیست و بهداشت ایجاب می‌گردد.

کلید واژه‌ها: تغییرات اقلیمی، گرمایش جهانی، سلامت انسانی، ایران.

مقدمه:

تغییرات اقلیمی اشاره به تغییرات بلندمدت آب و هوایی از قبیل تغییر در متوسط شرایط آب و هوایی و/ یا پراکنش شرایط آب و هوایی دارد (وقایع تشدید یافته آب و هوایی). بیشتر جوامع علمی معتقد هستند که افزایش در غلظت گازهای گلخانه‌ای در اثر فعالیت انسان‌ها منجر به گرمایش جهانی و تغییرات اقلیمی می‌گردد. بر اساس پیش‌بینی‌های هیئت بین دولتی تغییر اقلیم دمای جهان تا سال ۲۱۰۰ به میزان ۱.۴ تا ۵.۸ افزایش خواهد یافت. به دلیل پایداری گازهای گلخانه‌ای و اثرات آنها بر سیستم‌های اقلیمی، تغییرات اقلیمی حتی در صورت اقدامات پیشگیرانه بنیادی تا دهه‌های مختلف آینده ممکن است ادامه یابد. تغییرات اقلیمی اثرات متفاوتی در زمینه‌های مختلف چون اقتصاد، کشاورزی، اجتماع، و سلامت انسانها دارد (Babaie et al., 2018). لذا با توجه به اثرات مذکور، لزوم اجرای اقدامات مقابله‌ای با تغییرات اقلیمی در جوامع ضروری است. کشورهای مختلف دنیا برنامه‌های متعددی برای مقابله با این رویداد را اجرا می‌کنند. اما متاسفانه ازآنجاکه کشور ایران فاقد زیرساخت‌ها و امکانات لازم برای مقابله با تغییرات اقلیمی است لذا این اثرات به صورت تشدیدیافته در کشور نمایان می‌گردد. هدف این مقاله بیان اثرات سلامت مرتبط با تغییرات اقلیمی در ایران است تا نه تنها راهنمایی برای تصمیم‌گیرندگان محیط زیست باشد، بلکه بتواند بار مالی و روانی اثرات سلامت در حوزه بهداشت و درمان و مردم ایران را بکاهد.

مواد و روش ها:

در تحقیق موردنظر، کلمات کلیدی متفاوتی چون تغییرات اقلیمی و سلامت و ایران، تغییرات اقلیمی و بیماری‌های غیرواگیر و ایران، تغییرات اقلیمی و بیماری های واگیردار و ایران، تغییرات اقلیمی و بیماری‌های منتقله از غذا و ایران، تغییرات اقلیمی و بیماریهای منتقله از آب و ایران، و تغییرات اقلیمی و بیماری‌های منتقله از حشرات و ایران در پایگاه های داده مختلفی چون Web of Science، Pubmed، Scopus، و SID بدون محدودیت زمانی مورد استفاده قرار گرفت.

نتایج و بحث:

ایران کشوری در غرب آسیا و هفدهمین کشور بزرگ جهان با وضعیت اقتصادی درآمد متوسط-بالا و جمعیت حدود ۸۰ میلیون نفر است. ۸۰ درصد از سطح ایران متشکل از مناطق خشک و نیمه‌خشک است. در سالهای اخیر با وجود تنوع اقلیمی، ایران با مشکلاتی چون کاهش بارندگی، خشکسالی، کمبود آب، آلودگی شهری و صنعتی، بیابان‌زایی، فرسایش خاک، و کاهش تنوع زیستی روبه‌رو شده است. تخمین زده شده است که دمای ایران تا سال ۲۱۰۰ تقریبا به اندازه ۴.۵ درجه سلسیوس افزایش خواهد یافت که البته این مقدار میتواند در مناطق مرکزی و جنوبی ایران به دلیل حساسیت بیشتر به تغییرات اقلیمی تشدید یابد. یکی از اثرات ملموس تغییرات اقلیمی در ایران افزایش امواج گرمایی است. مواجهه با گرمای شدید نه تنها ناراحتی و شرایط عدم آسایش را ایجاد می‌کند بلکه یک تهدید جدی برای سلامت محسوب می‌گردد. بر اساس گزارشات هیئت بین دولتی تغییرات اقلیمی، مرگ زودرس و بارجهانی بیماری‌ها به شدت تحت تاثیر تغییرات اقلیمی

قرار دارد. اثرات سلامتی تحت تاثیر تغییرات اقلیمی به دو دسته کلی اثرات مستقیم و غیر مستقیم تقسیم میشوند. اثرات مستقیم شامل مرگ و میر ناشی از وقایعی چون سیل، امواج گرمایی، طوفان، و خشکسالی، و اثرات غیر مستقیم نیز شامل بیماری‌های غیرواگیر، بیماری‌های منتقله از آب، غذا، و حشرات می‌باشد (Goudarzian, 2023; Mousavi et al., 2020).

اثرات مستقیم:

تغییرات اقلیمی و وقوع فجایعی چون طوفان، سیل، و خشکسالی میتواند عامل ایجاد یا تشدیدکننده استرس و افسردگی در افراد گردد. هم‌چنین پیکره مرده حیوانات بعد از سیلاب یکی از مهم‌ترین منابع عفونی محسوب میشود. که بیماری‌های منتقله از طریق موش یکی دیگر از اثرات سیلاب می‌باشد (Shokri et al., 2020)

اثرات غیرمستقیم:

الف) بیماری‌های واگیردار و غیرواگیر:

بیماری های قلبی-عروقی، بیماری‌های تنفسی، بیماری‌های مرتبط با امواج گرمایی، بیماری‌های روان، و سرطان

بیماری‌های قلبی-عروقی:

مواجهه با گرمای شدید منجر به افزایش فشارخون می‌گردد. پرفشاری خون به عنوان ریسک فاکتورهای مهم برای حمله قلبی و سکته محسوب می‌شوند. ازآنجاکه که شدت و تناوب امواج گرمایی در ایران در حال افزایش است، شیوع پرفشاری خون نیز به عنوان یک عامل تهدیدکننده سلامت عموم در حال افزایش می‌باشد. گرمای شدید منجر به دی‌هیدراته شدن و به دنبال آن کاهش حجم خون و افزایش فشار خون میگردد. به علاوه امواج گرمایی میتواند یک عامل در تشکیل آلاینده‌های هوا چون ازون گردد. ازون در اثر واکنش ترکیبات آلی فرار با اکسیدهای نیتروژن در حضور نور خورشید تشکیل میگردد. مواجهه با ازون میتواند عاملی برای وقوع حمله‌های قلبی و فشارخون بالا باشد. متاسفانه مسئله آلودگی هوا در ایران در شهرهایی چون تهران، اصفهان، و مشهد یک معظل اساسی است که میتواند در حضور نور خورشید و امواج گرمایی تشدید یابد. به علاوه کشاورزی ایران به شدت تحت تاثیر مسائلی چون کمبود آب و تشدید شرایط اقلیمی است که منجر به ایجاد چالشهایی چون کاهش میزان تولید و تغییر فصل رشد و به دنبال آن عاملی برای امنیت غذایی ملی میشود. بحران غذای مذکور میتواند اثر مهمی بر بیماری‌های قلبی-عروقی ایجاد کند. یک رژیم غذایی پایدار و متنوع نقش اساسی در نگهداری و سلامت سیستم قلبی-عروقی سالم دارد. تغییرات اقلیمی منجر به ایجاد اختلال در تولید مواد غذایی و الگوهای رژیمی مواد غذایی برای افراد شده که عاملی برای افزایش ریسک چاقی، دیابت و سایر ریسک فاکتورهای بیماری های قلبی-عروقی است. تغییرات در زمان برداشت و کیفیت محصولات کشاورزی باعث ایجاد محصولاتی با ارزش غذایی کم از نظر ترکیباتی چون ویتامین‌ها، مواد معدنی، و آنتی اکسیدانت‌ها شده که اثر مهمی در تامین سلامت قلب به واسطه کاهش التهاب و محافظت از عملکرد قلب و عروق دارد. کمبود غذایی ناشی از تغییرات اقلیمی در ایجاد استرس‌های اجتماعی-

اقتصادی و سلامت روان نقش دارند، که سلامت روان ارتباط ویژه‌ای با بیماری‌های قلبی-عروقی دارد (Goudarzian, 2023). مطالعات نشان داده است که افزایش ۱ درجه سلسیوس دمای بیشینه منجر به افزایش ریسک ۴.۲۷ درصدی مرگ و میر ناشی از بیماری‌های قلبی-عروقی در مشهد شده است (Baaghideh and Mayvaneh, 2017). بررسی اثر آلودگی هوا و تغییرات دما بر پذیرش اورژانس ناشی از بیماری‌های قلبی-عروقی و تنفسی در بجنورد (شمال شرق ایران) نشان داد که اثر دمای بالا و پایین به سرعت از روز اول تا هفته دوم نمایان است. افزایش یا کاهش دما منجر به افزایش نرخ بستری شدن به ترتیب به میزان ۳۶ و ۱۷ درصد تا روز بیست و پنجم مواجهه شد. افزایش دما به طور معناداری باعث افزایش نرخ بستری شدن بیماری‌های قلبی-عروقی شد اما کاهش دما اثر معناداری نداشت. هم‌چنین ارتباطی میان آلودگی هوا با بستری شدن ناشی از بیماری قلبی-عروقی و تنفسی مشاهده نشد (Rastegar et al., 2024).

بیماری‌های تنفسی:

از جمله عوارض خشکسالی وقوع طوفان‌های گردو غبار در مناطق مختلف ایران است. کاهش منابع آبی، کاهش پوشش گیاهی، و معلق شدن ذرات در اثر باد منجر به ایجاد طوفانهای شدید گردوغبار میگردد، که این معظلات در ایران بسیار چشمگیر است. در ایران حدود ۱۸ استان و ۸۲ شهر کانون اصلی فرسایش بادی شناخته شده‌اند که فعالیتهای انسانی نقش مهمی در این حوادث دارد. در طی سالهای گذشته مشکل گردوغبار فقط در مناطق غربی و در فصول بهار و تابستان بود اما امروزه این مشکل به مناطق مرکزی و جنوبی ایران با شدت وقوع حدود هشت ماه در سال کشیده شده است (akbary and Sayad, 2021). که این ذرات میتوانند در ایجاد بیماری‌های تنفسی و قلبی-عروقی نقش مهمی داشته باشند. با این حال مطالعه اثر تغییرات دما بر مرگ‌ومیر ناشی از بیماری‌های تنفسی در شیراز نشان داد که کمترین میزان مرگ‌ومیر در دمای متوسط ۲۵ درجه سلسیوس مشاهده شد. نتایج مطالعه نشان داد که یک رابطه معکوس معنی‌دار بین دمای متوسط و مرگ‌ومیر ناشی از بیماری‌های تنفسی وجود دارد (Dadbakhsh et al., 2017). هم‌چنین مطالعه دیگی در رفسنجان نشان داد که ارتباط منفی معنی‌دار میان دما و بستری شدن ناشی از بیماری‌های قلبی-عروقی و تنفسی وجود دارد. به ازای هر ۱ درجه سلسیوس کاهش دمای میانگین تعداد بستری شدن ناشی از بیماری‌های قلبی-عروقی و تنفسی به ترتیب ۱ و ۴ درصد افزایش می‌یابد (Hassanlouei et al., 2013).

مطالعه اثر شرایط اقلیمی بر سارس در ۱۶۹ شهر ایران نشان داد که بیشترین بروز سارس در اقلیم‌های گرم- نیمه خشک (۲۴ درصد) مشاهده شد (Bahrami et al., 2022).

بیماری‌های روان:

نقش تغییرات اقلیمی در شکل‌گیری بیماری‌های مربوط به سلامت روان از جنبه‌های مختلف مورد بررسی قرار میگیرد. تغییر شرایط کشاورزی وناامنی غذایی میتواند در شکل‌گیری افسردگی در کشورهای در حال توسعه چون ایران بسیار مهم و موثر باشد. مطالعه اثر تغییرات اقلیم بر سلامت روان (افسردگی و اختلال دوقطبی) در غرب ایران نشان داد که افزایش

دمای بیشینه و کمینه در تابستان با افزایش افسردگی همراه بود. اثر تغییرات اقلیمی بر اختلال دوقطبی کمتر از افسردگی بود (Abbasi, 2021).

سرطان:

تغییرات در الگوهای تابش نور خورشید و مواجهه تشدید یافته و طولانی مدت با امواج ماورابنفش در اثر گرمایش میتواند منجر به سرطان های مختلفی چون پوست و مرتبط با چشم گردد (Esmaeili et al., 2024). بررسی توزیع جغرافیایی سرطان پوست غیرملانوم در ارتباط با تغییرات اقلیمی در ایران نشان داد که تشعشعات ماورابنفش و ساعات آفتابی، و رطوبت نسبی و پوشش ابر بیشترین ارتباط های مثبت و منفی را با سرطان مذکور داشتند. مقادیر عددی شاخص ماورابنفش به عنوان ریسک سلامتی مرتبط با مواجهه با نور خورشید محسوب میشود. بیشترین تشعشعات ماورابنفش در مناطق جنوب-شرق و مرکزی ایران مشاهده شده است. تشعشع ماورابنفش در ایران از ۶.۵۴ تا ۸.۶۱ متغیر است که بیشترین میزان متعلق به مناطق مرکزی است. پوشش ابر نیز از ۳.۴۲ تا ۶۵.۰۴ درصد در ایران متغیر است. بیشترین میزان پوشش ابر متعلق به نواحی ساحلی شمالی و جنوبی، و کمترین نیز در مناطق مرکزی مشاهده شد. مناطق جنوب‌شرقی، جنوب‌غربی، و مرکزی ایران دارای بیشترین نرخ سرطان پوست بودند که میتواند به دلیل سطوح بالای ماورابنفش و ساعات آفتابی در این مناطق باشد. ۹۰ درصد از مناطق مرکزی ایران جز نقاط داغ هستند که میزان بالایی از سرطان پوست نیز در این مناطق مشاهده شده است (Kya, 2024). اردبیل بعداز گلستان بالاترین آمار سرطان مری را در کشور دارد. نرخ سرطان مری با دما در اردبیل ارتباط منفی داشت، به طوریکه بیشترین میزان سرطان مری (۶۳ درصد) در دمای ۷ تا ۱۱ درجه سلسیوس مشاهده شد و افزایش دما منجر به کاهش سرطان مری در اردبیل شد (Ahari et al., 2013).

سایر بیماری‌های مرتبط با امواج گرمایی:

در میان افراد مختلف، زنان باردار به دلیل افزایش ریسک پیامدهای نامطلوب تولد چون زایمان زودرس، مرده‌زایی، و کم‌وزنی بدو تولد در اثر مواجهه با دمای نامناسب گروهی آسیب‌پذیر محسوب می‌شوند. سالانه حدود ۱۹ میلیون زن در دنیا تحت‌تاثیر پیامدهای نامطلوب بارداری هستند و سازمان بهداشت جهانی عنوان کرده که این پیامدها هرساله در حال افزایش است. زنان باردار با تغییرات هورمونی و متابولیک مواجه میشوند که باعث ایجاد تنش‌های فیزیکی و افزایش حساسیت آنها در برابر شرایط شدید آب‌وهوایی می‌گردد. مواجهه با گرمای شدید اختلال در عملکرد ژن‌های موثر در اندام‌زایی، آسیب سلولی جفت و سیستم عروق، تغذیه ناکافی جنین و مرگ سلول و مرده‌زایی را به همراه دارد. دی‌هیدراته‌شدن در اثر استرس گرمایی و عرق‌کردن و عدم وجود مایعات کافی در بدن مادر باعث کاهش مقدار خون دردسترس برای جنین و تحریک انقباضات رحم و مرده‌زایی می‌گردد. هم‌چنین دمای بالا با افزایش نرخ ابتلا به عفونت‌های گوارشی یکی از علل مرگ‌ومیر نوزادان محسوب می‌گردد. فراهمی غذا، وضعیت سلامت و تغذیه مادر در دوران بارداری بر سیستم ایمنی جنین موثر

می‌باشد. لذا نوزادان متولد شده از مادران با وضعیت تغذیه ضعیف بیشتر مستعد کم‌وزنی بدو تولد بوده که منجر به افزایش ریسک مرگ‌ومیر مخصوصاً در فصول سرد زمستان می‌شود.

ب) بیماری‌های منتقله از غذا:

اسهال و عفونت‌های روده‌ای از مهم ترین بیماری‌های منتقله از طریق مواد غذایی است. تخریب سیستم‌های فاضلاب و آلودگی آبهای آشامیدنی بعد از سیلاب در انتقال بیماری‌های منتقله از طریق آب و غدا نقش مهمی دارد. مصرف محصولاتی که با فاضلاب در طی سیل آبیاری شده‌اند یکی دیگر از منابع بالقوه بیماری‌های گوارشی است. مصرف کودهای حیوانی برای خاک نیز منبع بیماری‌زای بیولوژیک است (Shokri et al., 2020). یکی دیگر از مهم‌ترین بیماری‌های منتقله از طریق مواد غذایی در ایران سالمونلا است. از همین‌رو بروز این بیماری در یزد مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که بروز عفونت سالمونلا در گروه سنی زیر ۵ سال و در فصل تابستان بیشترین بود. استفاده از فاضلاب تصفیه نشده برای آبیاری در مناطق خشک میتواند حاوی غلظتهای بالایی از پاتوژن‌ها است. بنابراین مهم‌ترین دلیل عفونت سالمونلا در یزد (ایران) میتواند به دلیل خشکی و اقلیم گرم باشد که میتواند باعث افزایش ریسک شیوع بیماری‌های منتقله از طریق مواد غذایی به واسطه آلودگی منابع آب و غذا گردد (Dallal et al., 2020).

ج) بیماری‌های منتقله از آب:

اسهال، تیفوئید، وبا، و عفونت‌های روده‌ای

دیسانتری یکی از بیماری‌های التهابی عفونی روده است. مطالعه اثر تغییرات اقلیمی در اقلیم‌های مختلف ایران بر دیسانتری نشان داد که افزایش میانگین دمای حداقل ماهانه در مناطق معتدل خشک سرد، خشک گرم، معتدل خشک گرم، معتدل خشک سرد با رژیم بارشی زمستانه، و معتدل خشک گرم با رژیم بارش زمستانه همراه با افزایش دیسانتری بود، در حالیکه در برخی اقلیم‌ها چون نیمه گرمسیری با تابستان خشک، نیمه خشک سرد، نیمه گرمسیری، نیمه خشک گرم، معتدل قاره‌ای، و معتدل خشک گرم افزایش میانگین دمای حداکثر ماهانه با افزایش در دیسانتری همراه بود. هم‌چنین با افزایش بارش ماهانه نیز در اقلیم‌های معتدل اقیانوسی مرطوب گرم و نیمه خشک گرم، افزایش دیسانتری مشاهده شد. در اقلیم‌های معتدل اقیانوسی مرطوب گرم و نیمه خشک گرم با افزایش تعداد روزهای گرم دیسانتری نیز روند افزایشی داشت (Sajjadi et al., 2020). مطالعه ای دیگر در ایران نشان داد که افزایش میانگین بیشینه دمای ماهانه و تعداد روزهای بارانی بیشترین اثر را بر ریسک دیسانتری برای هر دو جنس داشته است. نتایج نشان داد که بیشترین بروز دیسانتری در اقلیم‌های گرم و نیمه خشک (۲۴ درصد)، گرم و خشک (۲۴ درصد)، و سرد و نیمه خشک (۱۵ درصد) رخ داده است (Bahrami et al., 2020).

کاربرد شبکه عصبی مصنوعی در پیش‌گویی وبا در ایران نشان داد که تا سال ۲۰۵۰ اقلیم در طی سال‌های آینده گرمتر خواهد شد. شبیه‌سازی نشان داد که موارد وبا تا سال ۲۰۵۰ افزایش می‌یابد و بیشترین موارد وبا نیز در ماه‌های گرم مشاهده

خواهد شد. دمای بالا و بارش کم در ماه‌های گرم میتواند فراهم کننده‌ی شرایط مناسب برای تکثیر سریع باکتری‌ها گردد. این شرایط در ایران مخصوصا در مناطق مرکزی ممکن است با نرخ افزایشی آمار وبا مواجهه گردد (Asadgol et al., 2019). اسهال یکی از مهم‌ترین و شایع‌ترین بیماریها بعد از سیلاب مخصوصا در مناطق با وضعیت بهداشتی ضعیف است (Shokri et al., 2020). نتایج مطالعه شیوع بیماری‌های منتقله از طریق آب (اسهال، دیسانتری، تیفوییید، هپاتیت A) در غرب ایران نشان داد که به جز هپاتیت A، بروز همه بیماری‌ها در نواحی مختلف (شهری و روستایی) و فصل‌های مختلف رابطه معناداری با آلودگی میکروبی آب آشامیدنی دارند. این رابطه در مناطق روستایی نسبت به مناطق شهری (به جز اسهال) و در فصول گرم نسبت به فصول سرد بیشتر و قویتر بود (Pirsaheb et al., 2017). بنابراین افزایش دما در اثر تغییرات اقلیمی میتواند در افزایش نرخ ابتلا به این بیماریها موثر باشد.

د) بیماری های منتقله از حشرات:

تغییرات اقلیمی اثرات گسترده‌ای بر سلامت انسانها دارد. در میان تمام بیماری‌های تحت تاثیر تغییرات اقلیمی، بیماری‌های عفونی منتقله از طریق وکتورها یا حامل‌ها به طور دقیق در ایران مورد بررسی قرار نگرفته است. بعضی از پاتوژن‌ها توسط حامل‌ها یا میزبان‌های واسطه منتقل می‌شوند. اقلیم مناسب و شرایط آب و هوایی به منظور بقا، تولیدمثل، پراکنش، و انتقال پاتوژن‌ها برای وکتورها و میزبان‌ها الزامی است. بنابراین تغییر در اقلیم و شرایط آب و هوایی بر پاتوژن‌ها، وکتورها، میزبان، محیط زندگی آنها و متعاقبا بر بیماری‌های عفونی تاثیر می‌گذارد. مالاریا، لیشمالیوز، و تب دانگ از مهم‌ترین بیماری‌های منتقله از طریق وکتورها هستند. شرایط اقلیمی و محیطی نقش موثری در چرخه زندگی، مدت زمان فعالیت، و تکثیر پشه‌هایی چون آنوفل دارد. مالاریا هنوز در ایران به عنوان یکی از مشکلات سلامت محسوب می‌شود و توزیع مکانی آن نیز بیشتر در مناطق جنوب شرقی ایران مشاهده شده است. استان‌های سیستان و بلوچستان، هرمزگان، و کرمان به عنوان استان‌های اندمیک مالاریا محسوب میشوند. استانهای هرمزگان، بوشهر، خوزستان، مازندران، جنوب سیستان و بلوچستان، گیلان، شرایط اقلیمی قابل ملاحظه‌ای (دما، رطوبت، بارش در یک زمان) را برای تکثیر و فعالیت آنوفل دارند. استان های گلستان، خراسان شمالی، تهران، مرکزی، شمال اصفهان، قم، لرستان، فارس، جنوب کرمان، شمال سیستان و بلوچستان، و قزوین دومین جایگاه از لحاظ شرایط اقلیمی مناسب برای آنوفل هستند. سومین جایگاه اقلیمی مناسب نیز متعلق به استان های خراسان رضوی، کهگیلویه و بویر احمد، یزد و کرمانشاه است. حداقل پتانسیل برای تولید و فعالیت آنوفل در آذربایجان شرقی و غربی، کردستان، چهارمحال و بختیاری، زنجان، همدان و اردبیل مشاهده شده است. گزارش شده است که در کرمان و چابهار بروز مالاریا به طور قابل ملاحظه‌ای با افزایش میانگین، کمینه، و بیشینه دما، افزایش یافته است. بارش نیز میتواند هم دارای اثر مثبت و منفی بر آنوفل باشد. پایداری رطوبت در اثر بارش میتواند فراهم کننده شرایط مناسب برای زندگی و تکثیر آنوفل و تکامل لارو گردد. هم‌چنین بارشهای طوفانی میتواند باعث شستشوی تخم آنوفل و محدودیت تکثیر و پراکنش این بیماری گردد. بنابراین مالاریا در ایران به شدت تحت تاثیر گرمایش، تغییر الگوهای بارش و تغییرات اقلیمی قرار دارد (Babaie et al., 2018).

بر اساس مطالعه پراکنش پشه آئدس آلبوپیکتوس در سیستان و بلوچستان، دمای بین ۶ تا ۱۰ درجه سلسیوس برای فعالیت‌های بیولوژیک پشه آئدس مناسب گزارش شده است، که دمای منطقه غالبا بالای ۳۵ درجه سلسیوس و دمای کمتر از ۵.۵ درجه سلسیوس در این منطقه گزارش نشده است. آنها تخمین زدند که عواملی چون کاربری اراضی، دما، ارتفاع از سطح دریا، و بارش مهم‌ترین عوامل موثر بر پراکنش آئدس آلبوپیکتوس هستند. دمای بالای ۴۰ درجه سلسیوس ممکن است بر بقا پشه‌های آئدس نابالغ و بالغ اثر منفی داشته باشد (Nejati et al., 2017).

تب کریمه کنگو یک بیماری ویروسی با توزیع جهانی است که از طریق تماس با کنه یا بافت آلوده حیوانی منتقل میگردد. البته بیشترین راه انتقال تب کریمه کنگو در ایران از طریق تماس با بافت یا خون حیوانات خانگی آلوده است. ایران یکی از مناطق اندمیک با میزان بروز تب کریمه کنگو بالا است. افزایش دمای جهانی میتواند باعث افزایش اقلیم گرم و خشک گردد که میتواند باعث افزایش پخش و جمعیت کنه‌های حامل تب کریمه کنگو شود. هم‌چنین به دنبال تغییرات دمایی و مهاجرت پرندگان شرایط برای پخش گونه‌های کنه مخصوصا کنه هیالوما (عامل تب کریمه کنگو) فراهم میشود. ازآنجاکه کنه‌ها اقلیم‌های گرم و خشک را میپسندند بنابراین افزایش دما و کاهش بارش محیط مناسب برای رشد و تکثیر کنه‌ها را فراهم می‌کند. لازم به ذکر است که سیستان و بلوچستان یکی از مناطق ادمیک تب کریمه کنگو در ایران است. پراکنش ماهیانه تب کریمه کنگو در زاهدان نشان داد که بروز آن الگوی فصلی دارد و بروز این بیماری در ماه های مختلف به طور معناداری با هم متفاوت هستند. پیک این بیماریی در زاهدان بین ماه می تا جولای مشاهده شد. کنه‌های هیالوما در ایران از ابتدای بهار تا اواسط تابستان فعال هستند. در مطالعه‌ای دیگری که در شرق ایران انجام شد نشان داد که هر یک درجه افزایش در دمای حداکثر منجر به افزایش ۹ درصدی نسبت تب کریمه کنگو میشود. شیوع بیشتر تب کریمه در فصول گرم میتواند به دلیل طی کردن زمان بیشتر افراد در فضای بیرون و گزش توسط کنه باشد (Nili et al., 2020).

با توجه به اثرات نامطلوب تغییرات اقلیمی در ایران، لزوم اجرای اقدامات پیشگیرانه برای مقابله با این تغییرات (مخصوصا کنترل تولید گازهای گلخانه‌ای و آلاینده های مختلف) ضروری است. امید است راهکارها و سیاست‌های مناسب برای دستیابی به این هدف در کشور اجرا گردد.

نتیجه‌گیری :

تغییرات اقلیمی در تمام کشورهای جهان جز یکی از پرچالش ترین مشکلات و مسائل دنیای مدرن محسوب می گردد. این مشکل در کشورهای در حال توسعه به دلیل عدم وجود برنامه‌ها و سیاست‌های مناسب اثرات بیشتر و چشمگیرتری را نشان می‌دهد. کشور ما ایران نیز در برابر تغییرات اقلیمی از این قائده مستثنی نبوده و در برابر تغییرات اقلیمی بسیار آسیب پذیر است. در مطالعه حاضر اثرات مختلف مرتبط با سلامت تغییرات اقلیمی در ایران بررسی شده است. نتایج نشان داده است که افزایش دما و حوادث ناشی از تغییرات اقلیمی نقش بسزا و مهمی در روند ابتلا به بیماری‌های چون قلبی-عروقی، تنفسی، پیامدهای نامطلوب تولد در زنان باردار، سرطان ها، منتقله از طریق آب، غذا، و حشرات دارند. لذا اتخاذ تصمیم های مناسب

در احداث زیرساخت های مناسب برای مقابله با تغییرات اقلیمی درایران نه تنها منجر به حفظ و پایداری محیط زیست برای نسل‌هایی آینده میگردد بلکه میتواند منجر به کاهش بار مالی و روانی بر وزارت بهداشت و درمان و مردم گردد.

منابع

Abbasi, H., 2021. The effect of climate change on depression in urban areas of western Iran. BMC Res. Notes 14, 155.

Ahari, S.S., Agdam, F.B., Amani, F., Yazdanbod, A., Akhghari, L., 2013. Analysis of the relationships between esophageal cancer cases and climatic factors using a Geographic Information System (GIS): a case study of Ardabil province in Iran. Asian Pac. J. Cancer Prev. 14, 2071–2077.

akbary, M., Sayad, V., 2021. Analysis of climate change studies in Iran. Phys. Geogr. Res. 53, 37–74. https://doi.org/10.22059/jphgr.2021.301111.1007528

Asadgol, Z., Mohammadi, H., Kermani, M., Badirzadeh, A., Gholami, M., 2019. The effect of climate change on cholera disease: The road ahead using artificial neural network. PloS One 14, e0224813.

Baaghideh, M., Mayvaneh, F., 2017. Climate change and simulation of cardiovascular disease mortality: A case study of Mashhad, Iran. Iran. J. Public Health 46, 396.

Babaie, J., Barati, M., Azizi, M., Ephtekhari, A., Sadat, S.J., 2018. A systematic evidence review of the effect of climate change on malaria in Iran. J. Parasit. Dis. 42, 331–340.

Bahrami, G., Noroozi, M., Shakiba, A., Rafiey, H., Sajjadi, H., 2020. The relationship between dysentery and climatic parameters in Iran. Urban Clim. 34, 100697.

Bahrami, G., Rafiey, H., Shakiba, A., Noroozi, M., Sajjadi, H., Seddighi, H., 2022. Climate change and respiratory diseases: Relationship between SARS and climatic parameters and impact of climate change on the geographical distribution of SARS in Iran. Adv. Respir. Med. 90, 378–390.

Dadbakhsh, M., Khanjani, N., Bahrampour, A., Haghighi, P.S., 2017. Death from respiratory diseases and temperature in Shiraz, Iran (2006–2011). Int. J. Biometeorol. 61, 239–246.

Dallal, M.M.S., Ehrampoush, M.H., Aminharati, F., Tafti, A.A.D., Yaseri, M., Memariani, M., 2020. Associations between climatic parameters and the human salmonellosis in Yazd province, Iran. Environ. Res. 187, 109706.

Esmaeili, S.V., Alboghobeish, A., Salehi Sahlabadi, A., Poursadeghiyan, M., 2024. Impact of Climate Change on Public Health in Iran: A Systematic Review. Health Emergencies Disasters Q. 10, 3–20.

Goudarzian, A.H., 2023. Climate Change and the Looming Threat of Cardiovascular Diseases in Iran: A Narrative Review. Tabari Biomed. Stud. Res. J. 5, 40–47.

Hassanlouei, B., Rezaeian, M., Sheikh-Fathollahi, M., Vazirinejad, R., 2013. Impact of diurnal temperature variations on hospitalization due to cardiovascular and respiratory diseases in Rafsanjan, Iran, in 2008-2013. J. Occup. Health Epidemiol. 2, 99–106.

Kya, M.A., 2024. Geospatial patterns of non-melanoma skin cancer in relation to climate changes in Iran. Asian Pac. J. Cancer Prev. APJCP 25, 1053.

Mousavi, A., Ardalan, A., Takian, A., Ostadtaghizadeh, A., Naddafi, K., Bavani, A.M., 2020. Climate change and health in Iran: a narrative review. J. Environ. Health Sci. Eng. 18, 367–378.
Nejati, J., Bueno-Marí, R., Collantes, F., Hanafi-Bojd, A.A., Vatandoost, H., Charrahy, Z., Tabatabaei, S.M., Yaghoobi-Ershadi, M.R., Hasanzehi, A., Shirzadi, M.R., 2017. Potential risk areas of Aedes albopictus in south-eastern Iran: a vector of dengue fever, zika, and chikungunya. Front. Microbiol. 8, 1660.
Nili, S., Khanjani, N., Jahani, Y., Bakhtiari, B., 2020. The effect of climate variables on the incidence of Crimean Congo Hemorrhagic Fever (CCHF) in Zahedan, Iran. BMC Public Health 20, 1893.
Pirsaheb, M., Sharafi, K., Ahmadi, E., Moradi, M., 2017. Prevalence of the waterborne diseases (diarrhea, dysentery, typhoid, and hepatitis A) in West of Iran during 5 years (2006-2010). Ann. Trop. Med. Public Health 10.
Rastegar, A., Ghorbanian, M., Hosseinzadeh, A., Saghi, M.H., Iranpour, S., Mohammadi, A.A., Poureshgh, Y., Rahmanzadeh, E., Hekmatshoar, R., Oghazyan, A., 2024. Investigating the impact of air pollution and temperature changes on emergency admissions (cardiovascular+ respiratory) disease in the city of Bojnord, northeastern Iran. Heliyon 10.
Sajjadi, H., Bahrami, G., Shakiba, A., Rafiee, H., Norouzi, M., 2020. Impact of climate change on health in different climate of Iran. Nivar 44, 115–121.
Shokri, A., Sabzevari, S., Hashemi, S.A., 2020. Impacts of flood on health of Iranian population: Infectious diseases with an emphasis on parasitic infections. Parasite Epidemiol. Control 9, e00144.

Effect of climate change on health in Iran

Zahra Emadi[1], Mehraban Sadeghi[2]

Department of Environmental Health Engineering, School of Health, Shahrekord University of Medical Sciences, Shahrekord, Iran
Student Research Committee, Shahrekord University of Medical Sciences, Shahrekord, Iran
Department of Environmental Health Engineering, School of Health, Shahrekord University of Medical Sciences, Shahrekord, Iran

* Zahra.emadi1987@yahoo.com

ABSTRACT

Climate change is a serious threat to the world. Identifying adverse health effects in various countries, particularly in developing nations such as Iran, is crucial. Unfortunately, Iran is vulnerable to climate change due to a lack of appropriate structures. In the present research, the adverse effects of climate change on human health were investigated. All articles were searched in a valid and scientific database and applied. The results presented that the health effects of climate change include direct and indirect effects. Direct

impacts refer to effects of natural disasters like floods that lead to different types of diseases. Indirect impacts refer to contagious and non-contagious diseases (cardio-vascular, respiratory, mental, and cancer), water and food-borne diseases (salmonella and dysentery), and vector-borne diseases (malaria and Crimean-Congo fever). The increase in temperature, as an important index of climate change, has an effective role in the morbidity of these diseases. Therefore, due to the adverse impacts of climate change on human health in Iran, it is necessary to develop preventive programs to mitigate the aforementioned effects, as recommended by environmental and health experts.

Keywords: climate change, global warming, human health, Iran

پهنه‌بندی و پیش‌بینی پتانسیل سیل‌خیزی در حوضهٔ لیقوان‌چای تبریز با استفاده از داده‌های اقلیمی و نرم‌افزار GrADS

فاطمه حسین پور اصل[۱]، علی محمد خورشید دوست[۲]، بهروز ساری صراف[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد آب و هواشناسی سینوپیک دانشگاه تبریز
۲- استاد گروه آب و هواشناسی دانشگاه تبریز
۳- استاد گروه آب و هواشناسی دانشگاه تبریز
f.hosseinpour1402@ms.tabrizu.ac.ir

چکیده

سیلاب یکی از مخرب‌ترین پدیده‌های هیدرولوژیکی است که هر ساله خسارات سنگینی به زیرساخت‌ها، اراضی کشاورزی و سکونتگاه‌های انسانی وارد می‌کند. حوضهٔ آبریز لیقوان‌چای در جنوب‌شرق تبریز به دلیل شرایط توپوگرافی، بارش‌های شدید و تغییرات کاربری اراضی در سال‌های اخیر، به‌ویژه در رخدادهای سیلابی سال‌های ۱۳۹۶ و ۱۳۹۸، آسیب‌پذیری بالایی نسبت به سیلاب از خود نشان داده است. در این پژوهش با بهره‌گیری از داده‌های اقلیمی (بارش و دما) و پردازش آن‌ها در محیط نرم‌افزار GrADS، الگوهای بارشی حاکم بر حوضه استخراج و نقشه‌های بارش تجمعی و شدت بارش در رخدادهای سیلابی تهیه گردید. سپس با تلفیق داده‌های اقلیمی و لایه‌های اطلاعاتی مربوط به کاربری اراضی و مدل رقومی ارتفاعی (DEM)، پهنه‌بندی خطر سیلاب در محیط GIS انجام گرفت. نتایج نشان داد که مناطق پایین‌دست حوضه، به‌ویژه اراضی کشاورزی و نواحی مسکونی نزدیک به بستر رودخانه، بیشترین پتانسیل سیل‌خیزی را دارند. همچنین نقش تغییرات کاربری اراضی در افزایش رواناب و تشدید خطر سیلاب کاملاً مشهود بود. یافته‌های این تحقیق می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد در مدیریت منابع آب و کاهش خسارات ناشی از سیلاب در منطقه به‌کار گرفته شود.

کلید واژه‌ها: سیلاب، پهنه‌بندی خطر، لیقوان‌چای، داده‌های اقلیمی، GrADS.

مقدمه

سیلاب به‌عنوان یکی از رایج‌ترین و ویرانگرترین بلایای طبیعی، همواره تهدیدی جدی برای جوامع انسانی، زیرساخت‌ها و محیط‌زیست به شمار می‌آید. طبق گزارش سازمان ملل متحد، بیش از ۴۰ درصد خسارات ناشی از بلایای طبیعی در جهان

مربوط به سیلاب‌هاست که علاوه بر تلفات انسانی، خسارات اقتصادی و اجتماعی فراوانی به همراه دارد (UNDRR,2020).
ایران به دلیل موقعیت جغرافیایی خاص، اقلیم خشک و نیمه‌خشک، و وجود حوضه‌های آبریز متعدد در مناطق کوهستانی، از جمله کشورهایی است که همواره با خطر وقوع سیلاب‌های ناگهانی و مخرب مواجه بوده است (یوسفی و همکاران، ۱۳۹۸؛ فتحی و همکاران، ۱۴۰۰).
از عوامل اصلی بروز سیلاب می‌توان به بارش‌های شدید و کوتاه‌مدت، تغییرات اقلیمی، تخریب پوشش گیاهی، تغییر کاربری اراضی و توسعه بی‌رویه شهرنشینی در بستر و حریم رودخانه‌ها اشاره کرد. این عوامل با کاهش نفوذپذیری خاک و افزایش رواناب سطحی، موجب تشدید فراوانی و شدت رخدادهای سیلابی می‌شوند (زارع و همکاران، ۱۳۹۷؛ عبدی و همکاران، ۱۳۹۹). به همین دلیل، شناسایی مناطق پرخطر و پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی در مقیاس‌های مختلف، یکی از ابزارهای کلیدی در مدیریت ریسک و کاهش خسارات ناشی از سیلاب محسوب می‌شود (محمدی و همکاران، ۱۳۹۶).

حوضهٔ آبریز لیقوان‌چای در جنوب‌شرق تبریز، یکی از مناطق مستعد سیلاب در شمال‌غرب ایران است. ویژگی‌های اقلیمی سرد و نیمه‌خشک، شیب‌های تند در بالادست و دشت‌های آبرفتی در پایین‌دست، همراه با تغییرات شدید کاربری اراضی، این حوضه را به منطقه‌ای با آسیب‌پذیری بالا در برابر سیلاب‌های ناگهانی تبدیل کرده است. وقوع رخدادهای سیلابی متعدد در دهه‌های اخیر ـ از جمله سیلاب‌های سال‌های ۱۳۷۵، ۱۳۹۶ و ۱۳۹۸ ـ نشان‌دهندهٔ ضرورت توجه ویژه به شناسایی و مدیریت خطر سیلاب در این منطقه است (صادقی و همکاران، ۱۳۹۹؛ یوسفی و همکاران، ۱۴۰۱).
در سال‌های گذشته، پژوهش‌های متعددی در ایران و جهان برای پهنه‌بندی خطر سیلاب انجام شده است. در ایران، پژوهشگرانی مانند حجازی و همکاران (۱۳۹۴) و کاظمی و همکاران (۱۳۹۶) با بهره‌گیری از GIS و مدل‌های هیدرولیکی، مناطق پرخطر را شناسایی کرده‌اند (حجازی و همکاران، ۱۳۹۴؛ کاظمی و همکاران، ۱۳۹۶). در سطح جهانی نیز مطالعاتی مانند Shrestha و همکاران (۲۰۱۴) و Merwade و همکاران (۲۰۱۲) نشان داده‌اند که ترکیب داده‌های مکانی، اقلیمی و هیدرولوژیکی نقش مهمی در بهبود دقت نقشه‌های پهنه‌بندی دارد.
با این حال، بیشتر تحقیقات داخلی تمرکز خود را بر مدل‌های هیدرولوژیکی و هیدرولیکی گذاشته‌اند و کمتر به استفاده از داده‌های اقلیمی شبکه‌ای پرداخته‌اند. نرم‌افزار GrADS (Grid Analysis and Display System) یکی از ابزارهای توانمند در این زمینه است که با قابلیت پردازش داده‌های شبکه‌ای اقلیمی و ترسیم نقشه‌های همدیدی، امکان تحلیل دقیق الگوهای بارش و شناسایی مناطق مستعد وقوع سیلاب را فراهم می‌کند (Ahmed; Doty, et al., ۱۹۹۵ ۲۰۱۷).
تصاویر برداشت‌شده از منطقه لیقوان‌چایی نشان‌دهنده‌ی ابعاد خسارات ناشی از سیلاب اخیر هستند. این شواهد تصویری ضرورت مطالعه دقیق‌تر علل و پیامدهای سیل در این منطقه را برجسته می‌سازد.



شکل ۱- تجمع گسترده‌ی سنگریزه‌ها و مصالح در مسیر آبراهه که نشانه‌ای از شدت جریان سیل اخیر است



شکل 2- فرسایش شدید بستر و کناره‌های رودخانه لیقوان‌چایی در اثر جریان سیلاب



شکل 3- تخریب مسیر دسترسی و انباشت رسوبات ناشی از سیلاب در حاشیه‌ی روستا

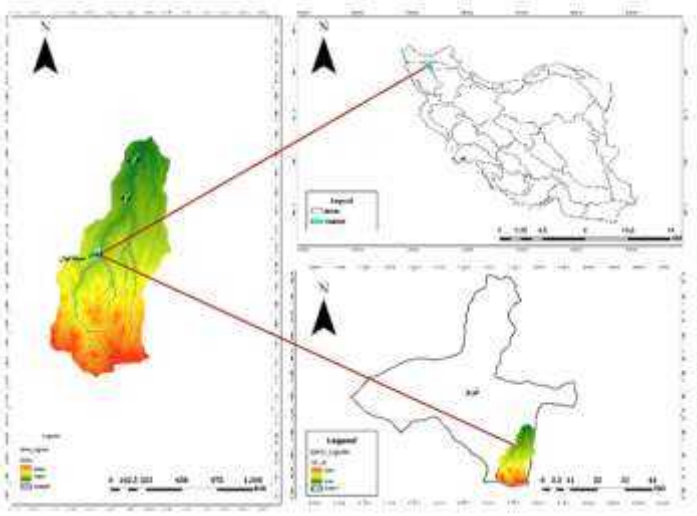
همان‌گونه که در تصاویر مشاهده می‌شود، شدت جریان آب سبب جابجایی سنگ‌ها و رسوبات در مسیر آبراهه و همچنین تخریب بخشی از اراضی اطراف شده است. استمرار چنین رخدادهایی نه‌تنها تهدیدی برای محیط‌زیست منطقه محسوب می‌شود، بلکه حیات اقتصادی و اجتماعی ساکنان محلی را نیز به خطر می‌اندازد. از این رو بررسی علمی علل، پیامدها و راهکارهای کاهش خطر سیلاب در این حوضه آبریز امری ضروری است.

با توجه به اهمیت موضوع، پژوهش حاضر با هدف پهنه‌بندی و پیش‌بینی پتانسیل سیل‌خیزی در حوضهٔ لیقوان‌چای تبریز با استفاده از داده‌های اقلیمی در محیط نرم‌افزار GrADS انجام شده است. در این تحقیق، تلاش شده است تا با ترکیب داده‌های اقلیمی و مکانی، الگوهای مکانی–زمانی سیلاب شناسایی شده و نقشه‌های خطر سیلاب برای مناطق مختلف حوضه تهیه گردد. نتایج این پژوهش می‌تواند مبنای مناسبی برای مدیریت منابع آب، برنامه‌ریزی شهری و کاهش اثرات مخرب سیلاب در این منطقه فراهم آورد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

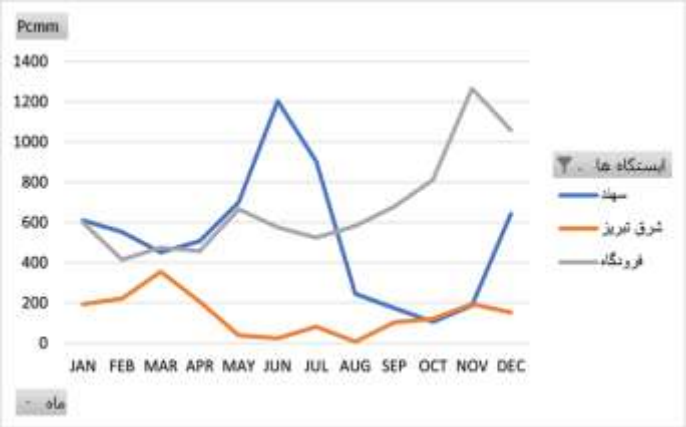
حوضه لیقوان‌چای در استان آذربایجان شرقی و در جنوب‌شرقی شهرستان تبریز واقع شده است. این حوضه با مساحتی حدود ۱۴۲ کیلومتر مربع، از کوه‌های سهند در جنوب تا دشت‌های اطراف تبریز در شمال امتداد دارد. رودخانه لیقوان‌چای که از این حوضه می‌گذرد، به‌عنوان یکی از منابع اصلی آب در منطقه شناخته می‌شود.



شکل ۴- موقعیت منطقه مورد مطالعه

شیب‌های تند و توپوگرافی کوهستانی در بخش‌های بالادست حوضه، همراه با شیب‌های ملایم‌تر در نواحی پایین‌دست، باعث می‌شود که این منطقه به‌ویژه در فصول بارندگی شدید، در معرض خطر سیلاب قرار گیرد.

بررسی مجموع بارش ماهانه نیز نشان می‌دهد که بیشترین بارش در فصل‌های سرد سال و بهار و کمترین آن در تابستان ثبت شده است. این تنوع اقلیمی، به‌ویژه به دلیل تفاوت‌های ارتفاعی و توپوگرافی، نقش مهمی در شکل‌گیری رواناب، فرسایش و بروز سیلاب در حوضه لیقوان‌چای دارد.



شکل ۵-مجموع بارش منطقه مورد مطالعه ۲۰۲۳-۱۹۹۳

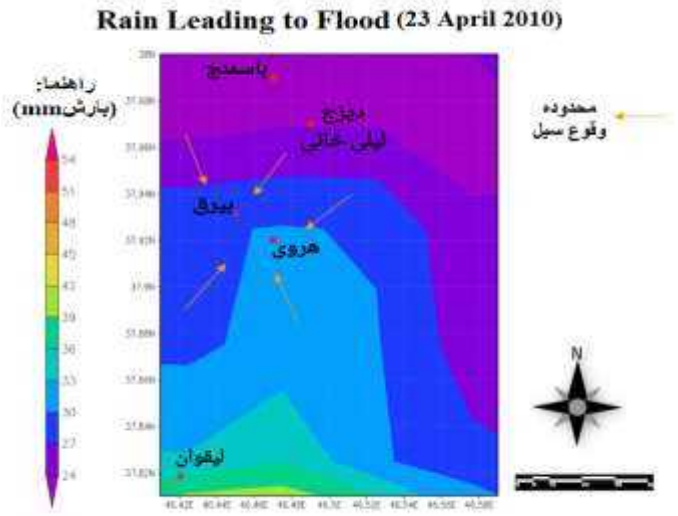
روش‌ها

برای بررسی و تحلیل بارش‌های منجر به وقوع سیلاب در حوضهٔ آبریز لیقوان‌چای، از داده‌های بارش ماهواره‌ای CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data) استفاده گردید. این مجموعه داده با بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای در محدوده فروسرخ و ترکیب آن‌ها با داده‌های ایستگاه‌های زمینی، تخمین بارش را با تفکیک مکانی حدود نیم درجه و در بازه زمانی روزانه ارائه می‌دهد و به دلیل پوشش گسترده و دقت قابل قبول، به‌ویژه در مناطق کوهستانی و نیمه‌خشک، کاربرد وسیعی در مطالعات مرتبط با بارش‌های حدی و سیلاب دارد (Funk et al., 2015). در این پژوهش، به‌جای تحلیل میانگین‌های سالانه یا بلندمدت بارش، تمرکز بر روی تاریخ‌هایی بود که بارش‌های شدید در آن‌ها منجر به وقوع سیلاب‌های مخرب در حوضه لیقوان‌چای شده است. بدین منظور، بر اساس گزارش‌های ثبت‌شده محلی، داده‌های هیدرومتری و سوابق سیلاب‌های اخیر، چندین رخداد بارشی شاخص شناسایی و داده‌های CHIRPS مربوط به این روزها استخراج گردید تا امکان بررسی الگوهای بارش و شدت آن‌ها فراهم شود.

برای تحلیل و پردازش داده‌های انتخاب‌شده، از نرم‌افزار GrADS (Grid Analysis and Display System) استفاده شد. این نرم‌افزار یک محیط متن‌باز و قدرتمند برای تجسم و تحلیل داده‌های شبکه‌ای اقلیمی و هواشناسی است که قابلیت پشتیبانی از فرمت‌های استانداردی نظیر NetCDF و GRIB را داراست و امکان اجرای محاسبات زمانی و مکانی متنوعی را فراهم می‌سازد. در این پژوهش، داده‌های بارش روزانه در قالب NetCDF به محیط GrADS وارد گردید و پس از آماده‌سازی اولیه، با استفاده از دستورات تحلیلی، نقشه‌های توزیع مکانی بارش برای تاریخ‌های منتخب ترسیم شد. خروجی‌های به‌دست‌آمده به صورت نقشه‌های روزانه استخراج گردید که شدت، گستره و پراکنش بارش‌های سنگین را در سطح حوضه نشان می‌داد. این نقشه‌ها علاوه بر نمایش نقاطی با بیشترین تراکم بارش، مبنای اصلی برای تحلیل ارتباط میان بارش‌های

شدید و وقوع سیلاب‌های ثبت‌شده در حوضه بوده و در ادامه برای پهنه‌بندی پتانسیل سیل‌خیزی منطقه مورد استفاده قرار گرفتند.

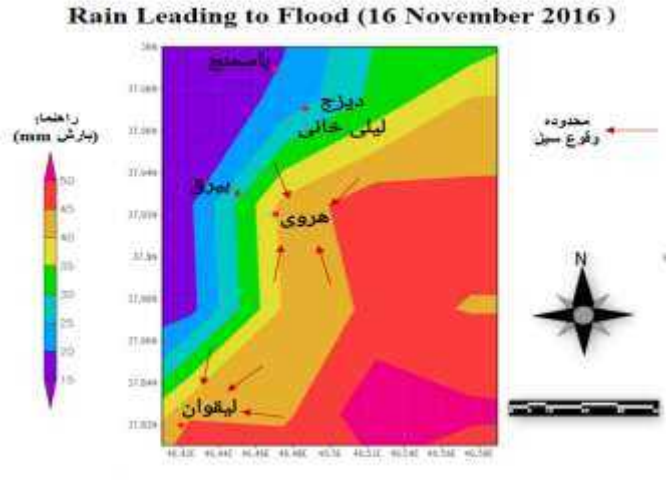
همان‌گونه که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، بارش رخ داده در تاریخ ۳ اردیبهشت ۱۳۸۹ (۲۳ آوریل ۲۰۱۰) دارای شدت قابل‌توجهی بوده و به‌طور مستقیم منجر به وقوع سیلاب در حوضه لیقوان‌چای شده است. مقادیر بارش در این رخداد بین حدود ۲۴ تا بیش از ۵۴ میلی‌متر متغیر بوده و الگوی فضایی آن ناهمگون است. بیشترین بارش در بخش‌های شمال‌غربی حوضه، به‌ویژه در محدوده روستاهای بیرق و هروی رخ داده که در پهنه‌های رنگی آبی پررنگ تا بنفش قرار دارند (بیش از ۴۵ میلی‌متر). در مقابل، مناطق جنوبی و جنوب‌شرقی حوضه مانند لیقوان بارش کمتری در حدود ۲۵ تا ۳۰ میلی‌متر دریافت کرده‌اند. این توزیع مکانی نشان می‌دهد که تمرکز بارش‌های سنگین در شمال حوضه و شیب مناسب اراضی، سبب افزایش سریع رواناب سطحی و هدایت آن به سمت پایین‌دست شده و در نهایت جریان‌های پرحجم سیلاب در مسیر لیقوان‌چای را به وجود آورده است. بنابراین، وقوع این سیلاب نتیجه ترکیب شدت بالای بارش و شرایط هیدرولوژیکی ویژه حوضه در این تاریخ بوده است.



شکل ۶- توزیع مکانی بارش منجر به سیلاب در ۲۳ آوریل ۲۰۱۰

این نقشه توزیع مکانی بارش در حوضهٔ آبریز لیقوان در تاریخ ۲۶ آبان ۱۳۹۵ (۱۶ نوامبر ۲۰۱۶) را نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، شدت بارش از بخش‌های غربی و شمال‌غربی حوضه (محدوده یاسمنج و بیرق) با مقادیر کمتر از ۲۰ میلی‌متر آغاز شده و به‌تدریج در جهت شرق و جنوب‌شرق افزایش یافته است. بیشینه بارش در نواحی مرکزی و شرقی حوضه (نزدیکی هروی و شرق لیقوان) ثبت شده که بیش از ۴۵ میلی‌متر بوده است. این الگوی ناهمگن بارش نشان می‌دهد

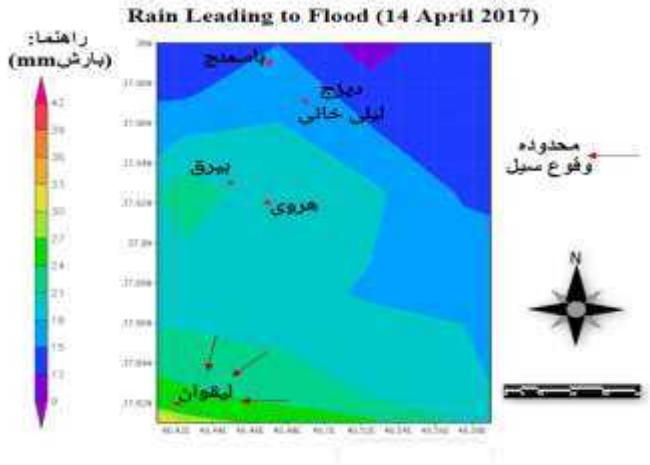
که بخش‌های مرکزی و شرقی بیشترین سهم بارش را دریافت کرده‌اند و در نتیجه، این مناطق مستعد تمرکز رواناب سطحی و افزایش احتمال وقوع سیلاب در بخش‌های میانی و پایین‌دست رودخانه لیقوان‌چای هستند.



شکل ۷- توزیع مکانی بارش منجر به سیلاب در ۱۶ نوامبر ۲۰۱۶

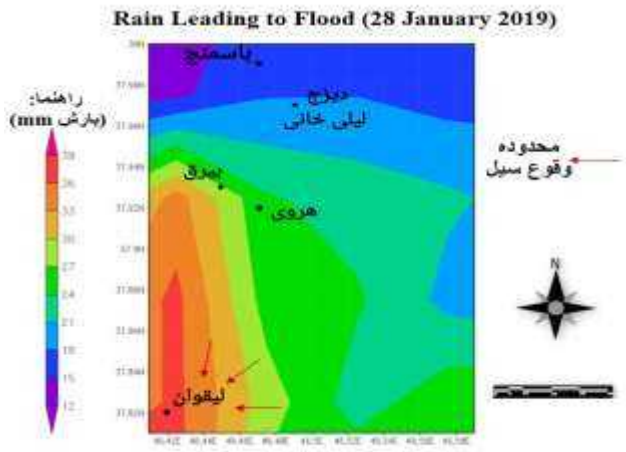
همان‌گونه که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، نقشه توزیع مکانی بارش در حوضهٔ آبریز لیقوان در تاریخ ۲۵ فروردین ۱۳۹۶ (۱۴ آوریل ۲۰۱۷) را نشان می‌دهد. الگوی بارش در این روز نسبت به رخداد سال ۲۰۱۶ یکنواخت‌تر بوده و در بیشتر نقاط حوضه مقادیر بین ۱۵ تا ۲۵ میلی‌متر ثبت شده است. بیشینه بارش در بخش‌های جنوب‌غربی حوضه، به‌ویژه در حوالی روستای لیقوان، حدود ۳۰ تا ۳۳ میلی‌متر بوده و در شمال و شمال‌شرق حوضه (محدوده یاسمنج و دیزج لیلی‌خانی) به کمتر از ۱۵ میلی‌متر کاهش یافته است. این الگو نشان‌دهندهٔ تمرکز نزولات جوی در نواحی جنوبی و غربی و کاهش تدریجی

آن در شمال و شمال‌شرق است که می‌تواند موجب افزایش رواناب و خطر وقوع سیلاب در بخش‌های پایین‌دست، به‌ویژه در اطراف روستای لیقوان شود.



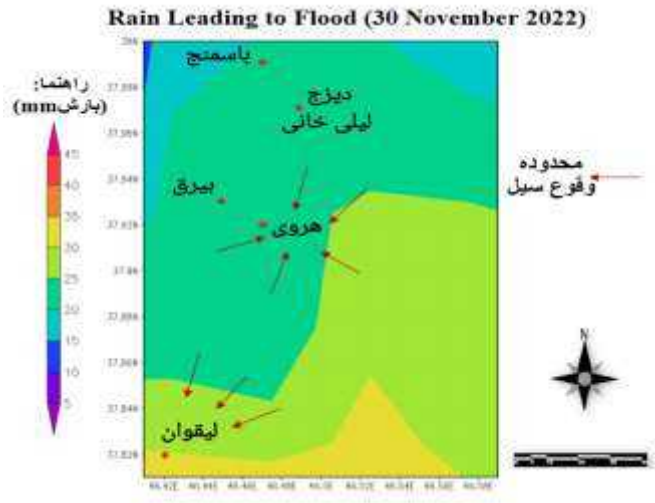
شکل ۸- توزیع مکانی بارش منجر به سیلاب در ۱۴ آوریل ۲۰۱۷

در نقشه بارش ۲۸ ژانویه ۲۰۱۹ بیشترین میزان بارش در جنوب‌غربی حوضهٔ آبریز لیقوان مشاهده می‌شود. این بخش که روستای لیقوان در آن قرار دارد، در محدوده رنگ‌های قرمز و نارنجی نقشه واقع شده و مقادیر بارش آن حدود ۳۶ تا ۳۹ میلی‌متر برآورد شده است. مقایسه این الگو با سایر بخش‌های حوضه نشان می‌دهد که شدت بارش در روستای لیقوان به‌طور قابل‌توجهی بیشتر از سایر روستاهای حوضه بوده و در نتیجه این ناحیه به‌عنوان پربارش‌ترین نقطه در میان روستاهای نمایش‌داده‌شده روی نقشه در سال ۲۰۱۹ شناخته می‌شود. چنین تمرکزی در بارش می‌تواند نقش مهمی در افزایش رواناب سطحی و تشدید خطر وقوع سیلاب در بخش‌های پایین‌دست رودخانه لیقوان‌چای داشته باشد.



شکل ۹- توزیع مکانی بارش منجر به سیلاب در ۲۸ ژانویه ۲۰۱۹

این نقشه میزان بارش در حوضهٔ آبریز لیقوان را در تاریخ ۳۰ نوامبر ۲۰۲۲ نمایش می‌دهد. مقدار بارش در سطح حوضه بین حدود ۵ تا ۴۵ میلی‌متر متغیر بوده و با طیف رنگی مختلف نشان داده شده است؛ به‌گونه‌ای که رنگ‌های بنفش و آبی بیانگر بارش کمتر (۵ تا ۱۵ میلی‌متر) و رنگ‌های سبز تا زرد نشان‌دهندهٔ بارش بیشتر (۲۰ تا ۳۰ میلی‌متر) هستند. بر اساس توزیع مکانی، بیشترین بارش در نواحی میانی و جنوب‌شرقی حوضه مشاهده می‌شود که به روستای هروی نزدیک‌تر است. بخش‌های اطراف روستای لیقوان نیز بارشی نسبتاً متوسط تا زیاد (حدود ۲۰ تا ۲۵ میلی‌متر) را تجربه کرده‌اند. در مقابل، روستاهای یامسنج و بیرق در شمال و شمال‌غرب حوضه در محدوده بارش کمتر از ۲۰ میلی‌متر قرار گرفته‌اند. به طور کلی، در این تاریخ روستای هروی و نواحی پیرامونی لیقوان جزو پربارش‌ترین بخش‌های حوضه بوده‌اند.



شکل ۱۰- توزیع مکانی بارش منجر به سیلاب در ۳۰ نوامبر ۲۰۲۲

نتیجه‌گیری

نتیجه‌گیری از بررسی نقشه‌های توزیع مکانی بارش در حوضهٔ آبریز لیقوان طی سال‌های مختلف نشان می‌دهد که الگوی بارش در این منطقه همواره ناهمگن بوده و شدت و پراکنش آن در مقاطع زمانی گوناگون تفاوت قابل‌توجهی داشته است. رخداد بارشی سوم اردیبهشت ۱۳۸۹ (۲۳ آوریل ۲۰۱۰) به دلیل شدت بالای بارش در بخش‌های شمالی و شمال‌غربی (به‌ویژه بیرق و هروی) و شرایط هیدرولوژیکی خاص حوضه، منجر به وقوع سیلاب گسترده در لیقوان‌چای شد. در رخداد ۲۶ آبان ۱۳۹۵ (۱۶ نوامبر ۲۰۱۶)، تمرکز بارش به سمت نواحی مرکزی و شرقی حوضه منتقل شد و این مناطق را به کانون اصلی تولید رواناب تبدیل کرد. در بارش ۲۵ فروردین ۱۳۹۶ (۱۴ آوریل ۲۰۱۷)، الگوی نسبتاً یکنواخت‌تری مشاهده شد، اما همچنان بخش‌های جنوبی و غربی (به‌ویژه اطراف روستای لیقوان) بیشترین بارش را دریافت کرده و مستعد افزایش رواناب بودند. رخداد ۲۸ ژانویه ۲۰۱۹ با بیشینه بارش در جنوب‌غربی حوضه، روستای لیقوان را به‌عنوان پربارش‌ترین نقطه معرفی کرد که این امر خطر وقوع سیلاب در پایین‌دست را تشدید می‌کرد. در نهایت، در تاریخ ۳۰ نوامبر ۲۰۲۲ تمرکز بارش به سمت نواحی میانی و جنوب‌شرقی (مجاور هروی) تغییر یافت و در کنار آن، اطراف لیقوان نیز بارشی متوسط تا زیاد دریافت کرد.

به‌طور کلی، بررسی این پنج رخداد بارشی نشان می‌دهد که تغییرات مکانی و زمانی بارش در حوضهٔ لیقوان‌چای الگوهای متفاوتی را رقم زده است، اما در بیشتر موارد، نواحی جنوبی، مرکزی و شرقی حوضه سهم بیشتری از بارش را داشته و همین امر سبب افزایش خطر رواناب و وقوع سیلاب در بخش‌های پایین‌دست به‌ویژه در محدوده روستای لیقوان شده است.

این نتایج اهمیت توجه به ناهمگنی مکانی بارش و نقش آن در مدیریت ریسک سیلاب و برنامه‌ریزی منابع آب را به‌خوبی نشان می‌دهد.

منابع

عبدی، ع.، و همکاران. (۱۳۹۹). کاربرد GIS در تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی خطر سیلاب. نشریه سنجش از دور و GIS ایران.

جعفری، ع.، و همکاران. (۱۳۹۸). پهنه‌بندی خطر سیلاب با استفاده از GIS و HEC-RAS در حوضه ... . مجله علوم آب ایران.

حجازی، م.، و همکاران. (۱۳۹۴). کاربرد سنجش‌ازدور و GIS در پهنه‌بندی مناطق سیل‌خیز حوضه لیقوان‌چای. نشریه جغرافیا و برنامه‌ریزی.

حسینی، م.، و همکاران. (۱۴۰۰). کاربرد داده‌های اقلیمی در پیش‌بینی رخداد سیلاب. مجله پژوهش‌های اقلیم‌شناسی.

خورشیددوست، ع. م.، جهانبخش‌اصل، س.، عباسی‌قصریک، ف.، عباسی‌قصریک، ز. (۱۴۰۳). کاربرد تطبیقی مدل‌های سری زمانی در پیش‌بینی بارش استان آذربایجان غربی. فصلنامه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۲۴(۷۵)، ۹۸–۱۱۵.

زارع، م.، و همکاران. (۱۳۹۷). پهنه‌بندی سیلاب و نقش آن در مدیریت ریسک. فصلنامه مدیریت بحران.

ساری صراف، بهروز؛ محمودی، سعید؛ زنگنه، سعید؛ پاشایی، زهرا. (۱۳۹۴). پایش و پیش‌بینی ترسالی و خشکسالی تبریز با استفاده از مدل CLIMGEN و شاخص SPI. هیدروژئومورفولوژی، ۲(۲)، ۶۱–۷۸.

صادقی، ک.، و همکاران. (۱۳۹۹). بررسی تغییرات کاربری اراضی و اثر آن بر وقوع سیلاب در شمال‌غرب ایران. نشریه جغرافیا و برنامه‌ریزی.

کاظمی، ر.، و همکاران. (۱۳۹۶). مدیریت مخاطرات سیلاب با استفاده از مدل HEC-RAS (مطالعه موردی: رودخانه سیمینه‌رود). نشریه علوم و فنون آب.

محمدی، س.، و همکاران. (۱۳۹۶). پهنه‌بندی خطر سیلاب در حوضه‌های آبریز ایران با استفاده از مدل‌های هیدرولوژیکی. مجله تحقیقات منابع آب ایران.

موقری، ع.، و جوان، خ. (۱۴۰۲). توزیع مکانی روند تغییر فراسنج‌های فرین بارش شمال‌غرب ایران و ارتباط آن با گردش عمومی جو منطقه. مجله مدیریت بیابان، ۱۱(۳)، ۳۷–۵۶.

یوسفی، ح.، و همکاران. (۱۳۹۸). تحلیل رخدادهای سیلابی ایران با تأکید بر تغییرات اقلیمی. مجله جغرافیا و توسعه.

یوسفی، ح.، و همکاران. (۱۴۰۱). ارزیابی خطر سیلاب با استفاده از داده‌های هیدرولوژیکی و GIS. نشریه محیط‌زیست ایران.

Ahmed, S., et al. (2017). Flood hazard mapping using satellite precipitation data and GrADS. Journal of Hydrology, 550, 350–364.

Doty, B. (1995). The Grid Analysis and Display System (GrADS): A scientific software package. University

of Maryland.

Javan, K., Movaghari, A., & Park, J. S. (2023). Projected changes in extreme precipitation indices over the Lake Urmia basin in Iran. Journal of Water and Climate Change, 14(8), 2564–2582.

Merwade, V., Cook, A., & Coonrod, J. (2012). GIS techniques for floodplain mapping. Environmental Modelling & Software, 26(6), 817–832.

Shrestha, B., et al. (2014). Flood hazard mapping in data-scarce environments. Hydrological Sciences Journal, 59(6), 1234–1245.

UNDRR (United Nations Office for Disaster Risk Reduction). (2020). Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction. UNDRR Report.

Flood Hazard Zoning and Susceptibility Prediction in the Liqvan-Chay Basin, Tabriz, Using Climatic Data and GrADS Software

Fatemeh Hosseinpour Asl[1], Ali Mohammad Khorshiddoust[2], Behroz Sari Sarraf[3]

Masters student in climatology, University of Tabriz.

Department of Climatology, University of Tabriz.

Department of Climatology, University of Tabriz.

* Corresponding author: f.hosseinpour1402@ms.tabrizu.ac.ir

ABSTRACT

Flood is one of the most destructive hydrological phenomena, causing severe damages to infrastructure, agricultural lands, and human settlements every year. The Liqvan-Chay watershed, located in the southeast of Tabriz, has shown high vulnerability to floods in recent years due to its topographic conditions, intense precipitation, and land-use changes—particularly during the flood events of 2017 and 2019. In this study, climatic data (precipitation and temperature) were processed in the GrADS software environment to extract the prevailing rainfall patterns of the basin, and cumulative precipitation as well as rainfall intensity maps were generated for the flood events. Subsequently, by integrating climatic data with land-use information layers and the Digital Elevation Model (DEM), flood hazard zoning was carried out in the GIS environment. The results revealed that the downstream areas of the basin, especially agricultural lands and residential zones near the river channel, have the highest flood susceptibility. Moreover, the role of land-use changes in increasing runoff and intensifying flood risk was clearly evident. The findings of this research can serve as an effective tool for water resources management and flood damage mitigation in the region.

Keywords: Flood, Hazard Zoning, Liqvan-Chay, Climatic Data, GrA

سومین کنفرانس ملی آب و هواشناسی ایران (با محوریت تغییر اقلیم)
The 3rd National Conference on Climatology of Iran (Focusing on Climate Change)
ارومیه ۱۶ مهر ۱۴۰۴

بررسی نمادین غبار و مه در رمان جین ایر اثر شارلوت برونته

نیلی عفراوی[۱]

هاله زرگرزاده[2]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد ادبیات انگلیسی، گروه زبان و ادبیات انگلیسی، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه ارومیه، st_n.afravi@urmia.ac.ir

۲- استادیار، گروه زبان و ادبیات انگلیسی، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه ارومیه، نویسنده مسئول، h.zargarzadeh@urmia.ac.ir

چکیده

این مقاله با هدف بررسی نقش عناصر جوی مه و غبار در رمان جین ایر(Jane Eyre) اثر شارلوت برونته (Charlotte Brontë) از منظر بوم‌شناختی-انتقادی، به تحلیل پیوند میان طبیعت و تجربه‌های روانی و اجتماعی شخصیت اصلی می‌پردازد. مسئله‌ی اصلی پژوهش، چگونگی عملکرد مه و غبار به‌عنوان نمادهایی محیطی در بازنمایی مفاهیمی چون ابهام زمانی، حاشیه‌نشینی اجتماعی و تعالی معنوی است. استدلال این مقاله بر این است که این عناصر جوی نه‌تنها جلوه‌هایی طبیعی‌اند، بلکه استعاره‌هایی پویا هستند که در ساختار روایی و تحول شخصیت جین نقش کلیدی دارند. روش تحقیق، تحلیل متنی با تکیه بر نظریه‌های بوم‌گرایی شریل گلاتفلتی و دیدگاه‌های گرگ گارارد درباره طبیعت آشفته است. در این چارچوب، مه و غبار در سه مکان اصلی رمان—لوود(Lowood)، ثورنفیلد (Thornfield) و دشت‌های یورکشایر(yorkshire)—بررسی شده‌اند تا نحوه‌ی بازتاب مبارزات درونی و اجتماعی جین روشن شود. نتایج نشان می‌دهد که این عناصر با ایجاد فضای تعلیق، محو مرزهای زمانی و تقویت انزوا، به شکل‌گیری هویت فردی و معنوی جین کمک می‌کنند. این مطالعه مفهومی عمیق‌تر از تعامل طبیعت، جنسیت و فرهنگ در آثار برونته دست می‌یابد.

کلید واژه‌ها: رویکرد بوم‌شناختی، جین ایر، شارلوت برونته، گرگ گارارد، شریل گلاتفلتی.

مقدمه

با گسترش مطالعات میان‌رشته‌ای در حوزه‌ی ادبیات و محیط زیست، توجه به عناصر طبیعی در ساختار روایی آثار کلاسیک اهمیت فزاینده‌ای یافته است. رمان جین ایر(Jane Eyre) اثر شارلوت برونته (Charlotte Brontë) (۱۸۴۷) نمونه‌ای برجسته از بهره‌گیری از پدیده‌های جوی مانند مه و غبار برای بازنمایی حالات روانی، موقعیت‌های اجتماعی و تحولات معنوی شخصیت اصلی است. گلاتفلتی در کتاب خوانش بوم‌نقد The Ecocriticism Reader (1996) بوم‌نقد را مطالعه‌ی رابطه‌ی ادبیات با محیط فیزیکی تعریف می‌کند و چارچوبی برای تحلیل مناظر طبیعی به‌عنوان بازتابی از روایت‌های فرهنگی و روانی ارائه می‌دهد. پژوهش‌هایی مانند « ارتباط و شخصیت: مناظر در جین ایر» (Landscape and Character in Jane Eyre and Wide Sargasso Sea اما عناصر جوی مانند مه و غبار را نادیده می‌گیرند.

گرگوری گارارد (Greg Garrard) در آثار خود با تحلیل مفاهیمی چون طبیعت والا، آشفتگی محیطی و عاملیت غیرانسانی، زمینه‌ای فراهم می‌سازد تا مه و غبار به‌عنوان فضاهایی والا و تأمل‌برانگیز در جین ایر درک شوند. با وجود تأثیر نظریات او، هیچ پژوهشی چارچوب‌های گارارد را برای تحلیل مه و غبار در این رمان به‌کار نگرفته است. مطالعاتی که به آتش، باران یا دشت‌ها پرداخته‌اند، مه و غبار را به‌عنوان نمادهای روایی مستقل کنار گذاشته‌اند. کتاب‌های گرگوری گارارد در حوزه بوم‌نقد، تلاش می‌کنند تا پیوندی تازه میان ادبیات و محیط‌زیست برقرار کنند. گارارد در آثارش، به‌ویژه در کتاب Ecocriticism، بوم‌نقد را نه صرفاً واکنشی به بحران زیست‌محیطی، بلکه روشی برای بازاندیشی در رابطه انسان با طبیعت در بستر فرهنگی و زبانی می‌داند. او مفاهیمی چون «وحشت»، «بومی‌گرایی»، و «آپوکالیپس» را در متون ادبی بررسی می‌کند تا نشان دهد چگونه تخیل ادبی می‌تواند به بازسازی اخلاقی و زیباشناختی نسبت به جهان طبیعی منجر شود. گلیتفرد نیز با تمرکز بر روایت‌های بومی و استعاره‌های طبیعت، به نقش حیوانات، اکوسفر و رؤیاهای طبیعت‌محور در ادبیات معاصر می‌پردازد. این دو نویسنده، بوم‌نقد را از یک رویکرد صرفاً نظری به ابزاری برای کنش‌گری فرهنگی و زیست‌محیطی تبدیل کرده‌اند.

شارلوت برونته (۱۸۱۶–۱۸۵۵)، نویسنده‌ای از دل یورکشایر انگلستان، با زندگی‌ای آمیخته به فقدان، تنهایی و تخیل، یکی از چهره‌های برجسته ادبیات ویکتوریایی است. او همراه با خواهرانش امیلی و آن، دنیایی خیالی خلق کرد که بعدها در آثارشان بازتاب یافت. برونته از تجربه‌های شخصی‌اش در مدارس سخت‌گیرانه، روابط خانوادگی، و کار به‌عنوان معلم خصوصی، الهام گرفت تا شخصیت‌هایی بسازد که در برابر ناملایمات، با قدرت درونی و استقلال فکری ایستادگی می‌کنند. او با نام مستعار کرر بل (Currer Bell) می‌نوشت تا از تبعیض جنسیتی زمانه‌اش عبور کند، و همین انتخاب نشان از جسارت و آگاهی اجتماعی‌اش دارد.

رمان جین ایر اثر شارلوت برونته، داستان زندگی دختری یتیم و فقیر به نام جین است که از کودکی با سختی‌های فراوانی روبه‌رو می‌شود. او ابتدا در خانه‌ی عمه‌اش، خانم رید (Mrs. Reed) ، مورد بی‌مهری و آزار قرار می‌گیرد و سپس به مدرسه‌ی شبانه‌روزی لوود (Lowood Institution) فرستاده می‌شود؛ جایی که شرایط سخت و رفتارهای تحقیرآمیز مدیر مدرسه، آقای براکلهرست (Mr. Brocklehurst،) زندگی او را دشوارتر می‌کند. با گذشت زمان، جین به زنی مستقل و تحصیل‌کرده تبدیل می‌شود و به عنوان معلم سرخانه در عمارت ثورنفیل (Thornfield Hall) مشغول به کار می‌شود. در آنجا با آقای ادوارد روچستر(Edward Rochester)، مردی مرموز و پرشور، آشنا می‌شود و میان آن‌ها رابطه‌ای عاشقانه شکل می‌گیرد. اما جین در آستانه‌ی ازدواج با روچستر، متوجه می‌شود که همسر روان‌پریش او در خانه پنهان شده است. جین با وجود عشق عمیقش، تصمیم می‌گیرد از او جدا شود تا اصول اخلاقی‌اش را حفظ کند. پس از مدتی، خانه‌ی ثورنفیلد در آتش می‌سوزد، همسر روچستر جان می‌بازد و خود او بینایی‌اش را از دست می‌دهد. جین در نهایت به روچستر بازمی‌گردد و با او زندگی تازه‌ای را آغاز می‌کند، بر پایه‌ی عشق، احترام و استقلال. با تمرکز بر تحلیل بوم‌شناختی-انتقادی، مه و غبار را نه صرفاً عناصر پس‌زمینه، بلکه استعاره‌هایی پویا در تعامل میان طبیعت و فرهنگ بررسی میکنیم. بر اساس نظریه‌ی شریل گلاتفلتی درباره‌ی رابطه‌ی ادبیات و محیط فیزیکی، و دیدگاه گرگ گارارد درباره‌ی طبیعت آشفته، این پژوهش نشان می‌دهد که مه و غبار در مکان‌هایی چون لوود، ثورنفیلد و دشت‌های یورکشایر(Yorkshire)، بازتابی از مبارزات درونی جین، حاشیه‌نشینی اجتماعی او و مسیر تعالی معنوی‌اش هستند. تمرکز او بر نقش ادبیات در شکل‌دهی به آگاهی زیست‌محیطی را می‌توان به ابعاد معنوی نیز گسترش داد؛ جایی که مه و غبار به‌عنوان عناصر طبیعی والا، زمینه‌ساز مواجهه‌های روحانی جین با امر متعالی می‌شوند (برای نمونه، دعاهای او در دشت‌ها). رویکرد میان‌رشته‌ای گلاتفلتی از این پیوند میان حضور محیطی مه و مضامین معنوی پشتیبانی می‌کند و نشان می‌دهد که طبیعت می‌تواند نقشی فراتر از پس‌زمینه‌ی روایی داشته باشد.

گارارد نیز در تحلیل خود از امر والا و روایت‌های آخرالزمانی در کتاب بوم‌نقد (ecocritisicm)، مه و غبار را فضاهایی والا می‌داند که حس شگفتی و تأمل معنوی را برمی‌انگیزند و با رشد اخلاقی و وجودی جین هم‌راستا هستند. تمرکز او بر عاملیت غیرانسانی، مه را به‌عنوان واسطه‌ای معنوی معرفی می‌کند که خارج از کنترل انسان عمل می‌کند و به تجربه‌های روحانی عمق و پیچیدگی بیشتری می‌بخشد. این دیدگاه‌ها مه و غبار را نه‌تنها عناصر جوی، بلکه نیروهایی فعال در تحول درونی شخصیت و ساختار معنایی رمان معرفی می‌کنند. این عناصر با محو کردن مرزهای دیداری و زمانی، فضایی تعلیق‌آمیز و رازآلود خلق می‌کنند که به شکل‌گیری هویت فردی جین کمک می‌کند. هدف مقاله، پر کردن خلأ موجود در پژوهش‌های پیشین درباره‌ی نقش نمادین این پدیده‌های جوی و ارائه‌ی خوانشی تازه از مناظر محیطی و عاطفی در جین ایر است.

پیشینه‌ی تحقیق

رویکردهای بوم‌نقدانه به رمان جین ایر اثر شارلوت برونته، در سال‌های اخیر توجه بیشتری به تعامل این اثر با جهان طبیعی نشان داده‌اند و بر نقش مناظر و عناصر محیطی در شکل‌گیری رشد روانی، اجتماعی و اخلاقی شخصیت جین تأکید کرده‌اند. با این حال، در حالی که ویژگی‌های برجسته‌ای چون دشت، باغ و طوفان به‌تفصیل بررسی شده‌اند، نقش خاص مه و غبار به‌عنوان عناصر جغرافیایی و عاطفی نمادین به‌ویژه در چارچوب نظریه‌های بوم‌نقدانه‌ی گلاتفلتی و گارارد، کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

مقاله مارگارت اس. کندی (Margaret S. Kennedy) ، که در Victorian Literature and Culture (2017) منتشر شده است، از نقد بوم‌شناختی برای بررسی آگاهی بوم‌شناختی در رمان جین ایر و مری بارتون(Mary Barton) اثر الیزابت گاسکل (Elizabeth Gaskell) استفاده می‌کند و استدلال می‌کند که رمان برونته، آلودگی پنهان روستایی را آشکار می‌کند. کندی از مفهوم «بیماری» جان راسکین برای برجسته کردن چگونگی رنج بردن شخصیت‌ها از بیماری‌های جسمی و روانی به دلیل جدایی از محیط زیست استفاده می‌کند، و جین ایر با آشکار کردن آلودگی مناظر روستایی، دیدگاه رمانتیک‌شده از آنها را به عنوان مناظری خالص به چالش می‌کشد (کندی، 2017). این مقاله به بررسی محیط‌هایی مانند لوود و تورنفیلد می‌پردازد و خاطرنشان می‌کند که چگونه عناصر محیطی، مبارزات روانی و اجتماعی جین را منعکس می‌کنند، اگرچه به طور خاص مه یا غبار را تحلیل نمی‌کند. این با چارچوب نقد بوم‌شناختی گلاتفلتی از «رابطه بین ادبیات و محیط فیزیکی» همسو است، اما نمادگرایی جوی مه را نادیده می‌گیرد (گلاتفلتی، 1996). تمرکز کندی بر ارتباطات زیست‌محیطی روستایی-شهری آب و هوای یورکشایر را تکمیل می‌کند، اما فاقد تمرکز ویژه بر نقش زمانی مه است.

مقاله جنیفر دی. فولر(Jennifer Fuller) با استفاده از نقد بوم‌شناختی، چگونگی بازتاب آگاهی زیست‌محیطی دوران ویکتوریایی در جین ایر را بررسی می‌کند و استدلال می‌کند که تعاملات جین با مناظر «وحشی»، مانند دشت‌ها، مضامین آزادی و رهایی را در بر می‌گیرد. فولر از دیدگاه بوم‌شناختی گلاتفلتی برای بررسی چگونگی ایجاد تعادل بین خواسته‌های انسانی و «وحشی بودن» جهان طبیعی استفاده می‌کند و دشت‌ها را به عنوان فضایی برای توانمندسازی به تصویر می‌کشد (فولر، ۲۰۱۳). در حالی که این مقاله بر چشم‌انداز بر جو تأکید دارد، به طور خلاصه به نقش آب و هوا در شکل‌دهی به حالات عاطفی جین اشاره می‌کند، اما به صراحت مه یا غبار را تحلیل نمی‌کند. این تمرکز بر دشت‌ها با منابعی مانند «ارتباطات و شخصیت» همسو است، اما ابهام زمانی مه را نادیده می‌گیرد. رویکرد فولر از استفاده روش‌شناسی از چارچوب گلاتفلتی و بافت جغرافیایی یورکشایر پشتیبانی می‌کند، اما عدم توجه آن به عناصر جوی، تازگی خوانش بوم‌انتقادیِ متمرکز بر مه را برجسته می‌کند.

مقاله تایلر نول (Tyler Knoll) ، منتشر شده در ساخت محیط‌های ادبی قرن نوزدهم در دانشگاه سایمون فریزر، استدلال می‌کند که جین ایر با پیوند دادن زنانگی جین به جو، با استفاده از نقد بوم‌شناختی و مفهوم «اتموسک»(Atmoscene)

جاستین پیزو(Justin) (pizzo برای بررسی تأثیر آب و هوا بر تجربه انسانی، به عنوان یک متن اولیه-اکوفمینیستی عمل می‌کند. نول معتقد است که برونته عناصر جوی، از جمله طوفان‌ها و بادها، را با استقلال جین مرتبط می‌کند، اگرچه مه و غبار مستقیماً مورد توجه قرار نمی‌گیرند. این مقاله با تکیه بر پیوندهای طبیعت-فرهنگ گلاتفلتی و استعاره‌های زیست‌محیطی گارارد، بررسی می‌کند که چگونه حساسیت زیست‌محیطی جین، هنجارهای جنسیتی ویکتوریایی را به چالش می‌کشد. دیدگاه اکوفمینیستی نول، رویکرد میان‌رشته‌ای روش‌شناسی، به‌ویژه استفاده‌ی مختصر آن از جغرافیای فمینیستی، را تکمیل می‌کند.

همانطور که بررسی شد مقالات پیشین تیوری های مختلف را بررسی کردند ولی بررسی غبار و مه از دیدگاه گارارد و گلاتفلتی در رمان جین ایر انجام نشده است.

روش شناسی

این پژوهش با بهره‌گیری از روش‌شناسی بوم‌نقدانه، به تحلیل نقش نمادین مه و غبار در رمان جین ایر اثر شارلوت برونته می‌پردازد و این عناصر جوی را به‌عنوان استعاره‌های جغرافیایی و عاطفی برای ابهام زمانی، ناپیدایی اجتماعی و تعالی معنوی در بسترهای مختلف رمان بررسی می‌کند. با تکیه بر تعریف بنیادین گلاتفلتی از بوم‌نقد به‌عنوان «مطالعه‌ی رابطه‌ی ادبیات با محیط فیزیکی» و تحلیل‌های گارارد درباره‌ی طبیعت آشفته و امر والا، این تحقیق با تلفیق خوانش دقیق متنی و چارچوب‌های نظری، نشان می‌دهد که مه و غبار چگونه مسیر روانی، اجتماعی و معنوی جین را شکل می‌دهند.

روش کار شامل سه محور اصلی است: نخست، خوانش دقیق بخش‌هایی از رمان که مه و غبار در آن‌ها حضور دارند، از جمله مه زرد و نمناک لوود در فصل پنجم، دشت‌های مه‌آلود هنگام فرار جین از ثورنفیلد در فصل بیست و هشتم، و اشاره‌های ظریف به مه در ثورنفیلد و فرن‌دین (Ferndean). این خوانش به بررسی زبان توصیفی، تصویرسازی و زمینه‌ی روایی می‌پردازد تا تعامل این عناصر با حالات درونی جین و روند داستان روشن شود. دوم، کاربرد نظریه‌های گلاتفلتی و گارارد برای تفسیر مه و غبار به‌عنوان نمادهای محیطی که بازتاب‌دهنده‌ی طرد اجتماعی، آشفتگی روانی و تجربه‌های معنوی‌اند. سوم، تحلیل کردن این عناصر در مناظر الهام‌گرفته از یورکشایر، با رجوع به منابع تاریخی و جغرافیایی درباره‌ی اقلیم انگلستان و مه‌خیزی منطقه، برای درک واقع‌گرایانه‌تر از فضای رمان است.

در پاسخ به خلأ موجود در پژوهش‌های پیشین—که عناصر جوی را کمتر به‌عنوان نمادهای بوم‌نقدانه بررسی کرده‌اند— این مطالعه مه و غبار را در برابر عناصر طبیعی دیگر مانند آتش و دشت‌ها قرار می‌دهد تا نقش منحصربه‌فرد آن‌ها در روایت برجسته شود. همچنین با بهره‌گیری محدود از جغرافیای فمینیستی و الهیات محیطی، ابعاد اجتماعی و معنوی این عناصر

شفاف می‌شود. این روش‌شناسی با تلفیق تحلیل متنی، نظریه‌ی بوم‌نقد و زمینه‌ی جغرافیایی، تحلیلی نوآورانه و دقیق ارائه می‌دهد که به گفتمان‌های گسترده‌تر درباره‌ی محیط، جنسیت و معنویت در آثار برونته یاری می‌رساند.

یافته‌ها

«مطالعه رابطه بین ادبیات و محیط فیزیکی»

این مطالعه استدلال می‌کند که مه و غبار در رمان جین ایر اثر شارلوت برونته به عنوان نمادهای پویای نقد زیست‌محیطی از ابهام زمانی، ناپیدایی اجتماعی و تعالی معنوی عمل می‌کنند و سفر روانشناختی، اجتماعی و اخلاقی جین را در مناظر الهام گرفته از یورکشایر رمان منعکس می‌کنند. این تحقیق با استفاده از تحلیل متنی دقیق، همانطور که در روش‌شناسی ذکر شده است، مه و غبار را به عنوان عناصر محیطی کمتر بررسی شده‌ای که پلی بین طبیعت و فرهنگ هستند، شناسایی می‌کند و با تعریف گلاتفلتی از نقد زیست‌محیطی به عنوان «مطالعه رابطه بین ادبیات و محیط فیزیکی» همسو است (گلاتفلتی، ۱۹۹۶). گلاتفلتی، از چهره‌های بنیادی نقد بوم‌شناختی، در مقدمه‌ی خود بر کتاب «خواننده‌ی نقد بوم‌شناختی: نشانه‌هایی در بوم‌شناسی ادبی» ، این حوزه را به عنوان «مطالعه‌ی رابطه‌ی بین ادبیات و محیط فیزیکی» تعریف می‌کند (گلاتفلتی، ۱۹۹۶). این تعریف، نقد بوم‌شناختی را به عنوان یک رویکرد میان‌رشته‌ای معرفی میکند که بررسی می‌کند چگونه متون ادبی، برداشت‌ها از جهان طبیعی را بازنمایی، تعامل و شکل می‌دهند. گلاتفلتی، نقد بوم‌شناختی را با نقد فمینیستی و مارکسیستی مقایسه می‌کند و خاطرنشان می‌کند که «رویکردی زمین‌محور به مطالعات ادبی دارد» ، و بر محیط زیست به عنوان یک دیدگاه انتقادی مشابه جنسیت یا طبقه تأکید می‌کند (گلاتفلتی، ۱۹۹۶). این مفهوم، بر پیوندهای متقابل بین فرهنگ انسانی (ادبیات، روایت‌ها) و محیط مادی (مناظر، آب و هوا) تأکید می‌کند و بررسی می‌کند که چگونه متون ادبی، نگرش‌های زیست‌محیطی و ارزش‌های فرهنگی را منعکس، تقویت یا به چالش می‌کشند. تعریف گلاتفلتی با اولویت دادن به محیط فیزیکی به عنوان یک نیروی پویا در روایت‌ها، نه صرفاً یک پس‌زمینه، تحلیل ادبی را گسترش می‌دهد. او استدلال می‌کند که: «استعاره‌های ما از زمین چگونه بر نحوه برخورد ما با آن تأثیر می‌گذارند؟»، که نشان می‌دهد بازنمایی‌های ادبی از طبیعت، دیدگاه‌های فرهنگی و اخلاقی را شکل می‌دهند (گلاتفلتی ،۱۹۹۶). این چارچوب ذاتاً میان‌رشته‌ای است و از بوم‌شناسی، جغرافیا و مطالعات فرهنگی برای تحلیل چگونگی رمزگذاری روابط زیست‌محیطی در متون بهره می‌برد. از نظر گلاتفلتی، نقد بوم‌شناختی همچنین دارای یک بُعد اخلاقی است، زیرا «به این معنی است که ما می‌توانیم با تغییر نحوه تفکر و صحبت در مورد رابطه بین انسان‌ها و جهان طبیعی، تغییری ایجاد کنیم» (گلاتفلتی، ۱۹۹۶).

این موضع اخلاقی، خوانش‌هایی را تشویق می‌کند که عاملیت محیطی و مسئولیت انسان در قبال طبیعت را برجسته می‌کنند. در رمان جین ایر، از منظر گلاتفلتی، مه و غبار را به عنوان عناصر محیطی که تجربیات روانشناختی، اجتماعی و معنوی جین را منعکس و شکل می‌دهند، روشن می‌کند. «مه زرد نمناک» در لووود در فصل پنجم فقط یک صحنه نیست، بلکه استعاره‌ای برای ابهام زمانی است که وضوح را می‌پوشاند و حس گرفتاری جین را در یک محیط راکد منعکس می‌کند:

شب به‌سرعت گذشت؛ آن‌قدر خسته بودم که حتی خواب هم ندیدم؛ فقط یک‌بار بیدار شدم و شنیدم که باد با خشم زوزه می‌کشید و باران سیل‌آسا می‌بارید، و فهمیدم که دوشیزه میلر کنارم نشسته است. وقتی دوباره چشمانم را گشودم، زنگ بلندی به صدا درآمده بود؛ دخترها بیدار شده و در حال لباس پوشیدن بودند؛ هنوز سپیده نزده بود و یکی دو چراغ کم‌نور در اتاق می‌سوخت. من هم با بی‌میلی برخاستم؛ هوا به‌شدت سرد بود، و با لرز لباس پوشیدم، و وقتی لگنی آزاد شد، خود را شستم—که خیلی زود اتفاق نیفتاد، چون فقط یک لگن برای شش دختر وجود داشت، روی پایه‌هایی در وسط اتاق. زنگ دوباره به صدا درآمد؛ همه دو به دو صف بستند و به همان ترتیب از پله‌ها پایین رفتند و وارد سالن سرد و کم‌نور مدرسه شدند. در آنجا، دعاها توسط دوشیزه میلر خوانده شد؛ سپس او گفت: «کلاس‌ها را تشکیل دهید!» چند دقیقه‌ای غوغا و همهمه برپا شد، که در آن دوشیزه میلر بارها فریاد زد: «سکوت!» و «نظم!» وقتی سر و صدا فروکش کرد، دیدم همه در چهار نیم‌دایره مقابل چهار صندلی که کنار چهار میز قرار داشت، صف کشیده‌اند؛ همه کتابی در دست داشتند و روی هر میز کتاب بزرگی برای استفاده معلم مسئول قرار گرفته بود. چند ثانیه‌ای سکوت برقرار شد، که با زمزمه‌های مبهم و آهسته اعداد پر شد؛ دوشیزه میلر از کلاسی به کلاس دیگر می‌رفت و این صدای نامشخص را آرام می‌کرد. مه زرد و نمناک بیرون، صحنه را غم‌انگیزتر کرده بود، و صبحانه‌ی اندک نان و شیر، نفرت‌انگیزتر. (برونته، ۱۹۸۱)

در این متن، برونته «مه زرد نم‌نم» را به عنوان یک وضعیت جوی توصیف می‌کند که موسسه لووود را در بر می‌گیرد و فضای «غم‌انگیز» و سرکوبگر کلاس درس را تشدید می‌کند. مه با سایر عناصر محیطی - سرمای گزنده، نور کم و باران سیل‌آسا - همراه می‌شود و حس رکود و ناراحتی ایجاد می‌کند. صفت «نم‌نم» نشان‌دهنده کیفیتی پایدار و فراگیر است، در حالی که «زرد» مهی ناسالم و تقریباً سمی را تداعی می‌کند که تاریکی صحنه را تشدید می‌کند. این مه، مانع دید می شود و به محیطی بی‌زمان و تغییرناپذیر کمک می‌کند، که با مفهوم «طبیعت دائماً آشفته» گارارد که «تغییرات را در هر مقیاس زمانی و مکانی» مختل می‌کند همسو است (گارارد، 2004). برای جین، مه، بازتابی از گرفتاری روانی او در لووود است، جایی که زمان در میان سختی‌های موسسه و از دست دادن هلن برنز، دوست و همراه جین، به حالت تعلیق در می‌آید. سوال گلاتفلتی این است که: «محیط فیزیکی چه نقشی در طرح این رمان دارد؟» در جواب، چنین محیطی عملکرد روایی مه را به عنوان یک حجاب زمانی برجسته می‌کند که مانع از پیشرفت و تکامل شخصیت جین می‌شود و سردرگمی او را در یک محیط سرکوبگر منعکس می‌کند (گلاتفلتی ،۱۹۹۶). حضور مادی مه، که ریشه در آب و هوای مرطوب یورکشایر دارد،

این نمادگرایی را در یک زمینه محیطی واقع‌گرایانه قرار می‌دهد و اهمیت زیست‌محیطی آن را تقویت می‌کند. «مه زرد نم‌نم» با مبهم کردن مرزهای بین روز و شب، نوعی ابهام زمانی ایجاد می‌کند، همانطور که جین اشاره می‌کند که «روز هنوز شروع به طلوع نکرده بود» (برونته، 1981). این حجاب جوی، نشانگرهای زمانی را به حالت تعلیق در می‌آورد و ناتوانی جین را در تصور آینده‌ای فراتر از محدودیت‌های لوود منعکس می‌کند. حضور مداوم مه، همراه با روال یکنواخت دعاها و کلاس‌ها، حسی از رکود بی‌زمان را برمی‌انگیزد که با طبیعت آشفته گارارد و تمرکز گلاتفلتی بر نقش روایی محیط همسو است.

تأکید گلاتفلتی بر پیوندهای متقابل طبیعت و فرهنگ گلوتفلتی به ما این امکان را می‌دهد که مه را به عنوان یک مصنوع فرهنگی تفسیر کنیم که نامرئی بودن اجتماعی جین را در ثورنفیلد تقویت می‌کند، جایی که فضای مه آلود سالن «خاکستری و بارودار» در فصل یازدهم برونته نمادی از به حاشیه رانده شدن او به عنوان یک معلم سرخانه است:

عمارت ترنفیلد فاصله‌ی زیادی از روستا داشت؛ شنیده بودم که جای قدیمی و باشکوهی‌ست، و آماده بودم که دوستش بدارم، هرچند نمی‌دانستم موقعیتم در آنجا چگونه خواهد بود. روز بعد هوا خوب بود و صبح زود راهی سفر شدم. جاده از میان مناظری دل‌انگیز پیچ‌وتاب می‌خورد، و سرانجام توده‌ی خاکستری و مه ملایم ترنفیلد را دیدم که از میان دره‌ای جنگلی سر برآورده بود، با مزرعه‌ها و چراگاه‌هایی که در دو سوی آن گسترده بودند. در نزدیکی، دهکده‌ی کوچکی قرار داشت که سقف‌هایش از میان درختان پیداست. هوا ملایم بود، اما مهی سبک بر زمین نشسته بود و به صحنه حالتی رؤیایی و دورافتاده بخشیده بود. (برونته، ۱۹۸۱)

در این متن، برونته تالار ثورنفیلد را با «مه ملایمی» که محوطه را فرا گرفته و «جنبه‌ای رویایی و خلوت» ایجاد می‌کند، معرفی می‌کند. برخلاف مه غلیظ لوود، این مه ملایم‌تر است و فضایی اثیری و مبهم را القا می‌کند که با رمز و راز گوتیک ثورنفیلد همسو است. حضور مه، خطوط کلی منظره را نرم می‌کند، مرزهای زمان و مکان را محو می‌کند و به حس تعلیق زمانی کمک می‌کند. تأکید گلاتفلتی بر «ارتباطات متقابل بین طبیعت و فرهنگ» این مه را به عنوان یک مصنوع فرهنگی ترسیم می‌کند که منعکس کننده موقعیت اجتماعی و عاطفی نامشخص جین هنگام ورود به ثورنفیلد به عنوان یک معلم سرخانه است. مفهوم گارارد از «طبیعت وحشی به عنوان یک اختراع فرهنگی، آمیخته با تصاحب سیاسی، تجاری و گفتمان قدرت» مه را بیشتر به عنوان یک حجاب گوتیک قرار می‌دهد که وضوح را مبهم می‌کند و نقش مبهم زمانی و اجتماعی جین را در یک خانواده مردسالار منعکس می‌کند (گارارد، 2004). تحلیل زمینه‌ای این روش از آب و هوای مه‌آلود یورکشایر، این خوانش را تقویت می‌کند، زیرا مه‌های مکرر این منطقه به توصیف جوی برونته اصالت می‌بخشد. «مه ملایم» در ثورنفیلد با بخشیدن حالتی «رویایی» به صحنه، ابهام زمانی ایجاد می‌کند و تمایز بین واقعیت و توهم، گذشته و آینده را محو می‌کند (برونته، ۱۹۸۱). با ورود جین به مرحله جدیدی از زندگی‌اش، مه نماد عدم اطمینان او در

مورد آینده‌اش در تورنفیلد و پیوندهای دیرینه‌اش با گذشته‌اش در لوود است. این ابهام جوی با طبیعت آشفته گارارد همسو می‌شود و وضوح زمانی و تمرکز گلاتفلتی بر اهمیت فرهنگی محیط را مختل می‌کند، زیرا مه منعکس‌کننده موقعیت آستانه‌ای جین در یک زمینه زمانی و اجتماعی جدید است.

به همین ترتیب، نقش مه در تعالی معنوی، مانند دعای جین در میان دشت‌های مه‌آلود در فصل بیست و هشتم از کتاب، با جهت‌گیری اخلاقی گلاتفلتی همسو است، زیرا نشان‌دهنده ظرفیت طبیعت برای میانجیگری در تأملات اخلاقی و الهی است. با تحلیل مه و غبار از این منظر، این مطالعه نشان می‌دهد که چگونه تصاویر محیطی برونته، قوس روایی جین را شکل می‌دهد و ساختارهای اجتماعی ویکتوریایی را نقد می‌کند و به شکاف موجود در پژوهش‌های ذکر شده در منابعی مانند «ارتباطات و شخصیت» می‌پردازد:

مستقیم به دل کشتزار خلنگ رفتم؛ به فرورفتگی‌ای چسبیدم که در دامنه‌ی قهوه‌ای رنگ دشت، شیار عمیقی انداخته بود؛ در میان گیاهان تیره‌اش تا زانو فرو رفتم؛ با پیچ‌وخم‌هایش پیچیدم، و چون در گوشه‌ای پنهان، صخره‌ای از گرانیت سیاه‌خزه دیدم، زیر آن نشستم. تپه‌های بلند خلنگ اطرافم را گرفته بودند؛ صخره سرم را محافظت می‌کرد؛ آسمان بالای آن بود، و دیگر هیچ. اما مهی نمناک و ابری بر دشت‌ها آویخته بود، و بارانی ریز و نفوذی می‌بارید که خیلی زود لباس‌هایم را خیس کرد. همان‌جا دراز کشیدم، صورتم را در دستانم پنهان کرده بودم، و قلبم آشفته از امید و ترس، پشیمانی و یأس بود. دعا کردم، و حس کردم که خدا نزدیک است. (برونته، ۱۹۸۱)

این صحنه، نقطه‌ی عطفی در سفر روحی جین است—جایی که او از همه چیز قطع امید کرده، اما هنوز به ایمانش چنگ زده است. در این متن، برونته «مه و ابر مرطوبی» را توصیف می‌کند که هنگام فرار جین از ثورنفیلد، دشت‌ها را فرا گرفته و فضایی گیج‌کننده و منزوی ایجاد می‌کند. مه، همراه با «باران ریز و نافذ»، چشم‌انداز را مبهم می‌کند و کیفیت وحشی و آستانه‌ای دشت‌ها را افزایش می‌دهد. عبارت «مه و ابر» به حجابی متراکم و بی‌شکل اشاره دارد که دید و نشانگرهای زمانی را محو می‌کند و با «طبیعت دائماً آشفته» گارارد که با «تغییرات در هر مقیاس زمانی و مکانی» عمل می‌کند همسو است (گارارد، 2004). این آشفتگی جوی، آشفتگی روانی جین را منعکس می‌کند، زیرا او قلب خود را «آشوب امید و ترس، پشیمانی و ناامیدی» توصیف می‌کند (برونته، ۱۹۸۱). نظریه گلاتفلتی، می‌پرسد چگونه محیط فیزیکی، طرح داستان را شکل می‌دهد ، مه را به عنوان ابزاری روایی قرار می‌دهد که بحران وجودی جین را تسهیل می‌کند و او را بین گذشته‌اش با روچستر و آینده‌ای نامشخص معلق نگه می‌دارد. تحلیل زمینه‌ای این روش از آب و هوای خلنگزار یورکشایر، که مستعد مه و غبار است، این نمادگرایی را در یک محیط زیست واقع‌گرایانه قرار می‌دهد و طنین بوم‌گرایانه آن را تقویت می‌کند. «مه و ابر مرطوب» بر فراز دشت‌ها، برهوتی گذرا ایجاد می‌کند که در آن گذشته، حال و آینده با هم ادغام می‌شوند و نشان‌دهنده‌ی سردرگمی جین در حین گذر از بحران اخلاقی و عاطفی‌اش است. تأثیر مبهم مه، هرگونه نشانه واضح از گذر

زمانی را مختل می‌کند و با طبیعت آشفته‌ی گارارد و تمرکز گلاتفلتی بر نقش روایی محیط همسو می‌شود. این ابهام زمانی، وضعیت آستانه‌ای جین را برجسته می‌کند، زیرا او برای هدایت الهی دعا می‌کند و قادر به تشخیص مسیر روشنی در زمان یا مکان نیست.

«طبیعت دائماً آشفته»

مفهوم «طبیعت دائماً آشفته» گارارد مه را به عنوان نیرویی مخرب که زمان خطی، جایگاه اجتماعی و کنترل انسان‌محور را به چالش می‌کشد و قوس روایی جین را در محیط‌هایی مانند لوود، ثورنفیلد و دشت‌ها شکل می‌دهد (گارارد، 2004). از طریق این دیدگاه، مه و غبار به عنوان استعاره‌هایی ظاهر می‌شوند که نه تنها فضای گوتیک و رمانتیک رمان را تقویت می‌کنند، بلکه پویایی فرهنگی جنسیت، طبقه و معنویت را نیز مورد پرسش قرار می‌دهند و شکاف مهمی را در پژوهش‌های جین ایر پر می‌کنند.

در زمینه ابهام زمانی، مه و غبار، وضوح زمانی را مبهم می‌کنند و سردرگمی روحی جین را منعکس می‌کنند. گارارد، در کتاب نقد زیست‌محیطی، مفهوم «طبیعت دائماً آشفته» را در بحث خود در مورد بوم‌شناسی دامداری معرفی می‌کند و خاطرنشان می‌کند که این مفهوم «به کاوش در طبیعت دائماً آشفته با تغییرات در هر مقیاس زمانی و مکانی» می‌پردازد (گارارد، 2004). این مفهوم، آرمان‌های سنتی دامداری از طبیعت به عنوان یک موجودیت هماهنگ، متعادل یا ایستا را به چالش می‌کشد و در عوض آن را به عنوان یک موجودیت پویا، آشفته و در معرض جریان مداوم به تصویر می‌کشد. گارارد «مدل منسوخ هماهنگی و تعادل» را در روایت‌های زیست‌محیطی نقد می‌کند و استدلال می‌کند که اختلالات طبیعت - چه از طریق آب و هوا، تغییرات زیست‌محیطی یا مداخله انسان - منعکس‌کننده تعاملات پیچیده با فرهنگ است (گارارد، 2004). این ایده با کاوش گسترده‌تر او در مورد استعاره‌های زیست‌محیطی مانند طبیعت وحشی و امر والا، که او آنها را به عنوان سازه‌های فرهنگی شکل گرفته توسط گفتمان‌های تاریخی و اجتماعی می‌بیند، همسو است (گارارد، 2004). «طبیعت دائماً آشفته» گارارد بر عاملیت و غیرقابل پیش‌بینی بودن طبیعت تأکید می‌کند و دیدگاه‌های انسان‌محورانه‌ای را که آن را به پس‌زمینه‌ای منفعل تقلیل می‌دهند، رد می‌کند. او استدلال می‌کند که نقد بوم‌شناختی «مفاهیم یکپارچه از «طبیعت» را به استعاره‌ها تجزیه می‌کند و «گفتمان محیطی با جزئیات موضوعی، تاریخی و جغرافیایی» را آشکار می‌کند (گارارد 2004)، و برجسته می‌کند که چگونه پدیده‌های محیطی مانند آب و هوا یا مناظر، کنترل انسان و ثبات روایت را مختل می‌کنند. این مفهوم به ویژه با ادبیات گوتیک و رمانتیک مرتبط است، جایی که طبیعت اغلب بازتاب آشفتگی‌های روانی یا اجتماعی است. نظریه گارارد، بررسی می‌کنند چگونه آشفتگی‌های محیطی - مانند طوفان، مه یا غبار - هنجارهای فرهنگی را به چالش می‌کشند و تنش‌ها را در روابط انسان و طبیعت آشکار می‌کنند. این مه با مفهوم گارارد از طبیعت آشفته همسو است که «با «تغییرات در هر مقیاس زمانی و مکانی» به درون طبیعتی دائماً آشفته فرو می‌رود» (گارارد، 2004)، پیشرفت

زمانی را به حالت تعلیق در می‌آورد و گرفتاری جین را در چرخه‌ای از سختی‌ها منعکس می‌کند. به طور مشابه، در طول پرواز جین بر فراز دشت‌ها، «مه و ابر» چشم‌انداز را پوشانده و تمایز بین گذشته و آینده را در حالی که او با تصمیم خود برای ترک روچستر دست و پنجه نرم می‌کند، محو می‌کند (برونت،ه ۱۹۸۱). گلاتفلتی، بر عملکرد روایی مه به عنوان یک حجاب زمانی تأکید می‌کند، که حس زمان جین را مختل می‌کند و عدم قطعیت وجودی او را تقویت می‌کند. مطالعه دقیق نشان می‌دهد که چگونه این عناصر جوی، که ریشه در توپوگرافی مه آلود یورکشایر دارند، مبارزه درونی جین برای تطبیق آسیب‌های گذشته‌اش با آرزوهای آینده‌اش را بیرونی می‌کنند:

به آسمان نگاه کردم؛ پاک بود: ستاره‌ای مهربان درست بالای لبه‌ی دره چشمک می‌زد. شبنم فرو می‌ریخت، اما با نرمی دل‌پذیر؛ نسیمی نمی‌وزید. طبیعت در نظرم نیک‌خواه و مهربان آمد؛ حس کردم دوستم دارد، با آن‌که مطرود بودم؛ و من، که از انسان جز بی‌اعتمادی، طرد و توهین انتظار نداشتم، با مهر فرزندانه به او چنگ زدم. دست‌کم امشب، مهمان او می‌شدم، چون فرزندش بودم: مادرم بی‌پول و بی‌قیمت مرا در آغوش می‌گرفت. هنوز یک لقمه نان داشتم: باقی‌مانده‌ی نانی که در شهری، هنگام عبور از ترنفیلد، ظهر خریده بودم. به راه افتادم؛ اندامم خسته بود، سینه‌ام از هق‌هق فروخورده بالا و پایین می‌شد، و دلم سنگین بود از حس تلاش بی‌ثمر و امید لگدمال‌شده. (برونته، ۱۹۸۱)

در فصل بیست‌وششم جِین ایر، جین در جریان مراسم ازدواجی که ناگهان متوقف می‌شود، از وجود همسر قانونی روچستر، برتا میسون(Mason Bertha) ، آگاه می‌گردد؛ و این کشف او را وادار می‌کند تا با ناممکن بودن ماندن در کنار او روبه‌رو شود. نقل‌قول مورد نظر، زمانی رخ می‌دهد که جین همان شب از ترنفیلد می‌گریزد و با تصمیم دشوار خود برای ترک راچستر، علی‌رغم عشقش به او، دست‌وپنجه نرم می‌کند. برونته در این صحنه، طبیعت را «پاک» توصیف می‌کند، با «ستاره‌ای مهربان» و «نرمش مساعد شبنم»؛ اما به‌طور مشخص، هیچ مه یا غباری در این لحظه ذکر نمی‌شود. نبودِ مه در این صحنه، در تضاد با صحنه‌ی دشت‌های خلنگ در فصل بیست‌وهشتم است، جایی که مه به‌وضوح حضور دارد. با این حال، فضای روشن اما از نظر احساسی سنگینِ این بخش، نوعی ابهام زمانی ایجاد می‌کند؛ چرا که شب آرام با آشوب درونی جین، که قلبی «سنگین از حس تلاش بی‌ثمر و امید لگدمال‌شده» دارد، در تقابل قرار می‌گیرد. این آشفتگی زمانی با پرسش چریل گلاتفلتی هم‌راستا می‌شود. چرا که طبیعت در اینجا لحظه‌ی برزخی جین را برجسته می‌سازد—میان گذشته‌اش با راچستر و آینده‌ای نامعلوم. مفهوم گارارد از «طبیعتی که پیوسته دستخوش تغییر است، در همه‌ی مقیاس‌های زمان و مکان» به‌طور غیرمستقیم قابل تطبیق است (گارارد، 2004)؛ چرا که شب آرام اما منزوی، نوعی اختلال ظریف در ادراک زمانی جین را بازتاب می‌دهد، و نقطه‌ی عطفی در مسیر روایی او رقم می‌زند. اگرچه در این بخش از فصل بیست‌وششم مه یا غبار به‌طور صریح توصیف نشده‌اند، شب صاف و وضعیت سرگردان جین، نوعی ابهام زمانی را برمی‌انگیزند؛ گویی او میان تعهد گذشته‌اش به راچستر و آینده‌ای نامعلوم معلق مانده است. آسمان «پاک» و «ستاره‌ی مهربان» در تضاد با آشوب

درونی او قرار دارند، و نوعی بی‌زمانی را خلق می‌کنند، آن‌گاه که جین با «امیدی لگدمال‌شده» دست‌وپنجه نرم می‌کند (برونته، ۱۹۸۱). این لحظه، زمینه‌ساز صحنه‌ی دشت‌های مه‌آلود در فصل بیست‌وهشتم است، جایی که مه به‌طور آشکار، آشفتگی زمانی را تشدید می‌کند—همان‌گونه که در ادامه بررسی خواهد شد. مه و غبار همچنین نمادی از نامرئی بودن اجتماعی هستند که نشان دهنده به حاشیه رانده شدن جین به عنوان یک معلم سرخانه یتیم در یک جامعه مردسالار است. در تورنفیلد، سالن «خاکستری و بارودار» اغلب در مه پوشیده شده است، که حضور اجتماعی جین را در حین ایفای نقش مبهم خود به عنوان معلم سرخانه و معشوقه مبهم می‌کند (برونته، ۱۹۸۱). تمرکز گلاتفلتی بر «ارتباطات متقابل بین طبیعت و فرهنگ» روشن می‌کند که چگونه مه، به عنوان یک پدیده طبیعی، پویایی فرهنگی طرد را منعکس می‌کند و جین را در ساختار سلسله مراتبی تورنفیلد نامرئی می‌سازد (گلاتفلتی، ۱۹۹۶). ادعای گارارد مبنی بر اینکه «طبیعت وحشی یک اختراع فرهنگی است که با تصاحب سیاسی، تجاری و گفتمان قدرت گره خورده است» مه ساختار فرهنگی که موقعیت اجتماعی جین را واضح تر به نمایش می‌گذارد، به ویژه فضاهای تحت سلطه مردان، بیشتر مطرح می‌کند (گارارد، 2004). تحلیل زمینه‌ای این روش از آب و هوای یورکشایر، با مه‌های مکررش، این نمادگرایی را در یک محیط زیست واقع‌گرایانه قرار می‌دهد و برجسته می‌کند که چگونه مه، مبارزه جین برای شناخت اجتماعی و عاملیت را تقویت می‌کند.

از نظر تعالی معنوی، مه و غبار به عنوان نماد های الهی عمل می‌کنند که واسطه‌ی مواجهه‌ی جین با امر الهی و رشد اخلاقی او هستند. جین در طول پرواز ناامیدانه‌اش در میان «باد وحشی که در میان درختان می‌وزد» و منظره‌ای مه‌آلود دعا می‌کند و در مشیت الهی آرامش می‌یابد (برونته، ۱۹۸۱). این لحظه با کاوش گارارد در امر والا طنین‌انداز می‌شود، جایی که استعاره‌های محیطی «گفتمان محیطی با جزئیات موضوعی، تاریخی و جغرافیایی» را آشکار می‌کنند ، و مه را به عنوان واسطه‌ای معنوی قرار می‌دهند که حیرت و درون‌نگری را برمی‌انگیزد (گارارد، 2004). جهت‌گیری اخلاقی گلاتفلتی، که معتقد است نقد بوم‌شناختی «به این معنی است که ما می‌توانیم با تغییر نحوه‌ی تفکر و صحبت در مورد رابطه‌ی بین انسان‌ها و جهان طبیعی، تغییری ایجاد کنیم» ، از خواندن مه به عنوان نمادی از شفافیت اخلاقی جین که از ابهام محیطی بیرون می‌آید، پشتیبانی می‌کند. خوانش دقیق این روش از چنین بخش‌هایی، همراه با تفسیر بوم‌انتقادی، نقش مه را در تسهیل تاب‌آوری معنوی جین، به‌ویژه در فضاهای آستانه‌ای مانند دشت‌ها، آشکار می‌کند (گلاتفلتی، ۱۹۹۶).

در رمان جین ایر، مه و غبار، «طبیعت دائماً آشفته» گارارد را تجسم می‌بخشند، که شفافیت زمانی، اجتماعی و معنوی را مختل کرده و آشفتگی درونی جین را منعکس می‌کنند. «مه و ابر» روی دشت‌ها در طول فرار جین از ثورنفیلد نمونه‌ای از این آشفتگی است و بیابانی آشفته ایجاد می‌کند که زمان و مکان را مبهم می‌کند و با ایده گارارد در مورد «تغییرات طبیعت در هر مقیاسی» همسو است (گارارد، 2004). این مه، حس جین از گذشته و آینده را مختل کرده و ابهام زمانی را تقویت

می‌کند. به طور مشابه، فضای مه‌آلود تورنفیلد همانطور که گارارد توصیف می‌کند ، حضور اجتماعی جین را پنهان میکند و به حاشیه رانده شدن او را در ساختارهای مردسالارانه برجسته می‌کند (گارارد، 2004). در زمینه‌های معنوی، دشت‌های مه‌آلود در طول دعای جین تداعی‌کننده‌ی امر والا هستند، استعاره‌ای که گارارد آن را به گفتمان محیطی پیوند می‌دهد ، و ارتباط متعالی او را با الوهیت تسهیل می‌کند (گارارد، 2004). تحلیل زمینه‌ای این روش از آب و هوای مه‌آلود یورکشایر، این خوانش را تقویت می‌کند و نقش مخرب مه را در یک محیط محیطی واقع‌گرایانه تثبیت می‌کند.

مه و غبار به عنوان نمادهای زیست‌محیطی-انتقادی و ابهام زمان در رمان جین ایر، مه و غبار به عنوان نمادهای قوی زیست‌محیطی-انتقادی از ابهام زمانی عمل می‌کنند، ادراک خطی از زمان را مختل می‌کنند و سردرگمی روانی و وجودی جین را در سراسر محیط‌های الهام گرفته از یورکشایر رمان منعکس می‌کنند. این تحلیل با بهره‌گیری از چارچوب زیست‌محیطی-انتقادی گلاتفلتی، که این حوزه را به عنوان «مطالعه رابطه بین ادبیات و محیط فیزیکی» تعریف می‌کند ، مه و غبار را به عنوان عناصر محیطی قرار می‌دهد که با تجربه زمانی جین در هم می‌آمیزند و ابعاد فرهنگی و روانی سفر او را منعکس می‌کنند (گلاتفلتی، ۱۹۹۶). مفهوم گارارد از «طبیعتی که دائماً آشفته است» و «در هر مقیاس زمانی و مکانی تغییر می‌کند» مه را به عنوان نیرویی پویا که وضوح زمانی را بی‌ثبات می‌کند، به چالش می‌کشد و آرمان روستایی طبیعت هماهنگ را به چالش می‌کشد و با حساسیت‌های گوتیک و رمانتیک رمان همسو می‌شود (گارارد، 2004). این مطالعه از طریق تحلیل دقیق متنیِ بخش‌های کلیدی، زمینه آب و هوای مه‌آلود یورکشایر و تفسیر بوم‌شناختی-انتقادی، نشان می‌دهد که چگونه مه و غبار در محیط‌هایی مانند لوود و دشت‌ها، مبارزه جین برای گذر از آسیب‌های گذشته و عدم قطعیت‌های آینده را بیرونی می‌کند و شکاف مهمی را در پژوهش‌های جین ایر پر می‌کند که این عناصر جوی را به نفع نمادهای گسترده‌تری مانند دشت‌ها یا آتش نادیده گرفته است («ارتباطات و شخصیت»؛ «نمادگرایی آتش»).

در موسسه لوود، مه به عنوان نمادی از رکود زمانی ظاهر می‌شود و حس پیشرفت جین را در محیطی سرکوبگر به حالت تعلیق در می‌آورد. برونته، مدرسه را در «مه زرد نم‌نم» توصیف می‌کند که «سردی و بدبختی» محیط را تشدید می‌کند و فضایی تاریک و بی‌زمان ایجاد می‌کند (برونته، ۱۹۸۱). این مه با نظریه گلاتفلتی، همسو است، زیرا بر تصویر روایت از لوود به عنوان مکانی گرفتار که به نظر می‌رسد زمان در آن متوقف می‌شود، تأکید می‌کند (گلاتفلتی، ۱۹۹۶). تأثیر مبهم مه، وضعیت روانی جین، به ویژه غم و اندوه او از مرگ هلن برنز و تلاش او برای تصور آینده‌ای فراتر از سختی‌های موسسه را منعکس می‌کند. مفهوم «طبیعت دائماً آشفته» از دیدگاه گارارد، این خوانش را تقویت می‌کند، چرا که مه، وضوح مورد انتظار از پیشرفت زمانی را مختل می‌کند و منعکس‌کننده‌ی یک جهان طبیعی آشفته است که در برابر کنترل انسان مقاومت می‌کند (گارارد، 2004). رویکرد خوانش دقیق این روش‌شناسی، برجسته می‌کند که چگونه زبان برونته - اصطلاحاتی مانند

«نم نم باران» و «زرد» - نوعی زمان‌مندی راکد و تقریباً خفه‌کننده را تداعی می‌کند و مه را به عنوان تجلی مادی ادراک آشفته‌ی جین از زمان قرار می‌دهد.

دشت‌های مه‌آلود در طول پرواز جین از تورنفیلد، نقش مه را در ابهام زمانی بیشتر نشان می‌دهد و فضایی آستانه‌ای ایجاد می‌کند که در آن گذشته، حال و آینده محو می‌شوند. برونته در حالی که جین سرگردان است، «مه و ابر» را توصیف می‌کند که چشم‌انداز را در بر گرفته است، و «باران به صورت اسپری ظریف و نافذی می‌بارد» که مسیر او را مبهم می‌کند (برونته، ۱۹۸۱). مه، حس جهت‌یابی زمانی او را مختل می‌کند و خاطرات گذشته‌اش در تورنفیلد را با آینده‌ای نامشخص در هم می‌آمیزد، حالتی از تغییر که مفهوم گارارد از طبیعت آشفته آن را به عنوان «تغییرات در هر مقیاس زمانی و مکانی» توصیف می‌کند (گارارد، 2004). تحلیل زمینه‌ای این روش از توپوگرافی مه‌آلود یورکشایر - که به دلیل آب و هوای خلنگزارش به مه‌های مکرر معروف است - این نمادگرایی را در یک محیط زیست واقع‌گرایانه قرار می‌دهد و خوانش زیست‌محیطی را تقویت می‌کند. بنابراین، خلنگزارهای مه‌آلود به یک برهوت موقت تبدیل می‌شوند، فضایی که جین در آن با عدم قطعیت وجودی روبرو می‌شود و قادر به تشخیص مسیر روشنی در زمان یا مکان نیست.

ابهام زمانی مه و غبار همچنین با رشد روانی جین تلاقی می‌کند، زیرا لحظاتی که وضوح در حال ظهور است اغلب با تغییراتی در محیط جوی مطابقت دارد. در فرندین، جایی که جین دوباره با روچستر متحد می‌شود، منظره با مه کمتری توصیف می‌شود که نشان‌دهنده‌ی حل سردرگمی زمانی است. برونته به یک محیط «آرام و تنها» اشاره می‌کند، با اشارات ظریفی به مه رو به زوال، همانطور که جین به وضوح عاطفی و اخلاقی دست می‌یابد (برونته، ۱۹۸۱). این تغییر با جهت‌گیری اخلاقی گلاتفلتی همسو است، که فرض می‌کند نقد بوم‌شناختی «به این معنی است که ما می‌توانیم با تغییر نحوه‌ی تفکر و صحبت در مورد رابطه‌ی بین انسان‌ها و جهان طبیعی، تغییری ایجاد کنیم» ، زیرا مه در حال محو شدن، نشان‌دهنده‌ی توانایی جین در تطبیق گذشته‌اش با حال پایدار است (گلاتفلتی، ۱۹۹۶). کاوش گارارد در استعاره‌های محیطی به عنوان پرده‌برداری از «گفتمان محیطی با جزئیات موضوعی، تاریخی و جغرافیایی» این گذار را بیشتر قاب‌بندی می‌کند، زیرا فضای کمتر آشفته‌ی فرندین نشان‌دهنده‌ی یک گره‌گشایی روایی است که در آن ابهام زمانی جای خود را به انسجام می‌دهد. خوانش دقیق این روش‌شناسی نشان می‌دهد که چگونه تغییر ظریف برونته در تصاویر محیطی - از مه غلیظ به آسمان‌های شفاف‌تر - با سفر روانشناختی جین به سوی یکپارچگی زمانی موازی است (گارارد، 2004).

این مطالعه با ادغام چارچوب طبیعت-فرهنگ گلاتفلتی و مفهوم طبیعت آشفته گارارد، نشان می‌دهد که چگونه این عناصر جوی، زمان خطی را مختل می‌کنند و منعکس‌کننده‌ی کشمکش‌های روانی جین و تعامل رمان با واقعیت‌های محیطی یورکشایر هستند. این رویکرد نه تنها به شکافی در پژوهش‌های موجود می‌پردازد، بلکه به بحث‌های گسترده‌تر در مورد

زمان‌مندی، هویت و عاملیت محیطی در ادبیات ویکتوریایی نیز کمک می‌کند و دیدگاهی تازه در مورد هنر روایت برونته ارائه می‌دهد.

نتیجه‌گیری

این مطالعه با تلفیق تحلیل متنی دقیق، چارچوب‌های بوم‌انتقادی گلاتفلتی و گارارد، و بینش‌های زمینه‌ای از جغرافیای یورکشایر، نشان می‌دهد که مه و غبار صرفاً جزئیات جوی نیستند، بلکه نمادهای محوری هستند که کاوش جین ایر در مورد زمان، هویت و معنویت را تعمیق می‌بخشند. برخلاف پژوهش‌های پیشین که عناصر طبیعی گسترده‌تری مانند دشت‌ها یا آتش را در اولویت قرار می‌دادند («ارتباطات و شخصیت»؛ «نمادگرایی آتش»)، این تحلیل نقش‌های منحصر به فرد مه و غبار را برجسته می‌کند و دیدگاهی تازه به تخیل زیست‌محیطی برونته ارائه می‌دهد. این رویکرد نه تنها به شکاف موجود در خوانش‌های زیست‌محیطی انتقادی از جین ایر می‌پردازد، بلکه به بحث‌های گسترده‌تری در مورد جنسیت، استقلال و امر والا در ادبیات ویکتوریایی نیز کمک می‌کند. چارچوب گلاتفلتی بر نقش مه به عنوان یک نماد فرهنگی و روایی تأکید می‌کند و پدیده‌های محیطی را به ابهام زمانی جین (مه لوود)، نامرئی بودن اجتماعی (مه ثورنفیلد) و تعالی معنوی (مه دشت) مرتبط می‌سازد. مفهوم گارارد، عاملیت مخرب مه را برجسته می‌کند و آن را به عنوان نیرویی پویا به تصویر می‌کشد که زمان خطی، سلسله مراتب اجتماعی و دیدگاه‌های انسان‌محور را بی‌ثبات می‌کند و با عناصر گوتیک و رمانتیک رمان همسو می‌شود. این نظریه‌ها در کنار هم، از رویکرد سه‌جانبه‌ی این روش‌شناسی - خوانش دقیق، تفسیر بوم‌انتقادی و زمینه‌سازی جغرافیایی - پشتیبانی می‌کنند و مه و غبار را به عنوان نمادهای محوری آشکار می‌سازند که کاوش جین ایر در مورد هویت و محیط را تعمیق می‌بخشند.

منابع

Charlotte, B. (1981). Jane Eyre. Bantam Books.
Loe, T. (2007). Landscape and Character in Jane Eyre and Wide Sargasso Sea. In A Breath of Fresh Eyre (pp.
49-61). Brill Rodopi.
Pradhan, P. C. (2024). Ecocriticism: A Conceptual Framework for Study of Literary Texts. Teresian Journal of
English Studies, 16(3), 8-21.
Fuller, J. D. (2013). Seeking Wild Eyre: Landscape and the Environment in Charlotte Brontë's Jane Eyre//En busca
de la salvaje Eyre: paisaje y medioambiente en Jane Eyre de Charlotte Brönte. Ecozon@: European Journal of Literature, Culture and Environment, 4(2), 150-165.

Garrard, G. (2004). Ecocriticism. Routledge.
Gilbert, S. M., & Gubar, S. (2020). The madwoman in the attic: The woman writer and the nineteenth-century
literary imagination. Yale University Press.
Glotfelty, C., & Fromm, H. (Eds.). (1996). The ecocriticism reader: Landmarks in literary ecology. University of
Georgia Press.
Addison, C. Burning Down the House in Jane Eyre, Aurora Leigh, and Denzil Place.
Kennedy, M. S. (2017). A breath of fresh air: Eco-consciousness in Mary Barton and Jane Eyre. Victorian Literature
and Culture, 45(3), 509-526.
Knoll, T. (2017). Jane Eyre and The Atmoscene: Early Expressions of Ecofeminism in Literature. ENG 435: Making
Nineteenth-Century Literary Environments.
Loe, T. (2007). Landscape and Character in Jane Eyre and Wide Sargasso Sea. In A Breath of Fresh Eyre (pp. 49-61).
Brill Rodopi.
Taylor, B. (2009). Dark green religion: Nature spirituality and the planetary future. Univ of California Press.
Waugh, J. S. (2008). Talking about the weather: climate and the Victorian novel (Doctoral dissertation, University of
York).

An Eco critical Reading: A symbolic study of fog and mist in Charlotte Brontë's Jane Eyre

[1]Nili Afravi

M.A student of English Literature, Department of English, Faculty of Literature and Humanities, Urmia ۱ University

Email: st_n.afravi@urmia.ac.ir

۲Haleh Zargarzadeh(corresponding author)

Assistant Professor, Department of English, Faculty of Literature and Humanities, Urmia University۲

Email: h.zargarzadeh@urmia.ac.ir

This paper aims to implement ecocriticism as a method for analyzing atmospheric symbolism in literature, focusing on fog and mist in Charlotte Brontë's Jane Eyre to explore themes of temporal ambiguity, social invisibility, and spiritual transcendence. According to Cheryll Glotfelty, ecocriticism examines the relationship between literature and the physical environment, while Greg Garrard emphasizes nature's dynamic and disruptive qualities, highlighting its role in challenging human constructs. Analyzing literature

through this ecocritical lens goes beyond mere textual analysis; it fosters ethical awareness, empathy for human-nature interconnections, and an appreciation for environmental agency among readers. In Jane Eyre, fog and mist envelop settings like Lowood's drizzling yellow fog, Thornfield's misty grounds, and the moors' damp mist and cloud, symbolizing disruptions in time, Jane's marginalization as a governess, and her spiritual growth through divine encounters. By adopting Glotfelty's and Garrard's perspectives, this study encourages readers to engage with diverse environmental narratives, explore ethical complexities of human-nature relationships, and consider their roles as environmentally conscious global citizens. Analyzing the atmospheric dilemmas in Jane Eyre can lead readers to engage in deep, critical, dynamic, and empathetic thinking, helping them better understand the interplay between nature, identity, and morality in literature.

Keywords: Jane Eyre, Charlotte Brontë, Ecocriticism, Cheryll Glotfelty, Greg Garrard

سومین کنفرانس ملی آب و هواشناسی ایران (با محوریت تغییر اقلیم)
The 3rd National Conference on Climatology of Iran (Focusing on Climate Change)
ارومیه ۱۶ مهر ۱۴۰۴

ارتباط الگوی اقلیمی بزرگ‌مقیاس ENSO با تغییرپذیری خشکسالی در برخی ایستگاه های ایران با استفاده از تحلیل Wavelet coherence

عالیه کشاورز[۱]، رضا مدرس[۲] * ، سید علیرضا گوهری[۳]

[۱] عالیه کشاورز، دانشجوی دکتری علوم مرتع، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران رایانامه: a.keshavarz@na.iut.ac.ir

[۲*]رضا مدرس، دانشیار، ، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران رایانامه: reza.modarres@iut.ac.ir

[۳]سید علی‌رضا گوهری، دانشیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران رایانامه: ar.gohari@iut.ac.ir

چکیده

خشکسالی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مخاطرات طبیعی، باعث کاهش دسترسی به منابع آب و اثرات منفی بر کشاورزی و اکوسیستم‌ها می‌شود. شناخت و بررسی عوامل اصلی مؤثر بر کاهش بارش و به دنبال آن وقوع خشکسالی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این میان، ENSO به عنوان یکی از پدیده‌های پیوند از دور اقلیمی، می‌تواند الگوهای آب‌وهوایی مناطق مختلف کره زمین را تحت تأثیر قرار دهد و نقش مهمی در بروز خشکسالی‌ها ایفا کند. هدف این مطالعه بررسی تأثیر ENSOبر شاخص خشکسالی SPI12 در ۱۱ ایستگاه سینوپتیک مراکز استان ایران بود. داده‌های ENSO و SPI12 مربوط به بازه زمانی ۱۹۷۹ تا ۲۰۲۲ مورد استفاده قرار گرفت و تحلیل‌ها با استفاده از روش Wavelet coherence انجام شد تا الگوهای همبستگی زمانی–فرکانسی شناسایی شود. نتایج نشان داد که ENSO نقش پیشرو و قابل توجهی در تغییرات SPI12دارد و الگوهای همبستگی آن در بازه‌های کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت متفاوت است. به‌طور کلی، بیشترین همبستگی‌ها در دوره‌های ۱ تا ۲ ساله مشاهده شد که در اکثر ایستگاه‌ها با شدت متوسط تا بالا (۰.۷ تا ۰.۹) همراه بودند. بیشترین تأثیر در ایستگاه‌های اهواز، بندرعباس و اصفهان مشاهده شد، به‌ویژه ایستگاه اهواز که یک بازه بلندمدت ۹/۵–۱۴/۵ساله با همبستگی قوی و پایدار داشت. در مقابل، کمترین تأثیر در ایستگاه‌های همدان، رشت و کرمانشاه مشاهده شد که تنها همبستگی‌های محدود و کوتاه‌مدت داشتند. این نتایج نشان می‌دهد که اثر ENSO بر خشکسالی به‌صورت منطقه‌ای ناهمگون بوده و شدت و پایداری آن وابسته به شرایط مکانی و اقلیمی است.

کلمات کلیدی: Wavelet، خشکسالی،ارتباط از راه دور، تغییرات اقلیمی،SPI

۱-مقدمه

خشکسالی یک ناهنجاری طبیعی و موقتی در دسترسی به آب است که با بارش کمتر از حد میانگین، با فراوانی، مدت‌زمان و شدتی نامشخص همراه است و پیش‌بینی وقوع آن دشوار است. این پدیده منجر به کاهش دسترسی به منابع آب و ظرفیت تحمل اکوسیستم‌ها می‌شود (Tabari et al 2012). خشکسالی یک ویژگی طبیعی و مکرر آب و هوا است. بر خلاف خشکی، که ویژگی دائمی آب و هوا است و محدود به مناطق کم بارش است، خشکسالی تقریباً در تمام رژیم های آب و هوایی اتفاق می‌افتد (Wilhite 2000). خشکسالی به عنوان یک خطر بی‌سر و صدا و یک بلای بدون پیشگیری در طبیعت شناخته می‌شود. انسان هنوز با تمام پیشرفت‌های علمی و فنی، قادر به کنترل این پدیده نشده است. بنابراین بررسی علمی پدیده خشکسالی جهت برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب و مقابله با مشکلات ناشی از کمبود آب ضروری است (مساعدی و همکاران ۱۳۸۷). اثرات خشکسالی می‌تواند با مدیریت ضعیف آب، زمین، جنگل و سایر منابع طبیعی حتی بدتر شود (Zakeri et al 2019).

مناطقی که عمدتاً دارای آب و هوای خشک و نیمه‌خشک مانند ایران هستند، مستعد ابتلا به تغییرات آب و هوایی شدیدتری هستند. ایران در منطقه‌ای واقع شده است که منابع آب کمیاب است و به دلیل کشاورزی متکی به آب و هوا، در برابر تغییرات آب و هوایی بسیار آسیب‌پذیر است (Zakeri et al 2019). به احتمال زیاد شناخته‌شده‌ترین پدیده‌ای که باعث تغییرات آب و هوایی می‌شود، پدیده نوسان جنوبی (ENSO) است که تمرکز مطالعه ما نیز بر آن است. ENSO یک پدیده جفت‌شده اقیانوس-جو است که در اقیانوس آرام گرمسیری رخ می‌دهد که بر اقیانوس‌ها، آب و هوا و هیدرولوژی در مقیاس جهانی تأثیر می‌گذارد (Rasanen and Kummu 2013). شناسایی رابطه کمی بین شاخص‌های اقلیمی در مقیاس بزرگ و ویژگی‌های خشکسالی به ذینفعان کمک می‌کند تا مدیریت خشکسالی را بهبود بخشند (Dabanlı et al 2017). مطالعات متعددی ارتباط میان ENSO و خشکسالی‌های ایران را بررسی کرده‌اند. به عنوان مثال، یافته‌های Azizi et al (2000) نشان می‌دهد که میان بارش سالانه ایران و پدیده ال‌نینو ارتباط نسبتاً قوی وجود دارد.(Nouri and Homaee (2020 با تحلیل ضریب همبستگی میان ENSO و شاخص‌های خشکسالی SPI و SPEI نشان دادند که پدیده لانینا تأثیر قابل توجهی بر خشکسالی‌های سراسر کشور دارد. Rezaei and Gurdak (2020) گزارش کردند که نوسانات مرتبط با اقیانوس آرام، نسبت به تغییرات مبتنی بر اقیانوس اطلس، تأثیر قوی‌تری بر تغییرپذیری بارش، سطح آب و رطوبت خاک در حوضه آبریز دریاچه ارومیه دارند. Rezaei (2021) نشان داد که خشکسالی، به ویژه در اقلیم‌های (نیمه)خشک مانند ایران، تحت تأثیر شاخص‌های اقیانوس-جو قرار دارد. او گزارش کرد که نوسانات اقیانوس آرام (ENSO، PDO وPNA) بیشترین همبستگی مثبت را با خشکسالی‌های شدید ایران دارند، در حالی که نوسانات اقیانوس اطلس اغلب همبستگی معکوس نشان می‌دهند. همچنین نتایج نشان می‌دهند که خشکسالی‌های سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ به طور کلی شدیدتر از خشکسالی‌های دو دهه پایانی قرن بیستم بوده‌اند، که بیانگر تقویت تأثیر ENSO بر اقلیم خاورمیانه در دهه‌های اخیر است. در مجموع، این نتایج

نشان می‌دهد که ENSO یکی از محرک‌های کلیدی خشکسالی در ایران بوده و تحلیل ارتباط آن با شاخص‌های خشکسالی مانند SPI می‌تواند درک بهتری از سازوکارهای اقلیمی منطقه فراهم آورد. SPI، یک شاخص خشکسالی هواشناسی و یک ابزار تحلیلی برای داده‌های بارش است و برای مقیاس‌های زمانی مختلف بر اساس احتمال بارش استفاده می‌شود. SPI خشکسالی را قبل از وقوع پیش‌بینی می‌کند و به تخمین شدت خشکسالی کمک می‌کند (Eslamian et al. 2017).

در سال‌های اخیر، Wavelet coherence (WTC) به دلیل توانایی‌اش در تجزیه و تحلیل روابط بین سیگنال‌های غیرایستا، محبوبیت زیادی پیدا کرده است و کاربرد آن در زمینه‌های مختلف گسترش یافته است (Cui et al 2024). در این راستا، تحلیل WTC به عنوان رویکردی نوین، امکان بررسی همبستگی زمان–فرکانس میان شاخص‌های اقلیمی و شاخص‌های خشکسالی مانند SPI را فراهم می‌کند و نشان می‌دهد که این ارتباط‌ها در چه بازه‌های زمانی و در چه مقیاس‌های تناوبی معنادار هستند.

با توجه به اهمیت شناسایی محرک‌های اقلیمی مؤثر بر خشکسالی، این مطالعه با هدف بررسی ارتباط بین شاخص خشکسالی SPI و نوسان جنوبی–ال‌نینو (ENSO) در ۱۱ ایستگاه سینوپتیک منتخب ایران با استفاده از تحلیل WTC انجام شده است تا تغییرپذیری زمانی و تناوبی این ارتباط در مقیاس‌های مختلف آشکار شود. نتایج حاصل می‌تواند درک دقیق‌تری از نقش ENSO در بروز خشکسالی‌های ایران ارائه دهد و زمینه بهبود پیش‌بینی و مدیریت خشکسالی را در مقیاس ملی و منطقه‌ای فراهم آورد.

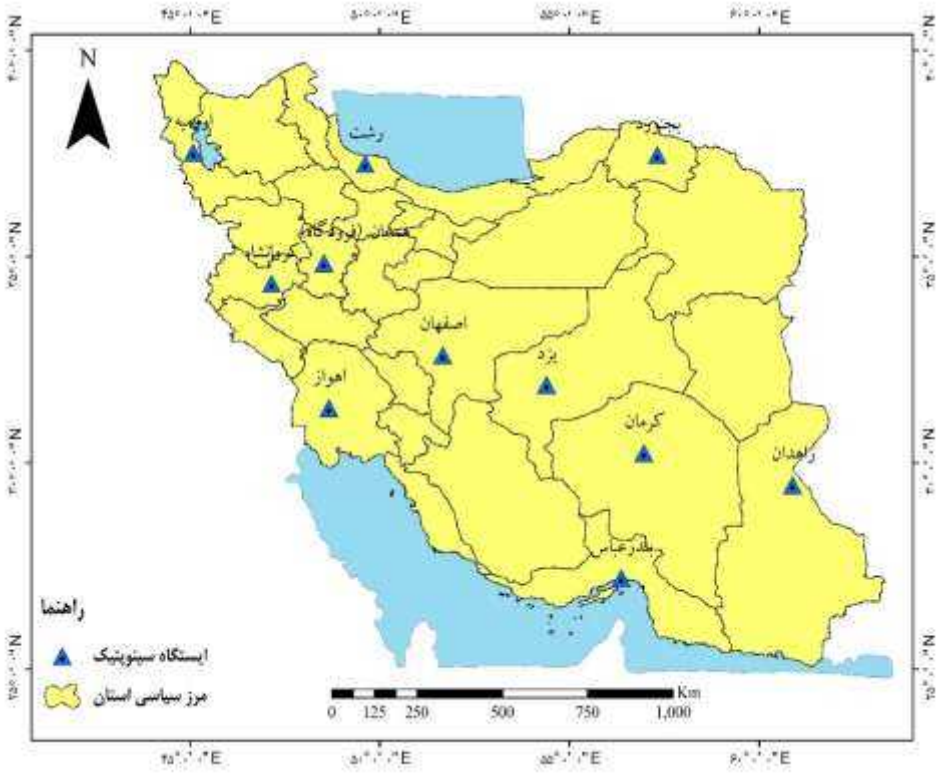
۲-روش ها

برای بررسی ارتباط بین شاخص خشکسالی SPI12 و ENSO ، داده‌های بارش ماهانه در ۱۱ ایستگاه سینوپتیک منتخب ایران، در یک دوره ۴۴ ساله (۲۰۲۲-۱۹۷۹) مورد استفاده قرار گرفت و سپس با بهره‌گیری از روش WTC، روابط زمان–فرکانسی بین این دو سری زمانی تحلیل گردید.

۲-۱منطقه مورد مطالعه

ایران در کمربند خشک قرار دارد و از شمال به دریای خزر و از جنوب به خلیج فارس و دریای عمان محدود می‌شود. دو رشته‌کوه البرز در شمال و زاگرس در غرب، ورود بادهای مدیترانه‌ای و خزری به فلات مرکزی را کنترل می‌کنند. کوه‌ها و بیابان‌ها ۵۲ درصد از مساحت کشور را پوشانده‌اند و حدود ۱۶ درصد از آن در ارتفاع ۲۰۰۰ متر از سطح دریا قرار دارد. قرار گرفتن ایران در میان دریاها، اقیانوس‌ها و بیابان‌ها و وسعت زیاد رشته‌کوه‌ها، تنوع اقلیمی گسترده‌ای را در این کشور ایجاد کرده است. بر اساس شاخص طبقه‌بندی دِمارتون، اقلیم ایران عمدتاً خشک (حدود ۶۵ درصد) و نیمه‌خشک (حدود ۲۰ درصد) است و تنها ۱۰ درصد آن مرطوب می‌باشد (Noorisameleh et al 2021). آب و هوای ایران متنوع است، اما بیشتر مناطق کشور آب و هوای خشک یا نیمه خشک دارند و میانگین بارندگی سالانه از ۵۰ میلی‌متر در مناطق مرکزی تا ۲۰۰۰

میلی‌متر در مناطق پست احاطه شده توسط دریای خزر و رشته کوه البرز متغیر است (Zakeri et al 2019). موقعیت ایستگاه‌های مورد مطالعه در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱)- موقعیت ایستگاه‌های مورد مطالعه در ایران

۲-۲ شاخص بارش استاندارد شده Standardized Precipitation Index (SPI)

McKee et al در سال ۱۹۹۳ شاخص SPI را توسعه دادند. این شاخص با تفاضل بارندگی از میانگین برای یک مقیاس زمانی معین و سپس تقسیم آن بر انحراف معیار به دست می‌آید. در این شاخص، داده‌های بارندگی در هر ایستگاه در مقیاس زمانی از پیش تعیین‌شده ابتدا با یک تابع احتمال (معمولاً توزیع گاما) برازش داده می‌شود، سپس به یک توزیع نرمال تبدیل می‌شود، به طوری که مقدار میانگین برای آن مکان و زمان معین برابر با صفر می‌شود. SPI مثبت نشان دهنده بارندگی بلندمدت بیشتر از مقدار میانگین و SPI منفی نشان دهنده بارندگی بلندمدت کمتر از مقدار میانگین است. SPI منفی نشانه خشکسالی و SPI مثبت نوید پایان خشکسالی را می‌دهد (Mahmoudi et al 2019). شاخص SPI در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه در مطالعه حاضر مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. دلیل استفاده از SPI12 این است که در ایران مناطقی

وجود دارند که بخش‌های قابل توجهی از مخازن آب موجود در مقیاس زمانی یک ساله مدیریت می‌شوند (یعنی در طول فصل بارندگی پر و در فصل خشک خالی می‌شوند). شاخص SPI در مقیاس‌های زمانی طولانی‌تر برای اهداف مدیریت منابع آب مناسب‌تر (Tabari et al 2012).

۲-۳ پدیده پیوند از دور اقلیمی ENSO

ENSO یک پدیده اقیانوس-جو است که شامل گرم شدن غیرمعمول (ال نینو) یا خنک شدن (La Niña) دمای سطح دریا (SST) در اقیانوس آرام استوایی است. این تغییرات دما با تغییر فشار اتمسفر، گردش واکر و انتقال رطوبت بر الگوهای آب و هوای جهانی تأثیر می گذارد (Go et al., 2019). شاخص نوسان جنوبی (SOI) که اختلاف فشار هوا بین تاهیتی و داروین را اندازه گیری می کند، به عنوان یک شاخص کلیدی از فعالیت ENSO عمل می کند (Gupta and Jain, 2021). در این مطالعه از شاخص SOI اداره ملی اقیانوسی و جوی (NOAA) برای نشان دادن تغییرپذیری ENSO طی دوره آماری ۱۹۷۹-۲۰۲۲ استفاده شد. داده ها به صورت رایگان در https://psl.noaa.gov/data/correlation/soi.data در دسترس است.

۲-۴ تحلیل همدوسی موجک Wavelet coherence (WTC)

WTC یک ضریب همبستگی محلی در فضای زمان و فرکانس است که برای تعیین کمیت درجه رابطه خطی بین دو سری غیر ایستا در حوزه زمان و فرکانس استفاده می‌شود (Su et al 2019). با توجه به سری‌های زمانی X و Y، با تبدیل‌های موجک $W_i^x(s)$ و $W_i^y(s)$، Wavelet coherenceرا می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$R_n^2 = \frac{\left|S\left(s^{-1}W_i^{XY}(s)\right)\right|^2}{S\left(s^{-1}\left|W_i^X(s)\right|^2\right)\left(s^{-1}\left|W_i^Y(s)\right|^2\right)} \quad (1)$$

که در آن S یک عملگر هموارسازی است که توسط نوع موجک مورد استفاده تعریف می‌شود و

$$W_i^{XY}(s) = W_i^X(s).W_i^Y*(s) \quad (2)$$

که در آن * نشان دهنده مزدوج مختلط است. R_n^2 مقداری بین ۰ و ۱ می‌گیرد، که در آن ۰ نشان دهنده عدم همبستگی بین دو سری زمانی و ۱ نشان دهنده همبستگی کامل دو سری زمانی با یکدیگر است. WTC مناطقی را در فضای زمان-

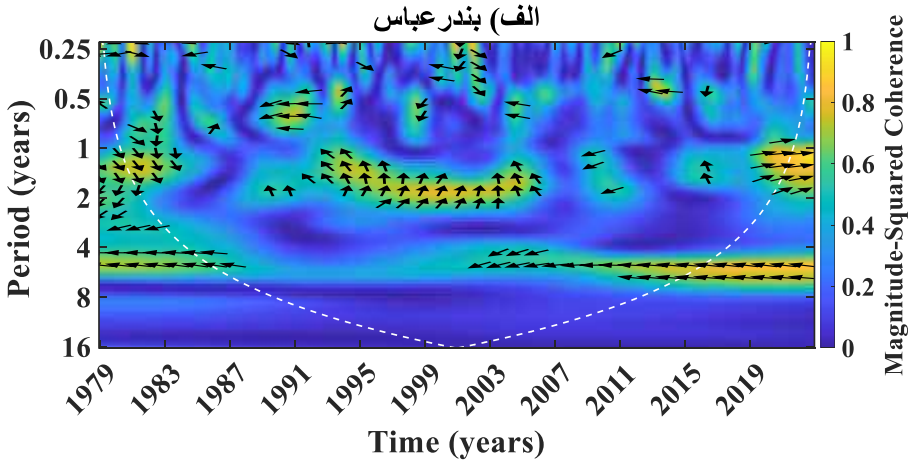
فرکانس نشان می‌دهد که در آن دو سری زمانی با هم تغییر می‌کنند اما لزوماً توان بالایی ندارند (Su et al 2019). در پژوهش حاضر از موجک مادر Morlet استفاده شد و تحلیل ها در نرم افزار MATLAB R2024b انجام شد.

۳-نتایج و بحث

به منظور بررسی ارتباط زمانی–فرکانسی بین شاخص خشکسالی استاندارد (SPI) و شاخص نوسان جنوبی(ENSO) ، از روش Wavelet coherence استفاده شد. شکل‌های ۲-۱۲ نمودارهای بصری تحلیل Wavelet coherence بین شاخص SPI12و شاخص ENSO را در ایستگاه‌ها نشان می‌دهد. در این نمودارها، نواحی با رنگ‌های گرم‌تر بیانگر شدت بالاتر همبستگی در مقیاس‌های زمانی مختلف هستند. همچنین جهت فلش‌ها اطلاعاتی درباره تقدم یا تأخر فاز بین دو متغیر ارائه می‌دهد. این تصاویر امکان شناسایی بازه‌های زمانی مشخصی را فراهم می‌سازد که طی آن‌ها اثر ENSO بر خشکسالی‌های منطقه معنادار بوده است.

۳-۱ ایستگاه بندرعباس (شکل الف):

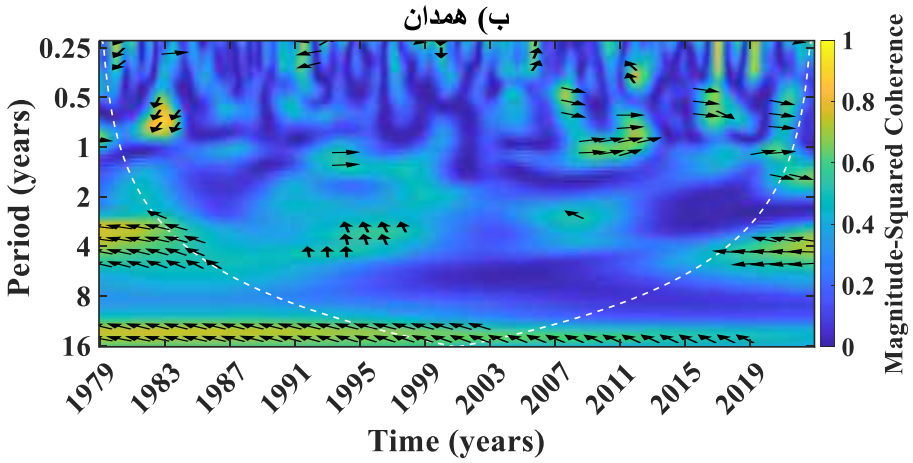
تحلیل Wavelet coherence بین SPI12 و ENSO در این ایستگاه نشان داد که بیشترین نواحی معنی‌دار در بازه‌های زمانی و مقیاس‌های متفاوت رخ داده است. در دوره‌ی ۱۹۹۴ تا ۲۰۰۵، همبستگی نسبتاً قوی با ضریب حدود ۰.۷ در مقیاس‌های ۱ تا ۲ سال مشاهده شد، به‌طوری که ENSO نقش پیشرو در تغییرات SPI داشت. علاوه بر این، در سال ۱۹۹۱ یک دوره‌ی کوتاه سه‌ماهه با شدت بالاتر (حدود ۰.۸) نمایان گردید. در بازه ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۶ نیز همبستگی در مقیاس‌های بلندمدت‌تر (۵ تا ۶ سال) با ضریب حدود ۰.۷ و در فاز مخالف (Anti-phase) مشاهده شد. در نهایت، در دوره ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۱ یک همبستگی نسبتاً قوی (حدود ۰.۸) در مقیاس ۱ تا ۱.۵ سال و هم‌فاز (In-phase) نمایان گردید.



شکل (۲)- Wavelet coherence بین SPI12 و ENSO ایستگاه بندر عباس

۳-۲ ایستگاه فرودگاه همدان (شکل ب):

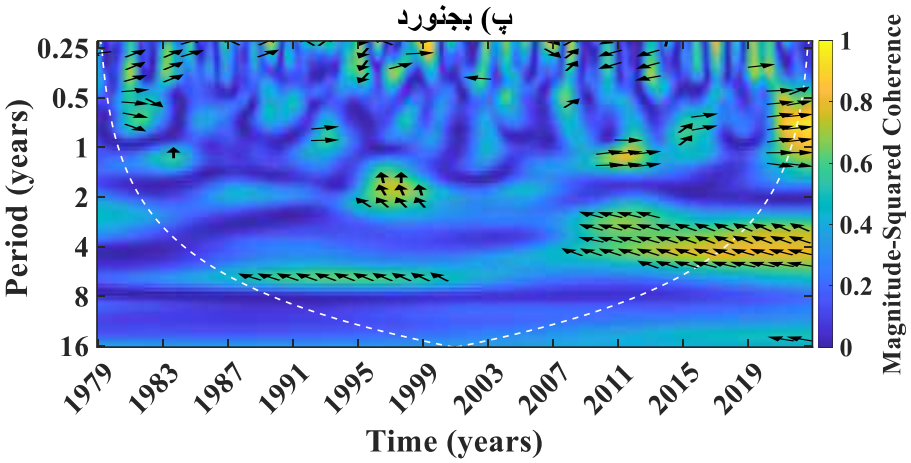
بررسی Wavelet coherence بین SPI12 و ENSO در این ایستگاه نشان داد که در بازه زمانی ۱۹۹۲ تا ۱۹۹۳، یک ناحیه‌ی معنی‌دار با همبستگی بسیار قوی (حدود ۰.۹) در مقیاس‌های کوتاه‌مدت، یعنی بین ۶ ماه تا ۱ سال، مشاهده شد. این نتیجه بیانگر آن است که در این دوره‌ی زمانی، تغییرات ENSO ارتباط مستقیم و شدیدی با نوسانات SPI12 داشته و می‌تواند به‌عنوان یک عامل مؤثر در بروز شرایط خشکسالی یا ترسالی کوتاه‌مدت منطقه در نظر گرفته شود.



شکل (۳)- Wavelet coherence بین SPI12 و ENSO ایستگاه فرودگاه همدان

۳-۳ ایستگاه بجنورد (شکل پ):

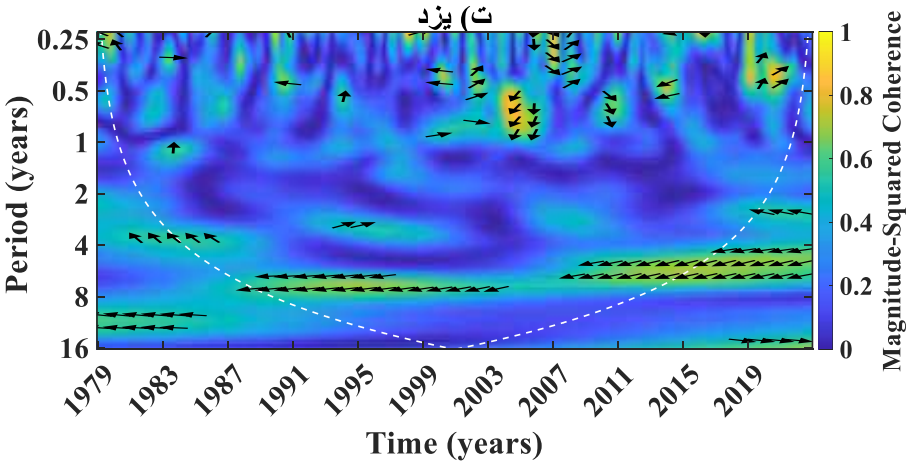
نتایج Wavelet coherence در این منطقه نشان داد که در بازه ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۲ یک همبستگی نسبتاً قوی (حدود ۰.۸) در مقیاس‌های ۱ تا ۱.۵ سال به‌صورت هم‌فاز (In-phase) مشاهده شد. همچنین در دوره ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۱، همبستگی بسیار قوی‌تری (حدود ۰.۹) در مقیاس‌های ۶ ماه تا ۱ سال و هم‌فاز ثبت گردید. علاوه بر این، طی سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۸ همبستگی در مقیاس‌های ۳ تا ۴ سال به‌صورت ضدفاز (Anti-phase) و با شدت حدود ۰.۷–۰.۸ نمایان شد. در سال ۱۹۹۹ نیز یک همبستگی بسیار قوی (حدود ۰.۹) در مقیاس سه‌ماهه به‌صورت هم‌فاز شناسایی شد. نهایتاً، طی دوره ۱۹۹۶ تا ۱۹۹۸، همبستگی در بازه ۱.۵ تا ۲ سال با شدت حدود ۰.۷ مشاهده شد که در آن ENSO نقش پیشرو نسبت به SPI12 داشت.



شکل (۴)- Wavelet coherence بین SPI12 و ENSO ایستگاه بجنورد

۳-۴ ایستگاه یزد (شکل ت):

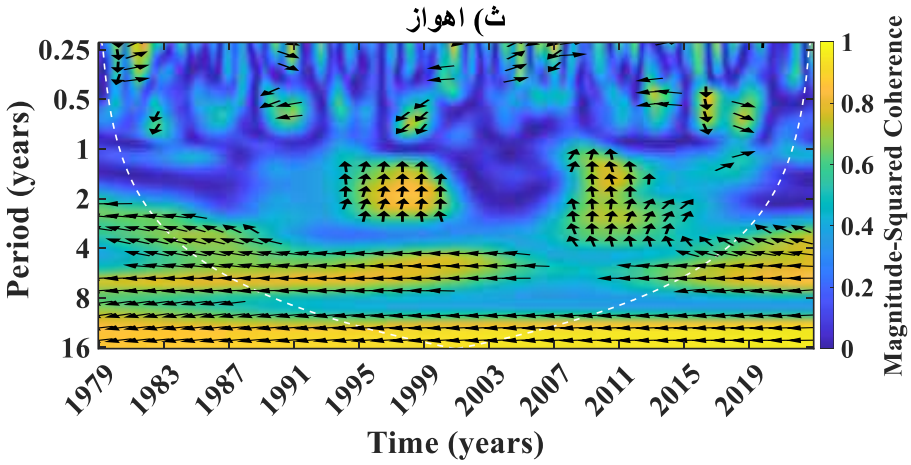
در این منطقه سه بازه‌ی زمانی اصلی از همبستگی معنی‌دار بین SPI12 و ENSO مشاهده شد. نخست، طی سال‌های ۲۰۰۴ تا ۲۰۰۵ همبستگی نسبتاً قوی (حدود ۰.۸) در مقیاس‌های ۶ ماه تا ۱ سال ثبت گردید که در آن SPI نقش پیشرو نسبت به ENSO داشت. دوم، در سال ۲۰۰۷ یک ناحیه‌ی معنی‌دار در مقیاس‌های کوتاه‌مدت‌تر (۳ تا ۴ ماه) با شدت حدود ۰.۸ دیده شد که باز هم SPI12 پیشرو بود. سوم، در سال ۲۰۲۰ یک همبستگی قوی (حدود ۰.۸) در بازه ۴ تا ۶ ماه ظاهر شد که این بار ENSO نسبت به SPI12 پیشرو بود. این الگو نشان‌دهنده تغییر نقش زمانی ENSO و SPI12 در مقیاس‌های مختلف است.



شکل (۵)- Wavelet coherence بین SPI12 و ENSO ایستگاه یزد

۳-۵ ایستگاه اهواز (شکل ث):

در این منطقه چندین بازه‌ی زمانی با همبستگی معنی‌دار بین SPI12 و ENSO شناسایی شد. در فاصله ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۰، یک همبستگی قوی (حدود ۰.۸) در مقیاس‌های ۱ تا ۲ سال مشاهده گردید که ENSO نقش پیشرو نسبت به SPI داشت. همچنین، در دوره ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۲ همبستگی نسبتاً قوی (حدود ۰.۷) در بازه‌های ۱ تا ۳ سال به ثبت رسید که در آن نیز ENSOپیشرو بود. علاوه بر این، در دوره بلندمدت‌تری از ۱۹۸۷ تا ۲۰۰۲، یک همبستگی با شدت حدود ۰.۷ در مقیاس‌های ۴ تا ۶ سال ظاهر شد که در فاز مخالف (Anti-phase) قرار داشت و نشان‌دهنده رابطه معکوس بین تغییرات ENSO و SPI12بود. در بازه ۹.۵ تا ۱۴.۵ ساله یک همبستگی بسیار قوی با شدت ۰.۹ طی سال‌های ۱۹۹۴ تا ۲۰۰۸ مشاهده شد که به‌صورت anti-phase رخ داده است. نهایتاً، در سال ۲۰۱۶ یک همبستگی با شدت متوسط (حدود ۰.۷) در مقیاس‌های ۵ تا ۸ ماه مشاهده گردید که در آن SPI12 نقش پیشرو نسبت به ENSO داشت.

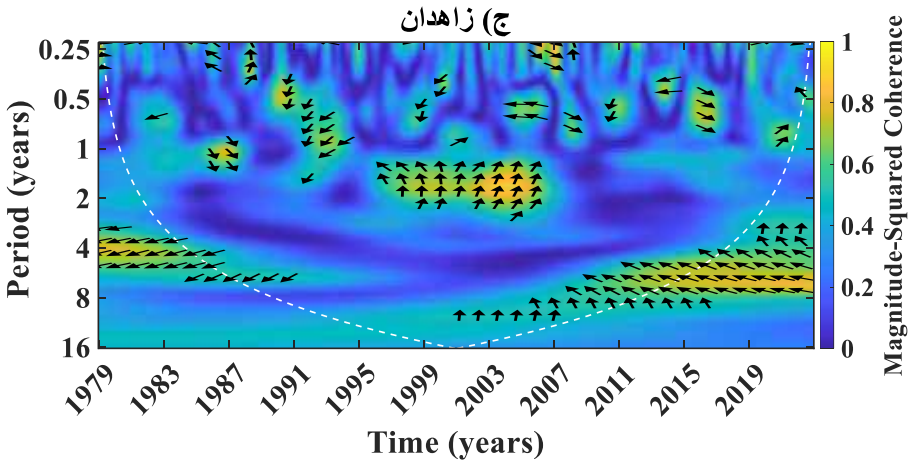


شکل (۶)- Wavelet coherence بین SPI12 و ENSO ایستگاه اهواز

۳-۶ ایستگاه زاهدان (شکل ج):

نتایج Wavelet coherence در این منطقه نشان داد که در مقیاس‌های ۱ تا ۲ سال دو ناحیه‌ی معنی‌دار ظاهر شدند؛ نخست طی سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۰۶ با شدت بسیار قوی (حدود ۰.۹) و سپس در دوره ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۱ با شدت متوسط‌تر (حدود ۰.۷)، که در هر دو بازه ENSO نقش پیشرو نسبت به SPI12 داشت. علاوه بر این، در بازه ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۶ یک همبستگی با شدت حدود ۰.۷ در مقیاس‌های ۵ تا ۷ سال مشاهده شد که در فاز مخالف (Anti-phase) قرار داشت و نشان‌دهنده رابطه

معکوس بین ENSO و شرایط خشکسالی منطقه است. در نهایت، در سال ۲۰۰۷ یک همبستگی کوتاه‌مدت در مقیاس‌های ۳ تا ۴ ماه با شدت حدود ۰.۸ به ثبت رسید که در آن SPI12 نقش پیشرو نسبت به ENSO داشت.



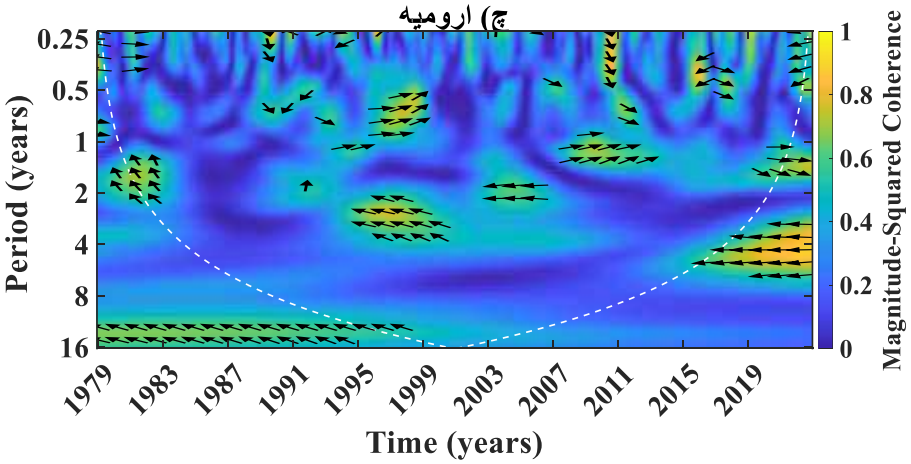
شکل (۷) – Wavelet coherence بین SPI12 و ENSO ایستگاه زاهدان

۳-۷ ایستگاه ارومیه (چ)

دوره‌های کوتاه‌مدت: در بازه‌ی ۳ تا ۶ ماهه، یک همبستگی قوی با شدت حدود ۰.۸ مشاهده شد (سال ۲۰۱۱) که در آن SPI12 پیشرو ENSOبوده است.

دوره‌های میان‌مدت: در مقیاس ۷ تا ۱۰ ماهه (۱۹۹۹-۱۹۹۷) همبستگی حدود ۰.۷ وجود داشت که در این بازه ENSO پیشرو بود. همچنین در بازه ۱ تا ۱.۵ ساله (۲۰۱۱-۲۰۰۸) همبستگی in-phase با شدت ۰.۷ دیده شد.

دوره‌های بلندمدت: در بازه ۲ تا ۳ ساله (۱۹۹۹-۱۹۹۶) همبستگی in-phase با شدت حدود ۰.۷ شناسایی شد.

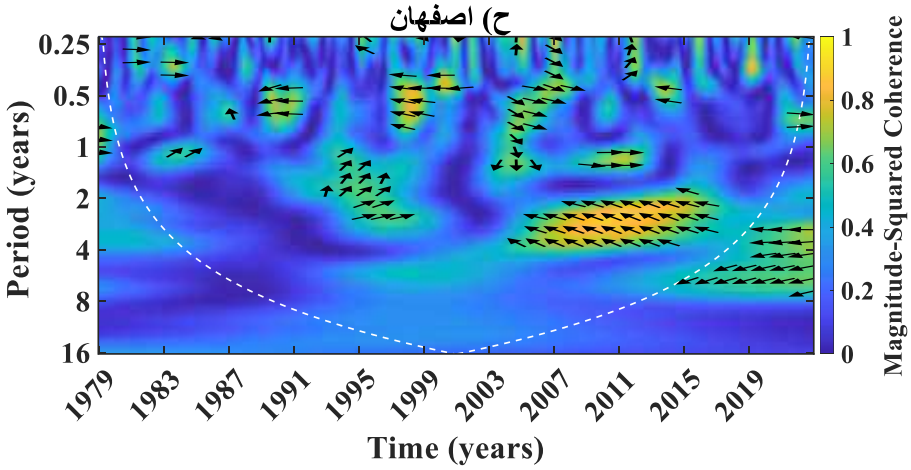


شکل (۸)- Wavelet coherence بین SPI12 و ENSO ایستگاه ارومیه

۳-۸ ایستگاه اصفهان (ح)

دوره‌های میان‌مدت: در بازه‌ی ۲ تا ۳.۵ ساله، یک همبستگی قوی با شدت حدود ۰.۹ در سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۵ مشاهده شد که به‌صورت in-phase بوده است.

دوره‌های کوتاه‌مدت: در مقیاس ۵.۵ تا ۸.۵ ماهه، یک همبستگی با شدت حدود ۰.۸ در سال‌های ۱۹۹۸ تا ۱۹۹۹ رخ داد که آن هم به‌صورت in-phase بوده است.



شکل (۹)- Wavelet coherence بین SPI12 و ENSO ایستگاه اصفهان

۳-۹ ایستگاه کرمان (خ)

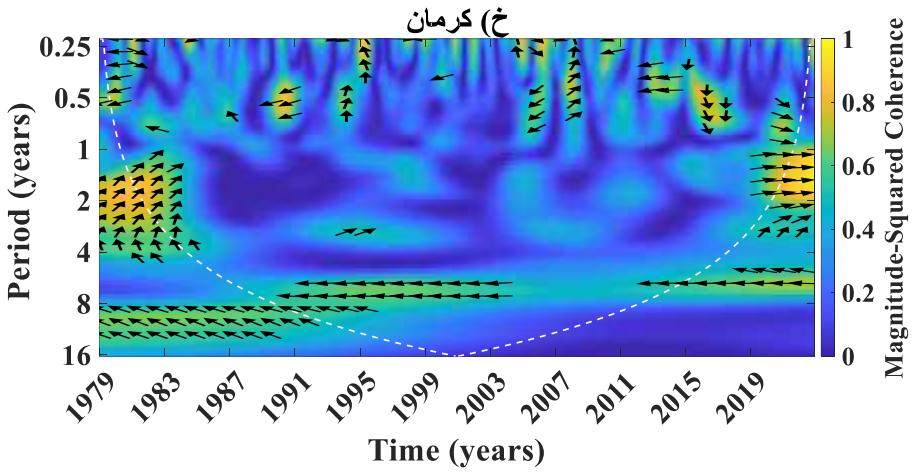
دوره‌های میان‌مدت: در بازه‌ی ۱ تا ۲ ساله، یک همبستگی قوی با شدت حدود ۰.۸ در سال ۲۰۲۰ مشاهده شد که به صورت in-phase رخ داده است.

دوره‌های ۱.۵ تا ۲.۵ ساله: همبستگی با شدت ۰.۸ در سال‌های ۱۹۹۲-۱۹۹۳ثبت شد که در آن ENSO پیشرو بوده است.

دوره‌های کوتاه‌مدت:

در بازه‌ی ۵ تا ۸ ماهه، یک همبستگی حدود ۰.۸ در سال ۱۹۹۱ به صورت in-phase مشاهده شد.

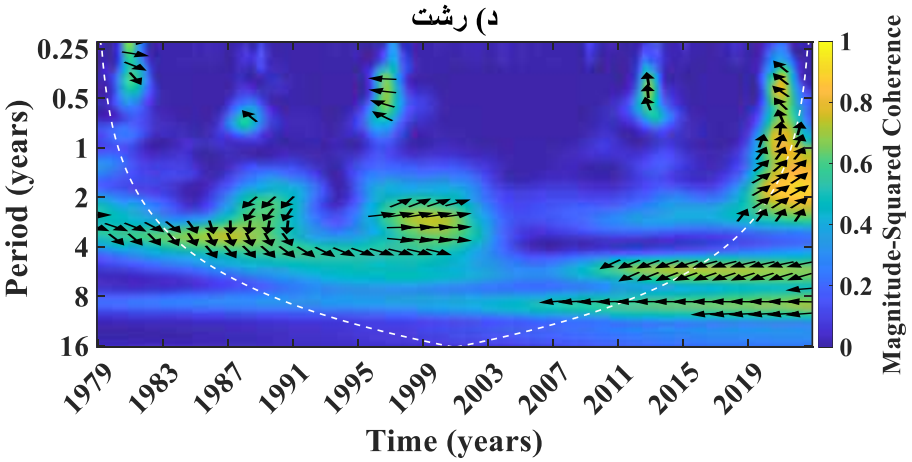
در بازه‌ی ۲.۵ تا ۴ ماهه، یک همبستگی با شدت ۰.۸در سال ۱۹۹۶ ثبت شد که در این مقیاس ENSO پیشرو بوده است.



شکل (۱۰) – Wavelet coherence بین SPI12 و ENSO ایستگاه کرمان

۳-۱۰ ایستگاه رشت (د)

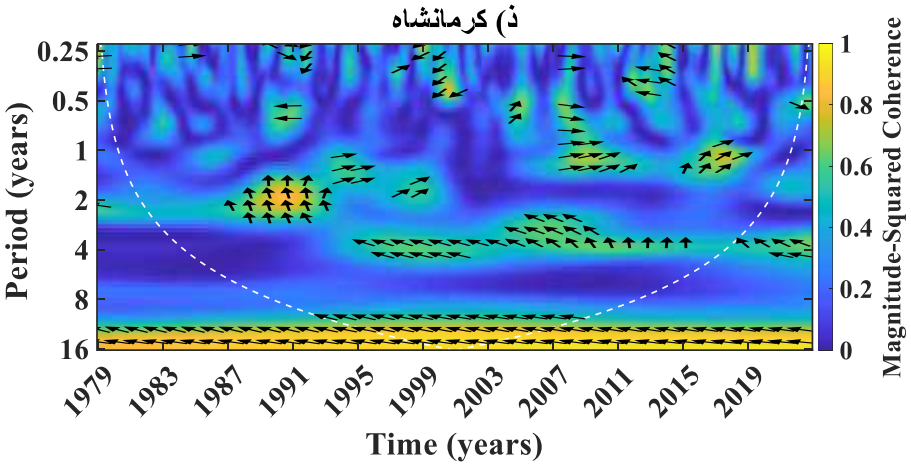
در بازه‌ی ۴ ماهه تا ۲ ساله، یک همبستگی قوی با شدت حدود ۰.۸ در سال ۲۰۲۰ مشاهده شد که در این مقیاس ENSO پیشرو بوده است.



شکل (۱۱) – Wavelet coherence بین SPI12 و ENSO ایستگاه رشت

۳-۱۱ ایستگاه کرمانشاه (ذ)

در بازه‌ی ۱.۵ تا ۲.۵ ساله، یک همبستگی قوی با شدت حدود ۰.۸ در سال‌های ۱۹۸۹ تا ۱۹۹۲ مشاهده شد که در آن ENSO پیشرو بوده است.



شکل (۱۲) – Wavelet coherence بین SPI12 و ENSO ایستگاه کرمانشاه

نتایج تحلیل Wavelet coherence بین شاخص خشکسالی SPI12 و شاخص ENSO در ۱۱ ایستگاه سینوپتیک مورد مطالعه نشان داد که الگوهای همبستگی در هر دو مقیاس کوتاه‌مدت و میان‌مدت قابل مشاهده هستند. با این حال، شدت و نوع همبستگی در ایستگاه‌های مختلف تفاوت‌هایی را نشان داد. به‌طور کلی، بیشترین همبستگی‌ها در دوره‌های ۱ تا ۲ ساله مشاهده شد که در اکثر ایستگاه‌ها با شدت متوسط تا بالا (۰.۷ تا ۰.۹) همراه بودند. این موضوع نشان می‌دهد که نوسانات بین‌سالانه ENSO یکی از عوامل تأثیرگذار بر تغییرپذیری بارش و خشکسالی در ایستگاه‌های مورد مطالعه است. در مقیاس‌های کوتاه‌مدت (۳ تا ۱۲ ماه)، همبستگی‌ها بیشتر به‌صورت in-phase مشاهده شدند. این همبستگی‌ها نشان‌دهنده واکنش سریع سیستم بارش و خشکسالی به نوسانات ENSO هستند. برای نمونه، در مناطق ارومیه و اصفهان همبستگی‌های معناداری در بازه‌های کمتر از یک سال مشاهده شد. در مقیاس‌های بلندمدت‌تر (۳ تا ۶ سال)، همبستگی‌ها کمتر و پراکنده‌تر بودند و در برخی موارد به‌صورت anti-phase ظاهر شدند (مانند مناطق بندر عباس، اهواز و زاهدان). این یافته می‌تواند به دلیل دخالت سایر عوامل جوی-اقیانوسی در مقیاس‌های دهه‌ای یا اثرات غیرمستقیم ENSO باشد.

بیشترین تأثیر ENSO در ایستگاه اهواز مشاهده شد، زیرا علاوه بر بازه‌های کوتاه‌مدت (۳–۱۲ ماه) و میان‌مدت (۱–۲ سال)، یک بازه بسیار بلندمدت ۹.۵–۱۴.۵ ساله با همبستگی قوی ۰.۹ و حالت anti-phase در سال‌های ۱۹۹۴–۲۰۰۸ دارد که آن را در بالاترین سطح تأثیر ENSO قرار می‌دهد. پس از آن، ایستگاه بندرعباس و اصفهان نیز تأثیر قابل توجهی نشان دادند، چرا که در بازه‌های کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت (۳–۶ سال) همبستگی معنادار داشتند. در مقابل، کمترین تأثیر در ایستگاه‌های فرودگاه همدان، رشت و کرمانشاه مشاهده شد، زیرا این ایستگاه‌ها تنها یک بازه محدود همبستگی نشان دادند؛ برای مثال، ایستگاه فرودگاه همدان در سال ۱۹۹۲-۱۹۹۳ یک همبستگی ۶ ماه تا ۱ سال، ایستگاه رشت در سال ۲۰۲۰ همبستگی در بازه ۴ ماه تا ۲ سال و ایستگاه کرمانشاه در سال‌های ۱۹۸۹–۱۹۹۲ بازه ۱.۵–۲.۵ ساله را نشان داد.

این یافته‌ها می‌تواند با نتایج Rezaei (2021) همسو باشد. وی نشان داد که خشکسالی‌های هواشناسی و کشاورزی در ایران به طور قابل توجهی تحت تأثیر سیستم های اقیانوسی-جوی به ویژه فاز سرد نوسان جنوبی (لانینا)، فاز منفی نوسان دهگانه اقیانوس آرام (PDO) و فاز مثبت نوسان اقیانوس اطلس شمالی (NAO) است. این همبستگی زمانی نشان دهنده تأثیر مستقیم یا غیرمستقیم ناهنجاری‌های اقیانوسی-جوی بر خشکسالی هواشناسی در مقیاس‌های منطقه‌ای است. همچنین Nouri and Homaee (2020) عنوان کردند به نظر می‌رسد که رویدادهای لانینا در سال‌های ۲۰۰۱-۱۹۹۸، ۲۰۰۹-۲۰۰۷ و ۲۰۱۲-۲۰۱۰ باعث خشکسالی‌های طولانی و شدید در ایران شده‌اند.

تحلیل نتایج نشان داد که اثر ENSO بر خشکسالی در ایران طی دوره آماری مورد مطالعه پایدار نبوده و در دهه‌های مختلف تغییر کرده است؛ به‌طوری که در دهه ۱۹۹۰ بیشتر در مقیاس‌های ۱–۲ سال ENSO نقش پیشرو داشت، اما پس از ۲۰۰۰ همبستگی‌ها متنوع‌تر شده و در برخی موارد SPI نقش پیشرو داشته است. در سال‌های اخیر نیز همبستگی‌های قوی مشاهده شد، اما الگوهای in-phase و anti-phase به‌طور متناوب ظاهر شدند که نشان‌دهنده تغییرپذیری اثر ENSO در طول زمان است.

۴-نتیجه گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که ENSO نقش مهم و پیشرو در تغییرات شاخص خشکسالی (SPI) دارد و اثر آن در بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت متفاوت است. بیشترین همبستگی‌ها در دوره‌های ۱ تا ۲ ساله مشاهده شد که در اکثر ایستگاه‌ها با شدت متوسط تا بالا (۰.۷ تا ۰.۹) همراه بودند. این موضوع نشان می‌دهد که نوسانات بین‌سالانه ENSO یکی از عوامل تأثیرگذار بر تغییرپذیری بارش و خشکسالی در ایستگاه‌های مورد مطالعه است. همچنین بیشترین تأثیر ENSO در مناطق اهواز، بندرعباس و اصفهان مشاهده شد، به‌ویژه منطقه اهواز که یک بازه بلندمدت ۹.۵–۱۴.۵ ساله با همبستگی قوی و پایدار نشان داد. در مقابل، ایستگاه‌های فرودگاه همدان، رشت و کرمانشاه کمترین تأثیرپذیری را داشتند و تنها همبستگی‌های محدود و کوتاه‌مدت در آنها مشاهده شد. این نتایج تأکید می‌کند که اثر ENSO بر خشکسالی در سطح منطقه‌ای ناهمگون است و شدت و پایداری آن بسته به ویژگی‌های مکانی و اقلیمی متفاوت می‌باشد. علاوه بر این، بررسی تغییرپذیری زمانی نشان داد که اثر این نوسانات طی دوره آماری ثابت نبوده و در برخی دهه‌ها افزایش یا کاهش یافته است. به طور کلی، نتایج این مطالعه بر اهمیت در نظر گرفتن نقش ENSO در پایش و پیش‌بینی خشکسالی در ایران تأکید دارد. با توجه به قرارگیری ایران در کمربند خشک جهانی و آسیب‌پذیری بالای منابع آب و کشاورزی، استفاده از شاخص‌های جوی–اقیانوسی در کنار داده‌های اقلیمی می‌تواند ابزار مؤثری برای مدیریت ریسک خشکسالی و تدوین راهبردهای سازگاری در شرایط تغییر اقلیم آینده باشد.

۵-رفرنس

-مساعدی، ا.، خلیلی‌زاده، م.، و محمدی‌استادکلایه، ا. (۱۳۸۷). پایش خشکسالی هواشناسی در سطح استان گلستان. علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ۱۵(۲)، ۱۷۶-۱۸۲.

- Azizi, G.H. (2000). Elnino and drought-wet periods in Iran. Geographical Research, 38, 71-84.

- Cui, A., Li, J., Zhou, Q., Zhu, H., Liu, H., Yang, C., ... & Li, Q. (2024). Propagation dynamics from meteorological drought to GRACE-based hydrological drought and its influencing factors. *Remote Sensing*, *16*(6), 976.

- Dabanlı, İ., Mishra, A. K., & Şen, Z. (2017). Long-term spatio-temporal drought variability in Turkey. *Journal of Hydrology*, *552*, 779-792.

- Gu, Y., Liu, H., Traoré, D. D., & Huang, C. (2020). ENSO-related droughts and ISM variations during the last millennium in tropical southwest China. Climate Dynamics, 54, 649-659.

Gupta, V., & Jain, M. K. (2021). Unravelling the teleconnections between ENSO and dry/wet conditions over India using nonlinear Granger causality. Atmospheric Research, 247, 105168.

-Mahmoudi, P., Rigi, A., & Miri Kamak, M. (2019). A comparative study of precipitation-based drought indices with the aim of selecting the best index for drought monitoring in Iran. Theoretical and Applied Climatology, 137(3), 3123-3138.

-McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993, January). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology* (Vol. 17, No. 22, pp. 179-183).

-Noorisameleh, Z., Gough, W. A., & Mirza, M. M. Q. (2021). Persistence and spatial–temporal variability of drought severity in Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, *28*(35), 48808-48822.

- Su, L., Miao, C., Duan, Q., Lei, X., & Li, H. (2019). Multiple-wavelet coherence of world's large rivers with meteorological factors and ocean signals. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *124*(9), 4932-4954.

-Rasanen, T. A., & Kummu, M. (2013). Spatiotemporal influences of ENSO on precipitation and flood pulse in the Mekong River Basin. *Journal of Hydrology*, *476*, 154-168.

-Rezaei, A. (2021). Ocean-atmosphere circulation controls on integrated meteorological and agricultural drought over Iran. Journal of Hydrology, 603, 126928.

- Rezaei, A., & Gurdak, J. J. (2020). Large-scale climate variability controls on climate, vegetation coverage, lake and groundwater storage in the Lake Urmia watershed using SSA and wavelet analysis. *Science of the Total Environment*, *724*, 138273.

-Tabari, H., Abghari, H., & Hosseinzadeh Talaee, P. J. H. P. (2012). Temporal trends and spatial characteristics of drought and rainfall in arid and semiarid regions of Iran. *Hydrological processes*, *26*(22), 3351-3361.

- Wilhite, D.A. 2000. Chapter 1 Drought as a Natural Hazard: Concepts and Definitions Drought Mitigation Center Faculty Publications, 69. 1: 3-18.

-Zakeri, S., Samkhaniani, A., Adeli, S., & Nikraftar, Z. (2019). Evaluation of long term trend of different drought indices using Mann-Kendall and sen's slope estimator over Iran. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *42*, 1141-1145.

The Relationship between ENSO Large-Scale Climate Pattern and Drought Variability in Some stations of Iran Using Wavelet Coherence Analysis

Aliyeh Keshavarz[1], Reza Modarres[2 *], Seyed Alireza Gohari[3]

Aliyeh Keshavarz, PhD student of Rangeland Science, Faculty of Natural Resources, Isfahan University [1] of Technology, Isfahan, Iran Email: a.keshavarz@na.iut.ac.ir
[2] Reza Modarres, Associate Professor, Rangeland and Watershed Department, Faculty of Natural Resources, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran Email: reza.modarres@iut.ac.ir
[3] Seyed Ali Reza Gohari, Associate Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran Email: ar.gohari@iut.ac.ir

Abstract

Drought, one of the most significant natural hazards, restricts access to water resources and has adverse effects on agriculture and ecosystems. Identifying and investigating the main factors affecting the decrease in precipitation and the subsequent occurrence of drought is of particular importance. In the meantime, ENSO, as one of the phenomena of Teleconnections, can affect the climatic patterns of different regions of the planet and play an important role in the occurrence of droughts. This study aimed to investigate the effect of ENSO on the SPI12 drought index in 11 synoptic stations in the some centers of province of Iran. ENSO and SPI12 data for the period 1979 to 2022 were used, and the analyses were performed using the wavelet coherence method to identify temporal-frequency coherence patterns. The results showed that ENSO plays a leading and significant role in SPI changes, and its coherence patterns are different in the short, medium, and long run. Overall, the highest coherence were observed in 1 to 2-year periods, which were associated with moderate to high intensity (0.7 to 0.9) at most stations. The highest impact was observed in the stations of Ahvaz, Bandar Abbas, and Isfahan, especially the Ahvaz station , which had a long-term period of 9.5–14.5 years with a strong and stable coherence. In contrast, the least effect was observed in the stations of Hamedan Airport, Rasht and Kermanshah, which had only limited and short-term coherence. These results show that the effect of ENSO on drought is regionally heterogeneous, and its intensity and stability are dependent on spatial and climatic conditions.

Keywords: Wavelet, Drought, Teleconnections, Climate Change, S

سومین کنفرانس ملی آب و هواشناسی ایران (با محوریت تغییر اقلیم)
The 3rd National Conference on Climatology of Iran (Focusing on Climate Change)
ارومیه ۱۶ مهر ۱۴۰۴

تحلیل تغییرپذیری خشکسالی هیدرولوژیکی در رودخانه مردق چای

مرضیه اسمعیل‌پور[۱]، احمدرضا قاسمی [۲]

۱- دانشیار گروه جغرافیا و برنامه‌ریزی شهری، دانشگاه مراغه
۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشگاه شهرکرد
آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول m.esmaeilpour@maragheh.ac.ir

چکیده

خشکسالی یکی از بلای طبیعی است که اثرات بالقوه‌ای بر محیط زیست، منابع آب، پایداری، انرژی و اقتصاد دارد و به چهار دسته هواشناسی، هیدرولوژیکی، کشاورزی و اجتماعی-اقتصادی دسته‌بندی شده است. خشکسالی هیدرولوژیکی به معنای کاهش و نقصان در آب‌های سطحی و زیرزمینی است که در نتیجه کمبود طولانی مدت بارندگی رخ می‌دهد. در این مطالعه، با استفاده از شاخص خشکسالی جریان رودخانه (SDI) و داده‌های دبی ایستگاه قشلاق امیر، خشکسالی هیدرولوژیکی رودخانه مردق چای برای مقیاس زمانی ۳ ماهه و سالانه، در دوره زمانی بلندمدت ۴۸ ساله بررسی شده است. همچنین همگنی سری زمانی مقادیر خشکسالی با استفاده از چهار آزمون مورد بررسی قرار گرفت. علاوه بر این، شدت و مدت خشکسالی با استفاده از تئوری ران محاسبه گردید. نتایج نشان دهنده کاهش مقادیر شاخص SDI در طول سال‌های اخیر نسبت به گذشته است . نتایج آزمون‌های همگنی نیز نشان داد بر اساس نتایج همه آزمون‌ها، سری زمانی مورد بررسی ناهمگن بوده و دارای یک نقطه تغییر در سال ۱۹۹۷ است به‌نحوی که میانگین شاخص SDI قبل و بعد از این سال بسیار متفاوت به‌ترتیب برابر با ۰/۶۵ و ۰/۶۱- است. با در نظر گرفتن آستانه ۰، طولانی‌ترین دوره خشکسالی ۵۴ ماه و با شدت ۹۳/. ثبت شده است. در حالی که شدیدترین خشکسالی (با شدت ۱/۴۴) ۲۴ ماه به طول انجامیده است. طولانی‌ترین خشکسالی شدید یا بسیار شدید (مقادیر کمتر از ۱- شاخص SDI) دارای تداوم کمتر و تنها ۱۰ ماه طول کشیده است. درصد وقوع طبقات مختلف خشکسالی در مقیاس سالانه نیز نشان داد که ترسالی ملایم بالاترین درصد وقوع و ترسالی شدید و خشکسالی بسیار شدید کمترین درصد وقوع را در بین سال‌های مورد مطالعه دارند.

کلید واژه‌ها: خشکسالی هیدرولوژیک، نقطه تغییر شاخص SDI، رودخانه مردق چای.

مقدمه

تغییرات اقلیمی، که به عنوان تهدیدی جهانی در بخش‌های مختلف در حال ظهور است، شدت و غیرقابل پیش‌بینی بودن رویدادهای شدید آب و هوایی از جمله خشکسالی، امواج گرما و سیل را افزایش می‌دهد (Almeu et al., 2025). خشکسالی پدیده‌ای پیچیده و چند متغیره است که تحت تأثیر فرآیندهای متنوعی قرار دارد که به عنوان پرهزینه‌ترین بلای طبیعی در جهان در نظر گرفته می‌شود (Cook et al., 2018) . تعاریف خشکسالی را می‌توان به مفهومی و عملیاتی طبقه‌بندی کرد (Mukherjee et al., 2018). خشکسالی یک دوره طولانی مدت کمبود آب است که در آن فرآیندهای طبیعی تولید کشاورزی و روابط طبیعی بین انسان و محیط زیست مختل می‌شود. بنابراین، خشکسالی محدود به مناطق خشک نیست و پتانسیل وقوع در هر نوع آب و هوایی را دارد .(Mahmoudi et al., 2019) ا. این پدیده به عنوان یک مخاطره طبیعی خزنده در نظر گرفته می‌شود که تأثیرات خود را در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف آشکار می‌کند. این به این دلیل است که رویدادهای خشکسالی تأثیرات مستقیم و غیرمستقیم متنوعی دارند که بر بسیاری از بخش‌های مرتبط با آب، از جمله کمبود مواد غذایی، کاهش تولید برق آبی و آتش‌سوزی‌های جنگلی تأثیر می‌گذارند (Laimighofer and Laaha, 2022) . خشکسالی فقط به دلیل کمبود بارندگی اتفاق نمی‌افتد. تغییر قابل توجهی در هر یک از اجزاء چرخه هیدرولوژی مانند تابش خورشیدی، تبخیر و تعرق، تراکم ابرها، باد، رواناب سطحی و جریان آب زیرزمینی می‌تواند باعث به وجود آمدن خشکسالی شود. همه این پارامترهای اقلیمی و هیدرولوژیکی باید در نظر گرفته شوند و برای تجزیه و تحلیل صحیح خشکسالی مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرند (Topcu et al., 2025). این پدیده زمانی رخ می‌دهد که تقاضای بلندمدت آب از میزان عرضه موجود فراتر رود و معمولاً به آرامی و در یک دوره طولانی ایجاد می‌شود (Akbas et al., 2025).

در ادبیات موضوعی، خشکسالی معمولاً به چهار نوع متمایز گروه‌بندی می‌شود: (۱) خشکسالی هواشناسی در نتیجه کاهش بارندگی رخ می‌دهد؛ (۲) خشکسالی کشاورزی نتیجه کمبود رطوبت خاک است؛ (۳) خشکسالی هیدرولوژیکی به دلیل کاهش جریان‌های رودخانه‌ای و رواناب‌ها ایجاد می‌شود؛ و در نهایت (۴) خشکسالی اجتماعی-اقتصادی به دلیل مصرف آب توسط انسان رخ می‌دهد (Yihdego et al., 2019) . به عنوان مثال، خشکسالی‌های هواشناسی تولیدات کشاورزی یک منطقه را از بین می‌برند، در دسترس بودن مواد غذایی را کاهش می‌دهند، تولید برق آبی را کاهش می‌دهند، باعث آتش‌سوزی در مراتع یا جنگل‌ها می‌شوند و از همه مهمتر باعث کمبود آب آشامیدنی می‌شوند. بنابراین، ممکن است در درازمدت منجر به ظهور بیماری‌های همه‌گیر و بیماری‌ها شوند(Zerouali et al., 2021) . خشکسالی یکی از رایج‌ترین بلایای طبیعی است که اثرات مخربی بر اقتصاد و محیط زیست دارد. از نظر مهندسی منابع آب، شناخت تغییرات زمانی و مکانی خشکسالی هیدرولوژیکی در طراحی، برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از سازه‌های هیدرولیکی رودخانه‌ها بسیار مهم است. بر این اساس، در دنیای امروز که کمبود منابع آب از اهمیت حیاتی برخوردار است، انجام تجزیه و تحلیل خشکسالی

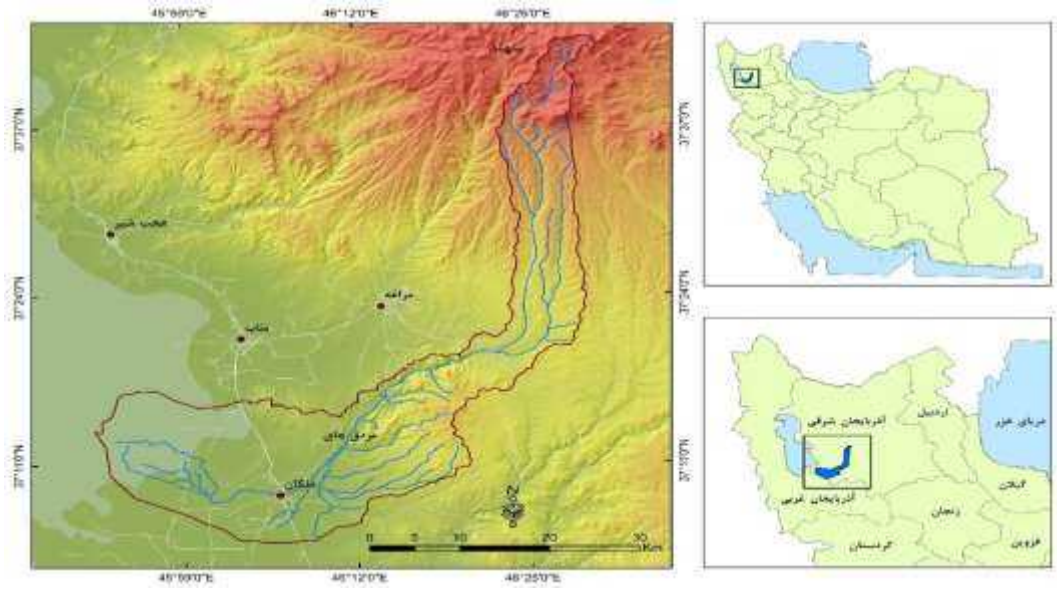
هیدرولوژیکی زمانی و مکانی برای مناطق بحرانی ضروری است. انتظار می‌رود این امر منجر به ارائه اقدامات احتیاطی مؤثر برای حفاظت از منابع آب موجود شود (Simsek 2021).

در زمینه تحلیل خشکسالی هیدرولوژیکی پژوهش‌های زیادی صورت گرفته است. امینی و همکاران (۱۳۹۸) با استفاده از شاخص SDI خشکسالی‌های هیدرولوژیک را در ایستگاه‌های استان اردبیل تحلیل کردند. یاراحمدی و رستمی‌زاد (۱۳۹۸) خشکسالی هیدرولوژیک را در رودخانه دریان چای مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که در مجموع ۳۸ دوره خشگسالی هیدرولوژیک در این رودخانه اتفاق افتاده که بیش از ۶۰ درصد آن دارای تداومی بیشتر از ۲۰۰ روز هستند. جوان (۱۳۹۹) روند خشکسالی هیدرولوژیک را در حوضه دریاچه ارومیه با استفاده از داده‌های بارش در ۸ ایستگاه منتخب حوضه مورد بررسی قرار داد. ایشان از دو روش تحلیل روند نوآورانه و من کندال استفاده کردند و نتیجه گرفتند مقادیر شاخص SPI در مقیاس‌های زمانی ۱۲ و ۲۴ ماهه در ایستگاه‌های مراغه، مهاباد، سهند، سقز و تکاب دارای روند کاهشی معنی‌دار می‌باشد. یوسه و همکاران (۲۰۲۳) خشکسالی‌های هیدرولوژیک را در حوضه یشیلرمارک ترکیه با استفاده از شاخص SDI و روش تحلیل روند ITA مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. نتایج پژوهش ایشان نشان داد که درصد طبقات ترسالی بیشتر از خشکسالی می‌باشد. ایشان با استفاده از تئوری ران، شدت و مدت خشکسالی را هم مورد بررسی قرار دادند و نتیجه پرفتند طولانی‌ترین دوره خشکسالی ۱۴۵ ماه از ۱۹۹۷ تا ۲۰۰۹ طول کشیده است. دیگر و همکاران (۲۰۲۵) روند و تغییرپذیری زمانی-مکانی خشکسالی هیدرولوژیک را در حوضه رودخانه فرات ذز مقیاس‌های زمانی متفاوت مورد بررسی قرار دادند. نتایج به دست آمده نشان داد که بر اساس درصد وقوع، دوره‌های خشکسالی خفیف و ترسالی، پرتکرارترین دسته‌ها هستند. هدف این پژوهش بررسی وضعیت وقوع خشکسالی هیدرولوژیک در مردق چای و تعیین سال‌های خشک و تر با استفاده از شاخص خشکسالی جریان رودخانه می‌باشد.

مواد و روش‌ها

رودخانه مردق به عنوان بخشی از آبراهه اصلی حوضه آبریز مردق چای از بهم پیوستن دو شاخه اصلی حوضه مردق‌چای یعنی مردق‌چای و مغانجق چای در محدوده شهرستان مراغه بوجود می‌آید. این رودخانه از دامنه جنوبی توده آتش فشانی سهند سرچشمه می گیرد و پس از گذر از شهرستان ملکان به دریاچه ارومیه می ریزد. حوضه آبریز مردق‌چای مساحتی در حدود ۱۱۱۲ کیلومترمربع را زهکشی می کند. مرتفع ترین نقطه حوضه با ارتفاع ۳۶۸۱ متر قله کوه سهند و پست ترین نقطه آن با ارتفاع ۱۲۶۲ متر در مصب رودخانه واقع شده است. سکونتگاه‌های زیادی در حاشیه این رودخانه واقع شده‌اند. بزرگترین مرکز جمعیتی حاشیه رودخانه، شهر ملکان است. در حوضه آبریز مردق‌چای دو ایستگاه هیدرومتری مستقر شده است. این ایستگاه‌ها شامل ایستگاه مغانجق بر روی شاخه مغانجق چای و ایستگاه قشلاق امیر بر روی آبراهه اصلی مردق‌چای می‌باشد. بنابراین داده‌های دبی ایستگاه قشلاق امیر را می‌توان به عنوان ایستگاه معرف دبی رودخانه مردق‌چای درنظر

گرفت. به این ترتیب آمار دبی این ایستگاه در دوره آماری ۴۸ ساله جهت تحلیل خشکسالی هیدرولوژیک مورد استفاده قرار گرفت. میانگین دبی سالانه رودخانه مردق‌چای در حدود ۲/۴ مترمکعب در ثانیه می‌باشد. اردیبهشت با میانگین دبی ۸/۳ مترمکعب در ثانیه و فروردین با میانگین دبی ۷/۱ مترمکعب در ثانیه پرآب‌ترین ماه‌های این رودخانه می‌باشند؛ در حالیکه در سه ماه تابستان رودخانه تقریبا خشک می‌شود.



شکل (۱) موقعیت جغرافیایی مردق‌چای

خشکسالی هیدرولوژیکی با کمبود منابع آب زیرزمینی و سطحی مانند جریان رودخانه‌ها، سطح آب‌های زیرزمینی و آب موجود در دریاچه‌ها و مخازن مشخص می‌شود. ارزیابی این نوع خشکسالی شامل پایش سطح آب در این منابع است (آکباس و همکاران، ۲۰۲۵). شاخص‌های زیادی برای تعریف خشکسالی هیدرولوژیکی در مقالات علمی وجود دارد. شاخص‌هایی مانند شاخص شدت خشکسالی هیدرولوژیکی پالمر (PHDI) ، شاخص جریان استاندارد رودخانه(SSFI) ، شاخص تامین مخزن استاندارد (SRSI) ، شاخص سطح آب استاندارد (SWI) ، شاخص خشکسالی جریان رودخانه (SDI)، شاخص تامین آب سطحی (SWSI) برای تجزیه و تحلیل خشکسالی هیدرولوژیکی استفاده می‌شوند.

شاخص SDI که توسط نالبانتیس و تساکیریس (۲۰۰۹) پیشنهاد شده است، شاخصی است که در تحلیل خشکسالی هیدرولوژیکی استفاده می‌شود. فرآیند محاسبه آن مشابه شاخص بارش استاندارد است، با این تفاوت که به جای داده‌های

بارندگی از داده‌های جریان رودخانه استفاده می‌کند. در این شاخص، کل جریان رودخانه با $X_{i,j}^{k}$ در ماه j و سال i مشخص نشان داده می‌شود که به مقیاس زمانی k (۱، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه) بستگی دارد و می‌توان آن را با استفاده از معادلات زیر محاسبه کرد.

$$X_{i,j}^{k} = \sum_{I=13-k+j}^{12} V_{i-1,l} + \sum_{I=1}^{j} V_{i,l} if j < k \quad (۱)$$

$$X_{i,j}^{k} = \sum_{I=1}^{j} V_{i,l} if j \geq k \quad (۲)$$

که در آن:

$V_{i,l}$ ، و $V_{i-1,l}$ به ترتیب نشان‌دهنده حجم جریان رودخانه در سال‌های $i-1$ و i هستند. بر این اساس، نالبانتیس و تساکریس (۲۰۰۹) اظهار داشته‌اند از آنجایی که داده‌های جریان رودخانه می‌توانند توزیع احتمال چوله‌ای داشته باشند، می‌توان از خانواده توابع توزیع گاما برای تقریب استفاده کرد. بنابراین، در این مطالعه، قبل از محاسبه SDI، از توزیع گاما برای برازش استفاده شده است. تابع توزیع احتمال توزیع گاما g(x) توسط (تام ۱۹۶۶) محاسبه شده است (Yuce et al., 2023). جهت جلوگیری از طولانی شدن مطلب معادلات آن در اینجا ارائه نشدند. طبقات خشکسالی براساس شاخص SDI در جدول ۱ ارائه شده است.

بعد از محاسبه مقادیر شاخص خشکسالی هیدرولوژیکی، چهار آزمون همگنی ناپارامتری برای تشخیص نقطه تغییر در داده‌های سری زمانی مقادیر شاخص خشکسالی انتخاب شدند که عبارتند از: آزمون Buishand (Buishand ۱۹۸۲)، آزمون پتیت (پتیت ۱۹۷۹)، آزمون SNHT (الکساندرسون ۱۹۸۶) و آزمون وان نیومن. در مرحله بعد، با استفاده از تئوری ران (Run Theory) شدت و مدت خشکسالی محاسبه شد. این روش توسط Yevjevich (1967) ارائه شده است. به این منظور، دو آستانه کمتر از صفر (خشکسالی) و کمتر از ۱- (خشکسالی شدید و بسیار شدید) در نظر گرفته شد و به صورت جداگانه برای هر کدام از این آستانه‌ها شدت و مدت خشکسالی محاسبه گردید. مدت یا تداوم خشکسالی (L) را می‌توان به عنوان دوره بین شروع و پایان خشکسالی تعریف کرد، در حالی که مقدار خشکسالی (magnitude) یا S به معنای مقدار تجمعی مقادیر SDI زیر سطح بحرانی در واحد ماه (معادله ۳) و شدت خشکسالی (Intensity) یا I نسبت مقدار به تداوم خشکسالی و یا همان میانگین این مقادیر (معادله ۴) است (Yuce et al., 2023).

$$S_i = \sum |X - X_0| \quad (۳)$$

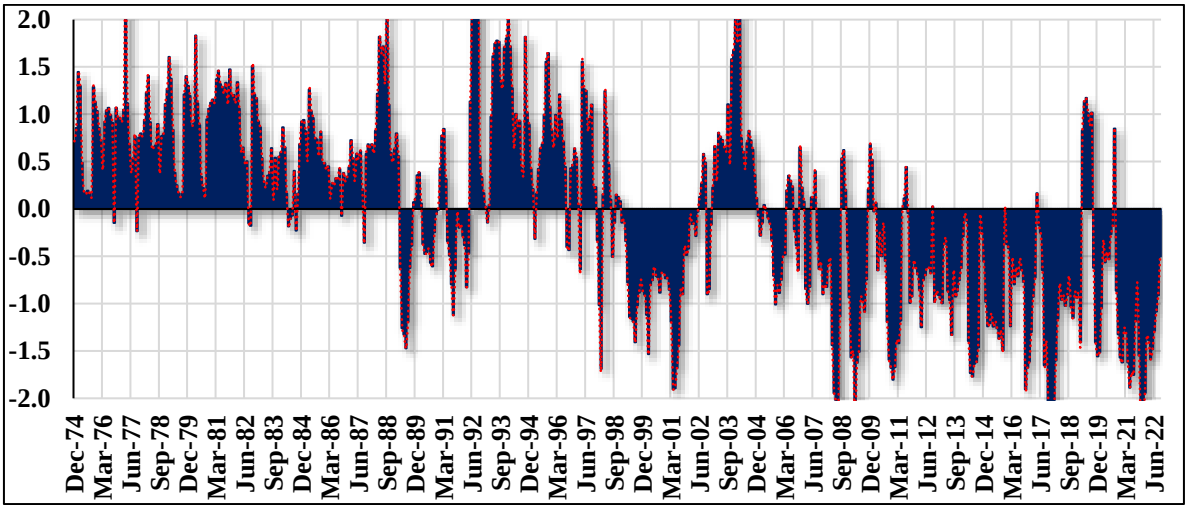
$$I = \frac{S_i}{L_i} \quad (۴)$$

جدول ۱ - طبقات مختلف خشکسالی بر اساس مقادیر SDI (Yuce et al., 2023)

طبقه	SDI
ترسالی بسیار شدید	۲+ و بالاتر
ترسالی شدید	$SDI \geq 2$
ترسالی متوسط	$1.5 \leq SDI < 2$
ترسالی خفیف	$1 < SDI < 1.5$
خشکسالی خفیف	$0 \leq SDI < 1$
خشکسالی متوسط	$-1 \leq SDI < 0$
خشکسالی شدید	$-1.5 \leq SDI < -1$
خشکسالی بسیار شدید	$-2 \leq SDI < -1.5$

یافته‌ها

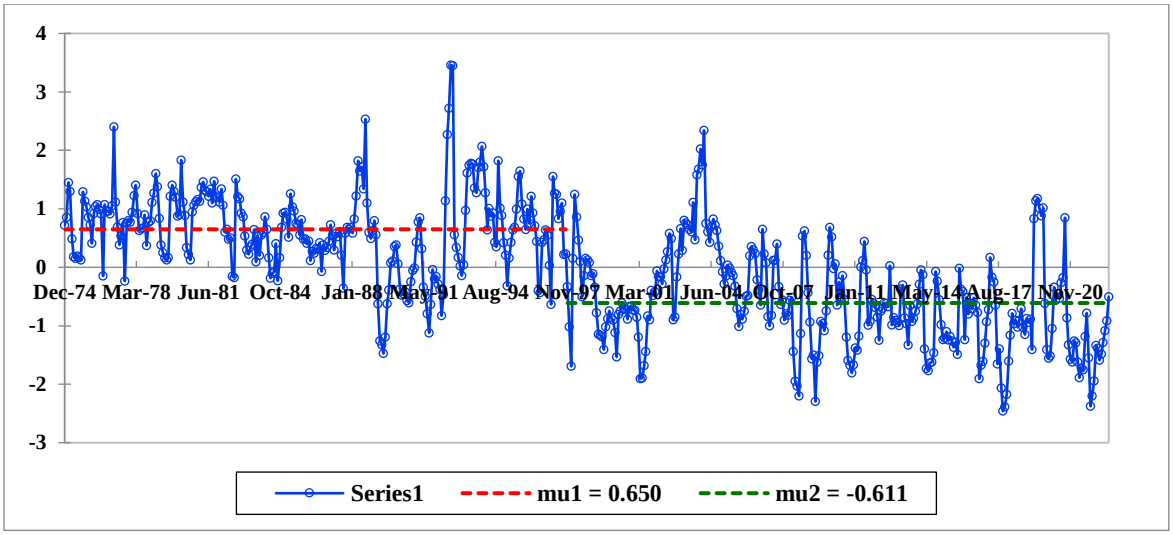
سری‌های زمانی مربوط به مقادیر شاخص *SDI* در مقیاس زمانی ۳ ماهه در ایستگاه قشلاق امیر در رودخانه مردق چای در شکل 2 ارائه شده است. با توجه به این نمودار می‌توان شدت و مدت خشکسالی را نیز تحلیل کرد. با این حال نکته‌ای که بسیار مشهود می‌باشد کاهش مقادیر شاخص SDI در سال‌های اخیر می‌باشد.



شکل ۲- سری زمانی مقادیر SDI سه ماهه در ایستگاه امیرقشلاق رودخانه مردق چای

چهار آزمون همگنی بر روی داده‌های SDI سه ماهه انجام شد. نتایج همه این آزمون‌ها از نظر شناسایی نقطه تغییر و همگن بودن داده‌ها یکسان می‌باشد. با توجه به محدودیت حجم مقاله، فقط نمودار مربوط به آزمون پتیت در اینجا ارائه شده است. آزمون‌های پتیت، SHNT و Buishand علاوه بر تست همگنی، نقطه تغییر را نیز نشان می‌دهند. در حالیکه آزمون Von Neumann تنها نشان دهنده همگنی داده‌ها می‌باشد. براساس نتایج سه آزمون اول، سری زمانی مقادیر شاخص خشکسالی جریان رودخانه در ایستگاه امیرقشلاق ناهمگن می‌باشد و مطابق هر ۳ آزمون فرض صفر که نشان دهنده همگنی داده‌ها می‌باشد رد شده و فرض مقابل یعنی H_0 تایید شده است که نشان دهنده وجود نقطه تغییر در داده‌ها می‌باشد. مطابق هر ۳ آزمون نقطه تغییر در داده‌ها نوامبر سال ۱۹۹۷ می‌باشد (شکل ۳). میانگین شاخص خشکسالی جریان رودخانه قبل از این نقطه تغییر ۰/۶۵ می‌باشد، در حالی که بعد از این تاریخ با کاهش شدید مواجه بوده و میانگین به ۰/۶۱- رسیده است.

این میزان تغییر در میانگین مقادیر خشکسالی بعد از نقطه تغییر بسیار قابل توجه بوده و نشان دهنده تشدید خشکسالی در این رودخانه در سال‌های اخیر می‌باشد.



شکل ۳- نقطه تغییر در سری زمانی شاخص خشکسالی دبی جریان ۳ ماهه در رودخانه مردق چای بر اساس آزمون پتیت

براساس جدول طبقات خشکسالی SDI، مقادیر کمتر از ۱- نشان دهنده خشکسالی شدید و بسیار شدید می‌باشند. با در نظر گرفتن عدد ۱- به عنوان مقدار بحرانی خشکسالی، نتایج آزمون ران برای محاسبه شدت و مدت خشکسالی به صورت جدول (۲) می‌باشد. لازم به ذکر است که خشکسالی‌های با مدت بیشتر از ۴ ماه در جدول آورده شدند. طولانی‌ترین دوره خشکسالی شدید و بسیار شدید ۱۰ ماه طول کشیده، در حالی که شدیدترین خشکسالی با شدت ۰/۸۶، مدت ۸ ماه به طول انجامیده است.

جدول ۲- شدت و مدت خشکسالی با استفاده از آزمون ران با در نظر گرفتن آستانه کمتر از ۱- (خشکسالی شدید و بسیار شدید)

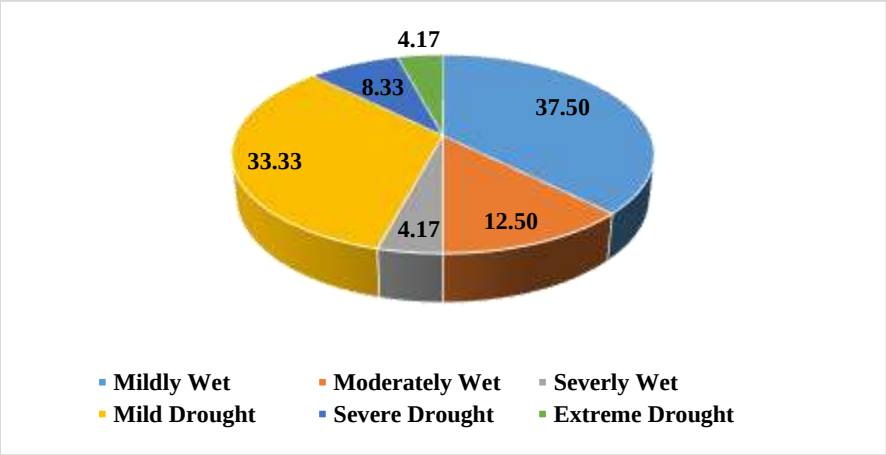
تاریخ خشکسالی	شدت	مدت
می ۱۹۸۹- آگوست ۱۹۸۹	۰/۳۱	۴
می ۱۹۹۹- سپتامبر ۱۹۹۹	۰/۱۸	۵

مارس ۲۰۰۱- جولای ۲۰۰۱	۰/۶۲	۵
آوریل ۲۰۰۸- آگوست ۲۰۰۸	۰/۷۵	۵
فوریه ۲۰۰۹- ژوئن ۲۰۰۹	۰/۷	۵
سپتامبر ۲۰۱۰- آوریل ۲۰۱۱	۰/۴۹	۸
آوریل ۲۰۱۴- سپتامبر ۲۰۱۴	۰/۶	۶
فوریه ۲۰۱۵- اکتبر ۲۰۱۵	۰/۲۶	۹
اکتبر ۲۰۱۶- ژانویه ۲۰۱۷	۰/۶۲	۴
آگوست ۲۰۱۷- مارس ۲۰۱۸	**۰/۸۶**	**۸**
نوامبر ۲۰۱۹- فوریه ۲۰۲۰	۰/۳۸	۴
نوامبر ۲۰۲۰- آگوست ۲۰۲۱	**۰/۵۲**	**۱۰**
اکتبر ۲۰۲۱- جولای ۲۰۲۲	**۰/۶۲**	**۱۰**

جدول ۳- شدت و مدت خشکسالی با استفاده از آزمون ران با در نظر گرفتن آستانه کمتر از صفر (خشکسالی)

تاریخ خشکسالی	شدت	مدت
آوریل ۱۹۸۹- اکتبر ۱۹۸۹	۰/۹۸	۷
آوریل ۱۹۹۰-دسامبر ۱۹۹۰	۰/۳۶	۹
می ۱۹۹۱-آوریل ۱۹۹۲	۰/۴۸	۱۲
ژانویه ۱۹۹۹- می ۲۰۰۲	۰/۸۱	۴۱
می ۲۰۰۵- مارس ۲۰۰۶	۰/۵۲	۱۱
آگوست ۲۰۰۷- آگوست ۲۰۰۸	۱/۰۷	۱۳
دسامبر ۲۰۰۸- اکتبر ۲۰۰۹	۱/۲۴	۱۱
آوریل ۲۰۱۰- آوریل ۲۰۱۱	۱/۰۸	۱۳
آگوست ۲۰۱۱- آگوست ۲۰۱۲	۰/۷۱	۱۳
اکتبر ۲۰۱۲- مارس ۲۰۱۷	**۰/۹۳**	**۵۴**
می ۲۰۱۷- مارس ۲۰۱۹	۱/۲	۲۳
اکتبر ۲۰۱۹- آگوست ۲۰۲۰	۰/۷۷	۱۱
اکتبر ۲۰۲۰- سپتامبر ۲۰۲۲	**۱/۴۴**	**۲۴**

نمودار دایره‌ای توزیع طبقات مختلف خشکسالی در مقیاس سالانه ترسیم شد. با توجه به نمودار مشخص می‌شود که طبقه‌ای که بیشترین درصد وقوع را دارد ترسالی ملایم با ۳۷/۵ درصد می‌باشد. بعد از این طبقه، دسته خشکسالی ملایم با ۳۳/۳ درصد وقوع در رتبه دوم قرار دارد. درصد وقوع ترسالی شدید و خشکسالی شدید یکسان (۴/۱۷ درصد) و کمترین مقدار را در بین طبقات مختلف دارد.



نمودار ۳- توزیع درصد طبقات مختلف خشکسالی در رودخانه مردق چای

نتیجه‌گیری

در این مطالعه جهت بررسی خشکسالی هیدرولوژیکی رودخانه مردق‌چای، مقادیر شاخص SDI در یک دوره آماری ۴۸ ساله و مقیاس زمانی سه ماهه و سالانه محاسبه شد. درصد هر یک از طبقات خشکسالی در مقیاس سالانه محاسبه شد و نتایج نشان داد طبقات ترسالی ملایم و خشکسالی ملایم به ترتیب بالاترین درصد وقوع را دارا می‌باشند. همگنی سری زمانی سه ماهه به دست آمده با استفاده از چهار آزمون مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج همه آزمون‌ها با یکدیگر همخوانی داشت. براساس نتایج آزمون‌های همگنی، سری زمانی مقادیر خشکسالی ناهمگن بوده و بعد از سال ۱۹۹۷ با کاهش شدیدی مواجه گردیده است. همچنین با استفاده از تئوری ران شدت و مدت خشکسالی با در نظر گرفتن دو مقدار بحرانی ۰ و ۱- محاسبه و نتایج نشان داد شدیدترین خشکسالی شدید یا بسیار شدید در یک دوره ۸ ماهه از آگوست ۲۰۱۷ تا مارس ۲۰۱۸ و به‌مقدار ۰/۸۶ اتفاق افتاده است. طولانی‌ترین خشکسالی شدید یا بسیار شدید نیز ۱۰ ماهه بوده است.

منابع

امینی، حامد , اسمعلی عوری، اباذر ، مصطفی‌زاده, رئوف , شرری, معراج و ذبیحی, محسن . (۱۳۹۸). ارزیابی خشک‌سالی آب‌شناختی و تحلیل ویژگی‌های آن با شاخص جریان رودخانه‌یی (SDI) در ایستگاه‌های آب سنجی استان اردبیل. *پژوهش های آبخیزداری*, *32*(3), 21-36. doi: 10.22092/wmej.2019.124502.1178

جوان، خدیجه . (۱۳۹۹). بررسی روند خشکسالی هیدرولوژیک در سطح حوضه آبریز دریاچه ارومیه.

هیدروژئومورفولوژی, 7(25), 138-119. doi: 10.22034/hyd.2021.43326.1562

یاراحمدی, جمشید و رستمی زاد, قباد . (۱۳۹۸). تحلیل خشکسالی های هیدرولوژیک در شمال دریاچه ی ارومیه .هیدروژئومورفولوژی, 6(19), 79-100.

Akbas, E., Çelik, R., Esit, M. *et al*. Climate change impacts on hydrological and meteorological variables in Diyarbakır Province: trend analysis and machine learning-based drought forecasting. *Theor Appl Climatol* **156**, 295 (2025). https://doi.org/10.1007/s00704-025-05533-9

Alemu, M.M., Zaitchik, B.F., Enku, T. *et al*. Spatiotemporal analysis of drought characteristics across multiple timescales in the upper Blue Nile basin, Ethiopia. *Theor Appl Climatol* **156**, 435 (2025). https://doi.org/10.1007/s00704-025-05667-w

Cook, B.I., Mankin, J.S. & Anchukaitis, K.J. Climate Change and Drought: From Past to Future. *Curr Clim Change Rep* **4**, 164–179 (2018). https://doi.org/10.1007/s40641-018-0093-2

Deger, I.H., Yuce, M.I. & Esit, M. Spatio-Temporal Variability of Hydrological Drought and Trends: Implementation of Classical and Innovative Approaches. *Water Resour Manage* (2025). https://doi.org/10.1007/s11269-025-04229-z

Laimighofer, J., Laaha, G. (2022) How standard are standardized drought indices? Uncertainty components for the SPI & SPEI case, Journal of Hydrology, Volume 613,

Mahmoudi, P., Rigi, A. & Miri Kamak, M. A comparative study of precipitation-based drought indices with the aim of selecting the best index for drought monitoring in Iran. *Theor Appl Climatol* 137, 3123–3138 (2019). https://doi.org/10.1007/s00704-019-02778-z

Mukherjee, S., Mishra, A. & Trenberth, K.E. Climate Change and Drought: a Perspective on Drought Indices. *Curr Clim Change Rep* **4**, 145–163 (2018). https://doi.org/10.1007/s40641-018-0098-x

Simsek, O. Hydrological drought analysis of Mediterranean basins, Turkey. *Arab J Geosci* **14**, 2136 (2021). https://doi.org/10.1007/s12517-021-08501-5

Topçu, E., Seçkin, N. & Haktanır, N.A. Drought analyses of Eastern Mediterranean, Seyhan, Ceyhan, and Asi Basins by using aggregate drought index (ADI). *Theor Appl Climatol* **147**, 909–924 (2022). https://doi.org/10.1007/s00704-021-03873-w.

Yihdego, Y., Vaheddoost, B. & Al-Weshah, R.A. Drought indices and indicators revisited. *Arab J Geosci* 12, 69 (2019). https://doi.org/10.1007/s12517-019-4237-z

Yuce, M.I., Deger, I.H. & Esit, M. Hydrological drought analysis of Yeşilırmak Basin of Turkey by streamflow drought index (SDI) and innovative trend analysis (ITA). *Theor Appl Climatol* **153**, 1439–1462 (2023). https://doi.org/10.1007/s00704-023-04545-7

Zerouali, B., Chettih, M., Abda, Z. *et al*. Spatiotemporal meteorological drought assessment in a humid Mediterranean region: case study of the Oued Sebaou basin (northern central Algeria). *Nat Hazards* 108, 689–709 (2021). https://doi.org/10.1007/s11069-021-04701-0.

Hydrological drought variability analysis in the Mordagh Chay River

Marziyeh Esmaeilpour[1], Ahmad Reza Ghasemi[2]

Associate Professor, Department of Geography and Urban Planning,University of Maragheh
Associate Professor, Department of Water Engineering, University of Shahrekord

* Corresponding author: m.esmaeilpour@maragheh.ac.ir

ABSTRACT

Drought is a natural disaster with significant impacts on the environment, water resources, sustainability, energy, and the economy. It is typically categorized into four types: meteorological, hydrological, agricultural, and socio-economic. Hydrological drought specifically refers to the reduction and depletion of surface and groundwater resources due to prolonged periods of insufficient rainfall. This study investigates the hydrological drought conditions of the Mordagh Chay River over a long-term period of 48 years, using the Streamflow Drought Index (SDI) and discharge data from the Qeshlaq Amir station. The analysis was conducted at both 3-month and annual time scales.To assess the homogeneity of the drought time series, four tests were applied. In addition, drought severity and duration were analyzed using the Run theory. The findings reveal a decline in SDI values in recent years compared to earlier periods. Homogeneity testing results indicated that the time series is heterogeneous, with a clear change point identified in 1997. The average SDI value before and after this point differs significantly—0.65 prior to 1997 and -0.61 thereafter. Based on a threshold SDI value of 0, the longest drought period lasted 54 months, with an severity of 0.93. The most severe drought, however, had an intensity of 1.44 and persisted for 24 months. Severe or very severe droughts (SDI < -1) were generally shorter in duration, with the longest lasting just 10 months. An analysis of drought class frequency on an annual scale showed that "mild wetness" occurred most frequently, while "severe wetness" and "ectremely drought" were the least common over the study period.

Keywords: Hydrological drought, change point, SDI, Mordagh Chay river

سومین کنفرانس ملی آب و هواشناسی ایران (با محوریت تغییر اقلیم)
The 3rd National Conference on Climatology of Iran (Focusing on Climate Change)
ارومیه ۱۶ مهر ۱۴۰۴

پیش بینی میزان تغییرات متغییرهای اقلیمی در محدوده مطالعاتی حاجی عرب

سمانه احسانی کلی کند[۱]، هادی رمضانی اعتدالی [۲]

۱- دانشجو دکتری گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین
۲- استاد گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین

Ehsani.smn@gmail.com

چکیده

پیش‌بینی دقیق دبی رودخانه‌ها نقش مهمی در مدیریت منابع آب و کاهش اثرات سیلاب دارد. در این پژوهش، با هدف بهبود دقت پیش‌بینی، ترکیبی از مدل تغییر اقلیم لارس (LARS) و شبکه عصبی مصنوعی (ANN) در نرم‌افزار OriginLab به کار گرفته شد. داده‌های اقلیمی روزانه شامل بارش، دمای حداقل و حداکثر و ساعات آفتابی در ایستگاه سینوپتیک بوئین‌زهرا طی سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۲۴ جمع‌آوری گردید. سپس با استفاده از مدل لارس و سناریوهای اقلیمی مختلف، داده‌های مصنوعی تولید و پس از رتبه‌بندی، مدل CMCC_ESM2 به عنوان دقیق‌ترین مدل انتخاب شد. داده‌های خروجی این مدل به عنوان ورودی به شبکه عصبی معرفی شد و پس از نرمال‌سازی داده‌ها، شبکه با معماری بهینه (دو لایه پنهان با ۸ و ۵ نورون) آموزش داده شد. نتایج نشان داد مدل توانسته است روند رابطه بارش–دبی را شبیه‌سازی کند، هرچند بهبود در ساختار شبکه ضروری است. یافته‌ها بیانگر افزایش دماهای حداقل و حداکثر و تغییرپذیری بارش سالانه در حوضه آبریز حاجی‌عرب در دوره آتی است. در مجموع، ترکیب مدل لارس و شبکه عصبی رویکردی کارآمد برای پیش‌بینی دبی رودخانه ارائه می‌دهد و می‌تواند مبنای توسعه مدل‌های پیشرفته‌تر در آینده باشد

کلید واژه‌ها : تغییراقلیم، شبکه‌های عصبی مصنوعی، مدلسازی غیرخطی،مدیریت منابع آب.

۱-مقدمه

پیش بینی دقیق دبی رودخانه به عنوان یکی از چالش های اساسی در مدیریت منابع آب، همواره مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است . در این راستا، تلفیق روش های کلاسیک آماری با الگوریتم های یادگیری ماشین می تواند گامی نوین در ارتقای دقت پیش بینی ها محسوب شد. این پژوهش با بهره‌گیری از قابلیت‌های پیشرفته نرم‌افزار OriginLab، به بررسی امکان سنجی ترکیب مدل لارس (LARS) با شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) به عنوان یک ابزار قدرتمند مدلسازی

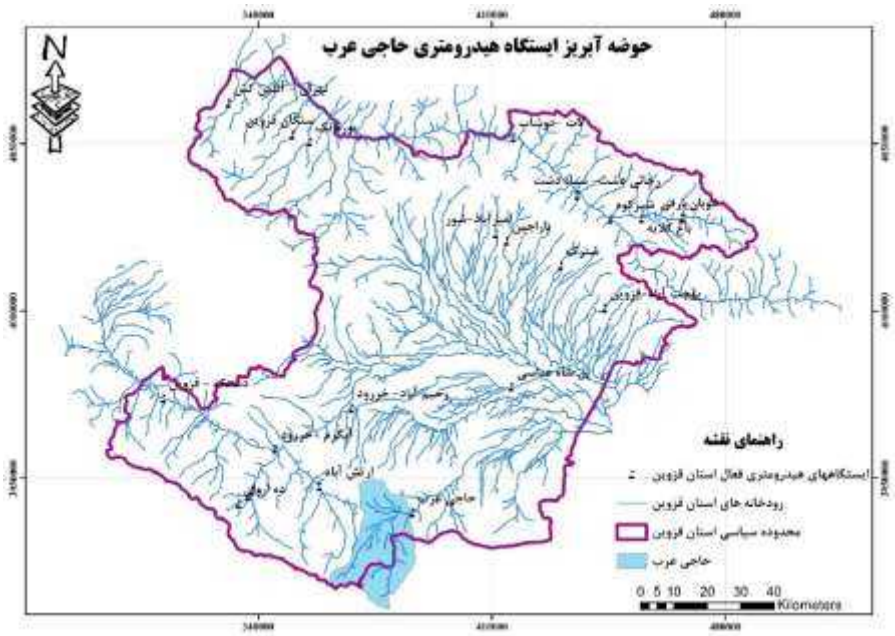
غیرخطی می‌پردازد.(مهرانی،۱۴۰۱) رویکرد ترکیبی پیشنهادی از یک سو با استفاده از مدل لارس، پارامترهای هواشناسی آینده را پیش بینی و از سوی دیگر با به کارگیری شبکه عصبی مصنوعی، قادر به مدلسازی روابط پیچیده و غیرخطی بین این متغیرها خواهد بود.

همچنین استفاده از محیط یکپارچه OriginLab این امکان را فراهم می‌آورد که کلیه مراحل پیش‌پردازش داده‌ها، انتخاب ویژگی، آموزش مدل و ارزیابی نتایج در یک پلتفرم جامع انجام پذیرد. (بیات‌ورکشی،۱۴۰۲)

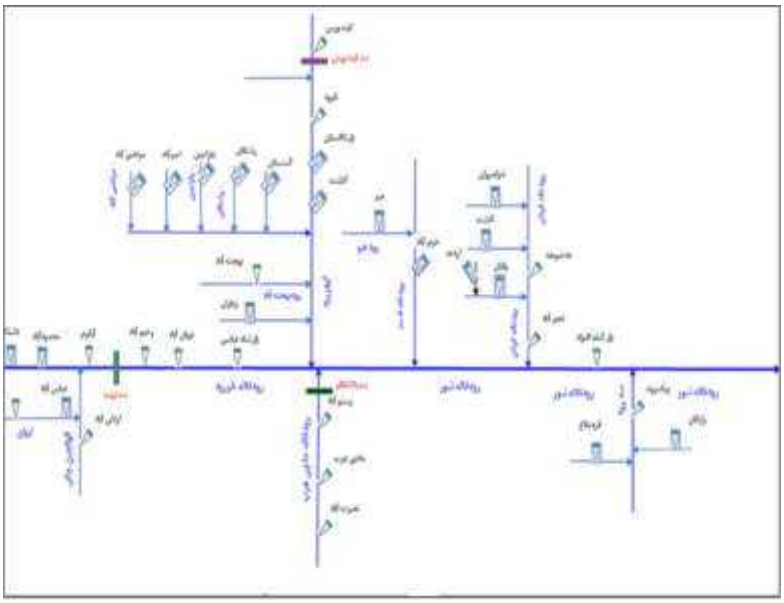
۲-مواد و روش‌ها

۲-۱-محدوده مورد مطالعه

حوضه ابریز حاجی عرب یکی از زیرحوضه های، حوضه آبریز قزوین است که رودخانه حاجی عرب بر روی آن قرار دارد. رودخانه حاجی عرب با مختصات جغرافیایی ۴۹ درجه ۵۱ دقیقه ۵۸ ثانیه طول جغرافیایی و ۳۵ درجه و ۳۹ دقیقه ۴۸ ثانیه عرض جغرافیای در بخش جنوبی دشت قزین و در محدوده شهرستان بوئین زهرا جریان دارد. این رودخانه با دو شاخه اصلی به نام نصرت آباد و چناقچی از ارتفاعات کوه های مرکزی به نام ارتفاعات که زیارت بلغی به ارتفاع ۲۶۰۰ متر سرچشمه گرفته و با روند جنوب به شمال از روستاهایی چن یرجان، رستم آباد رودک عبور می کند و وارد منطقه شهری سگزآباد در غرب شهر بوئین زهرا می شود. رودخانه در طول مسیر خود اراضی کشاورزی و باغی اطراف را سیراب نموده و وارد دشت قزوین می شود و در پاان به منطقه شوره زار مرکزی دشت قزوین می ریزد. در برخی سال ها طغیان این رودخانه سیلابی شدن آن موجب تهدید اراضی کشاورزی و مسکنی می شود. حوضه این رودخانه با مساحت کل ۱۳۰.۶ کیلومترمربع دارای آب و هوای نیمه خشک بوده و میزان متوسط بارندگی در آن ۳۰۰ میلیمتر در سال است. میانگین دبی سالانه جریان در رودخانه حاجی عرب ۰.۶۲ مترمکعب بر ثانیه است. از نقطه نظر تقسیمات زمین شناختی ایران، این منطقه بخشی از نوار ماگمایی ارومیه-بزمان در پهنه ایران مرکزی است(غلامی،۱۴۰۳). گدازه های ریولیتی و سنگ های آذرآوری اندزیتی سازندهای غالب منطقه مورد مطالعه را تشکیل می دهد. شکل (۱) نقشه حوضه آبریز را نشان می دهد. همچنین در شکل (۲) نقشه شماتیک سد و ایستگاه های هیدرومتری نشان داده شده است..



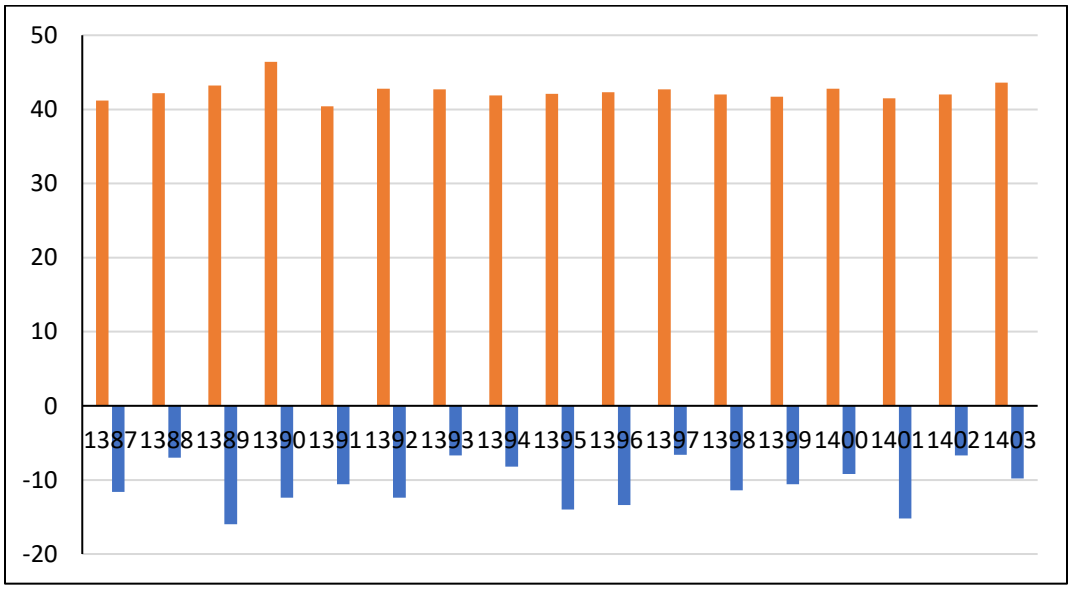
شکل ۱- موقعیت حوضه آبریز حاجی عرب در استان قزوین



شکل ۲- نقشه شماتیک موقعیت سد و ایستگاه های هیدرومتری محدوده مطالعاتی قزوین

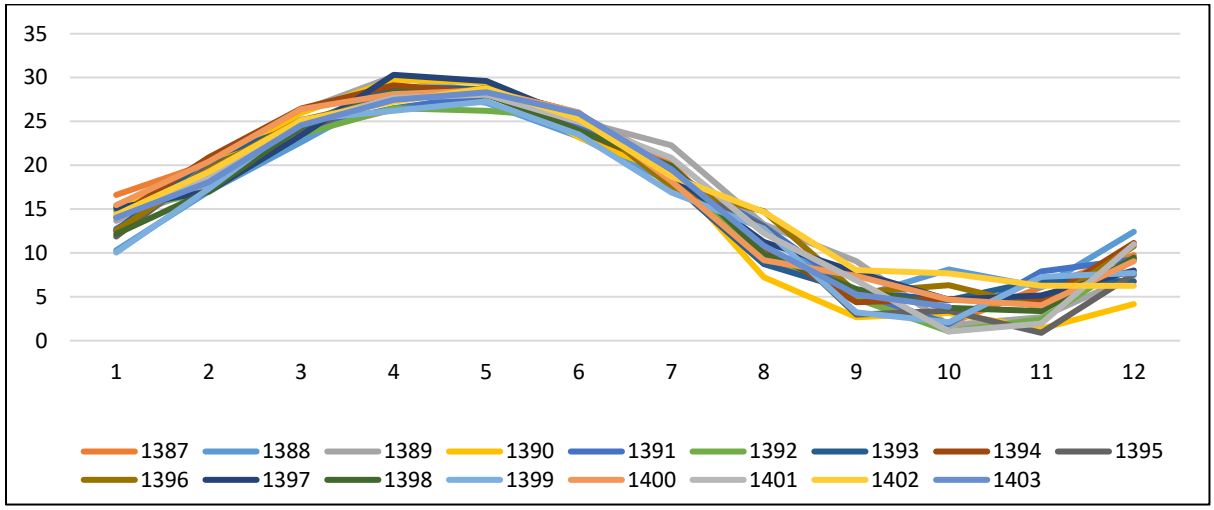
۲-۲-هیدرولوژی و هواشناسی

برای انجام این پژوهش ابتدا داده های اقلیمی (۲۰۰۸-۲۰۲۴) مورد نیاز از اداره هواشناسی و آب منطقه ای استان قزوین جمع اوری شد. مهترین داده‌های اقلیمی مورد نیاز شامل بارش، دمای حداکثر و حداقل، ساعت افتابی که جهت مدل سازی و نیز پیش بینی اقلیمی در ایستگاه سینوپتیک بوئین زهرا و میزان دبی در ایستگاه هیدرومتری حاجی عرب استفاده شده است. در شکل (۳) تغییرات دمایی در بازه زمانی ۲۰۰۸ تا ۲۰۲۴ (۱۳۸۷-۱۴۰۳) نشان داده شده است.



شکل ۳- نمودار تغییرات دمایی (حداکثر ماکزیمم، حداقل مینیمم و میانگین) در سال های مختلف (سانتی‌گراد)

همانطور که در شکل ۳ نمایش داده شده است، حداکثر دمایی که ممکن است در یک سال در این منطقه رخ دهد ۴۶.۴ درجه سانتیگراد و حداقل دمایی که ممکن است در یک سال در این منطقه رخ دهد ۱۶- درجه سانتی‌گراد است. در ادامه نمودار تغییرات دمای میانگین برای بازه زمانی ۲۰۰۸ تا ۲۰۲۴ به تفیک سال‌های مختلف رسم گردید. همانطور که در شکل (۴) مشاهده می‌گردد به طور میانگین بیشترین دما ماهانه در تیر ماه و کمترین در دی ماه می‌باشد.



شکل ۴- نمودار تغییرات دمای میانگین در ماه های مختلف به تفکیک سال

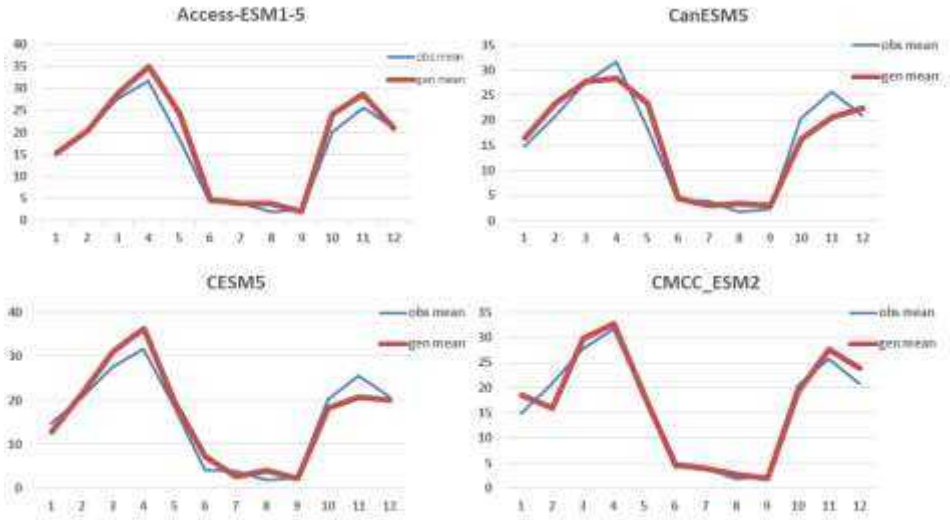
۲-۳-پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی

در تحقیق حاضر جهت پیش بینی میزان تغییرات متغییرهای اقلیمی در محدوده مطالعاتی حاجی عرب در آینده از نسخه هشتم مدل لارس استفاده شد. ورودی‌های مدل لارس چهار پارامتر هواشناسی دماهای کمینه و بیشینه، بارش و ساعت افتابی بود. بدین منظور داده‌های هواشناسی روزانه شهرستان بوئین زهرا از سال ۲۰۰۸ تا سال ۲۰۲۴ از داده‌های سازمان هواشناسی کشور تهیه گردید. از آنجایی که ساعات آفتابی روزانه در بسیاری از روزها ثبت نشده است، لذا برای دستیابی به مقادیر این متغییر با در اختیار داشتن پارامترهای دیگر اقدام به شبیه سازی با استفاده از رابطه جنگل تصادفی شد. فرآیند تولید داده‌های مصنوعی و پیش بینی با الگوی لارس در سه مرحله کالیبره کردن الگو، ارزیابی الگو، تولید داده های مصنوعی انجام می‌شود. (نصیری صالح،۱۳۹۴)

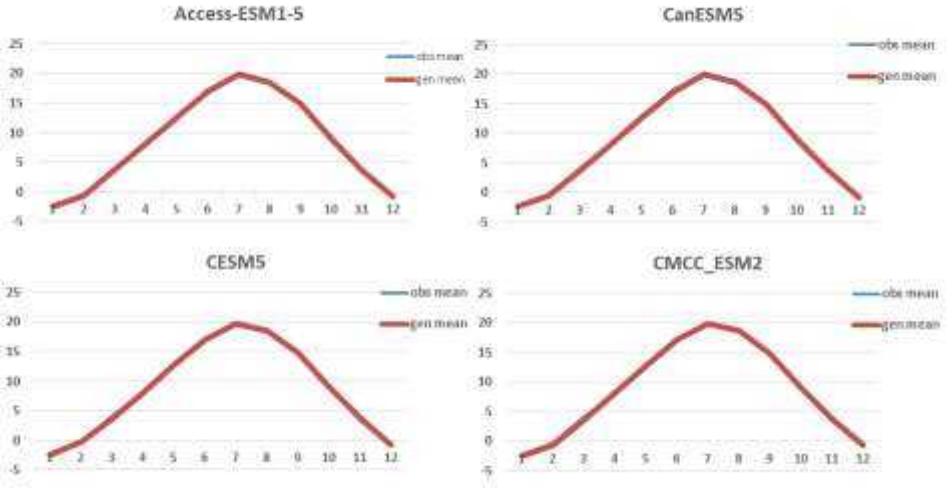
بدین منظور پس از آماده کردن فایل‌های ورودی و صحت سنجی داده‌ها، کالیبره و ارزیابی مدل با مقایسه‌ی داده‌های هواشناسی ثبت شده با داده‌های مصنوعی هواشناسی از طریق شاخص‌های آماری انجام شد.

برای انتخاب بهترین الگوی پیش بینی از چند الگو Access-ESM1-5، BCC_CSM2_MR، CanESM5، CESM2 و CMCC_ESM2 استفاده شد. دو مدل BCC_CSM2_MR و CanESM5 شباهت زیادی داشتند لذا در ادامه فقط از مدل CanESM5 استفاده شده است.

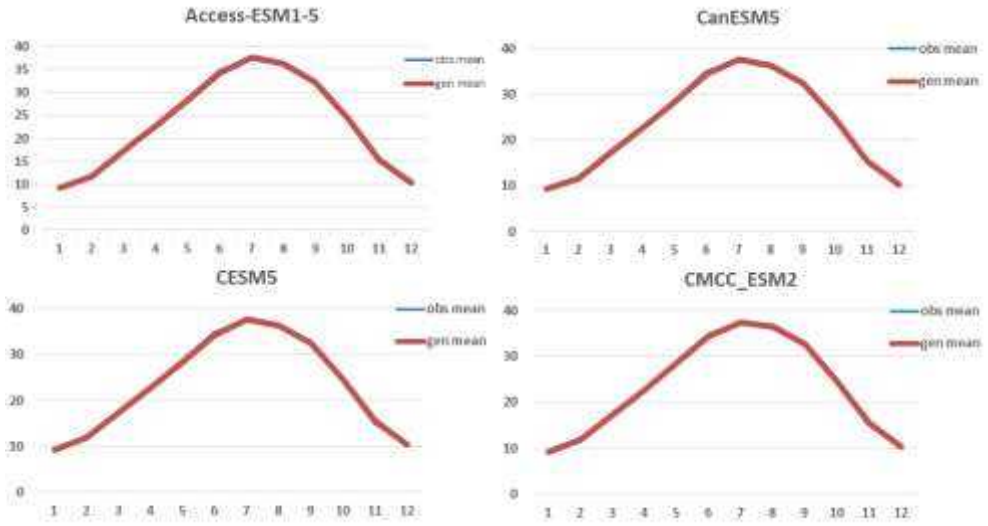
در پژوهش حاضر با استفاده از مدل های مذکور پیش بینی متغیرهای اقلیمی برای دوره آینده نزدیک انجام شد. درنهایت نتایج حاصل از مدل برای متغییرهای دمای کمینه، بیشینه و بارش به نرم افزار اکسل انتقال داده شد پس از رسم نمودارهای مورد نظر بهترین الگو در ایستگاه بوئین زهرا بررسی شد. شکل ۵ تا شکل (۷) مقایسه میانگین‌ها در داده‌های مشاهده شده و داده‌های تولید شده پارامترهای بارش ماهانه، دمای مینیمم ماهانه، دمای ماکزیمم ماهانه مقایسه شده است.



شکل ۵- مقایسه میانگین بارش داده های مشاهداتی و تولید شده در ماه های مختلف به تفکیک مدلها مختلف

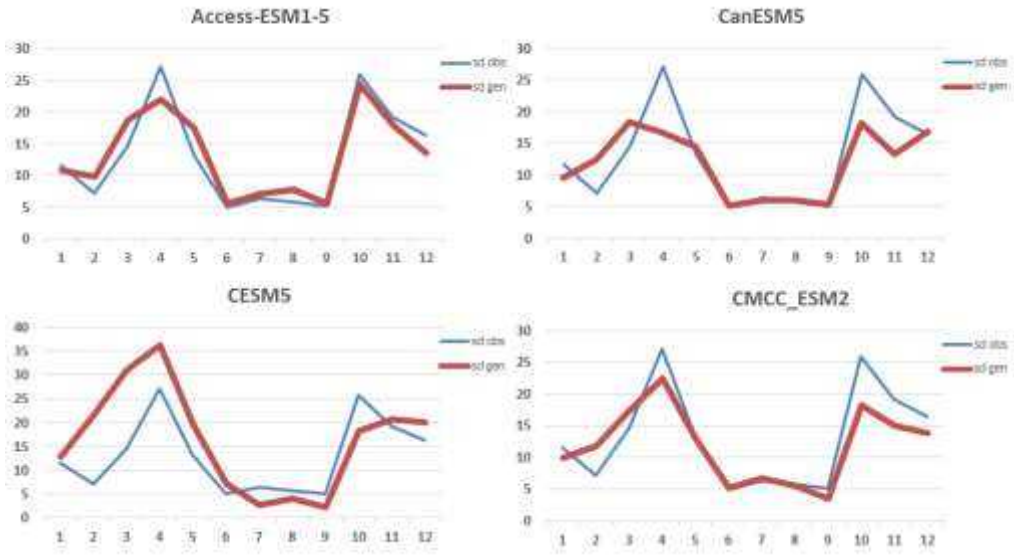


شکل ۶- مقایسه میانگین دمای میینیمم داده های مشاهداتی و تولید شده در ماه های مختلف به تفکیک مدلها مختلف

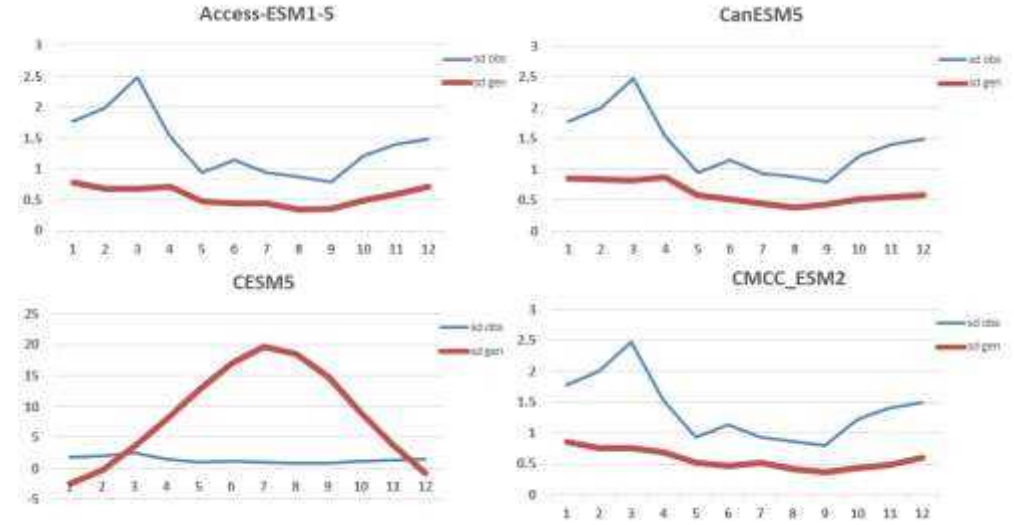


شکل ۷- مقایسه میانگین دمای ماکزیمم داده های مشاهداتی و تولید شده در ماه های مختلف به تفکیک مدلها مختلف

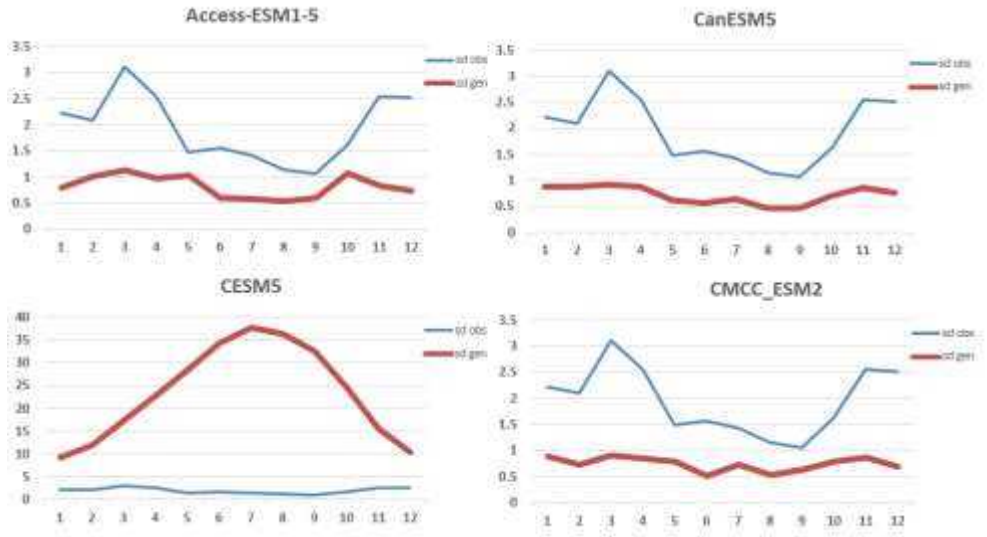
ضریب همبستگی و رگرسیون میانگین بارش ماهانه در مدل Access-ESM1-5 برابر با ۰.۹۹ و ۰.۹۷ در مدل CanESM5 برابر با ۰.۹۶ و ۰.۹۲ و در مدل CESM2 برابر با ۰.۹۷ و ۰.۹۴ و در مدل CMCC_ESM2 برابر با ۰.۹۸ و ۰.۹۶ است. ضریب همبستگی رگرسیون در میانگین دمای ماکزیمم ماهانه و مینیمم ماهانه در تمام مدل ها برابر با ۱ است. شکل (۸) تا شکل(۱۰) ، انحراف معیارها در داده های مشاهده شده و داده های تولید شده پارامترهای بارش ماهانه، دمای مینیمم ماهانه، دمای ماکزیمم ماهانه مقایسه شده است.



شکل ۸- مقایسه انحراف معیار بارش ماهانه در داده های مشاهداتی و تولید شده در ماه های مختلف به تفکیک مدلها مختلف



شکل ۹- مقایسه انحراف معیار دمای مینیمم ماهانه در داده های مشاهداتی و تولید شده در ماه های مختلف به تفکیک مدلها مختلف



شکل ۱۰- مقایسه انحراف معیار دمای ماکزیمم ماهانه در داده های مشاهداتی و تولید شده در ماه های مختلف به تفکیک مدلها مختلف

ضریب همبستگی و رگرسیون انحراف معیار بارش ماهانه در مدل Access-ESM1-5 برابر با ۰.۹۴ و ۰.۸۹ در مدل CanESM5 برابر با ۰.۸۳ و ۰.۶۸ و در مدل CESM2 برابر با ۰.۹۰ و ۰.۸۱ و در مدل CMCC_ESM2 برابر با ۰.۹۲ و ۰.۸۵ است. ضریب همبستگی و رگرسیون انحراف معیار دمای مینیمم ماهانه در مدل Access-ESM1-5 برابر با ۰.۸۱ و ۰.۶۵ در مدل CanESM5 برابر با ۰.۸۴ و ۰.۷۰ و در مدل CESM2 برابر با ۰.۸۶ و ۰.۷۳ و در مدل CMCC_ESM2 برابر با ۰.۸۴ و ۰.۷۰ است. ضریب همبستگی و رگرسیون انحراف معیار دمای ماکزیمم ماهانه در مدل Access-ESM1-5 برابر با ۰.۵۸ و ۰.۳۳ در مدل CanESM5 برابر با ۰.۹۰ و ۰.۸۲ و در مدل CESM2 برابر با ۰.۷۰ و ۰.۴۹ و در مدل CMCC_ESM2 برابر با ۰.۷۲ و ۰.۵۲ است. برای تعیین بهترین مدل از روش رتبه بندی در هر پارامتر استفاده میکنیم. در این روش هر مدلی که ضریب همبستگی هر پارامتر آن بالاتر باشد، رتبه پایین تری می گیرد و در نهایت مدلی که رتبه پایینتری دارد برای ادامه کار انتخاب کرده واز آن برای پیشبینی شرایط دبی رودخانه حاجی عرب در آینده استفاده خواهد شد. در جدول (۱) رتبطه بندی مدل های مختلف نشان داده شده است.

جدول ۱- رتبه بندی مدل های مختلف به تفکیک پارامتر

نام مدل GCM	رتبه مقایسه میانگین بارش ماهانه	رتبه مقایسه میانگین دمای مینیمم ماهانه	رتبه مقایسه میانگین دمای ماکزیمم ماهانه	رتبه مقایسه انحراف معیار بارش ماهانه	رتبه مقایسه انحراف معیار دمای مینیمم ماهانه	رتبه مقایسه انحراف معیار دمای ماکزیمم ماهانه	جمع رتبه
Access-ESM1-5	1	1	1	1	3	4	11
CanESM5	4	1	1	4	2	1	13
CESM2	3	1	1	3	1	3	12
CMCC_ESM2	2	1	1	2	2	2	10

براساس جدول ۱ مدل CMCC_ESM2 کمترین رتبه را داد و برای ادامه کار از داده های مصنوعی این مدل استفاده شده است.

۳-نتایج حاصل از خروجی مدل CMCC_ESM2

طی سال های اخیر دماهای کمینه و بیشینه حوضه آبریز افزایش یافته است. جدول(۲) تغییرات دمای ماکزیمم و مینیمم و میزان باران سالانه در این حووضه را نشان میدهد. داده های حاصل از شبیه سازی نشان می دهد که در سال های آتی دماهای کمینه بیشینه در حوضه آریز حاجی عرب نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت. همانطور که در شکل (۳) نشان داده شده است در بعضی از سال های دوره پایه حداکثر دمای سالانه ۴۱ درجه ثبت شده است در حالیکه در سال های آتی، دما افزایش خواهد داشت.

جدول ۲- تغییرات دمای ماکزیمم و مینیمم و میزان باران سالانه در سال های آتی

شماره سال	کمترین دمای مینیمم	بیشترین دمای ماکزیمم	بارش سالانه
1	-10	42.6	181.6
2	-11.6	42.2	256.2
3	-14.8	43.5	143.5
4	-10.1	42.5	262.6
5	-14.2	43.4	156
6	-12.8	43.6	243.3
7	-10.3	43.4	225.5
8	-12.8	42.7	367.8
9	-10.4	42.9	260.4
10	-13.9	43.6	334.8

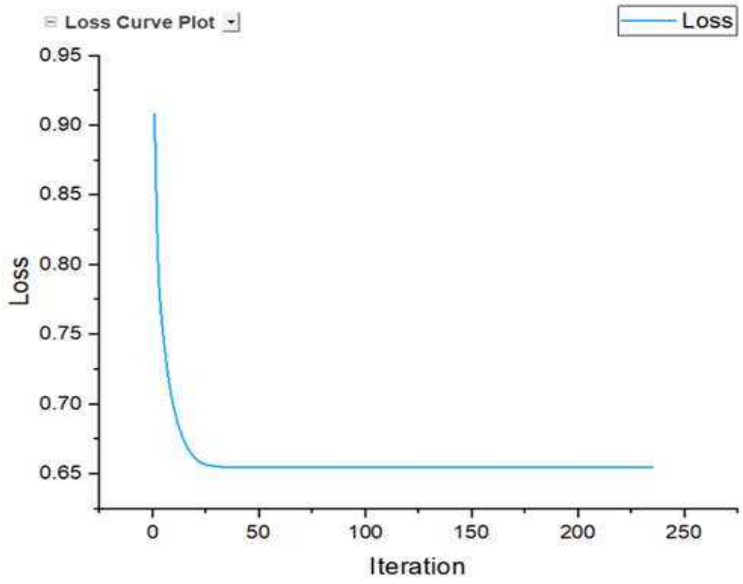
231	42.1	-10.4	11
226.7	43.5	-14.8	12
104.7	43.4	-14.8	13
214.9	42	-14.8	14
247.7	42.2	-12.7	15
203.6	43.6	-7.2	16
145.4	42.8	-14.7	17
238.2	42.3	-13.1	18
227.1	42.3	-14.2	19
214.1	43.3	-14.3	20

۳-۱-پیش بینی دبی رودخانه با استفاده از شبکه عصبی در محیط OriginLab

شبیه سازی جریان رودخانه به منظور آگاهی از آورد رودخانه در دوره های زمانی آینده از مسائل مهم کاربردی در مدیریت منابع آب می باشد. در این پژوهش با استفاده از نرم افزار OriginLab و پیاده سازی شبکه عصبی برای پیش بینی استفاده شده است.

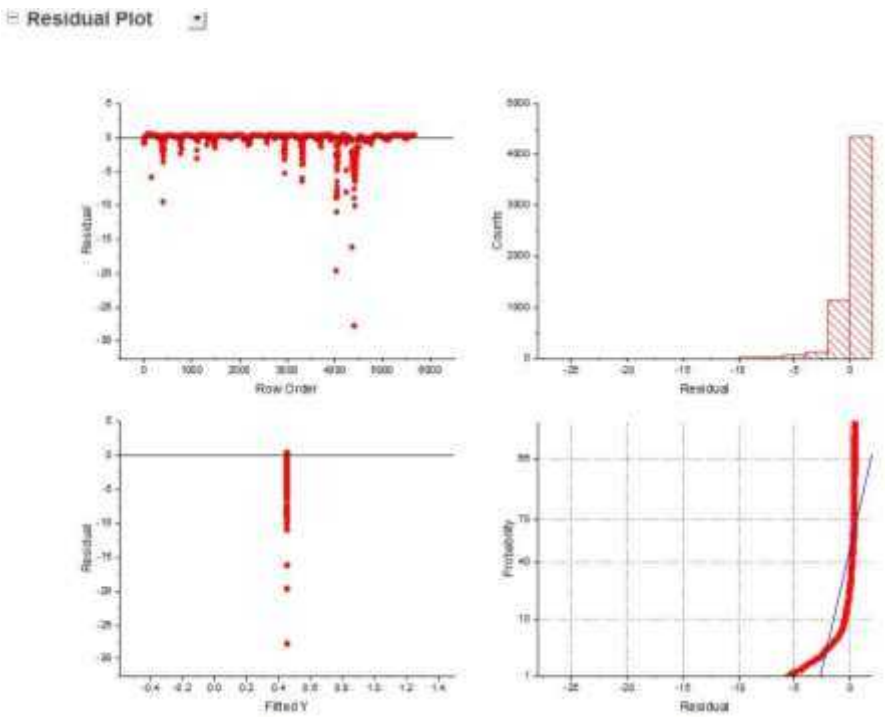
نرم افزار OriginLab یک نرم افزار تحلیلی است که داده های پیچیده را با دقت بالا پردازش و تحلیل می کند. برای پیش بینی دبی با استفاده از شبکه عصبی بسته ANN دانلود و به محیط نرم افزار اضافه شد. در ادامه برای اجرای مدل شبکه عصبی ابتدا داده های پایه را معرفی میکنیم و در پنجره دیگر داده های خروجی و پیش بینی شده مدل CMCC_ESM2 را معرفی میکنیم. (شیرازی،۱۴۰۲)

بعد از نرمال سازی داده ها ، مدل ANN اجرا شد. مدل در ۲۳۵ بار تکرار اموزش دیده است. شکل ۱۱نمودار منحنی خطا (Loss curve) را نشان می دهد که به آن نمودار منحنی یادگیری نیز گفته می شود. مقادیر خطا از ۰.۹۵ به تدریج به ۰.۶۵ کاهش یافته است که نشان دهنده این است که مدل در حال یادگیری است. خطای اولیه مدل (حدود ۰.۹۵) است که نشان دهنده حدس های تصادفی اولیه مدل است و کاهش پایدار خطا تا ۰.۷۵ نشان دهنده یادگیری موثر مدل است. این نمدار نشان می دهد مدل شما روند یادگیری مناسبی داشته است، اما هنوز نتیجه مطلوب حاصل نشده است.



شکل ۱۱- نمودار منحنی خطا داده های پایه ایستگاه هیدرومتری حاجی عرب

به منظور ارزیابی عملکرد مدل در شبیه سازی رابطه بارش و دبی ، نمودار پراکندگی باقی مانده ها مطابق شکل(۱۲) ترسیم گردید. همنطور که مشاهده می‌شود مدل تا حدی رابطه بین بارش دبی را یاد گرفته است. اما همچنان نیاز به تنظیم معماری پارامترهای شبکه عصبی دارد.



شکل ۱۲- ارزیابی عملکرد مدل شبکه عصبی در شبیه سازی رابطه بارش -دبی

۴-نتیجه‌گیری

مدل لارس به عنوان یک مدل تغییر اقلیم استفاده شد و این مدل موفق به پیش بینی پارامترهای دمای ماکزیم، مینیمم و بارش و تشعشع در آینده کوتاه مدت شد. سپس داده های خروجی از لارس به عنوان ورودی به ANN با معماری بهینه سازی شده (۲ لایه پنهان، ۸ و ۵ نورون) طراحی شد. تابع فعال سازی ReLU در لایه های میانی نسبتا بهتر عمل کرد. منحنی یادگیری نشان دهنده همگرایی پایدار مدل پس از ۲۳۰ تکرار است. این پژوهش نیاز به محاسبات بیشتر و زمان بیشتری دارد. همچنین در آینده می توان جهت پیش بینی دبی از مدل های هیبریدی استفاده کرد.

منابع

۱- غلامی، ف.، اشرفی، س. م.، طالبی‌فرد، ع. (۱۴۰۳). توسعه مدل مبتنی بر یادگیری ماشین جهت پیش بینی جریان رودخانه: مطالعه موردی رودخانه دز .اولین همایش ملی هیدرولوژی و منابع آب ایران

۲- شیرازی، ف.، ظاهری، ع. ر.، پیری، ج.، دهقانی، ع. د. (۱۴۰۲). ارائه روشی مبتنی بر هیدرولیک جریان و مدل یادگیری ماشین برای پیش‌بینی دبی سیلاب رودخانه‌ها .پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز ,۱۴ ,شماره ۲۸

۳- بیات‌ورکشی، م.، طاهری‌نیا، ب.، حسینیان‌زاده، ک.، و فصیحی، ر. (۱۴۰۳). پیش‌بینی جریان رودخانه با کاربست مدل‌های هوشمند عصبی و LARS-WG (مطالعه موردی: حوضه آبریز کشکان). مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک, ۴(۳), ۲۲۵–۲۳۸

۴- مهرانی، م. (۱۴۰۱). پیش‌بینی دبی رودخانه زاینده‌رود در ایستگاه قلعه‌شاهرخ با استفاده از تکنیک‌های یادگیری عمیق . نشریه مهندسی آب۱۰(۳)

۵-نصیری صالح، ف.، افخمی، م. (۱۳۹۴). ارزیابی عملکرد مدل‌های هیدرولوژیکی توزیعی و یکپارچه در شبیه‌سازی متوسط روزانه دبی جریان در حوضه آبریز رودخانه قره‌سو اردبیل .مجله مهندسی عمران مدرس ,۱۵(۵)

واکاوی پدیده گردوغبار در غرب و جنوب غرب کشور

توفیق ثامرناصری
دانشجوی اب و هواشناسی – دانشگاه پیام نور – خوزستان – ایران
Tofigh345@gmail.com

چکیده

در سالهای اخیر فراوانی و شدت توفان های گردوخاک در مناطق غرب و جنوب غرب کشور بهشدت افزایش یافته است و امروزه خسارات ناشی از آنها بر کسی پوشیده نیست. فراوانی این توفانها در سال 1394نسبت به سال 10 ،۱۳۹۱برابر شده است. بررسی کارشناسی موضوع، ریشه یابی و تشخیص کانون های منشأ گردوخاک امری لازم و ضروری است. توفانهای گردوخاک غرب و جنوب غرب کشور عمدتاً در استان خوزستان اتفاق میافتند. این قسمت از کشور جزء حوضه آبریز داخلی خلیج فارس و دریای عمان و حوضه آبریز بزرگ و برون مرزی اروندرود (شطالعرب) میباشد که بین کشورهای ترکیه، عراق، سوریه، ایران و عربستان مشترک میباشد. حوضه آبریز اروندرود (شطالعرب) که از رودخانه های اصلی دجله و فرات تشکیل شده است، در سالهای اخیر بهشدت گرمتر شده است، بهطوریکه متوسط دمای آن در 15سال اخیر نسبت به متوسط بلندمدت حدود 1درجه سانتیگراد افزایش داشته و همچنین بارندگی آن نیز حدود 27درصد کاهش یافته است. این قسمت از جهان در برابر خشکسالیها و تغییرات اقلیم بسیار آسیب پذیر است. از طرفی دیگر، کنترل و مهار آب رودخانه های دجله و فرات توسط سدهای مختلف در مسیر این رودخانه ها، باعث کاهش شدید آبدهی این رودخانه ها شده است. ازجمله این طرحها، طرح گاپ ترکیه است که توسط آن آب رودخانه های دجله و فرات در سرشاخهها مهار میشود. پیشبینی میشود که پس از طرح گاپ ترکیه آب ورودی رودخانه های دجله و فرات به عراق، بهترتیب حدود 66و 47 درصد کاهش داشته باشد. در حوضه آبریز داخلی خلیج فارس و دریای

عمان نیز بارندگی در 10سال اخیر نسبت به متوسط بلندمدت حدود 18درصد و بهتبع آن آبدهی رودخانه های کارون، کرخه، جراحی و زهره به ترتیب حدود 56 ،۵۶ ،۴۹و 41درصد کاهش داشته است. با توجه به اینکه آب رودخانه های دجله، فرات، کارون، کرخه، جراحی و زهره در نهایت تغذیه کننده زیست بوم ها و تالاب های پایین‌دست خود هستند، کاهش آبدهی آنها باعث به وجود آمدن مناطق خشک در این مناطق شده که در نهایت به برخاستن توفانهای گردوخاک از این کانون ها میانجامد. بررسی آمار مربوط به توفان های گردوخاک در استان خوزستان نشان میدهد که ترکیب شیمیایی این گردوخاک ها در برخی موارد شامل فلزات سنگین با مقادیر بسیار بیشتر از حد مجاز میباشد، که برای سلامتی انسانها بسیار خطرناک هستند. همچنین آمار بیانگر آن است که در برخی از سالها، براساس شاخص خشکسالی، خشکسالی بسیار شدید در استان خوزستان حاکم بوده و بین خشکسالیها و فراوانی و شدت توفانهای گردوخاک ارتباط مستقیمی برقرار است. تحقیقات نشان میدهد که کانون های خارجی منشأ توفان های گردوخاک از: شمال غرب عراق و شرق سوریه، دو طرف رودخانه فرات تالاب ها و زمین های خشک شده جنوب عراق (بین النهرین) زمین های اطراف و شمال دریاچه تارتار در عراق زمین های غرب عراق (استان الانبار) و شرق سوریه (استان حمص) و مناطق مرزی شمال عربستان و شرق اردن همچنین کانون های داخلی و منشاء توفان های گردوخاک در غرب و جنوب غرب کشور به طور عمده در استان خوزستان واقع شده اند .

واژگان کلیدی : گردوخاک . جنوب غرب . خشک سالی

مقدمه:

توفان گردوغبار یک رویداد طبیعی است که در مناطق خشک و نیمه خشک شکل می گیرد و پیامدهای نامطلوب بسیاری را به همراه دارد. از آنجا که غالب پژوهش های انجام شده بصورت موردی است و پژوهش جامع مروری که مجموعه گسترده ای از پژوهش های موجود را مورد ارزیابی قرار داده و به نتایج کلی برسد, در منطقه جنوب غرب ایران وجود ندارد؛ لذا در این پژوهش به مرور جامع منابع موجود پرداخته شده است که شامل مروری بر مطالعات در زمینه تغییرات زمانی-فضایی, مدل سازی و آشکارسازی گردوغبار و سلامت در جنوب غرب ایران است. . بررسی سابقه مطالعات توفان گردوغبار از منابع اطلاعاتی نشان داد که بیشتر محققان (۶۱/۴۰ درصد) از روش آماری-سینوپتیکی برای مطالعه توفان های گردوغبار استفاده کردند و مهمترین شاخص هایی که در ویژگی های فیزیکی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفت, فراوانی و تراکم بود که به ترتیب ۳۴/۲۱ و ۳۴/۲۱ درصد از مطالعات را به خود اختصاص داده اند. بررسی مطالعات در مورد روش های آشکارسازی پدیده گردوغبار نشان می دهد که صرفاً استفاده از باندهای حرارتی و یا انعکاسی نمی تواند پدیده گردوغبار را با دقت بالا آشکارسازی نماید, بنابراین باید مدلی توسعه دهند که از ترکیب باندهای انعکاسی و حرارتی برای این منظور بکار رود, بعبارتی استفاده از ترکیب طیف های انعکاسی و حرارتی MODIS می تواند در تشخیص توفان های گردوغبار در منطقه مورد مطالعه نتایج بهتری ارائه دهد. بررسی ها نشان می دهد که منشا اکثر توفان ها در خارج از ایران است. همچنین در معرض قرار گرفتن به آلاینده های هوا, به ویژه هنگام رخداد گردوغبار خاورمیانه, منجر به افزایش بیش از حد بستری شدن در بیمارستان است. بطوری که در زمان پدیده گردوغبار, مراجعات بیماران ریوی به مراکز درمانی با رشد ۷۰ درصدی روبرو بوده است. مرور مطالعات شبیه سازی مسیر حرکت ذرات گردوغبار نشان می دهد که اغلب مسیرها از مناطق شمالی و مرکزی عراق و سوریه گذشته و منشاء توفان های گردوغبار, مناطق کویری و خشک شمال و مرکز عراق و سوریه هستند. نتایج بررسی ها نشان می دهد که منطقه مرزی بین سوریه و شمال غرب عراق, غرب و جنوب غرب عراق به همراه شرق و شمال شرق عربستان کانون های اصلی گردوغبار برای منطقه مورد مطالعه هستند و شرایط همدیدی همزمان با رخداد گردوغبارهای برخاسته نشان از نقش بارز سیستم های سیکلونی در رخداد و انتقال این پدیده است, چرا که همزمان با رخداد این پدیده در دوره گرم, تقویت قابل توجه سیستم کم فشار عراق بهمراه شکل گیری تراف در زاگرس سبب شکل گیری و انتقال گردوغبار به منطقه مورد مطالعه می شود.

بیان مسئله و ضرورت گزارش:

اولین واقعه توفان گردوخاک در منطقه جنوب غرب ایران و کشور عراق در بین سالهای 1363تا ۱۳۶۷ گزارش شده است (پژوهشکده هواشناسی، 1395(.با نگاهی به روند شکلگیری این پدیده مخرب میتوان

دریافت که تا سال 1380این پدیده گذرا بوده است، اما در سالهای بعد، این پدیده بهتدریج در شهرهای جنوبی و غربی کشور گسترش یافته، بهطوریکه از سال ،۱۳۸۷هجده استان کشور را فرا گرفته و آثار منفی زیادی را به سلامت انسان و محیط زیست و حتی بر اقتصاد کشور وارد ساخته است. با توجه به خسارت زیاد این پدیده و احتمال افزایش وقوع آن در سالهای آتی، لزوم توجه به آن ازسوی دولت و اجرای راهکارهای مناسب، از تشدید وقوع این پدیده جلوگیری خواهد کرد. بدیهی است که میتوان قبل از اجرای طرحهای عملیاتی با داشتن اطلاعات و شناخت کافی از این پدیده، نحوه و علل وقوع آن، راههای مناسب را برای مقابله با آن پیدا کرد. با توجه به اینکه منشأ توفانهای گردوخاک، کانونهای داخلی و خارجی میباشند، لزوم تشخیص و تفکیک منشأ این توفانها و علل خاص هر کدام ضروری است تا علاوهبر شفافسازی این موضوع برای عموم، راهکارها را بتوان متناسب با هر مورد ارائه داد. پیشبینی وضعیت و داشتن نگاهی به افق آینده پدیده توفانهای گردوخاک نیز در برنامهریزی برای تسکین و سازگاری با آن امری ضروری است (نرجس السادات المنافی و مهدی مظاهری)

امروزه وقوع طوفان های *گردوغبار* علاوه بر تأثیر مستقیم بر زندگی مردم, بر بخش کشاورزی اعم از زراعت, باغبانی منابع طبیعی و محیط زیست, اثرات نامطلوبی بر جای گذاشته است. در این پژوهش برای بررسی روند تغییرات فراوانی روزهای همراه با طوفان های گردوغباری (FDSD) و میزان ارتباط آن با شاخص بارش استانداردشده ,SPI از داده های ساعتی و روزانه گردوغبار و داده های بارندگی ماهانه ۲۱ ایستگاه سینوپتیک منتخب در غرب و جنوب غرب کشور با طول دوره آماری ۲۵ ساله (۲۰۱۴-۱۹۹۰) در مقیاس فصلی استفاده شد. پس از بررسی تمامی داده های گردوغبار ازنظر غیر نرمال بودن به وسیله آزمون کلموگروف-اسمیرنوف و هم چنین سنجش حافظه بلندمدت سری های زمانی با استفاده از ضریب هرست ,از آزمون های نا پارامتریک من-کندال و اسپیرمن در سطح اطمینان ۹۵ درصد برای بررسی روند داده های غیر نرمال استفاده شد. سپس شاخص خشک سالی SPI فصلی در ایستگاه های مدنظر محاسبه و روند آن به روش آزمون پارامتریک رگرسیون خطی مورد تجزیه وتحلیل قرار گرفت. همچنین پهنه بندی آماره های من-کندال و رگرسیون خطی متغیرها, به روش IDW در نرم افزار Arc GIS انجام شد. سپس برای بررسی ارتباط اقلیمی با طوفان های گردوغبار ,ایستگاه هایی که *شاخص* SPI و همچنین متغیر فراوانی روزهای همراه با طوفان *گردوغبار* آن ها دارای روند معنی داری بودند (طوفان های گردوغبار در هر دو روش من-کندال و اسپیرمن و شاخص SPI_در روش رگرسیون خطی), با فن همبستگی پیرسون مورد تحلیل واقع شدند. نتایج نشان داد که از مجموع ۲۱ سری داده های فصلی؛ ایستگاه های همدان (نوژه), ایلام, اسلام آباد غرب, کرمانشاه, سرپل ذهاب, آبادان, اهواز, بندر ماهشهر, بستان, دزفول, مسجدسلیمان, صفی آباد, دوگنبدان, سنندج و خرم آباد دارای همبستگی زیادی بین شاخص اقلیمی SPI و فراوانی روزهای همراه با طوفان های گردوغبار بودند. به نحوی که بیشترین همبستگی بین تعداد روزهای گردوغباری و شاخص خشک سالی SPI در ایستگاه های دزفول, بستان

و مسجدسلیمان به ترتیب با ضرایب پیرسون ۰/۹۲۰-, ۰/۹۱۳-و ۰/۹۱۱-و مقادیر P-Value برابر با ۰/۰۰۲, ۰/۰۲۵ و ۰/۰۴۴ وجود داشت. نتایج این مطالعه می تواند در مدیریت پیامدهای ناشی از طوفان های گردوغبار در مناطق تحت مطالعه مفید واقع شود.

افزایش فاصله انتقال از ناحیه منشأ :

در توفانهای گردوخاک به دلیل ریز بودن ذرات نسبت به توفان های ماس های، جریان های رو به بالا میتواند این ذرات را به صورت معلق در هوا نگه داشته و تا مسافت های بسیار دور حمل نماید. ازاینرو در سالهای اخیر که بیابان های حاصل از خشک شدن تالاب ها به کانون های تولید توفان های گردوخاک تبدیل شدهاند، رسوبات ریزدانه رسی در بستر این کانون ها قابلیت انتقال تا مسافت های بسیار دور را دارند و علیرغم وجود موانع طبیعی نظیر رشته کوه های مرتفع زاگرس، بهطور مکرر بخشهای مرکزی و گاه شرقی کشور را تحت تأثیر قرار دادهاند، بهگونهای که در مواردی از مجموع 31 استان کشور ،23 استان درگیر توفان های گردوخاک شدهاند.

علل تشدید توفان های گردوخاک :

اگرچه فراوانی توفان های گردوخاک روند افزایشی ثابتی را نشان نمی دهد، اما افزایش قابل ملاحظه شاخص هایی مانند غلظت، ماندگاری و فاصله حمل بهروشنی گویای تشدید توفانهای گردوخاک در دهه اخیر است. این تغییر تا حد زیادی ناشی از تغییر در مناطق منشأ این توفان ها بوده است. کانون بسیاری از توفانهای گردوخاک در گذشته، صحراهای عربستان و شمال آفریقا بوده است. توفان های برخاسته از این مناطق به دلیل درشتی ذرات و نشست سریع، ماندگاری و قدرت انتقال کمتری داشته اند. اما بیش از یک دهه پیش، به دلیل تشدید تغییرات آبوهوایی و خشکسالی ها از یکسو و توسعه طرحهای عمرانی و برداشت بیرویه از منابع آب ازسوی دیگر، بسیاری از تالاب ها و نواحی مرطوب موجود در بینالنهرین رو به خشکی نهاده و بیابان های کوچکی را ایجاد نموده است که منشأ بسیاری از توفانهای گردوخاک درسالهای اخیر کرده است. جنس رسوبات این مناطق از رسوبات رسی ریزدانه است که تا ارتفاع زیادی در جو بالا رفته و علاوهبر ماندگاری و غلظت زیاد، مسافتهای بسیار زیادی انتقال مییابند.

در عرصه داخلی نیز تشدید تغییرات آبوهوایی در قالب خشکسالی های پی درپی، سبب افزایش دما و کاهش رطوبت سطح زمین شده است. این تغییرات در کنار بهره برداری از طرح های کلان آبی نظیر تونل های انتقال آب، احداث سدها و شبکه های آبیاری که به برداشت بیرویه و غیراصولی از منابع آب منجر شده، باعث کاهش سطوح آبی و مرطوب و از بین رفتن پوشش گیاهی در بسیاری از مناطق شده است که شکلگیری کانونهای داخلی تولید گردوخاک را به دنبال داشته است. صرفنظر از اینکه هر یک از عوامل تغییر اقلیم و یا طرحهای عمرانی در تشدید توفان های گردوخاک چه سهمی دارند، این عوامل سبب تغییر در سه پارامتر مؤثر در پیدایش کانونهای تولید گردوخاک شده اند، که عبارتند از: دما ،رطوبت و پوشش گیاهی. در ادامه توضیح مختصری در مورد هر عامل ارائه میگردد .

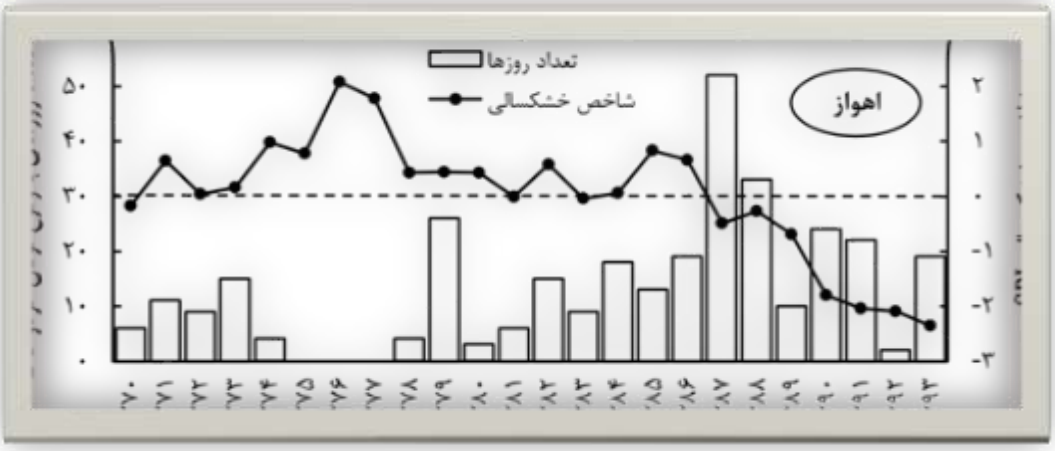
از بین عناصر نیکل و کادمیوم، نشان از آلودگی شدید خاکهای مناطق برخاستگاه به آلودگیهای نفتی دارد. همچنین با افزایش سرعت باد در توفانهای گردوخاک، ترکیب آن هرچه بیشتر به عناصر فلزی سمی آلودهتر شده و آلودگیهای نفتی بیشتری به آن اضافه میشود. خاکهای اراضی جنوب عراق، کویت و شمال عربستان و تا اندازهای خاکهای غرب استان خوزستان بهویژه در جنگهای ایران-عراق و عراق-کویت بین سالهای 1981 تا 1989 به مواد نفتی آغشته شدهاند. غلظت بیش از اندازه عنصر سلنیوم نیز میتواند حاصل از پالایش مواد نفتی و پتروشیمی و احتراق مواد سوختی مثل نفت و زغال باشد. این عنصر بهراحتی در اثر باران ،از خاکهای آلوده به مواد نفتی زهکش شده و در تالابها تجمع مییابد (غریب رضا و لک ،1394)

با توجه به مطالب ذکر شده در مورد ترکیب شیمیایی گردوخاکها، بهخصوص فلزات سنگین موجود در آنها، انتظار میرود که مخاطرات آنها در مورد تأثیر بر سلامتی انسانها، جانوران و گیاهان، چشمگیر باشد. اورژانسی شدن بسیاری از شهروندان هنگام وقوع توفانهای گردوخاک مصداق تأیید این موضوع است. از جنبه دیگر بررسی آثار بلندمدت گردوخاکهای مذکور بر سلامت انسانها، جانوران و گیاهان نیز قابل بررسی است.

روند شدت توفان های گردوخاک در غرب کشور طی بیست سال اخیر :

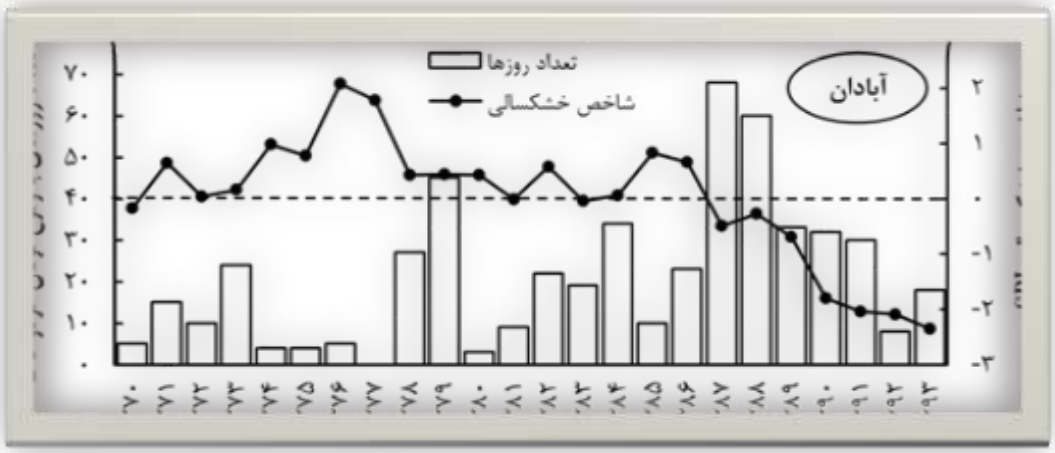
با وجود پرآبترین رودخانههای کشور در استان خوزستان که باعث رونق گرفتن کشاورزی در مناطق مجاور این رودخانهها شده است، شرایط خشکسالی دهه اخیر و کاهش نزولات آسمانی، سدسازی روی رودخانه ها و مهار آب آنها و کاهش حقابه مناطق پاییندست باعث خشک و کمآب شدن تالابهای طبیعی استان، تبدیل زمینهای کشاورزی به زمینهای خشک و بیابانی و در نتیجه ایجاد و توسعه کانونهای تولید گردوخاک در استان خوزستان شده است.

شاخص خشکسالی SPI[65] یکی از شاخصهای پیشنهادی سازمان جهانی هواشناسی است. این شاخص توسط مککی و همکاران بهمنظور تعریف و پایش خشکسالی و تعیین کمبود بارش برای مقیاسهای زمانی مختلف پیشنهاد شده است) McKee *et al.*, 3991(. این شاخص به تحلیلگر امکان میدهد تا تعداد وقایع خشکسالی و ترسالی اتفاق افتاده را برای هر گام زمانی دلخواه تعریف و شناسایی کند. شاخص SPI یکی از شاخصهای اساسی در مطالعه تغییر بارش حول مرکز بهشمار میآید. جدول 11 طبقهبندی شدت خشکسالی را براساس حدود این شاخص نشان میدهد.

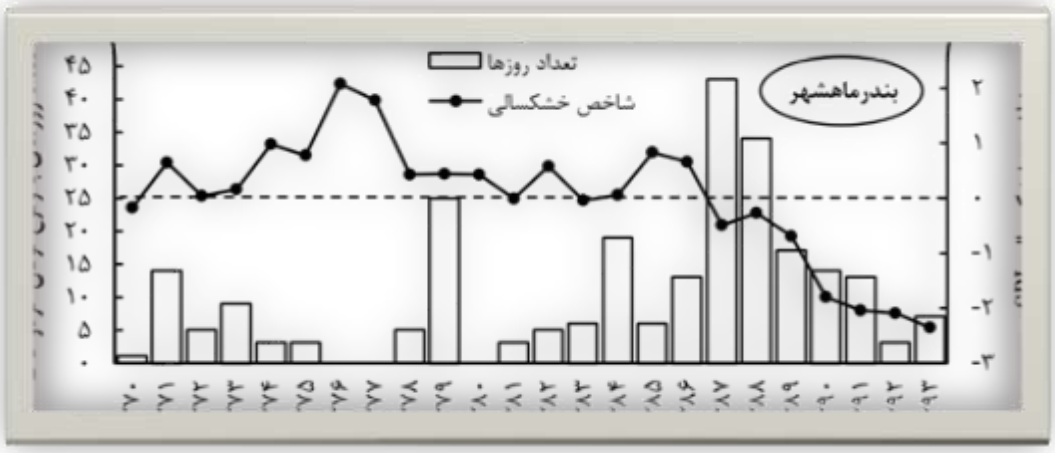


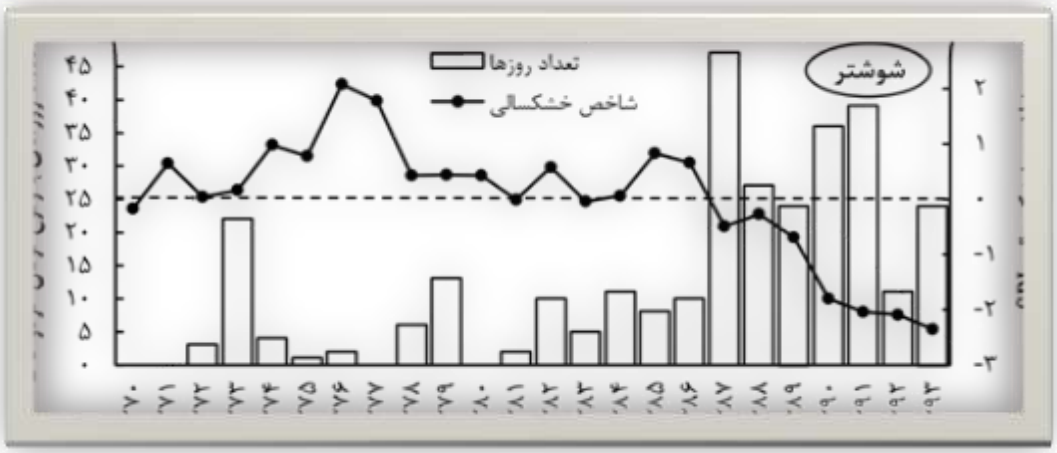
شکل 19. تعداد روزهای توأم با توفان گردوخاک در آبادان و شاخص خشکسالی

[65] **. Standardized Precipitation Index.**

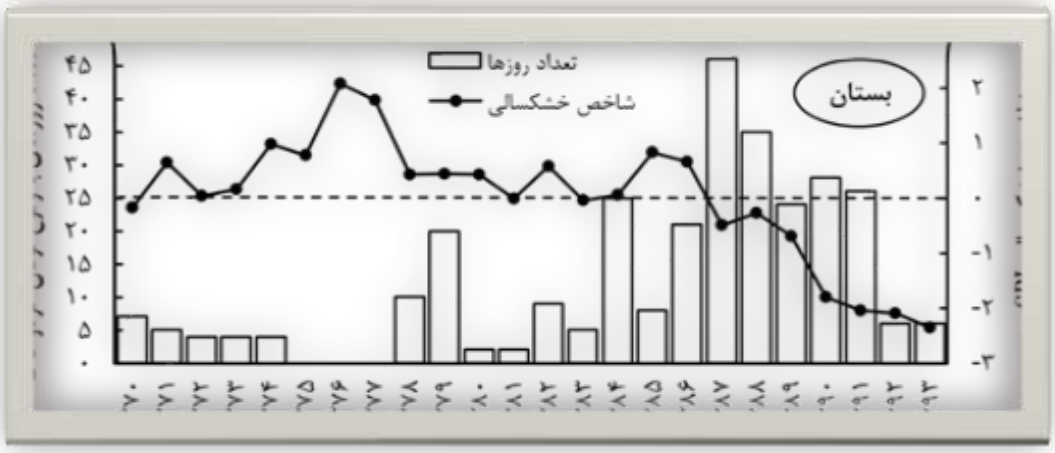


شکل 20. تعداد روزهای توأم با توفان گردوخاک در بندر ماهشهر و شاخص خشکسالی

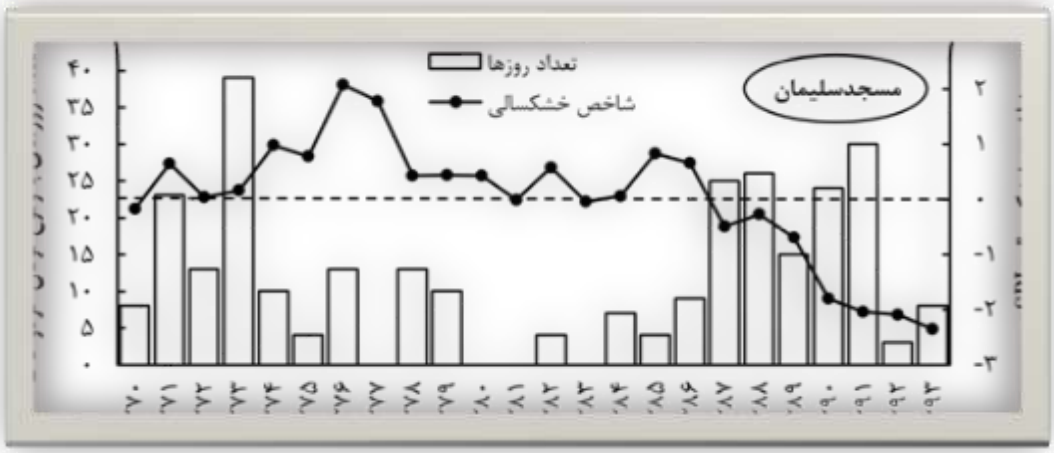




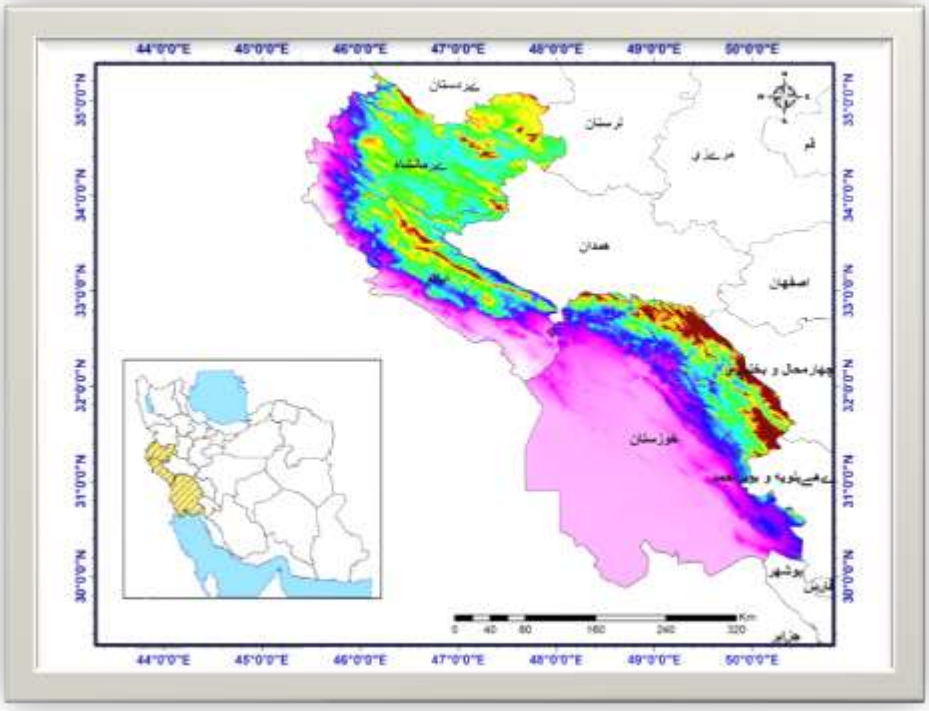
شکل 22. تعداد روزهای توأم با توفان گردوخاک در بستان و شاخص خشکسالی

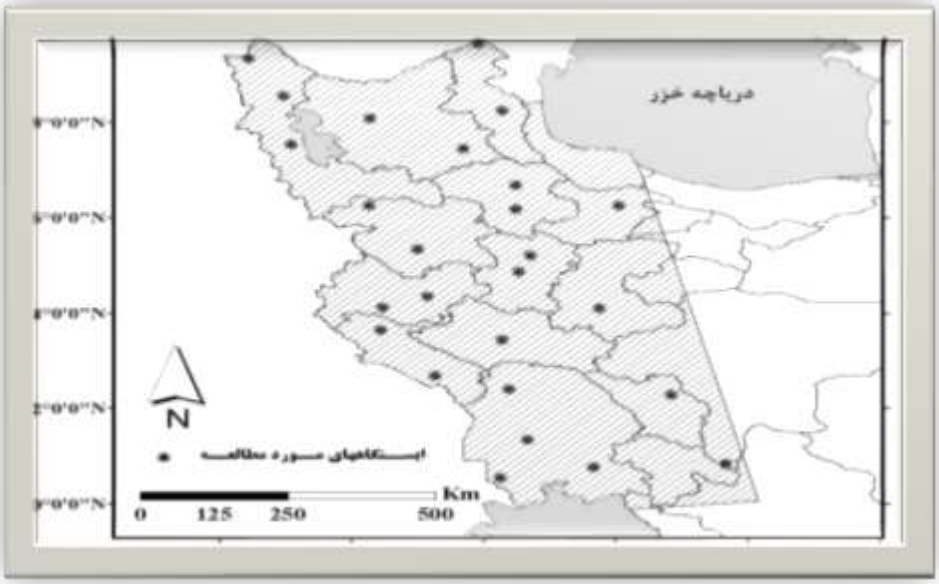


شکل 23. تعداد روزهای توأم با توفان گردوخاک در مسجدسلیمان و شاخص خشکسالی



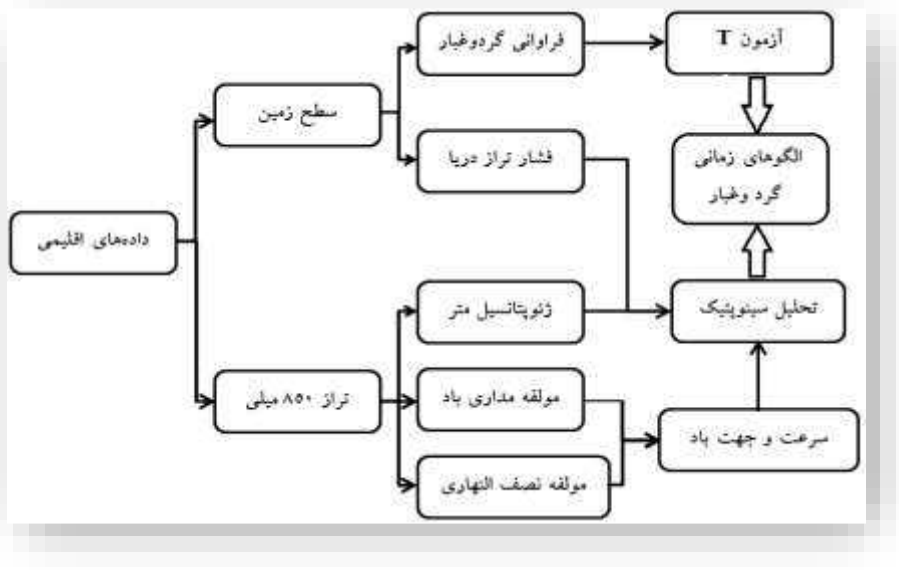
تصاویر پایین نشانگر اثرات گردوغبار در غرب و جنوب غرب کشور





شکل (۱) پراکنش ایستگاه های مورد مطالعه در تحقیق

بررسی تفاوت معنادار در میانگین فراوانی گردوغبار های رخ داده در نیمه غربی کشور طی سال های ۱۹۸۹ تا ۲۰۰۵ با بهره گیری از ازمون تی با دو نمونه مستقل انجام شد پیش نیاز انجام این ازمون ببرسی نرمال بودن داده های فراوانی گردوغبار می باشد زیرا در صورت نرمال نبودن فراوانی گردوغبار های رخ داده بایستی از معادل ناپارامتری ان ازمون یعنی یو من – وایت نی استفاده گردد جهت بررسی نرمال بودن داده ها از ازمون کلموگروف – اسمیرونف بهره گرفته شد بعد از ازمون فرضیه های تفاوتی (مقایسه) دوره های زمانی متمایز به لحاظ وقوع فراوانی گردوغبار مشخص شدند سپس گردوغبار های بزرگ رخداده طی سال های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ که در سایت سازمان فضایی و هوانوردی ملی امریکا ثبت شده بودند استخراج گریدند تحلیل همدیدی ۴۰ رخداد گردوغبار ثبت شده در ۱۱ سال اخیر با در نظر گرفتن دورهای متمایز (محاسبه شده در بخش ازمون فرضیه های تفاوتی) منجر به ارائه الگوهای ایجاد گردوغبار طی دوره های گرم (اوریل تا سپتامبر) و سرد (اکتبر تا مارس) شدند

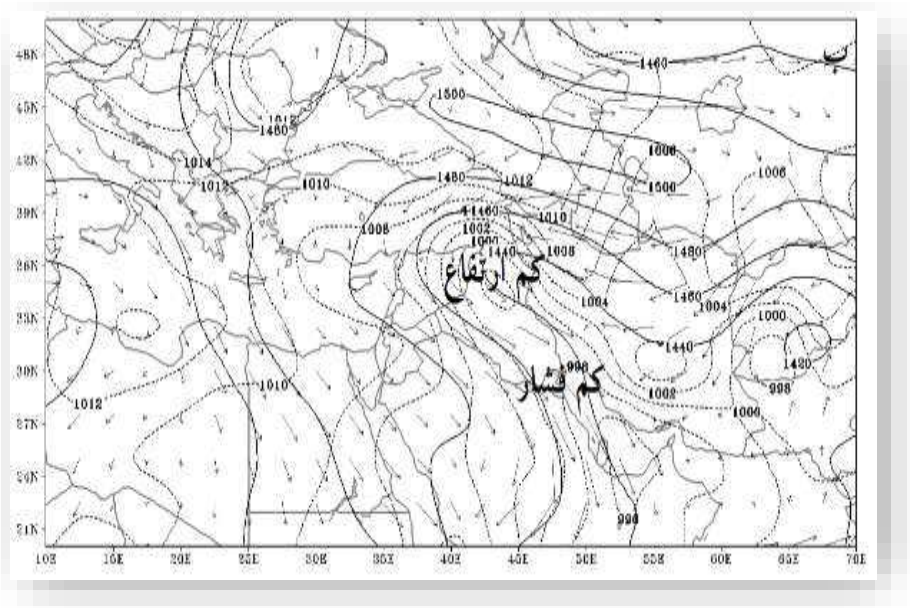


شکل ۲ فرایند انجام پژوهش به صورت شماتیک

تحلیل همدیدی گردوغبارهای فصل گرم

با بررسی نقشه های فشار سطح زمین و ارتفاع ژئوپتانسایل،سرعت و جهت باد در ساطح ۸۵۰ هکتوپاسکالی طی فصل گرمِ تاریخهای گزارش شده در جدول ۳ مشخص شد که در تمام موارد یک کم فشار در سطح زمین واقع در غرب ایران یعنی منطبق برکانون های گردوغبار (موسوم به کم فشار عمان -خلیج فارس که به صورت زبانه ای از کم فشار موسمی هند مشاهده می شود) شکل گرفته و در ساطح ۸۵۰ هکتوپاسکالی نیز یک کم ارتفاع در شمال، غرب و شمال غرب ایران مشاهده می شود که سبب انتقال

.گردوغبار به نواحی غربی ایران می گردد

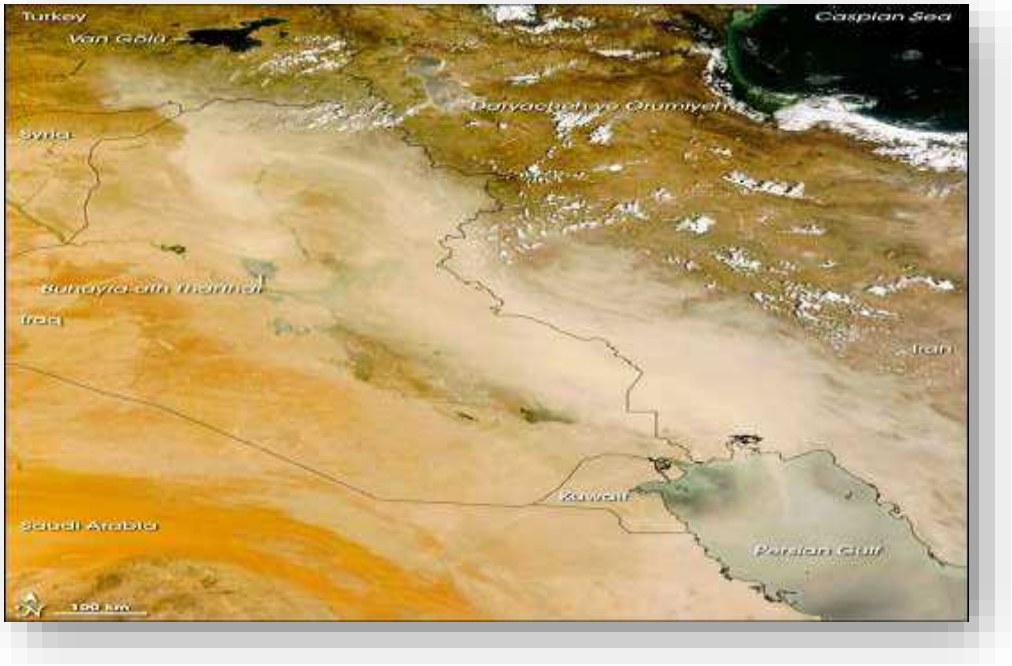


رخداد گردوغبار ۷ جولای ۲۰۱۰)الف (و ۱۷ آوریل ۲۰۰۴) ب (، پ زمینه فشار سطح دریا،)ه.پ(به همراه هم ارتفاع ژئوپتانسیل متر و بردارهای سرعت و بردار باد) متر بر ثانیه (در ۸۵۰ه.پ

الف) تحلیل همدیدی گردوغبارهای فصل سرد

بررسی نقشه های فشار سطح زمین و ارتفاع ژئوپتانسیل سرعت و جهت باد در سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال طی فصل سرد تاریخ های گزارش شده در جدول ۳ مشخص شد که الگوی همدیدی منجر به رخداد گردوغبار بر خلاف فصل گرم که برای تمام نمونه ها ثابت بود از شرایط مختلفی منتج می شود واکاوی تمام نمونه های گردواوری شده در جدول ۳ نشان داد که وقوع گردوغبار در فصل سرد بیشتر تابع شرایط سطح ۸۵۰ هکتوپاسکالی تا سطح زمین است واکاوی نقشه های همدید تراز ۸۵۰ میلی باری مشخص می سازد که در تمامی موارد یک کم ارتفاع در شمال و یک پر ارتفاع (واچرخند عربستان) در جنوب قرار دارد در بخش غربی این دو سلول تحت تاثیر شرایط همدید ممکن است یک سلول کم ارتفاع بصورت

سردچال جوی و با یک سلول پر ارتفاع پر فشار جنب حاره ای مشاهده می شود بنابراین دو حال کلی را می توان شناسایی کرد.



تولید تصاویر گردوغبار در غرب و جنوب غرب کشور سال (۲۰۰۸) (ثامرناصری)



تولید تصاویر گردوغبار در غرب و جنوب غرب کشور (۲۰۰۹) (ثامرناصری)

گردوغبار یکی از پدیده های جوی است که رخداد آن در مناطق مختلف دنیا متاثر از عوامل طبیعی و انسانی بوده و عمدلتا جزو مخاطرات طبیعی به شمار می آید که به طور مستقیم یا غیرمستقیم بخش گسترده ای از جامعه بشری را متاثر می سازند کشور ایران به خصوص مناطق جنوب غرب کشور نیز بیش از پیش طی سال های اخیر با این پدیده دست و پنجه نرم کرده است به همین دلیل گردوغبارهای شدید سه استان غرب و جنوب غربی مشتمل بر استان های کرمانشاه، ایلام و خوزستان طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷ بررسی شد. نتایج تحقیق نشان داد که شدیدترین و بیشترین میزان گردوغبار در این استان ها در سال های ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹ به وقوع پیوسته است. در بین روزهای گردوغباری در ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹ ، سه روز که

دارای شدیدترین گردوغبارها بودند، به عنوان شاخص برای بررسی انتخاب شدند. با بررسی مدل HYSPLIT و تصاویر AOD حاصل از سنجنده MODIS مشخص شد که کانون های اصلی گردوغبار در خارج از کشور و کشورهای سوریه، عراق، لبنان و جنوب ترکیه بوده است. توده های گردوغبار نشات گرفته از این کانون ها دارای حجم و غلظت بالایی بوده و مساحت زیادی از منطقه و حتی کشورهای همسایه را در برگرفته است این باعث تداوم بالا در منطقه شده که تا چندین روز طول کشیده است

منابع ماخذه :

نویسندگان (نرجس السادات المنافی و مهدی مظاهری)

ذوالفقاری، حسن و دیگران) ۱۳۹۰ (، بررسی همدید توفان های گردوغبار در مناطق غربی ایران طی سالهای ۱۳۸۸ تا ۱۳۸۴ مطالعه موردی موج فراگیر تیرماه **۱۳۸۸**

.سازمان هواشناسی کشور، گزارش اقلیم پایه کشور و چشم انداز آن تحت گرمایش جهانی)گزارش تلفیقی دستگاه های مختلف ۱۳۹۴

شعاعی . ضیاء الدین . تشدید توفان های گردوغبار . چالش مهم زیست محیطی ده اخیر در غرب اسیا و ایران

سازمان حفاظت محیط زیست ستاد ملی مقابله با پدیده گردوغبار ۱۳۹۴

سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور اداره کل زمین شناسی و اکتشافات معدنی اهواز شناسایی کانون های منشاء گردوخاک در استان خوزستان ۱۳۹۴

سازمان هواشناسی کشور و اداره کل هواشناسی اطلاعات خوزستان ۱۳۹۴

غریب زاده . محمد و لک . راضیه . برخاستگاه و ژئوشیمی . گردوخاک های استان خوزستان مطالعه موردی توفان بهمن ماه ۱۳۹۳

سازمان هواشناسی کشور پژوهشکده علوم جوی و هواشناسی . بررسی وضعیت شکل گیری و روند تغییرات

پدیده گردوغبار در غرب و جنوب غرب کشور ۱۳۹۵

سازمان هواشناسی کشور . مرکز ملی گردوخاک . بررسی توفان های گردوخاک محلی و گسترده استان خوزستان ۱۳۹۵

براتی و غلامرضا لشکری و حسن کرمی و فریبا ۱۳۹۰ نقش همگرایی سامانه های فشار برخط رخداد توفان های غباری استان خوزستان جغرافیا و توسعه شماره ۲۲و۵۶و ۳۹و زاهدان

ذوالفقاری و حسن عابدزاده حیدر ۱۳۸۴ تحلیل سینوپتیک سیستم های گردوغبار در غرب ایران جغرافیا و توسعه ۶ ۱۸۸ -۱۷۳. زاهدان

رنجبر سعادت ابادی عباس و قاسم عزیزی ۱۳۹۱ مطالعه الگوهای هواشناسی چشمه های تولید گردوغبار و مسیر حرکت ذزات معلق برای طوفان جولای ۲۰۰۹ پژوهش های جغرافای طبیعی شماره ۸۱ و ۹۲ و -۷۳ تهران

ckerman, S.A., 1997, Remote Sensing Aerosols Using Satellite Infrared Observations, Journal of Geophysical Research, Vol. 102, PP. 17069-17080.

Al-Dabbas, M. A., Ayad Abbas, M., Al-Khafaji, R. M., 2011, Dust Storms Loads Analyses-Iraq, International Journal of Water Resources and Arid Environments, Vol. 1, No. 2, PP.129-141.

Huang, J., Jinming, G., Weng, F., 2007, Detection of Asia Dust Storms Using Multisensor Satellite Measurements, Remote Sensing of Environment, Vol. 110, PP. 186-191.

Kalderon-Asael, B., Erel, Y., Sandler, A., Dayan U., 2009, Mineralogical and Chemical Characterization of Suspended Atmospheric Particles over the East Mediterranean Based on Synoptic-scale Circulation Patterns, Atmospheric Environment doi: 10.1016 /j. atmosenv.2009.03.057.

Gillette, D.A., Hanson, K.J., 1989, Spatial and Temporal Variability of Dust Production Caused by Wind Erosion in the United States, Journal of Geophysical Research, Vol. 94, PP. 2197-2206.

Goudie, A.S., 2006, Dust Storms: Recent Developments, Journal of Environmental Management, Vol. 90, PP. 89-94.

Hojati, S., Khademi, H., Faz Cano, A., Landi, A., 2011, Characteristics of Dust Deposited along a Transect between Central Iran and the Zagros Mountains. Catena J., Vol. 88, PP. 27-36.

بررسی شرایط اقلیمی وبیوکلیمای گردشگری شهر تبریز

[۱]فریباکرمی،[۲]اکرم نوری کمری، [۳]عارفه شعبانی عراقی،[۴]ولی اله نظری

[۱] استادیار گروه آموزش جغرافیا، دانشگاه فرهنگیان، تهران،ایران.

[۲] استادیار گروه آموزش جغرافیا، دانشگاه فرهنگیان، تهران،ایران.

[۳] استادیار گروه آموزش جغرافیا، دانشگاه فرهنگیان، تهران،ایران.

[۴] دانشیار گروه آموزش جغرافیا، دانشگاه فرهنگیان، تهران،ایران.

پست الکترونیک نویسنده مسئول f.karami@cfu.ac.ir

چکیده

صنعت گردشگری در سال های گذشته از رشد قابل توجهی برخوردار بوده است. این صنعت با چالش های خاص خود روبروست از جمله آنها تغییر در آب و هوا است. آب و هوا طول مدت و کیفیت توریسم ، سلامتی گردشگران را کنترل می کند.در این مطالعه برای تحلیل شرایط گردشگری استان از داده‌های اقلیمی ۳۰ ساله (۲۰۲۲ -۱۹۹۳)، استفاده شده است. برای شناخت اقلیم شهر تبریز و طبقه بندی آن از تیپ بندی اقلیمی کوپن کوپن-تراورتا استفاده شده است. روش کوپن - تراورتا اصلاح شده، روش کوپن است. در این تیپ بندی تأکید بیشتر بر مولفه بارش دارد وتفکیک مرزهای بارشی نشان می دهد. در همین راستا برای تعیین شاخص اقلیم توریستیTCI که معیار معتبری برای شناسایی و تحلیل شرایط اقلیمی یک ناحیه گردشگری است، استفاده گردید. در پایان برای محاسبه شاخص‌های بیوکلیمایی PET و PMV که از شاخص های فرعی اقلیم توریستی هستند ، مدل RayMan به کار گرفته شده است. در این مدل فاکتورهای فردی (جنس، سن، قد، وزن) و فاکتورهای نوع پوشش و فعالیت مد نظر است. نتایج به دست آمده نشان می دهند که در شهر تبریز بهترین زمان گردشگری از اوایل اردیبهشت تا اواخر مهر ، بیشترین تعداد روز های آسایش را دارد.

کلمات کلیدی: اقلیم، شاخص گردشگری TCI، شاخص های بیوکلیمایی PET و PMV، کوپن-تراورتا، تبریز.

مقدمه

گردشگری به عنوان یکی از بخش های پویا واساسی اقتصاد بسیاری از کشورها از تاثیرات تغییرآب وهوا مستثنی نیست. دردهه های آینده، تغییر آب وهوا یک موضوع حیاتی درتوسعه ومدیریت گردشگری به شمار خواهد آمد. با توجه به این حقیقت که آب وهوا یک پدیده غالب درتمام مقاصد توریستی جهان است وازآنجاکه هر فصل، گردشگرهای مخصوص به خود را دارد، لذا می توان با استفاده ازپارامترهای اقلیمی همچون دما و رطوبت، مناسبترین و نامناسبترین فصل و همچنین زمان مناسب هر فصل برای ورود گردشگرهای مختص همان فصل را تعیین کرد. با توجه به این موضوع هر چقدر فروانی عناصر اقلیمی در طول سال در منطقه مناسب باشد، شرایط جذب گردشگر بیشتر است. گرمایش جهانی و پیامدهای حاصله مثل تغییر در ارتفاع سطح آبهای اقیانوسی، تغییر فراوانی وشدت پدیده های جوی مثل طوفان ها یا امواج گرم که وابسته به تغییر اقلیم هستند، اثرات بسیار مهمی بر گردشگری ساحلی، زمستانی، کوهستانی، سلامتی وامثال آن خواهد داشت (ذوالفقاری، ۱۳۸۹). گردشگری وگرمایش جهانی اثرات مثبت یا منفی متقابل بریکدیگر داشته و همانطور که گردشگری از تغییر اقلیم و پیامدهای آن متأثر خواهد شد، خود نیز می‌تواند بر شدت و ضعف گرمایش جهانی نقش مهمی ایفا نماید. گردشگری بهینه می‌تواند در کاهش گازهای گلخانه‌ای و کاهش اثرات ناشی از تغییر اقلیم نقش مفیدی ارائه دهد. طبق پیش‌بینی‌ها، تغییر اقلیم می‌تواند تعداد مناطقی را که در برخی از فصول سال، اقلیم مناسبی برای گردشگری دارند را دچار کاهش و یا افزایش کند که این میتواند باعث رکود و بهبود وضعیت گردشگری در این مناطق شود (محمدی وهمکاران، ۱۳۸۴).گردشگران و تورگردانان می توانند با استفاده از شاخص های گردشگری زمان و مکان مناسب برای گذران اوقات فراغت و گردش را تعیین کنند. شهر تبریز با دارا بودن مناطق و آثار توریستی زیاد و قرار گرفتن در مسیر ارتباطی اروپا و نیز هم‌جواری با کشورهای قفقاز جنوبی، موقعیت استراتژیکی مهمی در منطقه برخوردار است . اهمیت این موضوع در مقایسه با سایر مناطق ایران در ارتباط با صنعت توریسم بسیار مهم است. درآمد سرشاری که توریست‌های وارده به منطقه می‌تواند ایجاد کند، لزوم برنامه‌ریزی هدفمند و اصولی را جهت توسعه توریسم ضروری می سازد. در این پژوهش برای شناخت اقلیم شهر تبریز از طبقه بندی اقلیمی کوپن کوپن-تراورتا استفاده شده است. روش کوپن - تراورتا اصلاح شده، روش کوپن است. در این طرح طبقه‌بندی، آب و هوای جهان در ۶ گروه بزرگ آب‌وهوایی طبقه‌بندی شده است. این تیپ بندی تأکید بیشتر بر مولفه بارش دارد وتفکیک مرزهای بارشی نشان می دهد(کرمی و همکاران،۱۴۰۳)..علی رغم اهمیت بسیار زیاد مساله تغییر اقلیم و تأثیر آن بر صنعت گردشگری، متأسفانه پژوهش‌هایی در این زمینه عمدتا به صورت پراکنده بوده است. در دسته ای از پژوهش ها به بررسی و تحلیل قابلیت های کلیماتوریسم در منطقه براساس شاخص های آسایش اقلیمی؛ PMV ، PET وTCI پرداخته شده است که می توان به ذوالفقاری (۱۳۸۶) ، جلالی عنصرودی (۱۳۸۸)، صراف و همکاران(۱۳۸۹)، انصاری(۱۳۹۰) ، خرمی حسین حاجلو (۱۳۹۲)،میکزکوسکی (۱۹۸۵)، مه یر و همکاران (۱۹۹۸)، اشاره کرد. در دسته ای از پژوهش ها نیز به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر صنعت گردشگری پرداخته شده است که می توان به

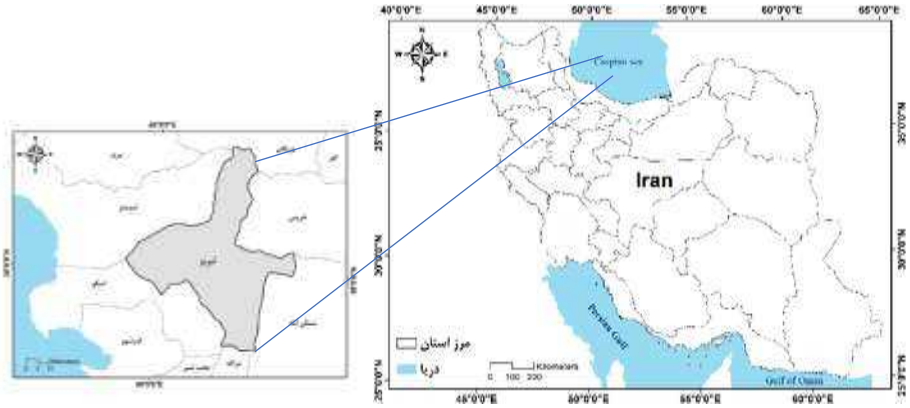
پری (۱۹۹۷)، هاریسون و همکاران (۱۹۹۹) ، پری (۲۰۰۱)، اسکات و همکاران (۲۰۰۴)، مارتین گومز (۲۰۰۵)، سازمان هواشناسی آمریکا (۲۰۰۵)، اندلر و همکاران(۲۰۰۷)، اسکات و همکاران(۲۰۰۷) ، ماتزاراکیس و همکاران (۲۰۰۷) ، سیمپسون و همکاران (۲۰۰۸)، اشاره کرد.بررسی مجموعه تحقیقات یاد شده توانست راهبر محقق در انتخاب برخی از روشهاو معیار های مورد استفاده در پژوهش کنونی باشد.علی رغم برجسته وآشکار بودن روابط بین اقلیم و توریسم متاسفانه هنوز تحقیقات جامع چندانی درباره کمیت و کیفیت روابط بین آنها صورت نگرفته است که در این پژوهش سعی بر این است که قابلیت های اقلیم گردشگری منطقه بررسی شود.

منطقه مورد مطالعه

شهر تبریز، به عنوان مرکز استان آذربایجان شرقی، در موقعیت جغرافیایی عرض ۳۸.۰۷ درجه شمالی و طول ۴۶.۲۸ درجه شرقی واقع شده است. این شهر با مساحتی در حدود ۴۵,۴۸۱ کیلومتر مربع، یکی از کلان شهر های ایران به شمار می‌آید. جمعیت تبریز در سال ۲۰۲۲ بالغ بر ۱,۶۴۳,۹۶۰ نفر برآورد شده است که آن را به پنجمین شهر پرجمعیت کشور تبدیل کرده است.تبریز نه تنها به دلیل میزان جمعیتش بلکه به واسطه اهمیت اقتصادی، فرهنگی و تاریخی از کلان‌شهرهای حیاتی ایران محسوب می‌شود. این شهر به ویژه به خاطر جاذبه‌های گردشگری متعدد و تاریخ کهن خود، یکی از مقاصد مهم گردشگری در ایران است. موقعیت و ویژگی های جغرافیایی ایستگاه سینوپتیک شهر تبریز در جدول(۱) و نقشه منطقه مورد بررسی در شکل(۱) ارایه شده است.

جدول ۱- موقعیت و ویژگی های جغرافیایی ایستگاه سینوپتیک تبریز

نام ایستگاه	نوع ایستگاه	سال تاسیس	ارتفاع(متر)	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
تبریز	سینوپتیک	۱۹۵۱	۱۳۶۱	۴۶.۱۷	۳۸.۰۵



شکل۱-نقشه منطقه مورد مطالعه

داده ها و روش ها

در این پژوهش، ابتدا به منظور شناسایی تیپ اقلیمی شهر تبریز از داده‌های بارش و دمای ماهانه در دوره آماری (۲۰۲۲-۱۹۹۳) از سازمان هواشناسی اخذ گردید. قبل از تحلیل داده‌ها کیفیت داده ها،همگنی و کامل بودن سری آماری آنها بررسی شد. طبقه بندی اقلیمی تبریز بر اساس تیپ بندی اقلیمی کوپن- تراورتا انجام شده است. در این روش از رابطه زیر استفاده شده است

$$R = 2.3\,T - 0.64\,Pw + 41$$ رابطه(۱)

در این رابطه(۱) R نمایانگر میانگین آستانه بارش سالانه بر حسب سانتی‌متر ، T میانگین دمای سالانه بر حسب سانتی¬گراد،Pw درصد میزان بارندگی سالانه زمستان (بارش زمستانه) در نیمکره شمالی (ماه¬های اکتبر تا مارس) و در نیمکره جنوبی (آوریل تا سپتامبر).

اگر متوسط بارش کمتر از Rباشد منطقه خشک و نیمه خشک است و در تیپ اقلیمی اصلی Bقرار می گیرد. برای تعیین زیر تیپ هابه این صوردت اقدام می شود که اگر R/2 <Pmean<R ،برقرار باشد زیرتیپS می¬شود و اگر رابطه Pmean< R/2 برقرار است زیر تیپ k(با ویژگی ۸ ماه دمای بالاتر از ۱۰ درجه سانتی¬گراد لازم است. (کرمی و همکاران،۱۴۰۳).

سپس، برای ارزیابی وضعیت گردشگری از شاخص آب و هوای گردشگری میرزکوسکی (TCI) که بازه آن از منفی۳۰ تا ۱۰۰ است استفاده گردید. این شاخص از ترکیب هفت متغیر اقلیمی در قالب یک معادله بیوکلیمایی که شرایط حرارتی بدن انسان را کنترل می‌کنند، حاصل می‌شود. متغیرهای به‌کاررفته عبارت‌اند از: میانگین حداکثر دمای روزانه(°C) ، میانگین

دمای روزانه(°C) ، حداقل و میانگین رطوبت نسبی روزانه (٪)، بارش(mm) ، کل ساعات آفتابی و میانگین سرعت باد (m/s یا. km/h) در محاسبهTCI ، متغیرها بر اساس اهمیت نسبی‌شان برای آسایش گردشگران وزن‌دهی و رتبه‌بندی می‌شوند تا مقادیر زیرشاخص‌ها تعیین گردد .

$$TCI = 2\ ((4\ CID) + CIA + 2\ P + 2\ S + W)$$ رابطه(۲)

در رابطه(۲) CID شاخص آسایش روزانه، CIAشاخص آسایش شبانه‌روزی، Pبارش، Sساعات آفتابی و W شاخص باد مورد نظر است.

مقادیر رتبه هر یک از این متغیرها در فرمول قرار می‌گیرد تا مقدار نهایی TCI به‌دست آید. این شاخص صرفاً شرایط محیطی مناسب یا نامناسب برای گردشگری را می‌سنجد .برای مدنظر قرار دادن تفاوت‌های فردی در تجربه گردشگری، شاخص‌های بیوکلیمایی دیگری نیز محاسبه می‌شوند؛ از جمله شاخص دمای معادل فیزیولوژیک (PET) و شاخص پیش‌بینی میانگین احساس گرمایی (PMV). برای محاسبه این شاخص‌های حرارتی، دمای تابشی میانگین محیط مورد نیاز است که در مدل RayMan محاسبه شده اند. مدل RayMan از متغیرهای موقعیتی (طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع از سطح دریا)، متغیرهای هواشناسی؛دمای هوا به C°، رطوبت نسبی به درصد، سرعت باد به m/s، فشار بخار به هکتوپاسکال، میزان ابرناکی به اکتا و میانگین دمای تابشی محیط)، متغیرهای فردی (قد، وزن، سن، جنسیت) و متغیرهای مربوط به پوشش و فعالیت استفاده می‌کند.

نتایج و بحث

تیپ بندی اقلیمی شهر تبریز با روش کوپن - تروروتا

با توجه به این که روش کوپن -تراورتا بهتر می تواند مناطق خشک و نیمه خشک را بهتر تشخیص دهد و مرز آنها را مشخص نماید از این روش برای بررسی تیپ اقلیمی شهر تبریز استفاده شد. با اجرای این روش، مطابق موارد ذکر شده در مواد و روش ها برای شهر تبریز، اقلیم نیمه خشک سرد با علامت Bsk به دست آمد.. که می تواند مبنای مطالعات بخش اقلیم گردشگری این پژوهش قرار گیرد. تیپ اصلی B نیمه خشک بودن شهر و زیر تیپ Kمیانگین دمای ماهانه بین(۰.۱ تا ۹.۹) درجه سانتی گراد را دارد. که نشانگر سرد بودن منطقه مورد مطالعه است(کرمی،۱۴۰۳)

وضعیت اقلیم گردشگری ماهانه شهر تبریزبر اساس شاخص TCI

شاخص ترکیبی TCI عناصر اقلیمی را که بیشترین ارتباط را با کیفیت تجربه توریستی برای غالب توریست ها دارد، به طور سیستماتیک ارزیابی می کند. ربای محاسبه شاخص اقلیم گردشگری ابتدا مقادیر زیر شاخص‌های مورد نیاز این مدل بدست

آمده است(جدول های۲و۳). در نهایت تمامی متغیرهای مورد نیاز ، در رابطه ۱(مراجعه به بخش مواد و روش ها) قرار گرفت و مقدار شاخص اقلیم توریستی (TCI) محاسبه شد.

در زیر شاخص CID (آسایش طول روز) که یک شاحص فرعی در درون شاخص آب و هوایی توریسم(TCI) است نشانگرآسایش انسانی در زمان فعالیت گردشگران است.

جدول۲ زیرشاخص CID ایستگاه تبریز

ایستگاه	ژانویه	فوریه	مارس	اوریل	مه	ژوئن	جولای	آگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
تبریز	۱	۱	۲	۳	۵	۵	۳	۳	۴	۵	۲.۵	۲

جدول۳- زیر شاخص CIA ایستگاه تبریز

ایستگاه	ژانویه	فوریه	مارس	اوریل	مه	ژوئن	جولای	آگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
تبریز	۱.۵	۱.۵	۱.۵	۲	۳	۵	۵	۵	۵	۳	۲	۱.۵

درجدول(۴)نتایج بدست آمده از شاخص اقلیم گردشگری TCI ارایه شده است که در آن آسایش اقلیم در ماههای فصل بهار و تابستان بیشتر است که در ذیل به تفکیک ماه های مختلف برای ایستگاه مورد نظر بررسی شده است. شرایط اقلیم تبریز در ماه ژانویه به علت استیلای شرایط سرد و به دلیل گسترش سیستم های غربی و کاهش دما و افزایش ابرناکی و بارندگی شرایط نامطلوب کلیما توریستی دارد و منطقه فاقد راحتی بیو کلیمایی است . در ماه فوریه در طبقه نامطلوب کم قرار دارد. و این دوماه شرایط مناسبی برای گردشگری نیست.سرمای زیاد،وجود برف و بارانو یخبندان شرایط آسایش گردشگر را به شدت کاهش می دهد. البته فقط ممکن است در بخش توریسم زمستانی رونقی داشته باشد. که در این صورت هم نیاز به زیر ساخت های مناسب برای گردشگری دارد.از ماه مارس بعلت شروع فصل بهار شرایط قابل قبولی از نظر اقلیم گردشگری حاکم است. و از مارس تا نوامبر شرایط ایده آل و خوب برای گردشگران ایجاد می شود که از ماه های مناسب گردشگری هستند ماه دسامبر نیز کف شرایط قابل قبول را دارد. که در صورت وجود امکانات قابل قبول برای گردشگری است. برای به دست آورن مقادیر ذکرشده در جدول(۴) مقیاس ها میکزکوسی استفاده شده است که شرح آن در جدول(۵) آمده است.

جدول ۴- طبقه بندی عددی و توصیفی شاخص TCI ماهانه ایستگاه تبریز

ایستگاه	ژانویه	فوریه	مارس	اوریل	مه	ژوئن	جولای	آگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
تبریز	۴۹	۴۹	۵۶	۶۴	۸۴	۹۴	۸۰	۷۶	۸۸	۹۱	۶۳	۵۴
	مرز	مرز	قابل قبول	خوب	عالی	ایده آل	عالی	خیلی خوب	عالی	ایده آل	خوب	قابل قبول

در جدول(۵)مقیاس میکزکوسکی - مقیاسی مرتبط با اقلیم گردشگری است - سطح احساس آسایش و ضریب TCIهمراه با توصیف آمده است.. در این مقیاس اعداد به ده طبقه ازمنفی ۳۰ تا ۱۰۰ تقسیم بندی شده اند. با مقایسه نتایج به دست آمده از ایستگاه تبریز می توان مقادیر شاخص آب و هوای توریسم آن را مشخص نمود.

جدول۴- تقسیم بندی شاخص میکزکوسکی و توصیف آن

سطح احسایس آسایش	ضریب TCI
آیده آل	۹۰-۱۰۰
عالی	۸۰-۸۹
خیلی خوب	۷۰-۷۹
خوب	۶۰-۶۹
قابل قبول	۵۰-۵۹
مرز	۴۰-۴۹
تا حدودی نامطلوب	۳۰-۳۹
نامطلوب	۳۰-۲۹
بی نهایت نامطلوب	۱۰-۱۹
غیر ممکن	بین ۹ تا منفی ۳۰

تعیین مناسب‌ترین دوره‌های زمانی گردشگری شهر تبریز

همانطور که اشاره شد در بررسی بیو کلیمای انسانی شهر تبریز از شاخص‌های فرعی بیوکلیماییPET و PMV استفاده شده است. نتایج

شاخص PMV در جدول(۵) آمده است. روزهای ۱۵ آوریل تا ۱۶ می و ۱۵ سپتامبر تا ۳۰ سپتامبر داری شرایط مطلوب و راحت و ۱۵ آوریل تا ۱۶ می و همچنین ۲۱ آگوست تا ۱۴ سپتامبر نسبتا مطلوب است .در این بین ۱۷ می تا ۴ ژوئن کاملا مناسب گردشگری و بدون تنش حرارتی است. همچنین از روز های ۲۵ نومامر تا ۲۸ مارس تنش سرمایی شدید یا بسیار شدید حاکم است که از موانع مهم ورود گردشگربه منطقه هستند.

جدول۵- تقویم زمانی گردشگری برای مقادیر شاخصPMV روزانه در تبریز

تاریخ	تنش فیزیولوژیک	حساسیت حرارتی	محدوده شاخص pmv
۲۵ نوامبر تا ۴ مارس	تنش سرمای بسیار شدید	خیلی سرد	< -3/5
۵ مارس تا ۲۸ مارس	تنش سرمای شدید	سرد	-3.5-(-2.5)
۲۹ مارس تا ۱۴ آوریل	تنش سرمای متوسط	خنک	-2/5 – (-1/5)
۱۵ آوریل تا ۱۶ می	تنش سرمای اندک	کمی خنک	-1/5 –(- 0/5)
۱۷ می تا ۴ ژوئن	بدون تنش	راحت	-0/5 – 0/5
۵ ژوئن تا ۱۲ جولای	تنش گرمای اندک	کمی گرم	0.5-(1.5)
۱۳ جولای تا ۲۰ آگوست	تنش گرمای متوسط	گرم	1.5-(2.5)
۲۱ آگوست تا ۱۴ سپتامبر	تنش گرمای اندک	کمی گرم	0.5-(1.5)
۱۵ سپتامبر تا ۳۰ سپتامبر	بدون تنش	راحت	-0/5 – 0/5
۱ اکتبر تا ۲۰ اکتبر	تنش سرمای اندک	کمی خنک	-1/5 – (-0/5)
۲۱ اکتبر تا ۶ نوامبر	تنش سرمای متوسط	خنک	-2/5 – (-1/5)
۷ نوامبر تا ۲۴ نوامبر	تنش سرمای شدید	سرد	-3/5 – (-2/5)

شاخص دمای معادل فیزیولوژیک(PET) عبارت از دمایی است که در آن بیلان انرژی انسان برای شرایز فضای سرپوشیده معادل دمای پوست و نرخ تعریق تحت شرایط واقعی فضاهای آزاد مورد بررسی است. شاخص دمای معادل فیزیولوژیک(PET)، کمک می کند که اثرات پیچیده در فضاهای آزاد را با تجارب منازل و مکان های کسب و کار،مقایسه نماید. علاوه بر این شاخص در تمام اقلیم ها و در تمام طول سال را می توان استفاده نمود و همچنین مقاومت لباس در برابر انتقال حرارت و تولید حرارت داخلی نیز در شاخص به خوبی لحاظ گردیده است(ذوالفقاری،۱۳۸۹:۱۲۰) همانطور که در جدول(۶)ملاحظه می گرددمنطقه آسایش حرارتی دمای ۱۸ تا ۲۳ درجه است که از ۱۰ می تا ۳۱ می و همچنین نوزده سپتامبر تا اول اکتبر شرایط مناسب گردشگری مناسب و بدون تنش حرارتی است. در درجه حرارت های معادل بین ۴ تا ۸درجه سانتی گراد،تنش های سرمایی حاکم است. و همینطور گردشگران از ۲۳نوامبر تا ۷ مارس با درجه حرارت معادل کمتر از ۴ درجه سانتی گراد تنش سرمای بسیار شدید با حساسیت حرارتی خیلی سرد و از ۸ تا۲۷ مارس با تنش سرمای شدید و حساسیت حرارتی سرد مواجه هستند

هر دو شاخص با تفاوت‌های اندک چند روزه دوره‌های آسایش و دوره‌های با تنش‌های حرارتی را شامل بوده و تقریباً دارای نتایج نزدیک به هم می‌باشند. با توجه به دو شاخص PMV و PET در تبریز ۳۵ روز بدون تنش و حساسیت حرارتی راحت حاکم می باشد.

جدول ۶- تقویم زمانی گردشگری برای مقادیر شاخص PET روزانه در تبریز

تاریخ	درجه تنش فیزیولوژیک	حساسیت حرارتی	محدوده شاخص PET(°C)
۲۳ نوامبر تا ۷ مارس	تنش سرمای بسیار شدید	خیلی سرد	< 4
۸ مارس تا ۲۷ مارس	تنش سرمای شدید	سرد	4-8
۲۸ مارس تا ۱۳ آوریل	تنش سرمای متوسط	خنک	8-13
۱۴ آوریل تا ۹ می	تنش سرمای اندک	کمی خنک	13-18
۱۰ مه تا ۳۱ می	بدون تنش	راحت	18-23
۱ ژوئن تا ۵ جولای	تنش گرمای اندک	کمی گرم	23-29
۶ جولای ۲۳ آگوست	تنش گرمای متوسط	گرم	29-35
۲۴ آگوست تا ۱۸ سپتامبر	تنش گرمای اندک	کمی گرم	23-29l

۱۹ سپتامبر تا ۱ اکتبر	بدون تنش	راحت	18-23
۲ اکتبر تا ۲۰ اکتبر	تنش سرمای اندک	کمی خنک	13-18
۲۱ اکتبر تا ۶ نوامبر	تنش سرمای متوسط	خنک	8-13
۷ نوامبر تا ۲۲ نوامبر	تنش سرمای شدید	سرد	4-8

نتیجه‌گیری

شهر تبریز به عنوان یکی از قطب های مهم گردشگری کشور دارا بودن شرایط اقلیمی متفاوت ، می تواند جاذب گردشگر در فصول مختلف باشد. نتایج کلی مطالعات این پژوهش نشان می دهند که در رابطه با شرایط آسایش اقلیمی درشهر تبریز از لحاظ بازه زمانی و هم از لحاظ مکانی تفاوت دیده می‌شود. توزیع زمانی و مکانی گردشگری دراین شهر نشان می دهد که در ماههای ژانویه (دی)وفوریه(بهمن) به علت سرمای زیاد وریزش برف به طور کلی شرایط برای حضور گردشگر چندان مناسب نیست. البته با برنامه ریزی و سرمایه گذاری می توان در ارتفاعات این شهر توریسم زمستانی را در در این ماهها رونق داد.از طرفی، آسایش اقلیمی در فصول بهار و تابستان برای گردشگری فراهم است که با شاخصPMV به مدت ۲۵۳ روز در سال، و با شاخص PET به مدت ۲۳۱ روز در سال، از ۹ اردیبهشت تا ۱۹ مهر می باشد. نتایج حاصل از شاخص های TCI، PMV وPET حاکی از همخوانی و تناسب نتایج پژوهش و واقعیت های اقلیمی و بیوکلیمایی است. این نتایج می تواند خود راهنمای مناسبی برای اخذ تصمیم مناسب جهت سرمایه گذاری در بخش گردشگری در این کلا ن شهر مهم شود.

منابع

انصاری، رقیه(۱۳۹۰)، مطالعه اقلیم توریستی و تعیین تقویم مناسب گردشگری در استان آذربایجان غربی پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه تبریز.

جلالی عنصرودی، طاهره، (۱۳۸۸)، بررسی و پهنه‌بندی اقلیم‌توریستی استان آذربایجان شرقی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علم انسانی و اجتماعی، دانشگاه تبریز.

جهانبخش، سعید، نجما، اسمعیل پور، (۱۳۸۳)، مبانی طراحی اقلیمی واحدهای مسکونی شهر یزد (مبانی حرارتی و نور گیری)، فصلنامه تحقیقات سرزمین، سال اول ،شماره ۲.

خاماچی، بهروز، ۱۳۸۰، طرح مطالعاتی- تحقیقاتی گردشگری تبریز (با نگاهی بر صنعت گردشگری استان)، شهرداری تبریز.

ذوالفقاری،حسن(۱۳۷۸)،ارزیابی تأثیر آب و هوا بر صنعت توریسم،مجله رشد آموزش جغرافیا،شماره،۵۳.

ذوالفقاری، حسن، (۱۳۸۶)، تعیین تقویم زمانی مناسب برای گردش در تبریز با استفاده از شاخص های دمای فیزیولوژی و متوسط نظرسنجی پیش‌بینی شده، پژوهش های جغرافیایی.

ذوالفقاری، حسن، ۱۳۸۹، آب و هواشناسی توریسم، تهران، انتشارات سمت.

کرمی،ف، شعبانی عراقی،ع، نجار،ع(۱۴۰۳) آموزش محاسبه تیپ¬بندی اقلیمی کوپن–تراورتا و مقایسه با روش تیپ¬بندی اقلیمی کوپن،پژوهش در آموزش مطالعات اجتماعی،شماره ۳.

Baker, B., Diaz, H., Hargrove, W., Hoffman, F., 2010, Use of the Köppen–Trewartha climate classification to evaluate climatic refugia in statistically derived ecoregions for the People's Republic of China, Springer, 98-113

Endler, C.Matzarakis.A, (2007). Climate - Change and Climate - Tourism Relationship in Germany . in: A.Matzarakis, C, C.R. de freitas, D Scott (eds), Developments in Tourism Climatology , 260 - 266.

Matzarakis , A , 2007, Assessing climate for tourism purposes: Existing methods and Climate, Tourism and Recreation tools for the thermal complex , In Proceedings of the First International Workshop on Climate, Tourism and Recreation , www.mif.uni-freiburg.de/isb .

Mieczkowski , Z , 1985, The tourism climatic index a method of evaluatin world climates for tourism , Canadian Geographer ,29(3).

Mayer, H., Höppe, P., (1998) Methods for the human-biometerological assessment of climate and air hygiene for urban and regional planning. Part I: Climate, VDI guideline 3787. Part 2. Beuth, Berlin

Perry, A., (1997): more heat and drought: can Mediterranean tourism survive and prosper? In proceedings of the first international workshop on climate, tourism and recreation, A. matzarakis and C. de freitas, eds., pp 69-89, international society of biometeorology.

Simpson. M.C, Gossling. S

Perry, A., (2001): more heat and drought: can Mediterranean tourism survive and prosper? In proceedings of the first international workshop on climate, tourism and recreation, A. matzarakis and C. de freitas, eds., pp 69-89, international society of biometeorology.

Simpson. M.C, Gossling. S,Scott. D, Hall C. M, and Glodin. E (2008). Climate change adaption and Mitigation in the Tourism Sector. Frame Works, tools and practices, UNEP, unversity of oxford, UNWTOMO. Paris, Farnce.

Serrano, A., Mateos, V.L., and Garcia, J.A., (1999). Trend Analysis of Monthly Precipitation Over the Iberian Peninsula for the Period 1921-1995. phys. Chem. EARTH(B), VOL.24, NO. 1-2:85-90.

Sueyers, R., (1990), "On the Statistical Analysis of Series of Observation" WMO, 415: 2-15.

Turkes, M. Sumer, U.M. & Demir, I., (2002), "Re- Evaluation of Trends and Changes in mean. Maximum and Minimum Temperatures of Turkey for the Period 1929-1999" Int. Journal of Climatol, 22:947-977.

تأثیر تغییرات اقلیمی بر الگوهای بارش و دما در ایران

اسماعیل قلی نژاد

دانشیار، گروه علمی علوم کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران
آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول (e_gholinejad@pnu.ac.ir)

چکیده

تغییرات اقلیمی تنها یک چالش نیست، بلکه یک واقعیت مسلم علمی است که عمدتاً ناشی از افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر است. این پدیده، سیستم‌های آب و هوایی کره زمین را دچار اختلال کرده است .این مقاله به صورت کمی و با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک و خروجی مدل‌های اقلیمی تحت سناریوهای مختلف انتشار گازهای گلخانه‌ای به بررسی روندهای گذشته و پیش‌بینی آینده پارامترهای اقلیمی در ایران می‌پردازد. این مطالعه به طور خاص به افزایش نرخ گرمایش در ایران نسبت به میانگین جهانی (یعنی بیش از ۱.۵ درجه سانتیگراد) اشاره می‌کند. این افزایش دما منجر به افزایش تبخیر و تعرق و تشدید تنش آبی می‌شود. این تغییرات تنها به کاهش یا افزایش بارش خلاصه نمی‌شود، بلکه به تغییر در توزیع مکانی و زمانی بارشها نیز مربوط می‌شود. به عنوان مثال، کاهش بارش برف در ارتفاعات (که منبع اصلی آب رودخانه‌هاست) و افزایش بارش‌های سیلابی شدید و کوتاه‌مدت از جمله این تغییرات هستند. افزایش فراوانی و شدت امواج گرمایی، خشکسالی‌های ممتد، و سیلاب‌های ناگهانی از دیگر یافته‌های کلیدی است. تاثیر تغییرات اقلیمی بر کشاورزی شامل کاهش عملکرد محصولات استراتژیک، افزایش نیاز آبی گیاهان، و گسترش آفات و بیماری‌های جدید و باعث کاهش آب‌های سطحی و زیرزمینی، تشدید رقابت بر سر آب بین بخش‌های مختلف، و بحران در تأمین آب شرب شهری خواهد بود در مورد اکوسیستم‌های طبیعی، افزایش خطر بیابان‌زایی، تغییر در پراکنش گونه‌های گیاهی و جانوری، و تخریب زیستگاه‌ها اتفاق خواهد افتاد. در نهایت، پیشنهاداتی برای مدیریت و سازگاری با این تغییرات ارائه می‌شود.

کلید واژه‌ها : الگوهای بارش، پدیده‌های جوی، تغییرات اقلیمی، سازگاری‌های اقلیمی.

مقدمه

تغییرات اقلیمی به عنوان یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های پیش روی بشر در قرن بیست و یکم، یک پدیده کاملاً جهانی است که مرزهای سیاسی را نادیده می‌گیرد. این پدیده عمدتاً ناشی از فعالیت‌های انسانی، به ویژه افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای است که منجر به برهم خوردن تعادل انرژی سیستم زمین شده است (IPCC, 2021). پیامد این اختلال، ایجاد تغییرات عمیق و گسترده در سامانه‌های آب و هوایی در مقیاس جهانی است، به طوری که الگوهای ثابت و شناخته شده آب و هوایی در گذشته اکنون در حال دگرگونی هستند (NASA, 2020).

ایران، با موقعیت جغرافیایی خاص خود، از یک تنوع اقلیمی چشمگیر برخوردار است که از شرایط خشک و بیابانی در مرکز تا آب و هوای نیمه‌مرطوب در حاشیه دریای خزر و کوهستانی در غرب را در بر می‌گیرد (Rahimzadeh et al., 2015). این تنوع، کشور را به طور همزمان در برابر طیف وسیعی از پیامدهای تغییرات اقلیمی بسیار آسیب‌پذیر کرده است. ایران در کمربند خشک جهان واقع شده و به طور تاریخی با محدودیت منابع آب دست و پنجه نرم کرده است (Madani, 2014). بنابراین، هرگونه تغییر در رژیم دما و بارش می‌تواند تشدیدکننده بحران‌های موجود باشد.

مشاهدات مبتنی بر داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک در سال‌های اخیر، گواه بروز تغییرات محسوس و نگران‌کننده‌ای در پارامترهای کلیدی آب و هوایی ایران است. این تغییرات تنها به افزایش میانگین دما محدود نمی‌شود، بلکه شامل نوسانات شدید دما، تغییر در توزیع مکانی و زمانی بارش‌ها (مانند کاهش بارش برف و افزایش باران‌های رگباری شدید)، و افزایش تکرار و شدت پدیده‌های حدی مانند امواج گرمایی، خشکسالی‌های ممتد و سیلاب‌های ناگهانی می‌شود (Khosravi et al., 2018; Zare et al., 2019).

این نوسانات آب و هوایی مستقیم و غیرمستقیم، پایه‌های اصلی اقتصاد و معیشت در ایران را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بخش کشاورزی که به شدت به آب و هوای متعادل وابسته است، با مخاطراتی چون کاهش عملکرد محصول، افزایش نیاز آبی گیاهان و شیوع آفات و بیماری‌های جدید مواجه خواهد شد (Karimi et al., 2018) . منابع آب، به عنوان عنصری حیاتی، تحت فشار مضاعف قرار می‌گیرند؛ چرا که از یک سو با کاهش آب‌های زیرزمینی و سطحی و از سوی دیگر با افزایش تبخیر و مصرف آب روبرو هستند (Gohari et al., 2013). همچنین، اکوسیستم‌های طبیعی حساس ایران، از جمله جنگل‌ها و تالاب‌ها، در معرض تهدیداتی چون بیابان‌زایی، تغییر در پراکنش گونه‌ها و تخریب قرار دارند (Jafari et al., 2021).
هدف اصلی این مقاله، ارائه یک تحلیل کمی و نظام‌مند از تأثیرات تغییرات اقلیمی بر دو پارامتر بنیادین آب و هوا، یعنی دما و بارش، در گستره ایران است. این پژوهش با تلفیق تحلیل داده‌های تاریخی بلندمدت (برای شناسایی روندهای گذشته) و خروجی مدل‌های اقلیمی منطقه‌ای (برای پیش‌بینی شرایط آینده تحت سناریوهای مختلف انتشار)، در پی پاسخگویی به این پرسش‌ها است: روند تغییرات دما و بارش در مناطق مختلف ایران چگونه بوده و خواهد بود؟ آیا می‌توان الگوی مکانی مشخصی برای این تغییرات شناسایی کرد؟ این تغییرات چه تهدیدات مشخصی را برای بخش‌های مختلف ایجاد می‌کند؟

یافته‌های این مطالعه می‌تواند مبنای علمی محکمی برای تدوین راهبردهای سازگاری و کاهش اثرات در سطح ملی و منطقه‌ای فراهم آورد.

مواد و روش‌ها

این مطالعه به صورت مروری و با استفاده از داده‌های تاریخی و پیش‌بینی‌های اقلیمی انجام شده است. داده‌های مربوط به دما و بارش از سازمان هواشناسی ایران و دیگر منابع معتبر علمی جمع‌آوری شده است. همچنین، برای تحلیل داده‌ها از روش‌های آماری و مدل‌سازی اقلیمی استفاده شده است. مدل‌های اقلیمی مختلفی مانند مدل‌های عمومی گردش جو و مدل‌های منطقه‌ای برای پیش‌بینی تغییرات آینده استفاده شده‌اند.

نتایج

تغییرات دما

تحلیل داده‌های تاریخی نشان می‌دهد که دمای متوسط در ایران در دهه‌های اخیر به طور قابل توجهی افزایش یافته است. بر اساس گزارش‌های سازمان هواشناسی، دمای متوسط سالانه در ایران از سال ۱۹۷۶ تا ۲۰۱۶ به طور متوسط ۱.۵ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است (Khosravi et al., 2018). این افزایش دما می‌تواند به افزایش تبخیر و کاهش منابع آب منجر شود. این افزایش دما نه تنها یک نگرانی محلی، بلکه بخشی از یک روند جهانی است، اما نرخ افزایش دما در ایران بیش از میانگین جهانی گزارش شده است. این افزایش دما منجر به کاهش دوره یخبندان و ذوب زودتر برف‌ها، افزایش نیاز آبی گیاهان و تبخیر از سطح خاک، تشدید پدیده جزیره گرمایی شهری در کلان‌شهرها و افزایش مصرف انرژی برای سرمایش خواهد شد.

تغییرات بارش

الگوهای بارش نیز تحت تأثیر تغییرات اقلیمی قرار گرفته‌اند. داده‌ها نشان می‌دهند که بارش در برخی مناطق ایران کاهش یافته و در برخی دیگر افزایش یافته است. به عنوان مثال، در مناطق شمالی کشور، بارش‌ها به طور متوسط ۱۰ تا ۲۰ درصد افزایش یافته است، در حالی که در مناطق مرکزی و جنوبی، کاهش بارش‌ها به میزان ۲۰ تا ۳۰ درصد گزارش شده است (Zare et al., 2019).

این تغییرات نشان‌دهنده تغییر در الگوهای گردش جوی منطقه است:

کاهش بارش برف در ارتفاعات و تبدیل آن به باران

افزایش بارش‌های شدید و کوتاه‌مدت به جای بارش‌های ملایم و مداوم

جابجایی زمانی فصل بارش‌ها

تشدید ناهماهنگی مکانی بین مناطق پربارش و کم‌بارش

فراوانی پدیده‌های شدید آب و هوایی

تغییرات اقلیمی همچنین منجر به افزایش فراوانی پدیده‌های شدید آب و هوایی مانند سیلاب‌ها و خشکسالی‌ها شده است. بر اساس گزارش‌ها، تعداد روزهای خشکسالی در ایران از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۰ به طور متوسط ۱۵ درصد افزایش یافته است (Mohammadi et al., 2020). این تغییرات می‌تواند تأثیرات جدی بر کشاورزی و منابع آب داشته باشد. فراوانی پدیده‌های شدید آب و هوایی شامل افزایش فرکانس و شدت امواج گرمایی، تشدید چرخه خشکسالی‌های پی در پی، افزایش سیلاب‌های ناگهانی به دلیل بارش‌های شدید و تغییر در الگوی طوفان‌های گرد و غبار می‌باشد.

بحث

تغییرات اقلیمی تأثیرات عمیقی بر الگوهای بارش و دما در ایران دارد. این تغییرات می‌تواند به چالش‌های جدی در زمینه مدیریت منابع آب، کشاورزی و حفظ اکوسیستم‌ها منجر شود.

تأثیر بر کشاورزی

افزایش دما و تغییرات بارش می‌تواند به کاهش تولیدات کشاورزی و افزایش هزینه‌های تولید منجر شود (Karimi et al., 2018). کشاورزان باید به تغییرات آب و هوایی پاسخ دهند و روش‌های کشاورزی خود را تغییر دهند. استفاده از کشت‌های مقاوم به خشکی و بهینه‌سازی مصرف آب می‌تواند به کاهش تأثیرات منفی کمک کند (Malekian et al., 2019). تاثیر تغییرات اقلیمی بر کشاورزی شامل کاهش دوره رشد گیاهان و افزایش تنش گرمایی، افزایش شیوع آفات و بیماری‌های جدید، کاهش کیفیت محصولات کشاورزی، لزوم بازنگری در تقویم کشت مناطق مختلف و ضرورت توسعه سیستم‌های هشدار زودهنگام برای کشاورزان می‌باشد (IPCC, 2022).

تأثیر بر منابع آب

کاهش بارش و افزایش تبخیر می‌تواند به کاهش منابع آب زیرزمینی و سطحی منجر شود (Gohari et al., 2013). این موضوع می‌تواند به بحران آب در کشور منجر شود (Madani, 2014). مدیریت بهینه منابع آب و استفاده از فناوری‌های نوین در آبیاری می‌تواند به بهبود وضعیت منابع آب کمک کند (Ashraf et al., 2021). تاثیر تغییرات اقلیمی بر منابع آب شامل کاهش آبدهی چشمه‌ها و قنوات، پایین رفتن شدید سطح آب‌های زیرزمینی، شور شدن آب‌های زیرزمینی به دلیل کاهش تغذیه، افزایش تنش آبی بین بخش‌های مختلف مصرف و لزوم اجرای طرح‌های تغذیه مصنوعی سفره‌های آب زیرزمینی می‌باشد (Zarei et al., 2020).

تأثیر بر اکوسیستم‌ها

تغییرات اقلیمی می‌تواند به تغییرات در زیستگاه‌ها و تنوع زیستی منجر شود (Jafari et al., 2021). از بین رفتن گونه‌های گیاهی و جانوری و تغییر در الگوهای مهاجرت می‌تواند به کاهش تنوع زیستی منجر شود (Díaz et al., 2019). حفاظت از

اکوسیستم‌ها و ایجاد مناطق حفاظت شده می‌تواند به حفظ تنوع زیستی کمک کند (Watson et al., 2014). تغییر در محدوده پراکنش گونه‌ها به سمت ارتفاعات بالاتر، افزایش خطر انقراض گونه‌های بومی و حساس، تغییر در زمان‌بندی رویدادهای زیستی (فنولوژی)، تخریب زیستگاه‌های حساس مانند تالاب‌ها، لزوم ایجاد کریدورهای مهاجرتی برای گونه‌های جانوری از نتایج تاثیرات تغییرات اقلیمی بر اکوسیستم‌ها می‌باشد (Parmesan & Yohe, 2003; Root et al., 2003).

نتیجه‌گیری

این مطالعه به وضوح نشان می‌دهد که تغییرات اقلیمی تأثیرات عمیق و چندبعدی بر الگوهای بارش و دما در ایران داشته است. یافته‌ها حاکی از آن است که ایران با نرخ گرمایشی فراتر از میانگین جهانی مواجه است که این پدیده موجب تشدید تنش آبی، تغییر الگوهای بارشی و افزایش فراوانی رویدادهای حدی آب و هوایی شده است. کاهش بارش برف در ارتفاعات، افزایش بارش‌های سیل‌آسا و تشدید خشکسالی‌های ممتد، سیستم‌های طبیعی و انسانی را با چالش‌های بی‌سابقه‌ای مواجه کرده است. پیامدهای این تغییرات در بخش کشاورزی به صورت کاهش عملکرد محصولات استراتژیک، در بخش منابع آب به شکل بحران کم‌آبی و در اکوسیستم‌های طبیعی به صورت تخریب زیستگاه‌ها و کاهش تنوع زیستی نمایان شده است. این پژوهش ضرورت اتخاذ راهبردهای سازگاری یکپارچه شامل مدیریت پایدار منابع آب، اصلاح الگوی کشت، توسعه سیستم‌های هشدار زودهنگام و حفاظت از اکوسیستم‌های طبیعی را بیش از پیش آشکار می‌سازد. موفقیت در کاهش اثرات تغییرات اقلیمی مستلزم همکاری بین‌بخشی، تدوین سیاست‌های مبتنی بر شواهد علمی و مشارکت فعال جامعه محلی است. برای مقابله با تأثیرات تغییرات اقلیمی، نیاز به یک رویکرد مدیریتی جامع وجود دارد. این رویکرد باید شامل: مدیریت منابع آب، استفاده بهینه از منابع آب و توسعه فناوری‌های نوین در آبیاری، ترویج کشت‌های مقاوم به خشکی و استفاده از روش‌های کشاورزی پایدار، افزایش آگاهی عمومی در مورد تغییرات اقلیمی و تأثیرات آن بر زندگی روزمره باشد همچنین تغییرات اقلیمی یک چالش جهانی است و نیاز به همکاری‌های بین‌المللی دارد. ایران می‌تواند با کشورهای همسایه و سازمان‌های بین‌المللی همکاری کند تا تجربیات و منابع را به اشتراک بگذارد و به مدیریت بهتر تغییرات اقلیمی کمک کند.

منابع

Ashraf, S., Nazemi, A., & AghaKouchak, A. (2021). Anthropogenic drought: Definition, challenges, and opportunities. Reviews of Geophysics, 59(2), e2019RG000683.
Díaz, S., et al. (2019). Pervasive human-driven decline of life on Earth points to the need for transformative change. Science, 366(6471), eaax3100.
Gohari, A., Eslamian, S., Mirchi, A., Abedi-Koupaei, J., Bavani, A. M., & Madani, K. (2013). Water transfer as a solution to water shortage: A fix that can backfire. Journal of Hydrology, 491, 23–39.
IPCC. (2021). Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
IPCC. (2022). Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability. Cambridge University Press.

Jafari, M., Tavili, A., & Panahi, F. (2021). Impacts of climate change on wetland ecosystems in Iran: A review. Wetlands Ecology and Management, 29(2), 145–160.

Karimi, V., Karami, E., & Keshavarz, M. (2018). Climate change and agriculture: Impacts and adaptive responses in Iran. Journal of Integrative Agriculture, 17(1), 1–15.

Khosravi, A., & Mohammadi, M. (2018). "Climate change impacts on temperature and precipitation patterns in Iran." Climate Dynamics*, 50(5-6), 1234-1248.

Khosravi, M., Tahroudi, M. N., & Mirabbasi, R. (2018). Analysis of trends in temperature and precipitation extremes in Iran using RClimDex. Theoretical and Applied Climatology, 134(3–4), 1395–1414.

Madani, K. (2014). Water management in Iran: What is causing the looming crisis? Journal of Environmental Studies and Sciences, 4(4), 315–328.

Malekian, A., et al. (2019). Livelihood vulnerability and adaptation strategies to environmental changes in the Urmia Lake Basin. Climate and Development, 11(9), 803–814.

Mohammadi, S., & Rahimi, M. (2020). "Extreme weather events in Iran: Trends and impacts." Environmental Monitoring and Assessment, 192(4), 1-15.

NASA. (2020). Global climate change: Vital signs of the planet. National Aeronautics and Space Administration. Retrieved from https://climate.nasa.gov

Parmesan, C., & Yohe, G. (2003). A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. Nature, 421(6918), 37–42.

Rahimzadeh, F., Asgari, A., & Fattahi, E. (2015). Variability of extreme temperature and precipitation in Iran during recent decades. International Journal of Climatology, 35(15), 4682–4698.

Root, T. L., et al. (2003). Fingerprints of global warming on wild animals and plants. Nature, 421(6918), 57–60.

Watson, J. E., Dudley, N., Segan, D. B., & Hockings, M. (2014). The performance and potential of protected areas. Nature, 515(7525), 67–73.

Zare, A., & Khosravi, H. (2019). "Trends in precipitation and temperature in Iran: A review." Journal of Hydrology, 577, 123-135.

Zare, S., Mardani, A., & Ghasemi, A. R. (2019). Spatiotemporal variation of precipitation in Iran using gridded data. Journal of Hydrology, 578, 124052.

Zarei, A. R., Moghimi, M. M., & Koohi, E. (2020). Evaluation of groundwater quality and assessment of pollution indices in Iran. Environmental Monitoring and Assessment, 192(12), 1–18.

The impact of climate change on precipitation and temperature patterns in Iran

Esmaeil Gholinezhad

Associate Professor, Department of Agricultural Sciences, Payame Noor University, Tehran, Iran.

* Corresponding author: e_gholinejad@pnu.ac.ir

ABSTRACT

Climate change is not merely a challenge but a scientific certainty, primarily driven by increasing concentrations of greenhouse gases in the atmosphere. This phenomenon has disrupted Earth's climatic systems. This study employs a quantitative approach, utilizing data from synoptic stations and outputs from climate models under various greenhouse gas emission scenarios, to examine historical trends and project

future climate parameters in Iran. Specifically, the research highlights that the rate of warming in Iran exceeds the global average (i.e., more than 1.5°C). This temperature rise leads to increased evaporation and transpiration, exacerbating water stress. These changes are not limited to simple increases or decreases in precipitation but also involve shifts in its spatial and temporal distribution. For instance, reductions in snowfall in mountainous regions (which are the primary source of river water) and an increase in intense, short-duration flood-producing rainfall are among these changes. Another key finding is the rising frequency and intensity of heatwaves, prolonged droughts, and sudden floods. The impact of climate change on agriculture includes reduced yields of strategic crops, increased crop water requirements, and the spread of new pests and diseases. It will also lead to diminished surface and groundwater resources, intensified competition for water among different sectors, and crises in urban drinking water supply. Regarding natural ecosystems, desertification risks will rise, plant and animal species distributions will shift, and habitats will degrade. Finally, recommendations for managing and adapting to these changes are presented.

Keywords: Atmospheric phenomena, Climate adaptations, Climate change, Precipitation patterns.

نقش سیستم‌های اگری‌ولتائیک در توسعه پایدار مناطق خشک و نیمه‌خشک

معصومه موقری[۱]، زهرا حیات[۲]

۱- استادیار گروه مهندسی طبیعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان
۲- دانشجوی کارشناسی مهندسی طبیعت، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی خوزستان
Email:movaghari@asnrukh.ac.ir

چکیده

با افزایش تقاضا برای انرژی‌های تجدیدپذیر، توسعه مزارع خورشیدی در مقیاس بزرگ به سرعت در حال گسترش است. با این حال، این توسعه اغلب با چالش رقابت بر سر کاربری اراضی ارزشمند کشاورزی و مرتعی مواجه می‌شود. سیستم‌های اگری ولتائیک به عنوان راه‌حلی نوآورانه پدید آمده‌اند که هدف آن یکپارچه‌سازی تولید انرژی خورشیدی با فعالیت‌های کشاورزی و دامداری در یک واحد زمین است. این تلفیق می‌تواند منجر به ایجاد مزایایی از جمله افزایش بهره‌وری کلی زمین (استفاده چندمنظوره از اراضی)، کاهش فشار بر منابع آبی، تأمین انرژی پاک، ایجاد درآمد مضاعف برای کشاورزان و مرتعداران، حفظ پوشش گیاهی و کاهش فرسایش خاک شود. مقاله حاضر با ارائه نقشه پهنه‌بندی انرژی خورشیدی در کشور با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای، تابش سالانه در مناطق مختلف ایران را مقایسه کرده و از طرفی با مروری بر منابع موجود، به معرفی انواع سیستم‌ها و عوامل مهم طراحی شامل زاویه نصب، فاصله بین ردیف‌ها، ارتفاع پنل‌ها و نوع گیاهان می‌پردازد. سپس مزایا و محدودیت‌های این فناوری، مانند افزایش بهره‌وری زمین، بهبود شرایط ریزاقلیمی، کاهش تبخیر و تعرق و چالش‌هایی نظیر هزینه‌های بالای نصب و کاهش عملکرد برخی محصولات را بررسی می‌کند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد عرصه‌های وسیعی از ایران به دلیل تابش سالانه بیش از ۱۸۰۰ کیلووات‌ساعت بر متر مربع در سال، پتانسیل بسیار بالایی برای اجرای پروژه‌های اگری‌ولتائیک دارا می‌باشند. البته شایان ذکر است که علاوه بر معیار شدت تابش، موفقیت اینگونه سیستم‌ها در گرو توجه به سایر عوامل مؤثر از جمله عوامل اقلیمی، جغرافیایی، اقتصادی، زیرساختی و توسعه سیاست‌های حمایتی است. سیستم‌های اگری‌ولتائیک رویکردی پایدار و آینده‌نگرانه برای همسوسازی امنیت غذایی، امنیت انرژی و حفاظت از اکوسیستم‌ها ارائه می‌دهند و می‌تواند با ارائه راهکارهای عملی و بومی‌سازی‌شده در مناطق خشک و نیمه‌خشک همچون ایران، نقش مؤثری ایفا کند.

کلید واژه‌ها : کشاورزی خورشیدی، استفاده دوگانه از زمین، انرژی تجدیدپذیر، امنیت غذایی.

مقدمه

آب، انرژی و غذا سه منبع حیاتی برای برآوردن نیازهای بشر و ادامه حیات روی زمین به شمار می‌روند. این منابع، به‌ویژه در شرایط کنونی، با چالش‌های متعددی روبه‌رو هستند که از جمله می‌توان به محدودیت دسترسی، افزایش تقاضا و مسائل مرتبط با پایداری اشاره کرد (Refaat and Ismail, 2017). بر اساس گزارش سازمان ملل متحد، جمعیت جهان در سال ۲۰۳۰ حدود ۸.۵ میلیارد نفر خواهد بود و پیش‌بینی می‌شود این رقم تا دهه ۲۰۸۰ به بیش از ۱۰.۴ میلیارد نفر افزایش یابد (United Nations, 2022).این رشد جمعیتی سریع، نیاز به تولید مواد غذایی را به‌شدت افزایش خواهد داد. برآوردها نشان می‌دهد تولیدات کشاورزی باید بین ۶۰ تا ۱۰۰ درصد افزایش یابد (Dinesh and Pearce, 2016).

با این حال، بخش کشاورزی جهان با محدودیت‌هایی مانند کمبود آب و انرژی مواجه است که این چالش‌ها مانعی برای توسعه پایدار آن به‌شمار می‌روند (Sass and Hahn, 2020). بخش کشاورزی، که مصرف‌کننده عمده آب و انرژی است، سهم قابل‌توجهی در انتشار گازهای گلخانه‌ای دارد. در برخی کشورها تا ۳۵ درصد از انتشار کل گازهای گلخانه‌ای مربوط به فعالیت‌های کشاورزی است (Rahman et al,2022). وابستگی بالای این بخش به سوخت‌های فسیلی برای تولید کود، آبیاری و مکانیزاسیون، افزایش گرمایش جهانی و تغییرات اقلیمی را تسریع کرده است (Rahman et al,2022).

در این میان، توسعه فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر، به ویژه سیستم‌های خورشیدی فوتوولتائیک (PV)، فرصت‌های جدیدی را برای کاهش اثرات زیست‌محیطی و تأمین انرژی پایدار فراهم آورده است (Pearce, 2002; Barker and Bing, 2005). بر اساس گزارش آژانس بین‌المللی انرژی (IEA,2014)، فناوری پنل‌های خورشیدی فوتوولتائیک طی سال‌های اخیر پیشرفت چشم‌گیری داشته است. پیش‌بینی می‌شود تا سال ۲۰۵۰ بیش از ۶۰۰۰ تراوات‌ساعت انرژی خورشیدی تولید شود. با این حال، احداث مزارع خورشیدی گسترده به زمین‌های وسیعی نیاز دارد و این امر رقابت با زمین‌های کشاورزی را افزایش می‌دهد (Dinesh and Pearce, 2016). این مسئله در مناطق پرجمعیت و با محدودیت زمین، چالش‌برانگیزتر است United Nations Department of Economic and Social Affairs, 2014).

به همین دلیل، سامانه‌های اگری‌ولتائیک که نخستین بار در سال ۱۹۸۲ توسط گوتزبرگر و زاسترو (Goetzberger and Zastrow, 1982) مطرح شدند، راهکاری نوآورانه برای تولید هم‌زمان انرژی خورشیدی و محصولات کشاورزی بر روی یک قطعه زمین واحد به‌شمار می‌آیند. این تلفیق می‌تواند منجر به ایجاد مزایایی از جمله: افزایش بهره‌وری زمین (تولید همزمان غذا و انرژی در یک قطعه زمین)، کاهش فشار بر منابع آبی (سایه‌اندازی پنل‌ها که میزان تبخیر آب از سطح خاک و نیاز آبی برخی گیاهان را کاهش می‌دهد)، تأمین انرژی پاک برای عملیات کشاورزی و دامداری (انرژی تولید شده می‌تواند برای پمپاژ آب، سیستم‌های روشنایی و سایر نیازهای مزرعه استفاده شود)، ایجاد درآمد مضاعف برای کشاورزان و مرتعداران (فروش برق تولیدی به شبکه، درآمدی پایدار و مکمل ایجاد می‌کند)، حفظ پوشش گیاهی و کاهش فرسایش خاک (ساختار مزرعه خورشیدی می‌تواند از زمین در برابر عوامل فرساینده محافظت کند) شود. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که با بهینه‌سازی زاویه نصب پنل‌ها و فاصله‌گذاری مناسب، می‌توان بازده انرژی خورشیدی را افزایش داد. این اقدامات همچنین اثرات

سایه‌اندازی بر محصولات کشاورزی را به حداقل می‌رسانند. این رویکرد می‌تواند به افزایش بهره‌وری زمین و کاهش تأثیرات زیست‌محیطی کمک کند. همچنین، به‌عنوان راهکاری پایدار برای تأمین همزمان انرژی و غذا مطرح است (Dinesh and Pearce, 2016). علاوه بر این، بحران‌های جهانی مانند پاندمی COVID-19 و رخدادهای شدید آب و هوایی اهمیت پایداری و امنیت انرژی را بیش از پیش نشان داده‌اند (Coşgun et al,2024). منابع انرژی تجدیدپذیر، که عمدتاً از خورشید تأمین می‌شوند و به‌طور طبیعی تجدید می‌گردند، گازهای گلخانه‌ای تولید نمی‌کنند. این منابع راهکاری مؤثر برای مقابله با تغییرات اقلیمی و کاهش انتشار کربن به شمار می‌روند (Guney, 2016).

سیستم اگری‌ولتائیک در مناطق مختلف با اصطلاحاتی چون «کاربرد دوگانه»، «هم‌مکانی»، «کشاورزی خورشیدی»، «سیستم‌های agri-PV» و حتی «خورشید دوستدار گرده‌افشان‌ها» شناخته می‌شود (Hernandez et al,2019).ویژگی مهم این فناوری، ایجاد رابطه‌ای هم‌افزا میان کشاورزی و انرژی است که به بهینه‌سازی عملکرد هر دو بخش کمک می‌کند (Weselek et al,2019). این مزیت به‌ویژه در سامانه‌های جنگلداری-کشاورزی برجسته‌تر است (Schindele et al,2020) .با توجه به این‌که سیستم‌های PV نیازمند سطح قابل توجهی زمین هستند که معمولاً برای کشاورزی قابل استفاده نیست، ضرورت وجود راهکارهایی برای ادغام بهینه این فناوری‌ها در عرصه‌های طبیعی بیش از پیش احساس می‌شود (Kabalci,2013). ارزیابی عملکرد و کاربرد این سامانه‌ها در شرایط اقلیمی و اقتصادی ایران یکی از ضرورت‌های مهم تحقیقاتی محسوب می‌شود.

مزایا و اثرات سامانه‌های اگری‌ولتائیک

مطالعات متعددی نشان داده‌اند که سامانه‌های اگری‌ولتائیک با بهینه‌سازی ریزاقلیم و کاهش تنش‌های محیطی می‌توانند عملکرد کشاورزی و بهره‌وری انرژی خورشیدی را افزایش دهند و همچنین به کاهش فرسایش خاک کمک کنند (مختارزاده و گرجیان،۲۰۲۲). شواهد موجود نشان می‌دهد که هر دو نوع اگری‌ولتائیک، اعم از سیستم‌های باز و بسته، نقش مؤثری در بهینه‌سازی مصرف منابع و افزایش تاب‌آوری کشاورزی در برابر تغییرات اقلیمی دارند. بهره‌وری زمین در این سیستم‌ها می‌تواند تا ۷۰ درصد افزایش یابد. این میزان به نوع گیاه، شرایط اقلیمی و شاخص نسبت معادل زمینی (LER) بستگی دارد که در برخی موارد به بیش از ۱ نیز رسیده است (Weselek et al,2019; Trommsdorff et al,2021).علاوه بر این، ارزش اقتصادی زمین با استفاده از این سیستم‌ها تا بیش از ۳۰ درصد افزایش می‌یابد؛ به‌ویژه زمانی که گیاهان زیر پنل‌ها به‌طور صحیح انتخاب شوند (Dinesh and Pearce, 2016).

اگری‌ولتائیک و بهره‌وری منابع آب

از منظر بهره‌وری منابع آب، Barron و همکاران(2019) گزارش دادند که نصب پنل‌های خورشیدی در برخی کشت‌ها مانند فلفل، کارایی مصرف آب را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد. همچنین، نتایج پژوهش Adeh و همکاران (2018) نشان می‌دهد که سامانه‌های اگری‌ولتائیک رطوبت خاک را افزایش می‌دهند و بهره‌وری آبیاری را تا ۳۲۸ درصد ارتقا می‌بخشند. مطالعات موردی متعددی نیز اثر سامانه‌های اگری‌ولتائیک بر عملکرد محصولات کشاورزی را بررسی کرده‌اند. در مطالعه‌ای در فرانسه، کاهش ۸ تا ۱۱ درصدی عملکرد گندم دوروم زیر پنل‌های خورشیدی گزارش شد، در حالی‌که محصولات

سایه‌دوستی مانند گوجه‌فرنگی و فلفل بومی عملکرد بهتری در شرایط سایه از خود نشان داده‌اند (Marrou et al,2013).همچنین، همین مطالعه نشان داد که تبخیر سطحی خاک در کشت‌هایی مانند کاهو و خیار زیر پنل‌ها به ترتیب تا ۶۲ و ۷۰ درصد کاهش یافته است (Marrou et al,2013).

مطالعه Yue و همکاران (2020) نشان داد که رطوبت خاک در سامانه‌های اگری‌ولتائیک تا ۱۴.۷ درصد افزایش یافته است. همچنین، دمای خاک در تابستان بین ۳.۵ تا ۷.۶ درجه سانتی‌گراد کاهش یافته است. مدل‌سازی انجام‌شده توسط Elamri و همکاران (2018) نیز نشان داد که سایه حاصل از پنل‌ها می‌تواند نیاز آبی گیاهانی مانند کاهو را تا کمتر از ۲۰ درصد کاهش دهد.

در مجموع، سیستم‌های اگری‌ولتائیک با ایجاد سایه مناسب و تعدیل شرایط ریزاقلیمی، مصرف آب را تا ۲۰–۴۷٪ کاهش داده و دمای خاک و هوا را ۱–۴ درجه سانتی‌گراد پایین می‌آورند که این تأثیرات به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران اهمیت فراوانی دارند. این سامانه‌ها با بهبود مقاومت گیاهان در برابر تنش آبی، عملکرد محصولات کشاورزی را در این مناطق بهبود می‌بخشند (Scognamiglio et al,2023; Dupraz et al,2011).

سیستم اگری‌ولتائیک باز و بسته

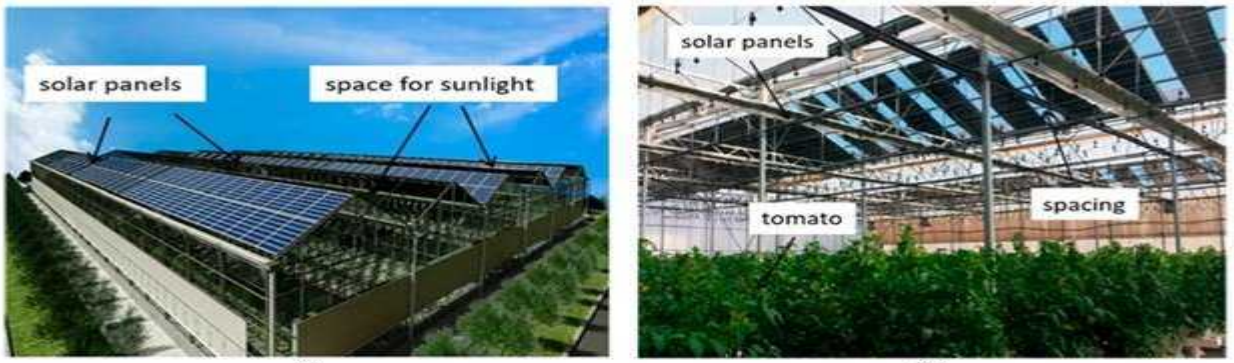
نحوه اجرای سیستم‌های اگری‌ولتائیک بسته به نوع فعالیت کشاورزی در هر منطقه متفاوت است. این اجرا می‌تواند شامل کشت مستقیم در مزرعه، تولیدات گلخانه‌ای یا دامی، مدیریت پوشش گیاهی برای ارائه خدمات زیست‌محیطی یا ترکیبی از این روش‌ها باشد(Macknick et al,2022) .

بر اساس طبقه‌بندی Macknick و همکاران(2022)، پیاده‌سازی سیستم‌های اگری‌ولتائیک می‌تواند بر بهینه‌سازی تولید انرژی، افزایش عملکرد زیست‌توده یا تلفیق هم‌زمان اهداف کشاورزی و انرژی متمرکز باشد. این رویکردها عمدتاً در قالب دو ساختار اصلی، شامل سیستم‌های باز (با پنل‌های نصب‌شده بر روی سازه‌های زمینی) و سیستم‌های بسته (با پنل‌های نصب‌شده بر سقف گلخانه‌ها) تعریف می‌شوند (شکل ۱).



شکل ۱.نمایی از سیستم‌های باز (بالا) و بسته (گلخانه‌ای، پایین).

نصب پنل‌های فتوولتائیک روی گلخانه‌ها (شکل b۲) باعث توزیع نامساوی تشعشع روی گیاهان می‌شود. این تغییر در توزیع تشعشع بر میزان آب مورد نیاز گیاهان تأثیر می‌گذارد. به همین دلیل، استفاده از پنل‌های فتوولتائیک شفاف برای حفظ یکنواختی تشعشع پیشنهاد می‌شود. شکل a۲ شبیه‌سازی این مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۲ (a)مدل سه‌بعدی پنل‌های خورشیدی روی گلخانه‌ها (Torrente et al,2023). **(b) پنل‌های فتوولتائیک نصب‌شده روی سقف گلخانه در شهر آلمریا**، اسپانیا(Coşgun et al,2024)

انواع سیستم‌های اگری‌ولتائیک

سامانه‌های اگری‌ولتائیک از نظر ساختاری به چند دسته اصلی تقسیم می‌شوند:

سیستم‌های مرتفع

پنل‌ها در ارتفاع بیش از ۲ متر نصب می‌شوند (شکل ۳) تا امکان عبور ماشین‌آلات کشاورزی و نفوذ نور به گیاهان فراهم شود. این ارتفاع می‌تواند بر رشد گیاهان حساس مانند انگور، درختان میوه کوچک و سبزیجات تأثیرگذار باشد و در برخی موارد باعث کاهش عملکرد آن‌ها شود (Macknick et al,2022)



شکل ۳. نمایی از سیستم‌های مرتفع در ایالات متحده آمریکا

سیستم‌های بین‌ردیفی

در این سیستم، محصولات کشاورزی در فضاهای بین ردیف‌های پنل‌ها کشت می‌شوند و به‌دلیل افزایش فاصله بین ردیف‌ها، عبور ماشین‌آلات بزرگ کشاورزی امکان‌پذیر است. همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده، در این روش معمولاً چمن‌ها، سبزیجات مقاوم و محصولات باغی با ارزش بالا کشت می‌شوند (Macknick et al,2022) .



شکل ۴.نمایی از سیستم‌های بین‌ردیفی.

سیستم‌های عمودی

نصب عمودی پنل‌های خورشیدی در سامانه‌های اگری‌ولتائیک با جهت‌گیری شرق–غرب برای محصولات دائمی و شمال–جنوب برای اولویت تولید انرژی بهینه‌سازی می‌شود (Katsikogiannis et al,2022). فاصله ردیف‌ها در این سیستم‌ها معمولاً

تا ۱۰ متر است. کاهش این فاصله می‌تواند عملکرد محصولات را تا ٪۵۰ کاهش دهد. همچنین حدود ٪۱۰ از زمین اطراف پنل‌ها به مناطق زیست‌محیطی اختصاص داده می‌شود (Campana et al,2021).

پنل‌های دوطرفه برای جذب نور دوطرفه کاربردی‌اند و نصب عمودی مزایایی مانند توزیع بهتر نور و هزینه نگهداری کمتر دارد(Abidin et al,2021)



شکل ۵. نمایی از سیستم‌های عمودی

سیستم‌های ردیاب خورشیدی

با استفاده از مکانیزم‌های تک‌محوره یا دومحوره (شکل ۶)، زاویه تابش در طول روز و فصول سال تنظیم می‌شود تا حداکثر بهره‌برداری از نور خورشید ممکن شود (Naamandadin et al,2018).



شکل ۶. سیستم‌های ردیاب تک‌محوره (چپ) و دومحوره (راست).

عوامل کلیدی در طراحی و نصب سامانه‌های اگری‌ولتائیک

زاویه نصب پنل‌ها

زاویه نصب پنل‌های خورشیدی نقش مهمی در میزان انرژی دریافتی دارد و معمولاً نزدیک به عرض جغرافیایی محل انتخاب می‌شود تا حداکثر دریافت تابش در طول سال تأمین گردد. علاوه بر این، پارامترهایی مانند آلبدو سطح زمین (میزان بازتاب تابش)، زاویه سایه عمودی، زاویه ساعتی، زاویه تمایل زمین و زاویه سمت‌الرأس بر میزان تابش دریافتی و عملکرد نهایی پنل‌ها تأثیرگذار هستند (Sarr et al,2023).

فاصله بین ردیف‌ها

فاصله بین ردیف‌ها باید طوری تنظیم شود که تعادلی بین میزان سایه بر گیاهان و تراکم پنل‌ها ایجاد گردد. در پیکربندی‌های چگالی بالا (FD)، تراکم پنل‌ها بیشتر است اما نور کمتری به گیاهان می‌رسد. در مقابل، در پیکربندی‌های چگالی پایین (LD)، نور بیشتری فراهم می‌شود اما تولید برق کاهش می‌یابد (Adeh et al,2018) (شکل ۷).

نوع گیاه

گیاهان سایه‌دوست زیر پنل‌ها عملکرد بهتری دارند. گیاهانی مانند کاهو، اسفناج، سبزیجات برگی و توت‌فرنگی به دلیل تحمل سایه بالا، در سیستم‌های اگری‌ولتائیک عملکرد مطلوبی نشان داده‌اند (Marrou et al,2013; Barron-Gafford et al,2019).

ارتفاع نصب پنل‌ها

افزایش ارتفاع نصب موجب بهبود فضای رشد و تهویه می‌شود، اما هزینه‌ها را نیز افزایش می‌دهد. بر اساس پیشنهاد Trommsdorff و همکاران (2022) حداقل ارتفاع مناسب برای نصب پنل‌های خورشیدی در سیستم‌های اگری‌ولتائیک هوایی، ۲.۱ متر از سطح زمین در نظر گرفته می‌شود. با این حال، این مقدار بسته به شرایط اقلیمی و نیازهای فنی در کشورهایی مانند ژاپن, فرانسه, آلمان و آمریکا متفاوت بوده و از ۳ تا ۵ متر متغیر گزارش شده است.

جهت نصب

در نیم‌کره شمالی، پنل‌های خورشیدی معمولاً به سمت جنوب نصب می‌شوند تا بیشترین میزان تابش خورشید در طول روز دریافت گردد و بازدهی سیستم افزایش یابد(Jacobson and Jadhav,2018).

نوع سازه و هزینه‌ها

استفاده از سازه‌های مقاوم و سبک‌وزن در نصب پنل‌های خورشیدی، به منظور کاهش هزینه‌های نگهداری و افزایش دوام سیستم ضروری است (Dupraz et al,2011)



شکل ۷.نمای کلی از فضای بین پنل‌ها در یک آزمایش در ایالات متحده که تفاوت پیکربندی‌های چگالی بالا (FD) و پایین (LD) را نشان می‌دهد(Macknick et al,2022).

در سامانه‌های اگری‌ولتائیک، رقابت بر سر نور میان پنل‌های خورشیدی و گیاهان زراعی ممکن است بر رشد گیاه تأثیر بگذارد. این رقابت همچنین ممکن است دسترسی گیاهان به منابعی مانند آب را تحت تأثیر قرار دهد؛ به‌عنوان مثال با کاهش نفوذ باران یا افزایش رواناب. با این حال، تعامل‌های مثبت نیز میان پنل‌ها و گیاهان وجود دارد. به‌عنوان مثال، کاهش تبخیر و تعرق و تعدیل دمای خاک که در شرایط خشکسالی اهمیت ویژه‌ای دارد (Dupraz et al,2011) همچنین، نفوذ بهتر بارندگی در خاک‌های سایه‌دار گزارش شده است.

پنل‌ها تا حدودی عملکرد درختان را شبیه‌سازی می‌کنند؛ با این تفاوت که علاوه بر ایجاد سایه، انرژی نیز تولید می‌کنند. این ویژگی در اقلیم‌های گرم و خشک، یک مزیت قابل‌توجه محسوب می‌شود. با وجود استقبال جهانی از این فناوری، توسعه آن مستلزم ارزیابی‌های دقیق زیست‌محیطی و اقتصادی است(Agostini et al,2021) .

درآمد حاصل از فروش محصولات کشاورزی و برق تولیدی باید در مقایسه با هزینه‌های نصب و نگهداری بررسی شود. برخی مطالعات گزارش داده‌اند که درآمد این سیستم‌ها می‌تواند ۱۷ تا ۳۰ درصد بیشتر از کشاورزی سنتی باشد (Adeh et

al,2018; Barron-Gaffrod et al,2019). هزینه‌ها بسته به قیمت تجهیزات، نرخ برق، زیرساخت‌ها و سیاست‌های حمایتی دولت‌ها متفاوت است (IRENA, 2020).

مصرف آب پنل‌ها عمدتاً به شستشو و تمیزکاری مربوط می‌شود و مقدار آن بسیار اندک است (IRENA, 2020) .طراحی مناسب می‌تواند اثرات منفی احتمالی همچون تغییر الگوی بارندگی یا فرسایش خاک را کاهش دهد (Dupraz et al,2011). کاهش تابش مستقیم خورشید باعث کاهش دمای روز، افزایش دمای شب، حفظ رطوبت خاک و در نتیجه کاهش نیاز آبی گیاهان می‌شود (Adeh et al,2018; Barron-Gaffrod et al,2019).

کاربرد در مرتعداری

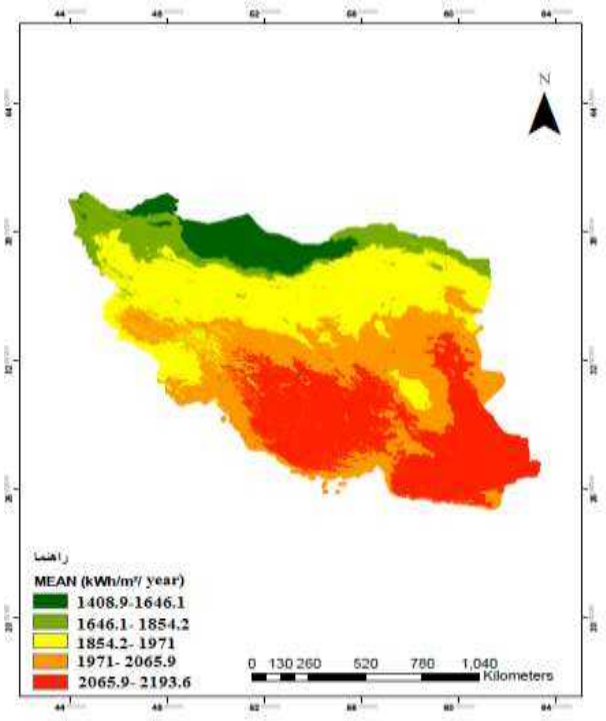
استفاده از فضای زیر پنل‌های خورشیدی برای چرای دام (شکل ۸)، روشی کارآمد برای افزایش بهره‌وری زمین محسوب می‌شود (Guarino and Swanson, 2022). مطالعات نشان داده‌اند که گوسفندان در این فضاها رشد بهتری دارند و نسبت به سایه‌بان‌های مصنوعی، زمان بیشتری را زیر پنل‌ها سپری می‌کنند (Andrew et al,2021) .این سیستم‌ها موجب افزایش درآمد سالانه و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شوند (Maia et al,2020). در کشور آمریکا در مورد پرورش خرگوش نیز، ترکیب با نیروگاه خورشیدی موجب افزایش درآمد بین ۲.۵ تا ۲۴ درصد شده است (Lytle et al,2021) با این حال، نیاز به مطالعات بیشتر برای طراحی بهینه فضای تغذیه دام وجود دارد (Andrew et al,2021; Maia et al,2020).



شکل ۸. استفاده از پنل‌های خورشیدی برای ایجاد سایه‌بان و چرای دام

پتانسیل سیستم اگری‌ولتائیک در کشور ایران

بر اساس نقشه پهنه‌بندی انرژی خورشیدی کشور که با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در شکل (۹) ارائه گردیده است، تابش سالانه در بیشتر مناطق ایران (نقاط با رنگ‌های زرد، نارنجی و قرمز) بیش از ۱۸۰۰ کیلووات‌ساعت بر متر مربع در سال است که در رده عالی از نظر پتانسیل انرژی تابشی قرار می‌گیرد. مناطق با تابش بین ۱۶۰۰ تا ۱۸۰۰ کیلووات‌ساعت بر متر مربع در سال (رنگ سبز روشن) نیز از پتانسیل خوب و قابل توجهی برخوردارند. مقادیر تابشی کمتر، در حدود ۱۴۰۰ تا ۱۶۰۰ کیلووات‌ساعت بر متر مربع در سال (رنگ سبز تیره) که عمدتاً در مناطق شمالی کشور واقع شده‌اند، برای برخی پروژه‌ها در آستانه توجیه فنی-اقتصادی قرار دارند و نیازمند تحلیل دقیق‌تر با در نظر گیری نوع محصول و شرایط اقتصادی خاص هستند. بنابراین، خوشبختانه عرصه‌های وسیعی از ایران پتانسیل بسیار بالایی برای اجرای پروژه‌های اگری‌ولتائیک دارا می‌باشند.



شکل ۹.نقشه شدت تابش مناطق مختلف کشور ایران (مستخرج از تحقیق حاضر)

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

ایران به‌عنوان کشوری خشک و نیمه‌خشک با میانگین بارندگی سالانه کمتر از ۲۵۰ میلی‌متر در سال، با بحران جدی کم‌آبی مواجه است (Mesgaran et al,2014) بخش کشاورزی ایران بیش از ۹۰ درصد از منابع آب تجدیدپذیر را مصرف می‌کند، در حالی‌که بهره‌وری آب در بسیاری از مناطق کمتر از ۴۰ درصد گزارش شده است (FAO,2021). طبق برآورد مرکز پژوهش‌های مجلس، دو سوم از خاک ایران مستعد بیابان‌زایی است و بسیاری از دشت‌ها با کسری مخزن شدید آب زیرزمینی مواجه‌اند (Gorjian et al,2021). از سوی دیگر، افزایش دمای متوسط کشور در سال‌های اخیر، کاهش بارش‌های سالانه، افت سطح آب‌های زیرزمینی و بیابان‌زایی گسترده، تهدیدی جدی برای امنیت غذایی و کشاورزی پایدار ایجاد کرده‌اند (Gorjian and Ghobadian, 2015). تأمین انرژی پایدار برای بخش کشاورزی، به‌ویژه در مناطق روستایی و شرایط خشکسالی، یکی از چالش‌های کلیدی ایران محسوب می‌شود(FAO and IRENA, 2021). این در حالی است که شدت بالای تابش خورشیدی در اغلب مناطق ایران، فرصت مناسبی برای توسعه انرژی خورشیدی فراهم کرده است (مختارزاده و گرجیان،۱۴۰۱). نتیجه این تحقیق نیز نشان داد که عرصه‌های وسیعی از ایران به دلیل تابش سالانه بیش از ۱۸۰۰ کیلووات‌ساعت بر متر مربع در سال پتانسیل بسیار بالایی برای اجرای پروژه‌های اگری‌ولتائیک دارا می‌باشند. در چنین شرایطی، بهره‌گیری ترکیبی از زمین برای تولید همزمان غذا و انرژی، مانند سامانه‌های اگری‌ولتائیک، می‌تواند به‌عنوان راه‌حلی نوین و کارآمد مطرح شود.

سامانه‌های اگری‌ولتائیک با ادغام تولید انرژی خورشیدی با محصولات کشاورزی و دامی، به‌عنوان راه‌حلی پایدار برای تأمین نیازهای غذایی، انرژی و آب مطرح هستند (Dupraz et al,2011). این فناوری علاوه بر افزایش بهره‌وری زمین از طریق استفاده دوگانه، با ایجاد سایه‌بان طبیعی، محصولات حساس به تابش شدید خورشید را محافظت می‌کند و از آسیب‌های ناشی از باران‌های شدید و تگرگ جلوگیری می‌نماید (Marrou et al,2013) . همچنین، سایه‌افکنی پنل‌های خورشیدی موجب کاهش تبخیر و تعرق می‌شود که این امر در کاهش مصرف آب، به ویژه در مناطق خشک و کم‌آب مانند ایران،

اهمیت زیادی دارد (مختارزاده و گرجیان،۱۴۰۱). استفاده از سامانه‌های جمع‌آوری آب باران در کنار اگری‌ولتائیک، امکان مدیریت بهینه منابع آبی را فراهم می‌آورد و موجب افزایش پایداری کشاورزی می‌شود (Agostini et al,2021).

با توجه به شرایط آب‌وهوایی گرم و خشک ایران و وجود مناطق بیابانی، سیستم‌های اگری‌ولتائیک می‌توانند با کاهش سرعت و شدت بارش و تابش مستقیم خورشید، به کنترل فرسایش خاک و بهبود بهره‌وری کشاورزی کمک کنند Agostini (et al,2021).

اگری‌ولتائیک به عنوان یک فناوری نوین، می‌تواند نقش مؤثری در تحقق اهداف کشاورزی پایدار و تأمین انرژی پاک در ایران ایفا کند. این سیستم‌ها با ادغام تولید انرژی خورشیدی با کشاورزی و دامداری، بهره‌وری زمین را افزایش داده و به کاهش فشارهای زیست‌محیطی کمک می‌کنند. مطالعات نشان داده‌اند که اگری‌ولتائیک می‌تواند موجب بهبود شرایط ریزاقلیم برای برخی محصولات کشاورزی، افزایش بهره‌وری آب و کاهش مصرف منابع گردد (مختار زاده و گرجیان،۱۴۰۱). بنابراین و با توجه به شرایط اقلیمی و منابع طبیعی ایران، توسعه سیستم‌های اگری‌ولتائیک فرصتی مناسب برای همزمان تحقق اهداف زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی است. البته لازم به ذکر است که پهنه‌بندی بهینه برای انرژی فتوولتائیک رویکرد چندمعیاره بوده و معیار تابش خورشید تنها یک ورودی، هرچند حیاتی، در این مدل است. تلفیق لایه‌های اطلاعاتی مختلف (اقلیمی، جغرافیایی، اقتصادی، زیرساختی) در یک سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و تعیین وزن مناسب برای هر معیار بر اساس شرایط محلی، می‌تواند به یک پهنه‌بندی واقع‌بینانه و قابل اعتماد منجر شود. هزینه‌های اولیه نصب، نیاز به آموزش بهره‌برداران و توسعه سیاست‌های حمایتی از موانع اصلی پیش رو هستند که باید مورد توجه قرار گیرند. برخی مطالعات گزارش کرده‌اند که سایه‌گذاری پنل‌ها ممکن است بر عملکرد برخی محصولات تأثیر منفی داشته باشد. در این راستا، استفاده از ماژول‌های نیمه‌شفاف، چیدمان‌های شطرنجی و ردیاب‌های خورشیدی برای ایجاد سایه پویا، راهکارهای مؤثری برای کاهش این اثرات هستند (Dupraz et al,2011). پیشنهاد می‌شود تحقیقات بیشتری در زمینه عوامل اقلیمی و جغرافیایی، ارزیابی اقتصادی و زیرساختی و همچنین طراحی بهینه سیستم‌ها و بررسی سازگاری با انواع محصولات

کشاورزی در مناطق مختلف ایران انجام شود تا بتوان راهکارهای عملی و بومی‌سازی‌شده برای بهره‌برداری گسترده‌تر از این فناوری ارائه داد. مطالعه اثرات اجتماعی و پذیرش فناوری توسط کشاورزان و مرتعداران نیز از اهمیت بالایی برخوردار است.

منابع

مختارزاده، ح.، و گرجیان، س. (۱۴۰۱). «اگری‌ولتاییک به عنوان راهکاری برای دستیابی به اهداف کشاورزی پایدار در ایران». چهاردهمین کنگره ملی مهندسی مکانیک بیوسیستم و مکانیزاسیون ایران، ۶ تا ۸ شهریور ۱۴۰۱، تهران.

Abidin, M., Mahyuddin, M., & Zainuri, M. (2021). Solar Photovoltaic Architecture and Agronomic Management in Agrivoltaic System: A Review. Sustainability, 13, 7846. doi:10.3390/su13147846.

Adeh, E., Selker, J., and Higgins, C. (2018). Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency. PLoS ONE, 13, e0203256. doi:http://doi.org/10.1371/journal.pone.0203256.

Affairs, U. N. (2014). Concise Report on the World Population Situation 2014. Retrieved April 10, 2015,

Agostini, A., Colauzzi, M., and Amaducci, S. (2021). Innovative agrivoltaic systems to produce sustainable energy: An economic and environmental assessment. Applied Energy, 281, 116102.
Andrew, A. C., Higgins, C. W., Bionaz, M., Smallman, M. A., and Ates, S. (2021). Pasture Production and Lamb Growth in Agrivoltaic System. AIP Conference Proceedings, Perpignan, France, 14–16 October 2020. 2361. College Park, MD, USA: American Institute of Physics Inc.

Barker, P., and Bing, J. (2005). Advances in Solar Photovoltaic Technology: An Applications Perspective. IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2, pp. 1955–1960.

Barron-Gafford, G., Pavao-Zuckerman, M., Minor, R., Sutter, L., Barnett-Moreno, I., Blackett, D., . . . al., e. (2019). Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands. Nature Sustainability, 2, 848–855. doi:http://doi.org/10.1038/s41893-019-0364-5.

Campana, P., Stridh, B., Amaducci, S., & Colauzzi, M. (2021). Optimisation of vertically mounted agrivoltaic systems. Journal of Cleaner Production, 325, 129091. doi:10.1016/j.jclepro.2021.129091.

Carreño-Ortega, A., Galdeano-Gómez, E., Pérez-Mesa, J., & Galera-Quiles, M. (2017). Policy and Environmental Implications of Photovoltaic Systems in Farming in Southeast Spain: Can Greenhouses Reduce the Greenhouse Effect? Energies, 10, 761. doi:10.3390/en10060761.

Coşgun, A., Endiz, M., Demir, H., & Özcan, M. (2024). Agrivoltaic systems for sustainable energy and agriculture integration in Turkey. Heliyon, e32300. doi:https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e32300.

Dinesh, H., and Pearce, J. (2016). The potential of agrivoltaic systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 54, 299–308. doi:http://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.024.

Dupraz, C. M. (2011). Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes. Renewable Energy, 36(10), 2725-2732. doi:10.1016/j.renene.2011.03.005.

Elamri, Y., Cheviron, B., Lopez, J. M., Dejean, C., & Belaud, G. (2018). Water budget and crop modelling for agrivoltaic systems: Application to irrigated lettuces. Agricultural Water Management, 208, 440–453. doi:10.1016/j.agwat.2018.07.001.

Food and Agriculture Organization (FAO). (2021). Irrigation and Water Management in Iran. Rome, Italy: FAO.

Goetzberger, A., and Zastrow, A. (1982). On the Coexistence of Solar-Energy Conversion and Plant Cultivation. International Journal of Solar Energy Int. J. Sol. Energy), 1, 55–69. doi:http://doi.org/10.1080/01425918208909875.

Gorjian, S., and Ghobadian, B. (2015). Solar desalination: A sustainable solution to water crisis in Iran. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 48, 571–584.

Gorjian, S., Calise, F., Kant, K., Ahamed, M., Copertaro, B., Najafi, G., . . . Shamshiri, R. (2021). A review on opportunities for implementation of solar energy technologies in agricultural greenhouses. Journal of Cleaner Production, 285, 124807. doi:10.1016/j.jclepro.2020.124807.

Guarino, J., & Swanson, T. (2022). Emerging Agrivoltaic Regulatory Systems: A Review of Solar Grazing. Chicago-Kent Journal of Environmental and Energy Law, 12, 1–30.

Guney, M. (2016). Solar power and application methods. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 57, 776–785.

Hernandez, R., Armstrong, A., Burney, J., Ryan, G., Moore-O'Leary, K., Diédhiou, I., . . . al., e. (2019). Techno–ecological synergies of solar energy for global sustainability. Nature Sustainability, 2, 560–568. doi:http://doi.org/10.1038/s41893-019-0309-z.

IEA. (2014). Technology Roadmap: Solar Photovoltaic Energy.

International Renewable Energy Agency (IRENA); Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2021). Renewable Energy for Agri food Systems: Towards the Sustainable Development Goals and the Paris Agreement. Abu Dhabi, UAE / Rome, Italy: IRENA & FAO. Retrieved July 10, 2025.

Jacobson, M., & Jadhav, V. (2018). World estimates of PV optimal tilt angles and ratios of sunlight incident upon tilted and tracked PV panels relative to horizontal panels. Solar Energy, 169, 55–66. doi:10.1016/j.solener.2018.04.030

Johansson, F., Gustafsson, G., Stridh, B., & Campana, P. (2022). 3D-thermal modelling of a bifacial agrivoltaic system: A photovoltaic module perspective. Energy Nexus, 5, 100052. doi:10.1016/j.nexus.2022.100052.

Kabalci, E. (2013). Design and analysis of a hybrid renewable energy plant with solar and wind power. Energy Conversion and Management, 72, 51–59.

Lytle, W., Meyer, T. K., Tanikella, N. G., Burnham, L., Engel, J., Schelly, C., & Pearce, J. M. (2021). Conceptual Design and Rationale for a New Agrivoltaics Concept: Pasture-Raised Rabbits and Solar Farming. Journal of Cleaner Production, 282, 124476.

Macknick, J., Hartmann, H., Barron-Gafford, G., Beatty, B., Burton, R., Choi, C., . . . al., e. (2022). The 5 Cs of Agrivoltaic Success Factors in the United States: Lessons From the InSPIRE Research Study. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory. Retrieved November 3, 2022, from https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/83566.pdf

Maia, A. S., Culhari, E. d., Fonsêca, V. d., Milan, H. F., & Gebremedhin, K. G. (2020). Photovoltaic Panels as Shading Resources for Livestock. Journal of Cleaner Production, 258, 120551.
Marrou, H., Wéry, J., Dufour, L., & Dupraz, C. (2013). Productivity and radiation use efficiency of lettuces grown in the partial shade of photovoltaic panels. European Journal of Agronomy, 44, 54-66.
Mesgaran, M., Madani, K., Hashemi, H., & Azadi, P. (December). Evaluation of Land and Precipitation for Agriculture in Iran. Stanford, USA: Stanford Iran 2040 Project.
Naamandadin, N., Ming, C., & Mustafa, W. (2018). Relationship between Solar Irradiance and Power Generated by Photovoltaic Panel: Case Study at UniCITI Alam Campus, Padang Besar, Malaysia. Journal of Advanced Research in Engineering Knowledge, 5, 16–20.
Pearce, J. (2002). Photovoltaics - A Path to Sustainable Futures. Futures, 34(7), 663-674.
Rahman, M., Khan, I., Field, D., Techato, K., & Alameh, K. (2022). Powering Agriculture: Present Status, Future Potential, and Challenges of Renewable Energy Applications. Renewable Energy, 188, 731–749.
Refaat, A., & Ismail, I. (2017). Water Food and Energy Sustainability Nexus. International Conference on Sustainable Futures–ICSF (pp. 280-299). Kingdom of Bahrain: Applied Science University.
Sarr, A., Soro, Y., Tossa, A., & Diop, L. (2023). Agrivoltaic, a Synergistic Co-Location of Agricultural and Energy Production in Perpetual Mutation: A Comprehensive Review. Processes, 11(3).
Sass, J., & Hahn, A. (2020). Solar Powered Irrigation Systems (SPIS): Technology; Economy; Impacts. Bonn: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH.
Schindele, S., Trommsdorff, M., Schlaak, A., Obergfell, T., Bopp, G., Reise, C., . . . al., e. (2020). Implementation of agrophotovoltaics: Techno-economic analysis of the price-performance ratio and its policy implications. Applied Energy, 265, 114737. doi:http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114737.
Scognamiglio, A. T. (2023). Impacts of agrivoltaic systems on microclimate and water use efficiency: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 169, 112975. doi:10.1016/j.rser.2023.112975.
Torrente, C., Reca, J., López-Luque, R., Martínez, J., & Casares, F. (2024). Simulation Model to Analyze the Spatial Distribution of Solar Radiation in Agrivoltaic Mediterranean Greenhouses and Its Effect on Crop Water Needs. Applied Energy, 353, 122050. doi:10.1016/j.apenergy.2023.122050.
Trommsdorff, M., Kang, J., Reise, C., Schindele, S., Bopp, G., Ehmann, A., . . . Obergfell, T. (2021). Combining food and energy production: Design of an agrivoltaic system applied in arable and vegetable farming in Germany. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 140, 110694.
Trommsdorff, M., Gruber, S., Keinath, T., Hopf, M., Hermann, C., Schönberger, F., . . . al., e. (2022). Agrivoltaics: Opportunities for Agriculture and the Energy Transition. Freiburg, Germany: Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE.
Unis, Nations. (2022). La population Mondiale Atteindra 8 Milliards le 15 Novembre 2022. New York, NY: Nations Unis.
United Nations Department of Economic and Social Affairs. (2014). Concise report on the world population situation 2014. United Nations.
Weselek, A., Ehmann, A., Zikeli, S., Lewandowski, I., Schindele, S., & Högy, P. (2019). Agrophotovoltaic systems: Applications, challenges, and opportunities. A review. Agronomy for Sustainable Development, 39, 35. doi:http://doi.org/10.1007/s13593-019-0581-3.
Yue, S., Guo, M., Zou, P., Wu, W., & Zhou, X. (2021). Effects of photovoltaic panels on soil temperature and moisture in desert areas. Environmental Science and Pollution Research, 28, 17506-17518.

The role of agrivoltaic systems in the sustainable development of arid and semi-arid regions

Masoumeh Movaghari, Zahra Hayat
*Email:movaghari@asnrukh.ac.ir

Abstract

With the increasing demand for renewable energy, the development of large-scale solar farms is rapidly expanding. However, this development often faces the challenge of competition for valuable agricultural and rangeland. Agrivoltaic systems have emerged as an innovative solution aimed at integrating solar energy production with agricultural and livestock activities on a single land unit. This integration can lead to benefits including increased overall land productivity (multi-purpose land use), reduced pressure on water resources, provision of clean energy, creation of dual income for farmers and ranchers, preservation of vegetation, and reduction of soil erosion. The present article, by providing a zoning map of solar energy across the country using satellite data, compares the annual solar radiation in different regions of Iran and, on the other hand, by reviewing existing resources, introduces various system types and important design factors including installation angle, spacing between rows, panel height, and types of plants. It then examines the advantages and limitations of this technology, such as increased land productivity, improved microclimatic conditions, reduced evapotranspiration, and challenges such as high installation costs and reduced yield of some crops. The results of this research indicate that vast areas of Iran, due to an annual solar radiation exceeding 1800 kilowatt-hours per square meter per year, have very high potential for implementing agrivoltaic projects. Of course, it is worth noting that besides the criterion of radiation intensity, the success of such systems depends on considering other influencing factors, including climatic, geographical, economic, infrastructural factors, and the development of supportive policies. Agrivoltaic systems offer a sustainable and forward-looking approach for aligning food security, energy security, and ecosystem conservation, and can play an effective role by providing practical and localized solutions in arid and semi-arid regions like Iran.

Keywords: Solar Agriculture, compound land use, Renewable Energy, Food Securit

بررسی اثرپذیری بارشهای ترسالی و خشکسالی از متغیرهای جغرافیایی (مطالعه موردی: حوضه دریاچه ارومیه

باقر قرمزچشمه[1*]، کاظم صابرچناری[2]، مجتبی نساجی زواره

۱- دانشیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران،
۲- استادیار پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران
۳- دانشیار معاونت آموزش و ترویج، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران،
*- آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول baghergh@gmail.com

چکیده

ارتفاع و موقعیت جغرافیایی از مهمترین عوامل کنترل کننده بارش محسوب شده و بسته به موقعیت آن نسبت به جهت حرکت توده‌های بارانزا، تاثیر کاملاً متفاوتی دارند. با شناخت روابط بین متغیرهای ارتفاع، طول و عرض جغرافیایی با بارش منطقه و تاثیر آن، می‌توان برآورد درست و دقیقتری از میزان بارش منطقه بدست آورد. در این تحقیق سعی شده‌است نقش توپوگرافی، بخصوص ارتفاع در بارش‌های حوضه ارومیه بررسی شود. بدین منظور ابتداء ایستگاه‌های با داده کافی انتخاب گردید. داده‌های سالانه در هر ایستگاه استخراج و آزمون همگنی انجام و داده‌های پرت حذف گردید. داده‌های بازسازی شده و پارامترهای توپوگرافی شامل ارتفاع، طول و عرض جغرافیایی برای هر ایستگاه محاسبه و رابطه یک و چند متغیره عوامل فوق با بارش سالانه برقرار گردید. برای بررسی نقش عوامل مرفومتری در شرایط ترسالی و خشکسالی در بارش، میانگین بارش دوره، میانگین بارش در شرایط خشکسالی شدید، خشکسالی متوسط، ترسالی متوسط و ترسالی شدید محاسبه شد. در هر یک از حالتهای یاد شده روابط تک و چند متغیره با بارش برقرار شد. با استفاده از روش‌های اندازه‌گیری خطا، میزان خطای هر روش محاسبه گردید. نتایج نشان داد که مدل چند متغیره نسبت به رابطه خطی بارش و ارتفاع دقت بهتری دارد. ولی رابطه ارتفاع با بارش سالانه نیز در سطح ۵ درصد معنی دار بوده و اثر ارتفاع در دوره‌های خشک نسبت به دوره نرمال کمتر بدست آمد. این موضوع بیانگر آن است که نقش ارتفاع در دوره های ترسالی نسبت به دوره های خشک بر بارش بیشتر می‌باشد.

کلید واژه‌ها: توپوگرافی ، ارتفاع، بارش، دوره خشک و مرطوب، رگرسیون چند متغیره

مقدمه

کوهستان به¬عنوان یکی از مهم¬ترین عوامل کنترل کننده بارش محسوب می¬شود. کوهستان در یک منطقه بسته به موقعیت آن نسبت به توده¬های هوا، تأثیر کاملاً متفاوتی دارد (قرمزچشمه و همکاران، ۱۳۹۲). بطوریکه دامنه-های رو به توده¬های هوا، باعث تأثیر کوهستان در افزایش بارش بوده و در دامنه¬های پشت به جریان به علت ممانعت از ورود توده¬های مرطوب، باعث خشک شدن منطقه می¬شوند (علیجانی و کاویانی، ۱۳۷۳؛ علیزاده و همکاران، ۱۳۸۷). ولی اثرات کوهستان بر میزان بارش در طول زمان هنوز از ناشناخته¬های علم می¬باشد. بطوریکه آیا در همه فصول دریک منطقه که بارش سالانه با ارتفاع رابطه مناسب و مستقیم دارد، این رابطه برقرار است و در سال¬های مرطوب این رابطه نسبت به سال¬های خشک یا نرمال چگونه است؟ این¬ها همگی از سؤالات اساسی است که با اطلاع از آن می¬توان به مدیریت منابع آب کمک شایانی کرد. تعمیم بارش از نقطه به سطح (Wang و همکاران، ۲۰۰۳؛ Ruiz و همکاران، ۲۰۰۸) به عنوان یک متغیر بسیار مهم در اغلب تحقیقات علوم طبیعی کاربر دارد. در بسیاری از مدلهای ژئومرفولوژی، هیدرولوژی و منابع آب بارش بعنوان یک متغیر اصلی بوده و دقت تعمیم بارش نقطه‌ای به سطح، در دقت نتایج مدلهای فوق تاثیر بسزایی دارد (قرمزچشمه و همکاران، ۱۳۹۲). از طرفی اغلب مدلها دارای توزیع مکانی بوده و نیاز به تبدیل داده‌های نقطه‌ای مانند بارش به سطح می باشد. هر چه دقت ورودیهای مدل بیشتر باشد، دقت خروجی مدل نیز بیشتر است.

پژوهشهای متنوعی در تعمیم بارش ایستگاه به منطقه صورت گرفته‌است که در این زمینه، علیجانی(۲۰۰۵) رابطه بین بارش و ارتفاع را در دامنه‌های البرز بررسی و نقش ارتفاع در مقدار بارش سالانه در دامنه‌های شمالی منفی و در دامنه‌های جنوبی مثبت ارزیابی کرد. لازم به ذکر است که در همه فصول این موضوع صادق نبوده، بطوریکه در فصل بهار در هر دو دامنه با افزایش ارتفاع بارش افزایش می‌یافت. با افزایش ارتفاع ضریب تغییرات در دامنه جنوبی در فصول زمستان و پائیز زیاد و در بهار و تابستان و دامنه‌های شمالی کاهش را نشان داد. Johansson و Chen (۲۰۰۳) رابطه بین بارش، باد و توپوگرافی را در منطقه سوئد با استفاده از روابط آماری شرح دادند. نتایج آنها نشان داد بارش دامنه‌های رو به باد با افزایش سرعت باد افزایش می‌یابد و در دامنه‌های پشت به باد بارش تغییرات کمتری دارد و سرعت باد عامل موثری بر روی مقدار بارش نمی‌باشد. رسولی و همکاران (۱۳۹۱) روند بارش سالانه در شمال غرب کشور در یک دوره آماری ۳۰ ساله با استفاده از روش من‌کندال را مورد بررسی قرار دادند. سپس در محیط GIS مقادیر روند بارش با استفاده از تکنیکهای دورنیابی به سطح منطقه تعمیم دادند. نتایج پژوهش آنها، نشان داد که در اغلب مناطق شمال غرب کشور تغییرات بارش معنی‌دار نبوده و در برخی مناطق روند کاهش بارش مشاهد می‌شود.

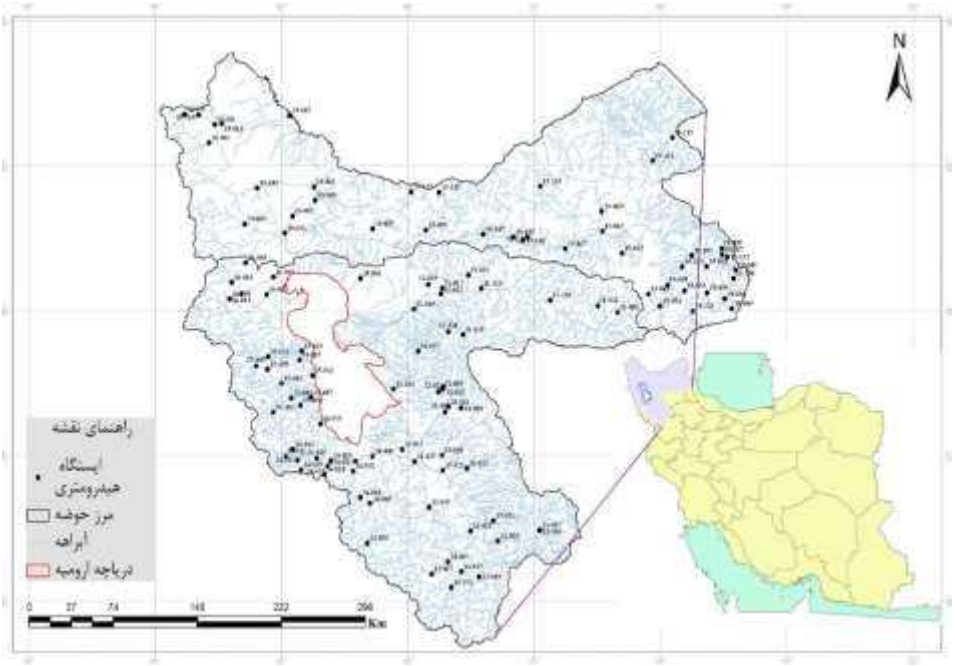
دین‌پژوه و همکاران (۱۳۹۸) به بررسی روند تغییرات زمانی (روش های مان -کندال و تخمین گر سن)و مکانی مشخصه های تعداد روزهای با بارش در پنج دسته متمایز شامل کمتر از ۱ میلیمتر, ۱ تا ۵, ۵ تا ۱۰, ۱۰ تا ۱۵ و بیش از ۱۵ میلیمتر در روز در حوضه ی دریاچه ارومیه پرداختند. نتایج این نشان داد که روند بارشهای یاد شده در اغلب ایستگاهها معنی دار نیست ولی بارشهای با مقادیر کمتر دارای روند افزایشی و بارشهای با مقادیر بالا روند کاهش دارند. جوان و عزیززاده (۱۴۰۳)

پیش نگری بارش مدل GFDL-ESM4 در حوضه دریاچه ارومیه مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد پیش نگری های میانگین سالانه بارش در سناریوی SSP1-2.6 بین ۲ تا ۹ درصد, در SSP2-4.5 بین ۵ تا ۱۷ درصد و در-SSP2 8.5بین ۸ تا ۲۶ درصد کاهش را نسبت به داده‌های مشاهده‌ای نشان می‌دهند.

در منابع مورد بررسی، بیشتر به رابطه بارش با ارتفاع و یا رابطه چند متغیره بارش طول، عرض و ارتفاع پرداخته شده‌است؛ ولی به موضوع رفتار بارش در دوره های ترسالی و خشکسالی پرداخته نشده‌است. همچنین نقش متغیرهای یاد شده در سالهای ترسالی و خشکسالی بر بارش مورد ارزیابی قرار نگرفته‌است. در تحقیق سعی شده‌است نقش هریک از متغیرهای یاد شده و بصورت ترکیبی در بارش متوسط دوره و بارش در دوره های ترسالی و خشکسالی، مورد تحلیل قرار گیرد.

منطقه تحقیق

حوضه آبخیز دریاچه ارومیه با وسعتی معادل ۵۱۸۷۶ کیلومترمربع در ناحیه کوهستانی شمال غرب ایران واقع شده‌است (شکل ۱). ۵۱ درصد از حوضه در استان آذربایجان‌غربی، ۳۸ درصد در آذربایجان‌شرقی و ۱۱ درصد آن در کردستان قرار دارد (Ahmadaali و همکاران، ۲۰۱۸). میانگین بارندگی سالانه و میانگین دمای هوای سالانه در حوضه در ۳۰ سال گذشته (۲۰۱۷-۱۹۸۸) به ترتیب ۳۳۹ میلی‌متر و ۱۱/۴ درجه سانتی‌گراد بوده‌است (Mirgolو همکاران، ۲۰۲۱). چندین رودخانه از مرزهای کوهستانی به سمت دریاچه در مرکز حوضه جاری می‌شوند که سالانه حدود ۲۵۰۰ میلیون متر مکعب آب سطحی به دریاچه کمک می‌رسانند (مهاب قدس، ۱۳۹۱). رودخانه‌ها به همراه آب‌های زیرزمینی در سفره های آبرفتی به‌عنوان منابع اصلی آب آبیاری در حوضه در نظر گرفته می‌شوند. افزایش روزافزون مصرف آب در کشاورزی و باغداری در حوضه منجر به بهره‌برداری بیش از حد از منابع سطحی و آب‌های زیرزمینی شده‌است که در کاهش شدید آب دریاچه نقش داشته‌است.



شکل ۱- موقعیت منطقه تحقیق

روش تحقیق

تأثیر توپوگرافی و موقعیت جغرافیایی بر بارش، بسیارپیچیده و از دیدگاه¬های مختلف قابل بحث می‌باشد. بطوریکه در نواحی رو به جریان‌های باران‌زا، توپوگرافی با ایجاد مانع در برابر توده هوای مرطوب باعث بارش‌های خوبی خواهد بود و برعکس در دامنه‌های پشت به جریان‌های مرطوب به دلیل ممانعت از عبور جریان هوا، دامنه‌های خشکی را ایجاد می‌نماید. تاثیر متغیرهای یاد شده در سالهای ترسالی یا خشکسالی می‌تواند تاثیر متفاوتی بر رفتار بارش داشته باشد. بطور کلی در مناطق کوهستانی و پر بارش، تغییرات زمانی بارش نسبت به مناطق دشتی و کم باران کمتر بوده و ضریب تغییرات آنها معمولا کمتر است (قرمزچشمه و همکاران، ۱۳۹۲).

دراین تحقیق، نقش ارتفاع، طول و عرض جغرافیایی بر بارش دوره های ترسالی تا خشکسالی مورد تحلیل قرار گرفت. بدین منظور ابتدا ایستگاه¬های باران‌سنجی وزارت نیرو و سینوپتیک سازمان هواشناسی در حوضه دریاچه ارومیه استخراج و ایستگاه¬های مناسب (از دیدگاه طول دوره آماری) انتخاب گردید. پایه سال آماری ۳۰ ساله (از ۱۳۶۷ تا ۱۳۹۶) مد نظر قرار گرفت. ابتدا برای اطمینان از عدم وجود داده پرت در بین ایستگاه¬های هواشناسی، از آزمون داده¬های پرت (Run Test) استفاده شد. پس از حذف داده¬های پرت، هر ایستگاه با استفاده از روش همبستگی، نواقص آماری بازسازی شد. پس از انجام عملیات فوق برای تعداد ۶۴ ایستگاه انتخابی سری زمانی ۳۰ ساله تکمیل شد. با توجه به گستردگی منطقه و عدم یکنواختی در دوره های ترسالی و خشکسالی، برای هر ایستگاه، میانگین بارش سالهای کمتر از ۰/۶ میانگین بارش کل دوره، بعنوان دوره خیلی خشک، بین ۰/۸ تا ۰/۶ کل دوره، دوره خشک، بین ۱/۲ تا ۱/۴ دوره مرطوب و بیشتر از ۱/۴ دوره

خیلی مرطوب در نظر گرفته شد. بر این اساس برای هر ایستگاه پنج بارش سالانه محاسبه گردید که به همراه مشخصات جغرافیایی ایستگاههای منتخب در جدول ۱ آورده شده‌است.

جدول۱- پارامترهای آماری بارش¬های سالانه در دوره های مختلف ترسالی و خشکسالی

کد ایستگاه	نام ایستگاه	طول جغرافیایی- درجه	عرض جغرافیایی- درجه	ارتفاع - متر	بارش متوسط سالانه- میلیمتر				
					دوره ۳۰ ساله	دوره خیلی خشک	دوره خشک	دوره مرطوب	دوره خیلی مرطوب
31-013	سعیدآباد	46.5839	37.9819	1771	347.3	187.3	269.1	456.0	545.9
31-022	سهلان	46.1592	38.1825	1380	261.2	134.5	219.1	332.3	366.0
31-037	قرمزیگل	46.1000	37.7167	1775	284.1	149.0	233.0	357.9	430.0
31-109	مهربان	47.1306	38.0731	1515	291.5	175.0	240.5	367.0	459.5
32-005	خرمازرد	46.1500	37.4167	1560	303.7	157.8	228.9	399.3	437.9
32-009	مراغه	46.2333	37.4000	1475	316.3	181.8	249.2	415.2	460.7
32-013	بناب	46.0500	37.3167	1283	254.2	136.0	199.8	326.0	342.3
32-015	ینگجه	46.1333	37.5167	1670	357.1	179.8	285.9	452.0	550.2
33-001	مغانجیق	46.4167	37.3333	1650	321.5	156.7	253.1	429.2	468.0
33-003	قشلاق امیر	46.2833	37.3167	1540	321.2	154.3	243.1	404.4	698.5
33-015	پل آدینان (پل صاحب	46.4244	36.2103	1445	344.4	169.4	279.6	423.3	507.6
33-018	باغچه‌میشه	46.7667	36.4853	1898	345.1	156.1	261.7	454.3	503.3
33-020	رحیم‌آباد	46.7006	36.3364	1810	351.3	185.8	285.9	440.2	511.0
33-021	صفاخانه	46.6869	36.4400	1622	390.8	155.3	309.0	495.5	780.0
33-023	ساریقمیش	46.4906	36.4836	1391	346.0	137.1	275.1	448.1	624.2
33-027	چوبلوچه	46.3975	36.8783	1361	276.7	155.5	218.6	366.6	472.8
33-029	پل میاندوآب - زرینه‌رود	46.1189	36.9744	1295	278.5	133.1	209.7	360.9	436.3
33-035	داشبند بوکان	46.1661	36.6544	1318	345.1	181.9	284.0	446.5	553.3
33-040	سد شهید کاظمی بوکان	46.5206	36.4219	1431	355.9	164.5	289.8	458.5	632.3
33-046	سرچنار (کلب رضاخان	46.1058	36.8744	1296	264.9	121.5	214.0	340.4	414.7
33-049	آلاسقل	47.0433	36.4886	1700	373.2	163.4	298.3	467.1	551.5
33-058	صائین‌دژ	46.5631	36.6858	1373	293.5	133.6	254.3	398.5	472.4
33-308	قزل قبر	46.6494	36.5800	1657	309.0	141.8	255.4	394.5	448.5
33-530	سد نوروزلو	46.2389	36.8872	1320	266.4	137.2	219.2	345.5	427.8

کد ایستگاه	نام ایستگاه	طول جغرافیایی- درجه	عرض جغرافیایی- درجه	ارتفاع - متر	بارش متوسط سالانه- میلیمتر				
					دوره ۳۰ ساله	دوره خیلی خشک	دوره خشک	دوره مرطوب	دوره خیلی مرطوب
33-921	محمودآباد	46.6792	36.5517	1474	335.6	159.6	288.8	443.9	548.9
33-923	جان آقا	46.4669	36.9192	1400	304.1	144.0	235.0	396.9	449.7
34-003	کوتر	45.6164	36.7053	1380	350.5	179.8	251.4	440.1	498.5
34-005	بیطاس	45.6956	36.6786	1412	384.4	178.0	307.0	492.8	560.5
34-007	پل سرخ مهاباد (کمپ مهاباد	45.7072	36.7708	1350	339.9	186.6	278.6	435.0	514.2
34-009	گردیعقوب	45.7169	36.9972	1280	247.4	92.9	193.2	321.5	402.5
34-012	دوربه	45.1967	37.1281	1892	362.5	120.6	312.0	469.2	588.2
34-014	ماسو	45.5617	36.8042	1510	394.9	184.7	312.8	514.8	644.7
34-015	چپرآباد	45.1267	36.9681	1454	407.3	215.7	332.8	512.0	674.0
34-019	نقده	45.3908	36.9661	1306	302.6	146.7	233.6	379.7	457.2
34-020	گردکاشان	45.1569	37.0825	1467	407.4	135.5	343.0	522.0	684.9
34-022	یونسلو	45.2928	37.0847	1486	314.3	160.7	258.5	398.2	500.5
34-023	داشخانه	45.6922	37.0158	1277	246.7	83.7	181.6	340.5	394.3
34-029	پیه‌جیک	45.2817	36.9819	1340	321.2	146.3	264.6	418.4	506.1
34-039	صوفیان	45.1567	36.9053	1500	421.8	194.5	340.3	515.0	655.0
34-045	ناری	45.2603	37.2497	1480	300.7	125.1	254.8	390.2	465.8
34-112	مهماندار	45.4333	36.9531	1300	330.2	158.6	281.6	426.5	481.5
34-915	اسلام‌آباد	45.3089	37.2203	1345	279.1	107.0	210.5	355.3	447.0
34-918	بایزیدآباد	45.3403	36.8742	1487	340.5	164.5	260.5	446.6	521.9
35-001	قاسملو	45.1453	37.3492	1360	338.1	188.5	276.3	446.3	519.3
35-005	دیزج فتحی	45.0928	37.4086	1333	325.3	180.0	263.5	400.3	484.0
35-007	باباروود	45.2314	37.4047	1282	325.0	166.8	266.2	442.0	493.0
35-027	مرز سرو	44.6394	37.7250	1628	378.7	211.5	288.7	481.3	564.0
35-031	تپیک	44.8978	37.6856	1398	293.1	163.8	229.4	376.9	444.0
35-033	آباجالوی سفلی	45.1653	37.7317	1281	274.1	137.6	215.8	348.0	428.2
35-039	کلهر	44.8911	37.6000	1499	308.6	164.1	253.7	398.4	458.0
35-045	کریم‌آباد (ارزین	44.7978	37.6217	1480	377.2	203.5	310.9	478.1	611.5
35-100	کمپ ارومیه	45.0347	37.5325	1389	359.2	202.5	273.0	449.0	523.6

کد ایستگاه	نام ایستگاه	طول جغرافیایی- درجه	عرض جغرافیایی- درجه	ارتفاع - متر	بارش متوسط سالانه- میلیمتر				
					دوره ۳۰ ساله	دوره خیلی خشک	دوره خشک	دوره مرطوب	دوره خیلی مرطوب
36-001	چهریق‌علیا	44.5936	38.0800	1611	365.4	189.0	290.7	467.9	530.3
36-003	نظرآباد	44.6086	38.1972	1595	354.5	150.3	281.3	440.3	658.5
36-222	قره باغ	45.0669	38.0764	1484	298.6	148.5	239.0	397.3	494.0
38-006	بنیس-شانجان	45.7247	38.2094	1575	330.6	188.0	255.3	410.8	521.5
40706	تبریز	46.2425	38.1222	1359	241.3	140.4	199.4	317.4	350.3
40707	سهند	46.1167	37.9333	1580	224.3	156.6	187.5	279.9	329.7
40710	سراب	47.5333	37.9333	1674	244.1	115.7	207.3	310.3	365.2
40712	ارومیه	45.0833	37.5333	1342	304.4	182.2	252.7	389.9	495.5
40713	مراغه	46.1458	37.3475	1343	286.5	141.8	228.4	361.8	469.5
40726	مهاباد	45.7153	36.7533	1352	393.2	204.4	333.2	492.0	592.7
40728	تکاب	47.1200	36.3800	1835	329.0	160.1	270.9	402.2	600.8
99239	بناب	46.0517	37.3703	1285	276.5	152.7	228.6	366.8	371.7

در گام دوم، برای هریک از دوره های پنج گانه بارش با ارتفاع، و چند متغیره ارتفاع- طول- عرض رابطه برقرار شد. مقادیر ضریب همبستگی نیز محاسبه شد. علاوه بر آن خطای مطلق (MBE)، خطای نسبی (MRE) نیز برای روابط تک و چند متغیره محاسبه شد. معادلات(۱)، (۲) و (۳) رابطه معیارهای آماری فوق را نشان می¬دهد.بر اساس روابط بدست آمده نقشه‌های بارش دوره‌های یاد شده استخراج و تغییرات بارش نسبت به میانگین کل دوره بدست آمد.

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|X_{Obsi} - X_{Esti}| \quad (۱)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{n}(X_{Obsi} - \bar{X}_{Obs})(X_{Esti} - \bar{X}_{Est})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(X_{Obsi} - \bar{X}_{Obs})^2 \sum_{i=1}^{n}(X_{Esti} - \bar{X}_{Est})^2}} \quad (۲)$$

$$MRE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|\frac{(X_{Obsi} - X_{Esti}}{X_{Obsi}}\right| \quad (۳)$$

X_{Obs} و X_{Est} به ترتیب مقدار مشاهده‌ای و برآورد شده داده و n تعداد داده‌ها می‌باشد.

نتایج و بحث

به منظور بررسی اثر پارامترهای طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع از سطح دریا بروی بارندگی، از ۵ دوره بارش از جمله میانگین دوره خیلی خشک، دوره خشک، کل دوره، دوره مرطوب و دوره خیلی مرطوب استفاده گردید. پس از محاسبه مقادیر شاخص بارش در ۵ حالت مختلف، همبستگی این دوره ها در شرایط تک متغیره با ارتفاع و چند متغیره با ارتفاع و طول و عرض جغرافیایی به منظور محاسبه ضریب هر متغیر برقرار گردید (جدول ۲). در شرایط رابطه تک متغیره، ضریب ارتفاع از حالت دوره خیلی خشک تا خیلی مطوب افزایش قابل توجهی را نشان داد. طوریکه در در دوره خیلی خشک این ضریب ۰/۰۳ و در دوره خیلی مرطوب به ۰/۱۷ افزایش یافته است. به عبارت دیگر در دوره خیلی خشک بارش در مناطق دشتی نسبت به مناطق کوهستانی خیلی متفاوت نمی باشد. در این شرایط، به ازای هر ۱۰۰ متر افزایش ارتفاع، ۳ میلیمتر افزایش بارش مورد انتظار است؛ در صورتیکه در دوره خیلی مرطوب، این مقدار، به ۱۷ میلیمتر می‌رسد.

در روابط چند متغیره، طول و عرض جغرافیایی با بارش در کلیه دوره ها دارای ضریب کاهشی بوده و با گذر از دوره خیلی خشک به دوره خیلی مرطوب، مقدار ضریب کاش بیشتری پیدا می‌کند بطوریکه ضریب طول جغرافیای از ۴/۲۹- در دوره خیلی خشک، به ۸۴/۷۰- در دوره خیلی مرطوب می‌رسد. عرض جغرافیایی نیز رفتار مشابه طول جغرافیایی داشت. ضریب این متغیر نیز از ۱۳/۴۵- در دوره خیلی خشک تا ۵۹/۵۷- در دوره خیلی مرطوب بدست امد. در رابطه چند متغیره با تاثیر کاهشی در بارش، نقش ارتفاع افزایشی بوده و نسبت به شرایط تک متغیره ضرایب بزرگتری را شامل شد. تغییات ضریب ارتفاعی از ۰/۰۵ در دوره خیلی خشک به ۰/۲۵ در دوره خیلی مرطوب افزایش یافت. به عبارت ذیگر با افزایش ۱۰۰ ارتفاع با فرض ثابت بودن طول و عرض جغرافیایی، بارش ۲۵ میلیمتر افزایش خواهد داشت. کل محدوده حوضه تقریبا در دو درجه طول و عرش حغرافیایی واقع شده است و نقش زیادی در بارش ایجاد نخواهد داشت ولی تغییرات ارتقاغی منطقه حدود ۳۰۰۰ متر بوده و لذا تاثیر مهمی در بارش خواهد داشت و بیانگر رابطه مستقیم با بارش است.

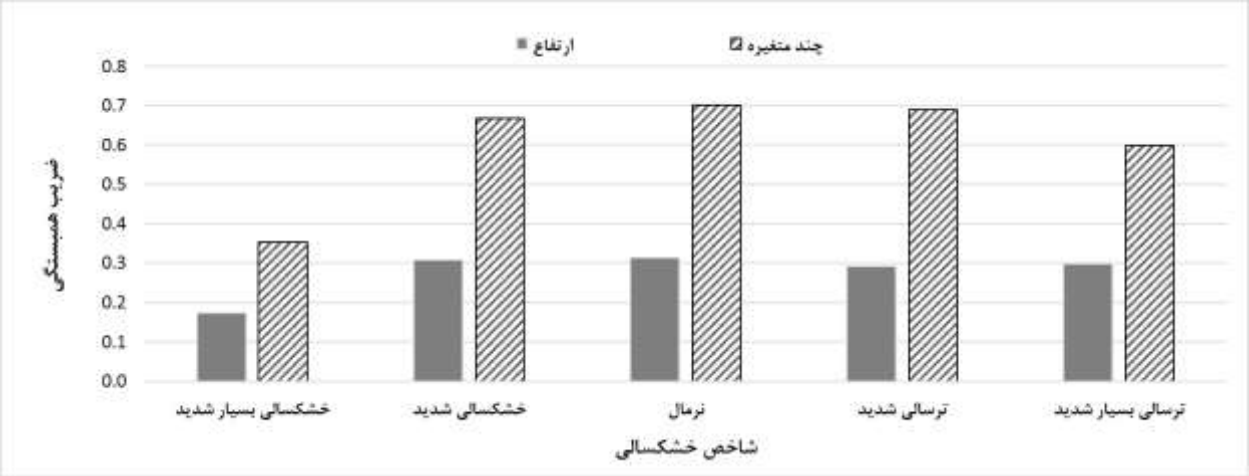
جدول ۲- روابط همبستگی شاخص های بارش با ارتفاع ، طول و عرض جغرافیایی

شاخص بارش	تک متغیره		چند متغیره			
	ضریب ثابت	ارتفاع	ضریب ثابت	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع
خشکسالی بسیار شدید	116.53	0.03	867.18	-13.45	-4.29	0.05
خشکسالی شدید	152.04	0.07	2865.12	-29.91	-37.71	0.11
نرمال	188.58	0.09	3736.17	-38.38	-50.16	0.14
ترسالی شدید	264.98	0.10	4459.82	-46.61	-57.87	0.16
ترسالی بسیار شدید	256.55	0.17	6015.70	-59.57	-84.70	0.25

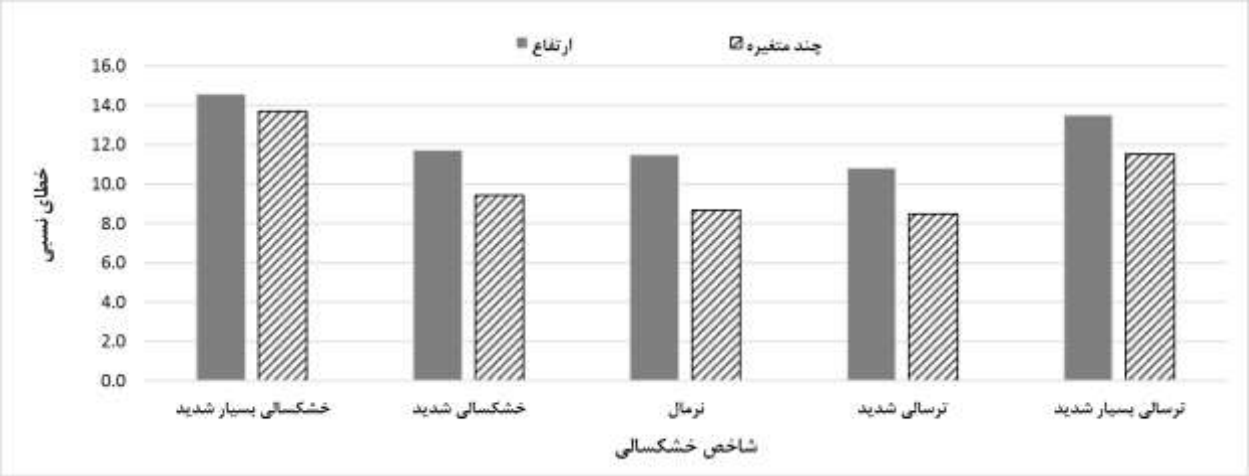
نتایج ضرایب همبستگی نشان داد که براورد میانگین بارش در دوره های محتلف، در رابطه چند متغیره همبستگی بهتری نسبت به حالت تک متغیره دارد. ضریب هم‌بستگی بارش با ارتفاع برای میانگین بارش کل دوره و دوره خیلی مرطوب بالاترین و دوره خیلی خشک پایین ترین همبستگی را دارند. ضریب همبستگی در رابطه چند متغیره و تک متغیره دارای روند مشابه و مقدار آن در رابطه چند متغیره حدود دو برابر تک متغیره بدست آمد. این موضوع بیانگر آن است که در رابطه چند متغیره دارای دقت بهتری نسبت به به رابطه تک متغیره دارد. در جدول ۳ خطای نسبی و ضریب همبستگی و در شکلهای ۲ و۳ نمودار ضریب همبستگی و خطای نسبی آورده شده است. خطای نسبی در روش چند متغیره بطور متوسط حدو دو درصد نسبت به تک متغیره ارتفاع کمتر بدست آمد. همانگونه که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، میزان خطا در دوره های خیللی خشک و خیلی مرطوب نسبت به کل دوره بزرگتر بدست آمد. این موضوع بیانگر آن است که هر چه از شرایط نرمال بارش به سمت فرین کم یا بیشتر می‌رویم، میزان تاثیر عوامل جغرافیایی کمتر شده و احتمالا عوامل سینوپتیکی بیشتر می‌شود.

جدول ۳- ضرایب همبستگی و خطای نسبی در شرایط تک و چند متغیره

میانگین بارش	ضریب همبستگی		خطای نسبی- درصد	
	ارتفاع	چند متغیره	ارتفاع	چند متغیره
دوره خیلی خشک	0.17	0.35	14.57	13.69
دوره خشک	0.31	0.67	11.74	9.42
کل دوره	0.31	0.70	11.50	8.68
دوره مرطوب	0.29	0.69	10.82	8.49
دوره خیلی مرطوب	0.30	0.60	13.50	11.53

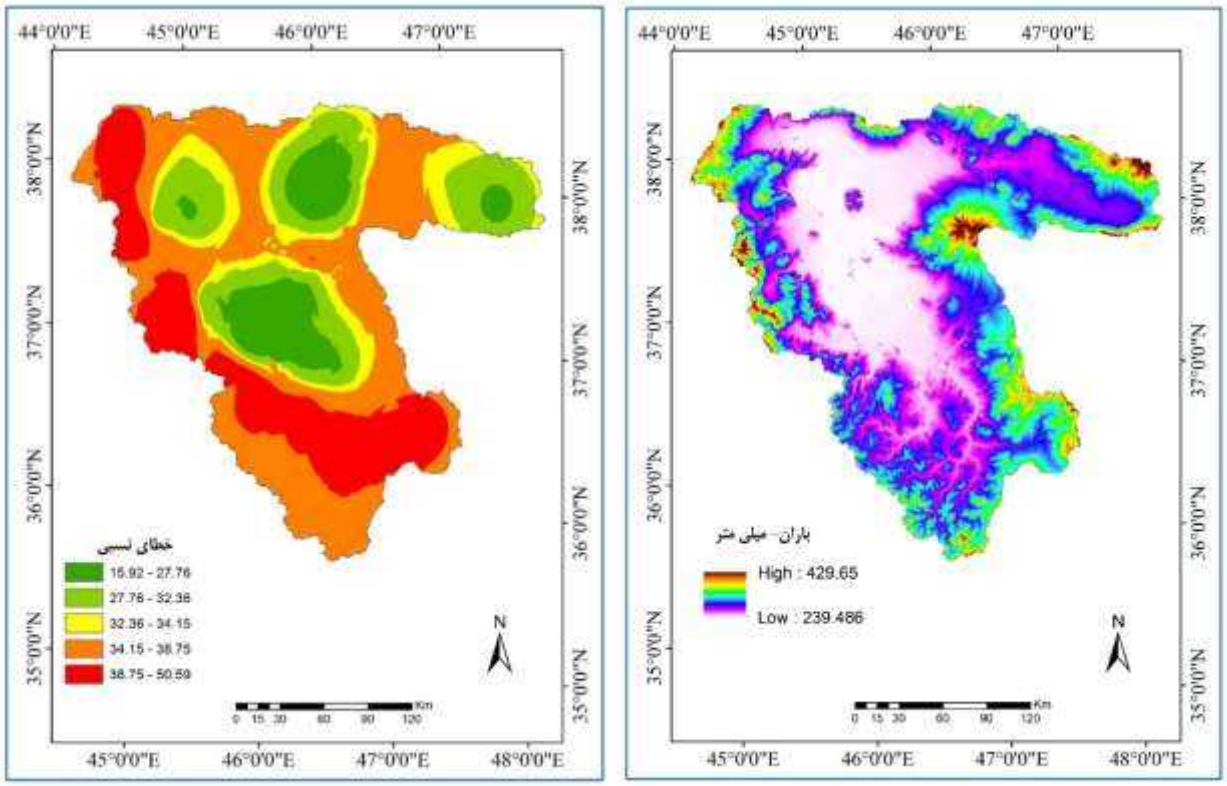


شکل ۲- نمودار ضرایب همبستگی شرایط تک و چند متغیره



شکل ۳- نمودار خطای نسبی شرایط تک و چند متغیره

تغییرات مکانی بارش و خطا نیز با استفاده از روابط ارائه شده نقشه دوره های بارش منطقه مورد مطالعه در محیط Arcgis10.8 تهیه گردید. به عنوان نمونه نقشه تک متغیره با ارتفاع در حالت خشکسالی شدید در شکل ۴ ارائه شده‌است. نتایج نشان داد که بارش در مرکز منطقه مورد مطالعه مقادیر کمتری نسبت به شرق و غرب دارد. همچنین نتایج خطای نسبی مقادیر مشاهده‌ای نسبت به برآوردی (شکل ۵) حاکی از این مطلب است که مقادیر خطا در مرکز حوضه کمتر بوده و از مرکز حوضه به سمت ارتفاعات خطا افزایش پیدا می‌کند.



شکل۴- بارش سالانه در دوره خشکسالی شدید (درونیابی:همبستگی با ارتفاع) شکل۵- خطای نسبی مدل

نتیجه گیری و پیشنهادات

بارش تحت تاثیر عوامل مختلف اقلیمی و جغرافیایی بوده و بر همین اساس تغییرات مکانی و زمانی زیادی را دارد. این پژوهش با هدف بررسی نقش ارتفاع طول و عرض جغرافیایی در بارش دوره‌های ترسالی و خشکسالی انجام شده است تا بر اساس نتایج آن، بتوان مدیریت درست منابع آب را در موقعیت‌های جغرافیایی مختلف اجرا کرد. بر این اساس، بارش سالانه به ۴ دوره خیلی خشک تا خیلی مرطوب در هر ایستگاه تقسیم و علاوه بر آن بارش متوسط ۳۰ ساله نیز محاسبه شد. رابطه‌های رگرسیون تک و چند متغیره خطی با طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع برقرار و صحت و دقت آنها مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج نشان داد که ارتفاع بیشترین نقش را در بین سه عامل یاد شده در تغییرات مکانی بارش دارد. با تغییر بارش از شرایط خشک به مرطوب نقش ارتفاع در معادلات بارش بیشتر می‌شود. لازم به ذکر است از غرب به شرق و از جنوب به شمال بارش روند کاهشی را نشان داد؛ ولی دارای نوسانات زیادی بود. بعبارت دیگر طول و عرض جغرافیایی رابطه معکوس با بارش داشته و با افزایش بارش از دوره خیلی خشک به خیلی مرطوب این نقش افزایش داشت. برعکس ارتفاع رابطه مستقیم با

بارش داشته و با افزایش بارش در دوره خیلی خشک به خیل مرطوب افزایش ضریب ارتفاع صورت گرفته است. مطالعات مشابه در دنیا و به ویژه کشور خیلی کم انجام شده و لذا قابل مقایسه با نتایج این تحقیقات به راحتی امکان‌پذیر نبود. در این رابطه پژوهش مشابهی توسط قرمز چشمه و همکاران (۱۳۹۲) صورت گرفته است که نتایج تقریباً مشابهی به دست آمده است. دقت و صحت روابط به دست آمده نشان داد که پارامترهای جغرافیایی با بارش کل دوره نسبت به دوره های خشک و مرطوب رابطه بهتری را دارند. **منابع**

قرمز چشمه، ب.، ساری صراف، ب.، نساجی زواره، م. (۱۳۹۲). بررسی نقش توپوگرافی در بارشهای سالانه و فصلی و دوره های ترسالی و خشکسالی در جنوب شرق خوزستان. مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، ۶(۱۸)، ۳۱ .

رسولی، ع.، و قرمزچشمه، ب.، نساجی زواره، م.، خیرخواه، م. (۱۳۹۰). بررسی مکانی روند بارش سالانه با استفاده از روش من ـ کندال در شمال غرب کشور، اولین کنفرانس ملی خشکسالی و تغییر اقلیم،کرج،https://civilica.com/doc/309053

مهاب قدس، (۱۳۹۱). مطالعات بهنگام سازی طرح جامع آب کشورحوضه‌های آبریز دریای خزر و دریاچه ارومیه. تهران.

دین پژوه، ی.، و صدیق پور، ر. (۱۳۹۸). تحلیل روند پنج مشخصه مهم بارش های روزانه در حوضه دریاچه ارومیه. مجله پژوهش آب ایران. شماره ۲۸ (۸۸). http//doi.org/10.22034/GP.2023.56731.3140

جوان، خ.، عزیززاده، م. (۱۴۰۳). ارزیابی روش های مختلف تصحیح اریبی بر پیش نگری بارش مدل GFDL-ESM4 در حوضه دریاچه ارومیه، جغرافیا و برنامه ریزی، شماره ۲۸(۸۸)، ص ۱۱۵-۱۰۱، DOI: http//doi.org/10.22034/GP.2023.56731.3140

Ahmadaali, J., Barani, G. A., Qaderi, K., Hessari, B. (2018). Analysis of the effects of water management strategies and climate change on the environmental and agricultural sustainability of Urmia Lake Basin, Iran. Water, 10(2), 160. https://doi.org/10.3390/w10020160.

Alijani, B. (2005). The role of Alborz Mountains in distribution amount of precipitation. Geography Researches , pp:37-52.

Alijani., B, kaviani, M. (1994). Principles of Climatology. Tehran: Samt. p:576

Alizadeh., A, Azadi, M., Aliakbari-Bidokhti, A. (2008). The effects of the Alborz mountain range on the development of synoptic weather systems. Physic, earth and Space , 9-24.

Johansson, B., D. Chen, 2003. The influence of wind and topography on precipitation distribution in Sweden: statistical analysis and modeling. International journal of climatology, 23: 1523-1535. doi: 10.1002/joc.951

Mirgol, B., Nazari, M., Etedali, H. R., & Zamanian, K. (2021). Past and future drought trends, duration, and frequency in the semi-arid Urmia Lake Basin under a changing climate. Meteorological applications, 28(4), e2009. https://doi.org/10.1002/met.2009

Ruiz. D, H. Alonso Moreno, M. E. Gutiérrez, P. A. Zapata, 2008, Changing climate and endangered high mountain ecosystems in Colombia, Science of the total environment, No.3 9 8, p; 1 2 2 – 1 3 2, doi: 10.1016/j.scitotenv.2008.02.038.

Wang. H, C.A.S. Hall, F.N. Scatena, N. Fetcher, W. Wu, 2003, Modeling the spatial and temporal variability in climate and primary productivity across the Luquillo Mountains, Puerto Rico, Forest Ecology and Management, No. 179 p: 69–94.

Investigating the effectiveness of wet and drought precipitation from geographical variables (Case study: Lake Urmia Basin)

Bagher GhermezCheshme[1*], Kazem Saber Chenari[2]

1Associate Prof., Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Tehran, Iran
1Assistant Prof., Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research, Education and Extension Organization, Tehran, Iran
*Corresponding author: baghergh@gmail.com

ABSTRACT

Elevation and geographical location are considered to be the most important factors on controlling precipitation and, depending on its location, have a completely different effect in relation to the direction of rain-bearing clouds. By understanding the relationships between the variables of elevation, longitude, and latitude with regional precipitation and its effect, a more accurate and precise estimate of the amount of precipitation in the region can be obtained. In this study, an attempt has been made to investigate the role of topography, especially elevation, in precipitation in the Urmia Basin. For this purpose, stations with sufficient data were initially selected. Annual data were extracted at each station, a homogeneity test was performed, and outliers were removed. Reconstructed data and topographic parameters including elevation, longitude, and latitude were calculated for each station, and univariate and multivariate relationships of the above factors with annual precipitation were established. To examine the role of morphometric factors in wet and drought conditions on precipitation, the average precipitation of the period, the average precipitation in severe drought, moderate drought, moderate wet, and severe wet conditions were calculated. In each of the aforementioned cases, univariate and multivariate relationships with precipitation were established. Using error measurement methods, the error rate of each method was calculated. The results showed that the multivariate model has better accuracy than the linear relationship between precipitation and elevation. However, the relationship between elevation and annual precipitation was also significant at the 5% level and the effect of elevation was less in dry periods than in normal periods. This indicates that the role of altitude on precipitation is greater in wet periods than in dry periods.

Keywords: Topography, elevation, precipitation, dry and wet periods, multivariate regression

تغییرات اقلیمی و واژگونی تمدن‌ها

هوشنگ مرادی[۱]

۱- دکتری جغرافیا و برنامه ریزی شهری، پژوهشگر و مدرس دانشگاه

چکیده

تغییر اقلیم یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های جهانی است که تأثیرات عمیقی بر تمدن‌ها و جوامع انسانی داشته و در طول تاریخ، باعث تغییرات زیادی در نحوه زندگی، کشاورزی و حتی شکل‌گیری جوامع انسانی داشته است. بیشتر تمدن‌های گذشته دچار فروپاشی شده‌اند، یعنی از دست دادن قدرت سیاسی و اجتماعی- اقتصادی که معمولاً با کاهش چشمگیر جمعیت‌شناسی در آن‌ها همراه بوده است. هدف اصلی این پژوهش بررسی اثرات تغییرات شدید آب‌وهوا بر آسیب‌پذیری جوامع، مانند فروپاشی امپراتوری‌ها و تمدن‌های انسانی می‌باشد.

انقراض تمدن‌ها یکی از موضوعات جالب و در عین‌حال پیچیده در تاریخ بشری هست. این انقراض‌ها معمولاً به دلیل ترکیبی از عوامل طبیعی، اجتماعی و اقتصادی اتفاق افتاده است. برخی از فرهنگ‌ها توانسته‌اند، بر چنین تغییرات ناگهانی اقلیمی تسلط داشته باشند (مثلاً سلسله تانگ در چین، به دلیل یک جامعه ساختارمند). تغییرات شدید آب و هوایی، مانند خشک‌سالی‌های طولانی یا سیلاب‌های مکرر، توانسته است تغییراتی در منابع غذایی، مهاجرت‌ها و جابجایی‌ها، تأثیر بر اکوسیستم‌ها، افزایش دما ایجاد کند و ناپایداری‌های اجتماعی- اقتصادی و زیست‌محیطی فراوانی را منجر شود. مثلاً تمدن مایا به دلیل تغییرات اقلیمی و کاهش بارش دچار فروپاشی شد.

واژگونی تمدن‌های انسانی به معنای سقوط یا فروپاشی یک تمدن به دلایل مختلف است و این موضوع در تاریخ بشری بسیار رایج بوده است. این فرآیند می‌تواند به‌تدریج یا به‌صورت ناگهانی اتفاق بیفتد. تاریخ پر از مثال‌هایی از تمدن‌های بزرگ و شکست‌خورده است که می‌توانند به ما درس‌هایی درباره پایداری، همکاری و اهمیت مدیریت منابع طبیعی بدهند؛ که در نهایت پدیده تغییر اقلیم یک چالش بزرگ برای بشریت به‌حساب می‌آید و نیازمند همکاری جهانی و راه‌حل‌های همه‌جانبه و پایدار هست.

لغات کلیدی: تغییر اقلیم، انقراض جوامع انسانی، سازگاری و پایداری.

مقدمه و بیان مسأله

بررسی سیر تحولات تمدن‌ها از شکل‌گیری تا زوال آن‌ها نشان می‌دهد که جوامع در درون خود مدام در حال تغییر و دگرگونی هستند و بر اساس همین دگرگونی‌ها است که پویایی جامعه تحقق می‌یابد. به‌عبارت دیگر عوامل مختلفی در طول زمان موجب تسریع در روند پیشرفت و پویایی یا افول و انحطاط تمدن‌ها می‌شوند (عزیز پور، ۱۳۹۰: ۱).

در هم تنیدگی، هم‌پیوستگی و در هم آمیختگی عنصرهای موجود در یک منظومه که ویژگی مشترکی بین آن‌ها وجود ندارد را هم -پیوندی سرزمینی گویند. به‌طور کلی سیستم‌های محیطی قادرند بین عناصر محیطی به‌رغم گوناگونی و تفاوت، نوعی پیوستگی و در هم آمیختگی به وجود آورند (رامشت و باباجمالی، ۱۳۹۹: ۳۱). این هم پیوندی‌ها در قالب سازمندی‌های طبیعی و فرهنگی منجر به ظهور تمدن‌های مختلف در طول زمان شده است. از دیدگاه دیگر پاره‌ای از مؤلفه‌ها در مکان‌های طبیعی دارای ساختارهای خاصی هستند که پتانسیل‌های موجود در ریخت‌شناسی آن باعث جذب گروه‌های انسانی برای تشکیل تمدن‌ها شده است. در حقیقت تمدن‌ها اشکالی از اجتماعات انسانی می‌باشند که با خصوصیاتی مانند، مکان یا قلمرو مشخص، نوع معیشت، فرهنگ، ابزار، مسکن و همچنین رفتارهای اجتماعی هویت یافته و معنا پیدا می‌کنند. به‌بیان دیگر تمدن را می‌توان معلول عملکرد مدنیت‌های مختلف در یک دوره زمانی خاص قلمداد نمود که در مکان‌های جغرافیایی خاصی ظاهر می‌شوند (باباجمالی،۱۳۹۰: ۴۳). بسترهای طبیعی شرایط لازم را برای استقرار سکونتگاه‌ها ایجاد می‌کنند؛ هر چند بعضی از آن‌ها شرایط پایدارتر را نسبت به بعضی دیگر ایجاد می‌کنند. موقعیت جغرافیایی، توپوگرافی، گسل، اقلیم، هیدرولوژی، سنگ‌شناسی، جهت دامنه، رودخانه، بارش، دما، رطوبت، شیب، ارتفاع از سطح دریا، ساختمان زمین‌شناسی، منابع آب، خاک و قابلیت اراضی از جمله مهم‌ترین عوامل طبیعی می‌باشند. تأثیر این عوامل نه‌تنها بر استقرار سکونتگاه‌های انسانی بسیار مشهود است؛ بلکه بر روحیات و ویژگی‌های جسمی افراد مختلف نیز تأثیرگذار می‌باشد (شیخ شریعتی کرمانی، ۱۴۰۱).

در ایران در اواسط دوره هولوسن، هم‌زمان با عصر مفرغ، شرایط آب‌وهوایی مناسب برای گسترش تمدن‌های باستانی، پدید آمده است. تمدن‌هایی مانند شهر سوخته در سیستان، تپه سیلک در کاشان و کنار صندل در دره هلیل رود، از جمله تمدن‌هایی هستند که در صحراهای ایران شکل گرفته و به شدت وابسته به نوع اقلیم بوده‌اند. اقلیم مرطوب می‌توانسته شرایط مناسبی برای زیستن، کشاورزی و دامپروری پدید آورد، در حالی که اقلیم خشک و بیابانی، سبب نابودی منابع آبی و در نتیجه شهرهای باستانی شده است (زندی، ۱۴۰۱). شهر سوخته در استان سیستان و بلوچستان و در ۵۶ کیلومتری جنوب زابل قرار دارد. بازمانده‌های این تمدن به منزلهٔ یکی از محوطه‌های مهم آغاز شهرنشینی در جنوب خاوری فلات ایران در کنار دلتای رود هیرمند و بر روی تراس رمرود واقع شده است. بقایای شهر سوخته در مساحتی حدود ۱۵۰ هکتار فقط با شمار اندکی از شهرهای عصر مفرغ قابل مقایسه است (طاهری، ۱۳۹۸). وجود منابع آبی محدود و اکوسیستم ناپایدار اطراف دریاچه حساسیت بالایی را نسبت به تغییرات اقلیمی نشان می‌دهد (رشکی، کاسکاوتیس، ۲۰۱۲: ۵). حال با توجه به ویژگی‌های محیط طبیعی و شرایط زیست‌بوم مراکز سکونتگاه‌های انسانی، مسأله مورد بحث و بررسی در این پژوهش بررسی

و تحلیل مهم‌ترین عوامل محیطی (طبیعی و انسانی) مؤثر بر شکل‌گیری و انحطاط تمدن‌های انسانی در ایران است. با تکیه‌بر مسأله اصلی تحقیق سؤال پژوهش این است آیا تغییرات آب‌وهوایی می‌تواند تمدن‌های بزرگ را نابود کند؟

ادبیات تحقیق

مبانی نظری و پیشینه پژوهش

ارزیابی عوامل مؤثر بر شکل‌گیری و انحطاط تمدن‌ها به‌خوبی بر این واقعیت تأکید دارد که بستر ظهور و انحطاط تمدن‌ها در همه نقاط یکسان نبوده است و بر اساس عوامل محیطی، تبلور و انحطاط این کانون‌ها از پدیده‌های طبیعی و انسانی تبعیت نموده است. به طور کلی کانون‌های تمدنی مستقر در یک مکان قادر به خلق هویتی خاص در طول زمان هستند. بدیهی است جهت ساماندهی و مدیریت کانون‌های مذکور توجه به بنیان‌های فرهنگی - مکانی از اهمیت خاصی برخوردار است. به عبارتی مدیریت اجتماعات و سازمان‌های اجتماعی امکان‌پذیر نمی‌گردد مگر آنکه تبارشناسی مکانی درستی از مجموعه‌های ذکر شده حاصل گردیده باشد. همچنین برنامه‌ریزی در جهت پایداری نیز بدون در نظر گرفتن این تبارشناسی مکانی امکان‌پذیر نمی‌باشد و توسعه پایدار جز با توجه به چارچوب‌های معرفتی آن جامعه و توجه به آرمان و آرزوهای جامعه میسر نمی‌گردد (خسروی، ۱۳۹۲: ۳).

از طرفی مطالعه عوامل محیطی مؤثر بر بروز و سقوط تمدن‌ها موجب برنامه‌ریزی دقیق‌تر می‌شود و برای حفظ مناطق مختلف در رابطه با فرآیندهای طبیعی و مخاطرات نیز حائز اهمیت می‌باشد؛ زیرا عواملی که در گذشته بر شکل‌گیری، شکوفایی، انحطاط و نابودی تمدن‌ها و سرزمین‌ها اثرگذار بوده‌اند، می‌توانند در برخی مواقع در حال یا آینده نیز اثرگذار باشند. از این‌رو به دلایل مذکور، مطالعه و بررسی عوامل مؤثر بر انقراض و واژگونی تمدن‌های انسانی از ضروریات این پژوهش می‌باشد. مطالعه و بررسی تمدن‌ها و عوامل مؤثر بر شکل‌گیری، شکوفایی و انحطاط آن‌ها علاوه بر اهمیت ملی و تاریخی می‌تواند اهمیت بین‌المللی و جهانی نیز داشته باشد؛ زیرا این مطالعات برای فرهنگ، تمدن، هویت و قدمت هر کشوری از اهمیت فراوانی برخوردار است. از طرفی مطالعه عوامل محیطی مؤثر بر شکل‌گیری و انحطاط تمدن‌ها نقش مهمی در برنامه‌ریزی دقیق و اصولی جهت دستیابی به توسعه و پیشرفت و همچنین کاهش خسارت‌های ناشی از مخاطرات محیطی در مناطق مختلف خواهد داشت. به همین علت پژوهش‌های متعددی توسط محققین مختلف در این زمینه صورت گرفته است: از جمله شیخ شریعتی کرمانی و همکاران (۱۴۰۱) بازسازی شرایط ظهور و افول تمدن باستانی شهداد با تأکید بر عوامل بسترساز طبیعی و انسانی پرداختند؛ نتایج به‌دست آمده از این تحقیق نشان داد که سطح دریا، موقعیت جغرافیایی، عدم وجود آب‌وهوای شدیداً گرم و یا سرد، افزایش بارش، افزایش آب رودخانه‌ها، خاک جلگه‌ای و حاصلخیز، مهم‌ترین عوامل طبیعی مؤثر بر شکل‌گیری تمدن شهداد بوده است. از طرفی نوسانات دمایی، بارش‌های رگباری، طغیان رودخانه‌ها و سیلاب مهم‌ترین عوامل طبیعی مؤثر بر انحطاط این تمدن بود. کشاورزی، موقعیت سوق‌الجیشی و ارتباط دو سویه با ملل مجاور نیز مهم‌ترین عوامل انسانی مؤثر بر شکل‌گیری تمدن شهداد بوده است.

رایگان و اسلامی (۱۳۹۸) در پژوهشی با عنوان بررسی تأثیر عوامل طبیعی در شکل‌گیری و ماندگاری شهر تاریخی دهدشت؛ از اهمیت عوامل طبیعی در شکل‌گیری و ماندگاری هویت‌ها سخن به میان آوردند. آن‌ها با استفاده از روش توصیف تاریخی –تحلیلی نتیجه می‌گیرند که آب مهم‌ترین عامل طبیعی در شکل‌گیری و ماندگاری شهر تاریخی دهدشت بوده است.

ملک شهمیرزادی (۱۳۸۷) ضمن تشریح مناطق باستانی ایران، تغییرات متعدد دوره‌های اقلیمی در اواخرکواترنر را از عوامل اصلی در شکل‌گیری، انحطاط و قبض و بسط تمدن‌ها می‌داند. همچنین فورس (۲۰۱۰) ضمن ارزیابی عوامل مؤثر بر شکل‌گیری تمدن‌ها و بررسی سیزده تمدن بزرگ دنیا نتیجه می‌گیرد که آب مهم‌ترین عامل در شکل‌گیری تمدن‌ها بوده است. ایشان تأکید می‌کند که تأثیر آب بر شکل‌گیری تمدن‌ها بسیار بیشتر از خاک، بازرگانی و مسائل اجتماعی است.

هاگ و همکاران (۲۰۰۳)، با تجزیه‌وتحلیل رسوبات در حوضه Cariaco در جنوب دریای کارائیب، گزارش داد که گسترش سریع مایا از ۵۵۰ تا ۷۵۰ پس از میلاد در یک دوره نسبتاً مرطوب رخ داده است. با این‌حال، از سال ۷۵۰ تا ۹۵۰، مایاهای جنوبی تغییرات آب‌وهوایی ویرانگر را تجربه کردند، یک دوره به‌طور کلی خشک در حدود سال ۷۶۰ پس از میلاد آغاز شد. دوره خشکی حدود ۱۴۰ سال ادامه یافت.

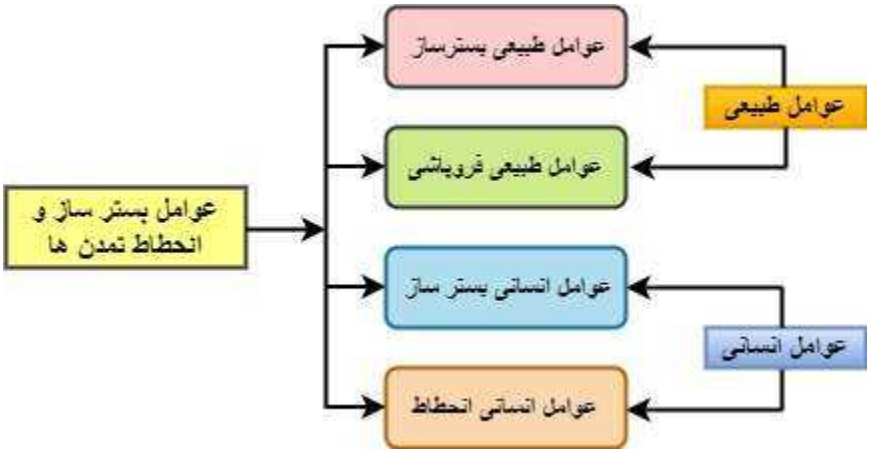
ریدلی و همکاران (۲۰۱۲) از طریق تجزیه‌وتحلیل استالاگمیت بلیز، یک بارندگی ماهانه پالئویی را در مقیاس ماهانه بازسازی کرد تا تاریخ ۲۰۰۰ ساله بارندگی را با جزئیات بیشتر از همیشه ردیابی کند. آن‌ها نشان می‌دهند که جنگل‌زدایی پیش از کلمبیا، آب‌وهوای مزو آمریکا را به سمت وضعیت متوسط خشک‌تر سوق داده و خشک‌سالی را در منطقه تقویت می‌کند. آن‌ها خاطر نشان کردند که «تمدن کلاسیک مایاها» در طی قرن‌ها با خشک شدن باران سقوط کرد، کشاورزی را مختل کرد و باعث بی‌ثباتی شد که منجر به جنگ‌ها و فروپاشی شهرهای بزرگ شد. آخرین خشک‌سالی بزرگ پس از فروپاشی سیاسی مایا ممکن است چیزی باشد که تمدن را از بازگشت باز داشت.

کوک و همکاران (۲۰۱۲)، با استفاده از بازسازی پوشش گیاهی ۲۰۰۰ ساله، نشان داد که تغییر از جنگل به محصولات کشاورزی، مانند ذرت، چقدر آب‌وهوا را تغییر می‌دهد. نتایج آن‌ها نشان داد که وقتی جنگل‌زدایی به حداکثر خود رسید، می‌تواند تا ۶۰ درصد از خشک‌سالی را تشکیل دهد. تغییر از درختان به ذرت، میزان آب انتقال یافته از خاک به جو را کاهش می‌دهد که باعث کاهش بارندگی می‌شود؛ بنابراین جنگل‌زدایی کل خشک‌سالی را توضیح نمی‌دهد، اما بخش قابل‌توجهی از خشک‌سالی کلی را که تصور می‌شود رخ داده است توضیح می‌دهد.

ترنر و همکاران (۲۰۱۲) نشان داد که تغییرات چشم‌انداز مایا در مقیاس بزرگ و تقاضاهایی که بر منابع و خدمات اکوسیستم اعمال می‌شود، شرایط محیطی پر استرسی را ایجاد می‌کند که با افزایش خشکی آب‌وهوایی تقویت می‌شود. چنین شرایط محیطی در حال تغییری منجر به افزایش تضادهای اجتماعی شد که به کاهش کنترل توسط نخبگان مایا کمک کرد که «به‌جای متحمل شدن هزینه‌های بالای حفظ سیستم‌های محیطی انسانی در محل»، به تصمیم‌گیری برای نقل‌مکان به‌جای دیگری در منطقه شبه‌جزیره منجر شد. به‌عبارت دیگر، با پاک‌سازی جنگل، مایاها ممکن است خشک‌سالی طبیعی را تشدید کرده باشند، خشک‌سالی که تقریباً در زمان پایان امپراتوری و کاهش جمعیت به‌شدت به اوج خود رسید. این آخرین نسخه

این واقعیت را برجسته می‌کند که «مورد مایا بینش‌هایی را برای استفاده از «پالئو» و مشابه‌های تاریخی برای اطلاع‌رسانی تغییرات زیست‌محیطی و پایداری جهانی معاصر ارائه می‌کند».

نویسندگان دیگر (دانینگ و همکاران، ۲۰۱۲)، (لوزادر و همکاران، ۲۰۱۲) همچنین فروپاشی مایا را با جزئیات مطالعه کردند تا به این نتیجه برسند که سه عامل تأثیرگذار بر آسیب‌پذیری و انعطاف‌پذیری انسان‌های همراه سیستم‌های محیطی وجود دارد: «گزینه‌هایی برای تغییر، سیستم استحکام، و ظرفیت ارتجاعی». نویسندگان بیان می‌کنند که ممکن است مایاها به دلیل تأثیرات آبشاری سیستم آبیاری بیش‌ازحد به دلیل تغییرات آب‌وهوایی (خشک‌سالی‌های شدید) سقوط کرده باشد. آن‌ها تعمیر و نگهداری کانال را رها کردند و مناطق آنها به محل بدبختی تبدیل شدند و به جنگل بازگشتند. شکل (۱) در زیر عوامل بسترساز یا تأثیرگذار بر شکل‌گیری و انحطاط تمدن‌های انسانی را نشان می‌دهد.



شکل (۱) چارچوب مفهومی پژوهش (مآخذ: نویسندگان، ۱۴۰۴).

روش تحقیق

این تحقیق از نظر ماهیت کاربردی و از نظر روش پژوهش، توصیفی- تحلیلی می‌باشد؛ که با استفاده از داده‌های اسنادی و مطالعات کتابخانه‌ای و بازسازی شرایط محیطی گذشته در بین سکونتگاه‌های انسانی که دچار انقراض و نابودی گردیده‌اند، به انجام رسید. برای گردآوری داده‌ها از شیوه‌های کتابخانه‌ای، استنادی، مطالعات بافت شناختی، شواهد ژئومورفولوژیکی، نقشه‌های پر تنش آبی، روندهای تاریخی آثار جغرافیایی استفاده شد.

یافته‌های پژوهش

شهرها و تغییرات اقلیمی

هر چند ساکنان شهرها بر مبنای سرانه کربن کمتری تولید می‌کنند، شهرنشینی سریع به این معناست که در کل میزان انتشار کربن در شهرها افزایش یافته است. این مقدار حدود ۸۰ درصد از کل دی‌اکسید کربن را شامل می‌شود و به طرز چشمگیری به انتشار سایر گازهای گلخانه‌ای کمک می‌کنند (Bronowski,J, 1974). در عین‌حال شهرها از طریق توسعه‌های پرتراکم، پیاده محور و دسترسی به حمل‌ونقل همگانی انبوه یا امکان برخورداری از آن بهترین فرصت برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای محسوب می‌شوند. فعالیت‌های که بیشترین سهم را در گرمایش جهانی دارند در نواحی شهری متمرکز شده‌اند مانند: حمل‌ونقل، صنعت، ساخت‌وسازها. مطالعات حاکی از آن است که توسعه با تراکم بالا انتشار گازهای گلخانه‌ای را در بخش حمل‌ونقل کاهش می‌دهد. اغلب برنامه‌های کاهش نشر گازهای گلخانه‌ای در حمل‌ونقل بر کارایی سوخت وسیله نقلیه تأکید می‌کنند.

تغییرات اقلیمی و تاریخ

تصادفی نیست که جهانی‌ترین موضوع گفتگو آب‌وهوا است، نیوانگلندی‌ها از باد شرقی می‌گویند و مصری‌ها از طلوع رود نیل صحبت می‌کنند. این چیزها صرفاً بیان این واقعیت است که از میان پدیده‌های طبیعت هیچ یک به‌اندازه عناصر آب‌وهوایی بر انسان تأثیر مستقیم و حیاتی ندارد. اگر انسان تا این حد تحت تأثیر شرایط اقلیمی است که هم اکنون حاکم و آشکار می‌باشد که هرگونه تغییر اقلیم که در گذشته اتفاق افتاده یا ممکن است در آینده رخ دهد از بالاترین اهمیت برخوردار است.

درک این حقیقت مورخان، جغرافیدانان و دیگران را به بحث در مورد تغییرات آب‌وهوا از زمان یونانیان سوق داده است. افلاطون و سایر نویسندگان می‌گویند که قبلاً آب‌وهوای یونان مرطوب‌تر و جنگل‌ها بیشتر از زمان خود بود. ارسطو اعلام می‌کند که سیل دوکالیون به دلیل یک چرخه دوره‌ای در پدیده‌های جوی بوده است. او بیان می‌کند که همان‌طور که زمستان هر سال به‌طور منظم باز می‌گردد، در دوره‌های طولانی بارندگی‌های شدید و سرد نیز باز می‌گردد؛ به‌عبارت دیگر او نظریه تغییرات ضربانی آب‌وهوا را اعلام می‌کند. به مدت دو هزار سال آن نظریه در حال تعلیق بود. بسیاری از مردم درباره احتمال خشک شدن تدریجی زمین، سرد شدن تدریجی یا افزایش تدریجی گرما بحث کردند، اما همه بحث‌ها بر اساس ایده تغییرات آهسته و نسبتاً منظم بود.

جغرافیدان امروزی به اهمیت عوامل فیزیکی، به‌ویژه آب‌وهوا، در تأثیرگذاری بر برخی از حقایق بزرگ تاریخ پی می‌برد، اما معمولاً بیش از تأثیر آهسته و کلی را در مقابل تأثیرات سریع و مشخصی که پذیرش این قانون می‌گذارد، نمی‌پذیرد. نظریه تغییرات ضربانی به‌طور طبیعی نیازی ضروری است.

در مورد رابطه آب‌وهوا و تأثیرگذاری آن بر مردمان یک سرزمین می‌توان به کشور مصر اشاره کرد: مصر نمونه‌ای عالی از ارزش مطالعه اقلیمی در این رابطه و همچنین خطرات آن در صورت عدم استفاده در پرتو تاریخ ارائه می‌دهد. ما یک آب‌وهوای گرم و خشک داریم که در آن وابستگی اصلی محصولات کشاورزی نه به باران، بلکه به بالا آمدن رود نیل است. این افزایش، به‌طور منظم مانند فصول سال، تغییر نسبتاً اندک دما در بین خود فصول، و عدم وجود تقریباً کامل بارندگی

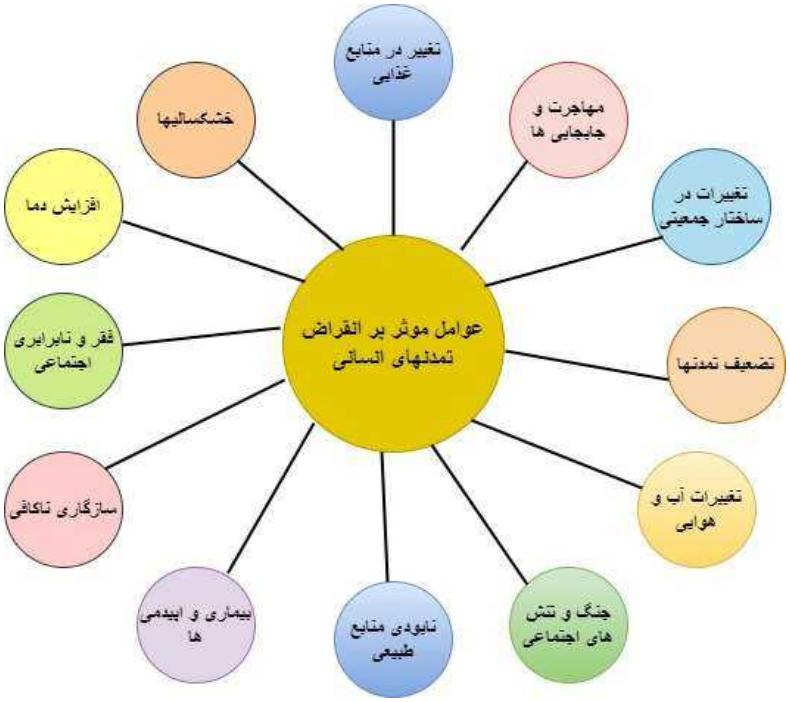
در ارتباط با حاصلخیزی خاک و تعداد اندک محصولات اصلی، شرایطی را ایجاد کرده است؛ که در آن تنها چیزی که خواسته می‌شود اجرای مداوم یک روال است که هرگز تغییر نمی‌کند و بیشتر به مغز نیاز دارد. فقط باید به یک اثر اشاره کرد. فقط به دلیل اینکه خود را با آب‌وهوا وفق ندادند، عصبانی شدند و در نهایت کشته شدند. به‌عبارت‌دیگر، آب‌وهوا فقط بر مردمانی که مصری‌ها را شایسته مطالعه ما کرده‌اند، تأثیر منفی داشته است؛ و از آنجایی‌که تاریخ به معنای تکامل است، دهقانان تغییرناپذیر، که تأثیر آب‌وهوا را به طرز چشمگیری نشان می‌دهند، فقط باید یک‌بار توسط مورخ ذکر شود، و پس از آن شاید بتوان وجود آن‌ها را برای رابطه تاریخی بعدی فرض کرد.

اگر در حال حاضر پذیرفته شود که تمام کمک‌های مهم مصر در طول تاریخ بشر به‌واسطه مهاجمان بوده است و دهقانان از زمان‌های بسیار قدیم دقیقاً همین ویژگی را حفظ کرده‌اند، مورخ و جغرافی‌دان نیز به همین صورت اتفاق نظر دارند.

جغرافی‌دانی که به تغییرات تپنده اقلیم معتقد است به‌سختی می‌تواند از این نتیجه‌گیری اجتناب کند که جنبش‌های بزرگ مردمان ناشی از چنین تغییراتی بوده و این جنبش‌ها دوره‌هایی از تهاجم و هرج‌ومرج را به وجود آورده است. همچنین به این نتیجه می‌رسد که وقتی استرس ناشی از شرایط نامساعد اقلیمی به دلیل تغییر دیگری برطرف شده است، این بار در جهت مساعدتر شدن شرایط اقلیمی، رونق و پیشرفت حاکم بوده است. البته نویسنده هم معتقد است نمی‌شود همه تهاجمات و همه رفاه‌ها به دلایل اقلیمی ربط داد، بلکه می‌توان عوامل اقلیمی را صرفاً یکی از عوامل مهم در ایجاد چنین نتایجی بوده قلمداد کرد.

ظهور و سقوط تمدن‌های فضایی

پیامدهای منفی تغییر اقلیم در رتبه نخست دو عامل تهدیدآمیز بشر در قرن ۲۱ نظیر فقر، سلاح‌های هسته‌ای، کمبود غذا و ... است. از مهم‌ترین آثار منفی تغییر اقلیم می‌توان به افزایش وقوع بلایای جوی و اقلیمی مانند سیل، خشک‌سالی، طوفان‌های گردوخاک، موج‌های گرمایی و سرمایی کاهش منابع و ذخایر برف اشاره کرد. شکل (۲) در زیر به چند نمونه از مواردی که منجر به ظهور و سقوط تمدن‌ها می‌شود، اشاره شده است.



شکل (۲) عوامل مؤثر بر واژگونی تمدن‌ها (منبع: نویسنده، ۱۴۰۴)

چهار سناریوی احتمالی نابودی سیارات یا تمدن‌های بشری:

نابودی: جمعیت و وضعیت سیاره بسیار سریع افزایش می‌یابد در نهایت به نقطه اوج می‌رسد با بدتر شدن شرایط بقا سخت و سخت‌تر می‌شود و جمعیت به‌طور ناگهانی کاهش پیدا می‌کند سرانجام به یک سطح ثابت و در نهایت بخش کوچکی از این جمعیت تنها محکوم به بقا باقی می‌ماند.

سناریوی پایدار: جمعیت و دما افزایش می‌یابد در نهایت هر دو بدون تأثیرات فاجعه‌بار به یک نقطه ثابتی می‌رسند- این سناریو زمانی رخ می‌دهد که تمدن متوجه تأثیر منفی بر روی سیاره می‌شود و منابع انرژی رفته‌رفته کنار گذاشته می‌شود و به منابعی با تأثیر کم مانند انرژی خورشیدی روی می‌آورد.

سناریو فروپاشی بدون تغییر منابع: جمعیت و دمای متوسط به‌سرعت افزایش می‌یابند وقتی جمعیت به نقطه اوج رسید با شتاب کاهش پیدا می‌کند- نتیجه جهانی در این سناریو فروپاشی تمدن است.

سناریو فروپاشی با تغییر منابع: جمعیت و دمای متوسط افزایش می‌یابد اما وقتی‌که جمعیت متوجه مشکلاتی که برای سیاره خود به وجود آورده می‌شود منابع انرژی مخرب را کنار می‌گذارد- در این حالت هر اقدامی دیر به نظر می‌رسد و نتیجه آن فروپاشی تمدن است. این سناریو ترسناک‌ترین سناریو است حتی اگر اقدامی درست انجام دهید به دلیل از دست رفتن زمان زیادی باز هم نتیجه فروپاشی و سقوط تمدن است.

سناریوهایی برای شهرهای آینده

سناریو ۱: واژگونی

ما علاقه نداریم واژگونی شهرها را متصور شویم، اما تاریخ مملو از شهرهای واژگون شده اِفسوس[۶۶] در روزگار مدرن ترکیه، دومین شهر بزرگ امپراتوری روم بود. این شهر بندری پررونق در سال ۱۰۰۰ بعد از میلاد مسیح زمانی که به دلیل فرونشست آب رودخانه در اثر قطع درختان بلندی‌های اطراف دیگر قادر نبود به‌عنوان بندرگاه فعالیت کند متروک شده است. اِفسوس ارتباط میان عدم مدیریت صحیح محیط‌زیست، جنگ و اقتصاد را نادیده گرفته بود؛ اما امروز می‌توانید بر خرابه‌های که زمانی شهر بندری بزرگی در سواحل مدیترانه بود در حال حاضر یک زمین ۵ مایلی در اثر فرسایش از آن باقی ماده است قدم بزنید. داستان‌های مشابهی از این قبیل را می‌توان در انجیل و در مورد شهرهای مانند بابل مشاهده کرد. جارد دیامون واژگونی را این‌گونه تبیین می‌کند: کاهش بی‌سابقه در جمعیت انسانی یا پیچیدگی‌ای سیاسی، اقتصادی، اجتماعی در پهنه‌ای کلان در زمانی طولانی. او در ادامه می‌گوید: واژگونی شهرها شدیدترین شکل از انواع خفیف‌تر زوال آن‌ها است (Diamond,J, 2005).

در سال ۲۰۰۵ با واژگونی شهر نیواورلئان در اثر تغییرات اقلیمی شدید، جهان در بهتی عظیم فرو رفت. فقدان آمادگی در شهر شرم آور بود. هنگامی‌که تمامی ملزومات تمدن نابود شد، مردم سرسختانه در جستجوی غذا و امنیت تلاش می‌کردند. این صحنه‌ها همگی ما را حیرت‌زده کرد؛ اما تاریخ حاکی از آن است که نباید حیرت کنیم؛ این ظرفیت در شهر وجود دارد. لوئیز مامفورد از شهر اموات صحبت می‌کرد؛ شهری که مقدر به نابودی است ویژگی‌های این شهر را چنین برشمرد: مهم‌تر از همه چیز، تمرکز جمعی عظیم در مسائل ناپایدار سطحی در همه زمینه‌ها است. زمانی که این نشانه‌ها تکثیر می‌شوند، شهر اموات فرا می‌رسد، اگر چه هنوز سنگی فرو نریخته است. بعد از پشت سر گذاشتن رنج و مرگ ناشی از واژگونی تلاش می‌کنیم این شهرها را از نو بسازیم و از آنچه اتفاق افتاده درس بگیریم. تجربه نیواورلئان سبب مجاهدت همه‌جانبه مردم برای عبرت از آنچه بر آن گذشته است می‌باشد (Mumford, L, 2007).

سناریو ۲: شهر تاب آور

سناریو شهر تاب آور زمانی اتفاق می‌افتد که قابلیت دسترسی و اشکال گوناگون سوخت و ساختمان در قلمروهای زیستی که در سناریو شهر تفکیک شده تنها منحصر به ثروتمندان می‌شد، برای همگان فراهم شود. در شهر تاب آور مردم به مشاغل و خدمات به‌وسیله حمل‌ونقل همگانی یا پیاده‌روی دسترسی دارند و در عین حال استفاده از خودروهای برقی برای سفرهای کوتاه امکان‌پذیر می‌شود. جابجایی‌های درون شهری به‌وسیله خطوط ریلی سریع‌السیر برقی صورت می‌گیرد و به میزان قابل توجهی به‌واسطه وجود نسل جدیدی از فناوری کنفرانس تصویری با کیفیت بالا کاهش خواهد یافت. طراحی ساختمان‌های سبز و سوخت‌های تجدید پذیر بخشی از تمامی محلات خواهد بود. شهر از خطوط ریلی جدید که تمامی بخش‌های آن‌ها به هم متصل می‌کند، برخوردار خواهد شد. مراکز قابل پیاده‌روی در سراسر منطقه شهری ایجاد می‌شوند، در حالی‌که به

[۶۶] -Ephesus

بهترین ساختمان‌های سبز و زیرساخت‌ها مجهز هستند. در نواحی بین مراکز و محورهای توسعه یافته و متراکم حمل‌ونقل همگانی برای کمک به مدیریت عملکرد اکولوژیکی شهر مانند تولید افزوده انرژی‌های تجدید پذیر و بازیافت آب ضایعات، دهکده‌های زیست‌محیطی شهری مستقر خواهند شد. همه این‌ها با یک سیستم زیرساخت سبز در سطح شهر به‌وسیله سیستم‌های کنترل هوشمند و مدیریت محلی پیوند خواهند خورد، همچنین دهکده‌های زیست‌محیطی شهری، محصولات کشاورزی ویژه را پرورش می‌دهند و نواحی شهری دارای تنوع زیستی را مدیریت می‌کنند. این دهکده‌های در عین اینکه به دلیل عملکردهای مختلف شهری در فاصله قابل قبولی از شهر واقع شده اند، بسیار خودکفا هستند.

تمدن جزیره ایستر

نخستین ساکنان این جزیره بین سال‌های ۴۰۰ تا ۷۰۰ م وارد جزیره شدند و شروع به استعمار آن کردند و تا سال ۱۲۰۰ تا ۱۳۰۰ م به نقطه اوج جمعیتی با جمعیتی حدود ۱۰ هزار نفر رسیدند و در نهایت در قرن ۱۸ ساکنان جزیره منابع طبیعی خود را کاملاً مصرف و جمعیت آن‌ها به‌شدت کاهش یافت.

در فروپاشی تمدن‌ها مفهومی بنام ظرفیت پشتیبانی یا حداکثر تعداد گزینه‌هایی که محیط می‌تواند پشتیبانی کند اشاره دارد. واکنش زمین نسبت به تمدن بشری تغییرات اقلیمی است. اگر وارد تغییرات اقلیمی بسیار شدیدی شوید (ظرفیت پشتیبانی کاهش می‌یابد) تولید مواد غذایی کاهش می‌یابد؛ زیرا اثرات مخرب به محیط وارد شده است. اگر شرایط اقلیمی به‌اندازه کافی تغییر کند ممکن است دیگر راهی برای معکوس کردن آن وجود نداشته باشد، و اگر منابع با تأثیر مخرب بالا کنار بگذاریم از دیگر منابع تجدید پذیر استفاده کنیم ممکن است بسیار دیر شده باشد این تخریب به‌اندازه کافی تأثیر خود را روی سیاره گذاشته است.

«تمدن‌هایی که نتوانسته‌اند موفق به درک شرایط و اتفاقاتی که می‌افتاد شدند و گذرگاهی برای عبور از شرایط پیدا کردند سقوط کردند».

اقلیم همیشه نقش اساسی در خاورمیانه داشته است این چیزی است که همیشه در نظر گرفته نمی‌شود. امپراتوری‌ها به دلیل ضعف جانشینان، طاعون، و توسعه سیاسی- نظامی سقوط کردند آن‌ها عموماً اقلیم را یک عامل محرک که در پس این تغییرات است را نادیده می‌گیرند.

مقایسه تحولات محیطی در حذف تمدن جیرفت

شرایط بهینه اقلیمی و به دنبال آن منابع آبی، یکی از مهم‌ترین مسائل تمدن‌های بشری، از ابتدا تا کنون بوده است. تمدن‌هایی مانند بین‌النهرین، مصر و ایلام، به ترتیب در کنار رودهای دجله و فرات، نیل و کارون پدید آمده‌اند و بیانگر اهمیت آب در شکوفایی تمدن‌های باستانی هستند. در ایران، در اواسط هولوسن، که هم‌زمان با عصر مفرغ است، شرایط آب و هوایی مناسب برای گسترش تمدن‌های باستانی، پدید آمده است. تمدن‌هایی مانند شهر سوخته در سیستان، تپه سیلک در کاشان و کنار صندل در دره هلیل رود، از جمله تمدن‌هایی هستند که در صحراهای ایران شکل گرفته و به‌شدت وابسته به نوع اقلیم

بوده‌اند. در حقیقت، اقلیم مرطوب می‌توانسته شرایط مناسبی برای زیستن، کشاورزی و دامپروری پدید آورد، در حالی‌که اقلیم خشک و بیابانی سبب نابودی منابع آبی و در نتیجه شهرهای باستانی شده است.

تغییرات اقلیمی و تمدن انسانی (جیرفت)

تطبیق بین داده‌های محیط زیستی و باستان‌شناسی، معمولاً با نبود قطعیت‌های زمانی مواجه می‌شود. داده‌های باارزشی که می‌توانند راهگشا باشند، رسوبات سالانه دریاچه‌ای هستند. اهمیت این رسوبات، به‌اندازه‌ای است که بر اساس آن‌ها، گسترش گیاهان، فعالیت‌های انسانی و همچنین گذشته آب و هوایی، قابل تفسیر است. این مزایا در ترکیب با روش‌های پیشرفته، باعث گرایش به سمت ارزیابی رسوبات لایه‌ای سالانه شده است (Tylman et al., 2013; Brauer et al., 2009) مطالعات انجام شده در این رابطه، بیشتر در بخش‌های آسیای مرکزی و شرقی انجام شده است. بر اساس شواهد ثبت شده، افزایش نفوذ گردوغبار در هولوسن، نشان‌دهنده برتری آب و هوای خشک در ناحیه منشأ است (Rea & Leinen, 1998). با این‌حال، این موضوع توسط شواهد اقلیمی در آسیای مرکزی تأیید نمی‌شود، در حالی‌که شواهد دریاچه‌ای نشان می‌دهد رطوبت کم و مؤثر در آب‌وهوای خشک، نه در هولوسن میانی، بلکه در هولوسن اولیه وجود دارد (Chen et al., 2008). در منطقه جیرفت، در ۴۷۰۰ سال پیش حاکمیت اقلیم مرطوب بوده است. خشک‌سالی شدید بین 4500 تا 4200 سال پیش، باعث نابودی این تمدن شد که در سرتاسر آسیای غربی حکم‌فرما بود (Madella & Fuller, 2006). در عهد حاضر، مسائلی مانند تغییرات اقلیمی، احداث سد و برداشت بی‌رویه آب، باعث تشدید اقلیم گرم و خشک در مراکز تمدن‌ها و سکونتگاه‌های انسانی شده است. در حقیقت، این مسائل محیطی- این مراکز انسانی را به یکی از کانون‌های مهم گردوغبار تبدیل کرده است که مناطق اطراف را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد و بر محیط‌زیست و سلامتی انسان تأثیر منفی دارد. از آنجایی که جنوب شرق ایران یکی از کانون‌های اصلی تمدن‌های عصر مفرغ بوده است و ظهور و افول این تمدن‌ها ارتباط نزدیکی با اقلیم دیرینه دارد، انجام مطالعاتی مشابه و سنجشی دقیق ضروری به نظر می‌رسد. این داده‌ها می‌توانند اطلاعات ارزشمندی را در اختیار باستان شناسان قرار دهند و پلی میان زمین‌شناسی و باستان‌شناسی باشند که تحت سیطره رشته جدیدی به نام زمین‌باستان‌شناسی است.

فروپاشی امپراتوری آکد

هلال حاصلخیز، منطقه‌ای، در کنار بین‌النهرین (که بین رودهای دجله و فرات قرار دارد) شاهد ظهور جوامع اولیه پیچیده و سطح بالای دولتی در طول عصر برنز بعدی (عمدتاً در دوره‌های اولیه سلسله از حدود ۲۹۰۰ تا ۲۳۳۴ قبل از میلاد) بود. امپراتوری اکد، تحت فرمانروایی سارگون، که از حدود سال ۱۰۰۰م پادشاهی کرد از سال ۲۳۳۴ تا ۲۲۱۸ قبل از میلاد، به سوریه امروزی، آسیای صغیر، ایران و شمال خلیج‌فارس گسترش یافت. در طی آن زمان، تمدن شکوفا شده‌ی مناطق داخلی کشاورزی شمال بین‌النهرین را با دولت شهرهای پیچیده در جنوب پیوند داد.

بنابراین اکدی‌ها توانستند تجارت از راه دور را کنترل کنند، فرآیندهای کشاورزی را توسعه دهند و سیاست خود را در نوشته‌های پیچیده‌تر ثبت کنند. تمدن سومری بیش از سه هزار سال به طول انجامید، اما آن‌ها پس از بیش از یک قرن شکوفایی قدرت خود را از دست دادند و در نزدیکی ۲۲۰۰ سال قبل از میلاد به طور ناگهانی سقوط کردند (Weiss et al., 1993). دوران شکوفایی جدیدی که توسط جمعیت‌های کم‌تحرک دوباره آغاز شد، تقریباً ۳۰۰ سال بعد رخ داد.

پس از چهار قرن زندگی شهری، به نظر می‌رسد این تغییر ناگهانی اقلیمی باعث رها شدن شهر تل لیلان (Tell Leilan) شده است که به یک منطقه‌ی متروکه تبدیل شده است و باعث فروپاشی امپراتوری اکدی مستقر در جنوب بین‌النهرین، عمدتاً توسط قحطی شده است. سوابق پالئوکلیماتیک از خاورمیانه، تغییر به شرایط بسیار خشک‌تر را در حدود ۲۲۰۰ قبل از میلاد ثبت کرده است، همان‌طور که (Cullen,2000) نشان داده شده است.

گزارش‌ها بیانگر همبستگی ژئوشیمیایی خرده‌های خاکستر آتش‌فشانی بین سایت باستان‌شناسی و رکورد رسوبات دریایی، یک ارتباط زمانی مستقیم بین خشکی بین‌النهرین و فروپاشی اجتماعی ایجاد می‌کند، که یک تغییر ناگهانی به شرایط خشک‌تر را به‌عنوان عاملی کلیدی در فروپاشی امپراتوری اکدی را نشان می‌دهد. فروپاشی امپراتوری‌ها هم‌زمان در مناطق مجاور نشان می‌دهد که تأثیر تغییرات ناگهانی آب‌وهوایی گسترده بوده است به‌عنوان مثال به تغییر آب‌وهوای ناگهانی ثبت شده در حاشیه شرقی فلات تبت، در بخش غربی فلات لس چین و در فلات وسیع مغولستان داخلی (لیو و فنگ،۲۰۱۲).

فروپاشی تمدن کلاسیک مایا (۸۰۰ پس از میلاد تا ۱۰۰۰ پس از میلاد)

تمدن باستانی مایا، یک‌سوم شرقی میان آمریکا، عمدتاً شبه‌جزیره یوکاتان را اشغال کرده بود. این یک امپراتوری واحد نبود، بلکه انبوهی از نهادهای مجزا با پیشینه فرهنگی مشترک بود. دوره پیش از کلاسیک اولیه که از ۲۰۰۰ قبل از میلاد تا ۲۵۰ بعد از میلاد ادامه داشت، توسط جامعه مایاها، دوره کلاسیک، احتمالاً از قرن دوم پس از میلاد تا اواخر قرن هشتم به دنبال داشت. برای نسل‌ها، مایاها در یک تمدن پیشرفته و پیچیده در آمریکای مرکزی امروزی رشد کردند. به‌ویژه، آن‌ها بناهای سنگی بزرگ، سیستم‌های ذخیره آب ساختند، سیستم نوشتاری را با استفاده از نمادهای استادانه توسعه دادند. نجوم به‌خوبی توسعه یافته بود و آن‌ها یک تقویم بدیع و بسیار دقیق (و پیچیده) طراحی کردند. سپس، مایاها وارد دوره جدیدی از "فروپاشی" جزئی به نام "ترمینال کلاسیک" شدند (۸۰۰ پس از میلاد تا ۱۰۰۰ پس از میلاد). در سال ۸۰۰ پس از میلاد، قبل از این فروپاشی، جمعیت آن حدود ۳ میلیون نفر تخمین زده شده است. در سال ۱۰۰۰ پس از میلاد، این تعداد کمتر از یک‌میلیون یا بیشتر بود. سپس، حدود سال ۱۱۰۰ پس از میلاد، تمدن مایاها از هم پاشید. علل مختلفی از جمله تهاجم خارجی، جنگ بین‌شهری، فرسودگی خاک و شورش طبقات پایین مطرح شده است. به نظر می‌رسد که همه این رویدادها در مکان‌های مختلف در سراسر منطقه در طول فروپاشی رخ‌داده است، اما علت شروع آنچه بوده است؟ تغییر اقلیم ممکن است یکی از دلایل اصلی باشد. هودل و همکاران (۲۰۰۱) هسته‌های رسوب دریاچه را از شبه‌جزیره یوکاتان (مکزیک) تجزیه‌وتحلیل کرد تا تاریخ آب‌وهوای منطقه را در ۲۶۰۰ سال گذشته بازسازی کند. آن‌ها یک الگوی مکرر خشک‌سالی را با تناوب غالب ۲۰۸ ساله (مشابه با دوره مستند ۲۰۶ ساله در سوابق تولید نوکلیدهای کیهانی) پیدا کردند که فکر می‌کردند

تغییرات در فعالیت خورشیدی را منعکس می‌کند و به این نتیجه رسیدند که جزء مهم قرن تنوع مقیاس در خشک‌سالی‌های یوکاتان را می‌توان با نیروی خورشیدی توضیح داد. آن‌ها اشاره کردند که برخی از حداکثرهای چرخه خشک‌سالی ۲۰۸ ساله با ناپیوستگی در تکامل فرهنگی مایاها مطابقت دارد، که نشان می‌دهد مایاها تحت تأثیر این نوسانات دویست‌ساله بارش قرار گرفتند.

فروپاشی مستعمرات گرینلند

در زمان فروپاشی مایاها، یعنی حدود سال ۱۰۰۰ م، اسکاندیناوی‌ها سرزمین‌های خود را ترک و در اروپا و فراتر از آن غارت می‌کردند. اریک سرخ، کاشف وایکینگ در سال ۹۸۲ پس از میلاد از ایسلند کشتی گرفت و سرزمین جدیدی با چشم‌انداز آب دره‌های جذاب و دره‌های سبز حاصلخیز کشف کرد. او به‌شدت تحت تأثیر منابع این کشور جدید قرار گرفت و این سرزمین را "گرینلند " نامید. برای او مطمئناً بسیار متقاعد کننده بود، زیرا یک اکسپدیشن جدید در سال ۹۸۵ فرستاده شد. پسرش به گرینلند بازگشت و در سال ۱۰۰۰، جوامع وایکینگ ها حدود ۳۰۰۰ نفر جمعیت داشتند که در ۳۰۰-۴۰۰ مزرعه تا شمال پراکنده شده بودند. جامعه وایکینگ ها حدود ۵۰۰ سال زنده ماندند، اما مستعمرات در سال ۱۴۲۰-۱۴۳۰ به‌طور غیرقانونی سقوط کردند. دلیل ناپدید شدن آن همچنان یک راز بزرگ است. تا قرن بیستم، فروپاشی به ماهیت تهاجمی وایکینگ ها و تماس آن‌ها با اجداد اینویت مدرن نسبت داده می‌شد (سیور، ۱۹۹۶). با این‌حال، اخیراً، بر اساس شواهد مستند محدود برای آن دوره و سوابق باستان‌شناسی در حال گسترش، آب‌وهوای سردتر به‌عنوان استدلال بهتر مطرح شد. مهم‌تر از همه، تجزیه‌وتحلیل اخیر هسته یخی مرکزی گرینلند، که تا حد زیادی با داده‌های به‌دست آمده از مطالعات حلقه‌درختی و رسوبات دریایی تأیید شده است، یک استدلال دیرینه-اقلیمی ظاهراً غیرقابل‌انکار برای شکست مستعمره نورس در گرینلند ایجاد کرده است (Slak,2002).

نوسانات آب‌وهوا قابل توجه است زیرا بر طول فصل رشد و حرکت حیوانات شکاری مانند فوک، کاریبو و شیر دریایی تأثیر می‌گذارد. در طول قرن ۱۵، ارتباطات کشتی بین گرینلند و مراکز جمعیتی حمایت‌کننده کاهش یافت. کوه‌های یخ همچنین آب دره‌هایی را که گرینلندی‌ها در آن جمعیت فک‌های مهاجر در حال مرگ را شکار می‌کردند، خفه کردند. درنهایت، فصل رشد برای حمایت از دام‌های ترجیحی که توسط نورس‌ها نگهداری می‌شد بسیار کوتاه شد (Diamond, 2006; Norman, 2011).

سوابق نشان می‌دهد که درجه حرارت در طی چند دهه و عمدتاً در زمان سوابق باستان‌شناسی رها شدن فرهنگ‌های نورس، چندین درجه کاهش‌یافته است. نتیجه‌گیری آن‌ها نشان می‌دهد که تغییرات ناگهانی دما به‌شدت بر تمدن بشری در این منطقه تأثیر گذاشته است.

سیل‌های نیل

هرودت گفت مصر هدیه نیل است و زندگی می‌بخشد. هر چشمه آب از کوه‌ها جاری می‌شد و رود نیل سیلاب می‌گرفت. با فروکش کردن آب‌های سیل، خاک حاصلخیز سیاه و غنی پشت سر گذاشته شد؛ بنابراین سیل‌ها نقش مهمی در توسعه

تمدن مصر ایفا کردند. رسوبات سیلت از رودخانه، زمین‌های اطراف را حاصلخیز می‌کرد، زیرا رودخانه تقریباً سالانه به کرانه‌های خود بدهکار بود. به دلیل طغیان سالانه رود نیل، مصریان باستان از استاندارد زندگی بالایی در مقایسه با سایر تمدن‌های باستانی برخوردار بودند.

ریتم سطح رودخانه نیل به دلیل شاهزاده عمر توسون (۱۹۲۵) شناخته شده است که داده‌های ثبت شده بین سال‌های ۶۲۲ تا ۱۴۷۰ را با یک نیم متر واقع در جزیره روضه در قاهره رونویسی کرد. اطلاعات دیگری که دوره زمانی را تا سال ۱۹۱۵ (در پایان اشغال بریتانیا) گسترش می‌دهند، در بسیاری از کتاب‌های تاریخ عربی، مانند کتاب‌های ابن تغریبردی (۱۹۷۰) (در سال‌های ۱۳۸۲ {۱۴۶۹) و العینی (۱۳۸۲) یافت می‌شود. ۱۹۸۸).

چندین فروپاشی چشمگیر تمدن درگذشته رخ داده است. یکی از معروف‌ترین دوره‌های فرهنگی میسینایی عصر برنز (حدود ۱۶۰۰ ق.م. {حدود ۱۱۰۰ ق.م) است. تمدن میسنی در دوره تقریباً بین ۱۶۰۰ قبل از میلاد تا ۱۱۰۰ قبل از میلاد شکوفا شد، زمانی که با فروپاشی تمدن عصر برنز در شرق مدیترانه از بین رفت. این فروپاشی معمولاً به تهاجمات نسبت داده می‌شود که از نظر تاریخی تأیید نشده است. تئوری‌های دیگری نیز برای توصیف بلایای طبیعی و تغییرات آب‌وهوایی ارائه شده است.

هیتی‌ها در آناتولی اولین مردمی بودند که از حدود ۱۵۰۰ سال قبل از میلاد آهن‌کار کردند. آن‌ها همچنین یکی از اولین افرادی بودند که از نوشته‌ها استفاده کردند، خط میخی را اختراع کردند و در اواسط قرن چهاردهم (پیش از میلاد) به اوج رسیدند. آن‌ها امپراتوری ایجاد می‌کنند که به شمال سوریه، شرق فرات می‌رسد و تا سواحل مدیترانه گسترش می‌یابد تا با مصریان مقابله کند. در قرن دوازدهم قبل از میلاد، امپراتوری هیتی ها به‌طور ناگهانی فرومی‌ریزد، ممکن است به دلیل مزاحمان وحشتناک باشد، در اینجا نیز تواریخ تاریخی به اثبات نرسیده است. آن‌ها تقریباً هم‌زمان با Mycenaeans فرو می‌ریزند. تصادف یا دوره خشک طولانی که قحطی‌های ملی برای آن فاجعه‌بار بود؟

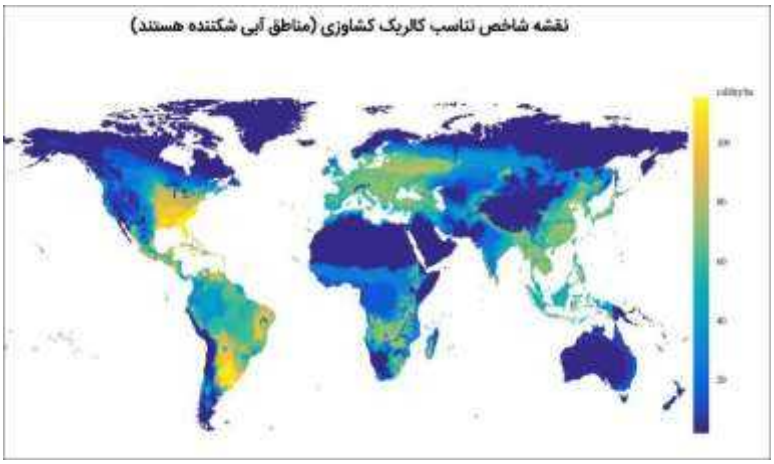
سلسله تانگ در چین (یکی از خلاق‌ترین سلسله‌های امپراتوری، بین سال‌های ۶۱۸ تا ۹۰۷) تقریباً هم‌زمان با مایاها فرو می‌پاشد. آیا این هم تصادفی محض است؟ آیا همه این تمدن‌ها با همین عوامل نابود می‌شوند؟ جارد دایموند در کتاب خود "فروپاشی " عواملی را فرض می‌کند که ممکن است به زوال و سقوط تمدن‌ها منجر شود: (۱) روابط خصمانه با همسایگان، (۲) از دست دادن حمایت از طرف "خانه " یا شرکای تجاری، (iii) تخریب محیط‌زیست.، (IV) تغییرات آب‌وهوایی و (v) ارزش‌های اجتماعی معیوب.

ما در اینجا فکر می‌کنیم که فرهنگ و ارزش‌ها به‌طور قابل توجهی بر توانایی جامعه برای انطباق و واکنش به تغییرات، به‌ویژه با شرایط آب‌وهوایی سریع و شدید تأثیر می‌گذارد. با این‌حال، بسیاری از عناصر دیگر نیز به‌طور بالقوه می‌توانند در فروپاشی نقش داشته باشند، مانند از بین رفتن اکوسیستم‌ها و/یا جنگل‌زدایی، که منجر به کمیاب شدن حیوانات و گیاهان می‌شود که برای بقای انسان ضروری است. عوامل اپیدمیولوژیک کاهش‌دهنده جمعیت و غیره آنچه ما در اینجا سعی کردیم بر آن تأکید کنیم، منشأ فیزیکی احتمالی تغییرات آب‌وهوایی مهم است، که برای آن شدت دما می‌تواند به تغییرات عمیق در قسمت UV تابش خورشیدی مرتبط باشد.

دلایل انحطاط و انحلال تمام تمدن‌هایی که در بخش‌های قبل توضیح داده شد را نمی‌توان به‌طور قطع به یک عامل منحصربه‌فرد نسبت داد، اما معیارهای آشکاری برای این تصور وجود دارد که اقلیم نقش اصلی را ایفا کرده است: دوره‌های طولانی خشک‌سالی، طغیان، زمستان‌های شدید پی‌درپی، منجر به کمبود محصولات کشاورزی و قحطی می‌شود. مطالعات تاریخی چنین بلایایی همچنان جایگاهی حاشیه‌ای به خود اختصاص داده است، اما امروزه این امر به‌آرامی در حال تغییر است. جالب است که اقلیم‌شناسی تاریخی و مطالعات بلایا را به هم مرتبط کنیم. بدون شک درس‌های مهمی وجود دارد که می‌توان از همه این فروپاشی‌ها آموخت و این‌یک درس سازگاری است، از اینکه بتوانیم ارزش‌ها و سبک زندگی خود را در زمان تغییر آب‌وهوا (مانند زمان کنونی) تنظیم کنیم. فروپاشی تاریخی دولت‌های باستانی همان‌طور که توسط (Butzer, 2012) بیان شد، پرسش‌های اجتماعی- اکولوژیکی جالبی را مطرح می‌کند. این چالشی حیاتی است که امروز با آن روبرو هستیم.

تنش آبی و فروپاشی سکونتگاهها

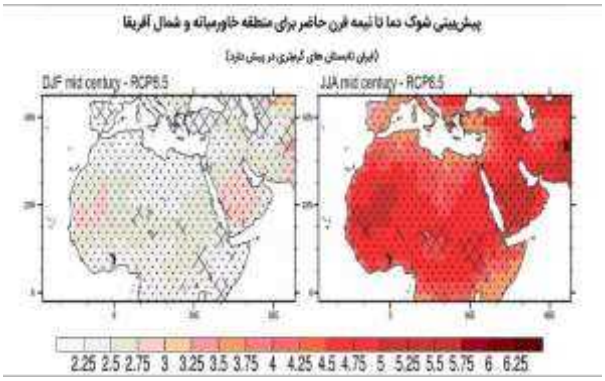
شروع جنگ‌های داخلی و قرارگیری بسیاری از جوامع امروزی در خاورمیانه و آفریقا در مسیر فروپاشی به ما ثابت کرده است که نباید تاریخ را فراموش و هشدارهای علمی محققان را نادیده گرفت. به‌عنوان مثال مهم‌ترین دلایل فروپاشی یک جامعه عبارتند از: شوک‌های اقلیمی و تغییرات آب و هوایی، نرخ بالای استخراج منابع تجدیدپذیر و ناپذیر، شکاف بین دولت – ملتها، افزایش دشمنان سیاسی، تنش ها و ناآرامی های سیاسی، شکست‌های نهادی و فرهنگی در پاسخ‌گویی صحیح به معارضات. تمام این عوامل در یک محیط جغرافیایی و اکولوژیک شکننده اثرگذاری قوی‌تری نیز دارند. شکل (۳) در زیر مناطق آبی شکننده را نشان می دهد.

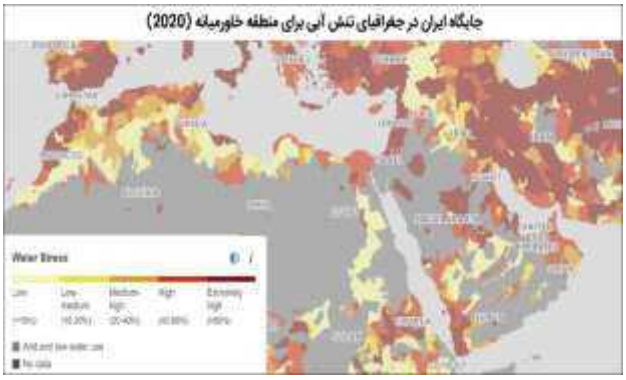


شکل(۳) مناطق آبی شکننده در جهان

ما در جغرافیا و در یک محیط اکولوژیک شکننده زندگی می‌کنیم، سرعت استخراج و برداشت منابع تجدیدپذیر بیشتر از نرخ جایگزینی و بازآفرینی آنها است و این درباره منابع تجدیدناپذیر نیز صدق می‌کند. بر تعداد دشمنان و تنش‌های منطقه خاورمیانه افزوده شده و پاسخ به چالشها با وقفه‌ای بسیار صورت می‌گیرد یا در شناخت مسأله گاهاً دچار اشتباه می‌شویم. تاریخ، مثال‌های بی‌شماری از جوامع گذشته برای ارائه دارد، مانند ساکنان جزایر ایستر، آناسازی‌ها در جنوب غربی ایالات متحده، مایاها در آمریکای مرکزی و تمدن وینلند نورس در جزیره گرینلند و سایر سکونتگاه‌ها و تمدن‌های انسانی در منطقه خاورمیانه و ایران، این تمدن‌ها به آرامی از هم نپاشیدند، بلکه ناگهان با کاهش شدید جمعیت و بهره‌وری مواجه شدند و در نهایت همه چیز به یک‌باره فروپاشید. اما آنچه موجب فروپاشی ناگهانی شبانه شد در یک روند آرام در حال رخ دادن بود؛ گویی که یک کتری آب روی آتش درست در لحظه ای پیش از جوشیدن باشد.

افول این جوامع ناشی از برداشت بیش از حد منابع، دوستان از دست رفته و فزونی دشمنان، تغییرات و شوک‌های آب و هوایی و اقلیمی و مهم‌تر از همه فرهنگ‌ها و باورهایشان است. فعال بودن این عوامل در یک محیط جغرافیایی شکننده نیز بر شدت اثرگذاری معارضات می‌افزاید. بر مبنای این روایت، اکثر این عوامل متاسفانه درباره ایران فعال است و اکثر جغرافیدانان، تاریخ دانان و سایر محققان هشدار می‌دهند که آنچه برای جوامع قدیم اتفاق افتاد امروز نیز می‌تواند تکرار شود. شکل(۴) در زیر پیش‌بینی میزان تغییرات دمایی در خاورمیانه و همچنین جایگاه ایران در آن را نشان می دهد.

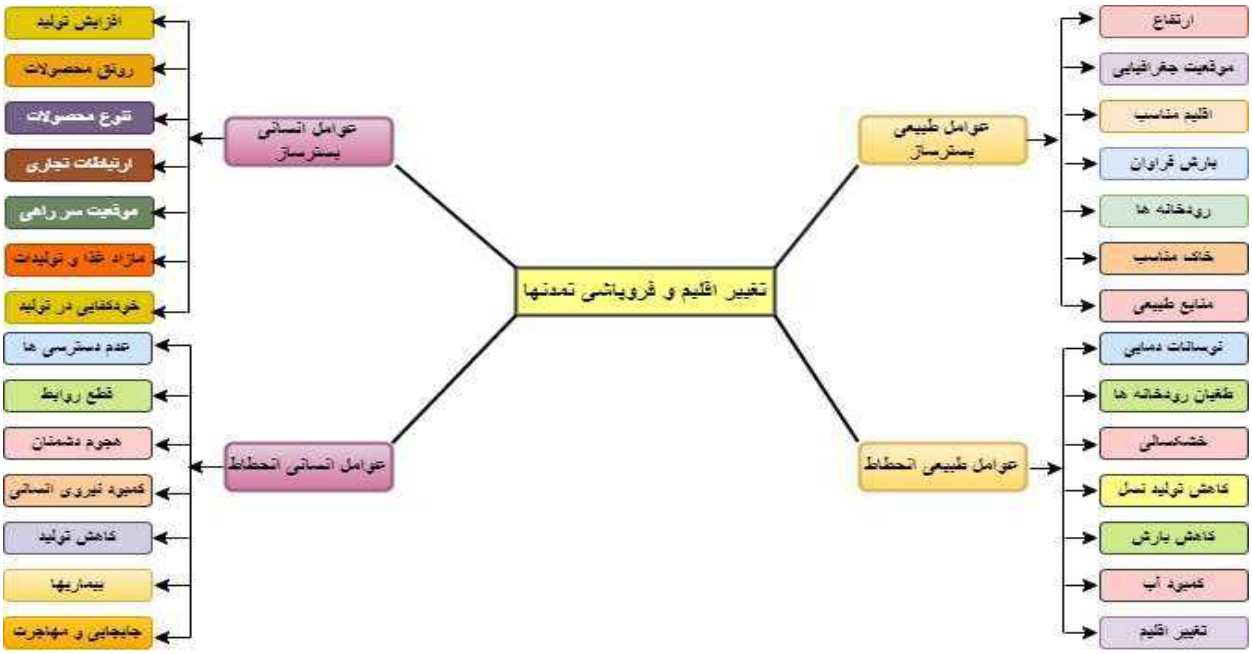




شکل (ب) جایگاه ایران در جغرافیای تنش آبی منطقه خاورمیانه شکل (الف) پیش بینی تغییرات دمایی برای منطقه خاورمیانه

فروپاشی بسیاری از جوامع باستانی را می‌توان در دو آسیب‌پذیری اساسی این جوامع ردیابی کرد. عوامل اجتماعی- سیاسی و عوامل داخلی که بر نحوه استفاده، تنظیم و حفاظت جوامع از منابعی مانند آب یا زمین تاثیر می‌گذارد؛ در حالی‌که شوک‌های آب‌وهوایی خارجی باعث ایجاد عدم اطمینان و آسیب‌پذیری می‌شود که می‌تواند در دسترس بودن آن منابع را محدود کند. فروپاشی باستانی جوامع پیشرفته شهری، مانند مایاها، آناسازی‌ها یا اکدی‌ها با این دو رویداد بی‌ثبات کننده مرتبط بوده است. اهمیت نسبی این عوامل توسط متخصصان مورد بحث است؛ اما شواهدی برای هر دو نوع آسیب‌پذیری

برای هر یک از این مطالعات موردی وجود دارد. شکل (۵) در زیر به برخی از عوامل انسانی و طبیعی بسترساز و انحطاط تمدن‌های انسانی اشاره شده است.



شکل (۵) عوامل انسانی و طبیعی مؤثر بر شکل‌گیری و انحطاط تمدن‌ها (مأخذ: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴)

نتیجه‌گیری

پیامدهای منفی تغییر اقلیم در رتبه نخست عوامل تهدید آمیز بشر در قرن ۲۱ نظیر فقر، سلاح‌های هسته‌ای، کمبود غذا و ... است. از مهم‌ترین آثار منفی تغییر اقلیم می‌توان به افزایش وقوع بلایای جوی و اقلیمی مانند سیل، خشک‌سالی، قحطی، مهاجرت، گرسنگی کاهش منابع و ذخایر برف و در نهایت مهم‌ترین پدیده که ناشی از عوامل آب‌وهوایی باشد مانند نابودی سکونتگاه‌های بشری یا انقراض تمدن‌ها اشاره کرد.

درگذشته مانند امروز آب و اقلیم نقش تعیین‌کننده‌ای در استقرار توسعه شهری و سکونتگاه‌های انسانی داشته است. چه بسا شهرهایی که به علت از بین رفتن منابع آبی دچار ویرانی شده‌اند که شهر تاریخی سیراف در جنوب ایران از آن جمله است. ویتفوگل تمدن‌های مشرق زمین را به وجود آب وابسته می‌داند و از این تمدن‌ها به‌عنوان تمدن آبی نام می‌برد وابستگی شهرها به منابع آبی نه‌تنها به علت نیاز شهرنشینان به آب آشامیدنی است بلکه بیشتر به این علت است که درگذشته بسیاری از شهرنشینان کشاورز بوده‌اند و زمین‌های اطراف شهر خود را به زیر کشت می‌بردند و برای این منظور

به آب نیاز داشتند. بر این اساس می‌توان به روابط میان شهرها و آب از دو جنبه اشاره کرد: نخست نیاز مستقیم شهرها به آب برای مصارف شهری و دوم نیاز غیرمستقیم شهرنشینان به آب برای آبیاری مزارع واقع در حاشیه شهرها اشاره کرد.
دلایل انحطاط و انحلال تمام تمدن‌هایی که در بخش‌های قبل توضیح داده شد را نمی‌توان به طور قطع به یک عامل منحصربه‌فرد نسبت داد، اما معیارهای آشکاری برای این تصور وجود دارد که اقلیم نقش اصلی را ایفا کرده است: دوره‌های طولانی خشک‌سالی یا دیگر عوامل محیطی و جغرافیایی، طغیان، زمستان‌های شدید پی‌درپی، منجر به کمبود محصولات کشاورزی و قحطی می‌شود. در مطالعات تاریخی چنین بلایایی همچنان جایگاهی حاشیه‌ای به خود اختصاص داده است، اما امروزه این امر به‌آرامی در حال تغییر است. جالب است که اقلیم‌شناسی تاریخی و مطالعات بلایا را به هم مرتبط کنیم. در نتیجه، تغییر اقلیم نه‌تنها تهدیدی برای محیط‌زیست است، بلکه تأثیرات اجتماعی و اقتصادی عمیقی نیز بر جوامع و سکونتگاه‌ها دارد. برای مقابله با این چالش‌ها، نیاز به اقداماتی جدی و هماهنگ در سطح جهانی و محلی وجود دارد. پیشگیری از نابودی تمدن‌ها به‌ویژه در مواجهه با چالش‌های جهانی مانند تغییر اقلیم، جنگ‌ها، فقر و نابرابری، نیازمند یک رویکرد جامع و چند جانبه است. جدول (۱) در زیر تعدادی از راهکارهای کلیدی برای پیشگیری از نابودی تمدن‌ها آورده شده است:

جدول ۱- راهبردهای مؤثر در جهت مقابله و سازگاری سکونتگاه‌های انسانی در برابر تغییر اقلیم

راهبردهای مؤثر در جهت مقابله با چالش‌های تغییر اقلیم
مشارکت جامعه محلی در برنامه‌ریزی‌ها، توانمندسازی و افزایش قابلیت شهروندان
دسترسی‌پذیری و فراهم نمودن زیرساخت‌ها جهت استفاده شهروندان
احساس مسئولیت، حمایت و بازی دادن رکن سوم حکمروایی یعنی نهادهای مدنی و NGOها در برنامه‌ریزی‌ها
کاهش آلودگی‌ها و افزایش سرزندگی و نشاط اجتماعی جوامع محلی
تعهد و پای بندی و اشتیاق شهروندان به پیشرفت و توسعه شهر و محل زندگی خود
تدوین سازوکار مدیریت یکپارچه و هماهنگ شدن
ارتقاء سطح آموزش و آگاهی در مورد چالش‌های جهانی، از جمله تغییر اقلیم و تأثیرات آن بر جوامع، می‌تواند به مردم کمک کند تا بهتر درک کنند چگونه بتوانند در حفظ محیط‌زیست و بهبود شرایط زندگی خود مشارکت کنند.
اجرای سیاست‌های توسعه پایدار که بر اساس حفظ منابع طبیعی و کاهش آلودگی باشد، می‌تواند به حفظ محیط‌زیست و بهبود کیفیت زندگی کمک کند. این شامل استفاده بهینه از منابع، انرژی‌های تجدید پذیر و کشاورزی پایدار است.
چالش‌های جهانی نیاز به همکاری و هماهنگی بین‌المللی دارند. کشورها باید برای مقابله با مسائل مشترک مانند تغییر اقلیم، فقر و نابرابری به توافق‌ها و همکاری‌های جامع دست یابند.
بهبود و توسعه زیرساخت‌های پایه‌ای مانند آب و فاضلاب، حمل‌ونقل و بهداشت می‌تواند به افزایش تاب‌آوری جوامع در برابر چالش‌ها کمک کند.

تقویت جوامع محلی و حمایت از ابتکارات محلی می‌تواند به افزایش تاب‌آوری و توانمندی آن‌ها در مواجهه با بحران‌ها کمک کند.
استفاده از فناوری‌های نوین در زمینه‌های مختلف، از جمله کشاورزی، انرژی و مدیریت منابع، می‌تواند به بهبود شرایط زندگی و کاهش تأثیرات منفی محیطی کمک کند.
ایجاد و تقویت نهادهای صلح و دیپلماسی برای جلوگیری از جنگ‌ها و منازعات می‌تواند به حفظ ثبات و امنیت جوامع کمک کند.
حفاظت از اکوسیستم‌ها و تنوع زیستی از طریق ایجاد پارک‌های ملی، مناطق حفاظت شده و اجرای قوانین محیط زیستی می‌تواند به حفظ منابع طبیعی و جلوگیری از تخریب آن‌ها کمک کند.
توسعه سیستم‌های پیش‌بینی و مدیریت بحران می‌تواند به جوامع کمک کند تا بهتر با بلایای طبیعی و سایر چالش‌ها مقابله کنند.

منابع:

باباجمالی، فرهاد .(1391) .مؤلفه‌های ژئومورفولوژی و تأثیر آن بر هویت کانون‌های مدنی و هنر فرش دستباف ایران .رساله دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه اصفهان.

خسروی، قاسم .(1392) .گسل‌ها و نقش آن‌ها بر شکل‌گیری هردینگ سیستم‌های) زمین‌بوم‌های اجتماعی (ایران مرکزی . رساله دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه اصفهان.

رامشت، محمدحسین، و باباجمالی، فرهاد .(1399) .ژئومورفولوژی تحلیلی ایران .تهران :انتشارات سمت.

رایگانی، ابراهیم، و اسلامی، مسعود .(1397) .بررسی تأثیر عوامل طبیعی) محیطی (در شکل‌گیری و ماندگاری شهر تاریخی دهدشت .نشریه مطالعات شهر ایرانی اسلامی،.62–51 ,(31)8

زندی‌فر، سمیرا .(1401) .مقایسه تحولات محیطی و اقلیمی در حذف تمدن جیرفت با توجه به تحولات جازموریان .طبیعت ایران،.27–24 ,(4)7

شیخ شریعتی کرمانی و همکاران .(1401) .بازسازی شرایط ظهور و افول تمدن باستانی شهداد با تأکید بر عوامل بسترساز طبیعی و انسانی .پژوهشنامهٔ تمدن ایرانی،.69 ,(7)4

عزیزپور، فرهاد، و شمسی، رقیه .(1393) .نقش عوامل محیطی در سازمان فضایی سکونتگاه‌های روستایی) مطالعه موردی : دهستان لواسان کوچک .(نشریه سپهر،.1 ,(89)23

ملک شهمیرزادی .(1387) .اطلس باستان‌شناسی ایران .تهران :انتشارات سمت.

Al-Ayni, B. al-D. (1988). ‘Iqd al-jinān: Tārīkh ahl al-zamān (New ed.). Cairo: General Egyptian Agency of Culture.

Andrea, W. J., Huang, Y., Fritz, S. C., & Anderson, N. J. (2011). Abrupt Holocene climate change as an important factor for human migration in West Greenland. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 108(24), 9765–9769. https://doi.org/10.1073/pnas.1101708108

Brauer, A., Dulski, P., & Mankgili, C. (2009). The potential of varves in high-resolution paleolimnological studies. PAGES News, 17, 96–98.
Bronowski, J. (1974). The ascent of man: A personal view. London: BBC Books.
Butzer, K. W., & Endfield, G. H. (2012). Critical perspectives on historical collapse. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 109, 3628–3631. https://doi.org/10.1073/pnas.1114772109
Chen, F. H., Yu, Z. C., Yang, M. L., Ito, E., Wang, S. M., Madnes, D. B., Huang, X. Z., Zhao, Y., Sato, T., Birks, H. J. B., Boomer, I., Chen, J. H., Ancb, W. U., & Nemann, B. (2008). Holocene moisture evolution in arid central Asia and its out-of-phase relationship with Asian monsoon history. Quaternary Science Reviews, 27(3–4), 351–364.
Cook, B. I., Anchukaitis, K. J., Kaplan, J. O., Puma, M. J., Kelly, M., & Gueyffer, D. (2012). Untitled. Geophysical Research Letters, 39(16), L16706. https://doi.org/10.1029/2012GL052565
Cullen, H. M., deMenocal, P. B., Hemming, S., Hemming, G., Brown, F. H., Guilderson, T., & Sirocko, F. (2000). Climate change and the collapse of the Akkadian empire: Evidence from the deep sea. Geology, 28(4), 379–382.
Diamond, J. M. (2006). Collapse: How societies choose to fail or succeed. New York: Viking. (French ed., Gallimard-Essais, 2007).
Diamond, J. (2005). Collapse: How societies choose to fail or succeed. New York: Viking.
Dunning, P. N., Beach, T. P., & Luzzadder-Beach, S. (2012). Kax and kol: Collapse and resilience in lowland Maya civilization. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 109(10), 3652–3657. https://doi.org/10.1073/pnas.1114838109
Ehrlich, P., & Ehrlich, A. (1977). Population, resources, environment. San Francisco: Freeman.
Haug, G., Günther, D., Peterson, L. C., Sigman, D. M., Hughen, K. A., & Aeschlimann, B. (2003). Climate and the collapse of Maya civilization. Science, 99, 1731–1735. https://doi.org/10.1126/science.1080444
Luzzadder-Beach, S., Beach, T. P., & Dunning, N. P. (2012). Wetland fields as mirrors of drought and the Maya abandonment. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 109(10), 3646–3651. https://doi.org/10.1073/pnas.1114919109
Madella, M., & Fuller, D. (2006). Palaeoecology and the Harappan civilisation of South Asia: A reconsideration. Quaternary Science Reviews, 25, 1283–1301.
Mollison, B. (1988). Permaculture: A designer's manual. Sydney: Tagari.
Mumford, L. (1961). The city in history. Harmondsworth: Penguin.
Norman, B. (2011). Did climate change cause Greenland's ancient Viking community to collapse? ScienceDaily. Retrieved from http://www.sciencedaily.com/releases/2011/06/110620095238.htm
Rashki, A., Kaskaoutis, D. G., Rautenbach, C., Eriksson, P. G., Qiang, M., & Gupta, P. (2012). Dust storms and their horizontal dust loading in the Sistan region, Iran. Aeolian Research, 5, 51–62.
Rea, D. K., & Leinen, M. (1988). Asian aridity and the zonal westerlies: Late Pleistocene and Holocene record of eolian deposition in the northwest Pacific Ocean. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 66(1–2), 1–8.
Seaver, K. A. (1996). The frozen echo: Greenland and the exploration of North America, ca. A.D. 1000–1500. Stanford, CA: Stanford University Press.
Slak, A. (2002). Why did Norse Greenland fail as a colony? York Medieval Yearbook, 1. York: Centre for Medieval Studies, University of York.
Trainer, T. (1985). Abandon affluence. London: Zed Books.
Trainer, T. (1995). The conserver society: Alternatives for sustainability. London: Zed Books.

Turner, B. L., & Sabloff, J. A. (2012). Classic period collapse of the Central Maya Lowlands: Insights about human–environment relationships for sustainability. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 109(35), 13908–13914. https://doi.org/10.1073/pnas.1210106109

Tylmann, W., Zolitschka, B., & Enters, D. (2013). Laminated lake sediments in northeast Poland: Distribution, preconditions for formation and potential for paleoenvironmental investigation. Journal of Paleolimnology, 50(4), 487–503.

Weiss, H., Courty, M. A., Wetterstrom, W., Guichard, F., Senior, L., Meadow, R., & Curnow, A. (1993). The genesis and collapse of third millennium North Mesopotamian civilization. Science, 261(5124), 995–1004. https://doi.org/10.1126/science.261.5124.995.

بررسی تاثیر ادبیات در آگاهی بخشی نسبت به معضلات زیست محیطی در رمان خدای چیزهای کوچک اثر آروناداتی روی

ستوده میجانی[۱]، هاله زرگرزاده [۲]

۱- کارشناس ارشد ادبیات انگلیسی، دانشگاه ارومیه
۲- استادیار گروه زبان و ادبیات انگلیسی، دانشگاه ارومیه

h.zargarzadeh@urmia.ac.ir

چکیده

بررسی تغییرات اقلیمی محدود به علوم طبیعی نیست و در متون ادبی نیز بازتاب می یابد. موضوعاتی چون تغییرات آب‌وهوا و بهره‌برداری از منابع طبیعی همواره مورد توجه بوده‌اند. انسان به عنوان بخشی از طبیعت ، از یک سو ویرانگر و از سوی دیگر در پی بیان دغدغه های زیست محیطی با هدف ضرورت کنترل بهره برداری از منابع است. ادبیات ، یکی از مؤثرترین ابزارهای انتقال این دغدغه‌ها به نسل‌های آینده به شمار می‌آید؛ چرا که با توانایی تأثیرگذاری بر خواننده ، بستری برای آگاهی‌بخشی فراهم می‌کند. این مقاله می‌کوشد با تکیه بر آموزش ادبیات، به‌عنوان فضایی برای پرورش اندیشه‌ها، مسئولیت پذیری را در برابر محیط زیست یادآور شود. در این پژوهش، رمان خدای چیزهای کوچک اثر آروناداتی روی بررسی می‌شود. در این اثر، طبیعت در دو بازه زمانی متفاوت توصیف شده است: دوران کودکی راحل و استا، شخصیت های اصلی، با رودخانه‌ای پرآب و درختانی انبوه ؛ و بیست‌وسه سال بعد، با رودخانه‌ای خشکیده و حیواناتی نابود شده. این تقابل تصویری، تأثیری ژرف بر خواننده می‌گذارد. از این‌رو، معلم می تواند با بهره‌گیری از آموزش ادبی بستری برای مسئولیت‌پذیری و همدلی در دانش‌آموزان فراهم آورد و نگاهی عمیق‌تر به رابطه متقابل انسان و طبیعت ارائه دهد.

کلید واژه‌ها: آموزش ادبیات، طبیعت، جغرافیا، خدای چیزهای کوچک، آروناداتی روی.

مقدمه

به دنبال پیشرفت فن آوری، یکی از مهم ترین مسائل روز دنیا بحران های زیست محیطی می باشد. به سبب استفاده بی رویه و نادرست انسان از منابع طبیعی و طولانی بودن یا در مواردی غیرممکن بودن فرایند جایگزینی این منابع، روزانه شاهد افزایش مشکلات زیست محیطی هستیم. در شرایط کنونی، بشر با اتکا به توجیه جایگاه خویش به عنوان اشرف

مخلوقات، سلطه ای مخاطره آمیز و به ظاهر بی پایان بر طبیعت اعمال می کند. علوی مقدم، مدرس مهندسی عمران و محیط زیست، تأکید می کند با رشد جمعیت و توسعه فعالیت‌های صنعتی، بخش عمده‌ای از منابع آبی موجود در جهان دچار آلودگی شده‌اند و این امر پیامدهای بهداشتی و زیست‌محیطی قابل توجهی را برای انسان و سایر موجودات زنده به همراه داشته است. تداوم این روند می‌تواند در آینده نزدیک منجر به بروز بحران کمبود آب شود .در سال های اخیر، مطالعات متعدد در رشته های مختلف به بررسی تخریب طبیعت توسط انسان پرداخته اند. کمک گرفتن از شاخه های مختلف علوم انسانی، به عنوان روشی اساسی برای حل معضلات زیست محیطی در نظر گرفته شده است. پرالدو اظهار می دارد، امروزه پژوهشگران مختلف برارتباط بین ادبیات و جغرافیا و هم پوشانی این دو رشته تاکید کرده اند. مطالعات بینارشته‌ای در حوزه ادبیات و جغرافیا به بررسی رابطه انسان و طبیعت و تبلور مسائل محیط زیست در آثار ادبی می پردازد.

ادبیات یکی از مهم ترین و قدرتمندترین ابزار هر ملت محسوب می شود که در راستای آموزش بشر و افزایش سواد جمعی ایفای نقش می کند. آثار ادبی به واسطه ی ارتباط خود با تمدن، فرهنگ، هنر، معماری و زیست بوم یک کشور منعکس کننده ی تفکر، عادات، رسوم و شیوه ی زیستن ساکنین آن کشور می باشند. به مرور زمان، با پیشرفت علم و صنعت، بشر خود را مجزا و مستقل از طبیعت دانست. این امر موجب به بار آوردن آسیب های مخرب فراوان در محیط زیست شد.

از این رو افراد دغدغه مند و متخصص از جمله جغرافی دانان سعی بر آن داشتند نگرانی ها و عواقب نابودی طبیعت را به گوش جهانیان برسانند. از این رو همانطور که پرالدو بیان می کند، نقد ادبی به عنوان رشته مدنظر جغرافیا فضای لازم برای بیان تفکرات زیست محیطی را فراهم نمود.

ادبیات از منظر محیط زیست به بررسی تعامل انسان و طبیعت در طول تاریخ می پردازد و با فراهم آوردن زمینه ی لازم سعی بر آگاهی بخشی و اصلاح رابطه مخاطره آمیز بشر و محیط زیست دارد. بحران های زیست محیطی به واسطه ادبیات مرزهای جغرافیایی را پشت سر گذاشته و وارد ملل مختلف می شوند. نتیجه آن می شود که افراد در سراسر جهان در راستای اصلاح رفتارهای نادرست انسان در برابر طبیعت و آموزش نحوه ی استفاده ی صحیح و مدیریت و کنترل منابع طبیعی قدم بر می دارند. لذا ادبیات با به تصویر کشیدن گذشته و آینده، پلی میان افراد و جهان طبیعی ایجاد می کند. از جمله منتقدین حامی محیط زیست وال پلاموود، بوم شناس استرالیایی، می باشد. پلاموود دوگانه انگاری (dualism) میان انسان و طبیعت را، که حاصل تفکرات غربی است، زیر سوال برده، بر تعامل انسان و طبیعت تاکید کرده، و راه حل رفع این تضادهای دوگانه را برچیدن و حذف مرزهای مشکل زا می داند.

با در نظر گرفتن ایران به عنوان کشوری دارای اقلیم های گوناگون، کلاس های آموزش ادبیات از طریق تدریس متون ادبی این فرصت را فراهم می آورند تا دانش آموزان از سنین پایین با محیط پیرامون خود به درستی آشنا شده، مسئولیت خود را درقبال محیط زیست پذیرفته و در راستای بهبود بخشیدن زیست بوم تلاش کنند. مقاله مد نظر به بررسی این موضوع

می پردازد که چگونه ادبیات قصد دارد از طریق آموزش و بازتاب محیط زیست وصف شده در آثار ادبی، دانش آموزان را در مسیر تفکر نقادانه، پویایی و همدلی نسبت به طبیعت قرار دهد. رمان خدای چیزهای کوچک (1997) اثر آروناتی روی می تواند به عنوان یک اثر ادبی برجسته در کلاس های درسی مورد بررسی و مطالعه قرار گیرد. این رمان انگلیسی در بستر ادبیات و فرهنگ هند نوشته شده و روایتگر زندگی آمو؛ زنی مطلقه جوانی است که پس از طلاق گرفتن از همسرش به همراه کودکان دوقلوی خود، استا و راحل، به خانه پدری بر می گردد. داستان در دو بازه زمانی متفاوت و توسط چند راوی بازگو می شود. استا و راحل سال ها پس از مرگ مادر و بقیه اعضای خانواده به روستا بازگشته و با طبیعتی روبرو می شوند که هیچ شباهتی به طبیعت دوران کودکیشان ندارد. راوی به زمانی باز می گردد که استا و راحل کودکانی هفت ساله هستند؛ آن دو در رودخانه میناچال (Meenachal) شنا می کنند، در میان درختان انبوه و سرسبز قدم می زنند، به تماشای حیوانات می پردازند و از باران های فصلی لذت می برند. بیست و سه سال بعد، استا و راحل رودخانه را درحالی تماشا می کنند که چون بیماری بر بستر مرگ افتاده است. درختان یکی پس از دیگری برای رفع نیازهای بومیان قطع شده، پروژه های توسعه گرا و پیشرفت محور چون سدسازی افزایش یافته و حیواناتی از قبیل بز و خوک جهت پذیرایی از مهمانان خارجی کشته می شوند. بدین ترتیب داستان رابطه تنگاتنگ بین انسان و طبیعت را به تصویر می کشد. انتظار می رود دانش آموزان و سایر خوانندگان از طریق آموزش متون ادبی تحت تاثیر قرار گرفته، به طبیعت در معرض خطر توجه کرده و در راستای اصلاح رفتار خود نسبت به محیط زیست اقدام نمایند.

پیشینه تحقیق

میدکه معقتد است که اگرچه آموزش ادبیات تا دهه 1970 رشته ای مستقل و پژوهش محور به شمار نمی رفت، اما پیشنه ای دیرینه دارد. آموزش متون ادبی در چارچوب فلسفه و تراژدی های کلاسیک به دوران یونان و رم باستان بازمی گردد. در قرون وسطی آموزش ادبی مبتنی بر متون دینی و ادبیات لاتین بود. سپس در دوره رنسانس توجه به آثار کلاسیک افزایش یافت و بدین ترتیب ادبیات به بخش ثابت نظام آموزشی تبدیل شد. لازار مزایای به‌کارگیری متون ادبی در فعالیت‌های زبانی را چنین بیان می کند: این متون طیف گسترده‌ای از سبک‌ها و سطوح زبانی را در بر می‌گیرند، امکان تفسیرهای متنوع را فراهم می‌سازند و بدین‌ترتیب فرصت‌های ارزشمندی برای بحث‌های کلاسی ایجاد می‌کنند و بر موضوعاتی واقعی، جذاب و انگیزه‌بخش برای بررسی در کلاس متمرکز می باشد. نوویانتی آموزش ادبیات، به‌ویژه رمان تربیتی، را بستری می‌داند که به دانش‌آموزان امکان می‌دهد تا با بهره‌گیری از فضایل و ویژگی‌های شخصیت‌های داستانی، به دیدگاه‌های ارزشمند دست یابند و شخصیت خود را از طریق آموزش و برداشت‌های مناسب ارتقا دهند. نوویانتی چنین توضیح می دهد زمانی که دانش آموزان وارد جامعه بزرگسالان می شوند ، دوگانگی های اخلاقی‌ای (ethical dilemma) که شخصیت‌های داستانی تجربه می کنند، می توانند به نوعی بازتاب زندگی دانش آموزان باشند و به آن‌ها کمک کنند تا در مواجهه با

مسائل، تصمیم‌گیری بهتری داشته باشند و صرفاً به منافع شخصی خود نیاندیشند، بلکه در خدمت جامعه و محیط نیز مفید واقع شوند.

بوهلین نیز بر اهمیت استفاده از متون ادبی برای پرورش اخلاق و شخصیت در دانش آموزان تاکید می کند. او متعقد است که ادبیات می تواند به عنوان ابزاری موثر در آموزش اخلاق عمل کند، زیرا داستان های ادبی به بررسی پیچیدگی های انسانی و رابطه ی او با محیط اطرافش می پردازند و دانش آموزان را به تفکر و تأمل درباره ی انتخاب ها وادار می کنند. بوهلین ضمن تاکید بر این موضوع که هدف اصلی مدارس و دانشگاه ها تربیت افراد و آموزش اخلاقیات می باشد، اظهار می کند که می توان از ادبیات به عنوان ابزاری جهت تاثیرگذاری بر زندگی واقعی یاد کرد که افراد را در برابر مسئولیت های خود آگاه تر می کنند.

انوشیروانی به جایگاه و اهداف آموزش ادبیات انگلیسی در ایران اشاره کرده و به بررسی رویکردی جدید در آموزش ادبیات جهان به زبان انگلیسی می پردازد تا فرهنگ ملل مختلف معرفی و صداهای سرکوب شده شنیده شوند. طبیعت نمونه ای بارز از صداهای سرکوب شده است، چرا که انسان از منابع به طور نادرست و بیش از حد بهره برداری می کند، بدون آنکه به جایگزینی آن ها یا بهبود شرایط موجود بیندیشد. در رمان منتخب، محیط زیست رو به نابودی است و روی از طریق بازتاب فضا و مکان، هشدار می دهد که اگر طبیعت نجات نیابد، بشر نیز در معرض خطر خواهد بود. رمان خدای چیزهای کوچک از زوایای متعددی همچون جمله فمینیسم، مطالعات استعماری، جنسیت و طبقات اجتماعی مورد تحلیل قرار گرفته است؛ با این حال، تا کنون از منظر آموزش ادبیات و در راستای ارتقای دانش، بینش و آگاهی درباره محیط زیست در مدارس و دانشگاه ها بررسی نشده است.

روش پژوهش

این مقاله با روش تحلیلی – توصیفی، بر مفهوم آموزش ادبیات از طریق نقد جغرافیا محور و پرورش اخلاقیات در دانش آموزان تمرکز دارد. نویسندگان با بهره گیری از منابع کتابخانه ای، پایگاه های اطلاعاتی و منابع موجود در فضای مجازی و اینترنت، داده ها و مطالب مورد نیاز را گردآوری کرده و سپس با تدوین چارچوب نظری مناسب به تجزیه و تحلیل آن ها پرداخته است. در این راستا، تاثیر و تعامل پدیده های جغرافیایی با زبان و ادبیات انگلیسی مورد بررسی و واکاوی قرار گرفته است. از این روی، پژوهش حاضر با به کارگیری مفهوم دوگانه انگاری(dualism) پلاموود و یک مورد از ویژگی های آن یعنی استفاده ابزاری (instrumentalism) تحلیلی بوم شناختی از رمان روی ارائه می دهد. در این اثر محیط زیست، به خصوص رودخانه، به واسطه ی استفاده نامناسب و بیش ازحد در معرض خطر قرارگرفته است. با این حال، ساکنان نه تنها اقدامی موثر در جهت بهبود شرایط انجام نمی دهند، بلکه بر شدت تخریب محیط زیست نیز می افزایند.

یافته ها

بوم شناسی در ادبیات جلوه ای ویژه دارد. نویسندگان و شاعران با بهره گیری از محیط جغرافیایی اطراف خود، اقلیم زندگی شان و پدیده های طبیعی آثار ادبی خود را خلق می کنند که با توجه به عناصر ذکر شده، سبب تفاوت در اندیشه، دیدگاه و روحیات مردم آن زیست بوم می شود. بنابراین محیط جغرافیایی و طبیعت خاص یک منطقه، به طور مستقیم در آثار ادبی نمایش داده می شوند.

یکی از مهم ترین مسائل که در کلاس های آموزش ادبیات تدریس می شود، جنبه ی اخلاقی رابطه ی انسان و محیط زیست است. همانطور که ذوالفقاری، متخصص در رشته جغرافیا، اذعان می دارد، محیط زیست دارای حریم هایی است که باید مورد احترام قرار گیرند و اخلاقیات حکم می کند در برابر محیط زیست و حفظ آن مسئول و تلاش گر باشیم. اگر انسان به طبیعت احترام گذارد و منابع آن را حفظ کند، طبیعت نیز او را از مواهب بیشمار خویش بهره مند خواهد ساخت؛ اما اگر اصول اخلاقی نادیده گرفته شوند و بهره برداری بی رویه و نامناسب از منابع به طبیعت آسیب رساند، انسان نخستین کسی خواهد بود که با خشم و پیامدهای آن مواجه می گردد. اغلب ناآگاهی، علت تخریب و آلودگی محیط زیست می باشد. همین امر ضرورت گنجاندن و تدریس رمان های آموزشی در برنامه ی درسی مدارس و دانشگاه ها را نشان می دهد چرا که دانش آموزان آینده ی کشور را شکل می دهند و اگر از سنین کم تحت تعلیم، آموزش و راهنمایی قرار گیرند، در بزرگسالی حفاظت از محیط زیست برای آن ها تبدیل به عقیده و باور خواهد شد.

در کلاس درس معلم با هدف آگاه سازی دانش آموزان و یادآوری مسئولیتشان نسبت به محیط زیست، ابتدا خلاصه ای از رمان خدای چیزهای کوچک را ارائه می دهد. همانطور که در رمان خدای چیزهای کوچک، پس از آن که اجزای مختلف طبیعت از جمله رودخانه، درختان و حیوانات، هر یک به نحوی، از بین رفتند خانواده ی استا و راحل نیز دچار سرنوشتی تراژیک شدند؛ خانه ی آیمنم، محل سکونت آمو و خانواده اش، که زمانی سرسبز و غرق در پوشش گیاهی بود، اکنون به ویرانه ای بدل گشته و باغچه ی زیبا و مرتب آن توسط گیاهان خودرو و رونده احاطه شده که این امر خود به گونه ای بازپس گیری فضا توسط طبیعت را نشان می دهد. سپس معلم بخشی از رمان را می خواند و از دانش آموزان می خواهد دیدگاه خود را نسبت به آنچه شنیده اند در یک پاراگراف بیان کنند.

سال ها بعد وقتی راحل نزد رودخانه بازگشت، رودخانه به او با لبخند هولناک یک اسکلت خوشامد گفت، با حفره هایی که روزگاری جای دندان ها بود و با دست نیمه جانی که از روی تخت بیمارستان بلند شده بود.دو اتفاق افتاده بود. رودخانه کوچک و حقیر شده و او رشد کرده بود. در پایین رودخانه در مقابل آرای نمایندگان بانفوذ شالیکاران، سد آب شوری ساخته شده بود. سد ریختن آب شور را به آب راه هایی که به دریای عربی می ریختند تنظیم می کرد. به این ترتیب حالا به جای سالی یکبار، سالی دو بار محصول را درو می کردند. برنج بیشتر در برابر بهای یک رودخانه. (روی،1997)

در این بخش معلم بر ارتقای آگاهی دانش آموزان و یادآوری مسئولیت های آنان در قبال محیط زیست تمرکزمی کند. آن ها اکنون می دانند رودخانه ای که روزگاری پرجنب و جوش و محل کسب درآمد بومیان بوده، با گذشت زمان رو به ویرانی است. دولت برای کنترل و مهار جریان آب شور از دریای عربی، سدی بر روی رودخانه میناچال (Meenachal) احداث کرده است. استفاده ابزاری از رودخانه با هدف کسب آرای بیشتر توسط دولت به وضوح نشان دهنده ی بی تفاوتی بشر نسبت به حفظ منابع طبیعی می باشد. همانطور که پلاموود اظهار می دارد، نگاه ابزاری نسبت به طبیعت، به رسمیت نشناختن عناصرش و در نظر گرفتن آن صرفاً به عنوان یک ابزار که محدودیتی در استفاده ندارد و تنها هدف آن رفع نیازهای انسان می باشد، سبب شده رودخانه کارکرد طبیعی و ذاتی خود را از دست بدهد و به یک منبع بهره برداری تمام ناشدنی تبدیل گردد.

طبق نظریه پلاموود، یکی از راه های به چالش کشیدن و تغییر دادن تفکر جدایی انسان از طبیعت، به رسمیت شناختن زیست بوم، درک تفاوت های میان بشر و محیط زیست، و احترام گذاشتن به حریم آن می باشد. پلاموود با تمرکز بر مفهوم دوگانه انگاری، بیان می دارد که رابطه بین انسان و طبیعت بر اساس تفاوت ها است و لازمه تغییر این دیدگاه، بازسازی رابطه انسان و طبیعت بر اساس همزیستی برابر و غیر طبقه بندی شده می باشد. میزان همدلی دانش آموزان پس از آموزش افزایش یافته و حتی بعضی از آن ها راه حل هایی جهت رفع مشکلات مشابه در کشور ارائه می دهند. دانش‌آموزان با تطبیق رویدادها و محیط توصیف‌شده در رمان با شرایط زندگی و زیست‌بوم خویش، از تجربه‌های شخصیت‌ها و اندیشه‌های خود بهره می‌گیرند تا راهکارهایی برای پیشگیری از وقوع رخدادهای مشابه بیابند. در واقع، آنان با دریافت پیامدهایی که در نتیجه‌ی مطالعه و شنیدن رمان بر سر زیست‌بوم و بومیان فرود می‌آید، می‌کوشند از بروز مشکلات مشابه در زندگی واقعی و محیط زیست پیرامون خود جلوگیری کنند.

از طریق نقد بوم گرا و جغرافیا محور، روی صنعتی شدن زندگی و تسلط بر طبیعت را به چالش می کشد. خشک ماندن رودخانه با وجود بارش های فصلی دلایل متعددی دارد. از جمله این دلایل همانطور که در رمان ذکر شده، سدسازی می باشد. فعالیت های مربوط به کشاورزی (Agricultural Wastes) و صنعت و استفاده بی رویه از آب نیز می تواند عامل دیگر کاهش سطح آب رودخانه باشد. معلم بخش دیگری از رمان را می خواند که در آن به مرگ موجودات ساکن رودخانه و آلودگی آب اشاره شده است. در این مرحله، دانش آموزان با بازنمایی اندیشه ها و تصورات خویش و از طریق اصلاح رفتاهاری پرخطر، نقش موثری در تقویت همدلی و مسئولیت پذیری نسبت به زیست بوم ایفا می کنند.

حالا با وجود ماه ژوئن و فصل بارندگی، رودخانه به طرزی غیرعادی خشک شده بود. نوار باریکی از آب غلیظ که از سر درماندگی، آراسته به ماهی نقره ای مرده از یک سو شده ای بر سطحش، از هر طرف بر کناره های گل آلودش غنوده بود.

در گلوی ماهی علف شادابی فرو رفته بود که ریشه های انبوه قهوه ای آن چون شاخک هایی در زیر آب شناور بودند و مرغان باران آبزی با پاهای پهنشان محتاطانه بر آن گام می زدند . روزگاری نیروی آن را داشت که هراس برانگیزد. زندگی ها را تغییر دهد. اما حالا دندان هایش غرق شده بودند، توانش به پایان رسیده بود. فقط نوار سبز و خزه بسته ای از لای و لجن بود که فاضلاب را به کندی به سوی دریا پیش می برد. کیسه های نایلونی شفاف بر سطح چسبنده و خزه بسته اش چون گل های پرنده ی گرمسیری در حرکت بودند. (روی، 1997)

معلم پس از خواندن متن از دانش آموزان می خواهد نظرات خود را مبنی بر علت خشک شدن رودخانه و مرگ ماهی ها ذکر کنند. گروهی از دانش آموزان سدسازی، راکد ماندن آب و نبود جریان های دریایی را عامل خشک شدن رودخانه و مرگ ماهی ها می دانند. گروهی دیگر، به زباله ها از جمله کیسه های پلاستیکی اشاره می کنند و رفتار بومیان نسبت به رودخانه را زیر سوال می برند. دانش آموزان معتقدند طبیعت سرمایه های خود را با انسان به اشتراک می گذارد اما انسان ها سواستفاده می کنند.

به عنوان مثال یکی از راه های کسب درآمد بومیان ماهیگیری بوده اما اکنون با افزایش آلودگی آب دیگر ماهی باقی نمانده است. گروه سوم تغییر الگوی بارش را عامل خشک شدن رودخانه می دانند و به بررسی دلایل تغییر آب و هوا می پردازند. پلاموود توضیح می دهد بشر با یادآوری تصور خویش به عنوان مرکز جهان هستی و با توجیه بهره کشی از منابع طبیعی، خود را از طبیعت جدا می انگارد و بدین ترتیب برتری خود را تصدیق می کند.

حالا که وضعیت اسفناک رودخانه تا حد زیادی برای دانش آموزان قابل درک است، بخشی از رمان خوانده می شود که در آن مستقیما به زباله های انسانی، که موجب نابودی رودخانه شده اند، اشاره می شود. ساکنین روستا در سال های گذشته بیشترین بهره را از رودخانه می بردند، اکنون نسبت به آن بی توجه شده و در نتیجه روز به روز اوضاع وخیم تر میشود. علیرغم آگاهی مردم و دولت از پیامدهای رفتار و اعمال خود در برابر طبیعت، نه تنها در راستای بهبود شرایط اقدام نمی کنند بلکه راه حل را در بی تفاوتی و نادیده گرفتن شرایط موجود می دانند. این امر موجب شده است که دانش آموزان حساسیت بیشتری از خود بروز دهند و نسبت به هم نوعانی که طبیعت را بی اهمیّت و فاقد حیات می پندارند، واکنشی همراه با نارضایتی و خشم نشان دهند.

در سوی دیگر رودخانه، ساحل شیب دار گلی ناگهان به دیوارهای گلی کلبه های حصیری کلبه نشینان تبدیل می شد. کودکان باسنهایشان را از لبه ی بام ها آویختند و محتویات روده هایشان را یکراست به درون گل نرم و مکنده بستر بی حفاظ رودخانه می ریختند. کوچکترها در تلاش برای یافتن راهی برای پایین آمدن رگه ای از باریکه ی آبی زرد رنگ به جا می گذاشتند. عاقبت بعداز ظهر رودخانه به خود می آمد تا آنچه را در عرض روز هدیه شده بپذیرد و رسوبات را به دریا ببرد و با این بیداری در پس خود خط مواجی از کف سفید و غلیظ به جا نهند. بالای رودخانه مادرهای تمیز لباس ها و

ظروف گلی را در آب نیالوده به فضولات کارخانه می شستند. مردم حمام می گرفتند. بدن های صابون زده و مجزای آن ها چون نیم تنه هایی تیره بر نوار باریک و متحرک چمنزاری چیده شده بودند. در روزهای گرم بوی مدفوع از رودخانه بلند می شد و چون کلاهی آیمنم (Ayemenem) را می پوشاند. (روی،1997)

به دنبال سهل انگاری در انجام وظایف، بشر تصور می کند همینکه طبیعت وجود داشته باشد کافی است و نیازمند توجه و مراقبت نمی باشد. معلم در کلاس درس وظایف افراد در قبال محیط زیست را یادآور می شود و از دانش آموزان می خواهد در این باره بحث و گفتگو داشته باشند. میان آنان اتفاق نظر وجود دارد که رخدادهای روایت‌شده در رمان ماهیتی وحشتناک دارند؛ با این حال، جنبهٔ طنزآمیز ماجرا از نظر ایشان در این نکته نهفته است که کودکان آب را آلوده می‌سازند، در حالی که مادرانشان در بالادست رودخانه، در آخرین بخش‌های نسبتاً پاکیزهٔ آب، به شست‌وشوی فرزندان خود می‌پردازند .در واقع آلودگی آب و خشک شدن رودخانه هیچ اهمیتی برای ساکنین منطقه ندارد. رودخانه که منبع حیات بوده اکنون نامرئی شده و با فضولات انسانی رو به ویرانی است. کارخانه داران نیز در پی یافتن راهکارهای مناسب برای دفع فاضلاب برنیامده اند و زباله ها مستقیما وارد رودخانه می شوند. پلاموود به روشنی تصریح می کند زمانیکه انسان خود را بخشی از طبیعت نمی بیند به دنبال این دیگاه دوگانه انگاری، شرایطی پیش می آید که طی آن طبیعت نادیده گرفته شده و ارزش توجه نخواهد داشت.

درحالیکه رودخانه رو به خشکی گراییده، طبقه مرفه و مسئولین هتلی پنج ستاره تأسیس کرده و از مهمانان خارجی، به ویژه توریست های غربی، استقبال می کنند. این امر نشان دهنده آن است بومیان منطقه ی خود را نادیده گرفته و در خدمت افراد ثروتمند درآمده اند. نویسنده شرایط را اینگونه توصیف می کند:

در خشکی، دورتر اما در همان حوالی، هتل پنج ستاره ای " قلب تاریکی" را خریده بود. خانه تاریخ (ان جا که زمانی اجدادی با نفسی که بوی نقشه های کاغذی می داد و ناخن های پای سخت، در آن نجوا می کردند) دیگر از رودخانه قابل دسترسی نبود. به آیمنم پشت کرده بود. مهمانان هتل از آبراه هایی که یکراست از کوچین می آمدند عبور داده می شدند. آن ها با قایق های موتوری از راه می رسیدند، با کف های آب یک v باز می کردند و در پس خود از ورقه نازکقوس و قزحی از بنزین باقی می گذاشتند. (روی،1997)در این بخش، دانش آموزان شرایط را مورد بحث و بررسی قرار می دهند. در یک سمت منطقه ای قرار دارد که منابع آبی آن آلوده شده و نیاز به مراقبت دارد و در سمت دیگر ساکنان ثروتمند همان منطقه هستند که تنها دغدغه شان تدارک مسیر عبور و مرور جهت حفظ راحتی و آسایش توریست ها است. مهم ترین روش حمل و نقل قایق است که با هر حرکت خود ردی از روغن و بنزین بر جای می گذارد و موجب تشدید آلودگی آب رودخانه و مرگ ماهی ها می شود. بنزین از مشتقات نفت می باشد که پس از ورود به آب، با ایجاد لایه ای بر سطح آن، مانع از تبادل اکسیژن میان هوا و آب شده و همچنین از نفوذ نور به درون آب جلوگیری می کند. همانطور که کارآموز و کراچیان اظهار

می دارند، روغن ها از جمله جامدات معلق آلی هستند که در فاضلاب های صنعتی وجود دارند. پس از خواندن این پاراگراف از رمان، دانش آموزان با دو دیدگاه متفاوت روبرومی شوند: حفظ رودخانه و نابودی آن. گروهی بر این باورند که اگرچه آب منبعی تجدید پذیر، اما محدود است. در نتیجه بهترین راهکار پیشگیری و حفظ منابع می باشد. گروهی دیگر معتقدند هرچه تعداد بازدیدکنندگان افزایش یابد، صنعت گردشگری به مراتب رونق بیشتری خواهد یافت. معلم توضیح می دهد سلطه بر طبیعت موضوعی است که از دیرباز ذهن بشر را به خود مشغول داشته است. پلاموود تصدیق می کند که گروهی از انسان ها استقلال طبیعت را نادیده گرفته اند و تنها در راستای اهداف خود آن را به کار می گیرند. معلم یادآور می شود که اقدام درست آن است که مسئولان و بومیان با آگاهی بخشی، یکدیگر را از عواملی که موجب نابودی محیط زیست می شوند مطلع کنند. همانطور که علوی مقدم بیان می کند، یکی از مهم‌ترین راهکارهای صیانت از کیفیت منابع آب، تدوین و اجرای دقیق قوانین و استانداردهای سخت‌گیرانه زیست‌محیطی است.

آب یکی از فراوان ترین و اصلی ترین ترکیبات طبیعت است. بزرگ حداد اظهار می کند آب، "پس از هوا مهم ترین و اساسی ترین ماده مورد نیاز بشر جهت ادامه حیات می باشد". به طور کلی، به آبی آلوده گفته می شود که کیفیت طبیعی خود را از دست داده باشد و به دلیل وجود مواد یا عوامل مضر، دیگر برای انسان حیوانات یا محیط زیست ایمن نباشد. در این اثر ادبی، آب آلوده محسوب می شود زیرا در آن مواد شیمیایی (بنزین)، مواد فیزیکی (زباله، پلاستیک) و مواد میکروبی و بیماری زا (فضولات انسانی) وجود دارد. برخی از موارد یاد شده باعث غلیظ تر شدن آب می شوند چرا که ترکیب طبیعی آن تغییر کرده است.

چشم انداز هتل زیبا بود، اما این جا هم آب غلیظ و مسموم بود. تابلوهایی نصب کرده بودند که روی ان ها با خط خوش نوشته شده بود " شنا نکنید ". آن ها دیوار بلندی ساخته بودند تا محلات پست و پرجمعیت را جدا کنند و مانع از تجاوز آن ها به املاک کاری سایپو شوند. درباره بو کار زیادی از دستشان بر نمی آمد. اما استخر شنایی برای شنا کردن داشتند. و ماهی سیم دریایی تازه تندروی و کرپ سوزت در فهرست غذایشان بودند. درخت ها هنوز سبز بودند، آسمان هنوز آبی بود و این ها ارزش داشتند. بنابراین آن ها کارشان را ادامه دادند و بر بهشت بویناکشان سرپوشی گذاشتند. (روی،1997)

غلیظ شدن آب ارتباط مستقیمی با افزایش آلاینده ها دارد. این امر کدورت آب را افزایش داده و آن را غلیظ تر نشان می دهد. طبق تعریف کارآموز و کراچیان، کدورت شاخصی کیفی از میزان جذب و یا پراکندگی پرتوهای نور توسط ذرات معلق موجود در آب به شمار می رود. آلاینده های شیمیایی کارخانه های اطراف نیز مواد محلول در آب را بالا می برند. ورود فاضلاب مقدار اکسیژن مورد نیاز برای تجزیه مواد آلی را افزایش می دهد در نتیجه آب حالت غلیظ تری به خود می گیرد. با کنار هم گذاشتن بخش های خوانده شده، دانش آموزان به این نتیجه می رسند که تغییرات یاد شده کیفیت فیزیکی، شیمیایی و زیستی آب را تحت تاثیر قرار داده و چرخه طبیعی اکوسیستم های آبی را مختل می کند. دیدگاه انسان به

عنوان محور اصلی جهان، طبیعت را امری کاملاً جدا و متفاوت می بیند و بشر را به طور آشکار از طبیعت و حیوانات متمایز می سازد. در این نگرش، طبیعت مرتبه ای فروتر دارد و به جای توجه به ویژگی های مشترک میان انسان، طبیعت و حیوانات، بر آن خصوصیات تأکید می شود که انسان را از محیط زیست جدا می کند. این تضاد زمانی برطرف می شود که انسان به طبیعت احترام گذاشته و مرزهای آن را نشکند.

مسئله ای دیگر که معلم از طریق تدریس ادبیات بر آن تأکید دارد، تأثیر سابقه ی نویسنده و تفکر او در شکل گیری آثارش می باشد. روی به عنوان فعال محیط زیست همواره سعی بر آن داشته صدای طبیعت را به گوش همگان برساند. وی یکی از اعضای دائمی اعتراضات علیه نابودی و تخریب محیط زیست، به ویژه پروژه های سدسازی، بوده و حتی درآمد حاصل از فروش معروف ترین رمانش، خدای چیزهای کوچک، را نیز صرف انجام امور زیست محیطی کرده است. در نتیجه دانش آموزان پس از مطالعه ی آثار ادبی به هدف نویسنده پی برده، با اوهمراه شده و از مسئولیت خود در برابر اقلیم و طبیعت آگاه تر خواهند شد. چنانکه نویسندگان این پژوهش سعی دارند از طریق تدریس این رمان در کلاس های آموزش ادبیات دوره کارشناسی و کارشناسی ارشد و نیز مدارس، مشکلات زیست محیطی موجود در کشور را منعکس نمایند.

یکی از اهداف نگارش مقاله ی حاضر، یادآوری شرایط ملال انگیز دریاچه ارومیه می باشد. دریاچه ای که روزگاری محل زندگی حیوانات و گیاهان گوناگون بود و نعمت های خویش را بر همگان ارزانی داشت، اما صد افسوس که چندی پیش، نفس های آخرش را کشید. لذا ادبیات وظیفه ی آموزش اذهان را به عهده گرفته و در راستای آگاهی سازی جهت حفظ منابع طبیعی اقدام می نماید تا از بروز مجدد مشکلات و معضلات زیست محیطی و پیامدهای ناشی از آن پیشگیری به عمل آورد.

نتیجه گیری

در نظر روی، نابودی طبیعت بدون شک نابودی بشر را به دنبال خواهد داشت. محیط زیست تا زمانی با انسان سازگار است که حریم آن حفظ شود؛ اما هنگامیکه بقای آن در معرض تهدید قرار گیرد، طبیعت گویی به حکم غریزه، به مقاومت و گاه خشونت، در برابر انسان برانگیخته می شود. به عنوان مثال اگرچه رودخانه در انتهای رمان وضعیت غم انگیزی دارد اما سال ها پیش قاتل دخترایی استا و راحل بوده به نحوی که بدن بی جان دخترک توسط ماهی ها خورده و در گل و لای و لجن پوشیده شده بود. پس از آموزش اثر انتخاب شده در کلاس های تدریس ادبیات و بررسی معضلات مربوط به محیط زیست، به ویژه در حوزه آب، میزان همدلی دانش آموزان با طبیعت افزایش یافته و مسئولیت پذیرتر می شوند؛ چرا که در طول تدریس رمان خود را به جای شخصیت ها قرار داده و و واکنش خود را نسبت به اتفاقات داستان تجسم نموده و حتی به زندگی شخصی و اجتماعی خود ربط می دهند. دانش آموزان با قرار دادن خود در جایگاه شخصیت های داستان، از منظر آنان به مسائل و شرایط نگریسته، به درک و ایده های نو دست یافته و تلاش می کنند دیگران را نیز نسبت به وظایف

خویش در قبال محیط پیرامون آگاه سازند. حتی بعضی از ایشان راه حل هایی برای رفع مشکلات مشابه در کشور ارائه می دهند تا بار دیگر پیوند میان خود با طبیعت را عمیق تر احساس کرده و به مثابه‌ی صدای بی‌صدای طبیعت، همچون دریاچه‌ی ارومیه، نقش‌آفرینی کنند. همزمان که سن دانش آموزان بالاتر می رود، دیدگاه، هویت آن ها عمیق تر شکل می گیرد و نظراتشان نسبت به جامعه و محیط زیست دقیق تر می شود. درنتیجه هرچه آگاهی دانش آموزان بیشتر شود،

منابع

انوشیروانی ، ع. (1393). آموزش ادبیات انگلیسی یا ادبیات جهان به انگلیسی در دانشگاه‌های ایران؟. پژوهش ادبیات معاصر جهان، (1) 19، 43-25.

بزرگ حداد، ا. (1390). جزوه درسی و کنکوری مدیریت منابع آب. انتشارات دانشگاه تهران، تهران.

ذوالفقاری ، ح. (1391). مبانی محیط زیست. انتشارات دانشگاه رازی، کرمانشاه.

علوی مقدم ، م. (1385). مروری بر استانداردهای کیفی منابع آب در ژاپن. علوم و تکنولوژی محیط زیست، (4) 8، 95-90.

کارآموز ، م.، و کراچیان، ر. (1382). برنامه ریزی و مدیریت کیفی سیستم های منابع آب. دانشگاه صنعتی امیر کبیر، تهران.

Bohlin, K. (2005). Teaching character education through literature: Awakening the moral imagination in secondary classrooms. Routledge.

Lazar, G. (1993). Literature and language teaching: A guide for teachers and trainers. Cambridge UP.

Middeke, M. (2016). English and American Studies: Theory and Practice. Springer.

Novianti, N. (2017). Teaching Character Education to College Students Using Bildungsromans. International journal of instruction, 10(4), 255-272.

Peraldo, E. (2016). Literature and geography: the writing of space throughout history. Cambridge Scholars Publishing.

Plumwood, V. (2002). Feminism and the Mastery of Nature. Routledge.

Roy, A. (1998). The God of Small Things. HarperCollins.

سومین کنفرانس ملی آب و هواشناسی ایران (با محوریت تغییر اقلیم)
The 3rd National Conference on Climatology of Iran (Focusing on Climate Change)
ارومیه ۱۶ مهر ۱۴۰۴

تحلیل روند، پراکنش و ترکیبات غالب پدیده گردوغباردر استان لرستان

آزاده پولادوند[۱]، غلامعلی مظفری[۲]، حمیدرضا غفاریان[۳]، کمال امیدوار[۴]، احمد مزیدی[۵]

۱- دانشجوی دکترای اقلیم شناسی، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی. دانشگاه یزد، یزد. ایران
۲- استاد گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه یزد ، یزد، ایران
۳- دانشیار گروه جغرافیا، دانشگاه یزد ، یزد، ایران
٤- استاد گروه جغرافیا، دانشگاه یزد ، یزد، ایران
٥- دانشیار گروه جغرافیا، دانشگاه یزد ، یزد، ایران
آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول gmozafari@yazd.ac.ir

چکیده

اهداف: این پژوهش با هدف تحلیل روند زمانی-مکانی پدیده گردوغبار و شناسایی ترکیبات شیمیایی غالب آن در استان لرستان طی دوره آماری ۲۰۲۰-۱۹۹۱ انجام شد.

مواد و روش‌ها: برای تحلیل روند از آزمون ناپارامتری من-کندال و برای برآورد شیب تغییرات از روش شیب سن استفاده گردید. پهنه‌بندی مکانی رخداد گردوغبار برای ماه‌های مختلف سال ترسیم و ترکیب شیمیایی یک نمونه گردوغبار با استفاده از طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDAX) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

یافته‌ها: نتایج نشان داد روند سالانه روزهای گردوغباری در ایستگاه‌های شاخصی مانند خرم‌آباد (۲۱/۴ (Z = و الیگودرز (۲۷/۴ (Z = در سطح اطمینان ۹/۹۹ درصد افزایشی و معنی‌دار است. این روند در ماه‌های گرم سال (مارس تا آگوست) و فصل بهار مشهودتر بود. پهنه‌بندی‌ها الگوی پیچیده‌ای را نشان داد که شدیداً تحت تأثیر توپوگرافی (ارتفاع و جهت دره‌ها) و جهت بادهای غالب بود؛ به طوری که مناطق شرقی (الیگودرز) و مرکزی (دورود، الشتر) و همچنین دشت‌های شمالی (بروجرد) کانون‌های اصلی گردوغبار بودند. آنالیز نمونه گردوغبار می ۲۰۱۲ نشان داد که ذرات عمدتاً از اکسیژن (۴۹٪/۵)، سیلیسیم (۲۰٪/۸) و کربن (۹٪) تشکیل شده‌اند که نشان‌دهنده منشأ زمین‌شناختی و خاکی این ذرات، احتمالاً از مناطق بیابانی غرب (عراق) است.

نتیجه‌گیری: یافته‌ها حاکی از تشدید معنی‌دار پدیده گردوغبار در استان لرستان است که می‌تواند پیامدهای جدی برای سلامت عمومی، کشاورزی و اکوسیستم‌های منطقه داشته باشد. این مطالعه لزوم اتخاذ راهبردهای مدیریتی یکپارچه در مقیاس محلی و منطقه‌ای برای مقابله با این چالش زیستمحیطی را آشکار می‌سازد.

کلید واژه‌ها : گردوغبار، روندیابی، من-کندال، پهنه‌بندی، ترکیب شیمیایی، استان لرستان

مقدمه

پدیده گردوغبار به عنوان یکی از چالش‌برانگیزترین بلایای طبیعی-انسان‌ساز (بیات و همکاران، ۱۳۹۰)، در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان محسوب می‌شود (اُبرلندر، ۲۰۰۰). این پدیده نه تنها بر کیفیت هوا و سلامت انسان تأثیر منفی می‌گذارد، بلکه باعث کاهش دید، تخریب خاک، آسیب به اکوسیستم‌های طبیعی و خسارت به بخش‌های اقتصادی مانند کشاورزی و صنعت می‌گردد (انصاری قوجغر، ۱۳۹۸). در دهه‌های اخیر، تغییرات اقلیمی، خشکسالی‌های متوالی، مدیریت نادرست منابع آب و خاک، و بهره‌برداری بی‌رویه از اراضی، باعث تشدید فراوانی و شدت طوفان‌های گردوغبار در بسیاری از مناطق از جمله غرب آسیا شده است (بوچانی،۱۳۹۰).

استان لرستان، واقع در غرب ایران، به دلیل موقعیت جغرافیایی خاص خود در مجاورت کانون‌های اصلی گردوغبار (علیجانی، ۱۳۸۱)، داخلی (مانند دشت‌های مرکزی) و خارجی (به ویژه عراق و سوریه)، همواره در معرض این پدیده قرار داشته است (چمن پیرا، ۱۴۰۰). وجود عواملی مانند توپوگرافی پیچیده (ترکیبی از ارتفاعات زاگرس و دشت‌های میان‌کوهی)، تغییرات کاربری اراضی و احتمالاً تغییر الگوهای اقلیمی منطقه، مطالعه نظام‌مند این پدیده را در این استان ضروری می‌سازد (عزیزی و همکاران، ۱۳۹۱).

اگرچه مطالعات پراکنده‌ای در زمینه گردوغبار در ایران انجام شده (انصافی مقدم، ۱۳۹۹). اما فقدان یک مطالعه جامع که به صورت همزمان به تحلیل روند بلندمدت، پهنه‌بندی مکانی-زمانی دقیق ماهانه و شناسایی ترکیبات شیمیایی ذرات گردوغبار در استان لرستان بپردازد، به وضوح احساس می‌شود. این پژوهش با تکیه بر یک دوره

آماری ۳۰ ساله (۲۰۲۰-۱۹۹۱) و با به کارگیری روش‌های آماری robust (مانند من-کندال و شیب سن) و تکنیک‌های آزمایشگاهی (EDAX)، در صدد است تا به سؤالات زیر پاسخ دهد:

۱. روند تغییرات فراوانی روزهای گردوغباری در ایستگاه‌های مختلف استان لرستان در مقیاس‌های سالانه، فصلی و ماهانه چگونه است؟

۲. الگوی پهنه‌بندی مکانی-زمانی رخداد گردوغبار در استان چه ویژگی‌هایی دارد و چگونه با توپوگرافی مرتبط است؟

۳. ترکیبات شیمیایی غالب در ذرات گردوغبار استان چیست و چه اطلاعاتی در مورد منشأ این ذرات ارائه می‌دهد؟

پاسخ به این سؤالات می‌تواند نقشه راهی برای برنامه‌ریزان و مدیران محیط زیست در جهت اتخاذ راهکارهای مناسب برای کاهش اثرات منفی این پدیده فراهم آورد.

۱-تحلیل روند فراوانی روزهای گرد و غباری طول دوره ی مطالعاتی و به تفکیک هر یک از ماه های سال در ایستگاه‌های استان لرستان به روش من-کندال:

جدول۱- روند فراوانی روزهای گرد و غباری ایستگاه خرم آباد به روش من- کندال و شیب سن

Time series	First year	Last Year	n	Test Z	Signific.	Q	Qmin99	Qmax99	Qmin95	Qmax95
January	۱۹۹۱	۲۰۲۰	۳۰	۱.۸۴	+	۰.۰۳۸	-۰.۰۱۷	۰.۱۰۲	-۰.۰۰۲	۰.۰۸۸
February	۱۹۹۱	۲۰۲۰	۳۰	۱.۳۸		۰.۰۳۹	-۰.۰۳۴	۰.۱۱۰	- ۰.۰۱۷	۰.۰۹۲
March	۱۹۹۱	۲۰۲۰	۳۰	۲.۹۲	**	۰.۰۵۴	۰.۰۰۷	۰.۱۰۴	۰.۰۱۸	۰.۰۹۱
April	۱۹۹۱	۲۰۲۰	۳۰	۲.۹۳	**	۰.۰۳۳	۰.۰۰۳	۰.۰۶۴	۰.۰۱۳	۰.۰۵۶
May	۱۹۹۱	۲۰۲۰	۳۰	۲.۷۶	**	۰.۰۲۶	۰.۰۰۲	۰.۰۵۳	۰.۰۰۷	۰.۰۴۷
June	۱۹۹۱	۲۰۲۰	۳۰	۰.۱۸		۰.۰۰۰	-۰.۰۲۴	۰.۰۲۶	-۰.۰۱۸	۰.۰۲۰
July	۱۹۹۱	۲۰۲۰	۳۰	۲.۶۹	**	۰.۰۲۸	۰.۰۰۰	۰.۰۵۵	۰.۰۰۸	۰.۰۴۸
August	۱۹۹۱	۲۰۲۰	۳۰	۲.۳۸	*	۰.۰۲۱	-۰.۰۰۲	۰.۰۴۱	۰.۰۰۴	۰.۰۳۵
September	۱۹۹۱	۲۰۲۰	۳۰	۱.۶۴		۰.۰۱۷	-۰.۰۱۱	۰.۰۴۱	-۰.۰۰۴	۰.۰۳۴
October	۱۹۹۱	۲۰۲۰	۳۰	۱.۶۱		۰.۰۱۶	-۰.۰۱۰	۰.۰۴۲	-۰.۰۰۳	۰.۰۳۶
November	۱۹۹۱	۲۰۲۰	۳۰	۲.۲۳	*	۰.۰۲۶	-۰.۰۰۴	۰.۰۵۶	۰.۰۰۴	۰.۰۵۰
December	۱۹۹۱	۲۰۲۰	۳۰	۱.۰۸		۰.۰۲۴	-۰.۰۳۳	۰.۰۷۴	-۰.۰۱۹	۰.۰۶۰
ANNUAL	۱۹۹۱	۲۰۲۰	۳۰	۴.۲۱	***	۰.۰۲۸	۰.۰۱۳	۰.۰۴۴	۰.۰۱۷	۰.۰۳۹
بهار	۱۹۹۱	۲۰۲۰	۳۰	۴.۰۳	***	۰.۰۴۱	۰.۰۱۷	۰.۰۶۷	۰.۰۲۳	۰.۰۶۰
تابستان	۱۹۹۱	۲۰۲۰	۳۰	۲.۶۶	**	۰.۰۱۶	۰.۰۰۰	۰.۰۳۳	۰.۰۰۴	۰.۰۳۰
پاییز	۱۹۹۱	۲۰۲۰	۳۰	۲.۶۱	**	۰.۰۱۹	۰.۰۰۰	۰.۰۳۸	۰.۰۰۵	۰.۰۳۳
زمستان	۱۹۹۱	۲۰۲۰	۳۰	۲.۲۶	*	۰.۰۳۷	-۰.۰۰۶	۰.۰۷۶	۰.۰۰۷	۰.۰۶۷

با توجه به جدول ارائه شده، تحلیل روند فراوانی روزهای گرد و غباری در ایستگاه خرم‌آباد طی دوره ۱۹۹۱-۲۰۲۰ نشان می‌دهد که در مقیاس سالانه روند افزایشی معنی‌داری در سطح ۹۹.۹٪ وجود دارد (Test Z = 4.21). در تحلیل ماهانه، ماه‌های مارس (Z = 2.92)، آوریل (Z = 2.93)، می (Z = 2.76)، جولای (Z = 2.69) و آگوست (Z = 2.38) روند افزایشی معنی‌داری را نشان می‌دهند. بیشترین شیب تغییرات (Q) مربوط به ماه مارس با ۰.۰۵۴ روز در سال است. ماه‌های ژوئن و دسامبر کمترین روند افزایشی را داشته‌اند. همچنین، در فصول مختلف نیز روند معنی‌داری مشاهده می‌شود، به‌طوری‌که تابستان با Z = 4.03 بیشترین روند افزایشی را نشان می‌دهد. این نتایج نشان‌دهنده تغییرات قابل توجه در الگوی گرد و غبار منطقه لرستان است. روند افزایشی معنی‌دار در اکثر ماه‌های گرم سال (مارس تا آگوست) و روند سالانه می‌تواند نشانگر تشدید بیابان‌زایی، کاهش پوشش گیاهی، و تغییرات اقلیمی در منطقه باشد. شدت بیشتر روند در فصل تابستان (= Z

4.03) احتمالاً به دلیل افزایش دما، کاهش رطوبت خاک و تشدید فرسایش بادی است. این الگو می‌تواند پیامدهای جدی برای سلامت عمومی، کشاورزی و اکوسیستم منطقه داشته باشد.

جدول۲- روند فراوانی روزهای گرد و غباری ایستگاه بروجرد به روش من- کندال و شیب سن

Time series	First year	Last Year	n	Test Z	Signific.	Q	Qmin99	Qmax99	Qmin95	Qmax95
سالانه	۱۹۹۱	۲۰۲۰	۳۰	۴.۰۱	***	۱.۹۳۳	۰.۵۰۰	۳.۰۵۹	۰.۷۵۰	۲.۸۸۹
بهار	۱۹۹۱	۲۰۲۰	۳۰	۳.۷۰	***	۰.۹۳۳	۰.۲۶۱	۱.۵۸۶	۰.۳۷۰	۱.۴۳۳
تابستان	۱۹۹۱	۲۰۲۰	۳۰	۲.۴۵	*	۰.۳۷۵	۰.۰۰۰	۰.۷۰۰	۰.۰۰۰	۰.۶۴۹
پاییز	۱۹۹۱	۲۰۲۰	۳۰	۳.۶۱	***	۰.۱۲۵	۰.۰۰۰	۰.۳۱۸	۰.۰۰۰	۰.۲۵۳
زمستان	۱۹۹۱	۲۰۲۰	۳۰	۲.۹۸	**	۰.۲۵۰	۰.۰۰۰	۰.۶۰۰	۰.۰۶۹	۰.۵۰۰

جدول۳- روند فراوانی روزهای گرد و غباری ایستگاه دورود به روش من- کندال و شیب سن

Time series	First year	Last Year	n	Test S	Test Z	Signific.	Q	Qmin99	Qmax99	Qmin95	Qmax95
سالانه	۲۰۰۰	۲۰۲۰	۲۱		۰.۹۴		۱.۵۵۰	۴.۵۹۲ -	۴.۹۶۱	۲.۰۰۰ -	۴.۰۰۰
بهار	۲۰۰۰	۲۰۲۰	۲۱		۱.۱۵		۰.۷۸۹	۱.۵۰۰ -	۲.۷۱۶	۰.۹۲۶ -	۲.۱۸۹
تابستان	۲۰۰۰	۲۰۲۰	۲۱		-۰.۱۲		۰.۰۰۰	۱.۰۸۷ -	۱.۰۰۰	۰.۹۵۳ -	۰.۶۳۲
پاییز	۲۰۰۰	۲۰۲۰	۲۱		۲.۴۴	*	۰.۰۸۳	۰.۰۰۰	۰.۵۵۹	۰.۰۰۰	۰.۴۳۷
زمستان	۲۰۰۰	۲۰۲۰	۲۱		۱.۹۲	+	۰.۵۰۰	۰.۱۳۱ -	۱.۲۹۳	۰.۰۰۰	۱.۰۰۰

جدول۴- روند فراوانی روزهای گرد و غباری ایستگاه ازنا به روش من- کندال و شیب سن

Time series	First year	Last Year	n	Test S	Test Z	Signific.	Q	Qmin99	Qmax99	Qmin95	Qmax95
سالانه	۲۰۰۰	۲۰۲۰	۲۱		- ۰.۰۹		۰.۰۰۰	- ۳.۰۰۰	۲.۳۴۶	- ۱.۷۶۰	۱.۵۴۹
بهار	۲۰۰۰	۲۰۲۰	۲۱		۰.۷۶		۰.۳۳۳	- ۰.۶۳۱	۱.۶۶۷	- ۰.۳۳۳	۱.۳۱۶
تابستان	۲۰۰۰	۲۰۲۰	۲۱		- ۰.۵۸		- ۰.۰۷۳	- ۱.۰۰۰	۰.۵۰۰	- ۰.۷۱۴	۰.۳۰۳

پاییز	۲۰۰۰	۲۰۲۰	۲۱		۰.۶۶		۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۱۲۵	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰
زمستان	۲۰۰۰	۲۰۲۰	۲۱		۰.۳۴		۰.۰۰۰	-۰.۲۵۰	۰.۳۳۳	-۰.۱۴۳	۰.۲۴۴

جدول۵- روند فراوانی روزهای گرد و غباری ایستگاه الشتر به روش من- کندال و شیب سن

Time series	First year	Last Year	n	Test S	Test Z	Significic.	Q	Qmin99	Qmax99	Qmin95	Qmax95
سالانه	۱۹۹۷	۲۰۲۰	۲۴		۱.۱۹		۰.۶۸۷	-۱.۳۳۵	۳.۴۸۵	-۰.۸۰۲	۲.۵۰۳
بهار	۱۹۹۷	۲۰۲۰	۲۴		۱.۵۲		۰.۵۴۷	-۰.۴۶۴	۱.۷۵۰	-۰.۰۷۳	۱.۲۹۱
تابستان	۱۹۹۷	۲۰۲۰	۲۴		-۰.۶۷		-۰.۰۶۹	-۰.۸۳۳	۰.۵۰۰	-۰.۶۲۹	۰.۲۶۲
پاییز	۱۹۹۷	۲۰۲۰	۲۴		۰.۴۱		۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۱۵۴	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰
زمستان	۱۹۹۷	۲۰۲۰	۲۴		۲.۱۵	*	۰.۲۸۶	۰.۰۰۰	۰.۶۶۷	۰.۰۰۰	۰.۶۰۲

جدول۶- روند فراوانی روزهای گرد و غباری ایستگاه الیگودرز به روش من- کندال و شیب سن

Time series	First year	Last Year	n	Test S	Test Z	Significic.	Q	Qmin99	Qmax99	Qmin95	Qmax95
سالانه	۱۹۹۱	۲۰۲۰	۳۰		۴.۲۷	***	۲.۰۵۶	۰.۷۷۳	۳.۸۲۳	۱.۰۰۰	۳.۲۵۰
بهار	۱۹۹۱	۲۰۲۰	۳۰		۳.۹۳	***	۱.۱۸۲	۰.۲۹۵	۱.۷۲۴	۰.۵۰۰	۱.۵۸۶
تابستان	۱۹۹۱	۲۰۲۰	۳۰		۳.۶۲	***	۰.۴۶۷	۰.۱۲۴	۰.۸۶۴	۰.۲۵۰	۰.۷۶۹
پاییز	۱۹۹۱	۲۰۲۰	۳۰		۴.۰۴	***	۰.۱۳۰	۰.۰۰۰	۰.۲۷۸	۰.۰۴۵	۰.۲۴۲
زمستان	۱۹۹۱	۲۰۲۰	۳۰		۳.۷۲	***	۰.۲۲۲	۰.۰۰۰	۰.۵۰۰	۰.۰۴۴	۰.۴۴۴

جدول۷- روند فراوانی روزهای گرد و غباری ایستگاه پلدختر به روش من- کندال و شیب سن

Time series	First year	Last Year	n	Test S	Test Z	Significic.	Q	Qmin99	Qmax99	Qmin95	Qmax95
سالانه	۱۹۹۹	۲۰۲۰	۲۲		۱.۸۱	+	۱.۶۲۵	-۰.۸۴۹	۴.۴۳۴	-۰.۲۳۰	۳.۶۷۴
بهار	۱۹۹۹	۲۰۲۰	۲۲		۱.۶۴		۰.۸۴۶	-۰.۷۱۵	۲.۰۰۰	-۰.۱۷۱	۱.۵۵۳

تابستان	۱۹۹۹	۲۰۲۰	۲۲		۰.۸۲		۰.۲۵۰	۰.۷۵۰-	۱.۰۰۰	۰.۵۰۰-	۰.۷۸۶
پاییز	۱۹۹۹	۲۰۲۰	۲۲		۲.۰۸	*	۰.۱۰۰	۰.۰۰۰	۰.۵۳۰	۰.۰۰۰	۰.۴۳۲
زمستان	۱۹۹۹	۲۰۲۰	۲۲		۲.۶۴	**	۰.۴۷۱	۰.۰۰۰	۱.۰۰۰	۰.۱۰۰	۱.۰۰۰

جدول۸- روند فراوانی روزهای گرد و غباری ایستگاه کوهدشت به روش من- کندال و شیب سن

Time series	First year	Last Year	n	Test S	Test Z	Signific.	Q	Qmin99	Qmax99	Qmin95	Qmax95
سالانه	۱۹۹۷	۲۰۲۰	۲۴		۲.۰۸	*	۱.۳۶۷	۰.۵۰۰-	۳.۰۰۰	۰.۲۵۴	۲.۵۸۶
بهار	۱۹۹۷	۲۰۲۰	۲۴		۲.۶۹	**	۰.۷۵۰	۰.۰۰۰	۱.۶۶۷	۰.۲۲۲	۱.۴۱۴
تابستان	۱۹۹۷	۲۰۲۰	۲۴		۱.۱۲		۰.۱۳۸	۰.۳۶۶-	۰.۶۷۸	۰.۱۶۴-	۰.۵۱۳
پاییز	۱۹۹۷	۲۰۲۰	۲۴		۱.۳۴		۰.۰۰۰	۰.۰۰۰	۰.۱۱۱	۰.۰۰۰	۰.۰۷۶
زمستان	۱۹۹۷	۲۰۲۰	۲۴		۳.۱۳	**	۰.۲۹۳	۰.۰۵۹	۰.۸۰۰	۰.۱۵۴	۰.۶۶۷

جدول۹- روند فراوانی روزهای گرد و غباری ایستگاه سیلاخور به روش من- کندال و شیب سن

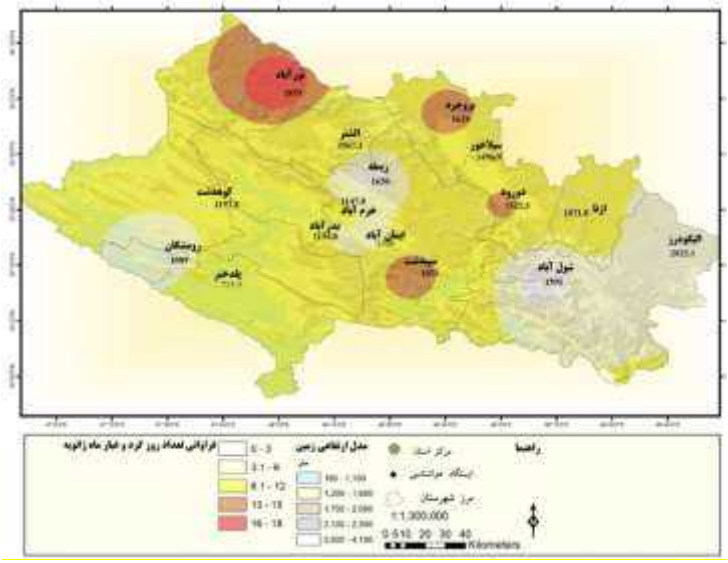
Time series	First year	Last Year	n	Test S	Test Z	Signific.	Q	Qmin99	Qmax99	Qmin95	Qmax95
سالانه	۲۰۰۲	۲۰۲۰	۱۹		۱.۶۸	+	۲.۹۲۹	۱.۰۱۷-	۶.۴۲۹	۰.۴۸۱-	۵.۵۹۲
بهار	۲۰۰۲	۲۰۲۰	۱۹		۱.۸۹	+	۱.۶۰۰	۰.۶۴۱-	۳.۲۶۴	۰.۰۲۸-	۲.۷۵۰
تابستان	۲۰۰۲	۲۰۲۰	۱۹		۰.۵۶		۰.۲۵۰	۱.۰۱۵-	۱.۴۶۶	۰.۵۰۰-	۱.۳۱۲
پاییز	۲۰۰۲	۲۰۲۰	۱۹		۱.۷۶	+	۰.۱۱۱	۰.۰۰۰	۰.۵۰۰	۰.۰۰۰	۰.۳۳۳
زمستان	۲۰۰۲	۲۰۲۰	۱۹		۱.۳۱		۰.۲۵۰	۰.۴۵۴-	۱.۳۳۳	۰.۱۲۵-	۱.۰۲۰

جدول۱۰- روند فراوانی روزهای گرد و غباری ایستگاه نورآباد به روش من- کندال و شیب سن

Time series	First year	Last Year	n	Test S	Test Z	Signific.	Q	Qmin99	Qmax99	Qmin95	Qmax95
سالانه	۲۰۰۰	۲۰۲۰	۲۱		۰.۴۵		۰.۲۹۲	- ۲.۹۴۵	۲.۱۸۵	- ۱.۵۰۰	۱.۷۱۵
بهار	۲۰۰۰	۲۰۲۰	۲۱		۰.۶۰		۰.۲۵۰	- ۱.۰۵۴	۱.۷۱۶	- ۰.۷۰۱	۱.۱۰۵

تابستان	۲۰۰۰	۲۰۲۰	۲۱		- ۱.۴۶		- ۰.۴۰۰		- ۱.۰۰۰	۰.۲۵۹	- ۰.۸۲۲	۰.۱۰۳
پاییز	۲۰۰۰	۲۰۲۰	۲۱		۰.۰۰		۰.۰۰۰		- ۰.۰۶۳	۰.۱۳۶	۰.۰۰۰	۰.۰۰۰
زمستان	۲۰۰۰	۲۰۲۰	۲۱		۱.۵۹		۰.۲۰۰		- ۰.۱۸۶	۰.۵۵۹	۰.۰۰۰	۰.۵۰۰

۲-تحلیل وضعیت پهنه بندی رخداد گرد و غبار به تفکیک هر یک از ماه های سال در سطح استان لرستان:

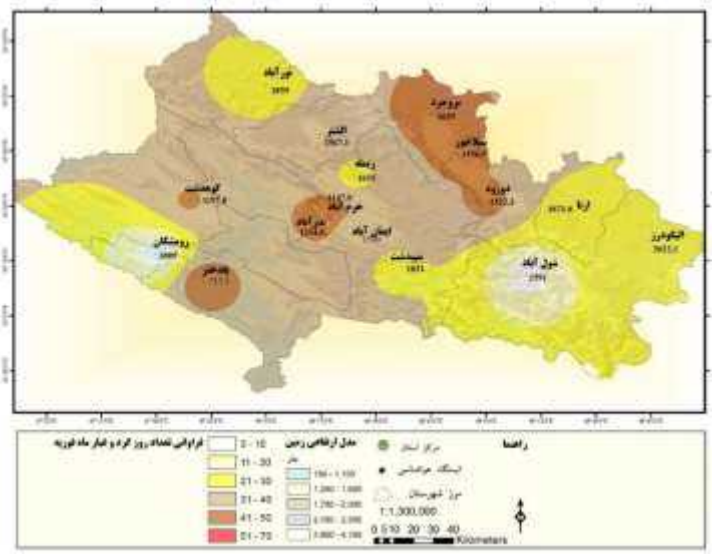


شکل۱-الگوی پهنه بندی گردوغبار ماه ژانویه استان لرستان در طول دوره ی ۲۰۲۰- ۱۹۹۱

بررسی توزیع فراوانی گردوغبار در ماه ژانویه (شکل ۱) نشان می‌دهد که نقشه مورد نظر الگوی پیچیده‌ای از این پدیده اقلیمی را در منطقه ترسیم می‌کند. نقشه با رنگ‌بندی از سفید تا قرمز، شدت روزهای گردوغباری را نمایش می‌دهد و بیشترین فراوانی (۱۶-۱۸ روز) در منطقه نورآباد مشاهده می‌شود، درحالی‌که مناطقی مانند بروجرد و سپیددشت فراوانی متوسط (۱۳-۱۵ روز) را نشان می‌دهند. بررسی ارتباط با توپوگرافی نشان می‌دهد که مناطق با ارتفاع کمتر (۱۸۰-۱۱۰۰ متر) عموماً فراوانی بیشتری از روزهای گردوغباری دارند، در حالی که مناطق مرتفع‌تر (۲۶۰۰-۴۱۰۰ متر) مانند اشترانکوه، فراوانی کمتری از گردوغبار را تجربه می‌کنند.

از نظر تحلیل منطقه‌ای، شهرستان‌های غربی و شمال غربی مانند کوهدشت و نورآباد بیشترین فراوانی را دارند، درحالی‌که مناطق شرقی و جنوب شرقی مانند ازنا و الیگودرز فراوانی کمتری را نشان می‌دهند. عوامل موثر بر این الگو شامل جهت باد غالب (احتمالاً از غرب به شرق)، پوشش گیاهی محدود در ارتفاعات پایین‌تر، و نزدیکی به مناطق بیابانی یا خشک در غرب ایران می‌باشند.

اهمیت این مطالعه در استفاده از داده‌های بلندمدت ۳۰ ساله (۱۹۹۱-۲۰۲۰) است که اعتبار آماری بالایی به نتایج می‌بخشد. چنین تحلیلی می‌تواند برای مطالعات روند و تغییرات اقلیمی در زمینه گردوغبار بسیار مفید باشد و درک عمیق‌تری از الگوهای اقلیمی منطقه ارائه دهد.



شکل۲- الگوی پهنه بندی گردوغبار ماه فوریه استان لرستان در طول دوره ی ۲۰۲۰-۱۹۹۱

این نقشه از دیدگاه تخصصی اقلیم‌شناسی گردوغبار، اطلاعات ارزشمندی را در مورد الگوهای گردوغبار در استان لرستان برای ماه فوریه ارائه می‌دهد (شکل ۲). ارزیابی تخصصی آن به شرح زیر است:

۱. توزیع فراوانی گردوغبار:

- نقشه فراوانی روزهای گردوغباری را در بازه‌های ۳-۱۰ تا ۵۱-۷۰ روز نشان می‌دهد.
- بیشترین فراوانی (۴۱-۵۰ روز) در منطقه بروجرد و سیلاخور دیده می‌شود.
- مناطق شرقی و غربی استان (مانند ازنا، الیگودرز، نورآباد و بخش‌هایی از کوهدشت) فراوانی متوسط (۲۱-۳۰ روز) را نشان می‌دهند.

۲. ارتباط با توپوگرافی:

- مدل ارتفاعی رقومی (DEM) نشان می‌دهد که توپوگرافی نقش مهمی در توزیع گردوغبار دارد.
- دشت‌های میانی استان (مانند خرم‌آباد و بروجرد) با ارتفاع متوسط، فراوانی بالاتری از گردوغبار را تجربه می‌کنند.
- مناطق کوهستانی با ارتفاع بالاتر (مانند اشترانکوه) فراوانی کمتری از گردوغبار را نشان می‌دهند.

۳. تحلیل منطقه‌ای:

- شمال شرقی استان (بروجرد) بیشترین فراوانی را دارد، که می‌تواند به دلیل موقعیت جغرافیایی و الگوهای باد باشد.

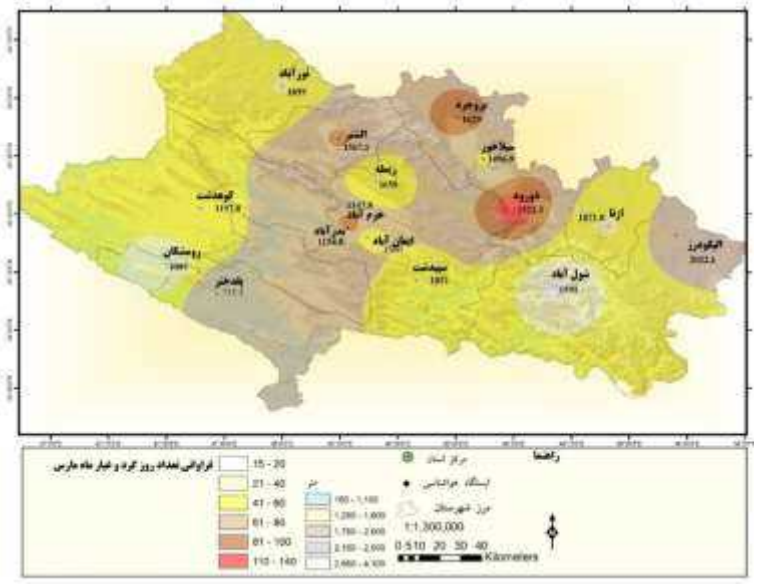
- مناطق جنوبی و جنوب غربی (مانند پلدختر) فراوانی کمتری را نشان می‌دهند.

۴. عوامل اقلیمی موثر:

- جهت باد غالب: احتمالاً از شمال غرب به جنوب شرق، که باعث تجمع گردوغبار در مناطق شمال شرقی می‌شود.
- توپوگرافی: دره‌ها و دشت‌های میانی استان مسیرهای مناسبی برای انتقال گردوغبار هستند.
- منابع محلی و منطقه‌ای: نزدیکی به مناطق بیابانی غرب و جنوب غرب ایران می‌تواند در این الگو موثر باشد.

۵. تفاوت‌های فصلی:

- این نقشه مربوط به ماه فوریه است که بخشی از فصل زمستان محسوب می‌شود.
- فراوانی بالای گردوغبار در این ماه می‌تواند ناشی از سیستم‌های جوی زمستانی و کاهش رطوبت خاک باشد.



شکل ۳- الگوی پهنه بندی گردوغبار ماه مارس استان لرستان در طول دوره ی ۲۰۲۰ - ۱۹۹۱

این نقشه توزیع فراوانی روزهای گردوغباری را در استان لرستان برای ماه مارس نشان می‌دهد (شکل۳). از دیدگاه تخصصی اقلیم‌شناسی گردوغبار، می‌توان نکات زیر را برجسته کرد:

۱. توزیع فراوانی گردوغبار:

- بیشترین فراوانی (۱۱۰-۱۴۰ روز) در منطقه دورود مشاهده می‌شود.
- مناطق شمال شرقی (بروجرد) و مرکزی (الشتر) فراوانی بالا (۸۱-۱۰۰ روز) را نشان می‌دهند.
- مناطق غربی و جنوبی (مانند کوهدشت و پلدختر) فراوانی متوسط (۴۱-۶۰ روز) دارند.
- کمترین فراوانی (۱۵-۲۰ روز) در مناطق محدودی دیده می‌شود.

۲. ارتباط با توپوگرافی:

- دره‌ها و دشت‌های میانی استان (مانند دورود و خرم‌آباد) فراوانی بالاتری از گردوغبار را نشان می‌دهند.
- مناطق کوهستانی با ارتفاع بالاتر (مانند اشترانکوه) فراوانی کمتری دارند.

۳. الگوهای اقلیمی:

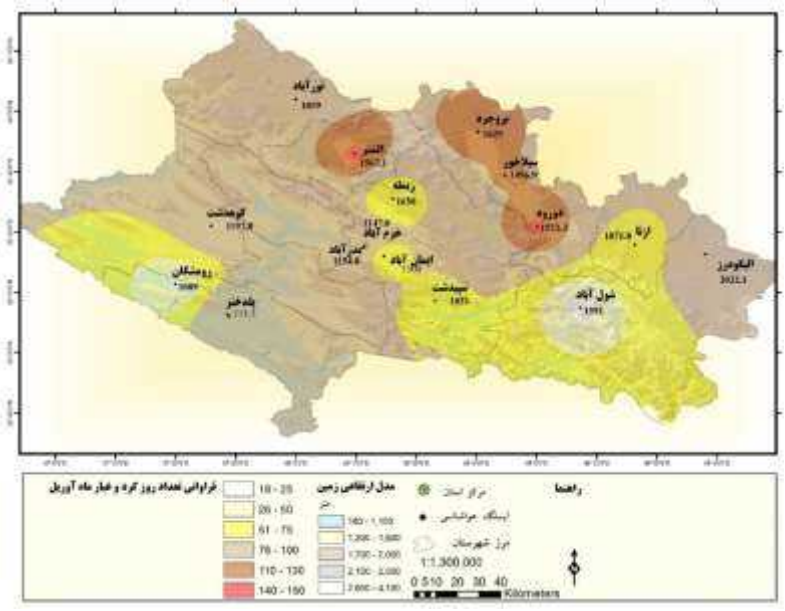
- افزایش قابل توجه فراوانی گردوغبار در ماه مارس نسبت به ماه‌های قبل (ژانویه و فوریه) مشهود است.
- این افزایش می‌تواند ناشی از شروع فصل خشک و افزایش فعالیت‌های جوی بهاره باشد.

۴. عوامل موثر بر توزیع گردوغبار:

- جهت باد غالب: احتمالاً از غرب به شرق، که باعث تجمع گردوغبار در مناطق شرقی و مرکزی می‌شود.
- توپوگرافی: دره‌ها و دشت‌ها مسیرهای مناسبی برای انتقال و تجمع گردوغبار هستند.
- منابع محلی و منطقه‌ای: نزدیکی به مناطق بیابانی غرب و جنوب غرب ایران در این الگو موثر است.

۵. تاثیرات زیست محیطی و اقتصادی:

- مناطق با فراوانی بالا (مانند دورود) احتمالاً با چالش‌های جدی زیست محیطی و بهداشتی مواجه هستند.
- فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی در این مناطق می‌تواند تحت تاثیر قرار گیرد.



شکل۴-الگوی پهنه بندی گردوغبار ماه آوریل استان لرستان در طول دوره ی ۲۰۲۰ - ۱۹۹۱

نقشه توزیع فراوانی روزهای گردوغباری را در استان لرستان برای ماه آوریل نشان می‌دهد (شکل۴). از دیدگاه تخصصی اقلیم‌شناسی گردوغبار، می‌توان به نکات زیر اشاره کرد:

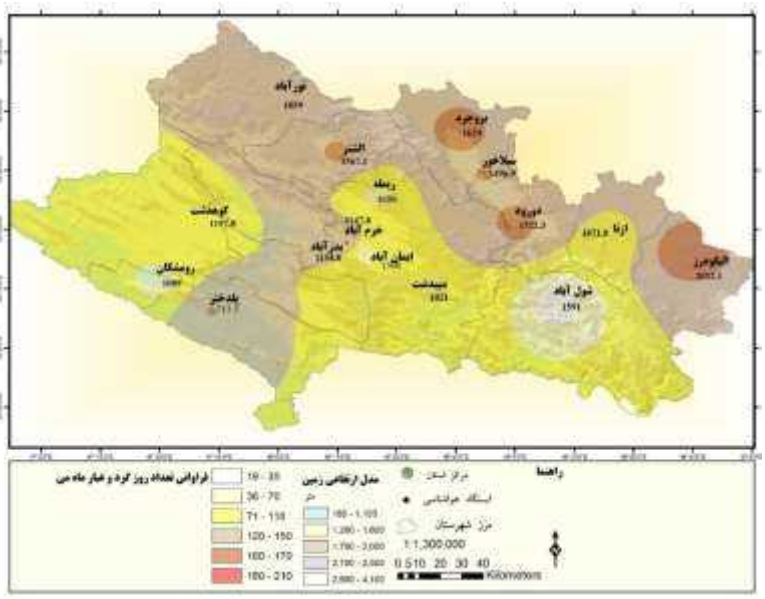
۱. **توزیع فراوانی گردوغبار:**
- بیشترین فراوانی (۱۴۰-۱۵۰ روز) در منطقه الشتر مشاهده می‌شود.
- مناطق شمال شرقی (بروجرد و دورود) فراوانی بالا (۱۱۰-۱۳۰ روز) را نشان می‌دهند.
- مناطق جنوبی و جنوب شرقی (مانند پلدختر، سپیددشت و ازنا) فراوانی متوسط (۵۱-۷۵ روز) دارند.
- کمترین فراوانی (۱۸-۲۵ روز) در مناطق غربی (مانند کوهدشت، شول آباد و رومشکان) دیده می‌شود.

۲. **ارتباط با توپوگرافی:**
- مناطق با ارتفاع متوسط (مانند الشتر و بروجرد) فراوانی بالاتری از گردوغبار را نشان می‌دهند.
- دره‌ها و دشت‌های میانی استان (مانند خرم‌آباد) فراوانی متوسط تا بالا دارند.
- مناطق کوهستانی با ارتفاع بالاتر (مانند اشترانکوه) فراوانی کمتری دارند.

۳. **الگوهای اقلیمی:**
- افزایش فراوانی گردوغبار در ماه آوریل نسبت به ماه‌های قبل مشهود است، که می‌تواند نشان‌دهنده شروع فصل خشک باشد.
- توزیع نامتقارن گردوغبار در استان، احتمالاً به دلیل تأثیر توپوگرافی و الگوهای باد محلی است.

۴. **عوامل موثر بر توزیع گردوغبار:**
- جهت باد غالب: احتمالاً از جنوب غرب به شمال شرق، که باعث تجمع گردوغبار در مناطق شمالی و شرقی می‌شود.
- توپوگرافی: دره‌ها و دشت‌های میانی مسیرهای مناسبی برای انتقال و تجمع گردوغبار هستند.
- منابع محلی و منطقه‌ای: نزدیکی به مناطق بیابانی غرب و جنوب غرب ایران در این الگو موثر است.

۵. **تاثیرات زیست محیطی و اقتصادی:**
- مناطق با فراوانی بالا (مانند الشتر و بروجرد) احتمالاً با چالش‌های جدی زیست محیطی و بهداشتی مواجه هستند.
- فعالیت‌های کشاورزی در این مناطق می‌تواند تحت تاثیر منفی قرار گیرد، به‌ویژه در فصل رشد گیاهان.



شکل۵ -الگوی پهنه بندی گردوغبار ماه می استان لرستان در طول دوره ی ۲۰۲۰ - ۱۹۹۱

این نقشه توزیع فراوانی روزهای گردوغباری را در استان لرستان برای ماه می (اردیبهشت) نشان می‌دهد (شکل۵). از دیدگاه تخصصی اقلیم‌شناسی گردوغبار، می‌توان به نکات زیر اشاره کرد:

۱. توزیع فراوانی گردوغبار:

- بیشترین فراوانی ۲۰۴ روز خرم آباد و (۱۶۰-۱۷۰ روز) در منطقه الیگودرز در شرق استان مشاهده می‌شود.
- مناطق شمال شرقی (بروجرد و دورود) و الشتر فراوانی بالا (۱۲۰-۱۵۰ روز) را نشان می‌دهند.
- بخش وسیعی از استان شامل مناطق مرکزی و جنوبی فراوانی متوسط (۷۱-۱۱۰ روز) دارند.
- کمترین فراوانی (۱۹-۳۵ روز) در مناطق محدودی مانند پلدختر دیده می‌شود.

۲. ارتباط با توپوگرافی:

- مناطق با ارتفاع متوسط تا بالا (مانند الیگودرز و الشتر) فراوانی بالاتری از گردوغبار را نشان می‌دهند.
- دره‌ها و دشت‌های میانی استان فراوانی متوسط دارند.
- برخی مناطق کم ارتفاع (مانند پلدختر) فراوانی کمتری را نشان می‌دهند.

۳. الگوهای اقلیمی:

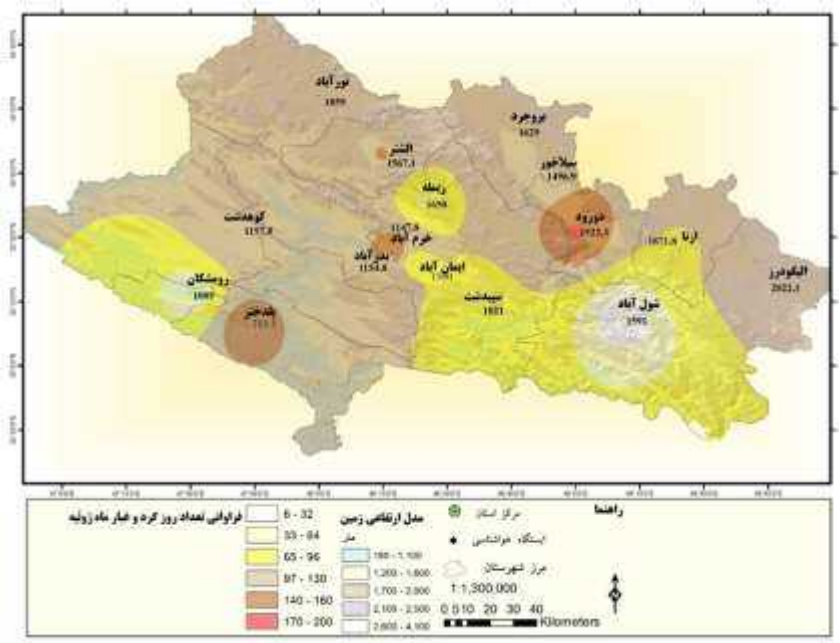
- افزایش قابل توجه فراوانی گردوغبار در ماه می نسبت به ماه‌های قبل، که نشان‌دهنده تشدید شرایط خشک و گرم در این ماه است.
- توزیع نامتقارن گردوغبار در استان، احتمالاً به دلیل تأثیر توپوگرافی پیچیده و الگوهای باد محلی است.

۴. عوامل موثر بر توزیع گردوغبار:

- جهت باد غالب: احتمالاً از غرب به شرق، که باعث تجمع گردوغبار در مناطق شرقی می‌شود.
- توپوگرافی: ارتفاعات و دره‌ها نقش مهمی در هدایت و تجمع گردوغبار دارند.
- منابع محلی و منطقه‌ای: نزدیکی به مناطق بیابانی مرکزی ایران می‌تواند در افزایش گردوغبار در شرق استان موثر باشد.

۵. تاثیرات زیست محیطی و اقتصادی:

- مناطق با فراوانی بالا (مانند الیگودرز و بروجرد) احتمالاً با چالش‌های جدی زیست محیطی و بهداشتی مواجه هستند.
- فعالیت‌های کشاورزی و دامداری در این مناطق می‌تواند تحت تاثیر منفی قرار گیرد.



شکل۶-الگوی پهنه بندی گردوغبار ماه ژوییه استان لرستان در طول دوره ی ۲۰۲۰ – ۱۹۹۱

۱. **توزیع مکانی گردوغبار در ماه ژوییه: (شکل ۶)**

- بیشترین فراوانی گردوغبار (۱۴۰-۱۶۰ روز) در منطقه دورود دیده می‌شود.
- مناطق شرقی و جنوب شرقی استان (مانند ازنا و الیگودرز) دارای فراوانی متوسط تا بالا هستند (۶۵-۹۶ روز).
- مناطق غربی و شمال غربی (مانند کوهدشت) فراوانی کمتری دارند.

۲. **ارتباط با توپوگرافی:**

- طبق مدل ارتفاعی نقشه، مناطق با ارتفاع ۱۷۰۰-۲۰۰۰ متر عموماً فراوانی متوسط گردوغبار را نشان می‌دهند.
- مناطق پست‌تر در غرب استان فراوانی کمتری از گردوغبار دارند.
- الیگودرز با ارتفاع حدود ۲۰۲۲ متر، فراوانی متوسطی از گردوغبار را نشان می‌دهد.

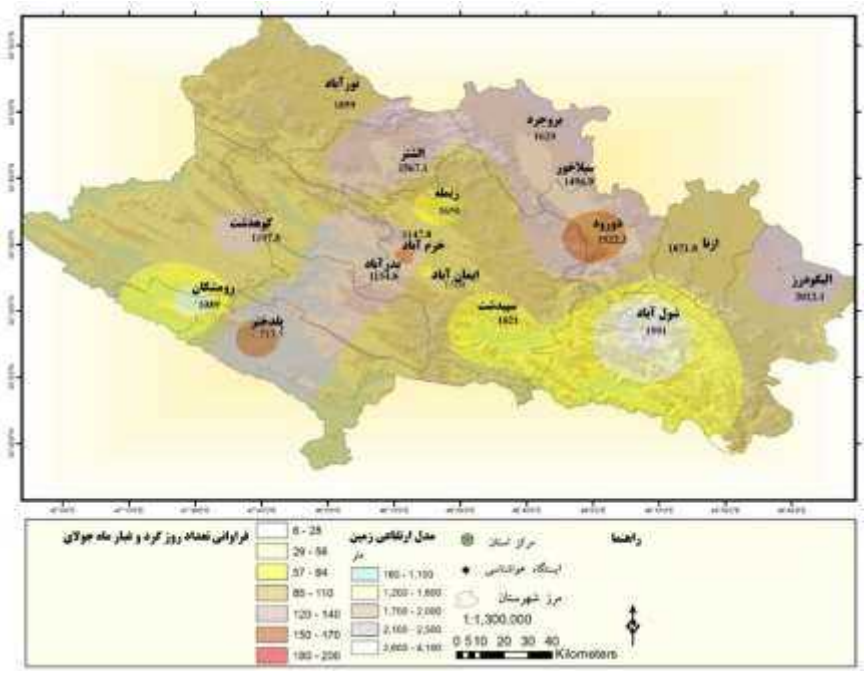
۳. **الگوی کلی:**

- یک گرادیان شرقی-غربی در توزیع گردوغبار مشاهده می‌شود.
- نقاط مرتفع‌تر عموماً فراوانی بیشتری از گردوغبار را نشان می‌دهند.
- مناطق مرکزی استان (خرم‌آباد و اطراف) فراوانی متوسطی دارند.

۴. **نکات قابل توجه:**

- پدل‌دختر در غرب استان با وجود ارتفاع کمتر، فراوانی بالایی از گردوغبار را نشان می‌دهد.

- سلسله و دلفان در شمال استان فراوانی متوسطی دارند.
- ایستگاه‌های هواشناسی به خوبی در سطح استان توزیع شده‌اند که صحت داده‌ها را تقویت می‌کند.



شکل۷-الگوی پهنه بندی گردوغبار ماه جولای استان لرستان در طول دوره ی ۲۰۲۰ – ۱۹۹۱

با بررسی نقشه گردوغبار استان لرستان در ماه جولای، الگوی پیچیده‌ای از توزیع گردوغبار مشاهده می‌شود (شکل۷).

در این ماه، شهرستان خرم آباد و بخش‌های شمالی استان شامل الشتر و منطقه سیلاخور-بروجرد بیشترین فراوانی روزهای گردوغباری را با ۱۲۰ تا ۱۴۰ روز تجربه می‌کنند. این وضعیت به دلیل قرارگیری این مناطق در دره‌های محصور بین ارتفاعات است که باعث به دام افتادن گردوغبار می‌شود.

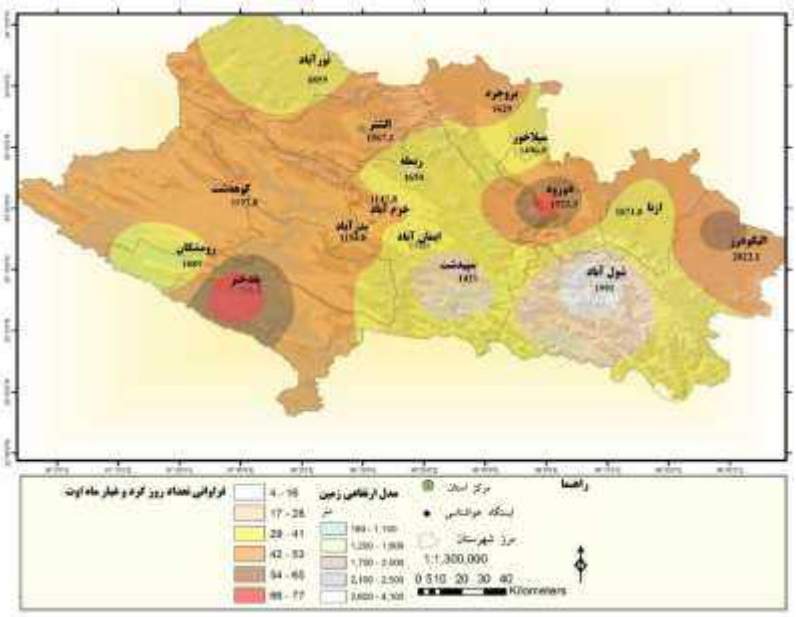
در بخش‌های غربی استان، شامل نورآباد و کوهدشت، فراوانی روزهای گردوغباری به ۸۵ تا ۱۱۰ روز می‌رسد. این کاهش نسبی به دلیل تأثیر ارتفاعات زاگرس و موقعیت خاص توپوگرافی این مناطق است. ارتفاعات زاگرس تا حدودی مانع نفوذ گردوغبار از سمت غرب می‌شوند، اما همچنان این مناطق تحت تأثیر جریانات گردوغبار قرار دارند.

مناطق مرکزی و جنوبی استان مانند سپیدشت و مناطق اطراف آن، فراوانی کمتری از روزهای گردوغباری را نشان می‌دهند (۵۷ تا ۸۴ روز). این کاهش می‌تواند ناشی از پوشش گیاهی نسبتاً بهتر و موقعیت محافظت شده‌تر این مناطق باشد. همچنین، جریانات هوا در این مناطق الگوی متفاوتی دارند که باعث کاهش تجمع گردوغبار می‌شود.

در ماه جولای، به دلیل استقرار سیستم پرفشار جنب حاره‌ای، دمای هوا به شدت افزایش می‌یابد و رطوبت نسبی کاهش پیدا می‌کند. این شرایط باعث خشک شدن سطح خاک و افزایش پتانسیل تولید گردوغبار محلی می‌شود. علاوه بر این، بادهای غربی و جنوب غربی که از سمت عراق می‌وزند، گردوغبار را به داخل استان منتقل می‌کنند.

توپوگرافی خاص استان لرستان با دره‌های عمیق در شمال و ارتفاعات در غرب، نقش مهمی در توزیع گردوغبار دارد. دره‌های شمالی مانند دره الشتر و سیلاخور به عنوان تله‌های رسوبی عمل می‌کنند و گردوغبار را در خود نگه می‌دارند. این وضعیت در ترکیب با شرایط اقلیمی تابستان، باعث ایجاد شرایط پایدار گردوغبار در این مناطق می‌شود.

این الگوی گردوغبار تأثیرات قابل‌توجهی بر زندگی ساکنان استان دارد. کاهش دید افقی، مشکلات تنفسی، و تأثیر بر فعالیت‌های کشاورزی از جمله پیامدهای این پدیده هستند. همچنین، فرسایش خاک در اثر وزش مداوم باد و انتقال ذرات، می‌تواند در درازمدت به تغییر ساختار خاک و پوشش گیاهی منطقه منجر شود.



شکل۸-الگوی پهنه بندی گردوغبار ماه اوت استان لرستان در طول دوره ی ۲۰۲۰ – ۱۹۹۱

در ماه آگوست (مرداد-شهریور)، الگوی گردوغبار در استان لرستان به دلیل شرایط خاص اقلیمی این ماه، تغییرات قابل‌توجهی را نشان می‌دهد (شکل۸).

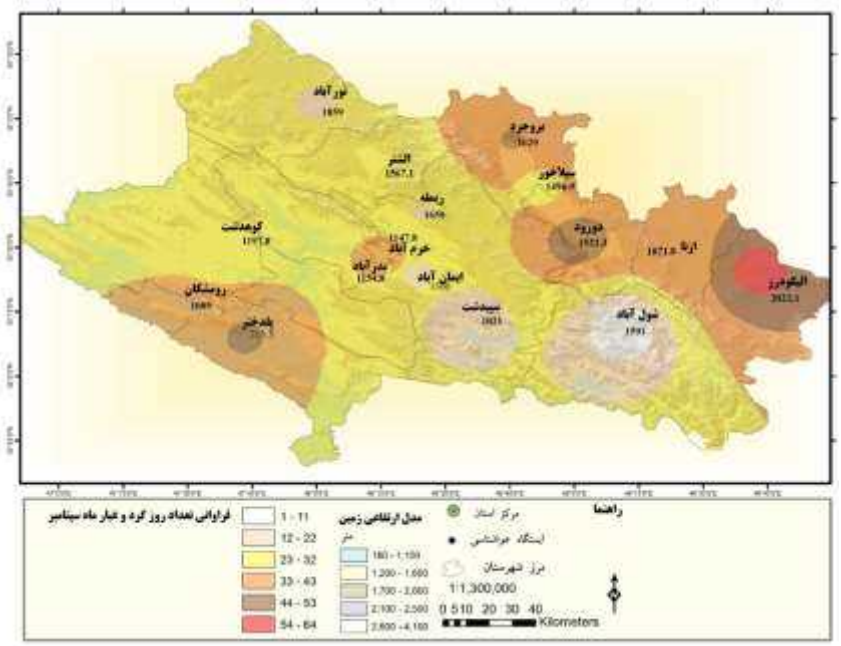
دو منطقه پلدختر در غرب و دورود در شرق استان با ۶۶ تا ۷۷ روز، بیشترین فراوانی روزهای گردوغباری را دارند. این فراوانی بالا به دلیل موقعیت خاص این دو شهر در دره‌های باز و کم ارتفاع است که مستقیماً تحت تأثیر جریانات هوای گرم و خشک تابستانه قرار می‌گیرند.

در این ماه، مناطق مرکزی شامل کوهدشت، خرم‌آباد و الشتر با فراوانی ۴۲ تا ۵۳ روز گردوغباری مواجه هستند. این کاهش نسبی نسبت به ماه جولای می‌تواند ناشی از تغییر الگوی بادهای منطقه‌ای و کاهش شدت سیستم پرفشار جنب حاره‌ای باشد.

مناطق جنوبی و شرقی استان مانند پلدختر، شول‌آباد و ازنا با ۲۹ تا ۴۱ روز گردوغباری، کمترین فراوانی را نشان می‌دهند. این کاهش را می‌توان به موقعیت جغرافیایی این مناطق و تأثیر ارتفاعات محافظت کننده نسبت داد که مانع از نفوذ مستقیم جریانات گردوغبار می‌شوند.

در مجموع، کاهش کلی فراوانی روزهای گردوغباری در ماه آگوست نسبت به جولای را می‌توان به تضعیف تدریجی سیستم پرفشار جنب حاره‌ای، کاهش نسبی دما و تغییر در الگوی بادهای منطقه‌ای نسبت داد. همچنین، الگوی توزیع فضایی

گردوغبار در این ماه بیشتر تحت تأثیر عوامل محلی مانند توپوگرافی و جریانات محلی هوا قرار دارد تا سیستم‌های جوی بزرگ مقیاس.



شکل۹- الگوی پهنه بندی گردوغبار ماه سپتامبر استان لرستان در طول دوره ی ۲۰۲۰ – ۱۹۹۱

تحلیل اقلیمی پدیده گردوغبار در استان لرستان در ماه سپتامبر را به شرح زیر ارائه می‌دهیم:(شکل۹)

۱. **توزیع مکانی گردوغبار:**

- بیشترین تعداد روزهای گردوغباری (۵۴-۶۴ روز) در منطقه الیگودرز در شرق استان مشاهده می‌شود
- مناطق مرکزی استان (مانند خرم‌آباد و الشتر) دارای روزهای گردوغباری کمتری (۲۳-۳۲ روز) هستند
- نواحی غربی و شمال غربی (مانند رومشکان و پلدختر) دارای روزهای گردوغباری متوسط (۳۳-۴۳ روز) هستند

۲. **ارتباط با توپوگرافی:**

- مناطق با ارتفاع بالاتر (۲۱۰۰-۲۵۰۰ متر) مانند اشترانکوه در الیگودرز، بیشترین تعداد روزهای گردوغباری را دارند
- دره‌های میانی استان با ارتفاع متوسط (۱۷۰۰-۲۰۰۰ متر) روزهای گردوغباری کمتری را تجربه می‌کنند
- نواحی کم ارتفاع غربی و جنوب غربی استان تحت تأثیر گردوغبار ورودی از عراق قرار دارند

۳. **الگوی کلی:**

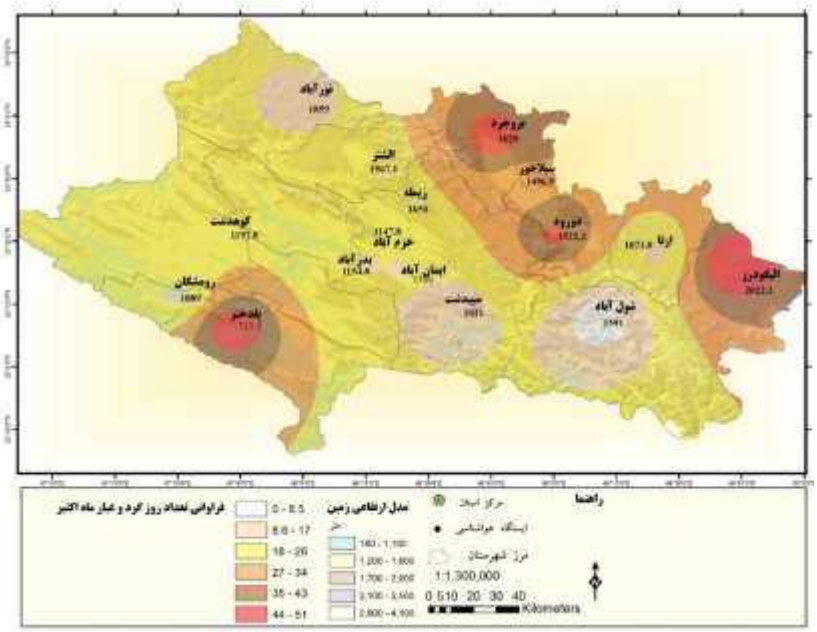
- شیب افزایشی تعداد روزهای گردوغباری از غرب به شرق استان

- تأثیر ارتفاع و توپوگرافی در توزیع گردوغبار
- نقش مسیرهای ورودی گردوغبار از سمت غرب و جنوب غرب

۴. مناطق حساس:

- الیگودرز با بیش از ۵۴ روز گردوغباری، حساس‌ترین منطقه
- دورود و ازنا در شرق استان با ۴۴-۵۳ روز گردوغباری
- بروجرد و سلسله با وضعیت متوسط رو به بالا

این الگوی توزیع نشان می‌دهد که عوامل محلی (توپوگرافی) و منطقه‌ای (جریانات هوایی غربی) هر دو در شکل‌گیری پدیده گردوغبار در استان لرستان نقش دارند.



شکل۱۰-الگوی پهنه بندی گردوغبار ماه اکتبر استان لرستان در طول دوره ی ۲۰۲۰ – ۱۹۹۱

با توجه به نقشه گردوغبار استان لرستان در ماه اکتبر، تحلیل زیر را می‌توان ارائه داد: (شکل۱۰)

۱. توزیع مکانی گردوغبار:

- بیشترین فراوانی (۴۴-۵۱ روز): در سه منطقه الیگودرز، بروجرد و پلدختر
- فراوانی متوسط (۲۷-۳۴ روز): در نواحی شمال شرقی و شرقی مانند دورود و ازنا
- کمترین فراوانی (۰-۸.۵ روز): در مناطق مرکزی استان مانند سلسله و نورآباد

۲. الگوی توزیع بر اساس توپوگرافی:

- مناطق مرتفع شرقی (الیگودرز) با ارتفاع بالای ۲۰۰۰ متر: فراوانی بالا

- دره‌های میانی با ارتفاع متوسط: فراوانی کمتر
- مناطق کم ارتفاع غربی (پلدختر): فراوانی بالا

۳. تحلیل منطقه‌ای:

- شرق استان: تحت تأثیر جریانات شرقی و گردوغبار مناطق مرکزی ایران
- غرب استان: متأثر از گردوغبار عراق و سوریه
- مرکز استان: محافظت شده توسط ارتفاعات و دارای کمترین فراوانی

۴. مقایسه با ماه‌های قبل:

- کاهش کلی فراوانی روزهای گردوغباری نسبت به ماه‌های آگوست و سپتامبر
- حفظ الگوی کلی توزیع گردوغبار در مناطق شرقی و غربی
- بهبود نسبی شرایط در مناطق مرکزی

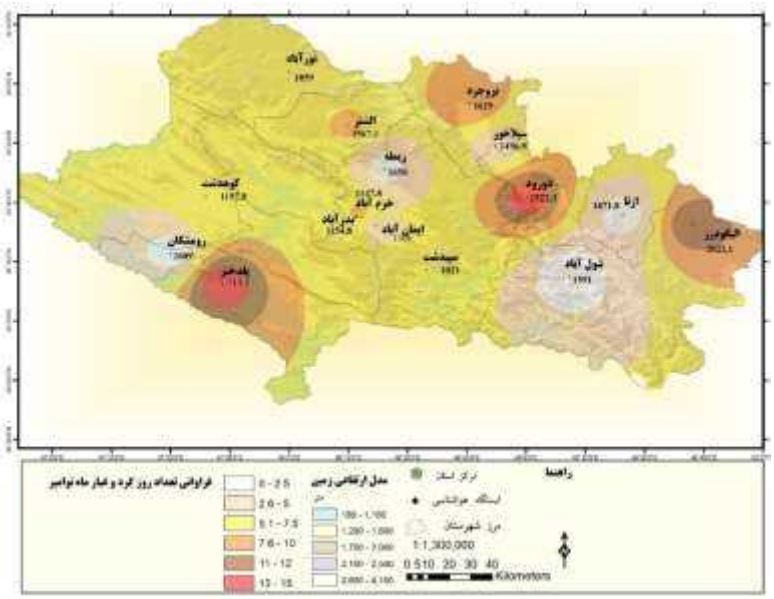
۵. دلایل کاهش گردوغبار در اکتبر:

- شروع فصل بارندگی
- کاهش دما و تبخیر
- افزایش رطوبت نسبی
- کاهش سرعت بادهای غالب

۶. نقاط بحرانی:

- الیگودرز: همچنان دارای بیشترین روزهای گردوغباری
- بروجرد: یکی از کانون‌های اصلی گردوغبار در شمال استان
- پلدختر: تداوم شرایط گردوغباری در غرب استان

این الگو نشان می‌دهد که علیرغم کاهش کلی گردوغبار در ماه اکتبر، برخی مناطق همچنان با این پدیده درگیر هستند که نیازمند توجه و مدیریت ویژه است.



ش‌کل۱۱-الگوی پهنه بندی گردوغبار ماه نوامبر استان لرستان در طول دوره ی ۲۰۲۰ – ۱۹۹۱

با توجه به نقشه، تحلیل گردوغبار استان لرستان در ماه نوامبر به شرح زیر است: (شکل ۱۱)

۱. **توزیع فراوانی روزهای گردوغباری:**

- بیشترین فراوانی (۱۳-۱۵ روز): در سه منطقه پلدختر، دورود و الیگودرز
- فراوانی متوسط (۷.۶-۱۰ روز): در نواحی بروجرد و اطراف پلدختر
- کمترین فراوانی (۰-۲.۵ روز): در مناطق مرکزی و رومشکان

۲. **مقایسه با ماه اکتبر:**

- کاهش چشمگیر تعداد روزهای گردوغباری
- حفظ الگوی کلی توزیع در مناطق بحرانی
- بهبود وضعیت در اکثر مناطق استان

۳. **تحلیل منطقه‌ای:**

- مناطق غربی (پلدختر): همچنان متأثر از گردوغبار عراق
- مناطق شرقی (الیگودرز): تداوم شرایط گردوغباری
- مناطق مرکزی: بهبود قابل توجه و کاهش گردوغبار

۴. **عوامل کاهش گردوغبار در نوامبر:**

- افزایش بارندگی‌های پاییزی
- کاهش دما و تبخیر

- افزایش رطوبت خاک
- کاهش سرعت بادهای منطقه‌ای

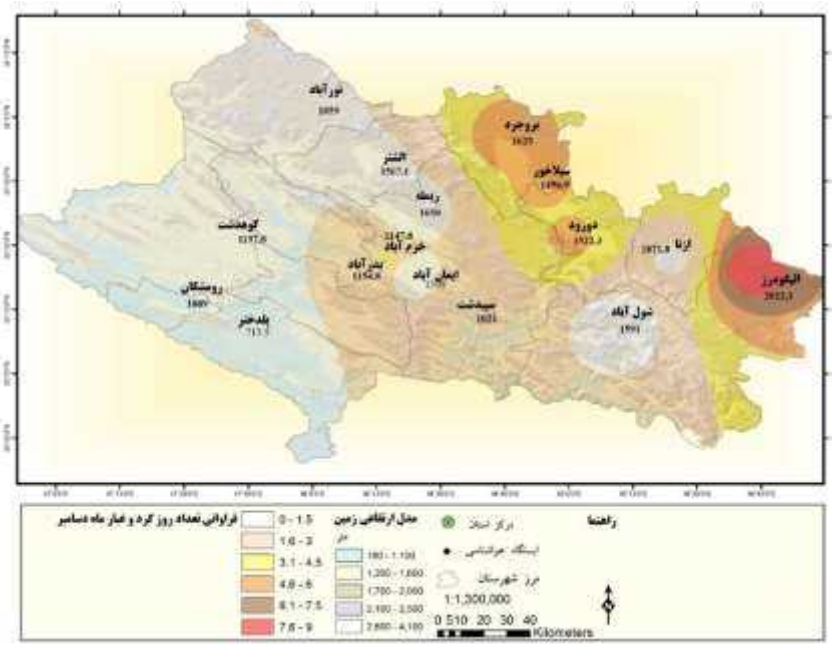
۵. وضعیت ارتفاعی و گردوغبار:

- مناطق مرتفع: کاهش نسبی گردوغبار
- دره‌ها و مناطق پست: تجمع نسبی گردوغبار
- ارتباط مستقیم توپوگرافی با توزیع گردوغبار

۶. نقاط بحرانی باقیمانده:

- پلدختر: به دلیل موقعیت مرزی و ارتفاع کم
- دورود: به دلیل شرایط توپوگرافی خاص
- الیگودرز: به دلیل موقعیت شرقی و ارتفاع بالا

این الگو نشان می‌دهد که با ورود به اواسط پاییز و افزایش بارندگی‌ها، شرایط گردوغبار در استان بهبود یافته، اما برخی مناطق همچنان تحت تأثیر این پدیده قرار دارند.



شکل۱۲-الگوی پهنه بندی گردوغبار ماه دسامبر استان لرستان در طول دوره ی ۲۰۲۰ – ۱۹۹۱

این نقشه نشان دهنده توزیع گردوغبار در استان لرستان در ماه دسامبر است (شکل۱۲). بر اساس تحلیل نقشه موارد زیر قابل مشاهده است:

۱. **توزیع جغرافیایی:**

- بیشترین میزان گردوغبار (۷.۶-۹) در منطقه الیگودرز در شرق استان مشاهده می‌شود (رنگ قرمز)
- مناطق مرکزی استان مانند خرم‌آباد و بروجرد میزان متوسطی از گردوغبار را دارند
- کمترین میزان گردوغبار (۱.۵-۳) در مناطق غربی استان مشاهده می‌شود

۲. **ارتباط با توپوگرافی:**

- مناطق با ارتفاع بیشتر (۲۱۰۰-۴۱۰۰ متر) عموماً گردوغبار بیشتری دارند
- مناطق پست‌تر و دره‌ای (۱۸۰-۱۱۰۰ متر) گردوغبار کمتری را تجربه می‌کنند

۳. **نکات قابل توجه:**

- شهرستان الیگودرز با ارتفاع ۲۰۲۲.۱ متر بحرانی‌ترین وضعیت را دارد
- منطقه پلدختر و رومشکان در غرب استان با ارتفاع کمتر، شرایط بهتری از نظر گردوغبار دارند
- روند کلی افزایش گردوغبار از غرب به شرق استان مشهود است

این توزیع می‌تواند متأثر از عوامل مختلفی مانند جهت بادهای غالب، توپوگرافی منطقه، و منابع تولید گردوغبار باشد.

۳- آنالیز نمونه گردوغباری می ۲۰۱۲ از طریق آزمایش IDAX

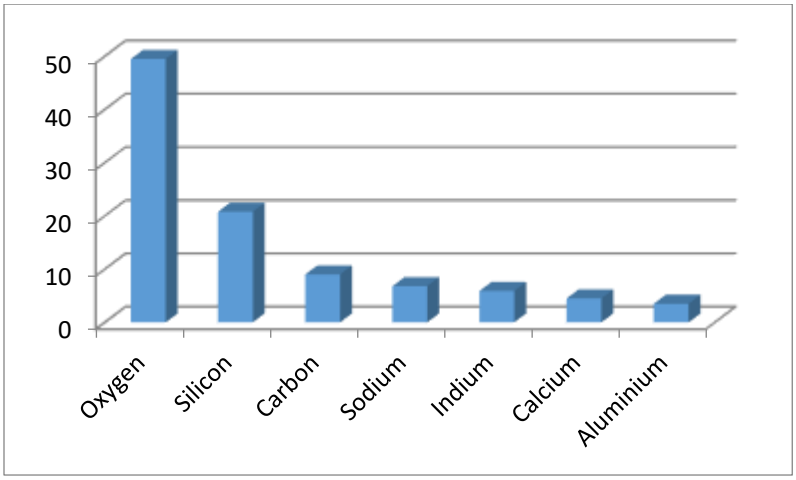
آنالیز EDAX-EDS طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس

آنالیز EDAX یک افزونه در میکروسکوپ های الکترونی SEM است. در صورتی که دستگاه آنالیز SEM مجهز به آشکارساز EDS باشد، علاوه بر تصویر برداری از سطح نمونه، داده های مربوط به عناصر تشکیل دهنده نمونه نیز قابل استخراج می

باشد. با استفاده از آنالیز EDAX می توان نه تنها طیف وسیعی ار عناصر شیمیایی بلکه توزیع و پراکندگی عناصر در نمونه را نیز تشخیص داد.

توانایی‌های روش آنالیز EDS یا EDAX

- بررسی درصد وزنی و درصد جرمی عناصر سنگین‌تر از لیتیم در یک نقطه و یا یک منطقه دلخواه از نمونه
- بررسی میزان آلودگی
- بررسی ترکیب شیمیایی ترکیبات معدنی
- بررسی ترکیب شیمیایی آلیاژها
- بررسی خلوص مواد شیمیایی و معدنی
- بررسی تغییرات درصد عناصر در راستاهای مختلف نمونه
- بررسی جدایش غلظتی در فرایندهای ریخته گری



شکل۱۳- نمودار میزان ترکیبات تشکیل دهنده ی گردو غبار می ۲۰۱۲

جدول۱۱- نمونه آنالیز پارامتر های گردوغبار می ۲۰۱۲

Element Number شماره عنصر	**Element Symbol** نماد عنصر	**Element Name** نام عنصر	**Weight Concentration** تراکم وزن	**Error** خطا
8	O	Oxygen	49.5	0.0
14	Si	Silicon	20.8	0.0
11	Na	Sodium	6.8	0.2
13	Al	Aluminium	3.5	0.2
20	Ca	Calcium	4.5	0.4
6	C	Carbon	9.0	1.3
49	In	Indium	5.9	0.5

آنالیز نمونه گردوغباری می ۲۰۱۲ از طریق آزمایش IDAX نشان داد که ترکیبات شیمیایی موجود در نمونه ی برداشت شده حاصل از ذراتی شامل: اکسیژن به میزان ۴۹/۵ درصد بیشترین مقدار را در پیوند گردوغباری بوده ،سیلیسیوم ۲۰/۸ ، کربن ۹، سدیم ۶/۸، ایندیوم ۵/۹، کلسیم ۴/۵ و آلومینیوم ۳/۵ درصد را تشکیل داده است (جدول۱۱).

یکی از منشأ های گردوغبار در این دوره که به طور تقریبی در تمام روزهای گردوغباری طولانی مدت از این ناحیه نشأت گرفته کل منطقه عراق به دلیل شرایط بدون رطوبتی خاک و همچنین قرار داشتن آن در مسیر بادهای غربی در مدار ۳۰ تا ۳۴ درجه شمالی و رسیدن آن به منطقه بوده است.شرایط سینوتیک در این روز و عمق کم موج رطوبتی مدیترانه باعث برخاسته شدن گردوغبار در این ناحیه شده است.

حضور بالای اکسیژن و سیلیسیم نشان می‌دهد که ذرات گردوغبار عمدتاً از منشأ کانی‌شناختی و زمین‌شناختی بوده‌اند، احتمالاً برآمده از مناطق بیابانی عراق که در آن دوره منبع اصلی رخدادهای گردوغباری طولانی‌مدت در منطقه بودند. وجود سایر عناصری مانند سدیم، کلسیم و آلومینیوم نیز مؤید منشأ طبیعی و زمین‌شناختی این ذرات است.

نوسانات فصلی: میزان) AOD عمق نوری آئروسل) به عنوان شاخص غلظت گردوغبار، در فصول گرم سال (بهار و تابستان) به اوج خود می‌رسد و در فصول سرد (پاییز و زمستان) کاهش می‌یابد. این مرتبط است با افزایش فعالیت‌های کشاورزی و طوفان‌های گردوغباری در فصول گرم.

نوسانات بین‌سالی: برخی سال‌ها مانند ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰ شاهد پیک‌های بالای AOD هستیم که بیانگر بروز رویدادهای گردوغباری شدید در آن سال‌هاست.

روند کلی کاهشی: علی‌رغم نوسانات فصلی و سالانه، روند میانگین AOD در طول دوره مورد بررسی کاهشی است. این می‌تواند ناشی از تغییرات در منابع گردوغبار یا اقدامات کنترلی در منطقه باشد.

تفاوت‌های مکانی: مناطق مختلف استان الگوهای متفاوتی از تغییرات AOD را نشان می‌دهند که به ویژگی‌های محلی مانند توپوگرافی و منابع گردوغبار مربوط است.

در مجموع، این الگوی زمانی-مکانی در غلظت گردوغبار در استان لرستان متأثر از عوامل اقلیمی، توپوگرافی و منابع آلاینده محلی است و می‌تواند به عنوان شاخصی برای پایش و مدیریت این پدیده مورد استفاده قرار گیرد.

۴-نتایج

نتایج این مطالعه جامع، تصویر روشنی از وضعیت رو به تخریب پدیده گردوغبار در استان لرستان ارائه می‌دهد. یافته‌ها به وضوح وجود یک روند افزایشی معنی‌دار در فراوانی روزهای گردوغباری در مقیاس سالانه و در اکثر ایستگاه‌های مورد مطالعه، به ویژه ایستگاه‌های خرم‌آباد و الیگودرز را تأیید کرد. این روند افزایشی در ماه‌های گرم سال (بهار و تابستان) بسیار بارزتر بود که همخوانی کامل با شرایط جوی خشک، افزایش دما و کاهش رطوبت خاک در این فصل‌ها دارد.

تحلیل‌های پهنه‌بندی نیز نشان داد که توزیع گردوغبار در استان تصادفی نبوده و به شدت تحت سیطره توپوگرافی و الگوهای جوی است. مناطق شرقی (الیگودرز)، دشت‌های مرکزی و شمالی (دورود، الشتر، بروجرد) به عنوان کانون‌های اصلی تجمع گردوغبار شناسایی شدند. دره‌های میانکوهی نقش "تله گردوغبار" را ایفا کرده و باعث تداوم و تشدید پدیده در این مناطق می‌شوند.

از سوی دیگر، نتایج آنالیز شیمیایی (EDAX) نمونه گردوغبار، غلظت بالای عناصر خاکی مانند سیلیسیم، آلومینیوم، کلسیم و سدیم را آشکار ساخت که به طور قاطع نشان از یک منشأ زمین‌شناختی و طبیعی برای ذرات دارد. ترکیب شیمیایی به دست آمده، همراه با تحلیل‌های همدیدی، منشأ خارجی (به ویژه مناطق بیابانی عراق) را به عنوان یکی از منابع اصلی ورود گردوغبار به استان لرستان معرفی می‌کند.

در جمع‌بندی نهایی می‌توان اذعان داشت که استان لرستان با یک چالش زیست‌محیطی جدی و فزاینده در زمینه گردوغبار روبرو است. مقابله با این پدیده نیازمند یک راهبرد دووجهی است: اول، همکاری‌های فرامرزی و منطقه‌ای برای کنترل کانون‌های خارجی گردوغبار، و دوم، اجرای برنامه‌های مدیریتی داخلی مانند حفاظت از پوشش گیاهی، مدیریت صحیح اراضی و آب‌های مرزی، و ایجاد بادشکن‌های طبیعی در مناطق آسیب‌پذیر. ادامه روند کنونی می‌تواند پیامدهای جبران‌ناپذیری بر امنیت غذایی، سلامت ساکنان و ثبات اکولوژیکی این استان داشته باشد.

منابع و مآخذ

اُبرلندر، تئودور. (۲۰۰۰). رودخانه‌های زاگرس از دیدگاه ژئومورفولوژی (معصومه رجبی و احمد عباس‌نژاد،
انصاری قوجغر، محمد، بذرافشان، جواد، عراقی نژاد، شهاب، پارسی، احسان و سلطانی، شکور. (۱۳۹۸). ارزیابی عملکرد بردار پشتیبانی – موجک مدل هیبریدی ماشین در پیش‌بینی طوفان‌های گردوغبار (مطالعه موردی: استان سیستان و بلوچستان). مدیریت مخاطرات محیطی.
انصافی مقدم، طاهره. (۱۳۹۹). بررسی شاخص عمق اُپتیکی آئروسلAOD در رویدادهای گرد و غبار در جنوب غربی ایران. مؤسسه تحقیقات جنگلها و مراتع کشور، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران. جلد ۵، شماره ۶، پیاپی ۲۵.
بوچانی، محمدحسین و فاضلی، داریوش. (۱۳۹۰). چالش‌های زیست‌محیطی و پیامدهای ناشی از آن گردو غبارها و پیامدهای آن در غرب کشور ایران. فصلنامه ره‌نامه سیاست‌گذاری، ۱۳۶-۱۴۱.
بیات، فرشته، جمالی، فاطمه و امدیان، سولماز. (۱۳۹۰). پدیده گردوغبار و اثرات آن بر محصولات کشاورزی. در اولین کنگره بین‌المللی پدیده گردوغبار و مقابله با آثار زیانبار آن. دانشگاه کشاورزی و منابع طبیعی رامین خوزستان.
چمن پیرا، رضا.، کریمی سنگچینی، ابراهیم؛ و نوروزی، علی اکبر. (۱۴۰۰). تحلیل زمانی و مکانی وقوع گردوغبار در استان لرستان. مجله‌ی علوم و تکنولوژی محیط‌زیست، ۵۷-۷۰.
عزیزی، قاسم.، میری، مرتضی؛ و نبوی، سید امید. (۱۳۹۱). ردیابی پدیده گردوغبار در نیمه غربی ایران. مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، شماره ۷، ۶-۸۱.

علیجانی، بهلول. (۱۳۸۱). اقلیم‌شناسی سینوپتیک. انتشارات سمت.

Azadeh Poladvand, Gholamali Mozaffari, Hamidreza Ghaffarian, Kamal Omidvar, Ahmad Mazadi

PhD student in Climatology, Faculty of Humanities and Social Sciences. Yazd University, Yazd. Iran
Professor, Department of Geography, Faculty of Humanities and Social Sciences, Yazd University, Yazd, Iran
Associate Professor, Department of Geography, Yazd University, Yazd, Iran
Professor, Department of Geography, Yazd University, Yazd, Iran
Associate Professor, Department of Geography, Yazd University, Yazd, Iran
Corresponding author's email address gmozafari@yazd.ac.ir

ABSTRACT

Objectives: This study aimed to analyze the spatiotemporal trend of dust phenomena and identify its dominant chemical compositions in Lorestan Province, Iran, during the 1991-2020 statistical period.

Materials & Methods: The non-parametric Mann-Kendall test was used for trend analysis, and the Sen's slope estimator was employed to quantify the trend magnitude. Spatial distribution maps of dust events were prepared for different months, and the chemical composition of a dust sample from May 2012 was analyzed using Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDAX).

Findings: Results revealed a significant increasing trend in annual dust days at key stations such as Khorramabad (Z = 4.21) and Aligudarz (Z = 4.27) at the 99.9% confidence level. This trend was more pronounced during the warm months (March to August) and the spring season. Zoning maps displayed a complex pattern heavily influenced by topography (elevation and valley orientation) and prevailing wind directions, identifying eastern (Aligudarz), central (Dorud, Aleshtar), and northern plains (Borujerd) regions as major dust hotspots. Analysis of the May 2012 dust sample indicated that particles were primarily composed of Oxygen (49.5%), Silicon (20.8%), and Carbon (9%), suggesting a geological and pedogenic origin, likely from western desert areas (Iraq).

Conclusion: The findings signify a significant intensification of dust events in Lorestan Province, posing serious potential consequences for public health, agriculture, and local ecosystems. This study highlights the necessity for adopting integrated management strategies at local and regional scales to address this environmental challenge.

Keywords: Dust, Trend Analysis, Mann-Kendall, Zoning, Chemical Composition, Lorestan Province.

بررسی اثرات تغییر اقلیم بر ذرات گردوغبار استان قم و ارزیابی تغییرات مکانی-زمانی آن با کمک تصاویر ماهواره ای

بایرامعلی محمدنژاد*[۱]، محمد حسین بیگی[۲] ، عبدالرضا کریمی[۳]

۱- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی قم
۲- کارشناسی ارشد مهندسی عمران-محیط زیست، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی قم
۳- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی قم
آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول: mohammadnezhad@qut.ac.ir

چکیده

ایران به دلیل موقعیت جغرافیایی و قرار گرفتن در کمربند خشک و نیمه‌خشک جهان، از جمله کشورهایی است که به شدت تحت تأثیر تغییر اقلیم و پدیده گردوغبار قرار گرفته است. کاهش بارش، افزایش دما، خشکی تالاب‌ها (مانند تالاب هورالعظیم و هامون) و دریاچه‌ها (مانند دریاچه ارومیه) و تخریب پوشش گیاهی در کانون‌های داخلی و خارجی (مانند عراق و سوریه) همگی به تشدید پدیده گردوغبار در کشور کمک کرده‌اند. تغییر اقلیم با ایجاد شرایط آب و هوایی نامساعد مانند خشکسالی‌های شدید، افزایش دما، و تغییر در الگوهای باد، به طور مستقیم و غیرمستقیم منجر به افزایش فرسایش بادی، از بین رفتن پوشش گیاهی، و در نهایت تشدید و گسترش پدیده گردوغبار در سراسر جهان می‌شود. طوفان‌های گردوغبار در دهه‌های اخیر به یکی از چالش‌های زیستمحیطی و اقلیمی ایران تبدیل شده و اثرات مستقیم و غیرمستقیم گسترده‌ای در مقیاس‌های محلی، منطقه‌ای و حتی جهانی برجای گذاشته‌اند. در این میان، استان قم به دلیل موقعیت جغرافیایی و شرایط اکولوژیکی خاص، یکی از مناطق متأثر از این پدیده است. با این وجود، مطالعات نظام‌مند چندانی درباره روند مکانی–زمانی گردوغبار در این استان انجام نشده است. به همین منظور، در این مطالعه با استفاده از فناوری سنجش از دور و تصاویر ماهواره‌ای، به بررسی تغییرات مکانی و زمانی پدیده گردوغبار در استان قم طی دوره ۱۸ ساله (۲۰۱۸–۲۰۰۰) پرداخته است. یافته‌های تحقیق حاکی از آن است که شاخص سالانه گردوغبار در استان قم از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۷ روندی کاهشی داشته، سپس در سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹ افزایشی موقتی را تجربه کرده است. از سال ۲۰۱۱ تا ۲۰۱۶ نیز مجدداً کاهش مشاهده شده، اما از ۲۰۱۶ تا پایان دوره، روندی صعودی به خود گرفته است. از نظر پراکنش مکانی، نتایج پایش در سال ۲۰۱۷ نشان می‌دهد که مناطق شمالی و مرکزی استان با غلظت بالای گردوغبار مواجه بوده‌اند، در حالی که نواحی جنوبی و غربی به دلیل توپوگرافی کوهستانی، ارتفاع بیشتر و فقدان کانون‌های داخلی تولید ریزگرد، کمتر تحت تأثیر قرار گرفته‌اند. بررسی همبستگی بین شاخص گردوغبار و متغیرهای اقلیمی مانند دما، بارش، رطوبت خاک و شاخص پالمر نیز

نشان می‌دهد که منشأ اصلی طوفان‌های گردوغبار در استان قم، داخلی است. این نتیجه بر ضرورت توجه جدی به مدیریت پایدار منابع آب و خاک، مهار کانون‌های داخلی ریزگرد و تدوین برنامه‌های مقابله با بیابان‌زایی در این منطقه تأکید می‌کند.

کلید واژه‌ها: گردوغبار، ریزگرد، سنجش از دور، تصاویر ماهواره‌ای، کانون ریزگرد، استان قم

مقدمه

طوفان‌های گردوغبار به عنوان یکی از جدی‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی عصر حاضر، به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان مطرح هستند [۱]. این پدیده در سال‌های اخیر تحت تأثیر تغییرات اقلیمی، خشکسالی‌های مکرر و مدیریت ناپایدار منابع آبی، روندی فزاینده داشته است [۴-۲]. از دیدگاه فنی، طوفان ریزگرد هنگامی رخ می‌دهد که سرعت باد از ۱۵ متر بر ثانیه فراتر رود و دید افقی به کمتر از یک کیلومتر کاهش یابد [۵]. ذرات تشکیل‌دهنده این پدیده با قطر ۰۵/۰ تا ۱/۰ میلی‌متر، قادرند مسافت‌های طولانی را در جو طی کرده و حتی چندین کشور را تحت تأثیر قرار دهند [۶]. پدیده گردوغبار دارای پیامدهای گسترده و چندبعدی است که بر کلیه اجزای محیط زیست تأثیر می‌گذارد. در حوزه کیفیت آب، این پدیده موجب آلودگی منابع آشامیدنی و کاهش کیفیت آب کشاورزی می‌شود [۷]. در بخش خاک، گردوغبار منجر به کاهش حاصلخیزی و تبدیل اراضی به شوره‌زار می‌گردد [۸]. در حوزه هوا، این پدیده باعث افزایش غلظت فلزات سنگین و آلاینده‌های جوی می‌شود [۹]. از منظر سلامت انسان، گردوغبار مشکلات تنفسی و پوستی متعددی ایجاد می‌نماید [۱۰]. در بعد اقلیمی نیز این پدیده بر تابش خورشیدی و تشکیل ابر تأثیر مستقیم می‌گذارد [۱۱]. این تأثیرات زنجیره‌ای نشان می‌دهد که گردوغبار یک چالش پیچیده زیست‌محیطی است که نیازمند رویکردی جامع برای مدیریت و کاهش اثرات آن می‌باشد.

مطالعات متعددی در سراسر جهان از فناوری سنجش از دور برای پایش و تحلیل پدیده گردوغبار استفاده کرده‌اند. بر اساس این تحقیقات، سنجنده‌هایی با پوشش طیفی و مکانی وسیع، همچون MODIS، توانایی بالایی در شناسایی و ردیابی طوفان‌های گردوغبار دارند [۱۲، ۱۳].

در ایران، پژوهش‌های میدانی متعددی به رابطه غلظت ذرات معلق با پارامترهای هواشناسی پرداخته‌اند. برای نمونه، ندافی و همکاران (۲۰۰۶) در یزد و جمشیدی و همکاران (۱۳۸۵) در گچساران، ارتباط معناداری بین غلظت ذرات و عواملی مانند دما، رطوبت و سرعت باد را گزارش کردند [۱۴، ۱۵]. این مطالعات نشان می‌دهند که بیشترین غلظت ذرات معمولاً در فصول بهار و تابستان رخ می‌دهد. از سوی دیگر، مطالعاتی مانند فرجزاده و همکاران (۱۳۸۹) بر روی ایستگاه زابل – که دارای بیشترین فراوانی وقوع طوفان‌های غباری در کشور است – تایید می‌کنند که الگوهای زمانی و ساعتی وقوع این پدیده از نظم خاصی پیروی می‌کنند [۱۶].

تعدادی از تحقیقات با تلفیق تصاویر ماهواره‌ای و مدل‌های عددی، به دنبال شناسایی مسیر و منشأ ذرات بوده‌اند. برای مثال، اشرفی و همکاران (۱۳۹۱) و فلاح ززولی و همکاران (۱۳۹۳) با استفاده از مدل‌هایی مانند HYSPLIT و تصاویرMODIS ، کانون‌های اصلی گردوغبارهای affecting ایران را در مناطق غرب عراق و مرز اردن و عربستان شناسایی کردند [۱۲، ۱۳]. این یافته‌ها توسط کریمی و همکاران (۱۳۹۰) نیز تایید شد که بر نقش کلیدی غرب عراق و شرق سوریه تاکید داشتند [۱۷]. در مطالعه‌ای دیگر، رشکی و همکاران (۲۰۱۲) خشکی دریاچه هامون و بادهای شمالی سیستان را عامل اصلی گردوغبار در جنوب شرق ایران معرفی نمودند [۱۸].

بررسی‌های بلندمدت با استفاده از شاخص ضخامت نوری آئروسل (AOD) روندهای تغییرات این پدیده را آشکار ساخته‌اند. نامداری و همکاران (۲۰۱۶) با تحلیل داده‌های MODIS در غرب ایران، روند افزایشی AOD را از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۱ و سپس کاهش آن را تا ۲۰۱۴ گزارش کردند و استان خوزستان را بحرانی‌ترین منطقه معرفی نمودند [۱۹]. محمدی‌نژاد و همکاران (۱۳۹۲) نیز با تلفیق داده‌های ماهواره‌ای و محیطی درGIS ، اقدام به پهنه‌بندی مناطق پرخطر استان خوزستان کردند [۲۰]. برخی پژوهش‌ها به توسعه و ارزیابی مدل‌های شبیه‌سازی پرداخته‌اند. خدابنده‌لو و همکاران (۱۳۹۵) با ارائه مدل DUSTEM و مقایسه آن با مدل‌های جهانی، کارایی آن را در شناسایی کانون‌های ریزگرد در غرب آسیا با دقت ۷۳.۶ درصد نشان دادند [۱۱]. مطالعات بین‌المللی نیز، همچون تحقیق گربوج و همکاران (۲۰۱۶)، بر نقش کانون‌های شمال آفریقا و خاورمیانه در تولید گردوغبار تاکید داشته‌اند [۲۱].

به طور کلی، ادبیات پژوهش نشان می‌دهد که تکنیک‌های سنجش از دور در کنار مدل‌سازی عددی و تحلیل‌های میدانی، ابزاری قدرتمند برای پایش، شناسایی کانون‌ها، تحلیل روند و ارزیابی خسارات ناشی از پدیده گردوغبار هستند. با این حال، کمبود داده‌های زمینی برای صحت‌سنجی، همچنان به عنوان یک چالش در بسیاری از مطالعات مطرح است [۱۹].

سنجنده‌های ماهواره‌ای زیادی با توانایی‌های مختلف برای شناسایی و تشخیص ریزگردها وجود دارند. هر نوع از این سنجنده‌ها قوت و ضعف‌هایی در شناسایی ریزگردها دارند. در گذشته سنجش ریزگردها توسط حس‌گرهای عملیاتی همانند TOMS و AVHRR انجام می‌شد. این سنجنده‌ها ابتدا برای تحقیقات روی ریزگردها طراحی نشده بودند. بااین‌وجود برای چند دهه این سنجنده‌ها داده‌های اقلیم‌شناسی و آب و هوایی را فراهم نمودند که در درک نحوه پخش ریزگردها سهم زیادی داشته‌اند. در سیستم مشاهده‌ای جدید زمین، NASA سنجنده MODIS را روی دو ماهواره AQUA و TERRA نصب نمود. MODIS اولین سنجنده تحقیقاتی کاربردی برای سنجش ریزگردها روی خشکی‌ها به‌صورت جهانی است که از اواخر سال ۱۹۹۹ میلادی به فضا پرتاب شده است. لذا در تحقیق حاضر از جدیدترین نسخه داده‌های سنجنده ماهواره‌ای

MODIS به منظور پایش گردوغبار منطقه استان قم در طی یک بازه گسترده ۱۷ ساله از سال ۲۰۰۰ تا پایان سال ۲۰۱۶ استفاده گردید.

مواد و روشها

در این مطالعه از دو دسته داده اصلی استفاده شده است:

الف- داده‌های زمینی

- داده‌های هواشناسی (دما، بارش، سرعت و جهت باد، تبخیر) از سازمان هواشناسی استان قم
- داده‌های مرتبط با خاک، پوشش گیاهی و بیابان‌زایی از اداره کل منابع طبیعی استان قم
- داده‌های آبخوان‌ها از شرکت سهامی آب منطقه‌ای قم

ب- داده‌های ماهواره‌ای:

- سنجنده MODIS: شاخص AOD از ماهواره‌های Terra (۲۰۱۷-۲۰۰۰) و Aqua (۲۰۱۷-۲۰۰۲) برای تحلیل روند زمانی گردوغبار.
- سنجنده AVHRR (NOAA) و MODIS: برای بررسی تغییرات پوشش گیاهی و شدت بیابان‌زایی.
- TerraClimate: برای تکمیل و تقویت داده‌های هواشناسی.
- Sentinel-5 Precursor: برای شناسایی و شفاف‌سازی فعالیت کانون‌های گردوغبار در استان.

برای تعیین مسیر و منشأ طوفان‌های غباری، از مدل HYSPLIT در تحلیل رویدادهای شدید استفاده شد.

مشخصات منطقه مطالعه:

استان قم به عنوان منطقه مورد مطالعه این پژوهش، در مرکز ایران بین مختصات ´۳۳ °۳۴ تا ´۴۳ °۳۴ عرض شمالی و ´۴۷ °۵۰ تا ´۵۶ °۵۰ طول شرقی واقع شده است. این استان از شمال با استان تهران، از شرق با استان سمنان، از جنوب با استان اصفهان و از غرب با استان مرکزی هممرز می‌باشد.

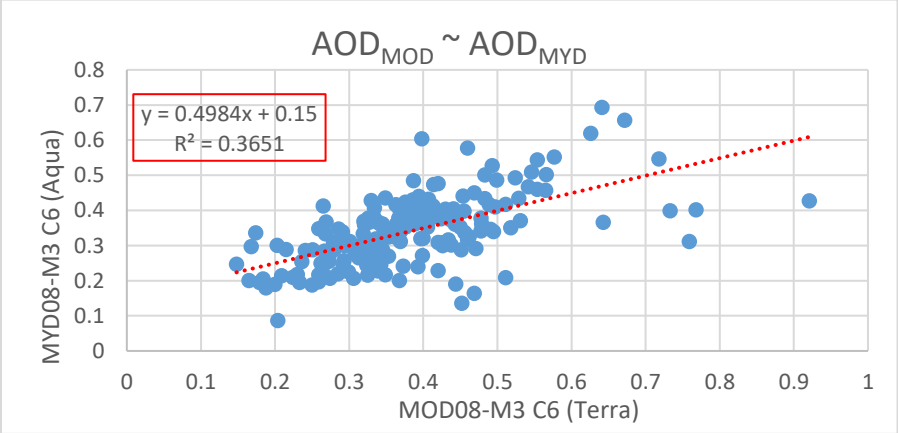
مساحت استان قم حدود ۱۱٬۳۰۰ کیلومترمربع است که تقریباً ۹٪ از مساحت کل کشور را پوشش میدهد. از نظر توپوگرافی، بخش وسیعی از سطح استان را عرصههای کویری و تپهماهورهای با شیب کم تشکیل میدهد. مرتفعترین نقطه استان در منطقه فردو، قله برفانبار با ارتفاع ۳۱۵۰ متر از سطح دریا قرار دارد که در فصول سرد سال دارای یخچال موقتی می‌باشد. این استان دارای یک شهرستان، ۵ بخش (مرکزی، جعفرآباد، خلجستان، سلفچگان و کهک)، ۱۰ دهستان و ۳۶۳ آبادی دارای سکنه میباشد. از جمله ویژگیهای مهم جغرافیایی استان، وجود دریاچه حوض سلطان در ۴۰ کیلومتری شمال شهر قم است. موقعیت جغرافیایی استان در منطقه کویری ایران مرکزی، آن را به منطقه ای مستعد برای شکل گیری پدیده گردوغبار تبدیل کرده است. نقشه موقعیت بخش‌ها در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱- استان قم به تفکیک بخش

نتایج و بحث

با توجه به عدم وجود ایستگاه AERONET در مجاورت منطقه مورد مطالعه، داده‌های شاخص ضخامت نوری آئروسل (AOD) از سنجنده MODIS بر روی دو ماهواره Terra (AODMOD) و Aqua (AODMYD) مورد استفاده قرار گرفت. بررسی تطبیقی این داده‌ها نشان‌دهنده همبستگی متوسط بین آنها (R^2 = ۰/۳۶۵) است. شیب خط رگرسیون نزدیک به ۰/۵بوده که حاکی از اختلاف نسبی systematic بین مقادیر AOD استخراج شده از دو سنجنده مذکور می‌باشد (شکل ۲). این اختلاف ممکن است ناشی از تفاوت در زمان گذر ماهواره‌ها و شرایط اتمسفری در لحظه تصویربرداری باشد.



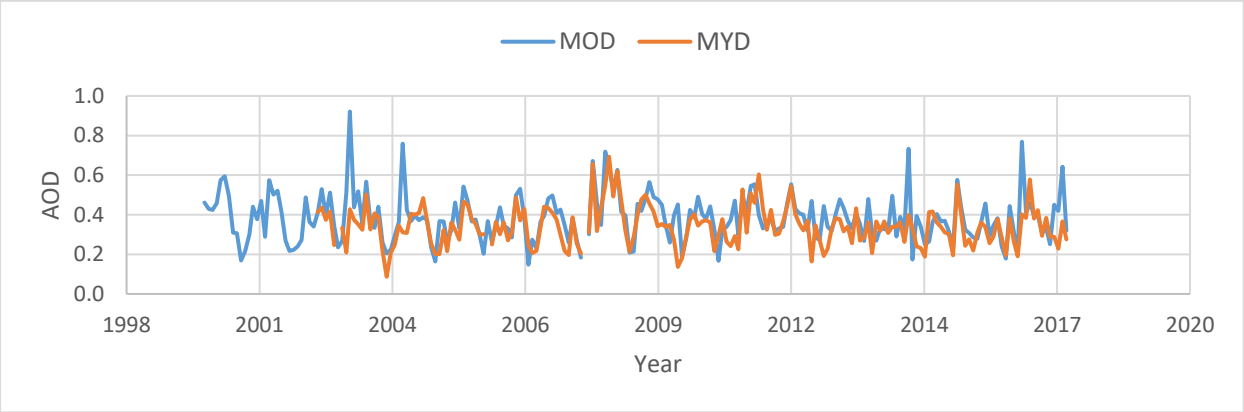
شکل ۲- نمودار پراکنش داده‌های سنجنده MODIS ماهواره Terra در برابر سنجنده MODIS ماهواره Aqua

شکل ۳ روند ماهانه شاخص ضخامت نوری آئروسل (AOD) استان قم را در بازه زمانی ۲۰۰۰-۲۰۱۷، مبتنی بر داده‌های سنجنده MODIS ماهواره‌های Terra (از مارس ۲۰۰۰) و Aqua (از جولای ۲۰۰۲) نشان می‌دهد. اگرچه هر دو مجموعه داده روند تغییرات مشابهی را نمایش می‌دهند، اما در مقادیر حداکثری اختلاف قابل توجهی مشاهده می‌شود. به دلیل عدم دسترسی به داده‌های AERONET برای صحت‌سنجی، داده‌های ماهواره Terra (با پوشش زمانی طولانی‌تر) با استفاده از روش میانگین‌گیری خطی در نقاط پرت، با استفاده از داده‌های ماهواره Aqua اصلاح شدند. ارزیابی نتایج اصلاح نشان می‌دهد که داده‌های اصلاح‌شده همبستگی بالایی با داده‌های اصلی دارند:

- همبستگی با داده‌های خام :Terra R^2 ۰/۸۶ = و شیب ۰/۷۸

- همبستگی با داده‌های خام :Aqua R^2 ۰/۷۶ = و شیب ۰/۸۷

این نتایج، بهبود و انسجام مناسب داده‌های اصلاح‌شده را برای ادامه تحلیل‌ها تأیید می‌کند.



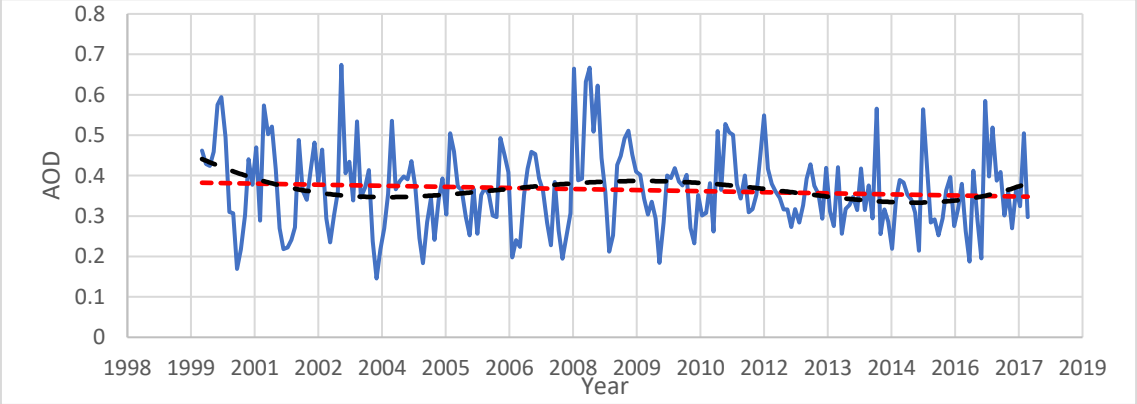
شکل ۳- نمودار متوسط ماهانه شاخص AOD استان قم به‌دست‌آمده از سنجنده MODIS ماهواره Terra و ماهواره Aqua در طول بازه زمانی سال ۲۰۰۰ تا پایان سال

روند زمانی پارامترهای کلیدی شامل شاخص AOD، متغیرهای اقلیمی (دما، بارش، سرعت و جهت باد، رطوبت خاک) و شاخص‌های زیست‌محیطی (پوشش گیاهی، منابع آب زیرزمینی و شاخص خشکسالی پالمر) برای تحلیل زمانی این پدیده مورد بررسی قرار گرفته است. تحلیل داده‌های ماهانه AOD در بازه ۲۰۱۷-۲۰۰۰ (شکل ۴) نشان‌دهنده یک روند کلی کاهشی نامحسوس در بلندمدت است که با نوسانات دوره‌ای قابل‌توجهی همراه بوده است. مهم‌ترین نوسانات به این شرح است:

- کاهش اولیه از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۴

- افزایش محسوس از ۲۰۰۶ تا ۲۰۰۹
- کاهش مجدد از ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۵

میانگین بلندمدت شاخص AOD در این دوره ۰.۳۵ محاسبه شده است، با این حال مقادیر ماهانه در بازه ۰.۲ تا ۰.۶ در نوسان بوده و تنها در سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۰۸ به حدود ۰.۷ رسیده است. این الگوی نوسانی نشان‌دهنده تغییرپذیری قابل‌توجه پدیده گردوغبار در استان قم طی دو دهه گذشته است.



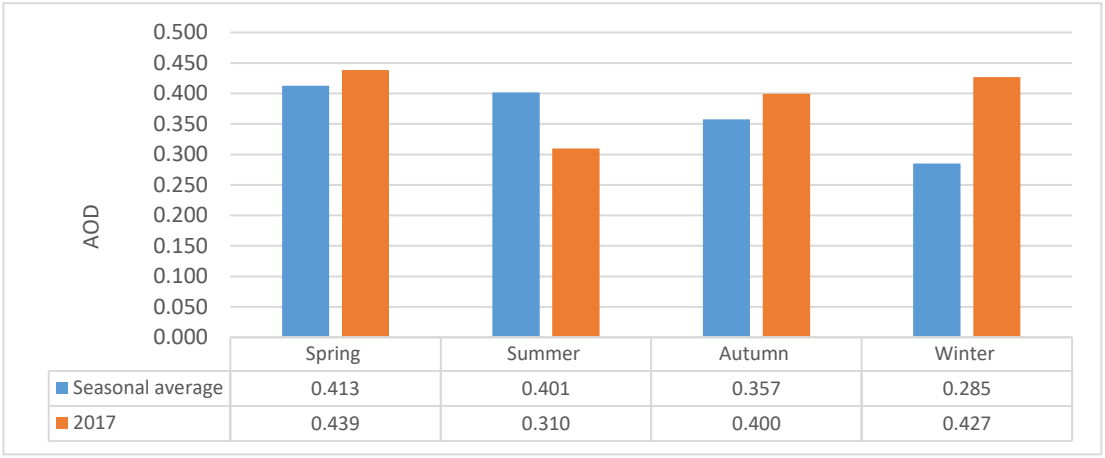
شکل ۴- متوسط ماهانه شاخص AOD استان قم در بازه زمانی سال ۲۰۰۰ تا پایان سال ۲۰۱۷

در ادامه به‌منظور بررسی تغییرات فصلی گردوغبار، داده های AOD بدست آمده مربوطه در نظر گرفته شده است. در شکل نتایج حاصل از بررسی شاخص AOD متوسط فصلی سال ۲۰۱۷ و میانگین شاخص متوسط فصلی در بازه زمانی تحقیق نشان داده شده است.

بررسی تغییرات فصلی شاخص AOD در بازه بلندمدت (۲۰۱۷-۲۰۰۰) نشان می‌دهد که بیشترین غلظت گردوغبار در فصول بهار و تابستان رخ داده است، در حالی که کمترین مقادیر مربوط به فصول پاییز و زمستان بوده است.

الگوی فصلی در سال ۲۰۱۷ انحراف قابل توجهی از روند بلندمدت نشان داد. در این سال:

- بیشترین غلظت گردوغبار در بهار (با ۶٪ افزایش نسبت به میانگین بلندمدت)
- رتبه دوم در زمستان (با ۵۰٪ افزایش چشمگیر)
- رتبه سوم در پاییز
- و کمترین مقدار در تابستان (با ۲۳٪ کاهش) ثبت شد.



	Spring	Summer	Autumn	Winter
Seasonal average	0.413	0.401	0.357	0.285
2017	0.439	0.310	0.400	0.427

شکل ۵- مقایسه شاخص متوسط فصلی AOD استان قم در بازه زمانی۲۰۰۰ - ۲۰۱۷ و سال ۲۰۱۷

تحلیل مکانی شاخص ضخامت نوری آئروسل (AOD) استان قم در سال ۲۰۱۷ با استفاده از تصاویر سنجنده MODIS ماهواره Terra انجام شد. نتایج حاکی از تغییرات مکانی-زمانی قابل توجه در توزیع گردوغبار است:

-نیمه اول سال ۲۰۱۷:

- در ژانویه و فوریه، مناطق شمال شرقی استان بیشترین تمرکز گردوغبار را نشان دادند.
- از ماه مارس، گستره گردوغبار به سراسر استان تسری یافت.
- در ماه‌های آوریل، می و ژوئن، نیمه غربی استان به طور مداوم مقادیر AOD بالاتری را نسبت به نیمه شرقی ثبت نمود.

-نیمه دوم سال ۲۰۱۷:

- علی‌رغم مجاورت نیمه شرقی با کانون‌های طبیعی گردوغبار (دریاچه نمک و کویر مرکزی)، این ناحیه غلظت کمتری را نسبت به نیمه غربی تجربه کرد. - بیشترین مقادیر AOD در ژانویه (شمال شرق) و نوامبر (جنوب غرب) مشاهده شد.

نقشه‌های تفکیک مکانی شده مقادیر AOD ماهانه استان قم که با استفاده از تصاویر ماهواره ای سنجنده Modis از ماهواره Terra استخراج شده است نتایج نشان داد که در دو ماه ابتدایی سال مقادیر AOD در منطقه شمال شرقی استان و در ماه مارس منطقه شمالی استان به‌طور کامل درگیر گردوغبار می‌شود. با آغاز بهار کل استان قم درگیر با این پدیده شده است. در ماه‌های آوریل، می و ژوئن سال ۲۰۱۷ که کل استان نشان از گردوغبار داشته است، نیمه‌ی غربی استان مقادیر AOD بیشتری را نسبت به نیمه‌ی شرقی نشان می‌دهد.

در نیمه دوم سال ۲۰۱۷، علی‌رغم مجاورت نیمه‌ی شرقی استان قم با دریاچه‌ی نمک و نزدیکی این منطقه به کویر مرکزی،

این ناحیه از استان در برابر نیمه¬ی غربی پدیده ریزگرد کمتری داشته است. در بین ۱۲ ماه سال ۲۰۱۷ ماه ژانویه و نوامبر به ترتیب در مناطق شمال شرقی و جنوب غربی استان بیشترین مقادیر AOD را در منطقه داشته‌اند.
لازم به ذکر است با توجه به کوچک بودن استان قم و میزان وضوح و دقت تصاویر MODIS بهتر است از داده های دیگری نیز جهت تحلیل مکانی استفاده نمود. در این تحقیق از تصاویر sentinel-5p جهت کمک به تحلیل مکانی ریزگردهای استان قم بکار گرفته شده است.

نتیجه‌گیری

این مطالعه با استفاده از داده‌های سنجش از دور و تصاویر ماهواره‌ای، به بررسی روند تغییرات گردوغبار استان قم طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸ پرداخت. پس از صحت‌سنجی داده‌های ماهواره‌ای و مقایسه آن‌ها با اطلاعات زمینی، نتایج نشان داد که اگرچه روند تغییرات سالانه گردوغبار در بلندمدت افزایش یا کاهش غالب نداشته، اما نوسانات قابل‌توجهی در مقیاس ماهانه و فصلی مشاهده می‌شود. به‌طور مشخص، بیشترین غلظت گردوغبار در بهار و تابستان و در ماه‌های مارس، آوریل و جولای رخ داده، درحالی‌که کمترین میزان در پاییز و زمستان ثبت شده است. از نظر مکانی، مناطق شمالی و مرکزی استان به‌ویژه اطراف دریاچه نمک و حوض سلطان، به عنوان کانون‌های اصلی داخلی شناسایی شدند. همچنین، وزش بادهای شرقی در فصول گرم و بادهای غربی در فصول سرد، به‌ترتیب در انتقال گردوغبار از کانون‌های خارجی و داخلی نقش داشته‌اند. درنهایت، اگرچه برخی طوفان‌ها منشأ خارجی دارند، اما تشدید فعالیت کانون‌های داخلی در سال‌های اخیر، لزوم توجه جدی‌تر به کنترل محلی این پدیده را نشان می‌دهد.

منابع

Middleton, N. Desert dust hazards: A global review. Aeolian Research, 2017. 24(Supplement C): p. 53-63.
Alizadeh-Choobari, O. P. Zawar-Reza, and A. Sturman, The “wind of 120days” and dust storm activity over the Sistan Basin. Atmospheric Research, 2014. 143: p. 328-341.
بهرامی، ح.ع.، م. جلالی.، ع. درویشی بلورانی. مدل‌سازی مکانی ـ زمانی وقوع توفان‌های گردوغبار در استان خوزستان. سنجش از دور و GIS ایران. ۵.(2)
دانیالی، م. پایش تغییرات مکانی-زمانی گردوغبار استان خوزستان به کمک تکنیک های سنجش از دور. ۱۳۹۶، دانشگاه صنعتی قم، دانشکده فنی و مهندسی.
مهرابی،ش. بررسی رابطه بین پارامترهای اقلیمی و وقوع ریزگردها (مطالعه موردی: استان خوزستان). نشریه علوم آب و خاک-علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی-دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۹۴. ۱۹.81-69 .p :(71)
حیدریان، پ.، م. جودکی.، ج. درویشی خاتونی.، ر. شهبازی. شناسایی کانون های منشأ ریزگرد در استان خوزستان. ۱۳۹۴.
لیمانی، م. عسگری.، س. دادالهی. بررسی تأثیر ریزگردها بر تولید اولیه در خلیج فارس با استفاده از داده‌های سنجش از دور. نشریه محیط زیست طبیعی، ۲۰۱۶. ۶۹.728-715 .p :(3)

آذر حافظی، ب. بررسی رابطه پارامترهای پوشش گیاهی و رطوبت خاک با پدیده ریزگردها در کانون‌های بحرانی جنوب غربی ایران توسط داده‌های سنجش از دور. ۱۳۹۵. دانشگاه زابل، دانشکده آب و خاک.

چابک، م. مسئولیت بین‌المللی دولت‌ها در قبال آلودگی‌های فرامرزی ناشی از ریزگردها. ۱۳۹۲. دانشگاه پیام نور استان تهران، مرکز پیام نور تهران.

کمالی، س. بررسی ساختار توفان‌های گرد و غباری در دشت سیستان. ۱۳۹۱. دانشگاه فردوسی مشهد، دانشکده ادبیات و علوم انسانی.

Xuan, J. et al. Identification and characterization of sources of atmospheric mineral dust in East Asia. Atmospheric Environment, 2004. 38(36): p. 6239-6252.

اشرفی، خ.، م. شفیع پور مطلق و ع. اصلمند. بررسی مسیرهای توفان های گرد و غبار بر روی ایران با به‌کارگیری مدل سازی عددی و تصاویر ماهواره ای. فصلنامه علوم و مهندسی محیط زیست، ۱۳-۲۰۱۳.p. 3-12 :(56)

زولی، م.ف.، ع. وفایی نژاد، م.م. خیرخواه زرکش.، ف. احمدی دهکا. پایش و تحلیل سینوپتیکی پدیده گرد و غبار با استفاده از سنجش از دور و) GIS مطالعه موردی: گرد و غبار ۱۸ ژوئن ۲۰۱۲.(

ندافی، ک.، احرام پوش، م.ح.، جعفری، و.، نبی زاده نودهی، ر.، یونسیان، م. بررسی کل ذرات معلق و ترکیب مواد تشکیل دهنده آن در منطقه مرکزی شهر یزد.

جمشیدی.، کریم‌زاده.، ر. شیرازی. بررسی میزان آلودگی ذرات معلق در هوای شهر گچساران در سال ۱۳۸۴. ارمغان دانش، ۲۰۰۷. ۱۲.p. 89-97 :(2)

فرج زاده اصل، ع.، خ. علیزاده. تحلیل زمانی و مکانی توفانهای گرد و خاک در ایران. برنامه ریزی و آمایش فضا، ۲۰۱۱. ۱۵.p. 65-84 :(1)

کریمی، خ. بررسی توفان‌های گرد و غبار و اثرات زیست محیطی آن‌ها با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در غرب و جنوب غرب ایران. ۱۳۹۰. دانشگاه صنعتی شاهرود.

Rashki, A. et al. Dust storms and their horizontal dust loading in the Sistan region, Iran. Aeolian Research, 2012. 5: p. 51-62.

Namdari, S. et al. Spatio-temporal analysis of MODIS AOD over western part of Iran. Arabian Journal of Geosciences, 2016. 9(3): p. 191.

محمدی نژاد، خ. ارزیابی روش‌های سنجش از دور در تجزیه و تحلیل مکانی-زمانی پدیده ریزگرد و ریسک آن. ۱۳۹۱. دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده علوم انسانی.

Gherboudj, I. S. Naseema Beegum, and H. Ghedira, Identifying natural dust source regions over the Middle-East and North-Africa: Estimation of dust emission potential. Earth-Science Reviews, 2017. 165(Supplement C): p. 342-355.

سومین کنفرانس ملی آب و هواشناسی ایران (با محوریت تغییر اقلیم)
The 3rd National Conference on Climatology of Iran (Focusing on Climate Change)
ارومیه ۱۶ مهر ۱۴۰۴

Investigating the Effects of Climate Change on Dust Particles in Qom Province and Evaluating Their Spatiotemporal Variations Using Satellite Imagery

Bayramali Mohammadnezhad[1]*, Mohammad Hossein Beighi[2], Abdolreza Karimi[3]

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Qom University of Technology (QUT), Qom, Iran.
Department of Civil Engineering, Qom University of Technology (QUT), Qom, Iran.
Associate Professor, Department of Civil Engineering, Qom University of Technology (QUT), Qom, Iran.

* Corresponding author: mohammadnezhad@qut.ac.ir

ABSTRACT

Due to its geographical location within the world's arid and semi-arid belt, Iran is one of the countries significantly impacted by climate change and the dust phenomenon. Factors such as declining precipitation, rising temperatures, the desiccation of wetlands (like Hoor al-Azim and Hamoun) and lakes (such as Lake Urmia), and the degradation of vegetation in both internal and external dust sources (e.g., Iraq and Syria) have all contributed to the intensification of dust storms in the country. Climate change, by creating adverse weather conditions like severe droughts, increased temperatures, and altered wind patterns, directly and indirectly leads to increased wind erosion, loss of vegetation cover, and the eventual aggravation and spread of dust phenomena worldwide. In recent decades, dust storms have become a major environmental and climatic challenge for Iran, with extensive direct and indirect impacts on local, regional, and even global scales. Among Iranian regions, Qom Province, due to its specific geographical and ecological conditions, is notably affected by this phenomenon. However, systematic studies on the spatiotemporal trends of dust in this province are scarce. Therefore, this study utilized remote sensing technology and satellite imagery to investigate the spatial and temporal variations of dust in Qom Province over a 18-year period (2000–2018). Findings indicate that the annual dust index in Qom Province followed a decreasing trend from 2000 to 2007, experienced a temporary increase in 2008–2009, decreased again from 2011 to 2016, and then showed an upward trend from 2016 until the end of the study period. Spatially, monitoring results for 2017 revealed that northern and central areas of the province faced high dust concentrations, while southern and western regions, due to their mountainous topography, higher elevation, and absence of internal dust sources, were less affected. Analysis of the correlation between the dust index and climatic variables—such as temperature, precipitation, soil moisture, and the Palmer Index—suggests a primarily internal origin for dust storms in Qom Province. This finding underscores the critical need for sustainable management of water and soil resources, controlling internal dust sources, and developing desertification combat programs in the region.

Keywords: Dust, Particulate Matter, Remote Sensing, Satellite Imagery, Dust Source, Qom Province

چالش‌های پیش‌بینی زیرفصلی تا چند سالانه بارش (با تاکید بر ایران)

روح‌اله اوجی، دانشیار اقلیم‌شناسی، دانشگاه گیلان

چکیده

پیش‌بینی بارش در بازه‌های زمانی زیرفصلی، فصلی و چندساله با چالش‌های قابل توجهی در سطح جهانی مواجه است. در بازه زیرفصلی، محدودیت مهارت مدل‌ها ناشی از پیچیدگی فرآیندهای جو–اقیانوس مانند امواج سیاره‌ای و نوسانات مادن–جولیان و نیز خطاهای مقداردهی اولیه است. در بازه فصلی، شاخص‌های اقلیمی بزرگ‌مقیاس (مانند ENSO، PDO، NAO) نقش تعیین‌کننده‌ای در نوسانات بارش دارند، در حالی که پیش‌بینی بلندمدت چندساله و ده‌ساله با عدم‌قطعیت ذاتی ناشی از نویز داخلی اقلیم و سناریوهای متفاوت تغییر اقلیم مواجه است. در ایران، این محدودیت‌ها تشدید شده و باعث نوسان شدید دقت مدل‌ها در مناطق مختلف کشور می‌شود؛ به طوری که پیش‌بینی زیرفصلی در حوضه‌های شمالی نسبتاً قابل اعتماد است، درحالیکه در مناطق مرکزی و خشک بطور قابل ملاحظه‌ای از دقت آنها کاسته شده و پیش‌بینی‌های بلندمدت نیز عمدتاً جنبه سناریویی دارد. برای افزایش کارآیی پیش‌بینی‌ها، تقویت شبکه‌های رصدی، توسعه مدل‌های منطقه‌ای متناسب با اقلیم ایران، استفاده از مدل‌های هیبریدی و تلفیق نتایج با دانش بومی و سناریوهای مدیریتی ضروری است.

کلمات کلیدی: چالش‌های پیش‌بینی فصلی، بارش، ایران

مقدمه

) و برنامه تحقیقات اقلیم‌شناسی WWRP[67]تلاش‌های بین‌المللی مشترک تحت نظارت برنامه تحقیقات هواشناسی جهانی (
) کمک شایانی به پیشرفت پیش‌بینی‌های هوا و اقلیم شناسی کرده است. به‌طوریکه، پژوهش‌های انجام WCRP[68]جهانی (
در ابتدا منجر به پیش‌بینی‌های اقلیمی برای یک تا دو فصل آینده شد. این اقدام، به تدریج بخشی WCRPشده از طریق
) شد (گراهام و همکاران ۲۰۱۱) و سپس پروژه مشترک WMO[69]از زیرساخت‌های عملیاتی سازمان جهانی هواشناسی (
در زمینه پیش‌بینی‌های زیرفصلی تا فصلی (در بازه زمانی دو هفته تا یک فصل) به انجام رسید WCRP و WWRP

[67] . World Weather Research Programme (WWRP)
[68] . World Climate Research Programme (WCRP)
[69] . World Meteorological Organization (WMO)

) NOAA[70](رابرتسون و همکاران ۲۰۱۸؛ ماریوتی و همکاران ۲۰۱۸). اداره ملی جوی و اقیانوسی ایالات متحده آمریکا (WCRP). علاوه‌براین، تحقیقات Pegion et al. 2019نیز یک پروژه پیش‌بینی زیرفصلی با هدف مشابه به اجراء درآورد (امکان پیش‌بینی در مقیاس‌های زمانی طولانی‌تر (از یک تا ده سال) را محقق نموده و منجر به توسعه زیرساخت‌های عملیاتی در زمینه پیش‌بینی اقلیمی شد (سازمان جهانی هواشناسی ۲۰۱۸؛ کوشنیر و همکاران ۲۰۱۹). هدف نهایی اقدامات WMO انجام شده در این زمینه، بهبود زمانی-مکانی خروجی مدل‌های پیش‌بینی است که بطور مستمر در حال انجام بوده است. در سال ۲۰۱۸، دو کنفرانس بین‌المللی در مورد انواع پیش‌بینی‌ها برگزار شد که ضمن بررسی اقدامات انجام شده و ملزومات همراه بود. بعد از آن نیز WCRP و WWRP)، با جلسات عمومی مشترک S2Dپیش‌بینی زیر فصلی تا چند ده ساله (اقدامات متعددی در این زمینه صورت گرفته است (مانند دوبلاس-ریس و همکاران ۲۰۲۳؛ سیلمن و همکاران، ۲۰۲۳؛ هوران و همکاران، ۲۰۲۴) که می‌توان گفت مبنایی برای معرفی انواع و دامنه کاربرد پیش‌بینی‌های زیرفصلی تا دهه‌ای (جدول ۱) است.

جدول (۱) پیش‌بینی‌های زیرفصلی تا اقلیمی

نوع پیش‌بینی	*مقیاس زمانی*	*تمرکز*	*کاربرد*
زیرفصلی	۲ تا ۶ هفته	بی‌هنجاری میان مدت دمایی	برنامه‌ریزی میان‌مدت برای کشاورزی، منابع آب، انرژی و سلامت عمومی
فصلی	۱ تا ۶ ماه	بی‌هنجاری‌ها یا روندهای عمومی فصلی (دما، بارش، خشکسالی)	برنامه‌ریزی بلندمدت برای کشاورزی، منابع آب، انرژی و کاهش مخاطرات
سالانه	۱ تا ۱۰ سال	بی‌هنجاری‌ها یا روندهای عمومی سالانه و چندساله (دما، بارش، خشکسالی)	برنامه‌ریزی بلندمدت برای کشاورزی، منابع آب، انرژی، کاهش مخاطرات و سایر زیرساخت‌ها

البته پیشرفت در پیش‌بینی‌های هواشناسی و اقلیم‌شناسی، چالش‌های مشترکی (شامل برهمکنش جو-اقیانوس، چرخه بیوژئوشیمیایی، کربن و بویژه عدم قطعیت ذاتی سیستم جو) را نیز در مقیاس‌های زمانی مختلف آشکار نمود. چالش‌هایی که پیش‌بینی‌پذیری برخی متغییرها (بویژه بارش) را با عدم قطعیت نسبتا زیادی مواجه کرده است. مقابله با این چالش‌ها و کاهش عدم قطعیت پیش‌بینی‌های آب‌وهوایی، نیازمند همکاری گسترده‌تر پژوهشگران و متخصصان جوامع پیش‌بینی هوا و اقلیم‌شناسی بر اساس دانش، زیرساخت‌ها و قابلیت‌های فنی مشترک است. پژوهش حاضر، تلاشی است برای بررسی برخی از چالش‌های مذکور با تاکید بر ایران که احتمالا با افزایش اثرات حاصل از گرمایش جهانی، پررنگ‌تر نیز خواهد شد.

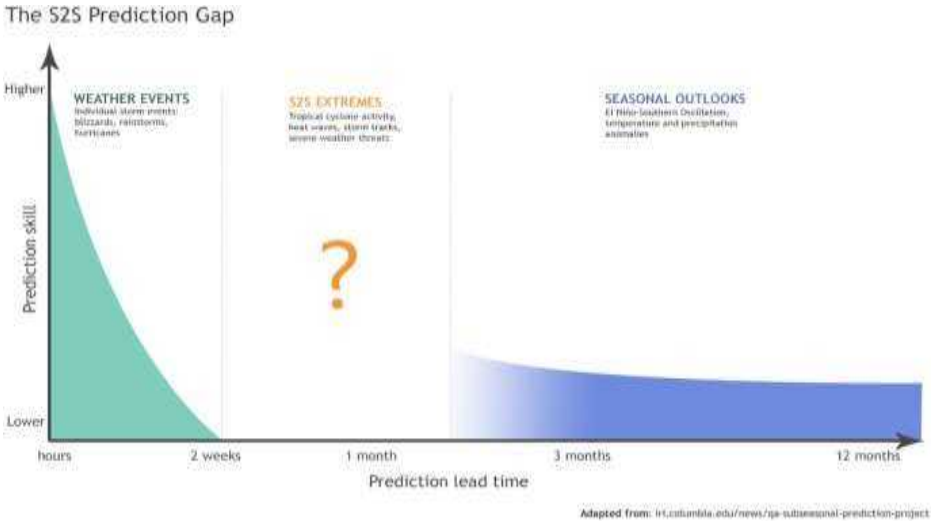
[70] . National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)

اگرچه این چالش‌ها در سراسر جهان وجود دارد، اما بواسطه برخی موانع و مشکلات موجود در کشور ما نیاز به توجه ویژه داشته و لازم است در اولویت برنامه‌های توسعه‌ای کشور قرار گیرد.

بحث و نتایج

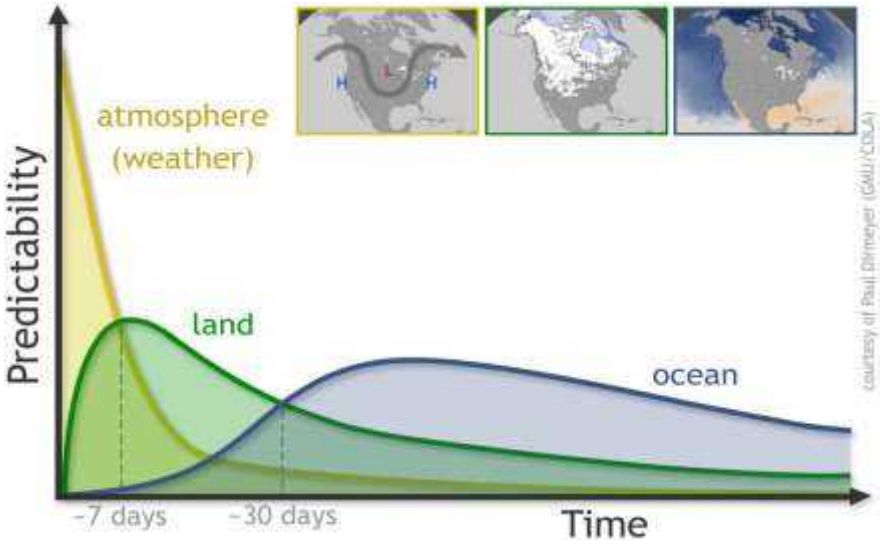
مفاهیم و تعاریف

مهارت انواع پیش‌بینی‌ها و پیش‌بینی پذیری پدیده‌های جوی برای بازه‌های زمانی مختلف در شکل (۱)، نشان داده شده است. همچنانکه ملاحظه می‌شود، قابلیت پیش‌بینی پدیده‌ها در پیش‌بینی فصلی نسبت به پیش‌بینی هواشناسی، بطور قابل توجهی تغییر کرده و مهارت پیش‌بینی بعنوان متغیر وابسته کاهش می‌یابد. همچنین، موارد مذکور در محدوده زیرفصلی تا) که بازه زمانی بیش از ۲ هفته تا کمتر از یک فصل را شامل می‌شود، کمتر شناخته شده است. S2Sفصلی (



شکل (۱) نمایش نقش پیش‌بینی زیرفصلی در پوشش شکاف بین پیش‌بینی هواشناسی و پیش‌بینی فصلی (NOAA, 2018)

آنچه مسلم است، آب و هوای هر نقطه از کره زمین از تعامل ۵ بازیگر اصلی سامانه اقلیم (شامل هوا کره، آب‌کره، یخ کره، سنگ کره و زیست کره) تشکیل می‌شود. اجزاء سامانه اقلیم در انواع پیش‌بینی‌ها نقش و نمود متفاوتی دارند (شکل ۲).

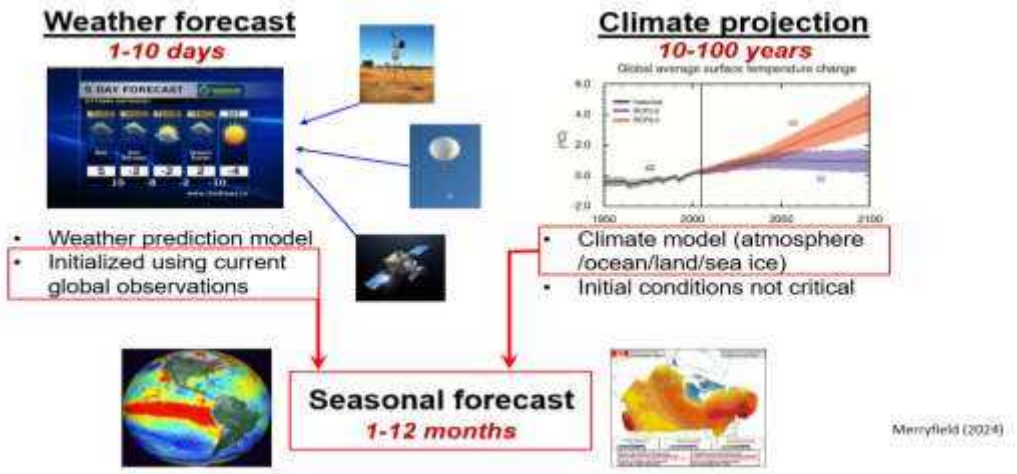


شکل (۲) نقش اجزای سامانه اقلیم در انواع پیش‌بینی‌ها (NOAA, 2018)

در پیش‌بینی‌های لحظه‌ای هواشناسی، دانستن وضعیت اولیه جو بیشترین اهمیت را دارد. شرایط جوی در تعامل بیشینه با پوشش زمینی، قابلیت پیش‌بینی کوتاه مدت پدیده‌ها را افزایش داده است. بطوریکه در پیش‌بینی زیر فصلی برای بازه زمانی ۲ تا ۶ هفته، آگاهی از پوشش سطح زمین نیز ضرورت دارد. درحالیکه در پیش‌بینی بیش از ۳۰ روز، نقش هواکره به شده کاهش یافته و معمولاً مستلزم آگاهی از وضعیت اقیانوس‌ها (مانند تغییرات دمای سطح دریا تحت تاثیر ال‌نینو یا سایر شاخص‌های دور پیوند) است. بنابراین، در بازه‌های زمانی طولانی‌تر، برهم‌کنش اجزاء سامانه اقلیم تحت کنترل شرایط اقیانوسی و سپس زمینی بوده و قابلیت پیش‌بینی بطور قابل‌توجهی کاهش می‌یابد. اگر چه قابلیت پیش‌پینی‌پذیری پدیده‌ها در دوره‌های بلندمدت‌تر کاهش می‌یابد، پیش‌بینی در پدیده‌هایی که به آرامی در حال تکامل‌اند (مانند سیستم‌های جریان اقیانوسی)، برای برنامه‌ریزی و تطبیق جامعه برای چند دهه آینده از اهمیت بالایی برخوردار است.

پیشرفت‌های به‌دست آمده در پیش‌بینی هواشناسی و مدلسازی اقلیمی نقش مهمی در بهبود دقت و قابلیت اعتماد ها) که در ابتدا برای شبیه‌سازی روندهای GCMپیش‌بینی‌های فصلی داشته‌اند (شکل ۳). مدل‌های گردش عمومی (بلندمدت اقلیمی توسعه یافته بودند، امروزه با بهبود تفکیک مکانی و زمانی، امکان استفاده در مقیاس‌های میان‌مدت (مانند پیش‌بینی‌های فصلی) را نیز فراهم کرده‌اند. این پیش‌بینی‌ها از اطلاعات دریافتی از سامانه‌های دیدبانی و مدل‌های هواشناسی کوتاه‌مدت تغذیه می‌شوند و با بهره‌گیری از روش‌های آماری و دینامیکی، تلاش می‌کنند رفتار اقلیم را در بازه‌هایی بین یک شناسی، بستر توسعه روش‌های فصل تا چند سال آینده پیش‌بینی کنند. تعامل میان دو حوزه هواشناسی عملیاتی و اقلیم ترکیبی جدید مانند پیش‌بینی‌های فصلی-اقلیمی را فراهم کرده است. در این چارچوب، مدل‌های تغییر اقلیم با اطلاعات

به‌روز شده جوی-اقیانوسی تغذیه می‌شوند تا شرایط مرزی آینده را در بازه‌های زمانی میان‌مدت شبیه‌سازی کنند. این هم‌افزایی، در مناطقی مانند ایران که تحت تأثیر پیچیدگی‌های توپوگرافی، تنوع اقلیمی و پدیده‌های بزرگ‌مقیاسی نظیر ENSOنوسانات قرار دارند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و می‌تواند به تصمیم‌گیری‌های بهتر در زمینه مدیریت منابع آب، کشاورزی و آمادگی در برابر خشکسالی کمک کند.

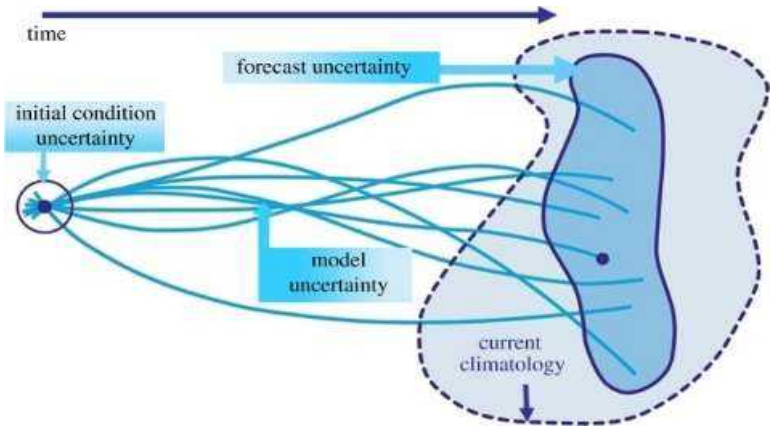


شکل (۳) تعامل پیش‌بینی هواشناسی و مدلسازی تغییر اقلیم در توسعه پیش‌بینی‌های فصلی (مریفیلد، ۲۰۲۴)

به منظور دستیابی به نتایج مطلوب در خصوص انواع پیش‌بینی‌های هوا و اقلیم‌شناسی، ابتدا نیاز به شناخت مولفه‌های کلیدی پیش‌بینی شامل (مدل‌های پیش‌بینی، پیش‌بینی چندمدلی/گروهی، پیش‌بینی‌پذیری شرایط اولیه یا شرایط آغازگری و محرک‌های اقلیمی و شاخص‌های مرتبط) است. پیش‌بینی‌های هوا عموما بر روش پیش‌بینی به نام «پیش‌بینی‌پذیری شرایط اولیه» تکیه می‌کنند. اساساً، با اشراف بر وضعیت کنونی جو – از نظر دما، فشار، رطوبت، الگوهای باد و غیره – امکان بهره‌گیری از این اطلاعات برای پیش‌بینی چگونگی تغییر آن در آینده نزدیک وجود دارد.

لورنز (۱۹۶۳) نشان داد که حتی ناپایداری‌های بسیار کوچک در شرایط اولیه جو، به دلیل ماهیت آشوبناک آن، در گذر زمان به عدم‌قطعیت در پیش‌بینی منجر می‌شود. بر این اساس، استفاده از روش‌های احتمالاتی در پیش‌بینی عددی هوا، به‌ویژه برای بازه‌های زمانی فراتر از حدود یک هفته، مطرح شد. در این رویکرد، اختلالات تصادفی و کوچک به متغیرهای اولیه جوی (دما، رطوبت، باد و فشار) وارد می‌شود و سپس تحت اثر پویایی‌های غیرخطی جو تقویت شده و مسیرهای پیش‌بینی متنوعی ایجاد می‌کنند. بطوریکه این اختلالات جزئی سپس توسط فرآیندهای آشوبناک تقویت می‌شوند و هر پیش‌بینی از پیش‌بینی‌های دیگر متفاوت می‌شود. در شکل (۴) طرح شماتیک یک پیش‌بینی تصادفی بر اساس عدم قطعیت‌های شرایط اولیه ارائه شده است. خطوط آبی در این تصویر، مسیر پیش‌بینی‌های مجزا را نشان می‌دهد که به دلیل

عدم قطعیت در شرایط اولیه و در نمایش فرآیندهای ریزمقیاس شبکه در مدل از یکدیگر واگرا می‌شوند. محدوده آبی روشن، حالت های ممکن را که اتمسفر واقعی می‌تواند داشته باشد را نشان می‌دهد و محدوده آبی تیره نشان دهنده حالت‌های نمونه‌برداری شده توسط پیش‌بینی‌های مدل است.

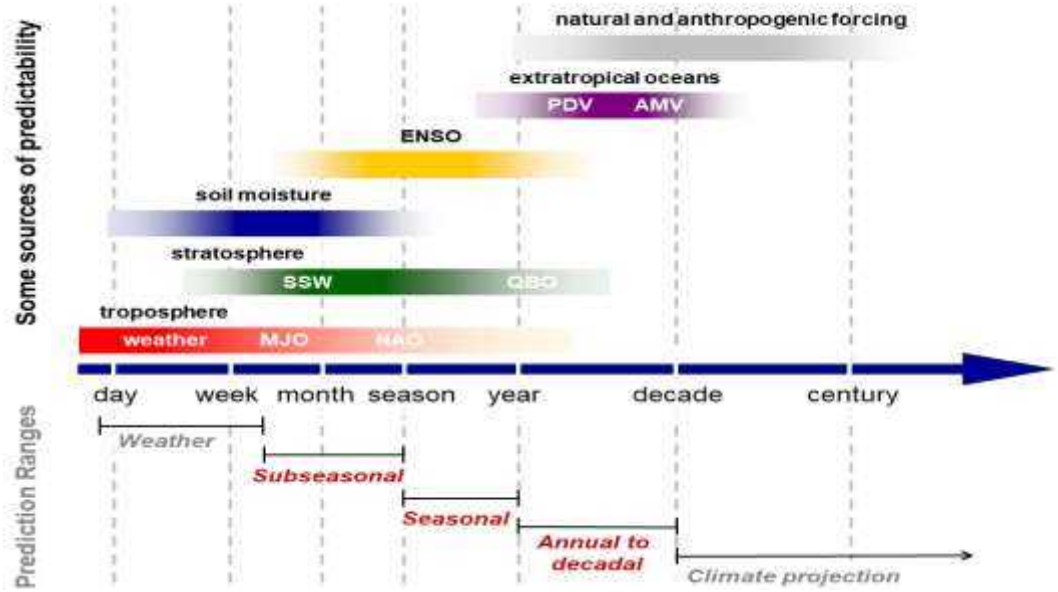


شکل (۴) الگوی شماتیک یک پیش‌بینی احتمالی آب و هوا با استفاده از عدم قطعیت های شرایط اولیه (اسلینگو و پالمر، ۲۰۱۱)

همچنانکه در شکل (۵) نیز نمایش داده شده است، شاخص‌های جوی-اقیانوسی بزرگ‌مقیاس مانند MJO[71]، NAO[72]، SSW[73]، QBO[74]، ENSO[75]، PDV[76] و AMV[77]، در شکل‌دهی به الگوهای آب‌وهوایی در بازه‌های زمانی مختلف (زیرفصلی تا دهه‌ای) نقش کلیدی دارند. بطوریکه در مقیاس‌های زمانی کوچکتر (پیش‌بینی‌های زیرفصلی تا فصلی)، نوسان مدن-جولیان (MJO) که یک ناهنجاری متحرک همرفتی در منطقه حاره‌ای است، می‌تواند بر بارش و دمای مناطقی مانند خاورمیانه و ایران، تأثیر بسزایی داشته باشد. همچنین شاخص نوسان اطلس شمالی (NAO) با تنظیم مسیر جت استریم و الگوهای فشار سطحی در عرض‌های میانی، در تعیین فراوانی سامانه‌های بارشی به‌ویژه در نیمه سرد سال در غرب ایران نقش دارد. پدیده‌هایی نظیر گرم شدن ناگهانی استراتوسفر (SSW) نیز از طریق تضعیف گردابه قطبی می‌توانند بر جابه‌جایی توده‌های هوای سرد و وقوع ناهنجاری‌های دمایی اثرگذار باشند. در بازه‌های زمانی میان‌مدت تا بلندمدت، شاخص‌هایی

[71] . Madden–Julian Oscillation (MJO)
[72] . North Atlantic Oscillation (NAO)
[73] . Sudden Stratospheric Warming (SSW)
[74] . Quasi-Biennial Oscillation (QBO)
[75] . El Niño–Southern Oscillation (ENSO)
[76] . Pacific Decadal Variability (PDV)
[77] . Atlantic Multidecadal Variability (AMV)

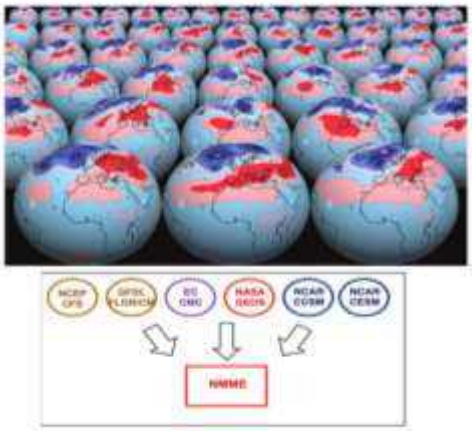
مانند ENSO، QBO، PDV و AMV اهمیت بیشتری می‌یابند. نوسان جنوبی-ال‌نینو (ENSO) از اصلی‌ترین محرک‌های تغییرات بین‌سالانه اقلیم جهانی است و با تأثیرگذاری بر گردش عمومی جو، بر الگوهای بارشی ایران، به‌ویژه در جنوب و جنوب‌شرق کشور، نقش موثری دارد. نوسان شبه‌دوسالانه استراتوسفری (QBO) نیز می‌تواند با تعدیل پاسخ جو به دیگر شاخص‌ها مانند MJO و ENSO، نقش واسط یا تقویتی دارد. در مقیاس‌های دهه‌ای، متغیرهایی مانند PDV و AMV بر دمای سطح دریا و الگوهای فشار میان‌مدت تأثیرگذارند و می‌توانند زمینه‌ساز خشکسالی‌های طولانی‌مدت یا دوره‌های ترسالی شوند[۷۸]. این شاخص‌ها به‌ویژه در مدل‌های اقلیم‌پایه برای پیش‌بینی روندهای بلندمدت در پیش‌نگری تغییر اقلیم کاربرد دارند و نقش آن‌ها در کاهش عدم قطعیت‌های مدل‌سازی اقلیم روزبه‌روز پررنگ‌تر می‌شود.



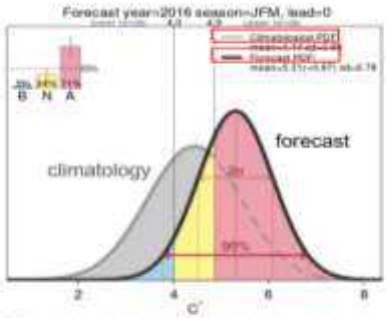
شکل (۵) نمایش شاخص‌های جوی-اقیانوسی بزرگ‌مقیاس در شکل‌دهی به الگوهای آب‌وهوایی در بازه‌های زمانی زیرفصلی تا دهه‌ای (مریفیلد و همکاران، ۲۰۲۰)

در نتیجه، شناخت، پایش و تلفیق مؤثر این شاخص‌ها در مدل‌های پیش‌بینی، یکی از پایه‌های بهبود دقت پیش‌بینی‌های اقلیمی به شمار می‌آید. یکی از رویکردهای پرکاربرد در کاهش عدم قطعیت پیش‌بینی بارش، استفاده از رویکرد مدل‌های چندگروهی است که از این طریق می‌توان پیش‌بینی‌های نزدیک به نرمال را افزایش داد (شکل ۶).

[۷۸] . نکته: در متون علمی جدید، به جای اصطلاح (Oscillation) که ماهیتی نوسانی و تکرارشونده را القا می‌کند، برای شاخص‌هایی مانند AMV و PDV از (Variability) استفاده می‌شود؛ برای اینکه نشان داده شود این نوسانات لزوماً منظم و چرخه‌ای نیستند. بنابراین، استفاده از AMV و PDV در مقالات روزآمدتر توصیه می‌شود.



The North American Multi-Model Ensemble (NMME)



Mariotti and Barrie (2018) & Merryfield (2024)

چالش‌های پیش‌بینی بارش

بر اساس جدول (۲)، چالش‌های پیش‌بینی زیرفصلی تا چندساله بارش به طور کلی در دو سطح علمی-فنی و کاربردی-عملیاتی قرار می‌گیرند. در سطح علمی، ضعف در نمایش فرآیندهای کلیدی اقلیم و محدودیت‌های ذاتی در مقداردهی اولیه، موجب کاهش مهارت مدل‌های دینامیکی می‌شود.

جدول (۲) چالش‌ها و راهکارها در پیش‌بینی زیرفصلی تا چندساله بارش

دسته چالش	شرح مشکل	پیامدها	راهکارهای موجود
محدودیت‌های مدل‌سازی فیزیکی	ضعیف MJO، فرآیندهای کلیدی مانند تله‌کانکشن‌ها و چرخه‌های ENSO اقیانوسی	کاهش مهارت پیش‌بینی به‌ویژه در مناطق عرض میانه و رخدادهای حدی	بهبود رزولوشن مدل‌ها، کالیبراسیون منطقه‌ای، ادغام داده‌های دیدبانی و بازتحلیل
عدم‌قطعیت در مقداردهی اولیه	خطاها در داده‌های ورودی جوی–اقیانوسی و فقدان مشاهدات کافی در برخی مناطق (اقیانوس‌ها، قطب‌ها)	کاهش دقت در بازه‌های ۲– ۶ هفته و چندساله	توسعه سامانه‌های رصدی (ماهواره‌ها، بویه‌ها)، داده‌گواری[۷۹] پیشرفته
محدودیت‌های یادگیری ماشین و داده‌محور	نیاز به داده‌های زیاد، عدم تبیین‌پذیری، عملکرد ضعیف در شرایط خارج از نمونه	کاهش اعتماد کاربران و محدودیت در استفاده عملیاتی	طراحی مدل‌های هیبریدی (یادگیری ماشین و فیزیک)، توسعه چارچوب‌های تبیین‌پذیری و سنجش عدم‌قطعیت

[79] . Data Assimilation

مرزهای بنیادی پیش‌بینی‌پذیری	ایجاد محدودیت ذاتی توسط نویز داخلی اقلیم و تغییرپذیری طبیعی برای پیش‌بینی چندساله	محدودیت پیش‌بینی در برخی مناطق/بازه‌ها	تمرکز بر شناسایی مناطق و متغیرهای با پیش‌بینی‌پذیری بالاتر، ترکیب چندمدلی[80]
شکاف پژوهش–کاربرد	هم‌راستا نبودن معیارهای مهارت فنی با نیازهای کاربر نهایی (کشاورزی، مدیریت سیلاب)	کم‌اعتمادی ذی‌نفعان و بهره‌برداری محدود	توسعه معیارهای کاربرمحور، هم‌زیستی پژوهشگران و نهادهای عملیاتی، طراحی خدمات اقلیمی کاربردی

همچنین هرچند روش‌های یادگیری ماشین توانسته‌اند برخی پیشرفت‌ها را ارائه دهند، اما تبیین‌پذیری و تعمیم‌پذیری پایین آن‌ها مانع از پذیرش گسترده در حوزه عملیاتی شده است. از سوی دیگر، وجود نویز در اقلیم مرزی برای پیش‌بینی‌های چندساله نشان می‌دهد که در برخی مناطق، اساساً بهبود قابل‌توجهی ممکن نیست. در سطح عملیاتی، فاصله میان خروجی‌های علمی و نیازهای کاربران (مثل مدیریت منابع آب یا پیش‌بینی بلایای طبیعی) همچنان زیاد است. راهکار اصلی در این حوزه، تمرکز بر طراحی سامانه‌های خدمات اقلیمی است که معیارهای کاربرمحور را در اولویت قرار دهند و با ذی‌نفعان در ارتباط نزدیک باشند. علاوه بر این، استفاده از مدل‌های هیبریدی (ترکیب مدل‌های دینامیکی و یادگیری ماشین) و داده‌گواری می‌تواند بخشی از محدودیت‌های فعلی را کاهش دهد. به موازات این اقدامات، تقویت شبکه‌های رصدی و همکاری بین‌المللی برای بهبود داده‌های اولیه از اهمیت بالایی برخوردار است.

جدول (۳) بررسی چالش‌های پیش بینی بارش را از منظر مقیاس زمانی مورد بررسی قرار می‌دهد. همچنانکه ملاحظه می‌شود، در مقیاس زیرفصلی، چالش اصلی ناشی از ماهیت گذرا و پرنویز پدیده‌های جوی–اقیانوسی مانند MJO و دیگر الگوهای دور پیوند است. محدودیت داده‌های ورودی و خطاهای مقداردهی اولیه نیز باعث می‌شود که پیش‌بینی در هفته‌های ۳–۴ به‌شدت افت کند. راهکار موجود در این حوزه نیز تمرکز بر بهبود داده‌گواری، شبکه‌های رصدی و مدل‌های هیبریدی فیزیکی-یادگیری‌ماشین است.

جدول (۳) چالش‌ها در سه افق پیش‌بینی بارش

مقیاس زمانی پیش‌بینی	دسته چالش	شرح مشکل	پیامدها	راهکارهای موجود
زیرفصلی (۲–۶ هفته)	فرآیندهای جوی–اقیانوسی	ضعف مدل‌ها در شبیه‌سازی نوسان مادن–جولیان (MJO)، موج‌های سیاره‌ای و دورپیوندها	مهارت پایین (به‌ویژه) در پیش‌بینی رخدادهای حدی	بهبود رزولوشن مدل‌ها، کالیبراسیون منطقه‌ای

[80] . Multi-model Ensemble

	مقداردهی اولیه روش‌های آماری و یادگیری ماشین	خطای زیاد در داده‌های ورودی جوی و اقیانوسی نیاز به داده زیاد و ضعف در تعمیم‌پذیری	کاهش قابلیت اعتماد در هفته‌های دوم و سوم محدودیت در استفاده عملیاتی	داده‌گواری پیشرفته، شبکه‌های رصدی قوی‌تر (ماهواره/بویه) مدل‌های هیبریدی (فیزیکی-یادگیریاشین)، چارچوب‌های تبیین‌پذیر
فصلی (۱–۶ ماه)	سیگنال‌های اقلیمی	وابستگی شدید به ENSO و الگوهای بزرگ‌مقیاس	مهارت پیش‌بینی متفاوت در مناطق مختلف (استوا بهتر از عرض‌های میانه)	تقویت مدل‌سازی تعاملات ENSO–اقیانوس–جو، استفاده از چندمدلی/گروهی
	خطاهای مدل	شبیه‌سازی ضعیف بارش‌های تجمعی و رخدادهای شدید	کاهش اعتماد کاربران	کالیبراسیون آماری، ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی
	شکاف پژوهش–کاربرد	معیارهای فنی با نیاز کاربر نهایی متفاوت	کم‌اعتمادی در بخش‌های عملیاتی	طراحی معیارهای کاربرمحور، مشارکت ذی‌نفعان
چندساله /ده‌ساله	نویز داخلی اقلیم	تغییرپذیری طبیعی داخلی[۸۱]	مرزهای ذاتی پیش‌بینی‌پذیری	شناسایی مناطق با پیش‌بینی‌پذیری بالا، تمرکز بر شاخص‌های اقلیمی پایدارتر
	مقداردهی اولیه اقیانوسی	داده‌های ناکافی از لایه‌های عمیق اقیانوس	کاهش قابلیت پیش‌بینی چندساله	گسترش شبکه‌های پایش اقیانوسی، بهبود داده‌گواری
	عدم قطعیت سناریوها	اثر تغییرات انسانی (انتشار GHG) و مدل‌های مختلف	اختلاف زیاد بین پیش‌بینی‌ها	استفاده از چندمدلی/گروهی و تحلیل سناریو
	شکاف پژوهش–کاربرد	کاربرد محدود در مدیریت ریسک بلندمدت	کم‌استفاده بودن در سیاست‌گذاری	توسعه خدمات اقلیمی بلندمدت، ترکیب با ارزیابی ریسک

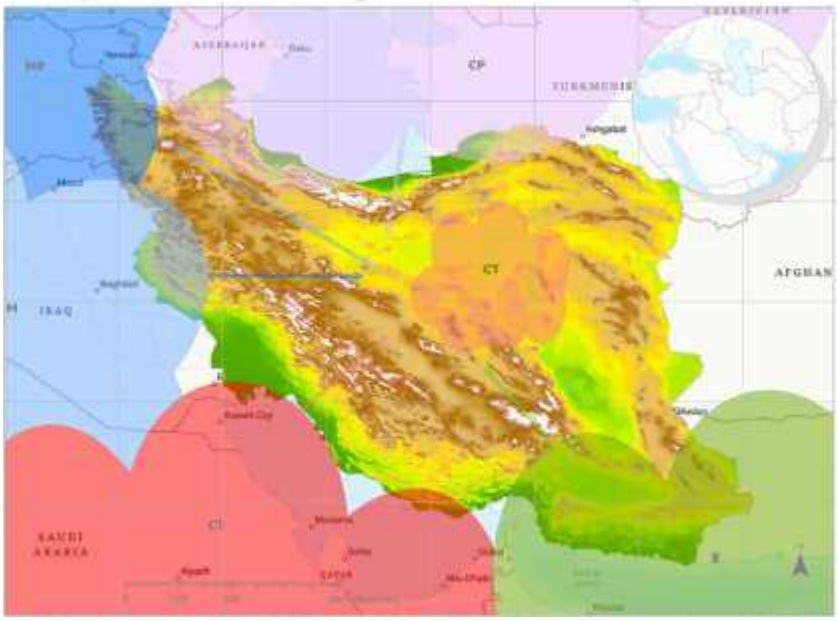
در مقیاس فصلی، پیش‌بینی تا حد زیادی وابسته به سیگنال‌های اقلیمی بزرگی مانند ENSO است. این باعث می‌شود برخی مناطق (مانند مناطق استوایی) قابلیت پیش‌بینی بالایی داشته باشند، اما در عرض‌های میانه و مناطق خشک مهارت پیش‌بینی محدود است. در این سطح، نقش مدل همادی، کالیبراسیون منطقه‌ای و توجه به معیارهای کاربرمحور (مثلاً کشاورزی یا مدیریت آب) کلیدی هستند. در مقیاس چندساله/ده‌ساله، مشکل اصلی نویز داخلی اقلیم و عدم قطعیت سناریوهای تغییر اقلیم است که برای پیش‌بینی محدودیت ایجاد می‌کند. با این حال، مناطقی که تحت تأثیر سیگنال‌های پایدارتر (مانند AMO، PDO یا نوسانات عمیق اقیانوسی) هستند، پتانسیل بیشتری دارند. راهکار مطلوب در این سطح می‌تواند استفاده از رویکرد ترکیب خروجی چندمدلی/گروهی، بهبود داده‌های اقیانوسی و طراحی خدمات اقلیمی بلندمدت

[81] . Internal Variability

باشد. همچنانکه در جداول (۲ و ۳) نیز نشان داده شده است، توجه به پرکردن شکاف بین پژوهش و کاربرد یکی از مهمترین مواردی است که لازم است مورد توجه جدی قرار گیرد. دستیابی به این مهم، نیازمند همکاری نزدیک پژوهشگران و نهادهای اجرایی است که متاسفانه در کشور ما تا حدود زیادی مورد غفلت واقع شده است.

چالش‌ها و مشکلات پیش‌بینی بارش در ایران

همچنانکه در شکل (۷) نیز قابل مشاهده است، کشور ایران علاوه بر توپوگرافی پیچیده و موقعیت ریاضی و نسبی خود در کره زمین، تحت تاثیر الگوها و توده‌های مختلف جوی است. از این رو، پیش‌بینی بارش ایران به شدت چالش‌برانگیز بوده و بر اساس مطالعات انجام شده از عدم قطعیت متفاوتی در مناطق مختلف کشور برخوردار است.



شکل (۷): تنوع ناهمواری و اقلیمی ایران

پژوهش نجفی و علیزاده (۲۰۲۵)، بررسی دقیقی از مهارت مدل‌سازی‌های میان‌مدت در ایران ارائه می‌دهند. آنها نشان دادند که مدل منطقه‌ای RegCM-4 مرتبط با CFSv2 برای پیش‌بینی در حوضه‌های نزدیک به دریای خزر از عملکرد نسبتاً بهتری برخوردار است؛ درحالیکه دقت مدل در مناطق مرکزی کشور کاهش محسوسی دارد. این تفاوت ناحیه‌ای، از این نظر حائز اهمیت است که مدیران منابع آب یا کشاورزی در شمال کشور می‌توانند تا حدودی به این پیش‌بینی‌ها اعتماد کنند، اما مناطق مرکزی باید با احتیاط عمل کنند.

مطالعه‌ای در نشریه معتبر نیچر علوم زمین (هوران و همکاران، ۲۰۲۴) درباره بارش‌های آسیای جنوب‌غربی (22-40°N، 30-70°E) نشان داده که حدود ۷۵٪ از نوسان بارش زمستانه در این ناحیه را می‌توان با الگوهای دور پیوند گرمسیری (تحت تأثیر غیرمستقیم ENSO از طریق اقیانوس هند) و نویز داخلی جو تبیین کرد. با این حال، نتایج پژوهش نشان داد که مدل پیش‌بینی فصلی نسل پنجم (SEAS5) و سیستم یکپارچه پیش‌بینی و تحقیقات سیستم زمین (SPEAR)[۸۲]، عملکرد قابل‌قبولی ارائه نداده و مهارت آنها محدود بود.

بررسی دهقانی و همکاران (۲۰۲۰) نشان داد که شاخص‌های اقلیمی بزرگ مانند ENSO، PDO و NAO تأثیر بسیار متغیری بر بارش فصلی ایران دارند؛ مثلا شاخص SOI در زمستان و PDO/NAO در فصل‌های دیگر بیشترین اثر را دارند. در مواردی، فازهای این شاخص‌ها می‌توانند تا ۱۰۰٪ موجب افزایش یا کاهش بارش شوند. این شرایط، برنامه‌ریزی برای کشاورزان/مدیران منابع آب را دشوار کرده است. از این‌رو، شرطی‌سازی پیش‌بینی‌ها بر اساس فاز شاخص‌ها کاربردی است.

اسدی‌رحیم‌بیگی و همکاران (۲۰۲۳)، پیش‌بینی فرین‌های بارشی در ایران در دوره ۲۰۲۱–۲۰۲۸ با استفاده از مدل همادی DCPP(عضو پروژه CMIP6) را انجام دادند. نتایج این پژوهش، نشان داد که فرین‌های بارشی (مثل تعداد روزهای بارش ≤۱۰ mm یا ≤۲۰mm ، شدت بارش تجمعیSDII ، RX1/3/5day) در جنوب‌غرب و شمال‌شرق ایران به صورت افزایشی خواهند بود؛ در حالی که سواحل جنوبی دریای خزر کاهش را تجربه می‌کنند. این نوع تحلیل می‌تواند برای برنامه‌ریزی بلندمدت بسیار مفید باشد، اما همچنان پیش‌بینی قابل‌اتکایی نیست. مقایسه چالش‌ها و مشکلات پیش‌بینی بارش در ایران در مقیاس‌های زمانی زیرفصلی تا دهه‌ای در جدول (۴) به تصویر کشیده شده است.

جدول (۴) چالش‌ها و مشکلات پیش‌بینی بارش در ایران

افق زمانی پیش‌بینی	چالش‌های کلیدی	پیامدها در ایران	منابع معتبر

[82] . The fifth-generation seasonal forecasting system (SEAS5) and Seamless System for Prediction and Earth System Research (SPEAR)

زیر فصلی (۲–۶ هفته)	عملکرد مدل‌های منطقه‌ای (RegCM4-CFSv2) متغیر است؛ در برخی حوزه‌ها (مثلاً حوضه‌های کنار خزر) عملکرد بهتر اما در مناطق مرکزی ضعیف است	عدم دقت در پیش‌بینی بارش میان‌مدت برای مدیریت منابع آب یا هشدار سیل	مطالعه نجفی م علیزاده (۲۰۲۵): مهارت ناحیه‌ای مدل RegCM-4 برای پیش‌بینی در داخل‌فصلی تا فصلی بررسی شد.
فصلی (۱–۶ ماه)	تاثیر قوی شاخص‌های اقلیمی بزرگ (ENSO، PDO، NAO) روی بارش فصلی در ایران؛ تاثیر متغیر فصلی و منطقه‌ای	نوسان شدید در بارش فصل‌ها بر اساس فاز شاخص‌ها؛ می‌تواند مدیریت آب را پیچیده کند	تحلیل دهفانی و همکاران (۲۰۲۰): اثر ENSO, PDO, NAO بر بارش فصلی در ایران، با وجود تغییراتی تا ±۱۰۰٪
چند ساله /ده ساله	پیش‌بینی چندساله با عدم‌قطعیت ذاتی بالا و نوسان داخلی بزرگ	نقاط ضعف در اعتماد و تصمیم‌گیری بلندمدت؛ چالش در برنامه‌ریزی آب	و همکاران (۲۰۲۳): مطالعه اسدی‌رحیم‌بیگی پیش‌بینی فرین‌های بارشی (استانداردهای R10، R20، RX) تا ۲۰۲۸ با مدل همادی ؛ نتایج بیانگر افزایش فرین‌ها در DCPP جنوب‌غرب و شمال‌شرق ایران بود.

نتیجه‌گیری

با توجه به ماهیت ذاتی و توزیع غیر نرمال بارش، پیش‌بینی آن در بازه‌های زیرفصلی، فصلی و چندساله در سطح جهانی با چالش‌ها و محدودیت‌های قابل توجهی مواجه است. با تغییر مقیاس زمانی، نقش برهمکنش پیچیده اجزاء سامانه اقلیم در این پیش‌بینی‌ها نمود بیشتری به خود می‌گیرد. بطوریکه در پیش‌بینی‌های زیرفصلی، مهارت مدل‌ها عمدتاً به توانایی شبیه‌سازی فرآیندهای جو–اقیانوس پیچیده مانند موج‌های سیاره‌ای، نوسانات مادن–جولیان (MJO) و دورپیوندها بستگی دارد. خطاهای مقداردهی اولیه نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش دقت پیش‌بینی دارند. در بازه‌های فصلی، شاخص‌های اقلیمی بزرگ‌مقیاس مانند ENSO، PDO و NAO اثر قابل توجهی بر نوسانات بارش دارند و باعث می‌شوند مهارت مدل‌ها

در مناطق مختلف متفاوت باشد. در پیش‌بینی‌های چندساله و ده‌ساله، نویز داخلی اقلیم و تغییرپذیری طبیعی، مرزهای ذاتی پیش‌بینی‌پذیری را تعیین می‌کند و پیش‌بینی بلندمدت بیشتر در قالب سناریوهای احتمالی باقی می‌ماند. از این‌رو، پیچیدگی‌ها و عدم قطعیت‌های ذاتی مرتبط با فرآیندهای جوی - اقیانوسی، تنوع منطقه‌ای و محدودیت‌های مدل، باعث ایجاد چالش‌های بیشتر در پیش‌بینی‌ها می‌شود. همچنین، محدودیت‌های روش‌های یادگیری ماشین و داده‌محور، به ویژه در زمینه تبیین‌پذیری و تعمیم‌پذیری، چالش‌های اضافی ایجاد می‌کنند. اگرچه پیشرفت‌ها در مدل‌سازی، روش‌های داده‌گواری و درک دینامیک اقلیم امیدهایی را برای بهبود پیش‌بینی‌ها ایجاد کرده است، اما پیش‌بینی بارش‌های محلی و مقادیر فرین، همچنان با چالش روبرو است.

در مجموع، می‌توان گفت: دینامیک پیچیده اتمسفر و تغییرپذیری کوتاه مدت، عدم قطعیت در محرک‌های جوی، محدودیت مدل‌های فعلی، عدم قطعیت شرایط آغازگری، برهمکنش پیچیده بین سامانه‌های جوی، تغییرپذیری در مقیاس منطقه‌ای، رویدادهای فرین نادر و تغییرپذیری شدید آنها، محدودیت پیش‌بینی پذیری، آشوبناکی و حساسیت و در نهایت تغییر اقلیم از جمله موارد مهم تاثیرگذار در کیفیت پیش‌بینی زیر فصلی است. همچنین، چالش‌هایی نظیر تغییرپذیری زمانی-مکانی بارش، محرک‌های پیچیده اقلیمی، محدودیت‌های مدل‌سازی، کیفیت و در دسترس بودن داده‌ها، عدم قطعیت در پیش‌بینی مقادیر فرین، تغییرپذیری بین سالانه، پیش‌بینی‌پذیری در مقیاس منطقه‌ای و محلی و افزایش عدم قطعیت تحت تاثیر تغییر اقلیم، از مهم‌ترین چالش‌های پیش‌بینی فصلی و چنددهه‌ای بارش در ایران و جهان است (ماریوتی و باری[83]، ۲۰۱۸)

در ایران، این چالش‌ها با ویژگی‌های اقلیمی و مکانی خاص کشور (شکل ۷) تشدید می‌شوند. برخی پژوهش‌ها (مانند نجفی و علیزاده، ۲۰۲۵) نشان دادند که پیش‌بینی زیرفصلی بارش با استفاده از مدل‌های منطقه‌ای مانند RegCM-4 در حوضه‌های شمالی و نزدیک دریای خزر نسبتاً قابل اعتماد است، اما در مناطق مرکزی و خشک کشور همچنان دقت پایین است. در مقیاس فصلی، اثرگذاری شاخص‌های اقلیمی بزرگ‌مقیاس مانند انسو بر بارش ایران باعث نوسانات شدید در مقادیر بارش فصل‌ها شده (دهقانی و همکاران، ۲۰۲) و خطاهای داده‌های ماهواره‌ای در مناطق خشک و نیمه‌خشک، قابلیت استفاده عملی را محدود می‌کند. در بازه‌های چندساله و ده‌ساله، تغییرپذیری طبیعی، نوسان داخلی اقلیم و عدم‌قطعیت سناریوهای آینده موجب می‌شود پیش‌بینی‌ها بیشتر جنبه سناریویی داشته باشند و اعتماد به آن‌ها برای برنامه‌ریزی بلندمدت محدود باشد.

پیشرفت‌های مستمر در مدل‌سازی اقلیمی، جمع‌آوری داده‌ها و شناخت محرک‌های آب و هوایی، معیارهای کلیدی در بهبود مهارت پیش‌بینی بارش هستند. بنابراین، برای ارتقای قابلیت پیش‌بینی بارش و کاهش فاصله میان پژوهش و کاربرد در ایران، تقویت شبکه‌های رصدی و داده‌گواری، توسعه مدل‌های منطقه‌ای متناسب با اقلیم ایران، استفاده از پیش‌بینی‌های

[83] . Mariotti and Barrie

دینامیکی و داده‌محور، بهبود تکنیک های پس پردازش، توسعه همکاری‌های بین‌المللی، به اشتراک‌گذاری داده‌ها و ارتباط بیشتر با ذینفعان و آماری و تلفیق نتایج با دانش بومی و سناریوهای مدیریتی ضروری است. این اقدامات می‌توانند نقش مهمی در بهبود مدیریت منابع آب و کاهش ریسک بلایای مرتبط با بارش در کشور ایفا کنند.

منابع و مآخذ

Najafi, M.S. and Alizadeh, O. (2025). The Skill of RegCM-4 in Forecasting Iran's Precipitation: A Basin-Scale Intra-Seasonal to Seasonal Analysis. Research Square. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-6556056/v1

Merryfield, B. (2024). Seasonal Forecasting Webinar, An online presentation, University of Guilan.

Horan, M.F., et al. (2024). Winter precipitation predictability in Central Southwest Asia and Its Representation in Seasonal Forecast Systems. npj Climate and Atmospheric Science. https://doi.org/10.1038/s41612-024-00594-5

Doblas-Reyes, F. J., et al. (2023). Seasonal climate predictions and predictability. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(1), 37-55.

Asadi-RahimBeygi, N. , et al. (2023). The prediction of the Precipitation Extremes over Iran for the Next Decade (2021-2028) usingthe Decadal Climate Prediction Project contribution to CMIP6 (CMIP6-DCPP). Journal of the Earth and Space Physics, 49(3), 707-725. doi: 10.22059/jesphys.2023.351678.1007474

Sillmann, J., et al. (2023). Future changes in seasonal precipitation extremes and their predictability. *Nature Climate Change*, 13(5), 404-412.

Zhou, L., et al. (2021). Seasonal precipitation forecasting using global climate models: Challenges and advancements. *Climate Dynamics*, 56(5-6), 1421-1435.

Räisänen, J., et al. (2021). Challenges in seasonal precipitation projections in a changing climate: Insights from recent CMIP6 simulations. *Climate Dynamics*, 57(3-4), 753-773.

Merryfield, W. J., et al. (2020). Current and emerging developments in subseasonal to decadal prediction. *Bulletin of the American Meteorological Society, 101*, E869-E896. doi:10.1175/BAMS-D-19-0037.1.

Feng, J., et al. (2020). Influence of the Indian Ocean Dipole on the predictability of seasonal precipitation in Asia. *Nature Climate Change*, 10(5), 380-388.

Kew, S. F., et al. (2020). Improving seasonal precipitation prediction using multi-model ensemble approaches. *Journal of Climate*, 33(16), 6697-6715.

Dehghani, M., et al. (2020). Spatial Analysis of Seasonal Precipitation over Iran: Co-Variation with Climate Indices. Atmospheric and Oceanic Physics. https://doi.org/10.48550/arXiv.2001.09757

McGregor, G. R., et al. (2019). ENSO and its impacts on regional precipitation: New perspectives. *Geophysical Research Letters*, 46(12), 6712-6720.

https://www.wcrp-climate.org/images/WCRP_conferences/S2S_S2D_2018/pdf/Programme/orals/presentations/5_Annarita-Mariotti_LR.pdf
Slingo, J. and Palmer, T. (2011). Uncertainty in weather and climate predictionPhil. *Trans. R. Soc.* A.3694751–4767. https://doi.org/10.1098/rsta.2011.0161
Lorenz, E.N. (1963) Deterministic Nonperiodic Flow. *Journal of Atmospheric Sciences*, 20, 130-141.

Challenges of Subseasonal-to-Decadal Precipitation Prediction (with Emphasis on Iran)

Ruhollah Oji, Associate Professor of Climatology, University of Guilan

Absreact

Precipitation forecasting at sub-seasonal, seasonal, and multi-annual timescales faces significant challenges globally. At the sub-seasonal scale, model skill is limited by the complexity of atmosphere–ocean processes, such as planetary waves and the Madden–Julian Oscillation, as well as uncertainties in initial conditions. At the seasonal scale, large-scale climate indices (e.g., ENSO, PDO, NAO) play a dominant role in precipitation variability, while multi-annual and decadal forecasts are inherently constrained by internal climate variability and uncertainties in climate change scenarios. In Iran, these global challenges are amplified, leading to considerable spatial variability in forecast accuracy: sub-seasonal predictions are relatively reliable in northern basins, but accuracy is substantially lower in central and arid regions, and long-term forecasts are primarily scenario-based. Enhancing forecast utility requires strengthening observational networks, developing regionally tailored climate models, employing hybrid modeling approaches, and integrating forecasts with local knowledge and management scenarios.

Keywords: Seasonal forecasting challenges, precipitation, Iran

تاثیر تغییرات اقلیمی با تاکید بر خشکسالی بر امنیت غذایی در مناطق روستایی ایران

علی‌رضا جمشیدی*[۱]، جواد جهانگیرزاده[۲]

۱- استادیار گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
۲- استادیار گروه جامعه شناسی، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

*نویسنده مسئول al.jamshidi@urmia.ac.ir

چکیده

هدف این تحقیق، تحلیل تأثیر تغییرات اقلیمی، به‌ویژه خشکسالی، بر امنیت غذایی در مناطق روستایی است. روش‌شناسی این مطالعه به صورت توصیفی-تحلیلی و مبتنی بر بررسی‌های کتابخانه‌ای طراحی شده است. داده‌های مورد نیاز از طریق مطالعه اسناد معتبر، مقالات علمی و گزارش‌های سازمان‌های بین‌المللی جمع‌آوری شده‌اند. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که خشکسالی به عنوان یکی از اصلی‌ترین پیامدهای تغییرات اقلیمی، به کاهش تولید محصولات کشاورزی، افزایش قیمت مواد غذایی و کاهش درآمد خانوارهای روستایی منجر شده و در نهایت امنیت غذایی را تهدید می‌کند. همچنین، یافته‌ها حاکی از آن است که مناطق روستایی به دلیل وابستگی مستقیم به منابع طبیعی، بیشترین آسیب‌پذیری را در برابر این تغییرات اقلیمی تجربه می‌کنند. این مقاله همچنین به ارائه راهکارهای سازگاری و سیاست‌های مناسب برای کاهش اثرات منفی خشکسالی بر امنیت غذایی پرداخته و به دنبال یافتن راه‌حل‌هایی برای تقویت تاب‌آوری جوامع روستایی در برابر این چالش‌ها است. در نهایت، این تحقیق به اهمیت توجه به مسائل محیط زیستی و نیاز به سیاست‌گذاری‌های مؤثر در این زمینه تأکید می‌کند.

کلید واژه‌ها: تغییرات اقلیمی، خشکسالی، امنیت غذایی، مناطق روستایی، سازگاری

مقدمه

تغییرات اقلیمی به عنوان یکی از بزرگترین چالش‌های قرن حاضر، اثرات گسترده‌ای بر سیستم‌های طبیعی و انسانی دارد. این تغییرات، ناشی از فعالیت‌های انسانی و افزایش گازهای گلخانه‌ای، منجر به تغییر در الگوهای آب و هوایی، افزایش دما، و بروز پدیده‌هایی چون خشکسالی، طوفان‌های شدید و سیلاب‌ها می‌شود. در میان پیامدهای مختلف تغییرات اقلیمی، خشکسالی به عنوان یکی از مخرب‌ترین پدیده‌ها، تأثیر مستقیمی بر بخش کشاورزی و امنیت غذایی دارد.

ایران، به عنوان کشوری با تنوع اقلیمی و جغرافیایی، در دهه‌های اخیر با دوره‌های متمادی خشکسالی روبرو بوده است. طبق گزارش سازمان هواشناسی ایران، بیش از ۸۰ درصد از کشور در معرض خطر خشکسالی قرار دارد و این مسئله به ویژه

در مناطق روستایی که معیشت ساکنان آن به شدت به منابع آبی و خاکی وابسته است، آثار مخربی بر جای گذاشته است (صفری و همکاران، ۱۴۰۰). در این مناطق، کشاورزی به عنوان یکی از ارکان اصلی اقتصاد محلی، تحت تأثیر خشکسالی قرار می‌گیرد و این امر می‌تواند به کاهش تولیدات کشاورزی و در نتیجه، تهدید امنیت غذایی منجر شود.

امنیت غذایی به عنوان یکی از ارکان اصلی توسعه پایدار، در مناطق روستایی ایران از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با توجه به اینکه حدود ۲۶ درصد از جمعیت ایران در مناطق روستایی سکونت دارند و بخش عمده‌ای از تولیدات کشاورزی کشور در این مناطق انجام می‌شود، بررسی تأثیر خشکسالی بر امنیت غذایی این مناطق از جنبه‌های مختلف اقتصادی، اجتماعی و امنیتی حائز اهمیت است (محمدی و رضوانی، ۱۳۹۹). این موضوع به ویژه در شرایطی که تغییرات اقلیمی و خشکسالی به طور فزاینده‌ای در حال افزایش است، ضروری به نظر می‌رسد.

بر اساس تحقیقات انجام شده، خشکسالی به طور مستقیم بر ابعاد مختلف امنیت غذایی تأثیر می‌گذارد. به عنوان مثال، مطالعه‌ای که توسط Smith et al. (2021) انجام شده است، نشان می‌دهد که خشکسالی مهمترین عامل تهدیدکننده امنیت غذایی در مناطق روستایی کشورهای در حال توسعه است. این مطالعه تأکید می‌کند که کاهش تولیدات کشاورزی، افزایش قیمت مواد غذایی و کاهش درآمد خانوارها از جمله پیامدهای خشکسالی هستند. همچنین، گزارش FAO (2022) نیز به کاهش ۱۵ درصدی تولیدات کشاورزی در خاورمیانه به دلیل خشکسالی اشاره کرده است.

خشکسالی نه تنها بر تولید مواد غذایی تأثیر می‌گذارد، بلکه به کاهش تنوع غذایی نیز منجر می‌شود. در شرایط خشکسالی، کشاورزان مجبور به کشت محصولات مقاوم‌تر و کم‌آب‌تر می‌شوند که این موضوع می‌تواند به کاهش تنوع غذایی و در نتیجه، کاهش کیفیت تغذیه در مناطق روستایی منجر شود. این وضعیت می‌تواند به افزایش بیماری‌های مرتبط با تغذیه و کاهش کیفیت زندگی ساکنان این مناطق منجر گردد.

علاوه بر این، خشکسالی می‌تواند به افزایش مهاجرت از مناطق روستایی به شهری منجر شود. در شرایطی که کشاورزان قادر به تأمین معیشت خود نیستند، بسیاری از آنها به دنبال فرصت‌های شغلی در شهرها می‌گردند. این روند می‌تواند منجر به کاهش نیروی کار در بخش کشاورزی و افزایش فشار بر منابع شهری شود.(FAO, 2022)

با توجه به این مسائل، هدف این پژوهش بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی با محوریت خشکسالی بر امنیت غذایی در مناطق روستایی ایران است. سؤالات اصلی تحقیق عبارتند از: چگونه خشکسالی بر ابعاد مختلف امنیت غذایی در مناطق روستایی تأثیر می‌گذارد؟ و چه راهکارهایی برای کاهش اثرات خشکسالی بر امنیت غذایی در این مناطق وجود دارد؟

این تحقیق به دنبال تحلیل دقیق اثرات خشکسالی بر امنیت غذایی در مناطق روستایی ایران و ارائه راهکارهایی برای مقابله با این چالش‌ها است. با توجه به اهمیت این موضوع، نتایج این پژوهش می‌تواند به سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان کمک کند تا راهکارهای مناسبی برای بهبود امنیت غذایی در شرایط خشکسالی ارائه دهند و به توسعه پایدار مناطق روستایی کمک کنند.

اهمیت موضوع:

تحقیق در مورد تأثیر تغییرات اقلیمی، به ویژه خشکسالی، بر امنیت غذایی در مناطق روستایی ایران از اهمیت بالایی برخوردار است. این مناطق که تقریباً ۲۶ درصد از جمعیت کشور را در خود جای داده‌اند، به شدت به کشاورزی و منابع آبی وابسته‌اند. خشکسالی‌های مکرر و تغییرات اقلیمی می‌توانند منجر به کاهش تولیدات کشاورزی، افزایش قیمت مواد غذایی و کاهش درآمد خانوارها شوند، که این مسائل به نوبه خود تهدیدی جدی برای امنیت غذایی و معیشت ساکنان این مناطق به حساب می‌آید. با توجه به اینکه امنیت غذایی یکی از ارکان اصلی توسعه پایدار است، درک عمیق‌تر از این چالش‌ها و ارائه راهکارهای موثر برای مقابله با آن‌ها می‌تواند به بهبود کیفیت زندگی در مناطق روستایی و ارتقای پایداری اجتماعی و اقتصادی کمک کند. این تحقیق می‌تواند به سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان در طراحی استراتژی‌های مناسب یاری رساند.

هدف مقاله:

این پژوهش با هدف بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی با محوریت خشکسالی بر امنیت غذایی در مناطق روستایی ایران انجام شده است. سؤالات اصلی تحقیق عبارتند از:

خشکسالی چگونه بر ابعاد مختلف امنیت غذایی در مناطق روستایی تأثیر می‌گذارد؟

چه راهکارهایی برای کاهش اثرات خشکسالی بر امنیت غذایی در این مناطق وجود دارد؟

ادبیات تحقیق

سلیمانی و همکاران (۱۳۹۵)، در پژوهشی با هدف تبیین فرایند آسیب‌پذیری روستاییان نسبت به خشکسالی می‌باشد. نتایج این مطالعه نشان داد که علل آسیب پذیری روستاییان نسبت به خشکسالی، متنوع و وسیع بوده و یازده مقوله را دربرمی گیرد که در قالب مدل‌های پارادایمی شامل شرایط علّی (عوامل آب و هوایی)، پدیده، زمینی (محیطی و معیشتی)، شرایط مداخله گر (فنی و غیر فنی) و پیامدها (اقتصادی ، اجتماعی و زیست محیطی) است .

طولابی نژاد و همکاران (۱۳۹۵)، در مطالعه‌ای با هدف بررسی روش‌های سازگاری کشاورزان با تغییرات آب و هوایی، همچنین نقش آن در امنیت غذایی خانوارهای روستایی بود. نتیجه یافته‌های آن‌ها نشان می دهد۹۷درصد از خانوارهای مورد بررسی، آگاه بودند که تغییرات آب و هوا روی داده و اثرات زیادی بر روی محصولات کشاورزی آن‌ها داشته است. از میان اثرات تغییرات آب و هوایی، خشکسالی و سیل، و در مورد اثرات احتمالی این تغییرات، کاهش سطح زیر کشت محصولات مهم ترین نقش را در ناامنی غذایی کشاورزان داشته است. در زمینه امنیت غذایی یافته‌ها نشان داد که ۵۳ درصد از خانوارها برای تامین مواد غذایی مشکلی نداشته؛ ۳۲ درصد به غذا دسترسی داشته اما کیفیتش پایین بوده؛ ۱۱ درصد معتقد بودند برای تامین مواد غذایی خانواده‌شان نگران بودند، همچنین ۳ درصد از پاسخ دهندها معتقد بودند که در برخی مواقع از بین مواد غذایی درسه وعده، فقط به یک یا دو وعده دسترسی داشتند. در نهایت می‌توان گفت، خانواده‌هایی که نسبت به تغییرات آب و هوایی آسیب پذیر بودند دچار ناامنی غذایی بالاتری نیز هستند.

اودماله و همکاران[84](۲۰۱۴) در بررسی ادراک کشاورزان از اثرهای خشکسالی سازگاری علمی و اجرایی اقدام‌های کاهشی در ایالت ماهاراشتراهند نشان دادند که از مهمترین اثرهای اقتصادی عبارت است از، کاهش عملکرد غلات و حبوبات، محصول‌های‌باغی، تولیدهای دامی و از دست دادن شغل بودند. مهاجرت، سلامت، تحصیل کودکان و سوءتغذیه نیز مهمترین اثرهای‌اجتماعی، تخریب جنگل‌هاومراتع، کاهش کیفیت آب، صدمه زیستگاه حیات وحش و تخلیه آب‌های‌زیر زمینی از اهمیت ترین‌آثار محیط زیستی خشکسالی بودند.

کومار[85] (۲۰۰۳) به تحلیل امنیت غذایی و کشاورزی پایدار در هند براساس چالش مدیریت آب پرداخت. نتایج مطالعات ایشان نشان دادکه به طور عمده، مشکلات تخریب منابع مانند تخلیه آب‌های زیرزمینی، شوری و فرسایش زمین امنیت غذایی را تضعیف می کند.

فارا[86] (۲۰۰۱) در مطالعه‌ای با هدف چگونگی آسیب‌پذیری اجتماعی ناشی از خشکسالی در جنوب نامیبیا، مدلی براساس فشارهایی که باعث آسیب‌پذیری از خشکسالی می‌شوند، ارائه داد. در این مدل از خشکسالی با عنوان آسیب یا حادثه نام برده است. اجزای دیگر این مدل شامل علل ریشه‌ای (دسترسی نامساوی به زمین، مناطق استعمارزده توسعه نیافته، رسوم و سنت‌های محدود کننده، کمبودحقوق سیاسی)، فشارهای پویا (کمبود فرصت‌های شغلی، سرمایه‌گذاری اقتصادی نامناسب، فشار بر منابع طبیعی، فقدان بازارهای محلی و امکانات مناسب)، شرایط نامطمئن (سطوح پایین درآمد، دسترسی ضعیف به آب و مواد غذایی، توانایی نداشتن یا ضعیف بودن توان مقابله با بلایا، پایین بودن سطح تحصیلات) و مصیبت‌ها (کاهش پایین قیمت فروش محصولات کشاورزی، افزایش نرخ مرگ و میر دام، گسترش سوء تغذیه، فرسایش خاک و پایین بودن ایستادگی در برابر بیماری‌ها).

سایکو[87] (۱۹۹۸) در پژوهشی با عنوان ابعاد جغرافیایی و اجتماعی-اقتصادی بحران دریاچه آرال و تاثیر آن بر پتانسیل‌های موجود در جامعه ، در کل چنین نتیجه گیری می کند که تغییرات اساسی در دسترسی به غذا بین مردم در منطقه رخ داده است. همچنین، مواردی مانند کاهش استانداردهای زندگی، بروز بیماری‌های جسمانی، رشد نرخ بیکاری و مهاجرت به خارج از منطقه را از فرایندهای‌اجتماعی و اقتصادی مرتبط با این بحران بیان می کند.

در نهایت مطالعه پیشینه تحقیق نشان می‌دهد که خشکسالی به عنوان یک پدیده طبیعی، تأثیرات عمیق و گسترده‌ای بر امنیت غذایی و آسیب‌پذیری روستاییان دارد. نتایج این مطالعات حاکی از آن است که علل آسیب‌پذیری روستاییان متنوع بوده و شامل عوامل آب و هوایی، شرایط محیطی و معیشتی، و پیامدهای اقتصادی و اجتماعی است. همچنین، آگاهی بالای خانوارهای روستایی از تأثیرات تغییرات آب و هوایی و ارتباط مستقیم این تغییرات با ناامنی غذایی، به وضوح مشخص است. کاهش عملکرد محصولات کشاورزی و مشکلات اجتماعی ناشی از خشکسالی، نشان‌دهنده ارتباط مستقیم بین این پدیده و معیشت روستاییان است. علاوه بر این، چالش‌های مدیریت منابع آبی و تخریب آن‌ها به طور جدی امنیت غذایی را تضعیف

[84] Udmale et, al
[85] Kumar
[86] Fara
[87] Saiko

می‌کند. ابعاد اجتماعی و اقتصادی خشکسالی نیز می‌تواند منجر به کاهش استانداردهای زندگی و افزایش ناامنی غذایی شود. بنابراین، این مطالعات به اهمیت درک عمیق‌تر از تأثیرات خشکسالی بر امنیت غذایی و نیاز به راهکارهای مؤثر برای مقابله با آن در مناطق روستایی تأکید می‌کنند.

تعاریف و مفاهیم کلیدی:

تغییرات اقلیمی :به تغییرات بلندمدت در الگوهای آب و هوایی منطقه‌ای و جهانی اطلاق می‌شود.

خشکسالی :دوره ممتدی از شرایط خشک که به طور غیرعادی طولانی باشد و باعث عدم تعادل هیدرولوژیکی شود.

امنیت غذایی :دسترسی فیزیکی، اجتماعی و اقتصادی همه افراد به غذای کافی، سالم و مغذی برای تأمین نیازهای غذایی و ترجیحات غذایی آنها برای یک زندگی فعال و سالم.

روش‌شناسی

نوع تحقیق:

این پژوهش از نوع تحقیقات **توصیفی-تحلیلی** است که با روش **کتابخانه‌ای** انجام شده است.

جمع‌آوری داده‌ها:

داده‌های مورد نیاز از طریق منابع زیر گردآوری شده‌اند:

مقالات علمی منتشر شده در پایگاه‌های معتبر داخلی و خارجی

گزارش‌های سازمان‌های بین‌المللی(FAO, IPCC, World Bank)

آمار و اطلاعات مرکز آمار ایران

گزارش‌های وزارت جهاد کشاورزی

تحلیل داده‌ها:

در این پژوهش از روش **تحلیل محتوای کیفی** و **سنتز سیستماتیک** پژوهش‌های پیشین استفاده شده است. داده‌ها به صورت کیفی تحلیل و در قالب جداول و نمودارهای تحلیلی ارائه شده‌اند.

نتایج

در این بخش، به ارائه یافته‌های تحقیق در زمینه تأثیر تغییرات اقلیمی و خشکسالی بر امنیت غذایی در مناطق روستایی ایران پرداخته می‌شود. این یافته‌ها بر اساس داده‌های جهانی و مطالعات معتبر ارائه شده‌اند.

۱- کاهش بارش‌ها و افزایش دما

مطالعات جهانی نشان می‌دهد که تغییرات اقلیمی به کاهش بارش‌ها و افزایش دما منجر شده است. بر اساس گزارش‌های سازمان ملل، در دهه‌های اخیر، بسیاری از مناطق جهان با کاهش بارش و افزایش دما مواجه بوده‌اند. این تغییرات به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، مانند بخش‌هایی از ایران، تأثیرات منفی بر کشاورزی و امنیت غذایی دارند.

۲- تأثیر خشکسالی بر تولید محصولات کشاورزی

طبق گزارش‌های سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد(FAO) ، خشکسالی‌های متوالی در سال‌های اخیر منجر به کاهش تولید محصولات کشاورزی در بسیاری از کشورهای در حال توسعه شده است. به عنوان مثال، در سال ۲۰۲۰، خشکسالی در برخی از مناطق خاورمیانه باعث کاهش ۳۰ تا ۵۰ درصدی تولید گندم و دیگر محصولات اصلی کشاورزی شد. این کاهش تولید نه تنها بر امنیت غذایی بلکه بر معیشت کشاورزان نیز تأثیر منفی گذاشته است.

۳- افزایش قیمت مواد غذایی

بر اساس گزارش‌های بانک جهانی، افزایش قیمت مواد غذایی در نتیجه کاهش تولید و افزایش تقاضا، یکی از پیامدهای مهم خشکسالی است. به عنوان مثال، در سال ۲۰۲۱، قیمت جهانی غلات به بالاترین سطح خود رسید و این موضوع به شدت بر کشورهای وابسته به واردات مواد غذایی تأثیر گذاشت. این افزایش قیمت‌ها به ویژه برای خانواده‌های کم‌درآمد، فشار اقتصادی زیادی به همراه دارد.

۴- نظرسنجی از روستاییان

در تحقیقاتی که در کشورهای مختلف انجام شده، نشان داده شده است که روستاییان به شدت نگران تأثیر خشکسالی بر امنیت غذایی خود هستند. بر اساس یک مطالعه در آفریقا، حدود ۷۰ درصد از کشاورزان اعلام کردند که خشکسالی بر تولید و درآمد آن‌ها تأثیر منفی گذاشته است. این نگرانی‌ها در ایران نیز مشهود است و بسیاری از کشاورزان با مشکلات ناشی از کاهش منابع آب و افزایش هزینه‌ها مواجه هستند.

لذا به صورت کلی می‌توان گفت که تغییرات اقلیمی و خشکسالی تأثیرات عمیقی بر امنیت غذایی در مناطق روستایی ایران دارند. این تأثیرات شامل کاهش تولید محصولات کشاورزی، افزایش قیمت مواد غذایی و نگرانی‌های اجتماعی و اقتصادی روستاییان است. برای مقابله با این چالش‌ها، نیاز به اتخاذ تدابیر مؤثر و جامع در مدیریت منابع آب و حمایت از کشاورزان وجود دارد.

جدول ۱: اثرات خشکسالی بر شاخص‌های امنیت غذایی در مناطق روستایی ایران

درصد تغییر	وضعیت پس از خشکسالی	وضعیت قبل از خشکسالی	شاخص امنیت غذایی
۴۰٪ کاهش	نامناسب	مناسب	دسترسی به غذا

۳۵٪ کاهش	ناپایدار	پایدار	درآمد خانوارهای روستایی
۴۵٪ کاهش	ناکافی	کافی	تولید محصولات اساسی
۵۰٪ کاهش	محدود	متنوع	تنوع غذایی

بحث در مورد یافته‌ها:

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که خشکسالی بر تمامی ابعاد امنیت غذایی در مناطق روستایی تأثیر منفی داشته است. به طور مشخص:

کاهش تولید محصولات کشاورزی به میزان ۵۰-۳۰ درصد

افزایش قیمت مواد غذایی اولیه به میزان ۴۰-۲۵ درصد

کاهش درآمد واقعی خانوارهای روستایی به میزان ۳۵-۳۰ درصد

افزایش نرخ مهاجرت از مناطق روستایی به شهری

بحث و نتیجه‌گیری

این پژوهش نشان داد که تغییرات اقلیمی و به ویژه پدیده خشکسالی، تهدید جدی برای امنیت غذایی در مناطق روستایی ایران محسوب می‌شود. اثرات این پدیده در ابعاد مختلف اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی قابل مشاهده است. تغییرات اقلیمی به عنوان یکی از چالش‌های بزرگ قرن بیست و یکم، تأثیرات عمیقی بر زندگی انسان‌ها و اکوسیستم‌ها دارد. در این میان، خشکسالی به عنوان یکی از اثرات بارز تغییرات اقلیمی، به ویژه در مناطق روستایی ایران، به یک معضل جدی تبدیل شده است. این بخش به بررسی تأثیرات خشکسالی بر امنیت غذایی در مناطق روستایی ایران می‌پردازد و به تحلیل پیامدهای اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی آن خواهد پرداخت.

تأثیر خشکسالی بر امنیت غذایی

خشکسالی به عنوان یک پدیده طبیعی، به کاهش بارش‌ها و افزایش دما منجر می‌شود که این امر تأثیرات مستقیمی بر کشاورزی و تولید غذا دارد. در مناطق روستایی ایران، که بخش عمده‌ای از معیشت مردم به کشاورزی وابسته است، خشکسالی می‌تواند منجر به کاهش قابل توجهی در تولید محصولات کشاورزی شود. این کاهش تولید نه تنها به ناامنی غذایی می‌انجامد، بلکه بر معیشت روستاییان نیز تأثیر منفی می‌گذارد.

۱-کاهش تولید محصولات کشاورزی

یکی از مهم‌ترین پیامدهای خشکسالی، کاهش عملکرد محصولات زراعی است. در شرایط خشکسالی، دسترسی به آب برای آبیاری محصولات کاهش می‌یابد و این امر باعث کاهش کیفیت و کمیت محصولات می‌شود. در نتیجه، کشاورزان با کاهش درآمد مواجه می‌شوند و این موضوع می‌تواند به ناامنی غذایی در خانواده‌ها منجر شود.

۲-افزایش قیمت مواد غذایی

کاهش تولید محصولات کشاورزی به افزایش قیمت مواد غذایی در بازار منجر می‌شود. در مناطق روستایی، که خانواده‌ها معمولاً به تولید خود وابسته‌اند، افزایش قیمت مواد غذایی می‌تواند فشار اقتصادی بیشتری به آن‌ها وارد کند. این فشار اقتصادی، به ویژه بر خانواده‌های کم‌درآمد، می‌تواند منجر به سوءتغذیه و کاهش سلامت عمومی شود.

۳- تغییرات در الگوی مصرف

خشکسالی همچنین می‌تواند به تغییرات در الگوی مصرف غذایی منجر شود. خانواده‌ها ممکن است به دلیل افزایش قیمت‌ها، از مصرف برخی مواد غذایی ضروری صرف‌نظر کنند و به سمت مواد غذایی ارزان‌تر و کم‌کیفیت‌تر بروند. این تغییرات می‌تواند به افزایش مشکلات بهداشتی و تغذیه‌ای در جامعه منجر شود.

پیامدهای اجتماعی

تأثیرات خشکسالی بر امنیت غذایی در مناطق روستایی ایران تنها به جنبه‌های اقتصادی محدود نمی‌شود، بلکه پیامدهای اجتماعی نیز به همراه دارد.

۱- مهاجرت روستاییان

یکی از پیامدهای ناامنی غذایی ناشی از خشکسالی، مهاجرت روستاییان به مناطق شهری است. با کاهش منابع معیشتی و افزایش فشار اقتصادی، بسیاری از خانواده‌ها مجبور به ترک زمین‌های خود و جستجوی فرصت‌های شغلی در شهرها می‌شوند. این مهاجرت‌ها می‌تواند به ایجاد مشکلات اجتماعی جدیدی در شهرها منجر شود و فشار بیشتری به زیرساخت‌های شهری وارد کند.

۲- افزایش نارضایتی اجتماعی

خشکسالی و پیامدهای آن می‌تواند به افزایش نارضایتی اجتماعی و تنش‌های محلی منجر شود. در شرایطی که منابع آبی محدود می‌شود، رقابت بر سر آب و منابع غذایی می‌تواند به بروز تنش‌ها و درگیری‌ها بین جامعه‌های محلی منجر شود. این تنش‌ها می‌توانند به افزایش خشونت و بی‌ثباتی اجتماعی در مناطق روستایی بیانجامند.

پیامدهای اقتصادی

خشکسالی همچنین تأثیرات عمیقی بر اقتصاد مناطق روستایی دارد.

۱- کاهش درآمد کشاورزان

کاهش تولید محصولات کشاورزی به طور مستقیم به کاهش درآمد کشاورزان منجر می‌شود. این کاهش درآمد می‌تواند به عدم توانایی کشاورزان در تأمین نیازهای اولیه خانواده‌ها منجر شود و در نهایت به افزایش فقر در مناطق روستایی بیانجامد.

۲- افزایش هزینه‌های تولید

کشاورزان ممکن است برای مقابله با خشکسالی مجبور به استفاده از روش‌های آبیاری جدید یا خرید آب از منابع دیگر شوند. این موضوع می‌تواند به افزایش هزینه‌های تولید منجر شود و در نهایت بر سودآوری کشاورزان تأثیر منفی بگذارد.

۳- تأثیر بر صنایع وابسته

خشکسالی همچنین می‌تواند تأثیرات منفی بر صنایع وابسته به کشاورزی، مانند صنایع غذایی و تبدیلی، داشته باشد. کاهش تولید محصولات کشاورزی به معنای کاهش مواد اولیه برای این صنایع است که می‌تواند به کاهش اشتغال و افزایش بیکاری در مناطق روستایی منجر شود.

راهکارهای مقابله با تأثیرات خشکسالی

برای کاهش تأثیرات خشکسالی بر امنیت غذایی در مناطق روستایی ایران، نیاز به اتخاذ راهکارهای مؤثر و جامع وجود دارد.

۱- مدیریت منابع آب

بهبود مدیریت منابع آب و استفاده بهینه از تکنولوژی‌های آبیاری می‌تواند به کاهش تأثیرات خشکسالی کمک کند. استفاده از سیستم‌های آبیاری قطره‌ای و جمع‌آوری آب باران می‌تواند به بهبود وضعیت آبیاری و افزایش تولید محصولات کمک کند.

۲- تنوع بخشی به کشت

تشویق کشاورزان به تنوع بخشی به کشت و استفاده از محصولات مقاوم به خشکی می‌تواند به افزایش تاب‌آوری کشاورزی در برابر خشکسالی کمک کند.

۳- آموزش و آگاهی

آموزش کشاورزان در زمینه تغییرات اقلیمی و تأثیرات آن بر کشاورزی می‌تواند به آن‌ها کمک کند تا با اتخاذ تصمیمات بهتر، از تأثیرات منفی خشکسالی بکاهند.

۴-حمایت‌های دولتی

حمایت‌های دولتی در قالب تسهیلات مالی، بیمه محصولات کشاورزی و برنامه‌های حمایتی می‌تواند به کشاورزان کمک کند تا در برابر تأثیرات خشکسالی مقاوم‌تر شوند.

نتیجه‌گیری

خشکسالی به عنوان یکی از پیامدهای تغییرات اقلیمی، تأثیرات عمیق و گسترده‌ای بر امنیت غذایی در مناطق روستایی ایران دارد. این تأثیرات نه تنها به جنبه‌های اقتصادی محدود نمی‌شود، بلکه پیامدهای اجتماعی و زیست‌محیطی نیز به همراه دارد. برای مقابله با این چالش، نیاز به اتخاذ راهکارهای مؤثر و جامع است که شامل مدیریت منابع آب، تنوع بخشی به کشت، آموزش کشاورزان و حمایت‌های دولتی باشد. با توجه به اهمیت امنیت غذایی برای توسعه پایدار و رفاه اجتماعی، توجه به تأثیرات خشکسالی و اتخاذ تدابیر لازم برای مقابله با آن، امری ضروری به شمار می‌آید.

- پیشنهادات:

سیاست‌های کوتاه‌مدت:

ایجاد صندوق حمایت از کشاورزان آسیب‌دیده از خشکسالی

اجرای برنامه‌های تغذیه‌ای هدفمند در مناطق آسیب‌دیده

سیاست‌های بلندمدت:

توسعه سیستم‌های آبیاری نوین

ترویج کشاورزی پایدار و مقاوم به خشکی

توسعه بیمه محصولات کشاورزی

راهکارهای فنی:

استفاده از ارقام مقاوم به خشکی

توسعه روش‌های جمع‌آوری و ذخیره‌سازی آب باران

پیشنهادات برای تحقیقات آینده:

بررسی اثرات اجتماعی خشکسالی بر جوامع روستایی

مطالعه راهکارهای بومی مقابله با خشکسالی

پژوهش در زمینه فناوری‌های نوین کشاورزی در شرایط خشکسالی

منابع

صفری، ع. و همکاران. (۱۴۰۰). اثرات خشکسالی بر تولید گندم در استان فارس. مجله تحقیقات اقتصاد کشاورزی.
محمدی، م. و رضوانی، م. (۱۳۹۹). تأثیر تغییرات اقلیمی بر الگوی کشت در مناطق روستایی. فصلنامه علوم محیطی.
سلیمانی، عادل، حسن افراخته، فرهاد عزیزپورواصغر طهماسبی (۱۳۹۵)؛ «تبیین فرآیند آسیب پذیری روستاییان نسبت به خشکسالی(مطالعه موردی: روستای پشتگ-شهرستان روانسر)»؛ پژوهش‌های‌روستایی، شماره۱۶، صص۹۰-۷۹.
طولابی نژاد، مهرشاد، طولابی نژادمیثم و سید علی طباطبایی (۱۳۹۶)؛ «سازگاری کشاورزان با تغییرات آب و هوایی و نقش آن در امنیت غذایی خانوارهای روستایی شهرستان پلدختر»؛ مخاطرات محیط طبیعی، دوره۶، شماره۱۳، صص۹۰-۶۷.

Udmale, P., Ichikawa, Y., Manandhar. S., Ishidaira, H. and kime, A.,(2014),Farmers perception of droutght imtacts, local adouptation and administrative mitigation measures in maharashtar state, India. International Journal of Disaster Risk Reduction. 10, 250-269.
Kumar , M, D. (2003).Food ssecurity and sustainable agriculture in India: the management Challenge, Colombo, Sir Lake: International Water Management Institute, Working Paper, 60: 1-43.
Fara, K. (2001). How natural are ‘natural disasters’? Vulnerability to drought of communal farmers in southern Namibia. Risk Management, 3(3): 47-63.
Saiko, T. S. (1998). Geographical and Socio- Economic Dimensions of the Aral Sea Crisis and Their Impacton The Potential for Community Action. Journal of Arid Environments, 39: 225-238.

Smith, M. et al. (2021). Climate Change and Food Security. Global Environmental Change. FAO. (2022). The State of Food Security and Nutrition in the World. Rome: FAO. IPCC. (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Cambridge University Press.

The impact of climate change, with emphasis on drought, on food security in rural areas of Iran

Ali Reza Jamshidi[1*], Javad Jahangirzadeh[2]

1- Assistant Professor, Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, Urmia University, Urmia, Iran
2- Assistant Professor, Department of Sociology, Faculty of Literature and Humanities, Urmia University, Urmia, Iran
* Corresponding author: al.jamshidi@urmia.ac.ir

Abstract
The aim of this research is to analyze the impact of climate change, especially drought, on food security in rural areas. The methodology of this study is descriptive-analytical and based on library research. The required data were collected through the study of reliable documents, scientific articles, and reports of international organizations. The results obtained show that drought, as one of the main consequences of climate change, leads to a decrease in agricultural production, an increase in food prices, and a decrease in the income of rural households, ultimately threatening food security. Also, the findings indicate that rural areas experience the greatest vulnerability to these climate changes due to their direct dependence on natural resources. This article also presents adaptation strategies and appropriate policies to reduce the negative effects of drought on food security and seeks to find solutions to strengthen the resilience of rural communities to these challenges. Finally, this research emphasizes the importance of paying attention to environmental issues and the need for effective policies in this field.

Keywords: Climate change, drought, food security, rural areas, adapta

بررسی پیامدهای اجتماعی و اقتصادی خشک شدن دریاچه ارومیه: چالش‌ها و راهکارها

اسماعیل قلی نژاد

دانشیار، گروه علمی علوم کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران
آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول (e_gholinejad@pnu.ac.ir)

چکیده

خشک شدن دریاچه ارومیه، به عنوان یکی از بزرگ‌ترین فجایع زیست‌محیطی ایران و یکی از چشم‌اندازترین نمونه‌های بحران‌های اکولوژیک در جهان، به یک مسئله پیچیده با ابعاد چندوجهی تبدیل شده است. این پژوهش به تحلیل نظام‌مند پیامدهای گسترده اجتماعی و اقتصادی ناشی از این پدیده می‌پردازد. از منظر اقتصادی، وابستگی شدید اقتصاد منطقه به بخش کشاورزی منجر به افزایش شوری خاک و آب‌های زیرزمینی شده که به طور مستقیم کاهش کمّی و کیفی محصولات کشاورزی، به ویژه باغات سیب و انگور، و نهایتاً کاهش درآمد خانوارها و افزایش ناامنی غذایی را به دنبال داشته است. از سوی دیگر، طوفان‌های نمک ناشی از بستر خشک دریاچه، تأثیرات مخربی بر سلامت عمومی گذاشته و باعث تشدید بیماری‌های تنفسی، چشمی و قلبی-عروقی در جوامع پیرامونی شده است. این فشارهای اقتصادی و بهداشتی، به عنوان عوامل دافعه قدرتمندی عمل کرده و موجی از مهاجرت‌های اجباری به ویژه از روستاها به شهرها و سایر استان‌ها را رقم زده است که این خود منجر به تخلیه سکونتگاه‌های روستایی، افزایش حاشیه‌نشینی شهری و ایجاد چالش‌های اجتماعی جدید شده است. راهکارهای پیشنهادی در سه سطح، مدیریت تقاضا و بهینه‌سازی مصرف آب در بخش کشاورزی (اصلاح روش‌های آبیاری، تغییر الگوی کشت)، احیای اکولوژیک (انتقال آب بین‌حوزه‌ای با ارزیابی دقیق پیامدهای زیست‌محیطی، مدیریت بارورسازی ابرها) و راهبردهای اجتماعی-اقتصادی (توسعه مشاغل جایگزین غیروابسته به آب، تقویت گردشگری پایدار، و اجرای برنامه‌های جبران خسارت برای جوامع آسیب‌دیده) دسته بندی می‌شوند.

کلید واژه‌ها : احیای اکولوژیک، پیامدهای اجتماعی-اقتصادی، خشک شدن دریاچه ارومیه، مهاجرت اجباری.

مقدمه

دریاچه ارومیه، واقع در فلات شمال غربی ایران، نه تنها به عنوان یکی از بزرگ‌ترین دریاچه‌های فوق شور جهان شناخته می‌شود، بلکه یک میراث طبیعی بین‌المللی و یک سایت تالاب با اهمیت جهانی محسوب می‌گردد. این اکوسیستم آبی

منحصر به فرد، عملکردهای زیست‌محیطی حیاتیای را ایفا می‌کند که فراتر از مرزهای جغرافیایی آن است. از جمله این کارکردها می‌توان به تعدیل آب و هوای منطقه، پشتیبانی از تنوع زیستی کم‌نظیر (از جمله آرتمیا اورمیانا به عنوان یک گونه کلیدی)، و ایجاد کریدورهای مهاجرت برای پرندگان اشاره کرد. به موازات این ارزش‌های اکولوژیک، این دریاچه همواره نقش غیرقابل انکاری در تأمین معیشت ساکنان حوضه آبریز خود، به ویژه از طریق تأمین آب برای بخش کشاورزی به عنوان محور اصلی اقتصاد منطقه، ایفا کرده است.

با این حال، در دو دهه اخیر، این گنجینه طبیعی با یک روند فاجعه‌بار خشکیدگی مواجه شده که آن را به سوی نقطه اوج برگشت‌ناپذیر سوق داده است. بر اساس داده‌های پایش ماهواره‌ای، مساحت دریاچه در سال‌های اخیر کاهش یافته است. این پدیده را نمی‌توان به یک عامل واحد نسبت داد، بلکه حاصل برهم‌کنش پیچیده و تشدیدکننده‌ای از عوامل انسانی و طبیعی است:

از سوی عوامل انسانی می‌توان به مدیریت ناپایدار منابع آب اشاره کرد که خود را در قالب توسعه بی‌رویه پروژه‌های سدسازی (برای تأمین آب کشاورزی و شهری)، برداشت بیش از حد از آب‌های زیرزمینی (از طریق حفر ده‌ها هزار چاه غیرمجاز)، و الگوهای ناکارآمد کشاورزی (استفاده از روش‌های آبیاری سنتی و کشت محصولات پرمصرف) نشان می‌دهد.

از سوی عوامل طبیعی تغییرات اقلیمی جهانی با تأثیر بر الگوهای بارش (کاهش بارش برف و باران) و افزایش دما و در نتیجه افزایش تبخیر، به عنوان یک عامل تشدیدکننده و تهدید مضاعف عمل کرده است.

این ترکیب عوامل، دریاچه ارومیه را به یک نمونه عینی و کلاسیک از یک "تراژدی منابع مشترک و یک بحران پیچیده زیست‌محیطی-اجتماعی تبدیل کرده است. در حالی که ابعاد اکولوژیک این بحران به طور گسترده‌ای مستند شده است، درک جامع پیامدهای گسترده اجتماعی و اقتصادی آن و همچنین تحلیل راهکارهای مدیریتی با درنظرگیری این ابعاد، از کاستی‌های موجود در ادبیات پژوهشی محسوب می‌شود.

هدف اصلی این مقاله، پر کردن این شکاف دانشی با ارائه یک تحلیل نظام‌مند و همه‌جانبه‌نگر از تبعات اجتماعی-اقتصادی بحران مذکور است. این مقاله در پی پاسخ به این پرسش‌ها است: پیامدهای مستقیم و غیرمستقیم خشک شدن دریاچه ارومیه بر معیشت خانوارهای روستایی و شهری چیست؟ این بحران چگونه بر الگوهای مهاجرت و تاب‌آوری اجتماعی تأثیر گذاشته است؟ و در نهایت، راهکارهای مدیریتی پایدار برای احیای دریاچه و کاهش این تبعات، با درنظرگیری بافت محلی و ملاحظات اجتماعی-اقتصادی کدامند؟ با واکاوی این ابعاد، این مقاله قصد دارد تا چارچوبی برای سیاست‌گذاری یکپارچه ارائه دهد که پاسخی هماهنگ به این بحران چندوجهی باشد.

مواد و روش‌ها

این مطالعه به صورت مروری و با استفاده از منابع معتبر علمی و گزارش‌های دولتی انجام شده است. داده‌های مربوط به سطح آب دریاچه، تغییرات اقلیمی، و تأثیرات اجتماعی و اقتصادی از مقالات علمی، گزارش‌های سازمان‌های دولتی و

بین‌المللی و مصاحبه‌های میدانی جمع‌آوری شده است. همچنین، برای تحلیل داده‌ها از روش‌های آماری و مدل‌سازی استفاده شده است.

نتایج

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که خشک شدن دریاچه ارومیه تأثیرات منفی زیر را به همراه داشته است:

تأثیر بر کشاورزی

کاهش سطح آب دریاچه منجر به کاهش کیفیت و کمیت محصولات کشاورزی در مناطق اطراف شده است. بر اساس تحقیقات انجام شده، کشاورزان در این مناطق با مشکلاتی نظیر کاهش آب‌های زیرزمینی و افزایش شوری خاک مواجه هستند .(Ghasemi et al., 2020) این مشکلات باعث کاهش درآمد کشاورزان و افزایش فقر در این مناطق شده است.

کاهش سطح ایستابی و افت کمی و کیفی آب‌های زیرزمینی: برداشت بی‌رویه برای جبران کمبود آب سطحی، باعث افت شدید سطح آب چاه‌ها و افزایش غلظت املاح و نمک در آنها شده است. شور شدن تدریجی خاک‌های زراعی: تبخیر شدید از بستر دریاچه و وقوع طوفان‌های نمک، ذرات نمک را بر روی اراضی کشاورزی مجاور رسانده و به تدریج باعث کاهش حاصلخیزی خاک و افزایش شوری آن شده است. مطالعات نشان می‌دهد که این امر بازدهی محصولات استراتژیک منطقه مانند سیب، انگور و چغندرقند را به میزان ۲۰ تا ۴۰ درصد کاهش داده است (Ghasemi et al., 2020; Farzamnia et al., 2021). کاهش درآمد خانوارها و ناامنی غذایی: ترکیب کاهش عملکرد محصول و افزایش هزینه‌های تولید (برای مثال، هزینه شیرین کردن آب یا اصلاح خاک)، درآمد خالص کشاورزان را به شدت کاهش داده و آنها را در دام «فقر زیست‌محیطی» گرفتار کرده است. این وضعیت، امنیت غذایی خانوارهای روستایی و همچنین کشاورزان خرده‌پا را به طور جدی تهدید می‌کند (Malekian et al., 2019).

تأثیر بر بهداشت عمومی

افزایش گرد و غبار ناشی از خشک شدن دریاچه، مشکلات تنفسی و بهداشتی را برای ساکنان منطقه ایجاد کرده است. مطالعات نشان می‌دهد که افزایش بیماری‌های تنفسی و آلرژی در این مناطق به وضوح قابل مشاهده است (Zare et al., 2019). همچنین، کاهش کیفیت آب شرب نیز به مشکلات بهداشتی دامن زده است. افزایش مواجهه با ریزگردهای نمکی: بستر خشک دریاچه به منبع عظیمی از ریزگردها (ذرات کوچکتر از ۱۰ میکرون) تبدیل شده که حاوی مقادیر بالایی از نمک‌ها، فلزات سنگین و سایر آلاینده‌ها هستند. مطالعه‌ای که توسط Zare et al. (۲۰۱۹) انجام شد، ارتباط معنی‌داری بین وقوع طوفان‌های نمک و افزایش مراجعات اورژانسی به دلیل بیماری‌های تنفسی مانند آسم، برونشیت و بیماری‌های انسدادی ریوی نشان داد. تأثیرات سیستمیک بر سلامت: این ریزگردها می‌توانند علاوه بر سیستم تنفسی، بر سلامت چشم (سبب ایجاد کنژنکتیویت و خشکی چشم شوند) و سیستم قلبی-عروقی نیز تأثیر منفی بگذارند (Nabizadeh et al., 2021).

تشدید بحران آب شرب: کاهش منابع آب شیرین و نفوذ آب‌های شور به سفره‌های زیرزمینی، دسترسی به آب آشامیدنی سالم را با مشکل مواجه کرده و خطر بروز بیماری‌های ناشی از آب آلوده را افزایش داده است (Gholampour et al., 2020).

تأثیر بر مهاجرت

بسیاری از ساکنان به دلیل شرایط نامساعد اقتصادی و زیست‌محیطی مجبور به ترک محل زندگی خود شده‌اند. این مهاجرت‌ها نه تنها بر روی زندگی افراد تأثیر منفی گذاشته، بلکه باعث افزایش فشار بر شهرهای دیگر و ایجاد چالش‌های اجتماعی و اقتصادی جدید شده است (Mohammadi et al., 2021). مهاجرت به عنوان راهبرد نهایی سازگاری: برای بسیاری از خانوارهای روستایی که معیشت آنها کاملاً وابسته به کشاورزی و منابع طبیعی است، مهاجرت به شهرهای بزرگ (مانند تبریز، تهران و ارومیه) یا استان‌های همجوار، به آخرین راهکار برای بقا تبدیل شده است. این پدیده به خوبی نظریه «مهاجرت زیست‌محیطی» را تأیید می‌کند (Hassani et al., 2020). تخلیه تدریجی سکونتگاه‌های روستایی: این روند مهاجرت، منجر به تخلیه روستاها، پیری جمعیت باقی‌مانده و از بین رفتن سرمایه اجتماعی در جوامع محلی شده است (Mohammadi et al., 2021). ایجاد چالش‌های ثانویه در مقصد: مهاجران جدید اغلب در حاشیه شهرها ساکن می‌شوند و با چالش‌هایی مانند دسترسی محدود به خدمات شهری، بیکاری و فقر شهری مواجه می‌شوند که این خود می‌تواند به بروز نابرابری‌ها و ناآرامی‌های اجتماعی بینجامد (Azizi et al., 2022).

بحث

خشک شدن دریاچه ارومیه نه تنها یک بحران زیست‌محیطی است، بلکه پیامدهای اجتماعی و اقتصادی عمیقی نیز دارد. برای مقابله با این چالش‌ها، نیاز به یک رویکرد جامع و چندجانبه وجود دارد . مدیریت منابع آب در این منطقه به دلیل عدم هماهنگی بین نهادهای مختلف و نبود برنامه‌ریزی جامع با چالش‌های جدی مواجه است. برای حل این مشکل، نیاز به ایجاد یک نهاد مرکزی برای مدیریت منابع آب و هماهنگی بین نهادهای مختلف وجود دارد. برای احیای دریاچه ارومیه، پیشنهاد می‌شود که برنامه‌های احیای دریاچه با مشارکت جامعه محلی و استفاده از فناوری‌های نوین طراحی و اجرا شود. به عنوان مثال، استفاده از سیستم‌های آبیاری هوشمند و کشت محصولات مقاوم به خشکی می‌تواند به کاهش مصرف آب کمک کند. آموزش و آگاهی‌بخشی به جامعه محلی در مورد اهمیت دریاچه و تأثیرات خشک شدن آن می‌تواند به افزایش مشارکت مردم در برنامه‌های احیا کمک کند. برگزاری کارگاه‌ها و سمینارها می‌تواند به افزایش آگاهی عمومی کمک کند.

راهکارهای احیای دریاچه ارومیه

۱- مدیریت تقاضا و بهینه‌سازی مصرف آب در بخش کشاورزی

این راهکار، اساسی‌ترین و کم‌هزینه‌ترین رکن احیای دریاچه است، چرا که بخش کشاورزی بیش از ۹۰ درصد مصارف آب منطقه را به خود اختصاص داده است. این راهکار بر دو محور اصلی استوار است:

الف) اصلاح روش‌های آبیاری: گذر از روش‌های غرقابی و سنتی به روش‌های نوین: هدف، جایگزینی سیستم‌های کم‌بازده با روش‌های تحت فشار مانند قطره‌ای و بارانی است. این تغییر می‌تواند راندمان آبیاری را از حدود ۳۰-۴۰٪ به بیش از ۷۵-۹۰٪ برساند. اجرا و پایش دقیق: این طرح تنها با نصب تجهیزات به پایان نمی‌رسد. لازم است سیستم‌های پایش هوشمند (مانند سنسورهای رطوبت خاک) نصب شده و مدیریت بهره‌برداری و نگهداری این شبکه‌ها به کشاورزان آموزش داده شود تا از تبدیل این پروژه‌ها به «پروژه‌های کاغذی» جلوگیری شود.

ب) تغییر الگوی کشت: کشت محصولات کم‌آب‌بر و سازگار با اقلیم: به جای محصولاتی مانند چغندرقند و سیب که آب‌بری بسیار بالایی دارند، باید کشت گونه‌های مقاوم به شوری و کم‌آب‌طلب مانند زعفران، گیاهان دارویی، جو و کلزا ترویج شود. تدوین سیاست‌های تشویقی و بازدارنده: این تغییر نیازمند بستری از سیاست‌های حکومتی است. مثلاً: تعیین تعرفه آب بر اساس نوع محصول: تعرفه آب برای محصولات پرمصرف بسیار بیشتر باشد. تضمین خرید محصولات کم‌آب‌بر: دولت خرید محصولات جدید را تضمین کند تا ریسک اقتصادی را از دوش کشاورز بردارد. آموزش و ترویج: برگزاری دوره‌های آموزشی برای نشان دادن توجیه اقتصادی کشت جایگزین به کشاورزان.

۲ .احیای اکولوژیک

این راهکارها بر تأمین آب مورد نیاز برای بازگرداندن تراز اکولوژیک دریاچه متمرکز هستند و معمولاً پیچیده‌تر و پرهزینه‌ترند.

الف) انتقال آب بین‌حوزه‌ای: یک راهکار جنجالی اما ممکن: این پروژه‌ها اگرچه می‌توانند حجم قابل توجهی آب را به حوضه برسانند، اما معمولاً با مخالفت‌های اجتماعی و زیست‌محیطی شدیدی از سوی حوضه مبدأ مواجه می‌شوند. لزوم ارزیابی دقیق پیامدهای زیست‌محیطی :پیش از اجرا، باید یک ارزیابی استراتژیک محیط زیستی جامع انجام شود تا پیامدهای منفی آن بر حوضه مبدأ (مانند خشکیدن چشمه‌ها، کاهش آب رودخانه‌ها و تخریب اکوسیستم‌های پایین‌دست) به حداقل برسد. این کار نباید به قیمت نابودی یک اکوسیستم دیگر تمام شود.

ب) مدیریت بارورسازی ابرها: یک روش مکمل، نه راهکار اصلی: این فناوری با پاشیدن موادی مانند یدید نقره در ابرها، کارایی تشکیل بارش (برف یا باران) را افزایش می‌دهد. محدودیت‌ها آن این است که اثربخشی این روش به وجود ابرهای مناسب و شرایط جوی مساعد بستگی دارد و نمی‌تواند به تنهایی مشکل کمبود آب را حل کند. همچنین، پایش دقیق اثرات اکولوژیکی بلندمدت آن در منطقه ضروری است.

۳- راهبردهای اجتماعی-اقتصادی

این بخش، کلید پایداری بلندمدت هر راهکار فنی است. اگر معیشت مردم در نظر گرفته نشود، هیچ راهکار فنی پایدار نخواهد ماند.

الف) توسعه مشاغل جایگزین غیروابسته به آب: کاهش وابستگی به کشاورزی: باید زمینه برای ایجاد اشتغال در بخش‌های صنایع کوچک و روستایی (مانند صنایع دستی)، خدمات و فناوری اطلاعات فراهم شود. توانمندسازی جامعه محلی: با اعطای وام‌های کم‌بهره و برگزاری کارگاه‌های آموزش مهارت‌های جدید، به جوامع محلی برای ایجاد کسب‌وکارهای جدید کمک شود.

ب) تقویت گردشگری پایدار: تغییر الگوی گردشگری: به جای گردشگری انبوه که فشار بر منابع آب را بیشتر می‌کند، باید اکوتوریسم (مانند پرنده‌نگری در مناطق احیا شده)، ژئوتوریسم (بازدید از پدیده‌های زمین‌شناسی مثل جزایر شوره‌زار) و گردشگری فرهنگی (بازدید از بازارهای محلی و صنایع دستی) ترویج شود. ایجاد درآمد برای جوامع محلی: این نوع گردشگری می‌تواند منبع درآمد جدیدی برای مردم ایجاد کند که مستقیم به آب وابسته نیست.

ج) اجرای برنامه‌های جبران خسارت: عدالت محیط زیستی: کشاورزانی که به دلیل تغییر الگوی کشت یا کاهش حقابه، متحمل خسارت می‌شوند، باید مورد حمایت قرار گیرند. این حمایت می‌تواند به صورت پرداخت نقدی مشروط، ارائه بیمه محصولات جدید، یا کمک بلاعوض برای تبدیل سیستم آبیاری باشد. پذیرش اجتماعی: بدون جبران خسارت، هیچ‌یک از راهکارهای فوق مقبولیت اجتماعی لازم را پیدا نخواهند کرد و با مقاومت محلی مواجه خواهند شد.

نتیجه‌گیری

خشک شدن دریاچه ارومیه یک بحران جدی است که نیاز به توجه فوری و اقدامات مؤثر دارد. با توجه به پیامدهای اجتماعی و اقتصادی این بحران، لازم است که برنامه‌های جامع و چندجانبه‌ای برای مدیریت و احیای دریاچه طراحی و اجرا شود. این برنامه‌ها باید شامل مشارکت جامعه محلی، استفاده از فناوری‌های نوین و آموزش و آگاهی‌بخشی به مردم باشد. این مطالعه به وضوح نشان می‌دهد که خشک شدن دریاچه ارومیه را نمی‌توان صرفاً به عنوان یک بحران زیست‌محیطیِ منفرد در نظر گرفت، بلکه باید آن را یک فاجعه پیچیده انسانی-زیست‌محیطی دانست که امنیت اقتصادی، سلامت عمومی و انسجام اجتماعی را در یکی از حاصل‌خیزترین مناطق ایران به مخاطره انداخته است. یافته‌های این پژوهش مؤید این امر است که پیامدهای این بحران در قالب یک چرخه معیوب و خودتشدیدکننده عمل می‌کند: تخریب اکوسیستم منجر به کاهش بهره‌وری کشاورزی و بحران سلامت می‌شود، این دو به نوبه خود فقر و مهاجرت اجباری را دامن می‌زنند، و مهاجرت نیز با تخلیه سرمایه انسانی و اجتماعی، ظرفیت جامعه برای سازگاری و مقابله با بحران را بیشتر تضعیف می‌کند.

منابع

Azizi, M. M., et al. (2022). Environmental migration and its socioeconomic consequences in the Lake Urmia basin: A qualitative study. Habitat International, 120, 102502.

Farzamnia, H., et al. (2021). The impact of salinity stress on crop yield and agricultural sustainability in the Urmia Lake Basin. Agricultural Water Management, 245, 106658.

Ghasemi, A. R., et al. (2020). Economic impacts of lake degradation on agricultural sector: A case study of Lake Urmia. Journal of Environmental Management, 270, 110883.

Gholampour, A., et al. (2020). Assessing the health impacts of water scarcity in the Lake Urmia basin: A focus on water-borne diseases. Science of The Total Environment, 705, 135955.

Hassani, M., et al. (2020). Modeling environmental migration in the Lake Urmia region using an agent-based approach. Environmental Modelling & Software, 134, 104845.

Malekian, A., et al. (2019). Livelihood vulnerability and adaptation strategies to environmental changes in the Urmia Lake Basin. Climate and Development, 11(9), 803-814.

Mohammadi, B., et al. (2021). Socio-hydrological drivers of rural migration in the Lake Urmia basin. Journal of Hydrology, 598, 126248.

Nabizadeh, R., et al. (2021). Characterization of salt dust storms in the Urmia Lake basin and their impacts on human health. Atmospheric Environment, 244, 117961.

Zare, S., et al. (2019). The association between airborne particulate matter from Lake Urmia and respiratory diseases in the surrounding communities. Environmental Research, 178, 108684.

Examining the social and economic consequences of the drying up of Lake Urmia: Challenges and solutions

Esmaeil Gholinezhad

Associate Professor, Department of Agricultural Sciences, Payame Noor University, Tehran, Iran.

* Corresponding author: e_gholinejad@pnu.ac.ir

ABSTRACT

The drying of Lake Urmia, as one of Iran's greatest environmental disasters and one of the most prominent examples of ecological crises in the world, has become a complex issue with multifaceted dimensions. This research systematically analyzes the extensive social and economic consequences arising from this phenomenon. From an economic perspective, the region's heavy reliance on the agricultural sector has led

to increased soil and groundwater salinity. This has directly resulted in the quantitative and qualitative decline of agricultural products, particularly apple and grape vineyards, ultimately leading to reduced household income and increased food insecurity. On the other hand, salt storms originating from the dry lakebed have had devastating impacts on public health, exacerbating respiratory, ocular, and cardiovascular diseases in surrounding communities. These economic and health pressures have acted as powerful push factors, triggering a wave of forced migration, particularly from villages to cities and other provinces. This, in turn, has led to the depopulation of rural settlements, increased urban marginalization, and created new social challenges. The proposed solutions are categorized into three levels: 1) demand management and optimization of water consumption in the agricultural sector (improving irrigation methods, changing cropping patterns), 2) ecological restoration (inter-basin water transfer with careful assessment of environmental consequences, cloud seeding management), and 3) socio-economic strategies (developing alternative water-independent livelihoods, promoting sustainable tourism, and implementing compensation programs for affected communities.

Keywords: Ecological Restoration, Forced Migration, Lake Urmia Desiccation, Socio-Economic Impacts

تغییرات اقلیمی و چالش های شهرهای ایران

ایوب منوچهری میاندوآب

استادیار گروه جغرافیا دانشکده ادبیات و علوم انسانی دانشگاه ارومیه ارومیه ایران

a.manouchehri@urmia.ac.ir آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول

چکیده:

تغییرات اقلیمی به عنوان یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های قرن بیست‌ویکم، اثرات گسترده‌ای بر جوامع انسانی و به ویژه شهرها دارد. ایران به دلیل شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک، جمعیت بالای شهری و محدودیت منابع آبی، از جمله کشورهایی است که به شدت در معرض پیامدهای این پدیده قرار دارد. در این مقاله، مهم‌ترین چالش‌های ناشی از تغییرات اقلیمی در شهرهای ایران شامل پدیده جزیره گرمایی شهری، افزایش سطح آب دریاها، رویدادهای شدید آب‌وهوایی، فشار بر منابع آب و پیامدهای اجتماعی-اقتصادی بررسی شده است. علاوه بر این، پیامدهای بهداشتی تغییر اقلیم و تجارب جهانی نیز تحلیل گردیده و راهکارهایی نظیر توسعه زیرساخت‌های سبز، مدیریت منابع آب، برنامه‌ریزی شهری مقاوم، توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر و آموزش عمومی ارائه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که بدون اقدام فوری و هماهنگ، شهرهای ایران در آینده نزدیک با بحران‌های زیست‌محیطی و اجتماعی غیرقابل جبران مواجه خواهند شد.

کلمات کلیدی :تغییرات اقلیمی، شهرهای ایران، منابع آب، جزیره گرمایی شهری، توسعه پایدار، رویدادهای شدید آب‌وهوایی

مقدمه:

تغییرات اقلیمی یکی از مهم‌ترین چالش‌های قرن بیست‌ویکم است که پیامدهای آن به صورت مستقیم و غیرمستقیم بر جوامع انسانی، محیط زیست و اقتصاد جهانی اثر می‌گذارد. این تغییرات که عمدتاً ناشی از فعالیت‌های انسانی نظیر سوزاندن سوخت‌های فسیلی، جنگل‌زدایی، مصرف بی‌رویه منابع طبیعی و رشد صنایع پرکربن هستند، در دهه‌های اخیر شدت یافته و به تهدیدی جدی برای پایداری زیست‌کره تبدیل شده‌اند .(IPCC, 2021) سازمان ملل متحد در گزارش‌های خود بارها هشدار داده است که اگر روند فعلی انتشار گازهای گلخانه‌ای مهار نشود، جهان تا پایان قرن با افزایش دمای ۳ تا ۴ درجه سانتی‌گراد مواجه خواهد شد؛ رقمی که می‌تواند بسیاری از مناطق کره زمین را غیرقابل سکونت کند.(UNEP, 2021)
ایران نیز به عنوان کشوری واقع در کمربند خشک و نیمه‌خشک جهان، به شدت تحت تأثیر تغییرات اقلیمی قرار دارد. بررسی‌های داخلی نشان می‌دهد که میانگین بارش سالانه ایران طی ۵۰ سال گذشته بیش از ۲۰ درصد کاهش یافته، در

حالی که دمای متوسط کشور حدود ۱.۵ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است (سازمان هواشناسی، ۱۴۰۱). این تغییرات نه تنها منابع آب کشور را تهدید کرده، بلکه باعث افزایش فراوانی پدیده‌هایی مانند خشکسالی‌های طولانی، سیلاب‌های ناگهانی و ریزگردها شده است.(UNESCO, 2020; World Bank, 2019) پژوهش‌های داخلی مانند گزارش مرکز پژوهش‌های مجلس (۱۴۰۰) نشان می‌دهد که بیش از ۷۵ درصد جمعیت ایران در مناطق شهری زندگی می‌کنند و اثرات تغییرات اقلیمی به ویژه در محیط‌های شهری بسیار محسوس است. تراکم بالای جمعیت، فشار بر زیرساخت‌ها، تمرکز فعالیت‌های اقتصادی و وجود سکونتگاه‌های غیررسمی باعث می‌شود شهرها به کانون اصلی آسیب‌پذیری در برابر تغییرات اقلیمی تبدیل شوند. مطالعات بین‌المللی نیز حاکی از آن است که شهرهای پرجمعیت با زیرساخت‌های ناکارآمد و فقدان فضای سبز در معرض بالاترین ریسک گرمای شهری و سیلاب‌های شهری هستند.(Oke et al., 2017; UN-Habitat, 2020) این مقاله به بررسی ابعاد مختلف تغییرات اقلیمی در شهرهای ایران می‌پردازد. ابتدا مهم‌ترین چالش‌های اقلیمی و اثرات آن‌ها بر زیرساخت‌ها، منابع آب، سلامت عمومی و اقتصاد شهری تحلیل می‌شود. سپس با بررسی تجارب جهانی، به ارائه راهکارهایی برای سازگاری و کاهش اثرات منفی این پدیده در ایران پرداخته خواهد شد.

چالش‌های شهرهای ایران در برابر تغییرات اقلیمی

افزایش دما و پدیده جزیره گرمایی شهری

یکی از مهم‌ترین پیامدهای تغییر اقلیم در شهرهای ایران، افزایش دما و تشدید پدیده جزیره گرمایی شهری است. در شهرهای بزرگی چون تهران، مشهد و اصفهان، تراکم ساختمان‌های بلند، کاهش فضاهای سبز و استفاده گسترده از مصالحی مانند بتن و آسفالت باعث شده دمای محیط شهری نسبت به مناطق پیرامون به طور متوسط ۵ تا ۷ درجه بالاتر باشد .این موضوع پیامدهای متعددی به همراه دارد:

افزایش مصرف انرژی :گزارش‌ها نشان می‌دهد تقاضای برق در تهران در تابستان تا ۳۰ درصد افزایش یافته است (وزارت نیرو، ۱۴۰۲).

تهدید سلامت عمومی :موج گرمای تابستان ۱۴۰۲ منجر به بیش از ۱۰۰۰ مورد بستری در بیمارستان‌های تهران شد (وزارت بهداشت، ۱۴۰۲).

کاهش کیفیت هوا :هوای گرم‌تر باعث افزایش واکنش‌های شیمیایی و تشکیل آلاینده‌هایی نظیر اُزن سطحی می‌شود.

تجربه جهانی نشان داده است که توسعه زیرساخت‌های سبز و استفاده از بام‌های سبز می‌تواند تا ۲ درجه از شدت جزیره گرمایی بکاهد .(Akbari et al., 2016) اما در ایران هنوز این سیاست‌ها در مقیاس گسترده اجرا نشده است.

۲ .افزایش سطح آب دریاها و سیل‌های ساحلی

با توجه به پیش‌بینی افزایش سطح آب دریاها تا ۱.۵ متر تا پایان قرن، شهرهای ساحلی ایران مانند بندرعباس، بوشهر و انزلی با تهدید جدی مواجه‌اند .(NOAA, 2022) افزایش سطح آب می‌تواند به زیرساخت‌های بندری، تاسیسات صنعتی، محلات مسکونی و منابع آب شیرین آسیب برساند. برای مثال:

سیل سال ۱۴۰۱ در بوشهر خسارتی بیش از ۵۰۰ میلیارد تومان بر جای گذاشت (سازمان مدیریت بحران، ۱۴۰۱).

نفوذ آب شور به سفره‌های آب زیرزمینی در بندرعباس کیفیت منابع آب را به شدت کاهش داده است.(UNESCO, 2020)

در صورت عدم مدیریت، مهاجرت اقلیمی از مناطق ساحلی به شهرهای مرکزی محتمل خواهد بود.

۳ .رویدادهای شدید آب‌وهوایی

شدت و فراوانی رویدادهای حدی در ایران رو به افزایش است:(IPCC, 2021)

سیلاب‌ها :سیل ۱۳۹۸ در شیراز و لرستان بیش از ۷۰ کشته و میلیاردها تومان خسارت برجای گذاشت (سازمان مدیریت بحران، ۱۳۹۸).

ریزگردها :در اهواز تعداد روزهای آلوده ناشی از گردوغبار طی ۲۰ سال اخیر سه برابر شده است.(World Bank, 2019)

خشکسالی‌ها :خشک شدن زاینده‌رود و بحران دریاچه ارومیه پیامدهای اجتماعی گسترده‌ای همچون مهاجرت و تنش‌های محلی داشته است (وزارت نیرو، ۱۴۰۲).

شهرهای ایران اغلب فاقد زیرساخت‌های مدرن برای مقابله با چنین بحران‌هایی هستند. شبکه‌های زهکشی ناکارآمد و بافت‌های فرسوده شهری آسیب‌پذیری را افزایش می‌دهند.

۴ .فشار بر منابع آب

سرانه آب تجدیدپذیر ایران کمتر از ۱۵۰۰ مترمکعب در سال است؛ رقمی که نشان‌دهنده ورود کشور به مرحله تنش آبی است .(UNESCO, 2020) تغییرات اقلیمی با کاهش بارش‌ها و افزایش تبخیر، فشار مضاعفی بر منابع آب وارد می‌کند.

پیامدهای این بحران عبارت‌اند از:

افت سالانه سطح آب‌های زیرزمینی (تا ۲ متر در مناطق مرکزی) (وزارت نیرو، ۱۴۰۲).

جیره‌بندی آب در تهران و کرمان در سال‌های اخیر (شرکت آب و فاضلاب تهران، ۱۴۰۱).

افزایش هزینه‌های تأمین آب از طریق شیرین‌سازی و انتقال بین‌حوضه‌ای (وزارت نیرو، ۱۴۰۲).

۵ .تأثیرات اجتماعی و اقتصادی

تغییر اقلیم نابرابری‌های اجتماعی را تشدید می‌کند. خانوارهای کم‌درآمد که عمدتاً در حاشیه شهرها و مناطق پرخطر زندگی می‌کنند، بیشترین آسیب را متحمل می‌شوند (مرکز پژوهش‌های مجلس، ۱۴۰۰). پدیده مهاجرت اقلیمی نیز در حال افزایش است؛ به‌گونه‌ای که بسیاری از روستاییان خوزستان و سیستان‌وبلوچستان به حاشیه شهرهایی مانند اهواز و

زاهدان مهاجرت کرده‌اند .(World Bank, 2019) این مهاجرت‌ها باعث رشد سکونتگاه‌های غیررسمی و افزایش فشار بر خدمات شهری می‌شود.

جدول۱: چالش های شهرهای ایران در مقابل تغییرات اقلیمی

مثال در ایران	آسیب‌پذیری اجتماعی	تأثیر اقتصادی	گستردگی جغرافیایی	شدت تأثیر (۱-۱۰)	چالش
گرمای شدید تهران، افزایش مصرف برق تا ٪۳۰	بسیار بالا	بالا	بالا (تمامی شهرها)	۸.۵	جزیره گرمایی شهری
سیل بوشهر و بندرعباس، خسارت ۵۰۰ میلیارد تومان	متوسط	بالا	متوسط (شهرهای ساحلی)	۷	افزایش سطح آب دریاها
سیل ۱۳۹۸ تهران، خشکسالی زاینده‌رود، طوفان‌های گردوغبار اهواز	بالا	بسیار بالا	بالا	۹	رویدادهای شدید آب‌وهوایی
کمبود آب در یزد و کرمان، جیره‌بندی آب در تهران	بسیار بالا	بسیار بالا	بالا	۹.۵	فشار بر منابع آب
مهاجرت از حاشیه شهرها، نابرابری در دسترسی به منابع	بسیار بالا	بالا	بالا	۸	تأثیرات اجتماعی و اقتصادی
خشک شدن زاینده‌رود و دریاچه ارومیه، کاهش تولید کشاورزی	بالا	بسیار بالا	بالا	۹	خشکسالی‌های طولانی
اهواز، کرمانشاه، مشکلات تنفسی گسترده در تابستان	بسیار بالا	بالا	متوسط تا بالا	۸.۵	ریزگردها و آلودگی هوا
بستری شدن افراد مسن در تهران و مشهد در موج گرما	بالا	متوسط	بالا	۷.۵	افزایش بیماری‌های مرتبط با گرما
بندرعباس، چابهار و هرمزگان، کاهش کیفیت آب شیرین	بالا	بالا	متوسط	۸	نفوذ شوری به منابع آب
فشار بر شبکه برق تهران، اصفهان و مشهد	متوسط	متوسط	بالا	۷	کاهش توان تولید برق در تابستان

پیامدهای بهداشتی تغییر اقلیم

یکی از ابعاد کمتر مورد توجه، تأثیر تغییر اقلیم بر سلامت عمومی است:
افزایش بیماری‌های قلبی و تنفسی در اثر آلودگی هوا و گرما.
گسترش بیماری‌های منتقل‌شونده از آب (مانند وبا) پس از سیلاب‌ها.

افزایش اختلالات روانی ناشی از استرس و مهاجرت اقلیمی.
در اهواز، تعداد بیماران تنفسی در روزهای ریزگردی تا ۵ برابر افزایش می‌یابد. در تهران نیز موج‌های گرمایی منجر به افزایش ۱۵ درصدی مرگ‌ومیر سالمندان شده است.

تجارب جهانی و درس‌آموزی برای ایران

شهرها، که هم قربانیان اصلی تغییرات اقلیمی هستند و هم سهم بزرگی در تولید گازهای گلخانه‌ای دارند، در خط مقدم این نبرد قرار گرفته‌اند و آزمایشگاه‌های زنده و نوآورانه‌ای برای یافتن راه‌حل‌ها هستند.
در اینجا به بررسی تجارب موفق شهرهای مختلف جهان در قالب استراتژیهای کلیدی میپردازیم:

شهر/کشور	استراتژی کلیدی	اقدامات و پروژه‌های شاخص	دستاوردها و نتایج
کپنهاگ، دانمارک	**کربن خنثی**	۱. **شبکه گسترده دوچرخه‌سواری :** بیش از ۴۰۰ کیلومتر مسیر مخصوص. ۲. **سیستم گرمایش منطقه‌ای :** تأمین گرمایش ٪۹۹ خانه‌ها از منابع پایدار. ۳. **توربین‌های بادی :** سرمایه‌گذاری عظیم در انرژی بادی.	**هدف: اولین پایتخت کربن خنثی جهان تا ۲۰۲۵.** •کاهش ٪۸۰ انتشار کربن از ۱۹۹۰ تاکنون. •٪۵۰ سفرهای درون‌شهری با دوچرخه.
روتردام، هلند	**شهر انعطاف‌پذیر (تاب‌آور) در برابر آب**	۱. **میدان‌های آبی (Water Squares)** فضاهای چندمنظوره برای ذخیره آب باران. ۲. **سقف‌های سبز :** برنامه تشویقی برای نصب سقف‌های جاذب آب. ۳. **سازه‌های شناور :** پارک‌ها، منازل و مزارع شناور.	•کاهش خطر سیلاب در مرکز شهر. •تبدیل تهدید آب به فرصتی برای طراحی شهری. •تبدیل به یک laboratory بین‌المللی مدیریت آب.
ونکوور، کانادا	**شهر سبز**	۱. برنامه عمل سبزترین شهر (GCAP): نقشه راه جامع برای پایداری. ۲. قوانین ساختمان‌سازی سبز: الزام به	•کاهش ٪۱۲ انتشار گازهای گلخانه‌ای •داشتن کمترین ردپای کربن در بین شهرهای آمریکای

دستاوردها و نتایج	اقدامات و پروژه‌های شاخص	استراتژی کلیدی	شهر/کشور
شمالی. •ایجاد هزاران شغل در بخش اقتصاد سبز.	استانداردهای بالای انرژی. ۳ .افزایش شدید فضاهای سبز و پیاده‌روی.		
•کاهش ٪۷۱ ترافیک خودرو در مرکز شهر. •افزایش ٪۵۲ استفاده از دوچرخه. •بهبود کیفیت هوا و زندگی شهری.	۱ .تبدیل خیابان‌ها به فضاهای پیاده‌محور. ۲ .**شبکه «پلان ولو** (Plan Vélo) **:**ایجاد ۶۵۰ کیلومتر مسیر دوچرخه‌سواری ایمن. ۳ .**احیای فضاهای عمومی** (تبدیل پارکینگ به پارک)	**شهر ۱۵ دقیقه‌ای**	**پاریس، فرانسه**
•کاهش قابل توجه رواناب سطحی و خطر سیل. •بازیابی و استفاده مجدد از آب باران. •کاهش اثر جزیره گرمایی شهری.	۱ .**سطوح نفوذپذیر :**پیاده‌روها و جاده‌های جاذب آب. ۲ .**پارک‌های قابل غرقاب :**فضاهای سبز برای ذخیره آب در بارشهای شدید. ۳ .**احیای تالاب‌ها و کریدورهای آبی.**	**شهر اسفنجی**	**شنژن/شانگهای، چین**
•کاهش ٪۱۰ی زباله‌های خانگی و افزایش ٪۴۰ی بازیافت. •بهبود چشمگیر کیفیت هوا و تنوع زیستی. •ایجاد یک مدل موفق برای مشارکت شهروندی.	۱. برنامه بازیافت هوشمند :سیستم پاداش برای بازیافت(program "Zero Pay"). ۲ .مراکز تعمیر محله‌ای :ترویج فرهنگ تعمیر به جای دور ریختن. ۳ .احیای رودخانه چئونگ گی چئون :حذف یک بزرگراه و احیای یک رودخانه.	**اقتصاد چرخشی و مشارکت شهروندان**	**سئول، کره جنوبی**
•کاهش ٪۳۵ی ترافیک و ٪۳۰ی آلودگی هوا در مرکز	۱اخذ عوارض از خودروهای ورودی به مرکز شهر	**حمل‌ونقل پایدار و کشاورزی شهری**	**میلان، ایتالیا**

دستاوردها و نتایج	اقدامات و پروژه‌های شاخص	استراتژی کلیدی	شهر/کشور
شهر. •افزایش دسترسی به محصولات محلی و تازه. •کاهش انتشار کربن از بخش حمل‌ونقل.	**Area C (Congestion)** ۲ .**پروژه «اوسوائیا دیستریت**(Orti Diffusi) ترویج کشاورزی شهری و باغ‌های محله‌ای. ۳ .**توسعه مترو و حمل‌ونقل الکتریکی.**		
•خنک‌کردن شهر و کاهش دما تا ۴ درجه سانتی‌گراد. •بهبود کیفیت هوا و سلامت روان شهروندان. •افزایش تنوع زیستی در قلب شهر.	**۱. برنامه جنگل‌های شهری** (Urban Forest Strategy): کاشت هزاران درخت بومی. ۲ .**ایجاد «خیابان‌های سبز** «برای کاهش اثر جزیره گرمایی. ۳ .**مدیریت پایدار آب‌های باران.**	**افزایش پوشش گیاهی و جنگل‌های شهری**	**ملبورن، استرالیا**

جمع‌بندی نکات کلیدی از تجارب جهانی:

رهبری و چشم‌انداز بلندمدت :موفقیت شهرها وابسته به تعهد سیاسی و هدف‌گذاری جاه‌طلبانه (مانند کپنهاگ و ونکوور) است.
یک‌پارچگی در برنامه‌ریزی :رویکرد موفق، تلفیق حمل‌ونقل، انرژی، مدیریت آب و برنامه‌ریزی شهری است.
راه‌حل‌های مبتنی بر طبیعت :(NbS) سرمایه‌گذاری برEcosystem ها (مانند شهرهای اسفنجی و جنگل‌های شهری) مقرون‌به‌صرفه و پایدار است.
مشارکت شهروندان :هیچ برنامه‌ای بدون آموزش، آگاهی‌بخشی و involvement شهروندان (مانند سئول) به نتیجه نمی‌رسد.
تاب‌آوری و سازگاری :علاوه بر کاهش انتشار کربن، شهرها باید برای پیامدهای اجتناب‌ناپذیر اقلیمی (مانند سیل در روتردام) آماده شوند

راهکارهای مقابله با چالش‌ها اقلیمی در ایران

ه	راهکار	اقدامات پیشنهادی

۱	توسعه زیرساخت‌های سبز	۱-کاشت درختان مقاوم به کم‌آبی در حاشیه بزرگراه‌ها و میادین شهری ۲-ایجاد بام‌ها و دیوارهای سبز بر روی ساختمان‌های دولتی و تجاری ۳-تبدیل زمین‌های متروکه شهری به پارک‌ها و فضاهای سبز عمومی ۴-استفاده از پوشش‌های گیاهی برای کاهش دمای محیط در مناطق خشک شهری
۲	مدیریت منابع آب	۱-جمع‌آوری و ذخیره آب باران در مناطق شهری و روستایی ۲-توسعه سیستم‌های تصفیه آب خاکستری در آپارتمان‌ها و ساختمان‌های اداری ۳-سرمایه‌گذاری در شیرین‌سازی آب دریا در استان‌های جنوبی و جنوب شرقی بهره‌گیری از فناوری‌های نوین برای کاهش هدررفت آب در شبکه‌های شهری برنامه‌ریزی برای انتقال بین‌حوضه‌ای منابع آب با توجه به اقلیم خشک مرکزی
۳	برنامه‌ریزی شهری مقاوم	۱-جابه‌جایی سکونتگاه‌های پرخطر و حاشیه‌نشین به مناطق امن ۲-بازطراحی سیستم زهکشی و شبکه فاضلاب ۳-مقاوم‌سازی زیرساخت‌های حمل‌ونقل، پل‌ها و جاده‌ها در برابر سیلاب و طوفان‌های گردوغبار• ۴-ادغام الزامات سازگاری با اقلیم در برنامه‌ریزی شهری و صدور پروانه‌های ساختمانی
۴	ترویج انرژی‌های تجدیدپذیر	۱-افزایش ظرفیت انرژی خورشیدی در یزد، کرمان و مناطق کویری ۲- توسعه نیروگاه‌های بادی در منجیل، سیستان و شمال خوزستان۳ ۳-حمایت مالی و مشوق‌های مالیاتی برای سرمایه‌گذاری بخش خصوصی در انرژی پاک ۴-تشویق ساختمان‌ها و صنایع به استفاده از پنل‌های خورشیدی و فناوری‌های کم‌مصرف
۵	آموزش و مشارکت عمومی	۱-کمپین‌های ملی برای کاهش مصرف آب و انرژی و ترویج سبک زندگی پایدار ۲-آموزش دانش‌آموزان و شهروندان درباره تغییر اقلیم و سازگاری با شرایط خشکی و گرما ۳- تشویق شهروندان به استفاده از حمل‌ونقل عمومی، دوچرخه و پیاده‌روی ۴- ایجاد برنامه‌های محلی برای

نتیجه‌گیری

تغییرات اقلیمی تهدیدی چندوجهی است که شهرهای ایران را با چالش‌های گسترده‌ای مواجه کرده است. فشار بر منابع آب، تشدید جزیره گرمایی شهری، وقوع سیلاب‌ها و افزایش مهاجرت اقلیمی از مهم‌ترین پیامدهای این پدیده هستند. تغییرات اقلیمی نه‌تنها یک پدیده‌ی زیست‌محیطی، بلکه مسئله‌ای چندوجهی است که ابعاد اجتماعی، اقتصادی، فرهنگی و حتی امنیتی شهرهای ایران را تحت تأثیر قرار می‌دهد. یافته‌های این مقاله نشان داد که فشار فزاینده بر منابع آب، تشدید پدیده‌ی جزیره‌ی گرمایی شهری، افزایش رخدادهای شدید آب‌وهوایی و پیامدهای اجتماعی-اقتصادی از مهم‌ترین چالش‌های اقلیمی در ایران هستند. این چالش‌ها اگر به‌موقع مدیریت نشوند، می‌توانند منجر به مهاجرت‌های گسترده،

افزایش نابرابری اجتماعی و کاهش توان تاب‌آوری شهرها شوند. بررسی تجارب جهانی نیز نشان داد که راهکارهایی همچون توسعه زیرساخت‌های سبز، مدیریت یکپارچه منابع آب، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و مشارکت فعال جامعه مدنی، می‌تواند در کاهش اثرات منفی تغییر اقلیم نقش تعیین‌کننده داشته باشد. ایران با توجه به ظرفیت‌های طبیعی خود – از جمله تابش بالای خورشید و امکان توسعه فناوری‌های بومی – فرصت آن را دارد که با برنامه‌ریزی هوشمندانه به سمت آینده‌ای پایدار حرکت کند. آینده‌پژوهی‌ها حاکی از آن است که در صورت بی‌توجهی به تغییرات اقلیمی، تا میانه‌ی قرن بیست‌ویکم بخش‌های وسیعی از مناطق مرکزی و جنوبی کشور با بحران‌های غیرقابل جبران زیست‌محیطی و اقتصادی مواجه خواهند شد. بنابراین، لازم است سیاست‌گذاران با نگاهی فرابخشی، هماهنگی بین دستگاه‌های دولتی، بخش خصوصی و نهادهای مدنی را تقویت کنند. در نهایت، تنها از رهگذر اقدام فوری، سیاست‌های مبتنی بر داده و مشارکت عمومی است که می‌توان مسیر شهرهای ایران را از آسیب‌پذیری به سمت تاب‌آوری و توسعه پایدار تغییر داد.

منابع

مرکز آمار ایران (۱۴۰۰) *آمار جمعیت شهری ایران* .تهران: مرکز آمار ایران.

مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی(۱۴۰۰) *تأثیرات اجتماعی تغییرات اقلیمی بر شهرهای ایران* .تهران: دفتر مطالعات زیربنایی.

سازمان حفاظت محیط زیست ایران(۱۴۰۱) *گزارش ملی تغییرات اقلیمی* .تهران: سازمان حفاظت محیط زیست.

سازمان مدیریت بحران کشور(۱۴۰۱) *گزارش سیل بوشهر* .تهران: سازمان مدیریت بحران.

سازمان هواشناسی کشور(۱۴۰۱) *بررسی روند تغییرات دما و بارش در ایران طی نیم‌قرن اخیر* .تهران: سازمان هواشناسی.

شهرداری تهران(۱۴۰۲) *گزارش طرح تهران سبز* .تهران: شهرداری تهران.

شرکت آب و فاضلاب تهران(۱۴۰۱) *گزارش وضعیت تأمین آب و جیره‌بندی در تهران* .تهران: شرکت آب و فاضلاب.

ساتبا (سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی(۱۴۰۲) *گزارش ظرفیت خورشیدی ایران* .تهران: ساتبا.

وزارت آموزش و پرورش(۱۴۰۱) *گزارش برنامه‌های آموزشی محیط‌زیست و تغییر اقلیم* .تهران: وزارت آموزش و پرورش.

وزارت بهداشت، درمان و آموزش پزشکی(۱۴۰۲) *آمار گرمازدگی تابستان ۱۴۰۲* .تهران: وزارت بهداشت.

وزارت نیرو (۱۴۰۲) *برنامه‌های شیرین‌سازی آب خلیج فارس* .تهران: وزارت نیرو.

بانک مرکزی ایران(۱۴۰۲) *گزارش اقتصادی سالانه* .تهران: بانک مرکزی.

Akbari, H., et al. (2016). Local climate change and urban heat island mitigation techniques. *Urban Climate*, *17*, 1–19. https://doi.org/10.1016/j.uclim.2016.04.001

Cambridge University Press. (2017). *Urban Climates* (T. R. Oke, et al.). Cambridge, UK.

IPCC. (2021). *Sixth Assessment Report: The Physical Science Basis*. Intergovernmental Panel on Climate Change. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1

NOAA. (2022). *Global and Regional Sea Level Rise Scenarios*. National Oceanic and Atmospheric Administration. https://oceanservice.noaa.gov/hazards/sealevelrise

UNESCO. (2020). *The United Nations World Water Development Report 2020: Water and Climate Change*. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.

UNEP. (2021). *Adaptation Gap Report 2021*. United Nations Environment Programme.

UN-Habitat. (2020). *World Cities Report 2020: The Value of Sustainable Urbanization*. United Nations Human Settlements Programme.

World Bank. (2019). *Lifelines: The Resilient Infrastructure Opportunity*. World Bank Group.

ردیابی و تحلیل همدیدی سرمای شدید شهرستان ورزقان (مطالعه موردی :۱۸ ژانویه۲۰۲۳)

آیسان کنزی حق [۱]، بهروز سبحانی [۲]*

۱. دانشجوی دوره دکتری آب و هواشناسی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
۲. نویسنده مسئول، استاد گروه اقلیم شناسی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.
آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول : sobhani@uma.ac.ir

چکیده

امواج سرمایی و یخبندان، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مخاطرات جوی، معمولا همه ساله در ایران، خسارت‌های گسترده و مخربی را در بخش‌های کشاورزی، اقتصادی، زیست - محیطی، عمرانی و ... وارد ساخته که با توجه به افزایش تغییرات اقلیمی، شدت یافته و نوسانات شدید دمایی را در مناطق مختلف کشور، به خصوص شمال‌غرب آن به دنبال داشته است. هدف از پژوهش حاضر، بررسی سینوپتیک دمای ۲۸/۳- درجه سانتی‌گراد ۱۸ژانویه سال ۲۰۲۳ شهرستان ورزقان، واقع در شمال‌شرق استان آذربایجان‌شرقی است. مطالعه حاضر، با رویکرد مبتنی بر تحلیل محیطی گردش جو گرد آوری شده است که در انجام آن، ابتدا مقدار دمای ثبت شده ایستگاه ورزقان از اداره کل هواشناسی استان آذربایجان‌شرقی تهیه شده و سپس با دریافت و بررسی داده‌های سطوح فوقانی جو(نقشه‌های ارتفاع ژئوپتانسیل، فشار سطح دریا، امگا، رطوبت نسبی، سرعت باد تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، ضخامت تراز ۵۰۰ -۱۰۰۰هکتوپاسکال و نقشه دما تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال) از سایت نووا، جهت تحلیل الگوهای همدیدی منجر به یخبندان شدید، شهرستان ورزقان برای ۴۸ ساعت قبل و زمان رخداد مذکور استخراج گردید. نتایج تحلیل مبین استقرار سامانه بسیار قوی پرفشار سیبری منطقه قزاقستان- سیبری، نقشه‌های فشار سطح دریا و حاکمیت سیستم‌های بلاکینگ امگایی شکل و هسته پرارتفاع قطبی مستقر بر منطقه قزاقستان، در نقشه‌های سطوح فوقانی جو تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال بوده که در ترکیب با موقعیت کوهستانی، اقلیم سرد شهرستان ورزقان و شرایط فصلی حاکم، نقش اساسی در سرمای و افت شدید دما تا ۲۸/۳- درجه سانتی‌گراد ایفا کرده‌اند.

واژه گان کلیدی: یخبندان، شهرستان ورزقان، تحلیل سینوپتیک، پرفشار سیبری، سیستم‌های بلاکینگ

۱-مقدمه

از جمله مخرب‌ترین و کشنده‌ترین مخاطرات طبیعی که همه ساله در کل جهان و به خصوص کشور ایران رخ داده و موجب برجای گذاشتن خسارت‌های مالی، اجتماعی، عمرانی، کشاورزی و زیست محیطی فراوانی می‌گردند، مخاطرات جوی و اقلیمی می‌باشند. افزایش رخدادهای مقادیر فرین دما، تغییرات در رفتار سنجه‌های هواشناسی و اقلیمی از جمله مواردی می‌باشند که عامل اصلی آن، تغییرات اقلیمی است و در دهه‌های اخیر به وفور به وقوع پیوسته‌اند. تغییرات رخدادهای امواج سرما و گرمایی مناطق از جمله نمایه‌های تغییرات اقلیمی هستند که توسط موسسات پژوهشی مختلف نیز بدان اشاره شده است و در هر منطقه به صورت مقادیر فرین بالا و پایین‌تر از حد معمول رخ می‌دهند(دارند، ۱۳۹۳). وقوع پدیده یخبندان و امواج سرمایی که ناشی از تغییرات دما در طول زمان بوده و با توده‌های هوایی دمای زیر صفر درجه سانتی‌گراد همراه هستند، نیز از جمله بلایای طبیعی زیان باری می‌باشند که خسارت‌های زیادی را هم بر حیات موجودات زنده و هم در بحث‌های مرتبط با بخش‌های عمرانی و کشاورزی وارد می‌سازند. ایران و منطقه شمال‌غرب آن نیز همه ساله با پدیده افت دما و سرمای شدید، با دوام و شدت‌های گوناگون رو به رو بوده که با رخ داد خود موجب مختل شدن فعالیت‌های انسانی و تاثیرگذاری بر بخش‌های گوناگون می‌شوند(فروتن و صلاحی، ۱۴۰۲). شهرستان ورزقان نیز با قرارگیری در شمال شرقی استان آذربایجان‌شرقی و با توجه به موقعیت کوهستانی خود و از طرفی وجود کوه‌های بلند و مرتفع از جمله رشته کوه قره‌داغ(ارسباران)، همواره مورد هجوم توده‌های هوای گوناگون در فصول مختلف سال بوده که وضعیت اقلیمی این شهرستان را تحت تاثیر خود قرار می‌دهند، به گونه‌ای که در زمستان سال ۲۰۲۳ (۱۰دی‌ماه سال ۱۴۰۱) این شهرستان شاهد افت شدید دما تا ۲۸/۳- درجه سانتی‌گراد و وقوع پدیده یخبندان گردید. بنابراین هدف از این مطالعه، شناسایی و درک بهتر از الگوهای سینوپتیکی موثری است که موجب ایجاد و تقویت موج سرد مورخ ۱۸ ژانویه محدوده مورد مطالعه و افت بی‌سابقه دمای آن گشته است. بنابراین اصلی‌ترین سوال مطرح شده در پژوهش حاضر که به آن پرداخته شده، عبارت است از : کلیدی‌ترین سامانه‌های جوی تاثیرگذار، در ایجاد هوای بسیار سرد و افت بی‌سابقه دمای شهرستان ورزقان تا ۲۸/۳- درجه سانتی‌گراد مورخ ۱۸ ژانویه سال ۲۰۲۳ کدام می‌باشند؟ و مطرح‌ترین فرضیه برای این پژوهش را می‌توان چنین بیان نمود: سرمای شدید ۱۸ژانویه سال ۲۰۲۳ شهرستان ورزقان، در نتیجه فعالیت و نفوذ توده هوای سرد و خشک سیبری به سمت شمال‌غرب کشور ایران، همزمان با قرارگیری در ماه سرد از فصل زمستان بوده است.مطالعات متعددی در رابطه با بررسی پدیده‌های حدی دما، به ویژه سرمای شدید و یخبندان با رویکرد همدیدی، با همراهی مدل‌ها و روش‌های مختلف تحلیل جوی، در جهان و ایران توسط محققان و پژوهشگران این حوزه صورت پذیرفته است که از جمله آن می‌توان به نمونه‌های زیر اشاره نمود. روستیکوکی۸۸ و وارگلاس (۱۹۹۵) وزش بادهای جنوب‌شرقی به سمت شمال را که در اطراف یک سامانه

88 Rusticucci

آنتی‌سیکلونی در جریان بوده‌اند را از شرایط سینوپتیکی لازم برای سردترین روزهای سال مطرح نمودند(فروتن و صلاحی،۱۴۰۲). مولر و همکاران ۸۹(۲۰۰۳) با تقسیم بندی الگوهای یخبندان، با در نظر گرفتن نحوه گسترش آن‌ها به بررسی الگوهای تراز دریای مرتبط با یخبندان‌های آمریکای جنوبی پرداختند و به این نتیجه دست یافتند که عامل اصلی یخبندان‌های آمریکای جنوبی، الگوی فشار تراز دریا می‌باشد (زینالی و همکاران، ۱۴۰۱). ژو و همکاران۹۰ (۲۰۰۹) سه عامل سینوپتیکی مهم را در ایجاد روزهای بسیار سرد و دمای پایین ژانویه ۲۰۰۸ جنوب چین، جذب هوای سرد و خشک سیبری از مناطق سیبری به سمت مرکز و جنوب چین، وجود جریان‌های جنوب‌غربی که به طور مداوم در حرکت بوده‌اند و وجود وارونگی عمیق در تروپوسفر زیرین به همراه وجود پوشش برف گسترده مناطق مرکزی و جنوبی چین بیان نمودند. روستا و همکاران۹۱ (۲۰۱۶) الگوی ضخامت جو یخ‌های گسترده منطقه ایران را به روش آماری و سینوپتیکی در طول یک دوره۵۰ ساله انجام دادند و نتایج به این صورت استخراج گردید که وجود سیستم پرفشار سیبری و در برخی موراد ترکیب آن با سامانه پرفشار اروپای شرقی در یخبندان‌های فراگیر ایران نقش کلیدی داشته‌اند. آناگنوستوپولو و همکاران۹۲ (۲۰۱۷) به مطالعه دوره یخبندان ۵ ژانویه الی ۱۲ ژانویه در سال ۲۰۱۷ شبه جزیره بالکان پرداختند که نفوذ توده‌های هوای سرد قطب شمال به اروپای شرقی و مرکزی و بالکان به همراه کاهش سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال بالکان را از علل اصلی سرمای مذکور بیان نمودند. عالی جهان و همکاران۹۳ (۲۰۱۸) وجود سامانه پرفشار سیبری را به همراه جریان‌های شمالی که با هدایت موج‌های سرد عرض‌های شمالی به سمت ایران و منطقه شمال‌غرب آن شده‌اند را از دلایل اصلی امواج سرمایی زیر ۱۵- درجه سانتی‌گراد و در طول دوره آماری ۱۴۲ساله مطرح نمودند(فروتن و صلاحی،۱۴۰۲). فتحیان و همکاران ۹۴(۲۰۲۰) رخدادهای حدی دما را در استان آذربایجان‌شرقی، در طول دوره آماری ۱۰ ساله اخیر بررسی کردند که نتایج حاکی از روند افزایشی شاخص‌های گرم و روند کاهشی شاخص‌های سرد در منطقه مورد مطالعه بوده است(جوان و موقری، ۱۴۰۳) . کریمی و همکاران (۱۳۹۱) به مطالعه امواج سرمایی و فراگیر ایران از دیدگاه همدیدی پرداختند که در این پژوهش تشکیل الگوی پرفشار سیبری و نفوذ آن به سمت عرض‌های زیرین که همراه با تشکیل پشته‌ای عمیق همراه بوده

89 Muller

90 Zhou

91 Rousta

92 Anagnostopoulou

93 Aalijahan

94 Fathian

است را در تشدید و ایجاد سرمای شدید منطقه اشاره نمودند. لشکری و همکاران(۱۳۹۳) سامانه پرفشار سیبری و گذر کم‌فشار شمالی با ایجاد پشته ناشی از فرابار مهاجر اروپا به سمت محدوده مورد مطالعه را که موجب فرا رفت هوای سرد و کاهش دمای منطقه مورد مطالعه گشته است را در تحلیل‌های همدیدی دمایه پایه برف شمال‌غرب ایران به‌عنوان اصلی‌ترین عامل مطرح نمودند. عساکره و شاهبایی کوتنایی(۱۳۹۴) وجود یک سیستم بلاکینگ شکل گرفته در غرب و مرکز اروپا و سامانه کم‌ارتفاع مستقر در شمال منطقه روسیه که موجب انتقال هوای سرد قطبی نواحی شمالی اسکاندیناوی به جانب منطقه ایران شده را از علت‌های اصلی سرمای فراگیر ایران ما بین سال‌های ۱۳۳۹ تا ۱۳۸۸ بیان نمودند. دوستکامیان و همکاران (۱۳۹۵) با استفاده از روش آماری و همدیدی و درون‌یابی فضایی کریجینگ و نرم افزارmatlab و خوشه‌بندی روزهای سرد به چهار الگو، فعالیت و استقرار سیبری و پرفشار مهاجر غربی را در هدایت و تزریق هوای سرد سطوح شمالی به سمت شمال‌غرب منطقه ایران تاثیر گذار دانسته‌اند. قاسمی‌فرد و ناصرپور(۱۳۹۶) امواج گرمایی و سرمای سواحل جنوبی دریای خزر را با استفاده از روش همدیدی تحلیل کردند و به این نتیجه دست یافتند که مراکز پرفشار اروپای شرقی، سیبری، کوه‌های آلپ و کم‌فشار اورال موجب ایجاد موج‌های سرد منطقه و تشکیل مراکز سیکلون عربستان، پاکستان و خلیج فارس در ایجاد موج‌های گرم منطقه تاثیر بسزایی داشته‌اند. براتی و همکاران(۱۳۹۷) با مطالعه و تحلیل شهرهای مستعد سرمای شدید ایران، نشان دادند که وجود هسته‌های آنتی‌سیکلون پرفشار سیبری در پیرامون مناطق دریاچه‌های بایکال و بالخاش، موجب ثبت دماهای پایین در شهرهای ایران شده است (فروتن و صلاحی،۱۴۰۲). حسن‌زاده و همکاران(۱۳۹۸) با بهره گرفتن از تکنیک تحلیل مولفه‌های اصلی و روش خوشه بندی سلسله مراتبی ward به مطالعه الگوهای اصلی سینوپتیکی تراز دریای یخبندان‌های بهاره استان کرمانشاه پرداختند که در الگوبندی خود به وجود پرفشارهای سیبری، شمال مدیترانه و دریاچه وان اشاره نمودند. زینالی و همکاران(۱۴۰۱) در بررسی وسیع‌ترین یخبندان‌های شمال‌غرب ایران در طی سال‌های۲۰۰۱-۲۰۱۷، که برای۹ ایستگاه شمال‌غرب، با استفاده از روش خوشه‌ای سلسله مراتبی ward الگوبندی گردید که در این مطالعه بیشترین سامانه‌های تاثیرگذار بر روی منطقه شمال‌غرب ایران، سامانه‌های پرفشار سیبری، کم‌فشار جنب قطبی و پرفشار اروپای شمالی و قرارگیری محدوده مورد مطالعه در مقابل محور فراز به همراه جریان بادهای غربی که موجب هدایت جریانات سرد شمالی به شمال‌غرب ایران گشته است، بیان نمودند(زینالی و همکاران، ۱۴۰۱). فروتن و همکاران(۱۴۰۲) با شناسایی الگوهای جوی مؤثر بر کاهش دمای شهر اردبیل، با استفاده از روش محیطی به گردشی و از طریق تعیین دوره‌های بازگشت آن با مدل آماری Hyfran-plus و بررسی تغییرات آن درسال‌های آینده طبق سناریوهای مختلف ریزگردانsdsm به این نتیجه دست یافتند که در هدایت هوای سرد عرض‌های شمالی به سمت منطقه مورد مطالعه، سیستم پرفشار حرارتی سیبری در نقشه‌های فشار سطح دریا و قرارگیری حوزه مطالعاتی در مقابل محور فراز مستقر بر روی اروپا در نقشه‌های سطوح فوقانی جو، نقش کلیدی داشته که موجب ایجاد

شرایط چرخندگی منفی هوا و تقویت جریانات نزولی و افت دما شده است (فروتن و صلاحی، ۱۴۰۲). جوان و همکاران (۱۴۰۳) به بررسی تغییرات شاخص‌های حدی دمای شمال‌غرب ایران و ارتباط آن‌ها با گردش کلی جو، در طول دوره ۲۵ ساله پرداختند که تقویت گردش فرا بار حاکم در منطقه، به همراه افزایش ارتفاع ژئوپتانسیل و افزایش پایداری جو، موجب تشدید تغییرات اقلیمی شمال‌غرب ایران شده است (جوان و موقری، ۱۴۰۳). انجام چنین مطالعات و تحلیل‌هایی در زمینه امواج سرمایی که موجب آشکارسازی سامانه‌ها و الگوهای مولد سرمای شدید و یخبندان مناطق می‌گردد، در شهرستان ورزقان نیز با وجود اقلیم سرد و موقعیت کوهستانی، که حداکثر تاثیر را از شرایط جوی این چنینی بر می‌دارد، از حیث افزایش امکان پیش‌بینی و کاهش خسارت‌های ناشی از آن، ضرورت یافته و حائز اهمیت می‌باشد.

۲-مواد و روش‌ها

۲-۱-معرفی منطقه مورد مطالعه

شهرستان ورزقان با مساحت ۲۳۶۸/۱۲ کیلومتر مربع در شمال‌شرقی استان آذربایجان‌شرقی واقع شده است. این شهرستان از لحاظ همجواری، به شهرستان‌های اهر از جانب شرق، مرند از غرب، جلفا از شمال، کلیبر از شمال‌شرق و تبریز از جنوب محدود شده است و با کشورهای ارمنستان و جمهوری آذربایجان نیز هم مرز می‌باشد. شهرستان ورزقان در فصل تابستان دارای آب و هوای معتدل تا گرم و در فصل زمستان، سرد و یخبندان و پر برف بوده که دلیل آن هم ارتفاع زیاد منطقه و وجود کوهستان‌های متعدد(رشته کوه‌های قره‌داغ) در پیرامون منطقه است. شکل(۱) نقشه موقعیت شهرستان ورزقان نسبت به نقشه کشور ایران و استان آذربایجان‌شرقی را نشان می‌دهد.

جدول ۱. مشخصات ایستگاه سینوپتیک ورزقان

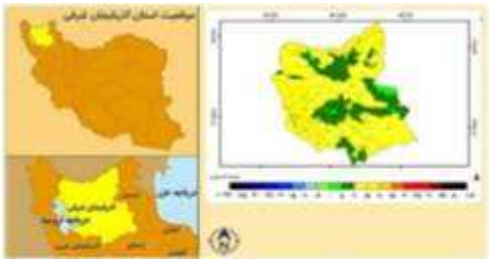
ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع
ورزقان	۴۶ ۴۴	۳۸ ۴۲	۱۶۷۰



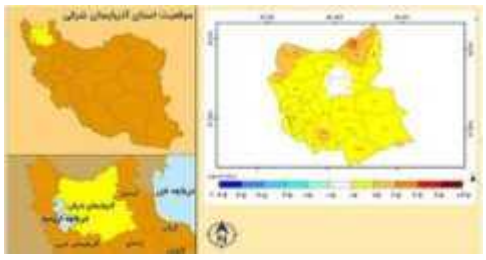
شکل ۱- نقشه موقعیت قرارگیری شهرستان ورزقان

جدول ۲- دمای کمینه مطلق در سال آبی ۱۴۰۱-۱۴۰۲، منبع : (اداره کل هواشناسی استان آذربایجان‌شرقی ، سالنامه ۱۴۰۱-۱۴۰۲)

سال ۱۴۰۲	سال ۱۴۰۱(۱۸ژانویه سال۲۰۲۳)	بلند مدت
-۲۶/۶	-۲۸/۳	-۳۰/۲
سراب	ورزقان	بستان آباد
۱۴۰۲/۱۰/۲۱	۱۴۰۱/۱۰/۲۸	۱۳۸۵/۱۰/۳۰



شکل۲- پهنه بندی دمای میانگین سال آبی ۱۴۰۲-۱۴۰۱ استان آذربایجان‌شرقی، منبع : اداره کل هواشناسی استان آذربایجان‌شرقی، سال ۱۴۰۲-۱۴۰۱



شکل۳- پهنه بندی اختلاف میانگین دمای شهرستان‌های استان نسبت به بلندمدت، منبع : اداره کل هواشناسی استان آذربایجان‌شرقی، سال ۱۴۰۲-۱۴۰۱

۲-۲- داده‌ها و روش‌ها

در مطالعه حاضر به منظور تحلیل همدیدی و سینوپتیکی یخبندان و افت شدید دمای ۱۸ ژانویه سال ۲۰۲۳ شهرستان ورزقان تا دمای ۲۸/۳- درجه سانتی‌گراد، اقدام به بررسی ویژگی‌های جو بالا و جو پایین موج سرد شده است. ابتدا داده‌های مربوط به ایستگاه شهرستان ورزقان با مراجعه به اداره کل هواشناسی استان آذربایجان‌شرقی دریافت گردید و در گام بعدی جهت تحلیل رخداده یخبندان و کاهش شدید دما در منطقه مورد مطالعه از نقشه‌های سینوپتیکی(ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، فشار سطح دریا، دمای تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال، امگا، ضخامت، رطوبت نسبی و سرعت باد) مربوط به سطوح مختلف جوی از دو روز قبل موج سرد و زمان یخبندان شدید، با اخذ از وب سایت متعلق به مرکز ملی پیش‌بینی محیطی - مرکز ملی پژوهش‌های جوی ایالات متحده۹۵ (www.esrl.noaa.gov/psd/ data/) (NCEP) استفاده شده است. برای انجام تحلیل الگوهای موثر، تمامی نقشه‌ها در محدوده عرض جغرافیایی ۷۰-۱۰ و طول جغرافیایی ۹۰-۰، برای تاریخ‌های۱۶-۱۷-۱۸ ژانویه سال ۲۰۲۳ انتخاب شده است.

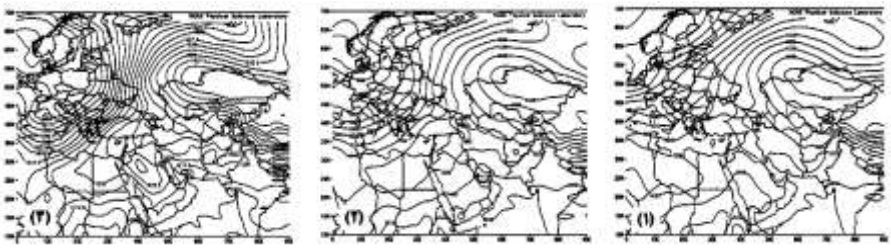
۳-نتایج و بحث

۳-۱- وضعیت فشار تراز سطح دریا (روزهای ۱۶-۱۷-۱۸ژانویه سال ۲۰۲۳)

بررسی نقشه‌های فشار سطح دریای تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (شکل۴) برای ۴۸ ساعت قبل از وقوع سرمای شدید و یخبندان شهرستان ورزقان، حاکی از تسلط سامانه پرفشار بسیار قوی سیبری با هسته مرکزی فشار۱۰۴۰میلیبار، مستقر بر روی منطقه قزاقستان- سیبری و شمال کشور ایران بوده که زبانه فشاری ۱۰۲۵ میلیبار آن از منطقه شمال‌غرب ایران و شهرستان ورزقان عبور کرده است. این سیستم پرفشار قوی با ارسال جریانات بسیار سرد و خشک شمال‌شرقی- جنوب‌غرب سوی خود از جانب مناطق سیبری و روسیه به سمت سطوح زیرین جو، به ویژه کشور ایران و محدوده مورد مطالعه گشته که به دنبال آن مقدمات سرمای شدید و افت دما تا ۲۸- درجه سانتیگراد را در مورخ ۱۸ ژانویه ۲۰۲۳ برای شهرستان ورزقان فراهم نموده است. در یک روز قبل از افت شدید دمای منطقه مورد مطالعه، زبانه فشاری ۱۰۲۵ میلیبار آنتی سیکلون مستقر در منطقه قزاقستان- سیبری، نیمی از شمال‌غرب ایران و کل منطقه مورد نظر را تحت سیطره خود قرار داده است که همزمان با قرارگیری در سردترین ماه از فصل سرد زمستان و شدت گرفتن فعالیت پرفشار سیبری، موجب افزایش سرما

95 National Centers for Environmental Prediction

و افت شدید دمای مناطق تحت نفوذ گشته است. در زمان وقوع یخبندان، زبانه فشاری ۱۰۲۵ میلیبار آنتی سیکلون قوی مناطق قطبی و سیبری، تا نیمی از ایران گسترش یافته، که نشان از سرمای گسترده مناطق و نفوذ هوای بشدت سرد و خشک حاصل از جریانات قطبی بوده که در ترکیب با الگوی توپوگرافیک و شرایط کوهستانی منطقه و از طرفی با وجود دره‌ها و دشت‌های محصور ما بین کوه‌های بلند افزایش یافته است .

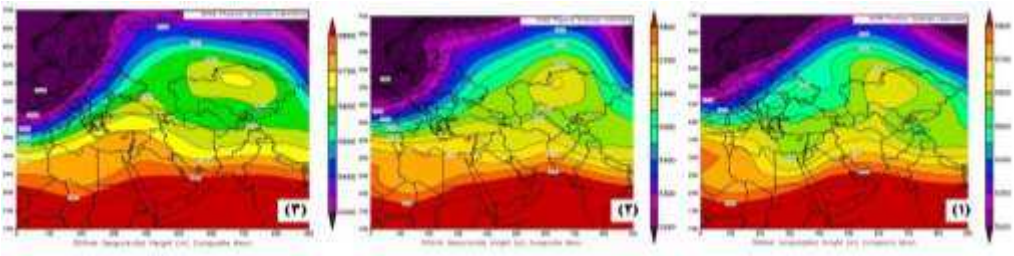


شکل ۴ - نقشه فشار تراز سطح دریا (میلیبار) روزهای(۱) ۱۶- (۲)۱۷-(۳)۱۸ژانویه، سال ۲۰۲۳، منبع www.esrl.noaa.gov/psd/ data/:

۳-۲-وضعیت ارتفاع ژئوپتانسیل (روزهای ۱۶-۱۷-۱۸ ژانویه سال ۲۰۲۳)

نقشه‌های ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال مربوط به دو روز قبل از رخداد و زمان وقوع یخبندان (شکل۵)، به وضوح وجود استقرار سامانه‌های بندالی حاکم در شرایط جوی آن روز به همراه ناوه‌ها و پشته ایجاد شده را گویا می‌باشند. به طوریکه در نقشه دو روز پیش افت شدید دمای شهرستان ورزقان، حاکمیت سیستم بلاکینگ امگایی شکل تشکیل شده بر فراز منطقه قزاقستان-سیبری و شمال ایران کاملا مشهود بوده که با ایجاد تغییر در جهت طبیعی جریان باد (غربی- شرقی) و هدایت هوای بسیار سرد مناطق سیبری به عرض‌های میانی از جمله ایران، موجب ناپایداری و اغتشاشات شدید جوی و ماندگاری هوای بشدت سرد و خشک سیبری در مناطق تحت نفوذ شده است . سیستم بلاکینگ موجود، با ایجاد یک پشته کشیده شده عمیق به سمت مناطق شمالی، موجب هدایت مستقیم و انتقال هوای بسیار سرد و خشک، به خصوص با در نظر گرفتن قرارگیری در ماه سرد از فصل سرد زمستان و کاهش دریافت انرژی خورشیدی، به سمت ایران و منطقه مورد مطالعه شده است. از طرفی با ایجاد ناوه‌ای در شمال‌غرب منطقه ایران و بر روی دریای مدیترانه که تا قسمتی از کشور مصر نیز کشیده، به‌عبارتی با قرارگیری منطقه مورد مطالعه در مقابل محور فرود، تقویت فرارفت هوای بشدت سرد و قطبی به سمت محدوده مورد نظر ایجاد شده است. در مورخ ۱۷ ژانویه سال ۲۰۲۳، به‌عنوان یک روز قبل یخبندان شدید منطقه مورد مطالعه، بر فراز منطقه قزاقستان و محدوده روسیه، حاکمیت یک سامانه بندالی پر ارتفاع با هسته مرکزی ۵۶۵۰ متری کاملا مشهود

بوده که نقشی کلیدی در تغییر جهت باد از غرب به شرق و انتقال هوای بسیار سرد و خشک منطقه سیبری به عرض‌های میانه داشته است. سامانه بندالی موجود با حبس سرمای شدید منطقه سیبری، موجب پایداری شرایط جوی حاکم، ایجاد سرمای فراگیر، یخبندان و افت کم سابقه دما در کشور ایران و به ویژه منطقه ورزقان شده است. در این حالت نیز وجود پشته عمیق سامانه بلاکینگ پرارتفاع که به سمت شمال و منطقه روسیه کشیده شده است و قرارگیری ایران و منطقه مورد مطالعه در پشت فراز، که همراه با انتقال و هدایت هوای بسیار سرد و خشک می‌باشد و از طرفی وجود ناوه کشیده شده بر روی منطقه اروپا و شمال‌غرب منطقه ایران به وضوح به چشم می‌خورد که در تشدید سرما و افت شدید دما برای روز بعد نقش اساسی داشته‌اند. وجود سامانه بلاکینگ پر ارتفاع ۵۶۵۰ متری برروی منطقه قزاقستان و سیبری نشان از پایداری سرمای شدید در مناطق میانی به همراه تشدید آن می‌باشد که وجود پشته عمیق شمال‌غرب سوی این سیستم و ناوه عمیق موجود منطقه اروپا، دلالت بر میزان سرما و هجوم توده هوای بسیار سرد و خشک به سمت کشور ایران و شهرستان ورزقان و در نتیجه افت شدید دما تا ۲۸- درجه سانتی‌گراد داشته که حاکمیت سامانه پرفشار قوی سیبری بر روی منطقه قزاقستان- سیبری را نیز در نقشه‌های سطح دریای آن روز اثبات می‌نماید .

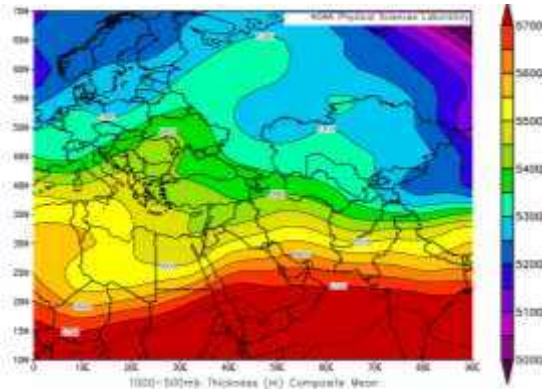


شکل ۵- ارتفاع ژئوپتانسیل (متر) روزهای ۱۶-۱۷-۱۸ ژانویه سال ۲۰۲۳، منبع :www.esrl.noaa.gov/psd/ data/

۳-۳- وضعیت ضخامت جو تراز ۵۰۰-۱۰۰۰هکتوپاسکال

میزان ضخامت جو۵۴۰۰ متری برای شهرستان ورزقان(شکل۶)، حاکی از کاهش ضخامت جو و میزان سردی منطقه می‌باشد که دلیل آن فعالیت سیستم پرفشار قوی سیبری در نقشه‌های سطح دریای روزهای موید و حاکمیت سیستم‌های بندالی موجود در نقشه‌های سطوح فوقانی جو در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال می‌باشد که به دنبال خود موجب هدایت و انتقال هوای بشدت سرد شمالی و سیبری به لایه‌های زیرین از جمله منطقه ایران و محدوده ورزقان به خصوص با قرارگیری در منطقه کوهستانی شده است. با پیشروی به مناطق فوقانی و شمالی از مقدار ضخامت جو نیز کاسته شده، به گونه‌ای که ضخامت ۵۳۰۰ متری مناطق قزاقستان، روسیه و سیبری، دلالت بر سرد بودن مناطق فوق الذکر و افت شدید دمای آن‌ها

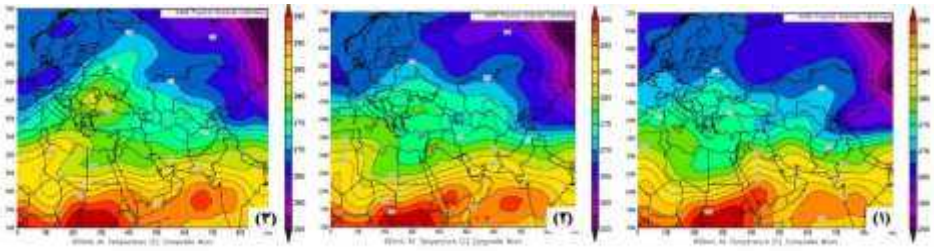
را حتی تا پایین‌تر از ۲۸- درجه سانتی‌گراد را به همراه داشته که به دنبال خود موجب سرمای فراگیر و افت شدید دما برای مناطق تحت نفوذ شده است.



شکل ۶ -ضخامت جو (متر) ۱۸ژانویه سال ۲۰۲۳، منبع :www.esrl.noaa.gov/psd/ data/

۳-۴- ارزیابی نقشه دمای تراز۸۵۰ هکتوپاسکال(روزهای ۱۶-۱۷-۱۸ ژانویه سال ۲۰۲۳)

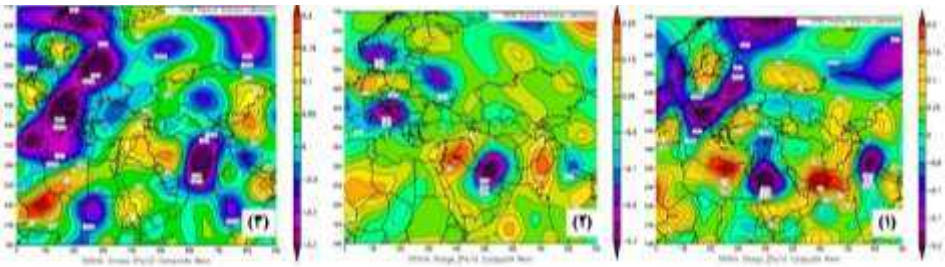
نقشه‌های دمای تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال روزهای مورد بررسی(شکل۷)، نشان از قرارگیری شمال و شمال‌غرب ایران در بازه دمایی ۲۷۰ تا ۲۷۵ درجه کلوین می‌باشد که شهرستان ورزقان نیز در این بازه دمایی قرارگرفته است . این میزان دمای مناطق دلالت بر سرمای شدید و کاهش محسوس دما داشته که فعالیت سیستم‌های فشاری بسیار قوی موجود در نقشه‌های سطح زمین و بلاکینگ‌های شکل یافته در سطوح فوقانی جو در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال نقش کلیدی در ایجاد آن داشته‌اند و با در نظر گرفتن فصل زمستان و شرایط توپوگرافیک منطقه مطالعاتی تشدید نیز شده‌اند. سامانه‌های تشکیل شده در روزهای موید، باعث هدایت سرما از عرض‌های فوقانی به خصوص سیبری به سمت عرض‌های میانی از جمله خاورمیانه و کشور ایران شده و به سبب شرایط پایداری که ایجاد کرده اند مانع از گذر جریان طبیعی بادهای سرد و در نتیجه ماندگاری سرما در منطقه شده‌اند .گذر زبانه دمایی ۲۷۰ درجه کلوین از روی منطقه قزاقستان و ۲۶۵ درجه کلوین از منطقه سیبری نشان از شدت سرمای مناطق فوق الذکر و شروع فعالیت توده‌های هوایی سردی از جمله پرفشار سیبری دارند .



شکل ۷- نقشه دما (کلوین)، (۱)۱۶- (۲)۱۷- (۳)۱۸ ژانویه سال ۲۰۲۳، منبع:www.esrl.noaa.gov/psd/ data/

۳-۵- شرایط امگایی (روزهای ۱۶-۱۷-۱۸ ژانویه سال ۲۰۲۳)

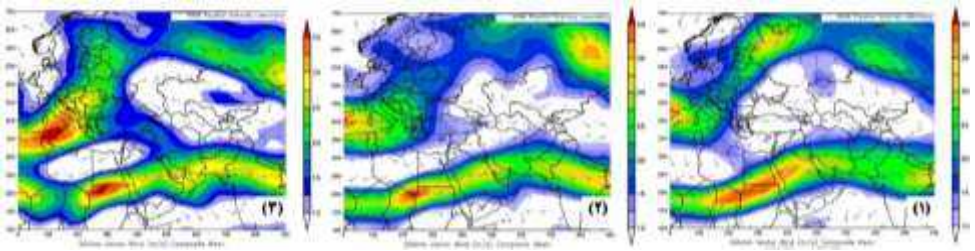
در نقشه‌های امگا برای ۲ روز پیش از وقوع پدیده یخبندان در منطقه مورد مطالعه، عبور زبانه‌های مثبت امگایی ۰/۰۲۵ پاسکال بر ثانیه، از روی منطقه شمال‌غرب ایران، نشان از پایداری شرایط جوی ایجاد شده و فرونشینی هوا با در نظر گرفتن سرمای حاکم در منطقه و زمان قرارگیری یعنی فصل زمستان می‌باشد که از طرفی نیز گویای حاکمیت سیستم بندالی شکل یافته بر روی منطقه قزاقستان – سیبری را در نقشه‌های سطوح فوقانی جو تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال می‌باشد که با حبس کردن جریانات سرد قطبی و ممانعت از جریان‌های طبیعی باد از غرب به شرق، موجب هدایت سرمای بسیار شدید و خشک سیبری به مناطق جنوبی از جمله ایران و شهرستان ورزقان و رسیدن دما به حداقل‌های شدید شده که از طرفی گویای حاکمیت و فعالیت سامانه آنتی‌سیکلون بسیار قوی سیبری در عرض‌های فوقانی جو و مستقر بر منطقه قزاقستان و دریاچه‌های بایکال و آرال می‌باشد. مقادیر منفی امگا در منطقه روسیه و سیبری نشان از صعود شدید هوا و ناپایداری جوی در ایجاد توده‌های هوای بسیار سرد قطبی بوده که همزمان با فعالیت سیستم پرفشار سیبری و ارسال جریانات شمال‌شرقی-جنوب‌غرب سوی آن به جانب عرض‌های میانی از جمله ایران و تشکیل بلاکینگ‌های موجود در نقشه‌های سطوح فوقانی جو تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، تشدید گشته است که نتیجه آن، سرمای شدید و فراگیر با ماندگاری برای چند روز برای مناطق زیرین می‌باشد. در نقشه‌های امگا روزهای ۱۷ و ۱۸ ژانویه، مقادیر مثبت امگا در مناطق شمال‌غرب ایران و شهرستان ورزقان و همچنین عرض‌های فوقانی(منطقه قزاقستان) نشان از پایداری جوی، آسمانی صاف و بی ابر که موجب انتقال مستقیم جریانات سرد قطبی به سطوح زیرین را به دنبال داشته است. وجود حلقه منفی امگایی مستقر بر روی منطقه قزاقستان و دریاچه آرال در نقشه امگا ۱۸ ژانویه، نشان از حاکمیت هسته بسیار سرد قطبی بوده که با وجود بلاکینگ پر ارتفاع شکل گرفته سطوح فوقانی جو در این منطقه، محبوس شده و موجب تشدید سرما و افت شدید دما در مناطق پیرامون به خصوص شهرستان ورزقان گشته، به گونه‌ای که دمای ۲۸- درجه سانتیگراد را که جز دماهای حدی بوده در تاریخ ۱۸ ژانویه سال ۲۰۲۳ برای این استان به ثبت رسانده است.



شکل ۸- نقشه امگا در تراز ۵۰۰ میلیبار روزهای (۱)۱۶- (۲)۱۷- (۳)۱۸ ژانویه سال ۲۰۲۳، منبع:/www.esrl.noaa.gov/psd/ data

۳-۶- وضعیت باد در سطوح فوقانی (روزهای ۱۶-۱۷-۱۸ژانویه سال ۲۰۲۳)

نقشه رود باد برای روزهای مورد بررسی یخبندان شهرستان ورزقان، به وضوح گویای حاکمیت سیستم بندالی تشکیل شده بر روی منطقه قزاقستان، دریاچه آرال و بایکال بوده به گونه‌ایی که در این محدوده جریانات باد از حالت غرب به شرق تغییر جهت داده و سیستم‌های بلاکینگ‌های شکل گرفته، موجب دو شاخه شدن رودباد گشته است به عبارتی در پیرامون محل بلاکینگ‌های امگایی شکل و پرارتفاع روزهای ۱۶ الی ۱۸ ژانویه با حبس هوای سرد در منطقه قزاقستان – سیبری، جریانات باد به سمت جنوب و عرض‌های میانی تغییر جهت داده‌اند که موجب انتقال هوای بسیار سرد و خشک مناطق سیبری و قطبی به جانب مناطق تحت نفوذ عرض‌های زیرین از جمله ایران شده که نتیجه آن افت بی‌سابقه دما در شهرستان ورزقان، به خصوص با در نظر گرفتن موقعیت کوهستانی منطقه بوده است. نزدیک بودن خطوط باد در نقشه‌های روزهای ۱۶ و ۱۷ ژانویه حاکی از سرعت زیاد جریانات باد (۱۰متر بر ثانیه) بوده که در مورخ ۱۸ ژانویه نیز با رسیدن به سرعت ۱۵ متر بر ثانیه شدت گرفته، که در ایجاد سرمای فراگیر منطقه مورد مطالعه نیز بی‌تاثیر نبوده است.

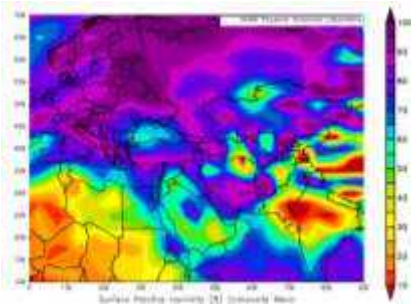


شکل ۹- نقشه سرعت قائم در تراز ۵۰۰ میلیبار روزهای (۱)۱۶- (۲)۱۷- (۳) ۱۸ ژانویه سال ۲۰۲۳، منبع:/www.esrl.noaa.gov/psd/ data

۳-۷- شرایط رطوبت نسبی(روزهای ۱۶-۱۷-۱۸ژانویه سال ۲۰۲۳)

مقادیر بالای ۸۰ درصد رطوبت نسبی در منطقه شمال‌غرب ایران و شهرستان ورزقان در روزهای مورد بررسی حاکی از میزان سردی و خشکی منطقه بوده که ناشی از سرمای مناطق بالادستی از جمله سیبری و روسیه می‌باشد. چنانچه میزان درصد رطوبت نسبی در این مناطق نیز در حدود ۹۰ درصد بوده که دلالت بر سرمای شدید منطقه و حاکمیت جریانات سرد و خشک قطبی و سیبری را دارد که با فعالیت سامانه پرفشار سیبری در نقشه‌های سطح زمین و سامانه‌های بندالی تشکیل شده در نقشه‌های سطوح فوقانی جو تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال بر شدت انتقال و فرونشست این جریانات به مناطق

میانی از جمله ایران افزوده شده و افت دما تا ۲۸- درجه سانتی‌گراد منطقه ورزقان را در تاریخ ۱۸ ژانویه سال ۲۰۲۳ منجر شده است .



شکل ۱۰- نقشه رطوبت نسبی (٪) روز ۱۸ ژانویه سال ۲۰۲۳، منبع:www.esrl.noaa.gov/psd/ data/

۴- نتیجه‌گیری

در بررسی و تحلیل الگوهای حاکم و تاثیرگذار در افت شدید دمای ۲۸/۳- درجه سانتی‌گراد شهرستان ورزقان در ۱۸ ژانویه سال ۲۰۲۳، با استفاده از نقشه‌های فشار سطح دریا و ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال ۴۸ساعت قبل و زمان رخداد، فعالیت پرفشار بسیار قوی سیبری با هسته مرکزی فشار ۱۰۴۰میلیبار، مستقر در شمال ایران و منطقه قزاقستان- سیبری و ازطرفی شکل گیری الگوهای بلاکینگ امگایی شکل روز ۱۶ژانویه و بلاکینگ پر ارتفاع روزهای ۱۷ و ۱۸ ژانویه مستقر در منطقه قزاقستان و دریاچه‌های بایکال و آرال، نقش کلیدی و موثر در هدایت و فرونشست سرمای شدید مناطق بالادستی ازجمله سیبری، به همراه محبوس نگه داشتن جریانات بسیار سرد و خشک مناطق شمالی و ممانعت از عبور آن داشته‌اند. فرابار موجود در نقشه‌های سطح زمین، با ارسال جریانات شمال‌شرقی-جنوب‌غربی سرد سیبری به سمت عرض‌های میانی از جمله خاورمیانه و کشور ایران موجب سرمای فراگیر و افت بی سابقه دما شده و از جانبی وجود سامانه‌های بندالی حاکم سطوح فوقانی با پشته عمیق کشیده شده به سمت شمال و ناوه‌هایی که بر روی اروپا و دریای مدیترانه ایجاد کرده است موجب هدایت جریانات سرد و خشک سیبری به همراه ثابت نگه داشتن شرایط جوی ایجاد شده برای مناطق تحت نفوذ از جمله شهرستان ورزقان شده است. بررسی نقشه‌های رودباد تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال روزهای مورد نظر، به وضوح وجود سیستم بندالی را در منطقه، که موجب دو شاخه شدن جریان رود باد، ممانعت از جریان باد به سمت شرق و ارسال جریانات شمالی سرد به مناطق جنوبی شده است، را نشان می‌دهند. سرعت بالای جریانات باد (۱۰متر بر ثانیه) در شهرستان ورزقان، نشان از شدت فرونشست هوای سرد و خشک سیبری در محدوده مورد مطالعه می‌باشد. با بررسی نقشه‌های دمای تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال و قرارگیری منطقه ایران و شهرستان ورزقان ما بین دمای ۲۷۰الی ۲۷۵درجه کلوین، می‌توان به سردی منطقه

و کاهش بی سابقه دما تا ۲۸- درجه سانتی‌گراد، که از تاثیرات الگوهای ذکر شده با همراهی ارتفاع زیاد و موقعیت کوهستانی شهرستان ورزقان و همچنین قرارگیری در سردترین ماه از فصل سرد سال بوده، پی برد. مقادیر مثبت امگا بر روی منطقه قزاقستان و عبور زبانه‌های آن از شمال‌غرب ایران، نشان از پایداری و ثبات شرایط جوی ایجاد شده توسط سیستم بندالی حاکم در سطوح فوقانی جو آن منطقه را داشته که با ایجاد آسمانی صاف و بی ابر همزمان با کاهش انرژی حرارتی خورشید و با در نظر گرفتن ماه ژانویه، موجب هدایت مستقیم جریانات سرد قطبی و سیبری به سمت محدوده مورد مطالعه و ماندگاری در آن گشته است. همواره وجود خطوط منفی امگا بر مناطق شمالی و سیبری نشان از ناپایداری جوی و ایجاد توده‌های هوای بسیار سردی است که مناطق زیرین را نیز تحت تاثیر خود قرار داده‌اند. مقادیر بالایی از درصد رطوبت نسبی (۸۰ درصد) در منطقه شمال‌غرب ایران و شهرستان ورزقان نشان دهنده میزان سردی و مساعد بودن شرایط منطقه جهت افت شدید دما بوده که با پیشروی به عرض‌های شمالی بر میزان آن تا ۹۰ درصد هم افزوده شده است که گویای سردی منطقه و کاهش دمای شهرستان ورزقان بوده که این منطقه را با شرایط حدی و وقوع پدیده یخبندان، در تاریخ ۱۸ژانویه سال ۲۰۲۳ مواجه ساخته است. بر اساس پیشینه تحقیقات صورت گرفته در این تحقیق، نتایج به دست آمده در مقایسه با سایر پژوهش‌ها به‌گونه‌ای اثبات کننده نتایج حاصل شده آن‌ها در این زمینه است که می‌توان گفت این نتایج در راستای نتایج حاصل شده از پژوهش‌های صورت گرفته توسط کریمی و همکاران(۱۳۹۱)، لشکری و همکاران(۱۳۹۳)، عساکره و شاهبایی کوتنایی(۱۳۹۴)، دوستکامیان و همکاران(۱۳۹۵)، قاسمی‌فرد و ناصرپور(۱۳۹۶)، براتی و همکاران(۱۳۹۷)، حسن زاده و همکاران(۱۳۹۸)، زینالی و همکاران(۱۴۰۱)، فروتن و همکاران(۱۴۰۲)، جوان و همکاران(۱۴۰۳) انجام شده است که همگی بر استقرار پرفشار حرارتی سیبری در نقشه‌های فشار سطح زمین، حاکمیت سیستم‌های بندالی پایدار سطوح فوقانی جو، به همراه پشته عمیق کشیده شده مناطق شمالی و ناوه کشیده شده اروپایی، نفوذ توده‌های هوای سرد مناطق شمالی و سیبری به همراه افت دما در ترازهای میانی و پایین جو اشاره کرده‌اند، مورد اثبات قرار گرفته است و نتایج حاصل شده به نوعی انعکاس نتایج کسب شده توسط این محققان می‌باشد، به گونه‌ای که در این روز با دمای ۲۸/۳- درجه سانتی‌گراد، آنتی سیکلون بسیار قوی سیبری مستقر بر منطقه قزاقستان- سیبری، تشکیل بلاکینگ‌های امگایی شکل و پرارتفاع و قرارگیری پشته عمیق آن در شمال و ناوه‌ای در شمال‌غرب منطقه ایران و شهرستان ورزقان در سطوح فوقانی جو و تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال نقش کلیدی و موثر ایفا کرده‌اند. بنابراین انجام چنین مطالعات و تحلیل‌هایی که با شناخت الگوهای جوی منجر به ایجاد پدیده‌های حدی از جمله یخبندان همراه است، در زمینه پیش بینی و هشداردهی زود هنگام را ارتقاء داده و موجب کاهش خسارات گوناگون در بخش‌های اقتصادی، کشاورزی،کنترل زیرساخت‌ها و... می‌گردد.

۵- مراجع

۱- براتی، غ.، مرادی، م.، شیری، ف. (۱۳۹۷). واکاوی همدید شهرهای رکورد دار سرما در ایران، فصلنامه جغرافیای طبیعی، ۱۱(۳۹)، ۸۰-۶۹ .

۲-بیدل، ر.، مسعودیان، س.ا. (۱۳۹۳). شناسایی توده‌های هوای ایران به روش طبقه‌بندی همدید مکانی. مجله جغرافیا و توسعه، ۱۲(۳۵)، ۱۸-۱.

۳-جوان، خ.، موقری، ع. (۱۴۰۳). تحلیل روند دمای شمال‌غرب ایران بر اساس مقادیر فرین و ارتباط آن با گردش کلی جو. آب و خاک، ۳۸(۵)، ۶۴۷-۶۲۹ .

۴-حس‌نزاده، ع.، عطایی، ه.، پروین، ن.،گندمکار، ا.(۱۳۹۸). بررسی الگوهای اصلی سینوپتیکی تراز دریا یخبندان‌های بهاره در استان کرمانشاه، فصلنامه جغرافیایی سرزمین،۱۶(۶۳)، ۵۵-۷۳.

۵-دارند، م.(۱۳۹۳). شناسایی امواج سرما و تحلیل زمانی- مکانی آنها بر روی ایران زمین . جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، ۲۵(۲)، ۲۶۸-۲۵۳.

۶-زینالی، ب.، فروتن، م.، اخوت، س. (۱۴۰۱). بررسی همدید وسیع‌ترین و مستمرترین یخبندان‌های شمال‌غرب ایران.فصلنامه جغرافیا و مطالعات محیطی، ۱۱(۴۴)، ۱۶۱-۱۴۸.

۷-عساکره، ح.، شاهبایی کوتنایی، ع. (۱۳۹۴). تحلیل همدید الگوی جوی فراگیرترین روز سرد ایران طی سال‌های ۱۳۳۹-۱۳۸۸. نشریه علمی- پژوهشی جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۶۴، ۲۱۱-۲۲۸ .

۸-فروتن، م.، صلاحی، ب. (۱۴۰۲). واکاوی همدیدی امواج سرمایی شهر اردبیل و برآورد دوره‌های بازگشت و تغییرات آن در سال‌های آینده . فصلنامه جغرافیا و روابط انسانی، ۵(۴) ، ۳۵۲-۳۶۹.

۹-قاسمی‌فر، ا.، ناصرپور، س. (۱۳۹۶). تحلیل سینوپتیکی امواج گرما و سرما در سواحل جنوبی دریای خزر. فصلنامه علمی-پژوهشی اطلاعات جغرافیایی(سپهر)، ۲۶(۱۰۳)، ۱۳۷-۱۴۶ .

۱۰-کریمی، ص.، نگارش، ح.، طاووسی، ت.، علیجانی، ب. (۱۳۹۱). تحلیل همدید امواج سرماهای فراگیر ایران مورد: موج سرمای دی و بهمن ۱۳۸۳ استان چهارمحال و بختیاری. جغرافیا و توسعه، ۱۰(۲۹)، ۷۶-۵۵.

۱۱- لشکری، ح.، پژوه، ف.، بیتار، م.، جعفری، ف. (۱۳۹۳). واکاوی همدید موج‌های سرمای بهاره استان آذربایجان‌غربی در سال‌های ۱۳۸۲ و ۱۳۸۴. نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۲(۱)، ۹۱-۷۵.

۱۲-لشکری، ح.، تقی‌زاده، ح.، مرادی، م.، نجفی، م.، س، (۱۳۹۳). تحلیل همدید دمای پایه بارش برف در شمال‌غرب ایران. نشریه پژوهش‌های اقلیم شناسی، ۱۳۹۳(۱۹و۲۰)، ۱۱-۲۲.

۱۳- میرموسوی، ح.، دوستکامیان، م.، ستوده، ف.، (۱۳۹۵)، بررسی و تحلیل الگوی فضایی تغییرات درون‌دهه‌ای بارش‌های سنگین و فوق سنگین ایران.جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، ۲۷(۳)، ۸۶-۳.

1- Aalijahan, M., Salahi, B., Ghavidel, Rahimi, Y., Farajzadeh Asl, M. (2018). A new approach in temporal-spatial reconstruction and synoptic analysis of cold waves in the northwest of Iran, Theoretical and Applied Climatology Vol. 137. p 341–352.
2-Anagnostopoulou, CH., Tolika, K., Lazoglou, G., Maheras, P. (2017). The Exceptionally Cold January of 2017 over the Balkan Peninsula: A Climatological and Synoptic Analysis, Atmosphere Vol. 8. Pp. 1-14.
3-Fathian, F., Ghadami, M., Haghighi, P., Amini, M., Naderi, S., & Ghaedi, Z. (2020). Assessment of changes in climate extremes of temperature and precipitation over Iran. Theoretical and Applied Climatology, 141, 1119–1133.https://doi.org/10.1007/s00704-020-03269-2
4-Muller, G.V. (2003). Surface circulation associate whit forst in the wet pampas international journal of climatology Vol. 23. Pp. 943-961.
5-Rusticucci, M., Vargas, W. (1995). Synoptic situations related to spells of extreme temperatures over Argentina, meteorological applications Vol. 2. p 291-300.
6-Rousta, I., Doostkamian, M., Haghighi, E., Mirzakhani, B. (2016). Statistical-Synoptic Analysis of the Atmosphere Thickness Pattern of Iran's Pervasive Frosts, Climate Vol. 4. p 1-19.
7-Zhou, W., Chan, GCL., Chen, W., Ling, J., Pinto, JG., Shao, Y. (2009). Synoptic-Scale Controls of Persistent Low Temperature and Icy Weather over Southern China in January 2008, Monthly Weather Review Vol. 137. p 3978–3991.

1988 in Synoptic tracking and analysis of widespread heavy rainfall of February2, northwest Iran

Aysan kanzi hagh[1], Behrouz Sobhani[2]*

1. Ph.D. Student of Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

2. Corresponding author, professor, Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

* Email: sobhani@uma.ac.ir

Abstract

Cold waves and frosts, as one of the most important weather hazards, usually occur every year in Iran, causing extensive and destructive damage in the agricultural, economic, environmental, construction, etc. sectors, which have intensified due to increasing climate change and have led to severe temperature fluctuations in different regions of the country, especially its northwest. The purpose of the present study is to investigate the synoptic temperature of -28/3 degrees Celsius on January 18, 2023 in Varzaghan County, located in the northeast of East Azerbaijan Province.The present study was compiled with an approach based on environmental analysis of atmospheric circulation, in which, first, the recorded temperature value of the

Varzaghan station was obtained from the Meteorological Department of East Azerbaijan Province, and then, by receiving and examining the data of the upper levels of the atmosphere (geopotential height maps, sea level pressure, omega, relative humidity, wind speed at the 500 hectopascal level, thickness at the 500-1000 hectopascal level, and temperature map at the 850 hectopascal level) from the Nova site, in order to analyze the synoptic patterns leading to severe frost, Varzaghan County for the previous 48 hours and the time of the aforementioned event were extracted. The results of the analysis showed the establishment of a very strong Siberian high-pressure system in the Kazakhstan-Siberia region, sea level pressure maps, and the dominance of omega-shaped blocking systems and a high-altitude polar core located over the Kazakhstan region, in the upper atmosphere maps at a level of 500 hectopascals, which, combined with the mountainous location, cold climate of Varzaghan County, and prevailing seasonal conditions, played a fundamental role in the cold and severe drop in temperature to -28/3 degrees Celsius.
Keywords: Frost, Varzeghan County, Synoptic Analysis, Siberian High Pressure, Blocking Systems

مراحل جامع مدیریت خشکسالی

محمد کلانتری[۱]، علیرضا عمادی[۲]

۱- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آب سازه‌های آبی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
۲- عضو هیئت علمی گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری
m.kalantari92@gmail.com

چکیده

خشکسالی (Drought) یکی از پیچیده‌ترین و زیان‌بارترین مخاطرات طبیعی است که به‌واسطه تغییرات اقلیمی، نوسانات بارندگی و افزایش دمای سطح زمین شدت یافته و اکوسیستم‌ها و جوامع انسانی را به‌طور گسترده تحت تأثیر قرار می‌دهد. برخلاف سایر بلایای طبیعی، خشکسالی به‌تدریج گسترش یافته و اثراتی چون کاهش تولید کشاورزی، کمبود آب، خسارات اقتصادی و پیامدهای اجتماعی را در پی دارد. انواع خشکسالی شامل هواشناسی، کشاورزی، هیدرولوژیکی و اقتصادی است که در این میان، خشکسالی هواشناسی معمولاً محرک بروز سایر انواع خشکسالی محسوب می‌شود. مدیریت مؤثر خشکسالی نیازمند پیاده‌سازی یک رویکرد جامع و چندمرحله‌ای با تمرکز بر پیش‌بینی زودهنگام، تاب‌آوری، کاهش آسیب‌پذیری و به‌کارگیری فناوری‌های نوین است. همچنین درک فرآیند انتشار خشکسالی، به‌ویژه در شرایط ناگهانی یا طولانی‌مدت، برای طراحی سیاست‌های پیشگیرانه و افزایش آمادگی در برابر آن حیاتی است. این مطالعه با هدف مرور مفهومی و تحلیلی ابعاد مختلف خشکسالی، تلاش دارد چشم‌انداز روشنی برای تقویت پایش، پیش‌بینی و مدیریت پایدار این پدیده در سطح منطقه‌ای و جهانی ارائه دهد.

کلید واژه‌ها: مدیریت جامع خشکسالی،تغییرات اقلیمی،خطرپذیری و آسیب‌پذیری.

مقدمه

نوسانات بارندگی و دمای سطح زمین از عوامل کلیدی شکل‌گیری رویدادهای شدید اقلیمی، به‌ویژه خشکسالی محسوب می‌شوند که این تغییرات، اکوسیستم جهانی را تحت تاثیر قرار داده‌اند(Nandgude et al., 2023). در میان پدیده‌های طبیعی مخرب، خشکسالی یکی از مهم‌ترین و در عین حال پیچیده‌ترین چالش‌های مدیریت منابع طبیعی به‌شمار می‌آید. برخلاف سایر بلایای طبیعی، خشکسالی با سرعتی آهسته گسترش می‌یابد اما اثرات وسیع و چندبخشی از جمله خسارات

شدید به بخش کشاورزی، کمبود منابع آب، قحطی، و آسیب‌های اقتصادی گسترده دارد(Zhou et al., 2024). پیش‌بینی زودهنگام خشکسالی اهمیت بسیاری داشته و نیازمند استفاده از داده‌هایی در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف، انتخاب مدل‌های پیش‌بینی مناسب و بهره‌گیری از منابع محاسباتی پیشرفته است(Nandgude et al., 2023). خشکسالی‌ها به انواع مختلفی از جمله خشکسالی هواشناسی، هیدرولوژیکی، کشاورزی و اجتماعی-اقتصادی تقسیم می‌شوند که در این میان، خشکسالی هواشناسی معمولاً به‌عنوان عامل آغازگر سایر انواع خشکسالی در نظر گرفته می‌شود(Zhou et al., 2024). مدیریت جامع خشکسالی با اهداف کاهش آسیب‌پذیری، افزایش تاب‌آوری و ارتقاء آمادگی در برابر شرایط خشکسالی طراحی می‌شود. تحقق این اهداف مستلزم استفاده از فناوری‌های نوین، داده‌محور بودن تصمیم‌گیری‌ها و هماهنگی بین‌بخشی در سطوح مختلف حکمرانی است(Masih, 2025). مطالعات انجام شده توسط (Seongmin and Park, 2024) و همچنین پژوهش (Shah, 2022) ، نشان داد که خشکسالی‌های ناگهانی که ناشی از کاهش بارش شدید اما کوتاه‌مدت همراه با تبخیر و تعرق بالا هستند و نیز خشکسالی‌های بزرگ که به‌واسطه کاهش ملایم اما طولانی‌مدت بارش یا افزایش تقاضای تبخیر به وجود می‌آیند، هر دو نشانگر پیچیدگی در ماهیت این پدیده هستند. همچنین، بهبودی از خشکسالی نیز هم از نظر مکانی و هم از نظر زمانی متغیر بوده و ممکن است در بخش‌های مختلف سیستم هیدرولوژیکی با تأخیر قابل‌توجهی رخ دهد.

این مطالعه با هدف برجسته‌سازی مراحل جامع مدیریت خشکسالی، به بررسی ابعاد مختلف این پدیده پرداخته است. انتظار می‌رود که خشکسالی در آینده نواحی گسترده‌ای از جهان را تحت تأثیر قرار دهد، و جوامع وابسته به کشاورزی بیش از سایر بخش‌ها آسیب ببینند ازاین‌رو، طراحی و اجرای اقدامات مدیریتی مؤثر برای کاهش آثار خشکسالی، امری حیاتی به‌شمار می‌رود و نتایج این مطالعه موجب تقویت قابلیت پایش خشکسالی، بهبود مقاومت جوامع در برابر آن و ارتقای راهبردهای مدیریت منابع آب شود.

پیچیدگی پدیده خشکسالی

پیچیدگی پدیده خشکسالی ناشی از تعاملات مؤلفه‌های خطر، آسیب‌پذیری و اثرات ناشی از خشکسالی است؛ به‌ویژه آن‌که بازخورد انسانی، این رابطه را از حالت خطی خارج کرده و به ساختاری پیچیده و غیرقابل پیش‌بینی تبدیل می‌کند. برای مثال، زمانی که خشکسالی به محصولات کشاورزی آسیب می‌زند، ممکن است با استفاده از آبیاری اثرات آن کاهش یابد. اما این برداشت اضافی از منابع آب زیرزمینی می‌تواند در بلندمدت خشکسالی هیدرولوژیکی را تشدید کرده و به بخش‌های دیگری که به این منابع وابسته‌اند نیز آسیب برساند. این تعاملات اغلب در مطالعات تأثیر خشکسالی لحاظ نشده و مطالعات مربوط به خطر خشکسالی فقط تغییرات را در نظر گرفته و میزان مواجهه و آسیب‌پذیری را در طول زمان ثابت نگه می‌دارند(Van Loon et al., 2024).

طبقه‌بندی خشکسالی

طبق تعریف انجمن هواشناسی آمریکا (۲۰۱۳)، خشکسالی به چهار نوع اصلی خشکسالی هواشناسی، هیدرولوژیکی، کشاورزی و اجتماعی-اقتصادی تقسیم می‌شود. در این میان، خشکسالی هواشناسی رایج‌ترین نوع به شمار رفته و معمولاً به عنوان عامل آغازگر سایر انواع خشکسالی محسوب می‌شود. این نوع خشکسالی اغلب ناشی از الگوهای غیرعادی بارش است و با تأخیری زمانی به صورت خشکسالی‌های هیدرولوژیکی، کشاورزی یا اجتماعی-اقتصادی نمایان می‌شود. فرایند گسترش خشکسالی پیچیدگی بالایی دارد. کاهش بارش می‌تواند منجر به کاهش رواناب و رطوبت خاک شود که این امر در نهایت خشکسالی‌های هیدرولوژیکی و کشاورزی را به دنبال دارد. اگر منابع آب نتوانند پاسخگوی نیازهای اقتصادی و اجتماعی باشند، پیامدهای آن به شکل خشکسالی اجتماعی-اقتصادی ظاهر می‌شود. علاوه بر کاهش بارش، ناهنجاری‌هایی در سایر متغیرهای اقلیمی، مانند افزایش دما یا تبخیر و تعرق نیز می‌توانند خشکسالی را تشدید کنند. برای مثال، افزایش دما باعث افزایش تبخیر و کاهش رطوبت خاک شده و شرایط را برای بروز خشکسالی کشاورزی فراهم می‌سازد. هنگامی که رطوبت خاک برای رشد پوشش گیاهی کافی نباشد، خشکسالی اکولوژیکی یا پوشش گیاهی اتفاق می‌افتد که به‌عنوان یکی از اشکال انتشار خشکسالی در سال‌های اخیر مورد توجه ویژه قرار گرفته است. اگرچه افزایش غلظت CO_2 ممکن است به بهبود رشد گیاهان و بهره‌وری مصرف آب منجر شود، اما در عین حال کاهش رطوبت خاک را تشدید کرده و نیاز به آبیاری را افزایش می‌دهد. این افزایش برداشت آب، به‌ویژه از منابع زیرزمینی، می‌تواند به تقویت خشکسالی‌های هیدرولوژیکی و کشاورزی منجر شود(Zhou et al., 2024).

خشکسالی کشاورزی

خشکسالی کشاورزی به وضعیتی اطلاق شده که در آن رطوبت خاک طی دوره‌های حساس رشد محصول، به‌دلیل عوامل خارجی نظیر کاهش بارش یا افزایش تبخیر، به سطحی می‌رسد که دیگر پاسخگوی نیاز گیاه نبوده و در نتیجه تولید محصول کاهش می‌یابد. کاهش بارش عامل کمبود رطوبت خاک بوده و افزایش غیرطبیعی تبخیر و تعرق نیز این کمبود را تشدید کرده و وقوع خشکسالی کشاورزی را تسریع می‌کند. با این حال، به‌دلیل وجود ذخیره اولیه در حوضه آبریز و همچنین تغذیه خاک از منابع آب زیرزمینی، وقوع خشکسالی هواشناسی لزوماً به‌معنای بروز خشکسالی کشاورزی نیست (Zhou et al., 2024).

خشکسالی اجتماعی-اقتصادی

خشکسالی اجتماعی-اقتصادی یکی از چهار نوع اصلی خشکسالی است، اما تفاوت‌های اساسی با سه نوع دیگر دارد؛ چرا که ارتباط تنگاتنگی با فعالیت‌های انسانی و تعامل آن‌ها با منابع آب دارد. طبق تعاریف رایج، خشکسالی اجتماعی-اقتصادی زمانی رخ می‌دهد که سیستم‌های تأمین آب قادر به پاسخگویی به نیازهای زندگی روزمره نباشند؛ وضعیتی که ناشی از عدم تعادل بین عرضه و تقاضای آب است(Van Loon et al., 2024). اکثر پژوهش‌ها در این زمینه، به‌ویژه از سال ۲۰۱۵ به بعد، از شاخص‌های چندمتغیره برای ارزیابی شدت و زمان وقوع این نوع خشکسالی استفاده کرده‌اند. در پژوهش (آقاکوچک و همکاران،۲۰۱۴)، مفهوم آستانه‌های مقاومت اجتماعی در برابر خشکسالی برای ارائه هشدار زودهنگام مطرح شده است (Zhou et al., 2024).

چارچوب نظری مدیریت چندمرحله‌ای خشکسالی

خشکسالی که ناشی از عدم تعادل بین عرضه و تقاضای آب است، ضرورت اتخاذ رویکردهای قوی و سازگار در مدیریت منابع آب را برجسته می‌کند. یک مدیریت مؤثر منابع باید نه‌تنها متغیرهای هواشناسی، بلکه عوامل اجتماعی-اقتصادی مانند الگوهای مصرف، رشد جمعیت و بهره‌وری منابع را نیز مدنظر قرار دهد(Masih, 2025). با افزایش فراوانی و شدت خشکسالی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، نیاز به رویکردی مرحله‌ای، پویا و آینده‌نگر در مدیریت این پدیده بیش‌ازپیش احساس می‌شود.

در همین راستا طی مطالعه‌ای (Smith et al., 2024)، عنوان تصمیم‌گیری چندمرحله‌ای (Scenario-Neutral Multilateral Decision-Making) را ارائه داده‌اند که قابلیت ارزیابی و مقایسه سیاست‌های مدیریتی خشکسالی را در فازهای مختلف، بدون وابستگی به یک سناریوی خاص اقلیمی، فراهم می‌سازد (Kim et al., 2025). این چارچوب در چهار مرحله اصلی با چرخه مدیریت بحران خشکسالی هماهنگ شده است:

پیشگیری (Mitigation) : در این مرحله، سیاست‌هایی نظیر بهینه‌سازی مصرف آب، حفاظت از منابع، و برنامه‌ریزی مصارف در قالب الگوهای پایدار طراحی و بررسی می‌شوند.

آمادگی (Preparedness) : با استفاده از شبیه‌سازی سناریوهای متنوع (خشک، نرمال، مرطوب) و تحلیل حساسیت، سیستم مدیریتی می‌تواند پیش‌بینی عملکرد سیاست‌ها در شرایط مختلف را انجام دهد.

پاسخ اضطراری (Response) : در هنگام وقوع خشکسالی، سیاست‌های از پیش‌ارزیابی‌شده به‌سرعت قابل اجرا هستند.

چارچوب مذکور با سیستم تصمیم‌یار، مدیران را قادر می‌سازد بر پایه داده‌های واقعی، واکنش هدفمند و کارآمدی داشته باشند.

بازسازی (Recovery) : پس از پایان بحران، نتایج این چارچوب برای مستندسازی، ارزیابی و بهبود سیاست‌های میان‌مدت و بلندمدت مورد استفاده قرار می‌گیرد.

از ویژگی‌های کلیدی این چارچوب، تأکید بر همکاری چندنهادی (Multilateral Governance) و مشارکت فعال ذی‌نفعان در فرآیند تصمیم‌گیری است. نتایج شبیه‌سازی‌های این مقاله نشان می‌دهد که ترکیب سه سیاست اصلی منطقه‌بندی برداشت آب، تخصیص منابع مبتنی بر بهره‌وری و اعمال محدودیت‌های تقاضا در ساختاری هماهنگ، نه‌تنها قابلیت اطمینان تأمین آب را تا ٪۱۰ افزایش می‌دهد، بلکه به بهبود عدالت اجتماعی نیز منجر می‌شود.

وضعیت خشکسالی در ایران

بررسی‌های اخیر نشان می‌دهد که خشکسالی‌های چندساله در ایران، به‌ویژه در دو دهه اخیر، تأثیرات عمیقی بر منابع آب و کشاورزی کشور برجای گذاشته‌اند. مطالعه‌ای از (Shayeghi et al., 2024) با بهره‌گیری از شاخص‌های خشکسالی SPI و SPEI، همراه با داده‌های دقیق بارش و تبخیر-تعرق پتانسیل (PET)، وضعیت خشکسالی را طی بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۶ در مناطق مختلف ایران مورد ارزیابی قرار داده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد:

افت ذخایر آب زیرزمینی: در بسیاری از مناطق مورد بررسی، کاهش معنادار سطح آب زیرزمینی ثبت شده است. این روند عمدتاً ناشی از کاهش بارش سالانه و افزایش شدت تبخیر بوده است.

خسارت به بخش کشاورزی: کاهش نزولات جوی همراه با افزایش PET باعث افت محسوس عملکرد محصولات کشاورزی، به‌ویژه در دشت‌های خشک و رطوبت‌پایین کشور شده است.

افزون بر این، تحلیل‌های اقلیمی اخیر نشان می‌دهند که دوره‌های خشکسالی شدید نظیر بازه ۲۰۲۰–۲۰۲۳، که با کاهش بی‌سابقه بارندگی و دمای بسیار بالا همراه بوده‌اند، در حال تکرارپذیری بیشتر هستند. پدیده‌هایی که در گذشته هر ۷۰ تا ۸۰ سال یک‌بار رخ می‌دادند، اکنون ممکن است در بازه‌هایی ۵ تا ۱۰ ساله تکرار شوند که نشانه‌ای از افزایش ناپایداری اقلیم در منطقه است. در سطح ملی، داده‌های منتشرشده از نهادهای رسمی حاکی از کاهش ٪۴۶ بارندگی در تهران تا اوایل سال ۲۰۲۵ و پر بودن تنها ٪۱۳ از ظرفیت مخازن آبی این استان است. استان‌هایی مانند خوزستان، سیستان‌وبلوچستان و خراسان‌رضوی نیز کاهش شدید منابع آب سطحی و زیرزمینی را تجربه کرده‌اند. همزمان با خشکسالی، پدیده فرونشست زمین نیز در حال گسترش سریع است. برای مثال، در بخش‌هایی از دشت تهران، نرخ فرونشست تا ۳۱ سانتی‌متر در سال گزارش شده و در استان کرمان این نرخ از ۳۵ سانتی‌متر در سال نیز فراتر رفته است که نشان‌دهنده برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی است. درک فرآیندهای منجر به خشکسالی و پاسخ سیستم‌های طبیعی و انسانی به آن، به‌ویژه در مناطق خشک، برای طراحی سیاست‌های مؤثر در مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی سازگار با اقلیم اهمیت

بالایی دارد. ایران که در ناحیه‌ای خشک و نیمه‌خشک واقع شده است، طی سال‌های اخیر با خشکسالی‌های مزمن و کمبود منابع آبی مواجه بوده که پیامدهای اجتماعی-اقتصادی قابل‌توجهی در پی داشته‌اند. شواهد نشان می‌دهد که مناطق شمال‌غربی و مرکزی ایران که از اقلیم نیمه‌خشک تا خشک برخوردارند، بیشترین آسیب‌پذیری را در برابر خشکسالی دارند.
مدیریت مرحله‌ای خشکسالی: از پیشگیری تا بازتوانی
مدیریت مؤثر خشکسالی مستلزم رویکردی مرحله‌ای، جامع و چرخه‌ای است که شامل اقدامات پیشگیرانه پیش از وقوع خشکسالی، واکنش سریع در زمان بحران و برنامه‌های بازسازی پس از آن می‌شود. چارچوب‌های جهانی مانند سندای (Sendai Framework) نیز بر این چرخه تأکید دارند. در این بخش، سه مرحله اساسی این چرخه، همراه با نمونه‌های مطالعاتی معتبر بررسی خواهد شد.

۱. پیشگیری و آمادگی پیش از خشکسالی

مطالعه‌ای جامع توسط (Masih, 2025) با تحلیل تطبیقی ۱۲ راهنمای جهانی مدیریت خشکسالی از جمله UNISDR (۲۰۰۹-۲۰۰۷)، UNCCD (۲۰۱۹) و اسناد بانک جهانی، چهار رکن اساسی را برای موفقیت چارچوب‌های مدیریت خشکسالی شناسایی کرده است:
سیاست‌گذاری و حکمرانی
پایش و هشدار زودهنگام
کاهش آسیب‌پذیری و آمادگی
پاسخ و بازسازی
که در فاز پیشگیری، سه راهبرد کلیدی مطرح هستند:
حکمرانی و سیاست‌گذاری: این بخش شامل ایجاد ساختارهای نهادی منسجم، تدوین سیاست‌های پیشگیرانه و شکل‌دهی کمیته‌های بین‌بخشی برای هم‌راستاسازی تصمیم‌گیری‌ها می‌باشد.
پایش و هشدار زودهنگام: متشکل از راه‌اندازی سامانه‌های پایش اقلیمی با استفاده از شاخص‌هایی مانند SPI، SPEI و داده‌های ماهواره‌ای؛ تعیین آستانه‌های هشدار و توزیع اطلاعات در سطوح محلی تا ملی است.
کاهش آسیب‌پذیری و آمادگی: تشکیل شده از ارتقای بهره‌وری مصرف آب در کشاورزی، توسعه زیرساخت‌های ذخیره‌سازی، اصلاح الگوهای کشت، و اجرای برنامه‌های آموزشی برای افزایش آگاهی جوامع محلی می‌باشد.

مسیح نشان می‌دهد که این سه مؤلفه به‌صورت مکمل، پیش‌نیازهای موفقیت در فازهای واکنش و بازسازی پس از خشکسالی را فراهم می‌کنند.

۲. اقدامات اضطراری حین خشکسالی

در دوره بروز خشکسالی، تمرکز مدیریت باید بر واکنش سریع و هدفمند برای حفظ سلامت مردم و کاهش خسارات باشد. در مطالعه‌ای تجربی در گواتمالا، با تمرکز بر تمرین‌های اضطراری برای مقابله با خشکسالی کشاورزی، چهار مرحله مقابله مؤثر معرفی شده است(Anna et al., 2019):

پایش میدانی: گردآوری سریع اطلاعات از کشاورزان و منابع محلی.

اعلام هشدار: صدور رسمی وضعیت اضطراری و آغاز هماهنگی نهادی.

اقدامات فوری: مانند آبرسانی سیار، توزیع علوفه و انتقال خدمات حمایتی.

بازبینی پس از بحران: ارزیابی عملکرد و اصلاح رویه‌ها جهت افزایش اثربخشی.

ماهیت تدریجی و غیربحرانی اولیه خشکسالی در مقایسه با بلایای ناگهانی مانند سیل یا زلزله، اغلب موجب تأخیر در واکنش می‌شود. عدم تشخیص به‌موقع نقطه بحرانی خشکسالی و بی‌توجهی سیاسی پس از اولین بارندگی، از چالش‌های اصلی در این فاز است. چنین چرخه‌ای منجر به افزایش آسیب‌پذیری و عدم توسعه تاب‌آوری بلندمدت در جوامع می‌شود. مداخله زودهنگام و ایجاد ساختارهای هماهنگ واکنشی، کلید اصلی جلوگیری از تبدیل یک بحران قابل‌کنترل به فاجعه‌ای بزرگ با تبعات اقتصادی و اجتماعی فراگیر است.

۳. بازسازی و بازتوانی پس از خشکسالی

بازسازی خشکسالی تنها پس از اتمام دوره بحران آغاز نمی‌شود، بلکه مرحله‌ای استراتژیک و زمان‌بر محسوب می‌شود. (Zhu et al., 2025) با ارائه چارچوبی نوآورانه، فرآیند بازتوانی را در دو فاز معرفی کرده‌اند:

فاز تأخیری (Lag Phase): در این دوره، اثرات منفی خشکسالی (کاهش سطح آب زیرزمینی، تخریب پوشش گیاهی) حتی پس از بازگشت شرایط جوی عادی، همچنان تداوم دارد.

فاز بازتوانی (Recovery Phase) : پس از آن‌که منابع طبیعی به مرحله تغذیه مجدد رسیدند، فرایند بازسازی آغاز شده و زیرساخت‌ها و اکوسیستم‌ها به مرور به شرایط پیش‌خشکسالی باز می‌گردند.

مطالعه ژو نشان می‌دهد که در شرایط تغییر اقلیم، مدت زمان فاز بازسازی ممکن است تا ٪۴۰ افزایش یابد. همچنین بارش و دمای دوره پس از خشکسالی، نقش تعیین‌کننده‌ای در سرعت و کیفیت بازسازی ایفا می‌کنند. به‌طور خاص، بارش فراوان در دوره بازیابی برای برخی زیست‌بوم‌ها مفید است، اما ممکن است برای مناطق گرمسیری اثرات منفی نیز به همراه داشته باشد.

برای ایران در فاز بازسازی، راهبردهای پیشنهادی زیر را می‌توان در نظر گرفت:

پایش مداوم منابع آبی، پوشش گیاهی و خاک حتی پس از پایان بحران.

تأمین حمایت‌های اقتصادی و فنی برای کشاورزان و مدیریت اکوسیستم.

بازنگری سیاست‌ها بر پایه بازه واقعی Recovery.

بر این اساس، بازتوانی نباید به عنوان یک فرآیند تک‌مرحله‌ای دیده شود، بلکه باید در قالب ساختاری پویا، پیوسته و منطبق با ویژگی‌های منطقه‌ای طراحی شود.

تحلیل چالش‌ها و ضعف‌های مدیریت خشکسالی در ایران

مدیریت خشکسالی در ایران با چالش‌های ساختاری و اجرایی متعددی روبه‌رو است. بسیاری از سیاست‌ها و اقدامات، هنوز واکنشی و متمرکز بر مقابله اضطراری هستند، در حالی‌که رویکرد جامع و چرخه‌ای نیازمند برنامه‌ریزی پیشگیرانه، ظرفیت‌سازی نهادی، و بازسازی پس از بحران است. در ادامه، مهم‌ترین چالش‌های شناسایی‌شده با استفاده از مطالعات اخیر از جمله مقاله (Masih, 2025) مرور می‌شود.

۱ .ضعف در حکمرانی و سیاست‌گذاری

مطالعات نشان می‌دهند که چارچوب‌های سیاستی مرتبط با خشکسالی در ایران عمدتاً واکنش‌محورند و تمرکز کافی بر مراحل پیشگیری، آمادگی و بازتوانی وجود ندارد. نبود نهادهای بین‌بخشی مؤثر، ناهماهنگی بین دستگاه‌ها، و فقدان سیاست‌های یکپارچه مدیریت ریسک، باعث کاهش اثربخشی اقدامات می‌شود. همچنین اجرای پروژه‌های کلان مانند سدسازی و انتقال آب بدون ارزیابی محیط‌زیستی و مشارکت ذی‌نفعان، بر پیچیدگی وضعیت افزوده است.

۲ .ناکارآمدی زیرساخت‌ها و بهره‌وری پایین منابع آب

بیش از ۹۰ درصد آب در ایران در بخش کشاورزی مصرف می‌شود، اما سهم این بخش از تولید ناخالص داخلی کمتر از ۱۰ درصد است. بهره‌وری پایین، الگوهای کشت نامتناسب با اقلیم، و استفاده محدود از فناوری‌های نوین آبیاری از مهم‌ترین

عوامل اتلاف آب هستند. همچنین، شبکه‌های انتقال آب شهری و روستایی فرسوده‌اند و میزان تلفات در برخی مناطق به بیش از ۳۰ درصد می‌رسد.

۳ .ضعف در پایش و هشدار زودهنگام

یکی دیگر از چالش‌های مهم، نبود سامانه‌های یکپارچه و دقیق هشدار زودهنگام خشکسالی است. در حال حاضر، داده‌های اقلیمی، هیدرولوژیکی و کشاورزی به‌صورت مجزا و با تأخیر تحلیل می‌شوند و در بسیاری از مناطق، شاخص‌های هشدار استانداردسازی نشده‌اند. طبق بررسی مسیح، یکی از دلایل ناکارآمدی پاسخ به خشکسالی در بسیاری از کشورها، نداشتن آستانه‌های هشدار قابل اتکا و شبکه پایش هماهنگ است، که این مسأله در ایران نیز دیده می‌شود.

۴ .پیامدهای اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی

خشکسالی در ایران نه‌تنها منابع آب را تهدید کرده، بلکه منجر به کاهش تولیدات کشاورزی، تخلیه روستاها، مهاجرت، فقر آبی، فرونشست زمین، و تشدید تنش‌های اجتماعی شده است. به‌عنوان مثال، در برخی دشت‌های مرکزی کشور نرخ فرونشست سالانه به بیش از ۳۰ سانتی‌متر رسیده و امنیت زیرساخت‌های شهری، حمل‌ونقل و منابع میراث فرهنگی را با خطر مواجه کرده است.

راهکارها و پیشنهادها

مطالعه‌ای توسط (Lyu et al., 2024) توصیه‌هایی کلیدی برای بهبود مدیریت خشکسالی در ایران ارائه داده است که مبتنی بر رویکرد کاهش ریسک و مشارکت ذی‌نفعان است (Savari et al., 2024).

۱ .مدیریت تقاضا و افزایش بهره‌وری آب

استفاده از سیستم‌های آبیاری هوشمند مانند قطره‌ای و بارانی می‌تواند به‌طور مؤثری از اتلاف منابع جلوگیری کند. همچنین، تغییر الگوی کشت و جایگزینی محصولات با نیاز آبی کمتر، راهکاری مؤثر برای کاهش مصرف آب است؛ به‌طوری‌که نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که این اقدامات می‌تواند به کاهش متوسط ۲۰ درصدی مصرف آب در بخش کشاورزی منجر شود.

۲ .توانمندسازی جوامع محلی و مشارکت ذی‌نفعان

استقرار کارگروه‌های محلی برای تصمیم‌گیری در خصوص تخصیص منابع آب، با توجه به اولویت‌های منطقه‌ای، نقش مهمی در افزایش کارآمدی دارد. همچنین آموزش کشاورزان و شهروندان در زمینه سازگاری با خشکسالی و مدیریت بهینه مصرف، به ارتقاء تاب‌آوری اجتماعی کمک می‌کند؛ به‌طوری‌که سیاست‌های مبتنی بر مشارکت می‌تواند مقاومت محلی را تا ۱۵ درصد افزایش دهد.

۳ .بهره‌گیری از فناوری‌های نوین و داده‌های پیشرفته

استفاده از سیستم‌های پایش آنی شامل داده‌های ماهواره‌ای و حسگرهای محلی برای پایش رطوبت خاک و سطح مخازن، ابزار مؤثری در پیش‌بینی و پاسخ به خشکسالی فراهم می‌کند. همچنین، تخصیص پویا و زمان‌بندی شده منابع آب با تکیه بر مدل‌های پیش‌بینی کوتاه‌مدت، موجب تسریع واکنش تا ۱۰ درصد در شرایط بحرانی می‌شود.

۴ .ایجاد چارچوب نهادی و حکمرانی انعطاف‌پذیر

تقویت هماهنگی بین نهادهای مرتبط مانند وزارت نیرو، جهاد کشاورزی، سازمان محیط زیست و مدیریت محلی از الزامات کلیدی مدیریت یکپارچه خشکسالی است. تدوین سیاست‌هایی برای بازنگری منظم برنامه‌ها براساس تغییرات اقلیمی و شواهد جدید نیز اهمیت دارد. در نهایت، تخصیص منابع مالی به پروژه‌های تاب‌آور بلندمدت نظیر آموزش، توسعه زیرساخت‌ها و به‌کارگیری فناوری‌های نو باید به‌عنوان بخشی از برنامه راهبردی در نظر گرفته شود.

نتیجه‌گیری

خشکسالی یکی از پیچیده‌ترین و مخرب‌ترین مخاطرات اقلیمی در ایران است که به دلیل شدت، گستره و تکرار بالا، اثرات گسترده‌ای بر منابع آب، کشاورزی، محیط‌زیست و جامعه وارد می‌کند. مدیریت مؤثر این پدیده، نیازمند رویکردی جامع، مرحله‌محور و هماهنگ در سه فاز پیش از وقوع (پیشگیری و آمادگی)، حین بحران (مقابله اضطراری) و پس از بحران (بازسازی و بازتوانی) است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در ایران، تمرکز غالب بر پاسخ اضطراری بوده و ضعف‌هایی مانند نبود سامانه هشدار زودهنگام، ناکارآمدی زیرساخت‌های آبی، نبود سیاست‌های مشارکتی و کمبود داده‌های به‌روز، مانع تحقق مدیریت مؤثر خشکسالی شده‌اند. برای عبور از این وضعیت، به‌کارگیری راهبردهای کاهش ریسک از جمله بهره‌وری منابع، توانمندسازی جوامع محلی، استفاده از فناوری‌های نوین و تدوین سیاست‌های منعطف، ضروری است. در نهایت، تنها با پذیرش این واقعیت که خشکسالی پدیده‌ای دائمی و ساختاری در اقلیم ایران است نه یک بحران موقتی، می‌توان به سوی

مدیریت آینده‌نگر و پایدار حرکت کرد. تغییر رویکرد از «واکنش» به «پیش‌بینی و پیشگیری»، نیازمند اصلاح نهادهای تصمیم‌گیر، ارتقاء آگاهی عمومی و برنامه‌ریزی میان‌بخشی در سطح ملی و محلی است.

منابع

Anna, M., Vesalio, M., Edwin, R., … & Van, J. (2019). Emergency drills for drought response: a case study in Guatemala. Zeitschriftenartikel / journal article, pp 1–23.

Kim, J., Kim, Y., Hyeok Park, D., Kim, T.W. & Seo, S.B. (2025). Scenario Neutral Based Multilateral Decision-Making Framework for Drought Management. Water Resources Management, 39, pp 1503–1519.

Masih, I. (2025). An evaluation of the alignment of drought policy and planning guidelines with the contemporary disaster risk reduction agenda. Nat. Hazards Earth Syst. Sci, 25, pp 2155–2178.

Nandgude, N., Singh, T.P., Nandgude, S. & Tiwari, M. (2023). Drought Prediction: A Comprehensive Review of Different Drought Prediction Models and Adopted Technologies. Sustainability, 15, pp 11684.

Shayeghi, A., Rahmati Ziveh, A., Bakhtar, A., … & AghaKouchak, A. (2024). Assessing drought impacts on groundwater and agriculture in Iran using high-resolution precipitation and evapotranspiration products. Journal of Hydrology, 631.

Van Loon, A.F., Kchouk, S., Matanó, A., … & Werner, M. (2024). Review article: Drought as a continuum – memory effects in interlinked hydrological, ecological, and social systems. Nat. Hazards Earth Syst. Sci, 24, pp 3173–3205.

Zhou, Z., Wang, P., Li, L., … & Shi, H. (2024). Recent development on drought propagation: A comprehensive review. Journal of Hydrology, 645.

Zhu, Q., Wei, Q., Tian, Y., … & Yang, T. (2025). A Framework to Quantify Drought Recovery Time Accounting for the Lagged Effect. Hydrological Processes, 39.

Savari, M., Eskandari Damaneh, Ham. & Eskandari Damaneh, Had. (2024). Managing the effects of drought through the use of risk reduction strategy in the agricultural sector of Iran. Nat. Hazards Earth Syst. Sci, 45.

Comprehensive drought management steps

Mohamad Kalantari1, Alireza Emadi2

PhD student in Water Science and Engineering of Hydraulic Structures, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources.
Faculty member, Department of Water Science and Engineering, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources.

* Corresponding author: M.kalantari92@gmail.com

Abstract

Drought is one of the most complex and damaging natural hazards, intensified by climate change, rainfall variability, and rising surface temperatures, and it significantly affects ecosystems and human societies. Unlike other natural disasters, drought evolves gradually and leads to consequences such as reduced agricultural productivity, water scarcity, economic losses, and social impacts. The main types of drought include meteorological, agricultural, hydrological, and socio-economic, with meteorological drought often acting as a trigger for the others. Effective drought management requires the implementation of a comprehensive, multi-stage approach that emphasizes early warning, resilience building, vulnerability reduction, and the use of innovative technologies. Moreover, understanding the dynamics of drought propagation—especially under abrupt or prolonged conditions—is essential for designing preventive policies and enhancing preparedness. This study aims to provide a conceptual and analytical review of the various dimensions of drought, offering insights to strengthen monitoring, forecasting, and the sustainable management of this phenomenon at both regional and global scales.

Keywords: Comprehensive management of drought, climate change, risk and vulnerability.

تحلیل نوسانات هیدرولوژیکی حوضه آبریز دریاچه ارومیه بر اساس داده‌های سنجش از دوری

بهنام خرّمی[1*]، سجاد مشیری[2]، نفیسه رجبی میلانی[3]

۱- گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز
۲- دانشجوی دکتری، گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز
۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز
bekhorram@tabrizu.ac.ir

چکیده

این پژوهش با هدف تحلیل نوسانات هیدرولوژیکی حوضه آبریز دریاچه ارومیه در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۱، از داده‌های ماهواره‌ای GRACE و GRACE-FO و مدل‌های زمین‌مرجع استفاده کرده است. به منظور رفع نواقص زمانی در داده‌های GRACE، از روش تجزیه روند-فصلی مبتنی بر رگرسیون محلی (STL) بهره گرفته شد. سپس با تفکیک مؤلفه‌های ذخیره آب زمینی (TWS)، به‌ویژه استخراج مؤلفه آب زیرزمینی (GWS)، تغییرات منابع آبی منطقه پایش شد. در ادامه، با تلفیق داده‌های ارتفاع سطح دریاچه و شاخص‌های خشکسالی، ارتباط بین کاهش منابع آبی و عوامل انسانی-اقلیمی بررسی گردید. نتایج حاکی از کاهش معنادار TWS و GWS در کل حوضه، همبستگی منفی بین افت سطح دریاچه و شاخص‌های خشکسالی بر دینامیک هیدرولوژیکی منطقه است. این یافته‌ها نشان‌دهنده بحران آب در حوضه و لزوم سیاست‌گذاری‌های مدیریت پایدار منابع آب هستند.

کلید واژه‌ها: GRACE، ذخیره آب زمینی، خشک شدن دریاچه، تجزیه فصلی-روندی، دریاچه ارومیه.

مقدمه

دریاچه ارومیه به‌عنوان بزرگ‌ترین پهنه آبی داخلی ایران و یکی از بزرگ‌ترین دریاچه‌های فوق‌شور در جهان، طی دو دهه گذشته با بحران شدید کاهش حجم آب مواجه شده است. بر اساس مطالعات انجام‌شده، از سال ۱۹۹۷ تاکنون بیش از ۹۰ درصد از حجم این دریاچه کاسته شده است (Tourian و همکاران، ۲۰۱۵؛ Hassanzadeh و همکاران، ۲۰۱۲). این روند کاهشی پیامدهای گسترده‌ای در حوزه‌های زیست‌محیطی، اجتماعی و بهداشتی در پی داشته است، از جمله تشدید طوفان‌های نمکی، از بین رفتن تنوع زیستی، و بروز مشکلات تنفسی و پوستی برای ساکنین حاشیه دریاچه (AghaKouchak و همکاران، ۲۰۱۵).

علل بروز این بحران، تلفیقی از عوامل اقلیمی و انسانی است. از یک‌سو، کاهش بارندگی، افزایش دمای هوا و خشکسالی‌های پی‌درپی در سال‌های اخیر نقش مؤثری در افت تراز آبی ایفا کرده‌اند (Alizadeh-Choobari، ۲۰۲۱). از سوی دیگر، توسعه بی‌رویه کشاورزی، بهره‌برداری بیش از حد از منابع آب زیرزمینی، و احداث سدهای متعدد بر روی رودخانه‌های تغذیه‌کننده، وضعیت بحرانی دریاچه را تشدید کرده‌اند (Khatami و همکاران، ۲۰۱۹؛ Madani، ۲۰۱۴). با وجود اجرای برخی برنامه‌های احیایی توسط دولت ایران و همکاری برخی نهادهای بین‌المللی، تاکنون این اقدامات نتوانسته‌اند به‌طور مؤثر از روند خشک‌شدن دریاچه جلوگیری کنند، که نشانگر پیچیدگی و گستردگی عوامل مؤثر در این فرایند است.

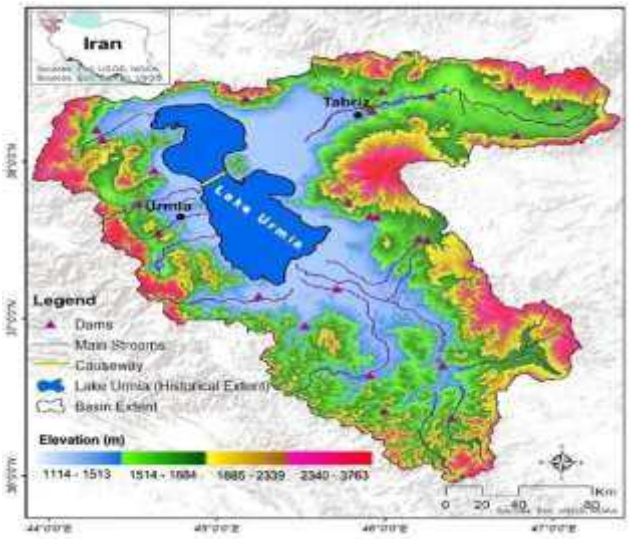
در این میان، فناوری‌های سنجش از دور، به‌ویژه داده‌های ماهواره‌ای مأموریت GRACE و GRACE-FO، امکان رصد تغییرات ذخیره آب زمینی در مقیاس‌های منطقه‌ای و جهانی را فراهم ساخته‌اند (Tapley و همکاران، ۲۰۰۴؛ Landerer و همکاران، ۲۰۲۰). با این حال، داده‌های این ماهواره‌ها نیز با محدودیت‌هایی مانند شکاف‌های زمانی به‌دلیل وقفه در مأموریت یا داده‌های از دست رفته مواجه‌اند که موجب دشواری در تحلیل‌های پیوسته زمانی می‌شود. برای رفع این محدودیت، روش‌های تجزیه سری‌های زمانی مانند الگوریتم STL توسعه یافته‌اند. این الگوریتم با تفکیک مؤلفه‌های روند، فصلی و باقی‌مانده، ابزار مناسبی برای بازسازی داده‌های ناقص و تحلیل دقیق‌تر روندهای هیدرولوژیکی به شمار می‌آید (Cleveland و همکاران، ۱۹۹۰؛ Wouters و همکاران، ۲۰۱۴).

مطالعه حاضر با هدف تحلیل نوسانات هیدرولوژیکی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه طراحی شده است. در این راستا، از داده‌های ماهواره‌ای GRACE/GRACE-FO، مدل‌های سطح زمین (GLDAS، WaterGAP) و داده‌های زمینی استفاده شده و با به‌کارگیری الگوریتم STL، مقادیر گمشده بازسازی و روندهای زمانی و مکانی تغییرات ذخیره آب بررسی گردیده‌اند. نتایج این مطالعه می‌تواند در درک بهتر پویایی‌های هیدرولوژیکی حوضه و ارائه راهکارهای مؤثرتر برای مدیریت منابع آبی منطقه مؤثر واقع شود.

مواد و روش‌ها

این پژوهش با هدف تحلیل نوسانات ذخایر آب زمینی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه، از ترکیبی از داده‌های سنجش از دور، مدل‌های هیدرولوژیکی و داده‌های مشاهداتی زمینی استفاده کرده است. مطالعه حاضر در حوضه آبریز دریاچه ارومیه واقع در شمال‌غرب ایران انجام شده است. این حوضه با وسعتی حدود ۵۱۰۸۷۶ کیلومتر مربع، نواحی وسیعی از استان‌های آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی و کردستان را دربر می‌گیرد. موقعیت جغرافیایی خاص این حوضه و ویژگی‌های اقلیمی نیمه‌خشک آن، آن را به یکی از بحرانی‌ترین مناطق آبی کشور تبدیل کرده است.

شکل ۱ موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز دریاچه ارومیه را در ارتباط با استان‌های اطراف و منابع آبی نمایش می‌دهد. لایه‌های هیدروگرافی، زیرحوضه‌ها و مرز سیاسی استان‌ها در این نقشه مشخص شده‌اند.



شکل ۱- محدوده جغرافیایی حوضه آبریز دریاچه ارومیه و موقعیت مکانی ایستگاه‌های هیدرولوژیکی.

داده‌هایGRACE/GRACE-FO

برای بررسی تغییرات جرم آبی در مقیاس حوضه‌ای، از داده‌های ماهواره‌ای GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment)و ادامه‌ی آن GRACE-FO استفاده شد. این داده‌ها از مرکز داده‌های JPL (Jet Propulsion Laboratory) و با استفاده از فیلترگذاری ماسک حوضه استخراج گردید. بازه زمانی داده‌ها، سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۱ را دربرمی‌گیرد. این

داده‌ها شامل تغییرات تراز ذخیره آب زمینی به‌صورت سری‌های زمانی ماهانه هستند. از آنجا که داده‌های GRACE دارای شکاف‌های زمانی (به‌ویژه بین دو مأموریت) هستند، بازسازی این شکاف‌ها ضروری بود.

مدل‌های سطح زمین(LSMs)

به‌منظور استخراج مؤلفه‌های مختلف ذخیره آبی، از داده‌های مدل‌های GLDAS (Global Land Data Assimilation System)و WaterGAP (Water Global Assessment and Prognosis) استفاده شد. مدل GLDAS شامل خروجی‌های آب خاک (Soil Moisture) و ذخیره برف (Snow Water Equivalent) است که برای تفکیک مؤلفه‌های GRACE از آن بهره گرفته شد. مدل WaterGAP نیز اطلاعاتی درباره آب سطحی، رواناب و سایر مؤلفه‌های هیدرولوژیکی فراهم می‌آورد که مکمل داده‌های GRACE محسوب می‌شود.

پیش‌پردازش داده‌ها

داده‌های GRACE و مدل‌ها به‌صورت raster (grid-based) با رزولوشن مکانی سازگار و در مقیاس ماهانه پردازش شدند. واحدهای داده برحسب ارتفاع معادل آب (cm) نرمال‌سازی شدند تا امکان مقایسه فراهم گردد. برای پردازش، تجمیع، و برش مکانی داده‌ها از نرم‌افزارهای GIS و زبان برنامه‌نویسی Python استفاده شد.

در این پژوهش، از مجموعه‌ای از داده‌های ماهواره‌ای، مدل‌های سطح زمین و داده‌های مشاهداتی استفاده شده است. مشخصات و منابع داده‌ها به تفکیک در جدول زیر آمده است.

جدول ۱- خلاصه داده‌ها و منابع مورد استفاده در مطالعه.

عنوان داده ها	نوع داده ها	زمان	پیکسل سایز قدرت تفکیک مکانی
GRACE/GRACE-FO	ماهواره	ماهانه [2003-2021]	CSR: $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ JPL: $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ GSFC: $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$
GLDAS	مدل سازی	Noah:ماهانه CLSM:روزانه [2003-2021]	$0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$
CHIRPS	ماهواره ای	ماهانه [2003-2021]	$0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$
Drought metrics	مدل سازی	ماهانه [2003-2021]	$0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$

-	ماهانه [2003-2021]	زمینی	Lake Water Level

بازسازی داده‌ها با روش STL

به‌منظور بازسازی مقادیر گمشده در سری‌های زمانی داده‌های GRACE ، از الگوریتم «تجزیه روند و فصلی بر پایه لوئس » (Seasonal-Trend decomposition using Loess – STL)استفاده شد. این روش سری‌های زمانی را به سه مؤلفه اصلی تفکیک می‌کند: مؤلفه فصلی، روند بلندمدت، و مؤلفه باقی‌مانده .(noise) مزیت اصلی روش STL نسبت به روش‌های سنتی مانند میانگین‌گیری ساده یا درون‌یابی خطی، توانایی حفظ الگوهای فصلی و نوسانات طبیعی در داده‌ها است. اجرای این الگوریتم در محیط زبان R صورت گرفت و خروجی آن به‌صورت سری‌های زمانی بدون شکاف برای کل دوره در نظر گرفته شد.

تجزیه ساختار TWS و استخراج آب زیرزمینی

TWSمتغیری هیدرولوژیکی با ساختار عمودی است که شامل مجموع ناهنجاری‌های ذخایر رطوبت خاک(SMS) ، برف (SWE)، آب زیرزمینی (GWS) و آب سطحی (SWS) می‌باشد .(Khorrami & Gunduz, 2021b) برای استخراج GWS از داده‌های TWS ، از فرآیند ایزولاسیون داده‌های GRACE استفاده شد. ساختار رابطه‌ای TWS و نحوه استخراج GWS به ترتیب در معادلات زیر ارائه شده است:

$$\mathbf{TWS} = \mathbf{GWS} + \mathbf{SWE} + \mathbf{SMS} + \mathbf{SWS} \quad (2)$$

$$\mathbf{GWS} = \mathbf{TWS} - [\mathbf{SWE} + \mathbf{SMS} + \mathbf{SWS}] \quad (3)$$

تحلیل روند و تغییرات زمانی

برای بررسی تغییرات در زمان، از روش خط روند ساده و آزمون آماری Mann-Kendall استفاده گردید تا جهت و معناداری روندهای مشاهده‌شده در داده‌های بازسازی‌شده ارزیابی شود. ضمناً، برای استخراج ویژگی‌های آماری از جمله میانگین متحرک، انحراف معیار و آستانه‌های افراط، از تحلیل سری‌های زمانی در محیط Python و بسته‌های آماری R استفاده شد.

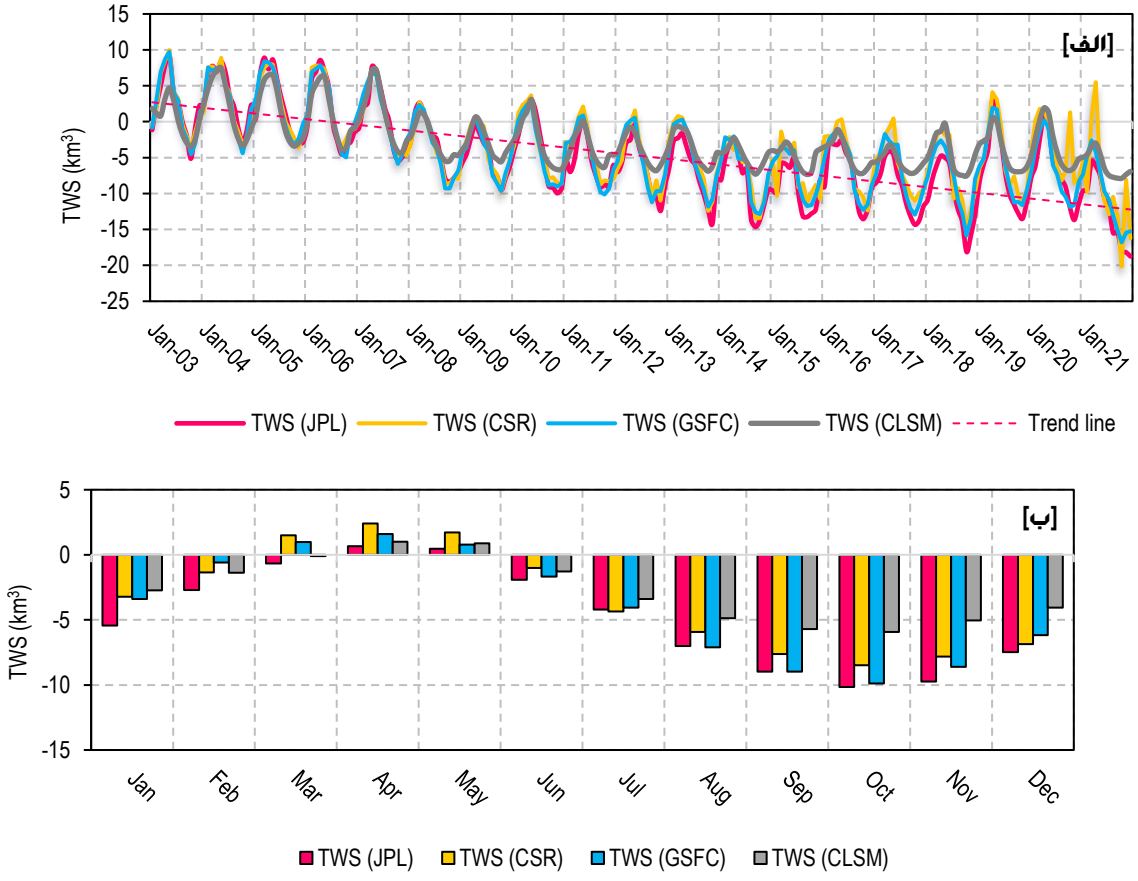
تطابق داده‌ها و تحلیل همبستگی

برای اعتبارسنجی داده‌ها، از داده‌های زمینی محدود و گزارش‌های رسمی وزارت نیرو و سازمان آب منطقه‌ای بهره گرفته شد. همچنین بین داده‌های بازسازی‌شده GRACE و خروجی مدل‌های GLDAS تحلیل همبستگی صورت گرفت تا میزان تطابق و هم‌راستایی بین داده‌ها مشخص شود. ضریب همبستگی پیرسون و آزمون معناداری (p-value) برای این منظور به‌کار رفت.

نتایج و بحث

بازسازی و تحلیل روند ماهانه TWS

به‌منظور درک الگوی زمانی تغییرات ذخایر آب زمینی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه سری‌های زمانی چندساله (۲۰۰۳ تا ۲۰۲۱) تحلیل شدند. شکل ۲ تغییرات ماهانه (الف) و میانگین ماهانه (ب) TWS را نشان می‌دهد. در نمودار سمت چپ، نوسانات پیوسته‌ای با روند کاهشی در بازه‌های خشک‌سالی (از جمله ۲۰۰۸ و ۲۰۱۵) قابل مشاهده است. در نمودار سمت راست، الگوی فصلی کاملاً منظم است و بیشترین مقادیر TWS معمولاً در ماه‌های فروردین تا اردیبهشت رخ داده‌اند، که هم‌زمان با ذوب برف و بارندگی‌های بهاره است.

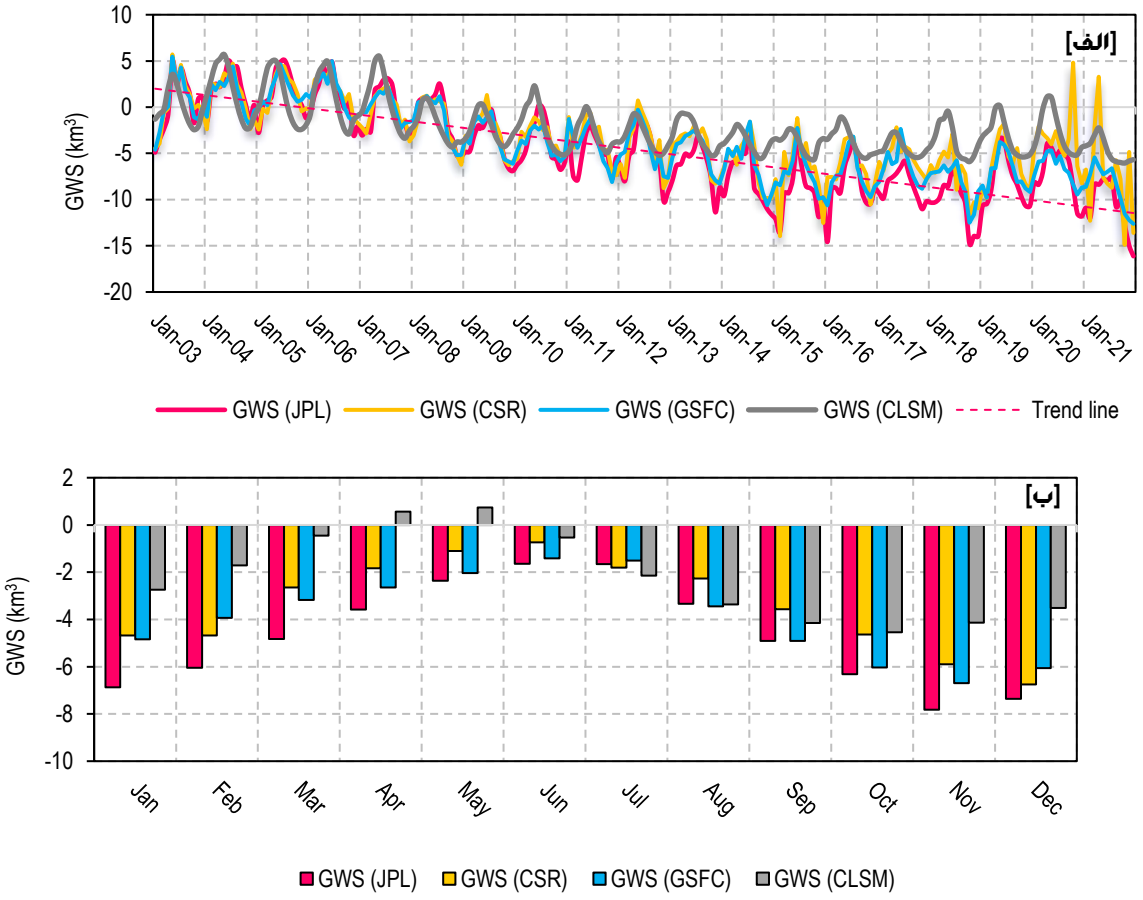


شکل ۲- تغییرات ماهانه چندساله (۲۰۰۳–۲۰۲۱) (الف) و میانگین ماهانه (ب) ذخیره آب زمینی (TWS) در سطح حوضه آبریز دریاچه ارومیه(LUB)

تحلیل سری زمانی و فصلی GWS در سطح حوضه

شکل ۳ روند تغییرات چندساله (۲۰۰۳ تا ۲۰۲۱) ذخایر آب زیرزمینی (GWS) را در دو قالب نمایش می‌دهد: نمودار (الف) نشان‌دهنده تغییرات ماهانه GWS در سطح حوضه ارومیه (LUB) است و نمودار (ب) میانگین مقادیر ماهانه در طول دوره را نشان می‌دهد.

همان‌گونه که دیده می‌شود، GWSنیز همانند TWS دارای الگوهای فصلی مشخصی است، با این تفاوت که نوسانات آن نرم‌تر و دارای دامنه کوچک‌تری است. بیشترین مقادیر معمولاً در فصل بهار مشاهده شده و کمترین مقادیر در ماه‌های انتهایی تابستان و پاییز ثبت شده‌اند. روند کلی کاهش در طول دوره زمانی نیز مشهود است که منعکس‌کننده برداشت‌های بی‌رویه، کاهش تغذیه آبخوان و تشدید خشکسالی‌هاست.

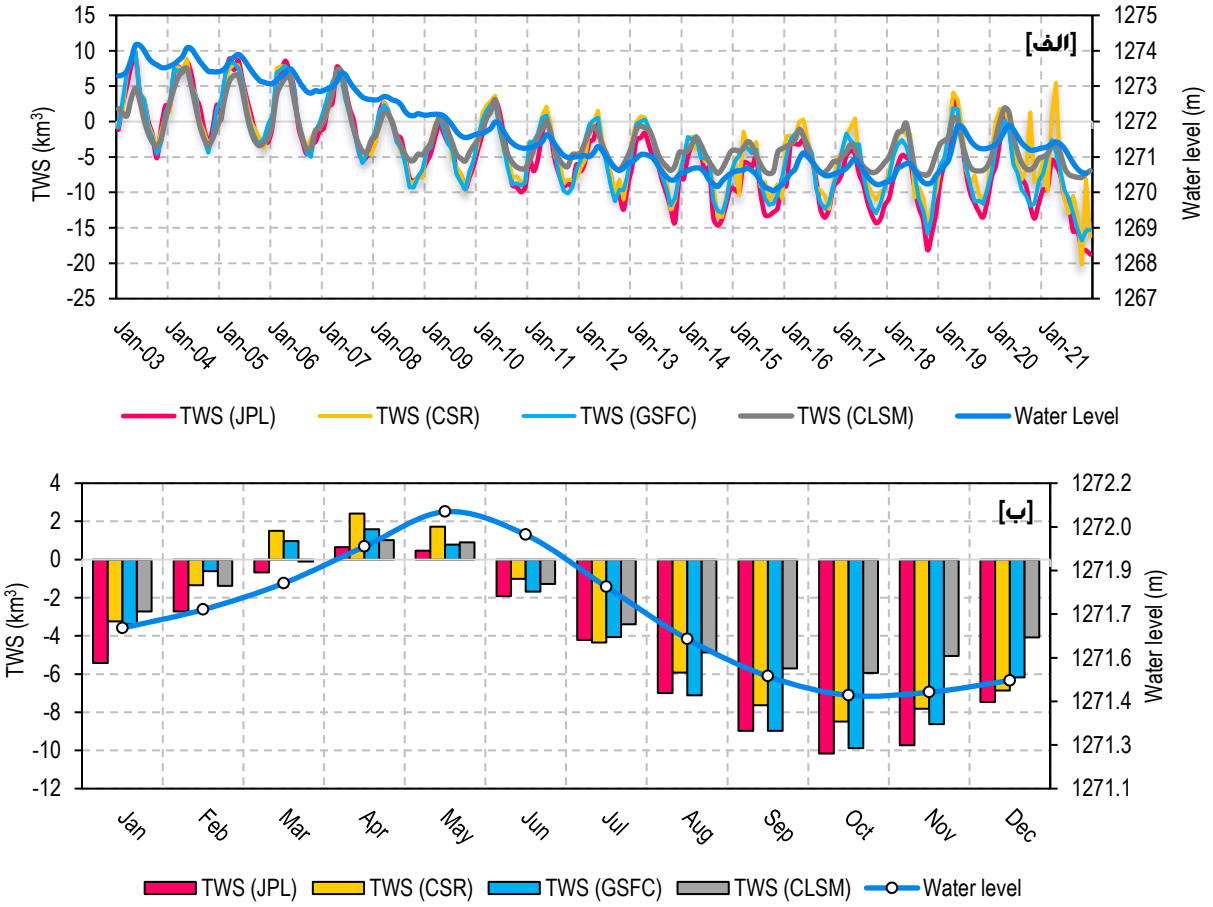


شکل ۳- تغییرات ماهانه چندساله (۲۰۰۳–۲۰۲۱) (الف) و میانگین ماهانه (ب) ذخیره آب زیرزمینی (GWS) در سطح حوضه آبریز دریاچه ارومیه(LUB)

ارتباط میان تغییرات TWS و نوسانات تراز دریاچه ارومیه

در این بخش، به بررسی ارتباط بین ذخایر آب زمینی و نوسانات سطح دریاچه ارومیه پرداخته شده است. همان‌طور که در شکل ۴ نمایش داده شده، نمودار (الف) روند تغییرات ماهانه TWS و تراز دریاچه را در طی دوره ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۱ نشان می‌دهد و نمودار (ب) میانگین ماهانه آن‌ها را برای دوره چندساله ترسیم کرده است.

مطابق نتایج به‌دست‌آمده، هم‌زمانی نسبی میان افت یا افزایش ذخایر آب زمینی و تغییر سطح دریاچه مشهود است. در بسیاری از سال‌های بحرانی، کاهش TWS بلافاصله با افت تراز دریاچه همراه بوده که می‌تواند بیانگر نقش تغذیه زیرزمینی در پایداری سطح دریاچه باشد. همچنین در نمودار ب، مشخص است که هر دو متغیر دارای نوسانات فصلی مشابه هستند، اگرچه دامنه تغییرات تراز دریاچه محدودتر است.



شکل ۴- ارتباطات ماهانه چندساله (۲۰۰۳–۲۰۲۱) (الف) و میانگین ماهانه (ب) بین ذخایر آب زمینی (TWS) و تغییرات تراز دریاچه ارومیه

جدول ۲- روند سالانه و کاهش کلی ذخیره آب زمینی (TWS) و آب زیرزمینی (GWS) در حوضه آبریز دریاچه ارومیه بر اساس داده‌های مختلف GRACE و مدل CLSM در بازه ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۱.

		GRACE-JPL	GRACE-CSR	GRACE-GSFC	CLSM
TWS	Trend (mm/yr)	-11.50 ± 0.52	-8.82 ± 0.52	-10.22 ± 0.52	-9.75
	Trend (km3/yr)	-0.59 ± 0.03	-0.46 ± 0.03	-0.53 ± 0.03	-0.51

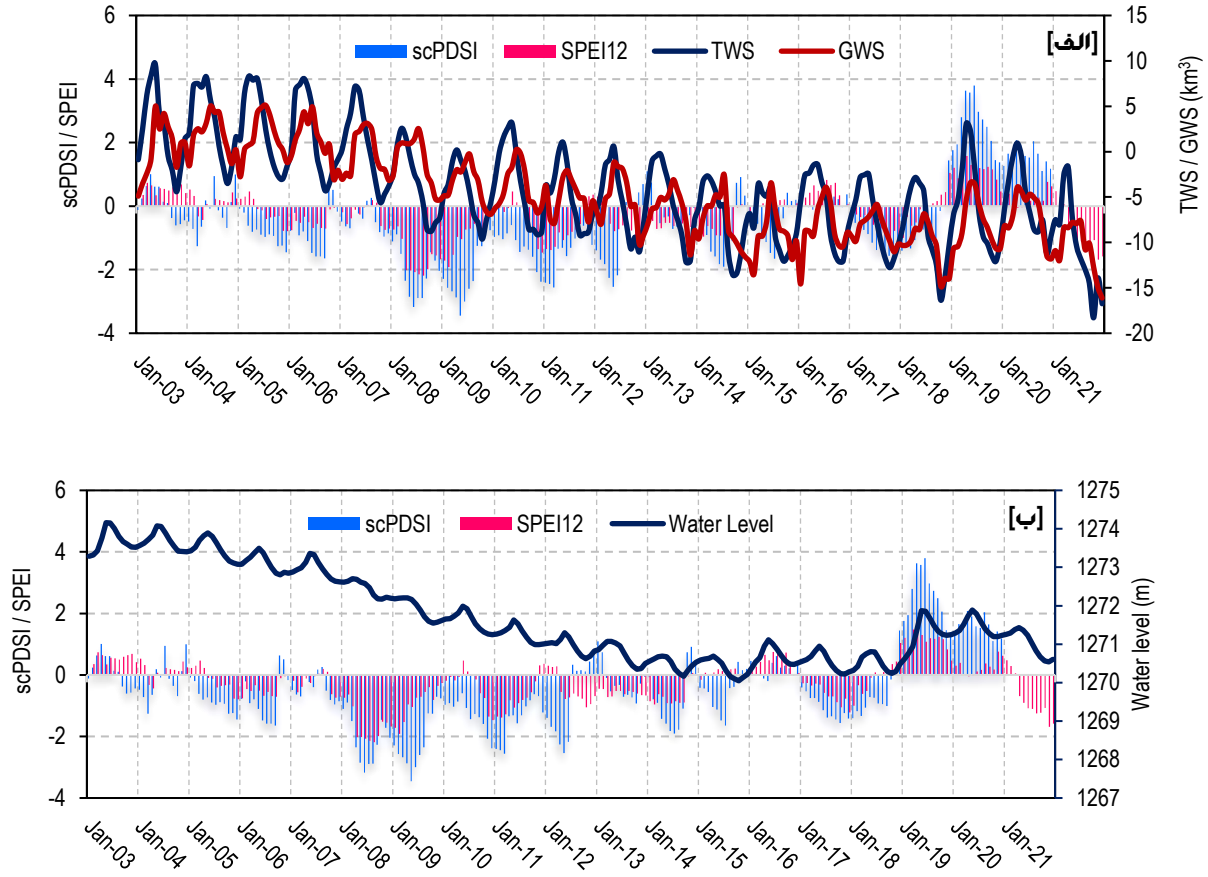
GWS	Total loss (km3)	-11.20 ± 0.51	-8.74 ± 0.51	-10.07 ± 0.51	-9.69
	Trend (mm/yr)	-9.10 ± 0.68	-6.32 ± 0.68	-7.72 ± 0.68	-10.20
	Trend (km3/yr)	-0.47 ± 0.03	-0.33 ± 0.03	-0.40 ± 0.03	-0.53
	Total loss (km3)	-8.87 ± 0.67	-6.22 ± 0.67	-7.60 ± 0.67	-10.10

همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌شود، روند کاهش TWS بین ۸٫۸۲ تا ۱۱٫۵۰ میلی‌متر در سال و برای GWS بین ۶٫۳۲ تا ۱۰٫۲۰ میلی‌متر در سال گزارش شده است. در مجموع، کل کاهش حجم ذخایر آب زمینی تا حدود ۱۱٫۲ کیلومترمکعب و برای آب‌های زیرزمینی تا حدود ۱۰٫۱ کیلومترمکعب تخمین زده شده است. تطابق نسبی میان مدل‌ها اگرچه قابل قبول است، اما اختلافات موجود نیز نشان‌دهنده حساسیت تحلیل‌ها نسبت به نوع مدل انتخابی و نیاز به استفاده از روش‌های همپوشانی چندمنبعی می‌باشد.

ارتباط بین شاخص‌های خشکسالی و متغیرهای هیدرولوژیکی

شکل ۵ به بررسی همبستگی بین شاخص‌های خشکسالی و مؤلفه‌های اصلی چرخه آب شامل TWS ، GWS و تراز سطح دریاچه ارومیه در بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۱ می‌پردازد. در نمودار (الف)، تغییرات شاخص‌های خشکسالی به‌صورت ماهانه با TWS و GWS مقایسه شده‌اند؛ و در نمودار (ب)، همین شاخص‌ها در برابر نوسانات سطح دریاچه قرار گرفته‌اند.

نتایج حاکی از آن است که افت شدید در مقادیر شاخص‌های خشکسالی) مانند SPI یا (SPEI همزمان با کاهش محسوس در TWS و GWS اتفاق افتاده است. این همبستگی قوی نشان می‌دهد که خشکسالی‌های اقلیمی تأثیر مستقیمی بر ذخایر آبی سطحی و زیرزمینی داشته‌اند. همچنین، افت تراز دریاچه نیز در دوره‌های خشکسالی شدید (به‌ویژه سال‌های ۲۰۰۸، ۲۰۱۴ و ۲۰۱۸) شدت بیشتری داشته است که نشان‌دهنده تأثیر هم‌افزایی کاهش بارش و افزایش تبخیر است.



شکل ۵- ارتباطات ماهانه چندساله (۲۰۰۳–۲۰۲۱) شاخص‌های خشکسالی با ذخیره آب زمینی TWS) و (GWS (الف) و تراز سطح دریاچه (ب)

بحث:

تحلیل سری‌های زمانی ذخایر آب زمینی (TWS) و آب زیرزمینی (GWS) در حوضه آبریز دریاچه ارومیه طی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۱، روندی نگران‌کننده از کاهش مستمر منابع آبی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل‌های ۳ و ۴ دیده می‌شود، نوسانات ماهانه و فصلی TWS و GWS اگرچه ساختار فصلی منظم دارند، اما در بلندمدت با شیب منفی و روند نزولی همراه بوده‌اند. شکل ۴ نیز نشان داد که کاهش TWS با افت تراز دریاچه هم‌راستا است، که این همبستگی در شکل ۵ با مقادیر شاخص‌های خشکسالی (SPI و PDSI) نیز تأیید می‌شود. این یافته‌ها با تحلیل‌های Khorrami and Gunduz

(2021b)هماهنگ است، که در مطالعات خود نیز رابطه مستقیم بین افت آب زیرزمینی و کاهش تراز دریاچه ارومیه را مستند کرده‌اند.

افزون بر این، در شکل‌های ۸ و ۹ تأثیر مستقیم برداشت انسانی آب و اختلال در تعادل ورودی‌ها و خروجی‌های هیدرولوژیکی منطقه روشن‌تر می‌شود. جدول ۲ روند کاهشی TWS بین ۸٫۸۲ تا ۱۱٫۵۰ میلی‌متر در سال و برای GWS بین ۶٫۳۲ تا ۱۰٫۲۰ میلی‌متر در سال، تصویری کمّی از بحران ارائه می‌دهد. این نتایج، در مقایسه با مطالعات Yi et al. (2021) که بر اهمیت پر کردن شکاف‌های داده‌ای GRACE برای پایش دقیق‌تر منابع آب تأکید کرده‌اند، حاکی از موفقیت روش STL در بازسازی داده‌های گمشده و ارائه نمایی پیوسته و قابل تحلیل از وضعیت هیدرولوژیکی منطقه است. همچنین ساختار افزایشی مدل STL در این پژوهش با مدل تفکیکی پیشنهادشده توسط Cleveland et al. (1990) نیز هم‌راستاست.

این پژوهش در ادامه مسیر تحقیقات پیشین، ضمن ارائه داده‌های پیوسته و بازسازی‌شده، تصویری تلفیقی و دقیق‌تر از دینامیک هیدرولوژیکی حوضه ارائه می‌دهد که می‌تواند مبنای تدوین سیاست‌های مدیریت پایدار منابع آب قرار گیرد. در کنار تأکید بر کاهش برداشت‌های بی‌رویه، این نتایج همچنین لزوم بهره‌گیری از مدل‌سازی چندمنبعی و تحلیل ترکیبی داده‌های سنجش از دور را برای پایش تغییرات بلندمدت منابع آبی برجسته می‌سازد.

نتیجه گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که ذخایر آب زمینی و به‌ویژه منابع آب زیرزمینی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه طی دو دهه گذشته با روندی نگران‌کننده کاهش یافته‌اند. ارتباط معنادار میان افت تراز دریاچه، کاهش TWS و شاخص‌های خشکسالی، بیانگر تأثیر توأمان عوامل طبیعی و انسانی در این بحران است. استفاده از تکنیک STL برای بازسازی داده‌های GRACE امکان تحلیل پیوسته و دقیق‌تر دینامیک هیدرولوژیکی را فراهم کرد. تحلیل‌های فضایی نیز نشان داد که مناطق با مصرف بالای آب بیشترین افت منابع را تجربه کرده‌اند. این یافته‌ها لزوم بازنگری در الگوی بهره‌برداری از منابع آب و اتخاذ سیاست‌های مدیریت پایدار را برجسته می‌سازد.

منابع

Cleveland, R. B., Cleveland, W. S., McRae, J. E., & Terpenning, I. (1990). STL: A seasonal-trend decomposition procedure based on loess. Journal of Official Statistics, 6(1), 3–73.

Flechtner, F., et al. (2014). What can be expected from the GRACE-FO laser ranging interferometer for Earth science applications? Surveys in Geophysics, 35, 999–1021.

Yi, S., et al. (2021). A global gap-filled GRACE/GRACE-FO data set of mass change time series. Earth System Science Data, 13(3), 943–954.
Khorrami, S., & Gunduz, O. (2021a). Integrating satellite-based and physically-based models to analyze the hydrological behavior of Lake Urmia basin. Hydrological Sciences Journal, 66(1), 1–16.
Khorrami, S., & Gunduz, O. (2021b). A multi-source assessment of terrestrial water budget over Lake Urmia basin using GRACE, satellite and model-based observations. Science of The Total Environment, 758, 143601.
Scanlon, B. R., et al. (2012). Groundwater storage changes in the US High Plains Aquifer, 2002–2011. Nature, 488(7410), 144–148.
Thomas, B. F., et al. (2017). GRACE ground water drought index: Evaluation of California central valley groundwater drought. Remote Sensing of Environment, 198, 384–392.
Richey, A. S., et al. (2015). Quantifying renewable groundwater stress with GRACE. Water Resources Research, 51(7), 5217–5238.
Tapley, B. D., et al. (2004). GRACE measurements of mass variability in the Earth system. Science, 305(5683), 503–505.
Rodell, M., et al. (2009). Satellite-based estimates of groundwater depletion in India. Nature, 460(7258), 999–1002.
Long, D., Longuevergne, L., & Scanlon, B. R. (2015). Uncertainty in evapotranspiration from land surface modeling, remote sensing, and GRACE satellites. Water Resources Research, 51(1), 293–304.

Rodell, M., et al. (2015). The observed state of the water cycle in the early twenty-first century. Journal of Climate, 28(21), 8289–8318.

Rodell, M., et al. (2004). The global land data assimilation system. Bulletin of the American Meteorological Society, 85(3), 381–394.

Reager, J. T., Thomas, B. F., & Famiglietti, J. S. (2014). River basin flood potential inferred using GRACE gravity observations at several months lead time. Nature Geoscience, 7(8), 588–592.

Tapley, B. D., Watkins, M. M., Flechtner, F., Reigber, C., Bettadpur, S., Rodell, M., ... & Velicogna, I. (2019). Contributions of GRACE to understanding climate change. Nature Climate Change, 9(5), 358–369.

Hydrological Variability Analysis of the Lake Urmia Basin Using Remote Sensing

B. Khorrami[1]*, S. Moshiri[2], Nafiseh Rajabi Milani[3]

Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran
PhD Candidate, Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Masters Student, Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran
* Corresponding author: bekhorram@tabrizu.ac.ir

Abstract
his study investigates the hydrological fluctuations of the Lake Urmia Basin (LUB) from 2003 to 2021 using remote sensing data from GRACE and GRACE-FO missions alongside model-based datasets. The STL technique was applied to reconstruct missing TWS values, and GWS was estimated through disaggregation. Comparative analysis with model outputs and lake level data revealed significant water storage decline, especially in groundwater components. Associations between TWS, GWS, lake level, and drought indices indicated strong anthropogenic and climatic impacts. Spatial assessments further illustrated areas of intense water use and depletion. The findings highlight an urgent need for sustainable water management strategies in the LUB.

Keywords: Lake Urmia, GRACE, Groundwater Storage, Hydrological Modeling, Remote Sensing, Drought Indices

Analysis of Temporal and Structural Trends of Greenhouse Gas Emissions in the Persian Gulf Countries in Recently 20 years

Mohsen Mirmohammadi[1], Ehsan Soureh[2] , Mosayeb Kalvandi[1], Aziz Azizpour[1]

1- Environmental Engineering Department, Faculty of Environment, University of Tehran, Iran.
2- Department of Climatology, Faculty of Natural Resources, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran.
* Corresponding author: Email

Abstract

In this study, the temporal trends of emissions of three major greenhouse gases, including carbon dioxide, methane, and nitrous oxide, were investigated in eight Persian Gulf countries, including Iran, Saudi Arabia, Iraq, Qatar, Kuwait, the United Arab Emirates, Oman, and Bahrain during the period from 2000 to 2023. The data were extracted from the eighth edition of the EDGAR World Database and were standardized in million tons for integrated analysis. Additionally, the annual compound growth rate index for each gas and country was calculated, and per capita and sectoral evaluations were done to identify structural differences in emissions.

The results indicate a significant growth in carbon dioxide emissions at an annual rate of 3.8 percent, while the growth rate of methane and nitrous oxide was 1.7 and 1.6 percent, respectively. Qatar and Oman showed the highest absolute growth, but only Qatar experienced a reduction in methane emissions. In contrast, larger countries such as Iran and Saudi Arabia have faced growth in per capita emissions due to the continuation of energy subsidies and the development of energy-intensive industries.

The analysis of Analysis of emission values showed that thermal power plants, leaks in the oil and gas production chain, and the consumption of nitrogen fertilizers in agriculture are mainly responsible for the emission of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide, respectively. The findings indicate that effective policymaking in the region should simultaneously address three critical areas: reducing fuel consumption in electricity generation, curbing methane leakage in hydrocarbon industries, and optimizing fertilizer consumption in agriculture. This study can provide a suitable scientific basis for designing climate policies in one of the most strategic energy-producing regions of the world.

Keywords: Compound Growth Index, Per Capita Emissions, Climate Change, Greenhouse Gases, Fossil Fuels.

Introduction

The increase in the concentration of greenhouse gases in the Earth's atmosphere, as one of the environmental crises of the 21st century, has had far-reaching consequences on climate systems, ecosystems, and human

societies. According to reports by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC96), the average global temperature has risen by about 1.1 degrees Celsius since the pre-industrial era, and this trend has accelerated at an unprecedented pace, especially since 2000, under the influence of the intensification of human activities (Zhai et al., 2018). Among them, the three main gases carbon dioxide (CO_2), methane (CH_4) and nitrous oxide (N_2O) have contributed 55%, 16% and 6% respectively to the increase in the global greenhouse effect. The Middle East and North Africa (MENA97) countries play an important role in the production of these gases due to their heavy dependence on fossil fuels (Wang & Witlox, 2025).

The study of greenhouse gas emissions in the Persian Gulf region has a lot of strategic and scientific importance from various aspects. From an environmental perspective, it was responsible for about 8.7% of the total global greenhouse gas emissions, comprising about six percent of the world's population in 2018 (El-Issa et al., 2020). On the economic side, the Gulf countries, as the world's main energy suppliers, are under increasing pressure to comply with the requirements of reducing greenhouse gas emissions. The Paris Agreement and countries' commitments to achieve net-zero emissions targets have doubled the need for rigorous and scientific planning (Babonneau et al., 2023).
This study, with a comprehensive and data-driven analysis of the temporal and structural trends of greenhouse gas emissions in the Persian Gulf region, provides a suitable scientific tool for the formulation of climate policies. Accurate recognition of these patterns, especially in the specific climatic conditions of the region, is a key step towards designing adaptation and emission reduction strategies.

Literature Review

Previous studies on greenhouse gas emissions in the Gulf region have mainly focused on one-dimensional analysis of carbon dioxide (CO_2). For example, Sinha et al. investigated the effect of energy-intensive technologies on CO_2 emissions in ten polluting countries in the MENA region using a quantum regression model and found that in small oil countries, the effect of energy consumption on increasing CO_2 emissions is more severe than other countries (Sinha et al., 2020). Analyzing the period from 1990 to 2023 for the six member states of the Gulf Cooperation Council (GCC), Obaid et al. confirmed the negative relationship between energy intensity and economic growth, and showed that countries such as Qatar and the United Arab Emirates have succeeded in reducing CO_2 emissions per capita by reforming fuel subsidy policies from a sectoral perspective, Yarmohammadi et al. have analyzed greenhouse gas emissions in Iran's manufacturing industries and identified industrial activity as the most important emission driver (Yarmohammadi et al., 2022). In the agricultural sector, several studies have investigated the role of nitrogen fertilizer application in the production of nitrogen oxide (N_2O) (Zhou et al., 2017; Reay et al., 2012).
Despite the value of these studies, three main limitations can be identified: first, the exclusive focus on CO_2 and the lack of multi-gas analysis, second, the limitation of time frames that ignore the impact of major

96 Intergovernmental Panel on Climate Change

97 Middle East and North Africa

global events such as the COVID-19 pandemic, and third, the neglect of regional and sectoral comparative analysis, which limits the possibility of evaluating common policy between countries.

In response to these limitations, the present study provides a comprehensive analysis of the situation of greenhouse gas emissions in the Persian Gulf region, relying on up-to-date data from the EDGAR database and supplementary field resources. This analysis includes four key axes: (1) investigating the temporal trend of CO_2, CH_4, and N_2O emissions at the regional and national levels, (2) calculating the annual compound growth rate (CAGR) to measure the acceleration or slowdown of the emission trend, (3) comparing per capita emissions between countries, and (4) sectoral analysis of the share of different areas such as energy production, transportation, agriculture, and waste. This comprehensive approach can provide a scientific basis for designing coherent and targeted climate policies at the regional level.

Stydy Area

The study area includes eight oil-rich countries of the Persian Gulf, including Iran, Saudi Arabia, Iraq, Qatar, Kuwait, the United Arab Emirates, Oman, and Bahrain. According to estimates by Sinha et al., these countries produced nearly 8.7% of total greenhouse gas emissions, despite having only about six percent of the world's population in the 2010s (Sinha et al., 2020). Figure 1 shows a geographical map of this area and the area studied. Their share of key CO_2 and CH_4 emissions is estimated to be about 10% and 7%, respectively (Sinha et al., 2020). In the meantime, the per capita emission rate is at an unprecedented level. According to the results published by NTNU University, four of the six members of the Gulf Cooperation Council (GCC) are among the top five countries in the world in terms of per capita emissions, a phenomenon attributed to the expansion of energy-intensive architecture as a result of the economic boom caused by oil exports (Bazilchuk, 2023).

In addition, the Gulf region is facing one of the fastest rates of climate warming in the world. According to recent studies, the probability of temperatures exceeding 50 degrees Celsius will be "normal" in this region by the end of this century, whereas in the pre-industrial era, these temperatures were not observed at all (Christidis et al., 2023). Rising temperatures, coupled with high humidity, have led to a growth in demand for air conditioning systems and a significant increase in electricity consumption. Also, the high reliance on industrial desalination plants has placed an additional burden on energy demand. GCC countries account for about 60% of global desalination capacity and 40% of freshwater production (Chibani, 2023).

In such a situation, the low price of fossil fuels due to extensive subsidy policies has not only encouraged excessive energy consumption but also prevented the formation of price signals to reduce consumption and emissions. According to the International Energy Agency, subsidies for fossil fuel consumption reached more than $1 trillion in 2022, a significant part of which was concentrated in Middle Eastern countries (IEA, 2023).

A combination of factors, including rapid urban population growth, ultra-hot climatic conditions, the expansion of energy-intensive architectures, dependence on energy-intensive infrastructures such as seawater desalination, and fuel subsidy policies, have made the Gulf region one of the world's leading emitters of greenhouse gases, despite its small share in the global population (Amer et al., 2025). As a result, accurate analysis of emission trends and estimation of compound annual growth rate (CAGR) for CO_2, CH_4

and N_2O gases in this region is of strategic importance and can be the basis for the formulation of coordinated climate policies at the regional and international levels.

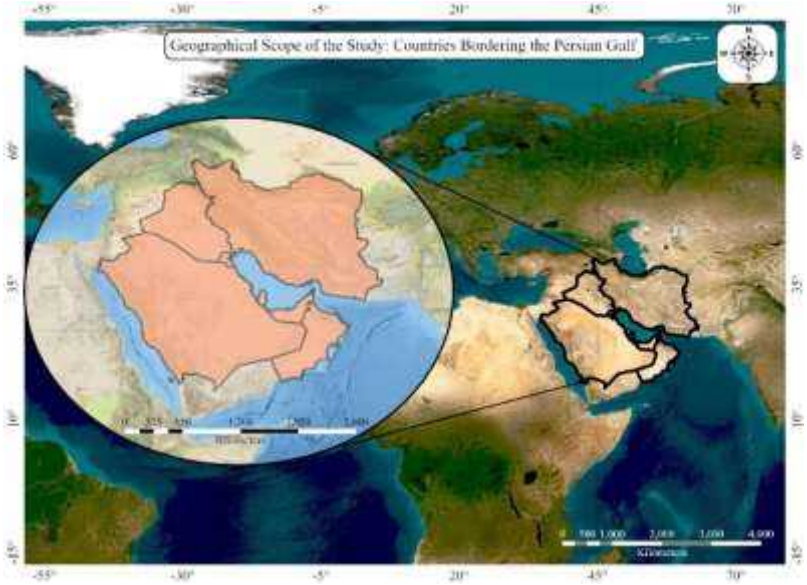


Figure 1: Study area

Methodology

The data of this research have been extracted from the EDGAR World Database Version 8, developed by the European Commission's Joint Research Center. This database provides annual statistics on CO_2, CH_4, and N_2O emissions at the country level. In this study, data for the years 2000 to 2023 for eight Persian Gulf countries (IRN, SAU, IRQ, QAT, KWT, ARE, OMN, BHR) were filtered. For the uniformity of the time series, a 23-year period was chosen. Since the 2023 data for CH_4 and N_2O have not yet been published, these values were estimated through linear extrapolation based on data from 2021 and 2022, a common practice in emission trend studies (IEA, 2022; Liu et al., 2023). To homogenize the units, all values were converted from 1000 tons (kt) to million tons (Mt).

Linear extrapolation is a method of estimating values outside the range of the observed data. In this study, to estimate emission values in 2023, the average years ($\bar{x}$) and the average emission ($\bar{y}$) were first calculated. Then, by determining the slope (m) and width from the source (b), the linear regression line equation was obtained as follows:

By inserting x = 2023, the emission value was estimated. Examining the accuracy of the method by comparing the estimates with the previous data showed an error of less than 5%.

To calculate CO_2 equivalent emissions, the GWP100 coefficients of the IPCC's sixth report were used, which suggests values of 27.2 for CH_4 and 273 for N_2O (IPCC, 2021). However, in this study, the gases have been analyzed separately to properly consider the specific characteristics of each gas.

To measure the acceleration of emission changes, the compound annual growth rate index (CAGR) was used. The index assumes that growth over the period has been uniform and provides a compact and comparable benchmark between countries and gases. The formula for calculating it is as follows:

In this regard, A is the amount of gas emissions in 2023, B is its value in 2000, and n is equal to 23 (period length). The result is multiplied by the number 100 to be expressed as a percentage. This index, while reducing the effect of short-term fluctuations, is also used to identify critical areas in climate policy making (Zhou et al., 2022).

Results

Total concentration of greenhouse gases

According to the data plotted in Figure 2, in the period from 2000 to 2023, all three greenhouse gases studied (CO_2, CH_4, and N_2O) have had an upward trend, but with differences in growth intensity and annual fluctuations. CO_2 gas has experienced the fastest increase with a compound annual growth rate (CAGR) of about 3.8 percent, from 924 to more than 2160 million tons of CO_2 equivalent per year. In contrast, CH_4 and N_2O increased with rates of about 1.7% and 1.6%, respectively, with a milder slope.

In the case of CO_2, two large jumps were observed in 2006 (6.6%) and 2008 (5.7%), which coincided with the economic growth of developing countries and the increase in coal consumption in Asia (Van Ruijven et al., 2016). In contrast, the decline in 2018, and especially 2020, is due to the decline in energy consumption due to the economic recession and lockdowns caused by the COVID-19 pandemic (Liu et al., 2020).

On the CH_4 curve, the 2016 jump (13%) was probably influenced by the very hot El Niño phenomenon of 2015–2016 and widespread biomass fires in the tropics, while the decline in 2020 (4.5%) indicates a decline in production in the oil and gas industry during the COVID-19 era (Nisbet et al., 2020).

The trend of N_2O emissions has been relatively milder, but it has been accompanied by an increase of 5.8% in 2016 and a decrease of 3.3% in 2015, which probably reflects changes in land use and the cycle of nitrogen fertilizer application in the agricultural sector (Kumar & Aravindakshan, 2023).

Detailed statistics related to the annual emission values and the growth rate of greenhouse gases are presented in Table 1.

Table 1: Annual emissions and growth of greenhouse gases in Mt CO_2eq/yr

Gases	2000	2023	CAGR (%)
CO_2	924.46	2166.66	+3.78
CH_4	406.06	595.51	+1.68
N_2O	+36.04	51.59	+1.57

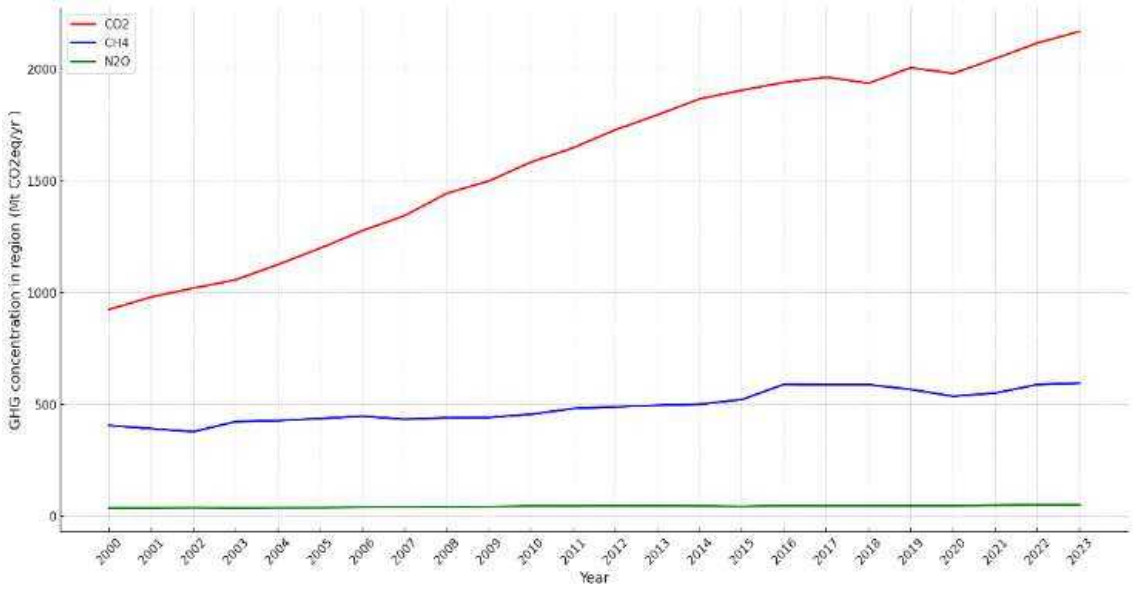


Figure 2: Concentration of greenhouse gases in the region

Greenhouse gas emissions per capita

Based on the data plotted in Figure 3, per capita greenhouse gas emissions in the eight Gulf states during the years 2000 to 2023 followed three distinct patterns: a steady decline in the four small wealthy countries (Qatar, Bahrain, the United Arab Emirates, and to a lesser extent Kuwait), a slight increase in the two largest producers (Iran and Saudi Arabia), and a sharp fluctuation or relative stability in the other two countries (Iraq and Oman).

At the beginning of the period, Qatar had recorded the highest per capita emissions in the world, with more than 100 tons of CO_2 equivalent per capita. The UAE, Bahrain, and Kuwait all had levels above 40 tCO_2eq/cap. However, the implementation of policies such as reducing gas flaring, developing combined cycle power plants, using low-carbon desalination plants, and investing in solar energy caused these countries to reduce their per capita emissions by between 0.6 and 2.8 percent annually (Hafner et al., 2023). Although Qatar still has the highest per capita, it has halved it compared to 2000. In contrast, Iran and Saudi Arabia have followed an upward path with CAGR rates of about 1.8 percent and 1.2 percent. In Iran, factors such as rapid growth of urban population, extensive subsidies for natural gas and gasoline, and the development of energy-intensive industries (such as steel and petrochemicals) have been responsible for the increase in per capita emissions from 7.7 to 11.6 tons. The 7.5 percent jump in 2003 coincided with the start of the operation of the South Pars phases and the liberalization of car imports, while the decline in 2012 coincided with oil sanctions and economic recession. In Saudi Arabia, the boom in construction projects and the increase in electricity generation from fossil sources until 2010 produced a five percent jump in per capita emissions (Van Lavieren et al., 2012). Iraq, which was struggling with war and sanctions in the early

2000s, had a per capita population of less than 6 tons. However, the restructuring of the oil industry between 2013 and 2017 led to a significant increase in 2016 and recorded a peak of 9.3 tonnes. However, the crisis caused by COVID-19 and the collapse in oil prices in 2020 led to the largest regional decline (14.3%) for the country (Yousif et al., 2023). In Oman, the development of LNG98 projects and the aluminum industry led to an initial increase in the mid-2000s, but after that, per capita emissions fluctuated between 23 and 27 tonnes and its compound annual growth rate is almost zero (Luomi, 2014). Table 2 details the annual trend and per capita growth rate of greenhouse gas emissions in these countries.

Table 2: Annual Trend of Greenhouse Gas Emissions per Capita in the Persian Gulf Countries and Iran (tCO_2eq/yr)

Countries	2000	2023	CAGR (%)
Bahrain	56.6	35.3	-2
Iran	7.74	11.64	+1.8
Iraq	7.14	8.08	+0.5
Kuwait	42.9	37.4	-0.6
Oman	23	23.4	+0.1
Qatar	101.03	52.6	-2.8
Saudi Arabia	16.9	22.2	+1.2
United Arab Emirates	37.2	26.3	-1.5

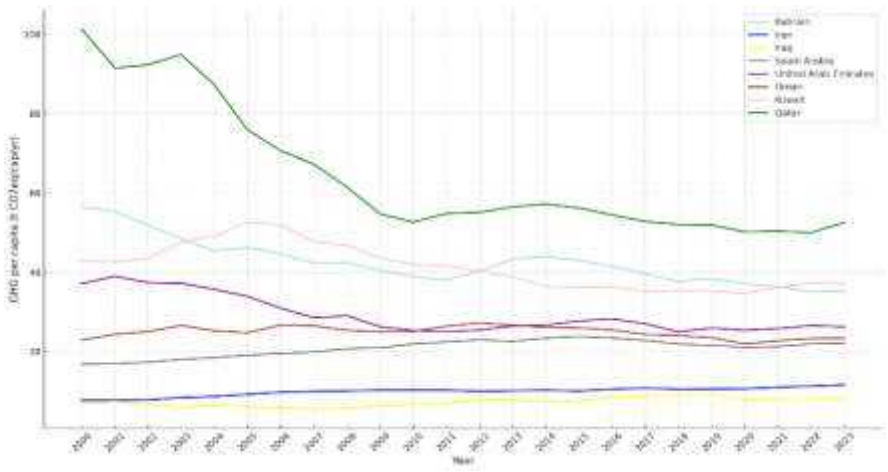


Figure 3: Per capita greenhouse gas emissions in the Persian Gulf countries and Iran

Distribution by country

98 liquefied natural gas

During the period from 2000 to 2023, the total annual greenhouse gas emissions in selected Persian Gulf countries and Iran have had an increasing but heterogeneous trend. Qatar and Oman, with compound annual growth rates of 4.2% and 4% respectively, have recorded the fastest upward trend, mainly due to the development of liquefied natural gas infrastructure, energy-intensive industries, and the strong economic dependence of these countries on hydrocarbon exports (Abdallah et al., 2024).

Saudi Arabia, the United Arab Emirates, and Iraq are next with rates between 3.4% and 3.7%. This significant growth has been mainly influenced by the development of industrial projects in the 2010s and the reconstruction of oil production capacity after political unrest (including the 2016 surge in Iraq) (Mills, 2018). Iran and Kuwait are at the mid-level with rates of about 2.9%. In Iran, the growth in emissions reflects the development of the South Pars gas fields and the expansion of energy-intensive industries (Azadi et al., 2017). In Kuwait, the main surge was observed in 2003. In contrast, Bahrain has recorded the slowest growth rate of about 2.3%, which may be the result of the gradual implementation of reforms in the energy and industrial structure (Saqib, 2018). Temporary declines in 2018 (in Saudi Arabia and the UAE) and 2020 (in Iraq and Oman) indicate that oil price shocks, revisions to energy subsidies, and restrictions due to the COVID-19 pandemic can lead to short-term emission reductions (M East, 2022).

This difference in growth rates reflects the heterogeneity of economic structure, industrial development trajectory, and climate policy among countries in the region.

Table 3: Trend and fluctuations of absolute CO_2 emissions in the Persian Gulf countries (Mt CO_2eq/yr)

Countries	2000 Value	2023 Value	CAGR (Annual %)	Maximum Annual Increase (%)	Maximum Annual Decrease (%)
Bahrain	37.6	63.7	+3.2	(+9.2) 2005	(-1.4) 2022
Iran	512	997	+2.9	(+8.8) 2003	(-1.3) 2012
Iraq	168	363	+3.4	(+17) 2016	(-12) 2022
Kuwait	88.1	167.9	+2.9	(+11.1) 2003	(-3.2) 2007
Oman	52.1	127.4	+4	(+11.9) 2011	(-3.7) 2020
Qatar	60	154.2	+4.2	(+14.2) 2011	(-5.1) 2001
Saudi Arabia	350	805	+3.7	(+8) 2010	(-2.1) 2018
United Arab Emirates	117	268	+3.7	(+15.8) 2008	(-6.1) 2018

The composite heat map shown in Figure 5 provides a compact view of the rate of climate change in eight oil-based economies in the region: The first column (CO_2) shows that Qatar, with a rate of 6.25 percent per year, and Oman, with 5.65 percent, have experienced the fastest carbon acceleration, while other countries fluctuate between 3 and 3.8 percent; the CH_4 column reveals a marked heterogeneity, with Iraq leading at 3.4 percent, and Qatar, despite its sharp growth in CO_2 and N_2O, being the only country with a downward trend in methane (8 percent), likely due to reduced flaring and improved management of liquid gas fields (Abu, 2023). The N_2O column indicates significant jumps in smaller economies: the Emirates, Qatar, and Oman all have growth above 3 percent, while Iran, although having the largest absolute share, has increased

by only 1.6 percent, and Iraq has recorded the lowest rate (0.9 percent). Juxtaposing these three dimensions shows that no country is leading or lagging in all three gases simultaneously; for example, Saudi Arabia has moderate growth in CO_2, but in N_2O, it exceeds the regional average with 2.7 percent, and in CH_4, it is almost constant.

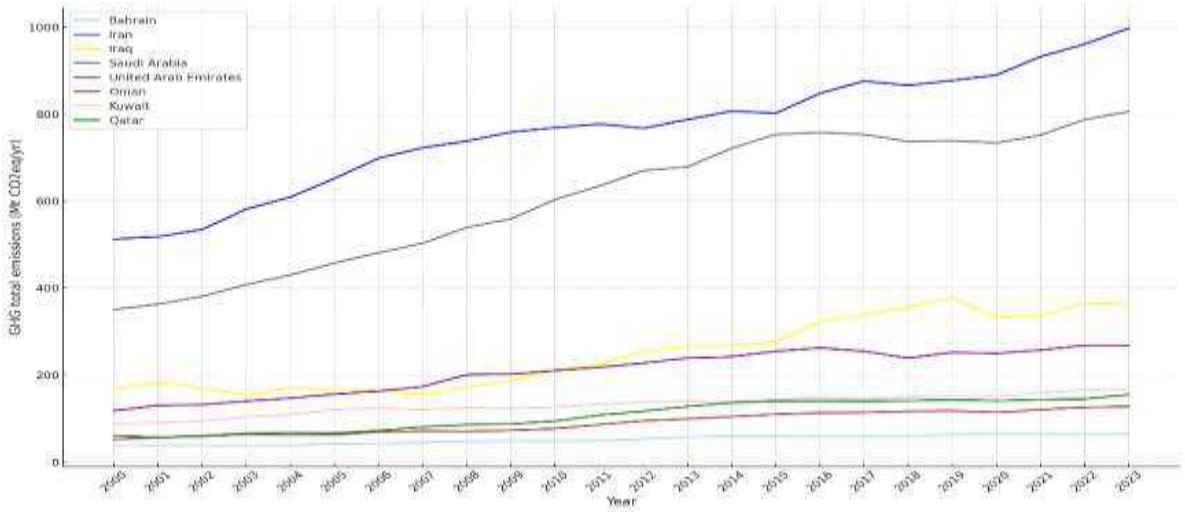


Figure 4: Total greenhouse gas emissions by country

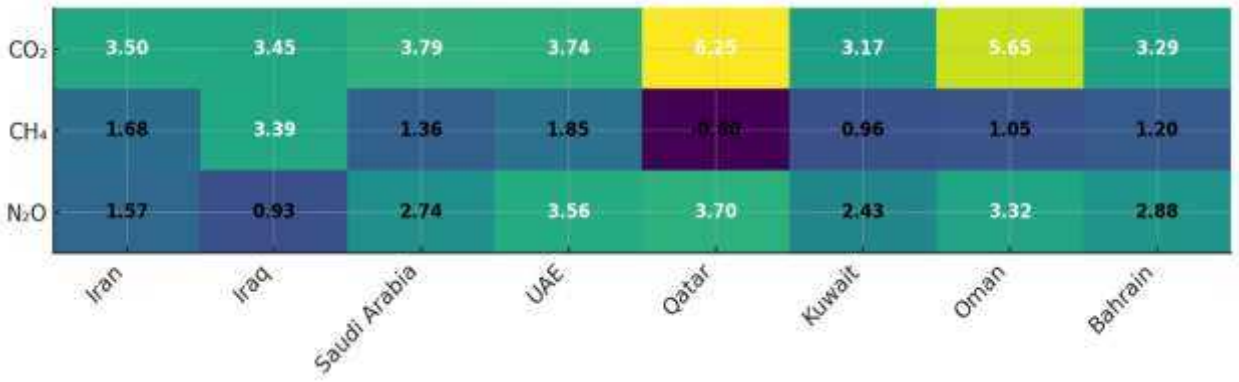


Figure 5: Heat map of compound annual growth rate (CAGR) of greenhouse gases

Figure six shows the annual average emissions of three greenhouse gases (CO_2, CH_4, and N_2O) over the period 2000 to 2023 in six key energy-related sectors. The image reveals a significant disparity in the contribution of gases and sectors to total emissions. Regarding CO_2 emissions, the power industry has the highest share by a significant margin; the average annual emissions in this sector are nearly twice that of the transportation sector and three times that of the buildings sector. This difference indicates that fossil fuel

power plants remain the main source of carbon emissions in the region. Next in line are transportation and industrial combustion, which are dependent on the consumption of petroleum products in road fleets and heavy fuels in thermal industries, respectively. Together, these two sectors account for approximately one-third of total CO_2 emissions. In contrast, the picture is quite different in the realm of methane gas. The fuel extraction and processing sector, with a share of over 90%, is the main source of methane emissions in the region. This dominance is mainly due to leaks in wellheads, gas flaring, and worn-out pipelines (Gordon, 2025). Following that, agriculture and waste management rank second and third; although their share is much smaller, they show a growing trend, especially in recent years. These two sectors mainly contribute to methane emissions through industrial livestock farming and landfilling (Shindell et al., 2021). Finally, for N_2O, agriculture, especially the consumption of nitrogen fertilizers, is the largest source, accounting for more than half of the emissions of this gas alone; followed by industrial processes and the transportation sector, which shows a slow but steady increase in the burning of diesel fuels. To better combat pollution, it is necessary to examine each gas and each sector separately and design appropriate solutions for it, and for effective climate policy, it is necessary to develop separate strategies tailored to the characteristics of each gas and each economic sector.

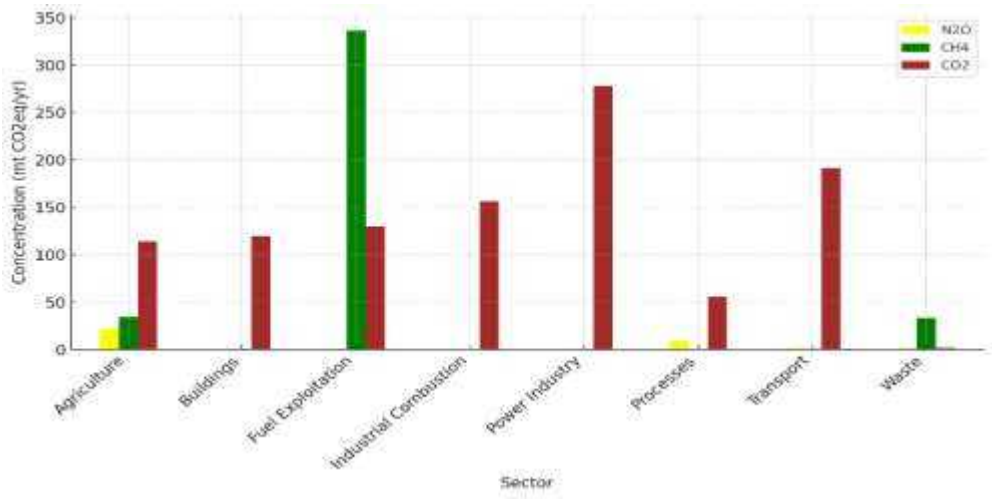


Figure 6: Average CO_2, CH_4 and N_2O emissions by major sectors

Results and Discussion

The present study, by mapping the emission trends of three greenhouse gases CO_2, CH_4 and N_2O in the 21st century for eight Gulf countries, shows that although the total emissions of the region have increased from 924 to 2168 million tons of CO_2 equivalent, the growth rate of the gases has not been the same: CO_2 is still the main driver with a compound annual growth rate (CAGR) of about 3.8 percent, while CH_4 and N_2O are at the same rate, respectively.have increased by 1.7 percent and 1.6 percent.

While most previous studies have focused solely on CO_2, this study provides a more comprehensive picture of emission patterns in the region by simultaneously analyzing three major greenhouse gases. For example, Sinha et al., using the quantile regression model for the period 1990–2017, showed that energy-intensive technologies in the top 10 MENA polluting countries had an increasing effect on CO_2 emissions in all distribution quartiles, and that this elasticity was even higher in small oil-rich countries (Sinha et al., Our findings also confirm this, especially in the case of Qatar and Oman, which have experienced the fastest acceleration of CO_2 emissions in the last two decades. But the inclusion of CH_4 and N_2O in this analysis reveals a more hidden dimension of the trends: Qatar is the only country with a downward trend in CH_4 emissions, despite the growth of CO_2, a point that was not taken into account due to the concentration of a single gas in the Sinha study. In addition, the extension of the time frame to 2023 in this study has made it possible to analyze the impact of recent events such as economic shocks caused by the COVID-19 pandemic and the decline in oil prices in 2020, which has led to a temporary but significant reduction in CO_2 and CH_4 emissions.

In line with structural analyses, our findings are also consistent with the results of the study by Abid et al.; they showed that energy intensity has a negative impact on economic growth, while CO_2 has a positive relationship with GDP in the short term (Abid et al., 2024). Our analyses clarify these relationships at the sectoral level: in countries such as Iran and Saudi Arabia, where extensive fuel subsidies are still in place, both energy intensity remains high and per capita CO_2 is increasing. In contrast, countries such as Qatar and the United Arab Emirates, by gradually reforming energy prices and developing renewable energies, have managed to almost halve their per capita CO_2 emissions, indicating the beginning of a process of relative decoupling between economic growth and emissions. On the other hand, the sectoral analysis of this study shows that, contrary to the traditional focus on the electricity sector, two neglected but effective areas, namely methane leakage in the hydrocarbon extraction and transmission chain, and the consumption of nitrogen fertilizers in agriculture, have a high potential for intervention and rapid emission reduction.

Overall, this study provides quantitative and qualitative evidence to fill the gaps in the comprehensive understanding of greenhouse gas emissions in the region and paves the way for the formulation of effective, targeted and multisectoral data-based climate policies for the future.

Conclusion

This study provides a comprehensive and up-to-date analysis of the temporal emission trends of the three main greenhouse gases (CO_2, CH_4, and N_2O) in eight Gulf countries, including Iran, Saudi Arabia, Iraq, Qatar, Kuwait, the United Arab Emirates, Oman, and Bahrain during the period 2000 to 2023. The findings show that during this period, gas emissions have generally increased. Among them, CO_2 with a compound annual growth rate (CAGR) of about 3.8 percent had the highest acceleration, while CH_4 and N_2O rates were 1.7 percent and 1.6 percent, respectively. Qatar and Oman have recorded the highest absolute growth in emissions. At the same time, Qatar is the only country that experienced a reduction in methane emissions during the period under study, which is likely due to the implementation of successful policies such as reducing flaring and developing renewable energy. The findings clearly show the differences in emission patterns between different countries and highlight the decisive role of sectors such as energy, industry, and

agriculture in this regard. Larger countries such as Iran and Saudi Arabia, due to their high energy consumption and dependence on energy-intensive industries, face significant challenges in reducing their per capita emissions, while countries such as Qatar and the United Arab Emirates have been able to significantly reduce their per capita emissions through policy reforms. This study is the first to simultaneously and regionally examine the trends of the three main greenhouse gases in the Persian Gulf countries. Taking advantage of a long-term time frame (23 years) and taking into account the impact of events such as the COVID-19 pandemic are other strengths. Despite the comprehensiveness of this research, there are some limitations. Among other things, the lack of complete release of 2023 data for some gases compensated through extrapolation, as well as the lack of consideration of social, political, and institutional factors that may influence emission patterns at the national level. Removing these limitations can pave the way for the future of climate research in this region in a more accurate way.

References:

Abdallah, I., Alhosin, H., Belarabi, M., Chaouki, S., Mahmoud, N., & Tayah, J. (2024). A Pan-Asian energy transition? The new rationale for decarbonization policies in the world's largest energy exporting countries: A case study of Qatar and other GCC countries. Energies, 17(15), 3776.

Abid, I., Hechmi, S., & Chaabouni, I. (2024). Impact of Energy Intensity and CO2 Emissions on Economic Growth in Gulf Cooperation Council Countries. Sustainability, 16(23), 10266.

Abu, R., Patchigolla, K., & Simms, N. (2023). A review on qualitative assessment of natural gas utilisation options for eliminating routine Nigerian gas flaring. Gases, 3(1), 1-24.

Amer, E. A. A. A., Xiuwu, Z., Meyad, E. M. A., Alareqi, M. M., Bather, S. M., & Abdelwahed, A. (2025). Urbanization, Growth, and Carbon Footprints: A GCC Perspective on Sustainable Development. Sustainable Futures, 100631.

Azadi, P., Sarmadi, A. N., Mahmoudzadeh, A., & Shirvani, T. (2017). The Outlook for natural gas, electricity, and renewable energy in Iran. Stanford Iran, 2040, 1-27.

Babonneau, F., Badran, A., Haurie, A., Schenckery, M., & Vielle, M. (2023). GCC countries strategic options in a global transition to zero-net emissions. Environmental Modeling & Assessment, 28(5), 709-733.

Bazilchuk, N. (2023, December 7). The energy footprint of architecture built by oil. Norwegian SciTech News.

Chibani, A. (2023). The costs and benefits of water desalination in the Gulf. Arab Center Washington DC.

Christidis, N., Mitchell, D., & Stott, P. A. (2023). Rapidly increasing likelihood of exceeding 50° C in parts of the Mediterranean and the Middle East due to human influence. npj Climate and Atmospheric Science, 6(1), 45.

El-Issa, B., Elmaddah, E., Rouabhia, I., Alharthey, S. S., Serriya, S. A., Fawaz, S., & Schiffer, R. (2020). A Green Recovery for a More Resilient MENA Region: Youth Perspective on Energy, Climate & Mobility. FES.

Gordon, D. (2025). No Excuses for Squandering Gas: Lessening Methane Waste, Bolstering Energy Security. Environment: Science and Policy for Sustainable Development, 67(4), 18-31.

Hafner, M., Raimondi, P. P., & Bonometti, B. (2023). Low-carbon energy strategies in mena countries. In The Energy Sector and Energy Geopolitics in the MENA Region at a Crossroad: Towards a Great Transformation? (pp. 175-261). Cham: Springer International Publishing.

International Energy Agency (IEA), 2023. Fossil fuel consumption subsidies 2022. IEA. https://www.iea.org/reports/fossil-fuel-consumption-subsidies-2022

Kumar, B. M., & Aravindakshan, S. (2022). Carbon footprints of the Indian AFOLU (Agriculture, Forestry, and Other Land Use) sector: a review. Carbon Footprints, 2(1).

Liu, Z., Ciais, P., Deng, Z., Lei, R., Davis, S. J., Feng, S., ... & Schellnhuber, H. J. (2020). Near-real-time monitoring of global CO2 emissions reveals the effects of the COVID-19 pandemic. Nature communications, 11(1), 5172.

Luomi, M. (2014). Mainstreaming climate policy in the Gulf Cooperation Council states.

M East, C.C. Initiative. (2022). Energy systems. Retrieved from https://www.asmeascholars.org/assets/docs/02_Energy-Web-r1.pdf

Mar, K. A., Unger, C., Walderdorff, L., & Butler, T. (2022). Beyond CO2 equivalence: The impacts of methane on climate, ecosystems, and health. Environmental science & policy, 134, 127-136.

Mills, R. (2018). A new hope: Iraq oil's way forward. Al-Bayan Center Publications Series, Iraq.

Nisbet, E. G., Manning, M. R., Dlugokencky, E. J., Fisher, R. E., Lowry, D., Michel, S. E., ... & White, J. W. (2019). Very strong atmospheric methane growth in the 4 years 2014–2017: Implications for the Paris Agreement. Global Biogeochemical Cycles, 33(3), 318-342.

Saqib, N. (2018). Greenhouse gas emissions, energy consumption and economic growth: Empirical evidence from gulf cooperation council countries. International Journal of Energy Economics and Policy, 8(6), 392-400.

Shindell, D., Ravishankara, A. R., Kuylenstierna, J. C., Michalopoulou, E., Höglund-Isaksson, L., Zhang, Y., ... & Borgford-Parnell, N. (2021). Global methane assessment: Benefits and costs of mitigating methane emissions (No. Job No: DTI/2352/PA). United Nations Environment Programme.

Sinha, A., Shah, M. I., Sengupta, T., & Jiao, Z. (2020). Analyzing technology-emissions association in Top-10 polluted MENA countries: How to ascertain sustainable development by quantile modeling approach. Journal of Environmental Management, 267, 110602.

Van Lavieren, H., Burt, J., Feary, D. A., Cavalcante, G., Marquis, E., Benedetti, L., ... & Sale, P. F. (2011). Managing the growing impacts of development on fragile coastal and marine ecosystems: Lessons from the Gulf.

Van Ruijven, B. J., Van Vuuren, D. P., Boskaljon, W., Neelis, M. L., Saygin, D., & Patel, M. K. (2016). Long-term model-based projections of energy use and CO2 emissions from the global steel and cement industries. Resources, Conservation and Recycling, 112, 15-36.

Wang, Y., & Witlox, F. (2025). Global trends in electric vehicle adoption and the impact of environmental awareness, user attributes, and barriers. Energy Reports, 13, 1125-1137.

Yousif, B., El-joumayle, O., & Baban, J. (2023). Exploring the Water-Energy-Food nexus in context of conflict in Iraq. Energy Nexus, 11, 100233.

Zhai, P., Pörtner, H. O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P. R., Pirani, A., ... & Tabatabaei, M. (2018). Global Warming of 1.5 C. An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5 C above Pre-Industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change. Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty, 32.

شبیه‌سازی بارش ماهانه ایستگاه سینوپتیک نمین با استفاده از مدل‌های هوشمند

محمدرضا نیک‌پور[1]*

۱- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی

* آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول (m_nikpour@uma.ac.ir)

چکیده

مقادیر بارش ماهانه به عنوان یکی از داده‌های اصلی ورودی به سیستم‌های هیدرولوژیکی محسوب شده و پیش‌بینی دقیق آن در مطالعات رواناب و آب‌های زیرزمینی حائز اهمیت است. در سال‌های اخیر، مدل‌های هوشمند به‌طور گسترده‌ای در شبیه‌سازی پدیده‌های هیدرولوژیکی مورد استفاده قرار گرفته است. در تحقیق حاضر به منظور شبیه‌سازی بارش ماهانه ایستگاه سینوپتیک نمین از مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و سامانه استنتاجی فازی عصبی تطبیقی (ANFIS) استفاده شد. بر اساس داده‌های موجود، مقادیر بارش ماهانه به‌ازای دوره آماری ۲۰۲۴-۲۰۰۸ مورد استفاده قرار گرفت. برای شبیه‌سازی کوتاه مدت بارش ماهانه (یک ماه بعد) سه الگوی مختلف بر اساس تأخیر بارش و پارامترهای دمای میانگین و حداقل تعریف شد. برای ارزیابی نتایج مدل از شاخص‌های ضریب تعیین (R2)، حداقل ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و شاخص کارایی نش-ساتکلیف (NSE) استفاده شد. نتایج پژوهش حاکی از عمکرد بهتر مدل ANFIS در مقایسه با مدل ANN بود. به‌طوری‌که مقادیر R2، NSE و RMSE برای مدل ANFIS به‌ازای بهترین الگو در مرحله صحت‌سنجی به‌ترتیب برابر ۰/۸۱۰، ۰/۸۰۳ و ۱۰/۲۰۱ میلی‌متر به‌دست آمد.

کلید واژه‌ها: ایستگاه نمین، بارش ماهانه، سامانه استنتاجی فازی-عصبی تطبیقی، شبکه‌های عصبی مصنوعی.

مقدمه

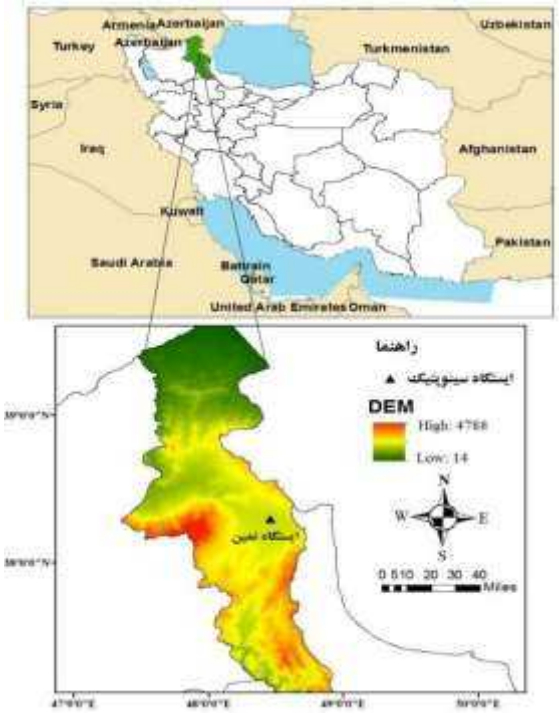
تخمین دقیق بارش ماهانه می‌تواند به عنوان ابزاری کاربردی در مدیریت بهینه منابع آب مورد استفاده قرار گیرد. همچنین برآورد میزان بارندگی نقش کلیدی در مطالعات کیفی آب و مدیریت مسائل محیط زیست ایفا می‌کند که از جمله می‌توان به کاهش آلودگی‌ها، کنترل کیفیت بدنه‌های آبی، حفاظت از آبزیان و حیات وحش اشاره کرد (Lou et al., 2016). امروزه روش‌های یادگیری ماشین به‌طور گسترده‌ای در پیش‌بینی متغیرهای هیدرولوژیکی و از جمله بارش ماهانه به‌کار گرفته می‌شود. معروفی و همکاران (۱۳۹۶) بارش ماهانه در پهنه جنوب شرق کشور، واقع در استان سیستان و بلوچستان را با

استفاده از روش‌های سری زمانی ساریما و مدل ANN پیش‌بینی کردند. آن‌ها از مقادیر بارش ماهانه طی دوره آماری ۱۳۸۸-۱۳۵۱ برای ایستگاه‌های منتخب منطقه استفاده کردند. مقایسه نتایج مدل‌ها حاکی از برتری مدل ANN نسبت به سری زمانی ساریما برای گستره مطالعاتی بود. وکیلی (۱۳۹۶) به منظور تخمین داده‌های بارش ماهانه ایستگاه ارومیه از روش‌های آماری کلاسیک و مدل درختی M5 با استفاده از نرم افزار Weka استفاده کرد. از بین روش‌های کلاسیک، روش تخمین‌گر منفرد، به‌عنوان بهترین روش با بیشترین ضریب همبستگی و کمترین خطا انتخاب شد. علاوه بر آن، مدل درختی M5 در برآورد داده‌ها با (MAE=7.29، RMSE=9.94 وr=0.91) بهترین عملکرد را به دنبال داشت. فرجی و همکاران (۱۴۰۴) به بررسی داده‌های بارش تجمعی ۲۴ ساعته در ایران و پیش‌بینی میزان بارش در دوره‌های زمانی مختلف با استفاده از شبکه‌های عصبی چندلایه (MLP) و درخت تصمیم (DT) پرداختند. در پژوهش آن‌ها، مدل MLP با حداقل‌سازی پارامتر MSE به میزان ۰/۰۴ کارایی چشمگیری از خود نشان داد. همچنین بر اساس تحلیل‌های درخت تصمیم، استان‌های ایران بر اساس ویژگی‌های بارش به هفت خوشه تقسیم‌بندی شدند. Lou et al. (2016) و Sofian et al. (2018) برای پیش‌بینی بارش ماهانه از مدل‌های پس انتشار (BP)، تابع پایه شعاعی (RBF) استفاده کردند. در تحقیقات مذکور به‌طور مشابه، مدل RBF عملکرد بهتری را به همراه داشت. Liu and Shi (2019) از مدل برنامه‌ریزی ژنتیک (GP) برای شبیه‌سازی بارش ماهانه در حوضه آبریزی واقع در کشور چین استفاده کردند و توانستند میزان بارش ماهانه تا سال ۲۰۵۰ را پیش‌بینی نمایند. Kumar et al. (2025) از الگوریتم‌های متنوع یادگیری ماشین شامل MLP، RF، XGBoost، CatBoost و LR برای تخمین بارش‌های روزانه و هفتگی استفاده کردند. نتایج حاکی از عملکرد قابل قبول همه مدل‌ها بود و در این میان، مدل XGBoost نتایج نسبتاً بهتری به همراه داشت. با توجه به عملکرد قابل تحسین مدل‌های داده-مبنا در شبیه‌سازی و تخمین میزان بارش، در پژوهش حاضر برای شبیه‌سازی بارش ماهانه ایستگاه سینوپتیک نمین واقع در استان اردبیل، از مدل‌های شبکه‌های عصبی (ANN) و سیستم استنتاجی فازی-عصبی تطبیقی (ANFIS) استفاده شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

ایستگاه سینوپتیک نمین در طول جغرافیایی $48^{o}29'28"$ و عرض جغرافیایی $38^{o}25'13"$ در سال ۱۳۸۶ در استان اردبیل تأسیس شده است. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همچنین خصوصیات آماری مقادیر متغیرهای بارش و دما در ایستگاه سینوپتیک نمین طی دوره آماری ۲۰۲۴-۲۰۰۸ در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

جدول ۱- خصوصیات آماری مقادیر ماهانه بارش و دما در ایستگاه سینوپتیک نمین طی دوره ۲۰۲۴-۲۰۰۸

متغیر	میانگین	بیشینه	کمینه	انحراف معیار	چولگی
بارش	۲۲/۴۸۳	۱۱۴/۹۳	۰	۱۹/۲۲۵	۱/۵۱
دما	۱۰/۵۷	۴۲/۶	۱۹/۲	۷/۰۴۱۲	-۰/۲۰۸

شبکه عصبی مصنوعی (ANN)

در پژوهش حاضر از شبکه پرسپترن چندلایه (MLP) که یکی از انواع رایج شبکه‌های عصبی است، استفاده شد. در مدل MLP، الگوریتم یادگیری و پردازش داده‌ها به سمت جلو از لایه ورودی به طرف لایه خروجی صورت می‌گیرد (فرجی و همکاران، ۱۴۰۴). متغیرهای مؤثر که در مدل‌سازی شبکه‌های عصبی نقش اساسی دارند شامل تعداد تکرار، نوع تابع آموزش، تعداد لایه‌های شبکه و تعداد نرون‌های لایه میانی می‌باشد. به‌منظور به حداقل رساندن خطای مدل‌سازی پس از انجام تحلیل حساسیت، توابع و مقادیر بهینه در نظر گرفته‌شده برای مدل MLP در تحقیق حاضر به شرح جدول ۲ می‌باشد.

جدول ۲- مقادیر پارامترهای مورد استفاده در مدل شبکه عصبی مصنوعی

پارامتر	بهترین مقدار
نوع شبکه عصبی	Multi-Layer Perceptron
تعداد لایه پنهان	1
الگوریتم آموزش	Levenberg-Marquardt
تعداد نرون	5
تابع انتقالی برای لایه میانی	TANSIG
تابع انتقالی برای لایه خروجی	LOGSIG
تعداد تکرار	1000

سامانه استنتاجی فازی- عصبی تطبیقی (ANFIS)

مدل فازی-عصبی بر اساس قوانین فازی بنا نهاده شده و از ویژگی‌های الگوریتم آموزشی مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی برای تطبیق و تعیین پارامترهای مبتنی بر قوانین استفاده می‌کند. یک مدل ANFIS شامل شبکه‌ای شش لایه و متشکل از گره‌ها و کمان‌های اتصال دهنده گره‌ها می‌باشد. (Kisi et al., 2015). لایه اول، شامل متغیرهای ورودی می‌باشد. در لایه دوم بر اساس تابع عضویت انتخاب شده، برای هر یک از ورودی‌ها، درجه عضویت (μ) در نظر گرفته می‌شود (فازی سازی). در لایه سوم، مطابق با قوانین منطق فازی سوگنو، سیگنال‌های ورودی در هم ضرب شده و خروجی آن که بیانگر قوه اشتعال هر قانون فازی می‌باشد، به لایه بعد فرستاده می‌شود. در لایه چهارم، پس از دریافت هر یک از قوانین لایه سوم، مقادیر نرمال شده قوانین محاسبه می‌شود (نرمال‌سازی). در لایه پنجم، میزان مشارکت (وزن) i امین قانون فازی، با حاصل‌ضرب قوه اشتعال نرمال شده (خروجی لایه چهارم) و تابع برآیند محاسبه می‌شود (غیرفازی سازی). در لایه ششم، با جمع مقادیر غیرفازی، خروجی مدل ANFIS تولید می‌شود. لازم به ذکر است که در پژوهش حاضر از تابع عضویت Guassian نوع ۲ برای آموزش شبکه استفاده شد.

داده‌های مورد استفاده و تعریف الگوها

داده‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر شامل مقادیر ماهانه بارش و دما (بیشینه، کمینه و میانگین)، طی دوره زمانی ۲۰۲۴-۲۰۰۸ بود. تعداد داده‌ها در مقیاس ماهانه برابر ۲۰۵ بود که ۷۰٪ آن برای مرحله آموزش و ۳۰٪ برای مرحله صحت‌سنجی (تست) مورد استفاده قرار گرفت. به‌منظور اولویت‌بندی پارامترهای تأثیرگذار بر میزان بارش ماه فعلی (Rt) و تعریف الگوها، از آزمون همبستگی در محیط SPSS استفاده شد. بر اساس نتایج آزمون همبستگی، بارش ماه قبل (Rt-1)

بیشترین همبستگی را با بارش ماه فعلی (Rt) داشت، بنابراین به عنوان تنها متغیر ورودی در اولین الگو به‌کار گرفته شد. متغیرهای دمای میانگین (Tave) و دمای کمینه (Tmin) نیز در الگوهای بعدی به‌کار گرفته شدند. شایان ذکر است که طبق نتایج آزمون همبستگی متغیر دمای بیشینه بر میزان بارش ماه فعلی (Rt) داری تأثیر معنی‌دار نبود، بنابراین در تعریف الگوها مورد استفاده قرار نگرفت. در جدول ۳، الگوهای مورد استفاده در پژوهش حاضر برای شبیه-سازی بارش ماهانه ایستگاه مورد مطالعه، ارائه شده است.

جدول ۳- الگوهای تعریف شده در پژوهش حاضر برای شبیه‌سازی بارش ماهانه ایستگاه سینوپتیک نمین

خروجی	متغیرهای ورودی		
Rt			Rt-1
Rt		Tave	Rt-1
Rt	Tmin	Tave	Rt-1

معیارهای ارزیابی مدل

در تحقیق حاضر، به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل‌ها از شاخص آماری ضریب تعیین (R2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و شاخص کارایی نش-ساتکلیف (NSE) مطابق با روابط ۱ تا ۳ استفاده شد.

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^{N}(R_O-\bar{R}_O)(R_M-\bar{R}_M)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(R_O-\bar{R}_O)^2 \sum_{i=1}^{N}(R_M-\bar{R}_M)^2}} \right) \quad (۱)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(R_O - R_M)^2} \quad (۲)$$

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^{N}(R_O-R_M)^2}{\sum_{i=1}^{N}(R_O-\bar{R}_O)^2}\right], -\infty \le NSE \le 1 \quad (۳)$$

در روابط فوق، N تعداد داده‌ها، R_O مقدار بارش اندازه‌گیری شده و R_M مقدار بارش شبیه‌سازی شده توسط مدل در گام زمانی i ام می‌باشد. همچنین $\bar{R}_O$ متوسط مقدار بارش اندازه‌گیری شده می‌باشد.

نتایج و بحث

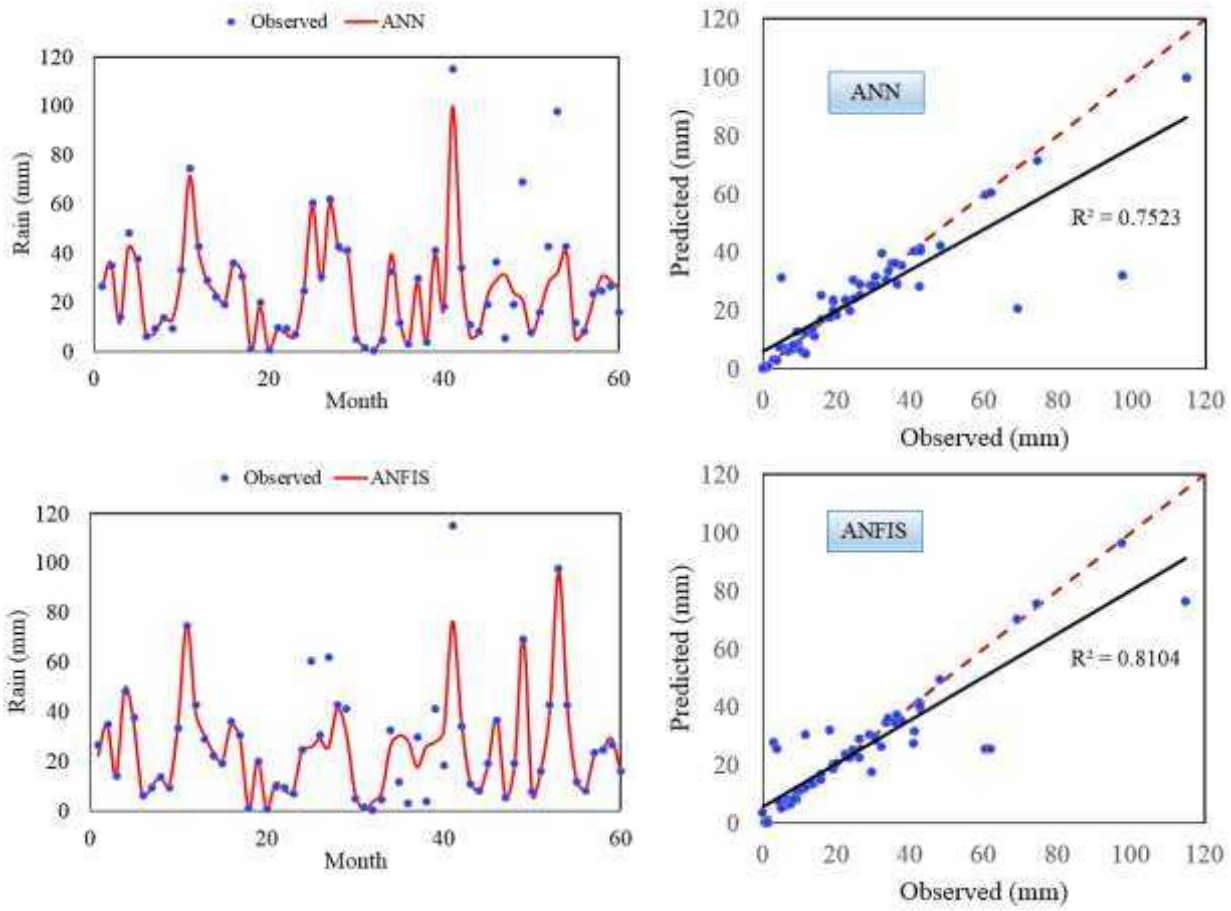
در جدول ۴ عملکرد مدل‌های ANN و ANFIS به‌ازای الگوهای ورودی تعریف شده، مطابق با جدول ۳ در قالب شاخص‌های آماری خطا برای ایستگاه سینوپتیک نمین در دوره تست (صحت‌سنجی) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، عملکرد هر دو مدل به‌ازای الکوی شماره ۱ ضعیف بوده و این موضوع حاکی از آن است که برآورد بارش ماهانه برای ایستگاه مورد مطالعه، صرفاً با استفاده از مقادیر بارش ماه قبل از دقت پایینی برخوردار می‌باشد. از سوی دیگر با اضافه

شدن متغیر دما (دمای میانگین و کمینه) به الگوهای ورودی، دقت مدل‌ها بهبود یافته است. ملاحظه می‌گردد که بهترین عملکرد مدل‌های ANN و ANFIS به‌ازای الگوی شماره ۳ (شامل همه متغیرها) می‌باشد. مقادیر R2، NSE و RMSE برای مدل ANFIS به‌ازای بهترین الگو در مرحله صحت‌سنجی به‌ترتیب برابر ۰/۸۱۰، ۰/۸۰۳ و ۱۰/۲۰۱ میلی‌متر به‌دست آمد. هم‌چنین طبق نتایج، مقادیر مذکور برای مدل ANN به‌ترتیب برابر ۰/۷۵۲، ۰/۷۴۰ و ۱۱/۷۰۷ میلی‌متر به‌دست آمد. با مقایسه نتایج می‌توان دریافت که مدل ANFIS در شبیه‌سازی بارش ماهانه عملکرد نسبتاً بهتری را داشته است. در شکل ۲ نمودارهای پراکندگی حول خط یک‌به‌یک و سری زمانی حاصل از مدل‌های ANN و ANFIS به‌ازای بهترین الگو (الگوی شماره ۳) برای ایستگاه نمین در دوره تست (صحت‌سنجی) نمایش داده شده است. با توجه به شکل مذکور، هرد مدل از لحاظ پراکندگی نقاط حول نیمساز ۴۵ درجه، انطباق مقادیر مشاهداتی و مدل و همچنین تخمین مقادیر پیک، عملکرد قابل قبولی را ارائه داده‌اند. با این حال، مدل ANFIS برتری جزئی نسبت به مدل ANN از خود نشان داده است.

با وجود کارایی قابل قبول مدل‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر، برای بهبود نتایج پیشنهاد می‌شود از تبدیل موجک برای پیش‌پردازش (تجزیه) داده‌ها استفاده شود. ضمناً تأثیر سایر پارامترهای اقلیمی شامل رطوبت نسبی و سرعت باد نیز بر روی آموزش بهتر شبکه بررسی شود.

جدول ۴- نتایج مدل‌های هوشمند مورد استفاده در پژوهش حاضر برای شبیه‌سازی بارش ماهانه ایستگاه نمین به‌ازای الگوهای مختلف

	مدل ANN			مدل ANFIS		
شماره الگو	R2	RMSE	NSE	R2	RMSE	NSE
۱	۰/۳۵۱	۱۵/۶۱۸	۰/۳۴۴	۰/۴۰۹	۱۴/۹۰۴	۰/۳۹۸
۲	۰/۶۸۴	۱۳/۰۴۱	۰/۶۷۷	۰/۷۲۸	۱۲/۷۱۳	۰/۷۱۹
۳	۰/۷۵۲	۱۱/۷۰۷	۰/۷۴۰	۰/۸۱۰	۱۰/۲۰۱	۰/۸۰۳



شکل ۲- تغییرات سری زمانی و پراکندگی مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده بارش ماهانه توسط مدل‌های هوشمند به‌ازای دوره تست

فهرست منابع

فرجی، م.، رضایی، م.، ساری صراف، ب.، و خورشیددوست، ع.م. (۱۴۰۴). داده‌کاوی داده‌های بارش تجمعی ۲۴ ساعته ایران با استفاده از یادگیری ماشین شبکه عصبی پرسپترون چندلایه و درخت تصمیم. مجله اکو هیدرولوژی، ۱۲(۲)، ۸۱۰-۷۹۹.

معروفی، ص.، نوروز ولاشدی، ر.، و گلکار، ف. (۱۳۹۶). مدل‌سازی پیش‌یابی بارش ماهانه در حوضه آبریز بلوچستان جنوبی. فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، ۳۲(۱)، ۱۶۲-۱۴۹.

وکیلی، ش. (۱۳۹۶). پیش‌بینی بارش ماهانه با مدل درختی M5 و مقایسه آن با روش‌های کلاسیک آماری (مطالعه موردی: ایستگاه سینوپتیک ارومیه). مجله تحقیقات منابع آب ایران، ۱۳(۴)، ۱۸۲-۱۷۹.

Kisi, O., Sanikhani, H., Kermani, Z., & Niazi, F. (2015). Long-term monthly evapotranspiration modeling by several data-driven methods without climatic data. Computer and Electronics in Agriculture, 115, 66-77.
Kumar, V., Kedam, N., Kisi, O. et al. (2025). A Comparative Study of Machine Learning Models for Daily and Weekly Rainfall Forecasting. Water Resources Management. 39, 271–290.
Liu, S. and H. Shi. 2019. A recursive approach to long-term prediction of monthly precipitation using genetic programming. Water Resources Management, 33(3): 1103-1121.
Lou, J., W. Lu, Y. Ji & D. Ye. (2016). A comparison of three prediction models for predicting monthly precipitation in Liaoyuan city, China. Water Science and Technology, 16(3), 845-854.
Sofian, I.M., A.K. Afandi, I. Iskandar & Y. Apriani. (2018). Monthly rainfall prediction based on artificial neural networks with backpropagation and radial basis function. International Journal of Advances in Intelligent Informatics, 4(2), 154-166.

Simulation of monthly rainfall of Namin synoptic station using intelligent models

Mohammad Reza Nikpour1*

1* Associate Professor, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
E-mail: m_nikpour@uma.ac.ir

Abstract
Monthly rainfall values are considered one of the main input data to hydrological systems, and its accurate prediction is important in runoff and groundwater studies. In recent years, intelligent models have been widely used in simulating hydrological phenomena. In the present study, artificial neural network (ANN) and adaptive neural fuzzy inference system (ANFIS) models were used to simulate monthly rainfall at Namin synoptic station. Based on the available data, monthly rainfall values were used for the statistical period of 2008-2024. For short-term simulation of monthly rainfall (one month later), three different models were defined based on the rainfall delay and average and minimum temperature parameters. To evaluate the model results, the statistical indices were used including, the coefficient of determination (R2), root mean square error (RMSE), and Nash-Sutcliffe efficiency index (NSE). The results of the study indicated a better performance of the ANFIS model compared to the ANN model. So that the R2, NSE and RMSE values for the ANFIS model for the best model in the validation stage were 0.810, 0.803 and 10.201mm, respectively.

Keywords: ANN, ANFIS, Monthly rainfall, Namin synoptic station.

تحلیل دینامیکی – همدیدی تشکیل، تداوم و تکامل رخدادهای شاخص گرد و غبار برون مرزی و درون مرزی در نیمه غربی ایران

پریسا سهرابی پیردوستی[۱]، حسن ذوالفقاری[۲]

۱- دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، گروه جغرافیا، دانشکده ی ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه رازی، کرمانشاه
۲- دانشیار آب و هواشناسی، گروه جغرافیا، دانشکده ی ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه رازی، کرمانشاه
آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول: Parisasohrabi92@gmail.com

چکیده

این پژوهش با هدف تحلیل ویژگی‌های سینوپتیکی و دینامیکی رخدادهای گردوغباری شاخص در سال‌های ۲۰۱۱، ۲۰۱۲ و ۲۰۱۶ در نیمه ی غربی ایران انجام شد. بدین منظور از داده‌های بازتحلیل NCEP/NCAR شامل فشار سطح زمین، ارتفاع ژئوپتانسیل و باد استفاده گردید و نقشه‌های همدیدی در قالب سه ترکیب تحلیلی برای هر رخداد در مراحل آغاز، اوج و فروکش با کمک نرم‌افزار GrADS ترسیم شد. نتایج نشان داد سه رخداد دارای ساختار سه‌سطحی مشترک هستند. رخداد ۲۰۱۱ با تثبیت الگوی بلوکینگ اُمگایی و هم‌پوشانی پایدار لایه‌ها، طولانی‌ترین و شدیدترین، رخداد ۲۰۱۲ اگرچه از الگوی مشابه پیروی می کند، اما با اوج ثانویه ای ناشی از منابع محلی (هورالعظیم و دشت خوزستان) همراه بود که اهمیت منابع داخلی را برجسته ساخت. رخداد ۲۰۱۶ با وجود سازوکار مشابه، به دلیل پایداری مکانی و زمانی کمتر، شدت و مدت کوتاه‌تری داشت. مقایسهٔ رخدادها نشان می دهد در مرحلهٔ آغاز، گرادیان فشار سطحی و ناپایداری پایین‌لایه نقش کلیدی دارند؛ در اوج، آدوکسیون تاوایی مثبت و واگرایی فوقانی شدت پدیده را تعیین می‌کنند؛ در فروکش، کاهش تاوایی میانی و افت شیب فشاری موجب تضعیف سامانه می‌شود. یافته‌ها بیانگر آن است که هم‌پوشانی زمانی–مکانی متغیرها، همراه با نقش فزاینده منابع داخلی، عامل اصلی تفاوت میان رخدادهاست.

کلید واژه‌ها: گرد و غبار، تحلیل سینوپتیکی – دینامیکی، بلوکینگ امگایی، تاوایی مثبت، نیمه ی غربی ایران.

۱- مقدمه

گردوغبار یکی از چالش‌های مهم زیست‌محیطی و اقلیمی در غرب آسیا و به‌ویژه ایران است که اثرات گسترده‌ای بر سلامت انسان، کشاورزی، صنعت، کاهش دید افقی و سامانه‌های حمل‌ونقل برجای می‌گذارد (Goudie, 2014; Middleton, 2017)

. در دهه‌های اخیر، افزایش فراوانی و شدت رخدادهای گردوغبار در غرب و جنوب‌غرب ایران، اهمیت شناخت سازوکارهای جوّی و منابع مؤثر بر آن را دوچندان کرده است. (Hamidi et al,2013 ، بروجنی، ۱۴۰۱)

اگرچه مطالعات متعددی به بررسی ویژگی‌های گردوغبار در ایران و کشورهای همسایه پرداخته‌اند (فرحبخش و همکاران ، ۱۳۹۳، Notaro et al, 2013)، اما بخش عمده‌ای از آن‌ها بیشتر بر شناسایی منابع گردوغبار یا تحلیل همدیدی پدیده در یک لایه جو متمرکز بوده و معمولاً به متغیرهایی مانند فشار و ارتفاع در روز وقوع رخداد بسنده کرده‌اند. برای نمونه، زززولی و همکاران (۱۳۹۳) با استفاده از داده‌های فشار سطحی و ارتفاع ژئوپتانسیل، رخدادهای گردوغبار غرب ایران را در یک تراز میانی تحلیل کرده‌اند؛ و میری (۱۳۹۰) تنها با تمرکز بر مشاهده ایستگاهی و داده‌های سطح زمین، نقش منابع خارجی را در شکل‌گیری گردوغبار بررسی کرده است. این در حالی است که پژوهش حاضر با تحلیل همزمان چندین تراز جو، بر ترکیب منابع داخلی و خارجی و سازوکارهای دینامیکی–همدیدی تأکید دارد. همچنین، در بسیاری از پژوهش‌ها سهم منابع داخلی ایران—به‌ویژه دشت خوزستان و تالاب خشک‌شده‌ی هورالعظیم—کمتر در کنار منابع خارجی مانند بیابان‌های عراق و سوریه بررسی شده است .(Alizadeh-Choobari et al ,2014) درک کامل از چگونگی شکل‌گیری، انتقال و تداوم گردوغبار نیازمند تحلیل هم‌زمان متغیرهای همدیدی و دینامیکی در چندین تراز جو و در بستر چرخه‌ی کامل پدیده است . (Prospero et al 2002)

پژوهش حاضر با رویکردی تلفیقی، سه رخداد شاخص گردوغبار در سال‌های ۲۰۱۱، ۲۰۱۲ و ۲۰۱۶ را به‌عنوان نمونه‌های مرجع انتخاب کرده و آن‌ها را از مرحله‌ی آغاز تا اوج و فروکش تحلیل کرده است. در این چارچوب، علاوه بر توجه به منابع داخلی و خارجی، اهمیت نسبی متغیرهای کلیدی همچون گرادیان فشار سطحی و بادهای نزدیک به سطح، آدکسیون تاوایی در لایه میانی و واگرایی ناشی از رودباد در لایه بالایی ارزیابی شده است. این مطالعه با رویکرد مرحله‌ای و چندلایه، تلاش می‌کند شکاف موجود در تحلیل رخدادهای گردوغبار نیمه ی غربی ایران را پر کند و تصویری جامع‌تر از شرایط حاکم بر طوفان‌های گردوغبار ارائه دهد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، نیمه غربی ایران شامل استان‌های کرمانشاه، کردستان، ایلام، خوزستان، بوشهر و لرستان است. این محدوده در گستره‌ای میان عرض‌های ۲۶ تا ۳۷ درجه شمالی و طول‌های ۴۵ تا ۵۳ درجه شرقی واقع شده و مساحتی بالغ بر ۳۸۷٬۳۱۰ کیلومتر مربع، معادل ٪۱۱٫۴۵ از وسعت کشور را در بر می‌گیرد. جمعیتی در حدود ۱۱٬۷۷۰٬۱۶۱ نفر در این منطقه سکونت دارند. موقعیت جغرافیایی، ساختار توپوگرافی و قرارگیری در مجاورت کانون‌های

تولید گرد و غبار در داخل و خارج از کشور، این منطقه را به یکی از مناطق مستعد وقوع پدیده‌های گرد و غبار در ایران تبدیل کرده است (بروجنی، ۱۴۰۱; زولی و همکاران، ۱۳۹۳).

۲-۲- داده‌های مورد استفاده

جهت تحلیل جامع رخدادهای گرد و غبار، از سه گروه داده‌ی مکمل بهره‌گیری شد:

داده‌های ایستگاهی سازمان هواشناسی کشور شامل پارامترهایی چون دید افقی، سرعت و جهت باد و سایر عناصر همدیدی که به‌منظور شناسایی رخدادهای گرد و غبار به‌کار گرفته شد (فرحبخش و همکاران، ۱۳۹۳).

داده‌های پایش آلودگی هوا از ایستگاه‌های محیط زیست که اطلاعات مربوط به غلظت ذرات معلق (PM10) را دربر دارد و برای اعتبارسنجی رخدادهای انتخابی استفاده شد.

داده‌های بازتحلیل مرکز ملی پیش‌بینی محیطی و مرکز ملی اقلیم‌شناسی آمریکا (NCEP/NCAR) شامل فشار سطح دریا، ارتفاع ژئوپتانسیل و مؤلفه‌های باد در ترازهای مختلف جوی، که برای تحلیل دینامیکی و ترسیم نقشه‌های همدیدی به کار رفت. (Alizadeh-Choobari et al, 2014; Hamidi et al, 2013)

۲-۳- انتخاب رخدادها

با استفاده از داده‌های دید افقی در ایستگاه‌های منتخب، رخدادهایی شناسایی شدند که در آن‌ها کاهش دید به کمتر از ۱۰۰۰ متر و تداوم پدیده به بیش از ۲۴ ساعت در دست‌کم سه ایستگاه مجاور ثبت شده بود. در ادامه، با تطبیق این رخدادها با داده‌های غلظت PM10 ، سه طوفان گرد و غبار فراگیر به‌عنوان رخدادهای شاخص انتخاب گردید: (۴–۱) ژوئن ۲۰۱۱، (۲۶–۲۱) مه ۲۰۱۲ و (۱۸–۱۵) ژوئن ۲۰۱۶ . انتخاب این رخدادها بر پایه شدت، وسعت جغرافیایی و قابلیت تحلیل دینامیکی آن‌ها صورت گرفت و از برجسته‌ترین پدیده‌های ثبت‌شده طی دهه اخیر محسوب می‌شوند.

۲-۴- روش تحلیل همدیدی و دینامیکی

به‌منظور بررسی ساختارهای سینوپتیکی و شرایط دینامیکی حاکم بر رخدادهای گرد و غبار انتخاب‌شده، داده‌های بازتحلیل مرکز NCEP/NCAR در سطوح مختلف جو شامل فشار سطح دریا، ارتفاع ژئوپتانسیل، مؤلفه‌های باد مداری و نصف‌النهاری استخراج گردید و با استفاده از نرم‌افزار GrADS پردازش شد. این داده‌ها در قالب نقشه‌های همدیدی چندلایه به‌گونه‌ای ترکیب شدند که بتوانند نمای جامعی از شرایط هم‌زمان لایه‌های مختلف جو ارائه دهند و ضمن کاهش پیچیدگی‌های گرافیکی، تفسیر فرایندهای مؤثر در شکل‌گیری و گسترش گرد و غبار را تسهیل کنند. در همین راستا، سه دسته نقشه‌ی ترکیبی طراحی گردید که هر یک متشکل از سه متغیر کلیدی در لایه‌های مختلف جو هستند و با هدف تحلیل هم‌زمان شرایط پایداری، واگرایی بالایی، انتقال افقی و عمودی ذرات گرد و غبار در نظر گرفته شدند (Hamidi et al , 2013;

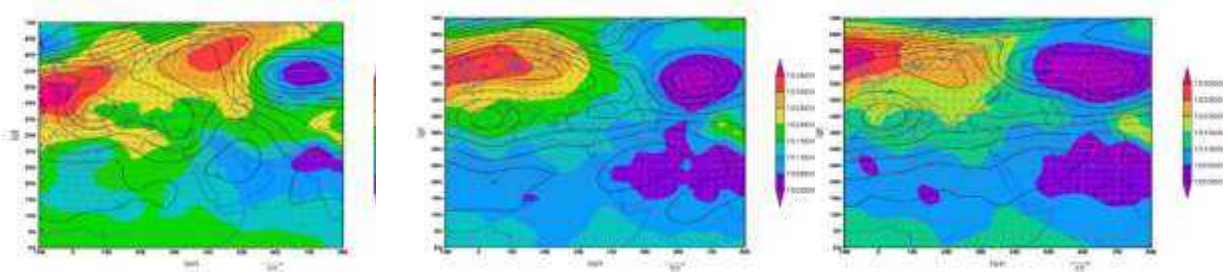
(Middleton, 2017. در ترکیب نخست، متغیرهای فشار سطح دریا به‌صورت پلات رنگی، ارتفاع ژئوپتانسیل در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال به‌صورت کنتور، و بردار باد در تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال نمایش داده شده است. این ترکیب، با تمرکز بر لایه‌های پایین، میانی و بالایی جو، امکان تحلیل الگوهای فشار سطحی، ترافها و ناوه‌های میانی، و همچنین موقعیت و شدت رودبادها را در سطح بالا فراهم می‌سازد و به درک بهتری از تعامل بین دینامیک لایه‌های مختلف جو و فرایند صعود ذرات گرد و غبار کمک می‌کند. در ترکیب دوم و سوم، تلاش شده است با تمرکز بر تاوایی و بادهای سطحی، فرآیندهای ناپایداری و انتقال افقی ذرات در ترازهای پایین‌تر جو بررسی شود. در ترکیب دوم، تاوایی نسبی در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، رودباد در تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال و باد سطحی در ارتفاع ۱۰ متری ترکیب شده‌اند تا شرایط ناپایداری عمودی، واگرایی بالایی و تأثیر آن‌ها بر خیزش گرد و غبار از سطح زمین تحلیل گردد. در ترکیب سوم، که بر ترازهای پایین‌تر تمرکز دارد، تاوایی در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال در کنار رودباد ۳۰۰ هکتوپاسکال و باد سطحی ۱۰ متری ترسیم شده است تا تحلیل دقیق‌تری از شرایط انتقال افقی و جابه‌جایی توده‌های گرد و غبار در مجاورت سطح زمین ارائه شود. بهره‌گیری از این ترکیب‌های هدفمند ضمن حفظ دقت علمی، امکان تحلیل یکپارچه‌ی سازوکارهای افقی و عمودی گرد و غبار در شرایط همدیدی مختلف را فراهم ساخته و در شناسایی مناطق مستعد تولید، تشدید و انتقال غبار نقش مؤثری ایفا می‌کند (Goudie, 2014; Notaro et al, 2013). در این پژوهش رخداد (۴-۱) ژوئن ۲۰۱۱ به عنوان رخداد مرجع انتخاب گردیده و به‌دلیل بررسی تفصیلی آن، رخداد (۲۶-۲۱) مه ۲۰۱۲ و (۱۸ -۱۵) ژوئن ۲۰۱۶ به‌شکل فشرده‌تر اما با تأکید بر نکات کلیدی سینوپتیکی–دینامیکی و تمایز رخدادها ارائه می‌شود.

۳- نتایج

۳-۱- رخداد مرجع: گرد و غبار (۱-۴) ژوئن ۲۰۱۱

۳-۱-۱- ترکیب متغیرهای فشار سطحی، ارتفاع ژئوپتانسیل ۵۰۰hpa و بردار باد ۳۰۰ hpa (ترکیب اول)

این رویداد با شکل‌گیری گرادیان فشار سطحی قابل‌توجه بر فراز غرب عراق و نواحی مرزی سوریه در ۱ ژوئن آغاز شد. در همان روز (شکل ۱-الف)، شکل‌گیری کم‌فشار حرارتی عمیق بر روی شبه‌جزیره ی عربستان همراه با زبانه ی پرفشار مدیترانه‌ای در شمال‌غرب، گرادیان فشار شدیدی را در راستای شمال–جنوب برقرار کرد که بادهای غربی و جنوب‌غربی



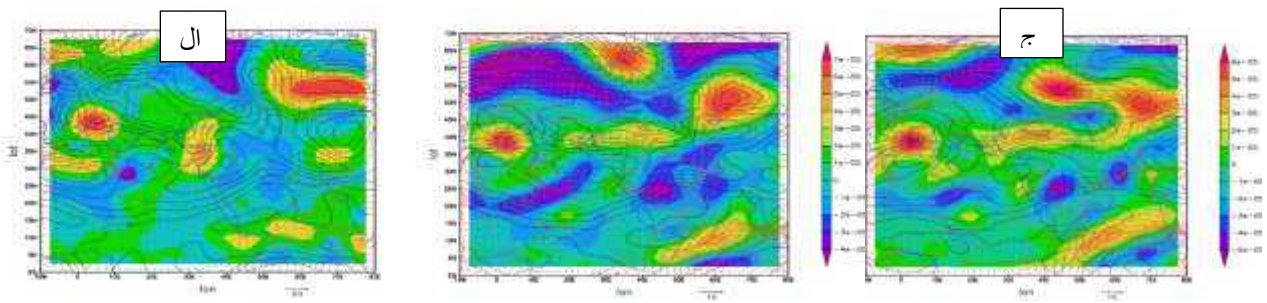
ال ب ج

سطح زمین را تقویت نمود و لیفت اولیه ی ذرات گردوغبار را ممکن ساخت. هم‌زمان، ناوه‌ای کم‌عمق در تراز(۸۵۰ hPa) با آدکسیون تاوایی مثبت (جابه‌جایی و ورود مقادیر بالای چرخندگی به منطقه، که باعث تشدید صعود میانی می‌شود) در بخش جلویی خود، صعود میان‌تراز را افزایش داد. در لایه ی فوقانی نیز رودباد غربی در تراز(۳۰۰ hPa) با واگرایی در ناحیه ی خروجی چپ خود، مکش دینامیکی لازم برای همگرایی سطحی و تقویت لیفت را ایجاد کرد. در اوج سامانه (۳ ژوئن؛ شکل ۱-ب)، تعمیق کم‌فشار سطح زمین و جابه‌جایی مرکز آن به جنوب‌شرق عراق موجب موازی‌شدن جریان باد در سطح و در تراز(۸۵۰ hPa) شد که بیانگر کانالیزه‌شدن جریان در یک محور مشخص بود و باعث تمرکز انتقال ذرات گردوغبار گردید. این وضعیت تحت تأثیر تراف جنب‌حاره‌ای مدیترانه‌ای و الگوی بلوکینگ اُمگایی در عرض‌های بالا تثبیت شد و رودباد ۳۰۰ هکتوپاسکال با واگرایی قوی، تداوم صعود و بیشترین شدت گردوغبار را رقم زد. در مرحله ی فروکش (۴ ژوئن؛ شکل ۱-ج)، کاهش شیب فشاری، عقب‌نشینی زبانه ی پرفشار مدیترانه‌ای و جابه‌جایی ناوه به شرق، منجر به افت تدریجی شدت بادهای سطحی، کاهش واگرایی فوقانی و ضعیف‌شدن صعود میانی شد و در نهایت غلظت ذرات و انتقال آنها به‌تدریج کاهش یافت.

شکل ۱- تحلیل همدیدی رخداد گرد و غبار در بازه ۱ تا ۴ ژوئن ۲۰۱۱ بر اساس فشار سطحی، ارتفاع ژئوپتانسیل(hPa ۵۰۰) و باد تراز بالایی (۳۰۰ hPa)در سه مرحله زمانی:الف ۱ژوئن(شروع رخداد)- ب ۳ ژوئن(اوج رخداد)- ج ۴ژوئن(فروکش رخداد)

۲-۱-۳- ترکیب متغیرهای تاوایی نسبی ۵۰۰hpa، رودباد ۳۰۰hpa و باد سطحی(ترکیب دوم)

این ترکیب نقش لایه‌های میانی و فوقانی را در رخداد ۲۰۱۱ پررنگ‌تر نشان می‌دهد. در آغاز (۱ ژوئن؛ شکل ۲-الف)، ناوه ی مدیترانه‌ای با نفوذ به شرق، هسته‌های مثبت تاوایی را بر فراز عراق و سوریه مستقر ساخت .آدکسیون تاوایی مثبت در جلوی ناوه موجب تشدید صعود میان‌تراز (مطابق معادله ی QG)گردید و رودباد فعال در جناح شرقی ناوه واگرایی قابل توجهی در لایه‌های فوقانی ایجاد کرد. در سطح زمین نیز بادهای شمال‌غربی، ذرات را از بیابان‌های عراق و سوریه و بخشی



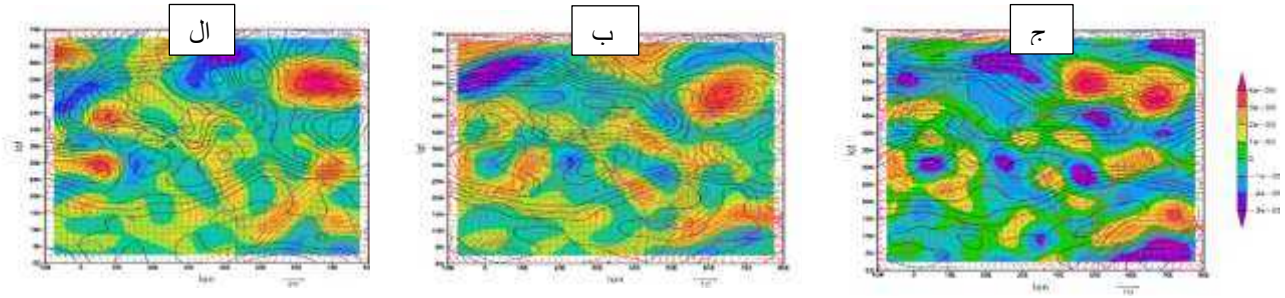
از خوزستان به حرکت درآوردند. در اوج رخداد (۳ ژوئن؛ شکل ۲-ب)، هم‌پوشانی سه عامل—تاوایی مثبت قوی، واگرایی

شدید در لایه ی فوقانی و انسجام بادهای سطحی—انتقال سازمان‌یافته ی ذرات به شرق ایران را رقم زد. در مرحله ی فروکش (۴ ژوئن؛ شکل ۲-ج)، با کاهش تاوایی میانی، تضعیف واگرایی فوقانی و افت سرعت بادهای سطحی، انتقال ذرات به‌طور کامل متوقف شد و پدیده فروکش کرد.

شکل ۲- تحلیل همدیدی رخداد گرد و غبار در بازه ۱ تا ۴ ژوئن ۲۰۱۱ بر اساس تاوایی ۵۰۰ hPa، رودباد ۳۰۰ hPa و باد سطحی در سه مرحله زمانی:الف ۱ ژوئن(شروع رخداد)- ب ۳ ژوئن (اوج رخداد)- ج ۴ژوئن (فروکش رخداد)

۳-۱-۳- ترکیب متغیرهای تاوایی نسبی ۸۵۰hpa، رودباد ۳۰۰hpa و باد سطحی(ترکیب سوم)

در این ترکیب، نقش ناپایداری پایین‌لایه و منابع محلی برجسته‌تر است. در روز آغاز (۱ ژوئن؛ شکل ۳-الف)، هسته‌های مثبت تاوایی در تراز ۸۵۰ hPa بر فراز بیابان‌های غرب عراق و شرق سوریه و نیز بخش‌هایی از هورالعظیم در جنوب‌غرب ایران مشاهده شدند. این هسته‌ها هم‌زمان با جریان بادهای سطحی منظم، شرایط مناسب برای لیفت اولیه ی ذرات را ایجاد کردند که توسط رودباد و واگرایی فوقانی پشتیبانی شد. در اوج پدیده (۳ ژوئن؛ شکل ۳-ب)، در اوج پدیده، تمرکز هسته‌های تاوایی ۸۵۰ و شدت بالای باد سطحی بر روی منابع خارجی (عراق، سوریه) در کنار منابع داخلی (هورالعظیم)، ساختار سه‌لایه ی کلاسیک(پایین، میانی و فوقانی) سامانه ی گردوغبارزای بالغ را ایجاد نمود. در این ساختار، بادهای سطحی قوی



لیفت اولیه ی ذرات را فراهم کرده، ناوهٔ میانی با تاوایی مثبت صعود را سازمان داده و رودباد بالایی با واگرایی شدید، تداوم و گسترش انتقال را تضمین نمود. این آرایش سه‌سطحی، انتقال گسترده و ماندگاری گردوغبار را تضمین کرد. در روز فروکش (۴ ژوئن؛ شکل ۳-ج)، کاهش تاوایی پایین‌لایه و افت سرعت باد سطحی موجب توقف انتقال و فروکش کامل پدیده شد.

شکل ۳- تحلیل همدیدی رخداد گرد و غبار در بازه ۱ تا ۴ ژوئن ۲۰۱۱ بر اساس تاوایی۸۵۰ hPa، رودباد ۳۰۰ hPa و باد سطحی در سه مرحله زمانی:الف ۱ ژوئن(شروع رخداد)- ب ۳ ژوئن (اوج رخداد)- ج ۴ ژوئن (فروکش رخداد)

۴-۱-۳- جمع‌بندی رخداد مرجع

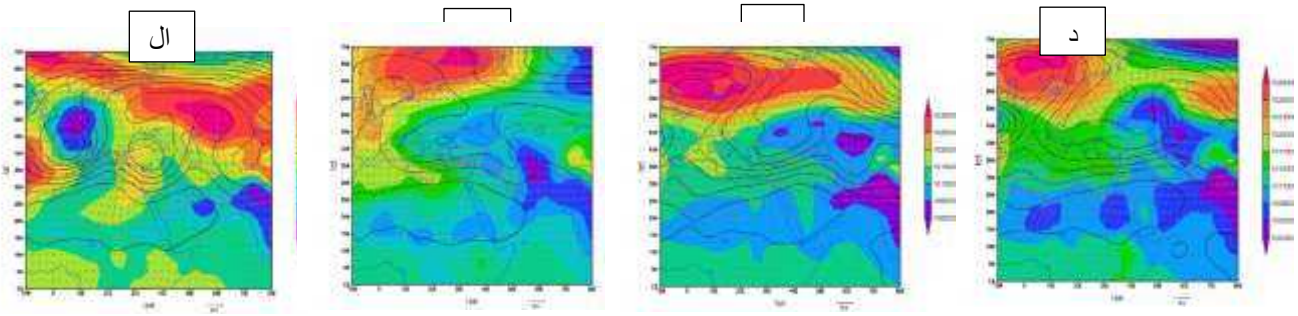
رخداد ژوئن ۲۰۱۱ نمونه‌ای کامل از یک سامانه ی چندلایهی گردوغبار بود؛ سامانه‌ای که در آن ناپایداری پایین، میانی و بالایی جو همراه با گرادیان فشار سطحی قوی و شرایط بلوکینگ در عرض‌های بالا نقش داشتند. این همان ساختار سه‌لایه

ی کلاسیک است: در سطح زمین گرادیان فشار و بادهای قوی موجب خیزش اولیه ی ذرات می‌شوند، در لایه میانی(hPa ۵۰۰) ناوه و آدکسیون تاوایی مثبت صعود را سازمان می‌دهند، و در لایه بالایی (hPa ۳۰۰) رودباد با واگرایی خود به تداوم و گسترش انتقال کمک می‌کند. منابع خارجی (عراق و سوریه) سهم اصلی در تولید گردوغبار داشتند و منابع داخلی (هورالعظیم/خوزستان) نقش تقویتی ایفا کردند مشابه یافته‌های . (Alizadeh-Choobari et al, 2014; Hamidi et al, 2013) شدت و مدت چهارروزه ی پدیده—به‌ویژه اوج طولانی در سوم ژوئن—این رخداد را از رخدادهای بعدی متمایز و به رخداد مرجع برای مقایسه تبدیل کرد. تثبیت این شرایط تحت تأثیر بلوکینگ اُمگایی در عرض‌های میانی–بالا بود که با کندکردن جابه‌جایی ناوه ی مدیترانه‌ای، پایداری زمانی رخداد را تضمین کرد.

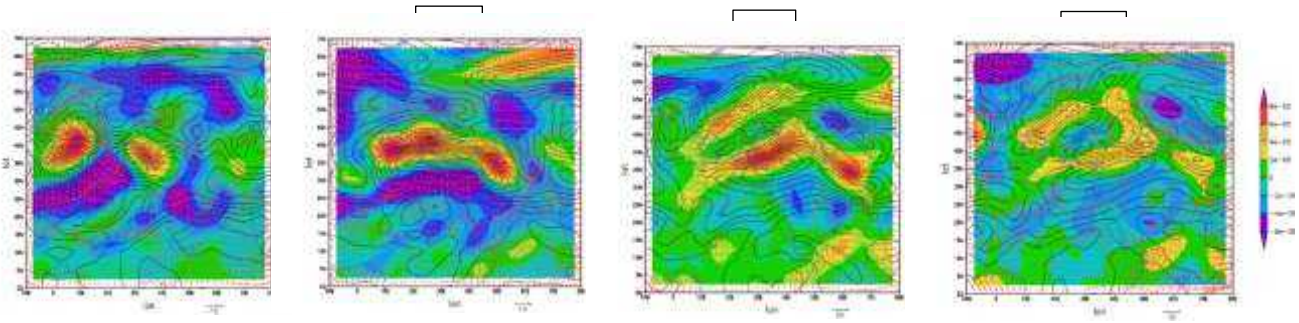
۲-۳- رخداد گرد و غبار (۲۶ –۲۱) مه ۲۰۱۲

رخداد مه ۲۰۱۲ در کلیت، همانند رخداد مرجع (۲۰۱۱) ساختاری سه‌سطحی داشت، به‌گونه‌ای که در هر سه ترکیب (شکل‌های ۴ تا ۶) تقویت گرادیان فشار سطحی، حضور ناوه ی میانی با تاوایی مثبت و واگرایی جت hPa ۳۰۰ نقش اصلی در آغاز و اوج سامانه ایفا کردند. در روز آغاز (۲۱ مه؛ شکل‌های ۴-الف، ۵-الف و ۶-الف)، شرایط مشابه ۲۰۱۱ برقرار بود. گرادیان فشار سطحی و ناپایداری پایین‌لایه لیفت اولیه را فعال کردند. در اوج پدیده (۲۳ مه؛ شکل‌های ۴-ب، ۵-ب و ۶-ب)، بیشینه ی تاوایی مثبت میانی، واگرایی شدید لایه فوقانی و انسجام باد سطحی هم‌پوشانی کامل ایجاد کرده و انتقال گسترده‌ای را سبب شدند. ؛ الگویی که تقریباً همسان با رخداد ژوئن ۲۰۱۱ بود. تفاوت اصلی این رخداد، بروز اوج ثانویه در ۲۵ مه بود در اوج ثانویه ۲۵ مه ۲۰۱۲، برخلاف اوج اصلی، شدت تاوایی میانی و واگرایی فوقانی کاهش یافت و هم‌پوشانی سه‌سطحی تضعیف شد. با این حال، نقشه‌های همدیدی(شکل‌های ۴-ج، ۵-ج و ۶-ج) نشان می دهند که بادهای سطحی شدید و فشردگی ایزوبارها همچنین تمرکز هسته‌های مثبت تاوایی در تراز ۸۵۰ بر فراز جنوب‌غرب ایران (هورالعظیم و دشت خوزستان) موجب بلند شدن مجدد ذرات گردوغبار از منابع داخلی گردید. بنابراین، این اوج ثانویه بیش از آنکه ناشی از محرک‌های بزرگ‌مقیاس باشد، تحت تأثیر بازفعال‌سازی منابع محلی شکل گرفت. این ویژگی بیانگر اهمیت منابع داخلی

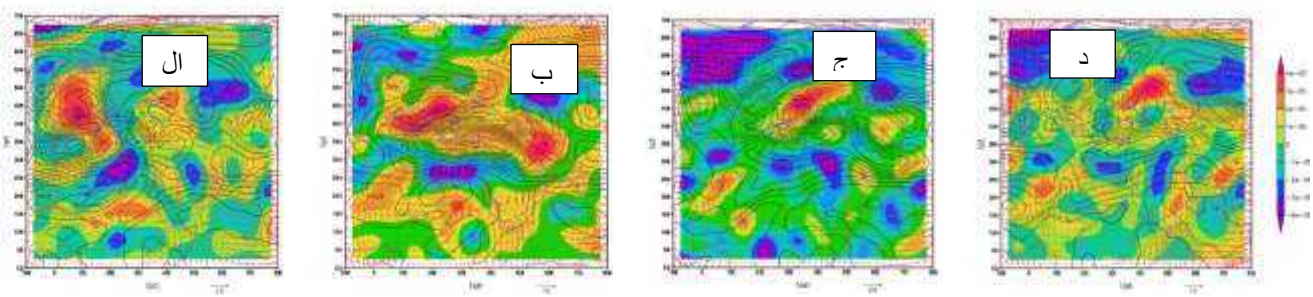
به‌عنوان عامل بازفعال‌سازی سامان حتی پس از تضعیف محرک‌های بزرگ‌مقیاس است(ززولی و همکاران، ۱۳۹۳) در نهایت، در ۲۶ مه (شکل‌های ۴-د، ۵-د و ۶-د)، با تضعیف گرادیان سطحی و کاهش تاوایی میانی، رخداد به‌طور کامل فروکش کرد.



شکل ۴- تحلیل همدیدی رخداد گرد و غبار در بازه ۲۶ -۲۱ مه ۲۰۱۲ بر اساس فشار سطحی، ارتفاع ژئوپتانسیل(hPa ۵۰۰) و باد (hPa ۳۰۰)در چهار مرحله زمانی:الف ۲۱ مه(شروع رخداد)- ب ۲۳ مه(اوج رخداد)- ج ۲۵ مه(اوج ثانویه) – د ۲۶ مه (فروکش رخداد)



شکل ۵- تحلیل همدیدی رخداد گرد و غبار در بازه ۲۶ -۲۱ مه ۲۰۱۲ بر اساس تاوایی hPa ۵۰۰ ، رودباد hPa ۳۰۰ و باد سطحی در چهار مرحله زمانی: الف ۲۱ مه(شروع رخداد)- ب ۲۳ مه(اوج رخداد)- ج ۲۵ مه(اوج ثانویه) – د ۲۶ مه (فروکش رخداد)

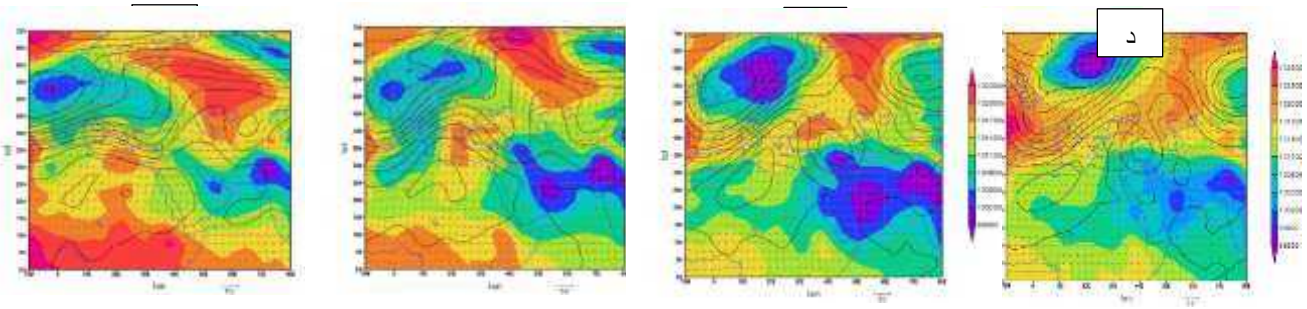


شکل ۶- تحلیل همدیدی رخداد گرد و غبار در بازه ۱ تا ۴ ژوئن ۲۰۱۱ بر اساس تاوایی۸۵۰ hPa، رودباد ۳۰۰ hPa و باد سطحی در چهار مرحله زمانی: الف ۲۱ مه(شروع رخداد)- ب ۲۳ مه(اوج رخداد)- ج ۲۵ مه(اوج ثانویه) – د ۲۶ مه (فروکش رخداد)

۳-۳- رخداد گرد و غبار (۱۸- ۱۵) ژوئن ۲۰۱۶

رخداد ژوئن ۲۰۱۶ نیز همانند دو رخداد پیشین، در هر سه ترکیب نقشه (شکل‌های ۷ تا ۹) الگوی سه‌سطحی شامل گرادیان فشار سطحی، ناوه ی میانی با تاوایی مثبت و واگرایی جت فوقانی را نشان داد در روز آغاز (۱۵ ژوئن؛ شکل‌های ۷-الف، ۸-الف و ۹-الف)، گرادیان فشار سطحی ملایم، ناوه ی کم‌عمق ۵۰۰ hPa و جت‌استریم ضعیف . شرایط اولیه برای لیفت ذرات را فراهم کردند. در اوج رخداد (۱۶ ژوئن؛ شکل‌های ۷-ب، ۸-ب و ۹-ب)، بیشینه ی تاوایی مثبت، تمرکز ناوه ی میانی و قرارگیری ناحیه خروجی جت مستقیماً بر فراز غرب عراق با بادهای سطحی منظم هم‌زمان شد و صعود سازمان‌یافته

و انتقال گسترده‌ای را ایجاد کرد. برخلاف ۲۰۱۱ و ۲۰۱۲، در این رخداد از ۱۷ ژوئن به بعد (شکل‌های ۷-ج، ۸-ج و ۹-ج)، جابه‌جایی محور جت و کاهش همپوشانی عمودی لایه‌ها موجب افت سریع انتقال گردوغبار شد و نهایتاً در ۱۸ ژوئن (شکل‌های ۷-د، ۸-د و ۹-د) پدیده به‌طور کامل فروکش کرد. بنابراین ویژگی بارز ۲۰۱۶ در مقایسه با رخدادهای پیشین،

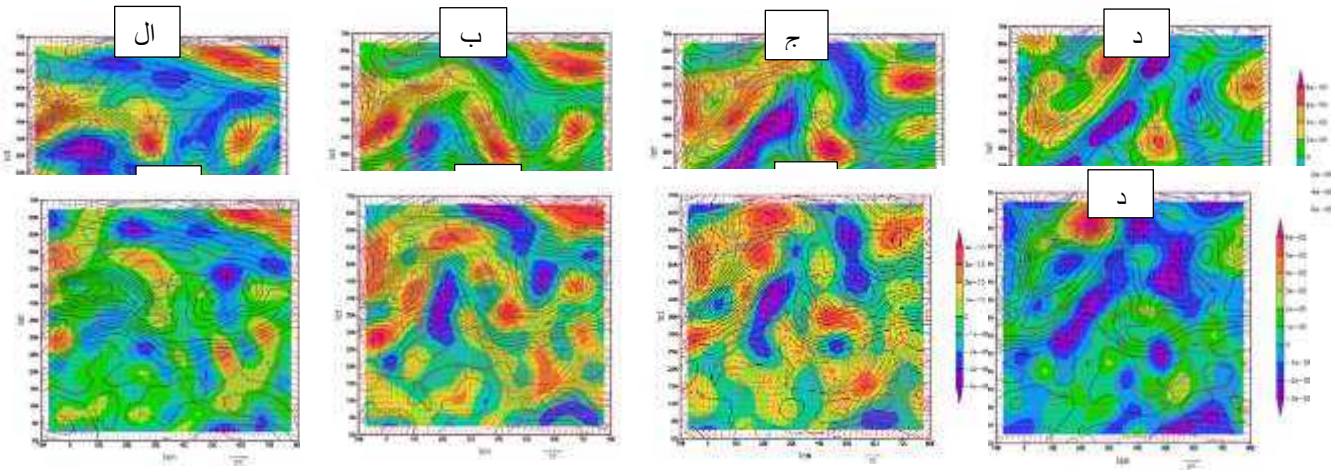


شدت کمتر و کوتاه‌بودن فاز اوج به‌علت ناپایداری مکانی–زمانی هم‌پوشانی لایه‌ها بود. این الگو مشابه تحلیل‌های جهانی تأثیر گرادیان فشار و رودبادها بر انتقال گردوغبار است.(Goudie ,2014; Notaro et al, 2013)

شکل ۷- تحلیل همدیدی رخداد گرد و غبار در بازه ۱۸ -۱۵ ژوئن ۲۰۱۶ بر اساس فشار سطحی، ارتفاع ژئوپتانسیل(hPa ۵۰۰) و باد تراز بالایی (hPa ۳۰۰)در چهار مرحله زمانی:الف ۱۵ ژوئن(شروع رخداد)- ب ۱۶ ژوئن(اوج رخداد)- ج ۱۷ ژوئن(جابجایی محور جت) – د ۱۸ ژوئن (فروکش رخداد)

شکل ۸- تحلیل همدیدی رخداد گرد و غبار در بازه ۱۸ -۱۵ ژوئن ۲۰۱۶ بر اساس تاوایی hPa ۵۰۰ ، رودباد hPa ۳۰۰ و باد سطحی در چهار مرحله زمانی: الف ۱۵ ژوئن(شروع رخداد)- ب ۱۶ ژوئن(اوج رخداد)- ج ۱۷ ژوئن(جابجایی محور جت) – د ۱۸ ژوئن (فروکش رخداد)

شکل ۹- تحلیل همدیدی رخداد گرد و غبار در بازه ۱۸ -۱۵ ژوئن ۲۰۱۶ بر اساس تاوایی hPa ۸۵۰، رودباد hPa ۳۰۰ و



باد سطحی در چهار مرحله زمانی: : الف ۱۵ ژوئن(شروع رخداد)- ب ۱۶ ژوئن(اوج رخداد)- ج ۱۷ ژوئن(جابجایی محور جت) – د ۱۸ ژوئن (فروکش رخداد)

۴- جمع بندی و تطبیق نتایج سه رخداد شاخص گرد و غباری مورد مطالعه

پس از تحلیل تفصیلی سه رخداد شاخص گردوغبار در سال‌های ۲۰۱۱، ۲۰۱۲ و ۲۰۱۶، می‌توان برآیند نتایج را در دو سطح بررسی کرد: نخست مقایسه ی ویژگی‌های عمومی هر رخداد و سپس ارزیابی نقش متغیرهای دینامیکی و سینوپتیکی در مراحل آغاز، اوج و فروکش.

از نظر ساختاری، بررسی سه رخداد گردوغبار نشان داد که اگرچه همهی رخدادها دارای الگوی سه‌سطحی مشترک بودند (گرادیان فشار سطحی، ناوه ی میانی با تاوایی مثبت، و واگرایی جت در لایه ی فوقانی)، اما تفاوت‌های مهمی در پایداری زمانی و مکانی هم‌پوشانی سه‌لایه‌ای، شدت، و نقش منابع محلی و خارجی مشاهده شد. به‌طور خاص، پایداری بلوکینگ

اُمگایی در ۲۰۱۱، بازفعال‌سازی منابع محلی در ۲۰۱۲ و ناپایداری کوتاه‌مدت لایه‌ها در ۲۰۱۶ عامل اصلی تفاوت میان رخدادها بوده است.

از نظر منابع، بیابان‌های عراق و سوریه در هر سه رخداد نقش اصلی را داشتند؛ اما در ۲۰۱۲ و ۲۰۱۶ سهم منابع داخلی جنوب‌غرب ایران پررنگ‌تر شد و در شرایط ضعف محرک‌های بزرگ‌مقیاس به‌عنوان عامل تقویتی و بازفعال‌سازی عمل کردند. این روند نشان می‌دهد که سهم منابع داخلی در سال‌های اخیر در مقایسه با رخدادهای گذشته افزایش یافته است . (Prospero et al, 2002).

جدول (۱) ویژگی‌های سینوپتیکی هر رخداد را مقایسه می‌کند. همان‌طور که دیده می‌شود، رخداد ۲۰۱۱ با طولانی‌ترین مدت و بیشترین شدت شناخته می‌شود؛ رخداد ۲۰۱۲ علاوه بر اوج اصلی، دارای یک اوج ثانویه ناشی از منابع داخلی (هورالعظیم و خوزستان) بود؛ و رخداد ۲۰۱۶ به دلیل هم‌پوشانی ناپایدار لایه‌ها، کوتاه‌ترین و کم‌دامنه‌ترین رخداد به شمار می‌آید. این نتایج نشان می‌دهد که با گذر زمان نقش منابع داخلی نسبت به خارجی پررنگ‌تر شده است. .

جدول ۱- مقایسه ویژگی‌های سینوپتیکی رخدادهای شاخص گردوغبار در مراحل آغاز، اوج و فروکش

رخداد	مدت	آغاز	اوج	فروکش	منابع	ویژگی بارز
۲۰۱۱ (رخداد مرجع)	۴-۱ ژوئن	کم‌فشار حرارتی عربستان + زبانه ی پرفشار مدیترانه و گرادیان شدید	تعمیق ناوه ی ۵۰۰ + hPa واگرایی شدید جت در حضور بلوکینگ اُمگایی	کاهش شیب فشاری + جابه‌جایی ناوه	عراق، سوریه (خارجی) + هورالعظیم (داخلی نقش تقویتی)	ساختار سه‌لایه کامل + شدت و ماندگاری بالابه‌سبب بلوکینگ و کانالیزه‌شدن جریان
۲۰۱۲	۲۱– ۲۶ مه	گرادیان فشار سطحی قوی عراق و سوریه + ناوه میانی با هسته‌های تاوایی	هم‌زمانی بیشینه گرادیان سطحی+ تاوایی مثبت + واگرایی جت	تضعیف ناوه میانی و جابه‌جایی جت+ افت باد سطحی + اوج ثانویه ضعیف	عراق، سوریه (خارجی) + خوزستان و هورالعظیم(داخلی نقش پررنگ)	حضور اوج ثانویه با نقش پررنگ منشأ محلی
۲۰۱۶	۱۵– ۱۸ ژوئن	گرادیان ملایم سطحی + ناوه کم‌عمق۵۰۰	مرکز تاوایی ۵۰۰ + خروجی جت بر فراز عراق + باد سطحی منسجم	جابه‌جایی محور جت + کاهش تاوایی ۸۵۰ در نتیجه فروکش سریع	غرب عراق، شرق سوریه(خارجی) + هورالعظیم(داخلی نقش فعال سازی موضعی)	شدت کمتر و فاز اوج کوتاه به‌علت هم‌پوشانی ناپایدار لایه ها

از سوی دیگر، جدول (۲) ، نقش محرک‌های دینامیکی مانند تاوایی، آدکسیون و واگرایی فوقانی به تفکیک رخدادها نشان داده شده است و به‌خوبی روشن می‌سازد که تغییرات این متغیرها چگونه تکامل سامانه را کنترل کرده‌اند. به‌ویژه در رخداد ۲۰۱۱ پایداری تاوایی میانی و واگرایی فوقانی، علت ماندگاری طولانی‌تر بوده است، در حالی‌که در رخداد ۲۰۱۶ ناپایداری کوتاه‌مدت این متغیرها عامل محدودیت شدت و مدت بوده است.

جدول ۲- بررسی نقش محرک‌های دینامیکی اصلی (تاوایی، آدکسیون و واگرایی فوقانی) در هر رخداد

مرحله	باد/فشار (سطح زمین)	ناپایداری پایین (۸۵۰ hPa)	تاوایی/ناوه (۵۰۰ hPa)	جت/واگرایی (۳۰۰ hPa)	نتیجه دینامیکی
آغاز	گرادیان فشار سطحی+ بادهای لیفت‌کننده	هسته‌های تاوایی ضعیف	ناوه اولیه	واگرایی محدود	آغاز لیفت و صعود موضعی
اوج	بادهای سطحی شدید + کانالیزه‌شدن جریان	تمرکز هسته‌های تاوایی + اختلاط مرزی	آدکسیون مثبت قوی، تعمیق ناوه	واگرایی شدید، رودباد فعال	صعود سازمان‌یافته و انتقال گسترده
فروکش	افت گرادیان و باد سطحی	کاهش هسته‌های تاوایی	جابه‌جایی/تضعیف ناوه	کاهش واگرایی و تغییر موقعیت جت	افت صعود و توقف انتقال

در نهایت، جدول (۳) اثر کلی متغیرهای کلیدی در مراحل آغاز، اوج و فروکش را به‌صورت تلفیقی ارائه می‌دهد و نشان می دهد که در آغاز پدیده، گرادیان فشار سطحی و ناپایداری پایین‌لایه بیشترین اهمیت را دارند؛ در اوج، ترکیب هم‌زمان تاوایی مثبت میانی و واگرایی فوقانی کلید اصلی شدت و گستره است؛ و در فروکش، افت شیب فشاری و کاهش تاوایی میانی بیشترین نقش را در توقف فرایند انتقال ایفا می‌کنند.

مرحله	متغیرهای کلیدی	توضیح نقش
آغاز	گرادیان فشار سطحی، تاوایی مثبت سطح زمین ۸۵۰ hpa	تأمین انرژی افقی برای لیفت و ایجاد ناپایداری اولیه
اوج	تاوایی مثبت ۵۰۰hpa ، واگرایی ۳۰۰hpa ، انسجام باد سطحی	هم‌پوشانی سه‌سطحی ⟶ انتقال سازمان‌یافته و شدت حداکثری
فروکش	کاهش شیب فشاری، تضعیف تاوایی میانی، افت رودباد	کاهش صعود و توقف تدریجی انتقال ذرات

جدول ۳- تأثیر ترکیبی متغیرهای کلیدی بر مراحل مختلف رخدادهای شاخص گردوغبار

برآیند این سه جدول تأکید می‌کند که درک رخدادهای گردوغبار تنها با رویکرد ترکیبی سینوپتیکی–دینامیکی و توجه هم‌زمان به منابع خارجی و داخلی امکان‌پذیر است. مقایسه سه رخداد به‌خوبی بیانگر آن است که گردوغبار منطقه غرب آسیا نه تنها محصول سامانه‌های بزرگ‌مقیاس است، بلکه پایداری و شدت آن‌ها وابسته به هم‌پوشانی زمانی–مکانی لایه‌های جو و همچنین نقش فعال منابع داخلی است. این یافته‌ها بستر لازم را برای نتیجه‌گیری و پیشنهادهای کاربردی در بخش پایانی مقاله فراهم می‌سازد.

۵- نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان داد که گردوغبار نیمه ی غربی ایران حاصل برهم‌کنش پیچیده متغیرهای دینامیکی و سینوپتیکی در سه لایه جو است و هیچ متغیری به‌تنهایی قادر به توضیح شدت و ماندگاری رخدادها نیست. آنچه تفاوت رخدادها را رقم می‌زند، هم‌پوشانی زمانی و مکانی میان گرادیان فشار سطحی، تاوایی مثبت میانی و واگرایی تراز بالا همراه با نقش منابع محلی است.

از نظر علمی، این نتایج اهمیت رویکرد مرحله‌ای در تحلیل رخدادها را برجسته می‌سازد؛ به‌طوری‌که در آغاز، گرادیان فشار سطحی و ناپایداری پایین‌لایه محرک اصلی‌اند، در اوج ترکیب هم‌زمان تاوایی مثبت و واگرایی فوقانی شدت را تعیین می‌کند، و در فروکش کاهش تاوایی و افت شیب فشاری سامانه را تضعیف می‌سازد. این نگاه مرحله‌ای می‌تواند چارچوبی برای طراحی شاخص‌های پیش‌بینی و هشدار سریع فراهم آورد.

از نظر کاربردی، نتایج بیانگر آن است که صرف‌نظر از وجود سامانه‌های بزرگ‌مقیاس، منابع داخلی در جنوب‌غرب ایران قادرند پدیده را تقویت یا بازفعال‌سازی کنند. بنابراین، مدیریت مؤثر منابع داخلی مانند تالاب هورالعظیم و دشت خوزستان باید در کنار پایش دینامیک جو قرار گیرد تا شدت و تداوم رخدادها کاهش یابد.

به‌طور کلی، این مطالعه روشن می‌سازد که گردوغبار غرب آسیا پدیده‌ای چندلایه است که درک آن تنها با رویکرد تلفیقی سینوپتیکی–دینامیکی و در نظر گرفتن نقش منابع سطحی امکان‌پذیر است. این جمع‌بندی علاوه بر غنای علمی، می‌تواند مبنای توسعه سامانه‌های پیش‌بینی عددی و سیاست‌های محیط‌زیستی در ایران قرار گیرد.

منابع

بروجنی، م. (۱۴۰۱). بررسی روند تغییرات و همبستگی تعداد وقوع گردوغبار در ایران (۱۹۹۰–۲۰۱۶). تحقیقات کاربردی خاک، ۱۰(۱)، ۶۹–۸۱.

زرولی، م. ف.، وفایی‌نژاد، ع.، خیرخواه‌زرکش، م.، و احمدی‌دهکاء، ف. (۱۳۹۳). پایش و تحلیل سینوپتیکی پدیده گردوغبار با استفاده از سنجش از دور و GIS (مطالعه موردی: گردوغبار ۱۸ ژوئن ۲۰۱۲). اطلاعات جغرافیایی (سپهر)، ۲۳(۹۱).

فرحبخش، م.، علیجانی، ب.، و فتاحی، ا. (۱۳۹۳). تحلیل سینوپتیکی مخاطره گردوغبار (۱۰ تا ۱۲ مرداد ۱۳۹۲) در ایران. مدیریت مخاطرات محیطی، ۲(۱).

میری، م. (۱۳۹۰). [تحلیل زمان‌بندی و منابع گردوغبار در جنوب‌غرب ایران]. [پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه زابل].

Alizadeh-Choobari, O., Zawar-Reza, P., & Sturman, A. (2014). The “wind of 120 days” and dust storm activity over the Sistan Basin. Atmospheric Research, 143, 328–341. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.02.001

Goudie, A. S. (2014). Desert dust and human health disorders. Environment International, 63, 101–113. https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.10.011

Hamidi, M., Kavianpour, M. R., & Shao, Y. (2013). Synoptic analysis of dust storms in the Middle East. Aeolian Research, 10, 103–112. https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2013.04.002

Middleton, N. J. (2017). Desert dust hazards: A global review. Aeolian Research, 24, 53–63. https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2016.12.001

Notaro, M., Alkolibi, F., Fadda, E., & Bakhrjy, F. (2013). Trajectory analysis of Saudi Arabian dust storms. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 118(12), 6028–6043. https://doi.org/10.1002/jgrd.50346

Prospero, J. M., Ginoux, P., Torres, O., Nicholson, S. E., & Gill, T. E. (2002). Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the Nimbus 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product. Reviews of Geophysics, 40(1), 2-1–2-31. https://doi.org/10.1029/2000RG000095

Dynamic–Synoptic Analysis of the Formation, Evolution, and Persistence of Major Transboundary and Internal Dust Events in the Western Half of Iran

Parisasohrabipirdosti[1], Hasanzolfaghari[2]

PhD student in meteorology, Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, Razi University, Kermanshah, Iran
Associate Professor of meteorology , Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, Razi University, Kermanshah, Iran
Corresponding Author’s Email: Parisasohrabi92@gmail.com

Abstract

This study analyzes the synoptic and dynamic characteristics of major dust storm events in western Iran during 2011, 2012, and 2016. NCEP/NCAR reanalysis data including surface pressure, geopotential height, and wind were applied, and synoptic maps were generated with GrADS software for three composites representing initiation, peak, and dissipation. Results show that all three events shared a common three-layer structure. The 2011 case, reinforced by a persistent Omega blocking and vertical overlap of layers, was the longest and most intense. The 2012 event followed a similar pattern but had a secondary peak linked to local sources (Hawizeh Marsh and Khuzestan Plain), highlighting the role of internal dust origins. The 2016 case, although generated by comparable mechanisms, was shorter and weaker due to less temporal and spatial persistence. Comparative analysis reveals that during initiation, surface pressure gradients and lower-level instability were dominant; at peak, positive vorticity advection and upper-level divergence controlled intensity; and during dissipation, weakening mid-level vorticity and reduced pressure gradients led to decay. Findings indicate that the spatiotemporal overlap of dynamical factors, together with growing contribution of local sources, is the key determinant of differences among the events.

Keywords: Dust storm, synoptic–dynamic analysis, omega blocking, positive vorticity, western Iran

سومین کنفرانس ملی آب و هواشناسی ایران (با محوریت تغییر اقلیم)
The 3rd National Conference on Climatology of Iran (Focusing on Climate Change)
ارومیه ۱۶ مهر ۱۴۰۴

تحلیل همبستگی مکانی تغییرات دما و بارش با خشکسالی طبقه‌بندی شده از شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI) در استان فارس

امیرحسین حدادی[۱]

[۱]- دانشجوی کارشناسی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران
(Amir.Haddadi81@sharif.edu)

چکیده

بررسی ارتباط تغییرات اقلیمی و پدیده خشکسالی از موضوعات کلیدی در مدیریت و برنامه ریزی پایدار منابع طبیعی و کشاورزی به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک است. در این پژوهش، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای مادیس (MODIS)، شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI) برای استان فارس محاسبه و پهنه‌بندی آن انجام شد. سپس با بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای TerraClimate و CHIRPS، اختلاف دمای بیشینه و کمینه و بارش بین میانگین دو دوره زمانی ۱۹۹۵–۲۰۰۰ و ۲۰۲۰–۲۰۲۵ استخراج گردید. پس از اصلاح تفکیک مکانی داده‌ها، نمونه‌برداری شبکه‌ای به روش Fishnet انجام و همبستگی مکانی بین VCI و متغیرهای اقلیمی با استفاده از ضرایب همبستگی پیرسون و اسپیرمن ارزیابی شد. نتایج نشان داد بر اساس ضریب پیرسون، اختلاف دمای بیشینه با مقدار ۰.۶۱ بیشترین همبستگی را با VCI دارد و بارش در رتبه دوم قرار می‌گیرد، درحالی‌که ضریب اسپیرمن بارش را با مقدار ۰.۵۰ مهم‌ترین متغیر معرفی می‌کند. بررسی بیشتر همبستگی‌های مختصات جغرافیایی با تغییرات اقلیمی نیز تایید کننده الگوی مشابهی با خشکسالی است. این یافته‌ها بر نقش پتانسیل و برجسته بارش و دما در رخداد پدیده خشکسالی در استان فارس تأکید دارد.

کلید واژه‌ها: همبستگی مکانی، شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI)، تغییرات اقلیم، سنجش از دور، سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)

مقدمه

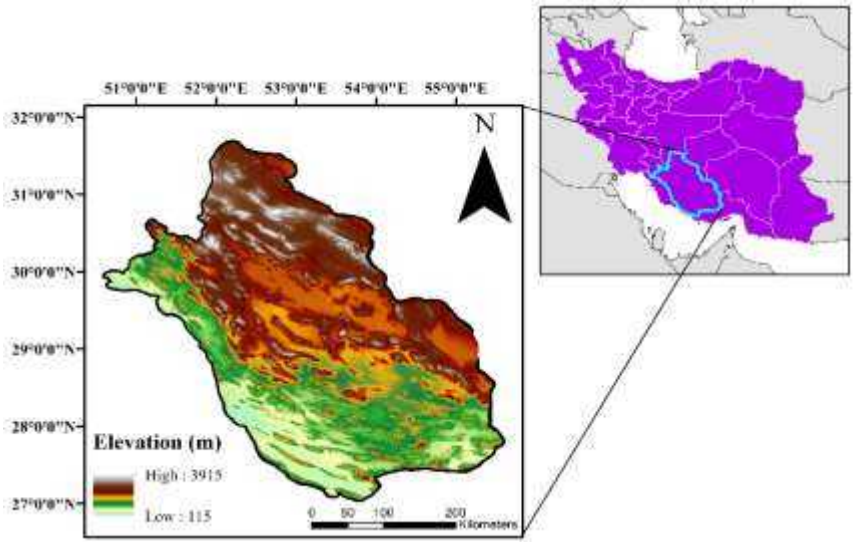
پدیده تغییر اقلیم، به‌ویژه زمانی که منجر به افزایش فراوانی و شدت خشکسالی می‌شود، تهدیدی جدی برای پایداری منابع طبیعی و امنیت غذایی در مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌شمار می‌رود. گزارش ویژه هیات میان دولتی تغییر اقلیم (IPCC) نیز بیان می‌کند که خشکسالی‌های کشاورزی و اکولوژیکی در بسیاری از مناطق جهان افزایش یافته و تغییرات اقلیمی عامل موثر در این روند است (Scholes, 2020). ارزیابی‌های دیگر نیز نشان می‌دهند که تغییرات در الگوهای دما و بارش ناشی از اقلیم جهانی، کشاورزی در مناطق خشک را با چالش‌های جدی مواجه ساخته است (Abbas et al., 2022). فناوری سنجش‌ازدور به‌دلیل توانایی بررسی مکانی‌زمانی دقیق، رصد گسترده و هزینه‌اثربخشی بالا، ابزار مطلوبی برای پایش تغییرات اقلیمی و خشکسالی محسوب می‌شود. روش‌های مرسوم ارزیابی خشکسالی اقلیمی و کشاورزی مانند شاخص‌های بارش استاندارد (SPI) یا خشکسالی پالمر (PDSI) اغلب به داده‌های زمینی و تاریخی وابسته‌اند که در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک ناقص یا نامطمئن هستند. به همین جهت، فناوری سنجش‌ازدور فرصتی مناسب فراهم کرده تا با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای، تغییرات اقلیمی و پوشش گیاهی را به‌صورت مکانی‌زمانی مطالعه گردد (AghaKouchak et al., 2015). در مرور کاملی که انجام شد، مشخص گردید سنجش‌ازدور نه‌تنها برای پایش خشکسالی اقلیمی و کشاورزی قابل استفاده است بلکه نقش مهمی در کاهش خطر بلایای طبیعی، مدیریت منابع آب و سیاست‌گذاری آب دارد (Cullen, 2023). در نمونه‌ای دیگر، برای مثال Badarneh و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از تصاویر Landsat-8 و MODIS تغییرپذیری مکانی‌زمانی خشکسالی کشاورزی در شمال اردن را پایش کرده و الگوهای پیش‌رونده خشکسالی را شناسایی کردند. همچنین، بررسی منطقه‌ای در جنوب غرب چین توسط Lu و همکاران (۲۰۲۳) با شاخص‌هایی شامل VCI، TCI و TVDI نشان داد خشکسالی در زیرناحیه‌های کارستی بسیار آشکار بوده و ضریب همبستگی بالای دما با خشکی مشاهده گردیده است. علاوه بر این، پژوهش دیگری به‌وسیله مرور سیستماتیک بر این نکته تاکید کردند که افزایش تغییرپذیری بارش و دما باعث کاهش پایداری سیستم‌های زنجیره غذایی در مناطق خشک شده است (Dzvene et al., 2025). با این حال، روش‌های مبتنی بر سنجش‌ازدور محدودیت‌هایی نیز دارند؛ از جمله تفکیک مکانی و زمانی محدود، تأثیر اتمسفر بر کیفیت داده، خلأهای زمانی تصاویر و سوگیری‌های آماری ناشی از اندازه واحدهای مکانی متفاوت که ممکن است به دقت پایین در پایش خشکسالی منجر شود (El-Beltagy and Madjour, 2012). در این پژوهش، استان فارس به‌عنوان محدوده مورد بررسی انتخاب شد تا شرایط پوشش گیاهی به عنوان نماینده خشکسالی و ارتباط آن با مؤلفه‌های اقلیمی تحلیل گردد. برای این منظور، شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI) از داده‌های ماهواره‌ای MODIS استخراج و نقشه‌های پهنه‌بندی آن تهیه شد. به‌منظور سنجش تغییرات اقلیمی، داده‌های ماهواره‌ای TerraClimate و CHIRPS به کار گرفته شد تا

تفاوت‌های دمای بیشینه و کمینه و نیز بارش میانگین دو بازه زمانی ۱۹۹۵–۲۰۰۰ و ۲۰۲۰–۲۰۲۵ محاسبه شود. داده‌های حاصل پس از بهبود وضوح مکانی، با بهره‌گیری از شبکه منظم نمونه‌برداری (Fishnet) برداشت گردید. در ادامه، همبستگی مکانی بین شاخص VCI و پارامترهای اقلیمی با استفاده از دو رویکرد آماری پیرسون و اسپیرمن مورد ارزیابی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

در جنوب غرب ایران، استان فارس با وسعت حدود ۱۲۲۴۰۰ کیلومتر مربع و کاربری اراضی متنوع، اقلیم غالبا خشک و نیمه‌خشک دارد و میانگین سالانه بارش آن در حدود ۲۶۰-۲۹۰ میلی‌متر در سال است (شکل ۱). مطالعات مختلف نشان داده‌اند که این استان در سال‌های اخیر تجربه خشکسالی‌های شدید و گسترده‌ای را پشت سر گذاشته است؛ برای مثال Moradi و همکاران (۲۰۱۱) شدت، مدت و گسترش خشکسالی در استان را با استفاده از شاخص PDSI در بازه زمانی ۱۹۹۵–۲۰۱۴ بررسی کرده و خشکسالی طولانی‌مدت را در این منطقه تأیید نموده است. همچنین پژوهش Nouri و همکاران (۲۰۲۴) به‌وضوح بیان می‌کند که استان فارس به‌عنوان یکی از قطب‌های کشاورزی ایران، در سال‌های اخیر تحت تأثیر خشکسالی شدید قرار گرفته است. بنابراین، با توجه به واقعیت‌های اقلیمی و اثرات گسترده خشکسالی بر منابع آب و کشاورزی استان فارس، انجام تحلیل‌های مبتنی بر سنجش از دور مانند VCI و بررسی ارتباط مکانی‌زمانی آن با متغیرهای دمایی و بارشی، اهمیت علمی و کاربردی زیادی دارد. پژوهش حاضر در چنین بستری انجام شده تا با تمرکز بر الگوهای اقلیمی و خشکسالی در فارس، به‌دقت نقش متغیرهای دما و بارش را در وضعیت پوشش گیاهی به‌عنوان نماینده خشسکالی شناسایی کند.



شکل ۱- مشخصات جغرافیایی و ارتفاعی منطقه مورد مطالعه

داده‌های ماهواره‌ای

در این پژوهش برای تحلیل تغییرات پوشش گیاهی و متغیرهای اقلیمی از سه مجموعه داده ماهواره‌ای معتبر استفاده شد. نخست، محصول MODIS که نسخه ۶.۱ شاخص‌های پوشش گیاهی سنجنده مادیس است، به‌کار گرفته شد. این محصول شاخص NDVI را با وضوح مکانی تقریبی ۱ کیلومتر و به‌صورت ترکیب ۱۶ روزه ارائه می‌دهد و شامل لایه‌های کنترل کیفیت (QA) برای حذف اثرات ابر و خطاهای اتمسفری است. داده‌های این محصول امکان پایش مستمر وضعیت پوشش گیاهی و استخراج شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI) را فراهم می‌سازد. دوم، مجموعه داده روزانه CHIRPS برای استخراج داده‌های بارش مورد استفاده قرار گرفت. این مجموعه با وضوح مکانی ۰.۰۵ درجه (حدود ۵٫۶۶ کیلومتر) و تفکیک زمانی روزانه، از سال ۱۹۸۱ تاکنون، بارش جهانی را بر اساس ترکیب داده‌های مادون‌قرمز ماهواره‌ای و اطلاعات ایستگاهی ارائه می‌کند. سوم، مجموعه داده TERRACLIMATE برای دسترسی به اطلاعات دمای بیشینه و کمینه و سایر پارامترهای اقلیمی مورد استفاده قرار گرفت. این مجموعه داده ماهانه با وضوح مکانی تقریبی ۴ کیلومتر (۲۴/۱ درجه) از سال ۱۹۵۸ تا زمان حال، بر اساس ترکیب مدل‌های اقلیمی و داده‌های مشاهداتی تولید شده و شامل پارامترهایی نظیر بارش، دما، تبخیر و تراز آبی سطحی است.

شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI)

شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI) به‌عنوان یکی از شاخص‌های مهم سنجش‌ازدور برای ارزیابی وضعیت سلامت و تنش پوشش گیاهی، نخستین بار توسط Kogan معرفی شد. این شاخص از داده‌های شاخص تفاضلی نرمال‌شده پوشش گیاهی (NDVI) مشتق می‌شود و با مقایسه مقادیر فعلی NDVI با دامنه تغییرات تاریخی آن در یک دوره زمانی مشخص، شرایط نسبی پوشش گیاهی را مشخص می‌کند. NDVI به‌عنوان یک شاخص طیفی، بر اساس بازتاب طیفی گیاهان در ناحیه‌های قرمز و فروسرخ نزدیک محاسبه می‌شود:

$$NDVI = \frac{RED - NIR}{RED + NIR} \quad (۱)$$

که در آن NIR بیان‌گر بازتاب در باند نزدیک فروسرخ و RED بازتاب در باند قرمز است. مقادیر NDVI بین ۱- تا ۱ متغیر است و مقادیر بالاتر نشان‌دهنده تراکم و سلامت بیشتر پوشش گیاهی است.

برای محاسبه VCI، مقادیر NDVI فعلی با دامنه تغییرات تاریخی آن در یک دوره زمانی معین مقایسه می‌شود:

$$VCI = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} * 100 \quad (۲)$$

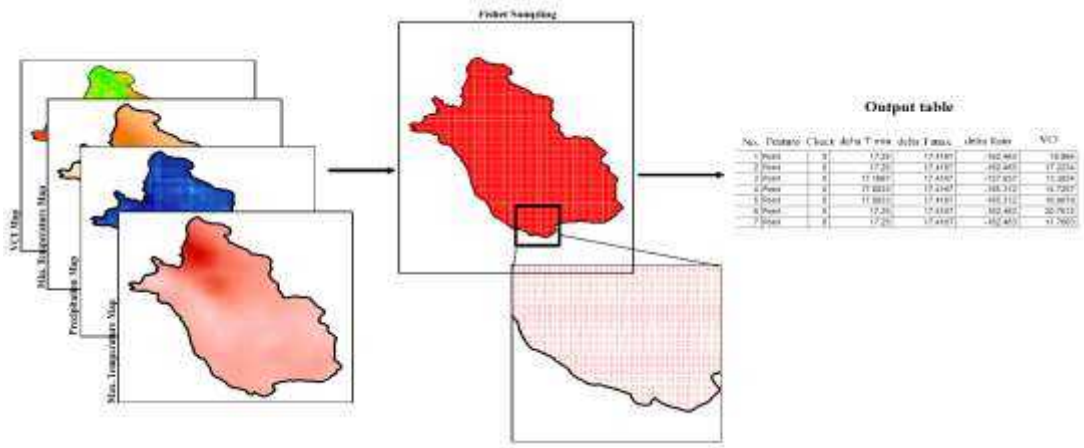
در این معادله NDVImin و NDVImax به‌ترتیب کمینه و بیشینه مقدار NDVI در دوره مرجع هستند. مقدار VCI بین ۰ تا ۱۰۰ تغییر می‌کند؛ مقادیر نزدیک به ۰ نشان‌دهنده وضعیت بحرانی خشکسالی و مقادیر نزدیک به ۱۰۰ بیانگر شرایط مطلوب پوشش گیاهی است (جدول ۱).

جدول ۱- طبقه‌بندی انواع خشکسالی برحسب میزان شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI)

دسته‌بندی	مقدار VCI (٪)	طبقه‌بندی
کلاس ۱	۱۰-۰	خشکسالی بسیار شدید
کلاس ۲	۲۰-۱۰	خشکسالی شدید
کلاس ۳	۳۰-۲۰	خشکسالی متوسط
کلاس ۴	۴۰-۳۰	خشکسالی ملایم
کلاس ۵	۱۰۰-۴۰	بدون خشکسالی

سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)

برای پردازش و تحلیل داده‌های مکانی، از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) بهره‌گیری شد. این سامانه مجموعه‌ای از ابزارها و روش‌ها را فراهم می‌کند که امکان ذخیره‌سازی، مدیریت، تحلیل و نمایش داده‌های مکانی را به‌صورت یکپارچه فراهم می‌آورد. در این پژوهش، نرم‌افزار ArcGIS به‌عنوان یکی از پرکاربردترین محیط‌های GIS برای انجام عملیات پیش‌پردازش، نمونه‌برداری شبکه‌ای و پهنه‌بندی شاخص VCI مورد استفاده قرار گرفت. ArcGIS با دارا بودن قابلیت‌های تحلیلی و گرافیکی پیشرفته، امکان تلفیق داده‌های سنجش‌ازدور با اطلاعات مکانی را فراهم ساخته و نقش مهمی در یکپارچه‌سازی نتایج ایفا کرد. در ابتدا تصاویر دریافت شده از سنجش از دور، با دستور Resample به رزولوشن مکانی هزارمتری تبدیل شدند تا نمونه برداری از هر پیکسل شامل همه اطلاعات مورد نیاز باشند. پس از برش تصاویر در مرزبندی سیاسی استان فارس، از روش Fishnet برای نمونه‌برداری استفاده گردید. درنهایت جدول اطلاعات برای تحلیل‌های بعدی تهیه شد (شکل ۲).



شکل ۲- شماتیک روند تهیه جدول اطلاعات مورد نیاز با استفاده از اصلاحات لازم در نرم افزار ArcGIS و نمونه برداری از نقشه ترکیب شده

تحلیل همبستگی مکانی و آماری

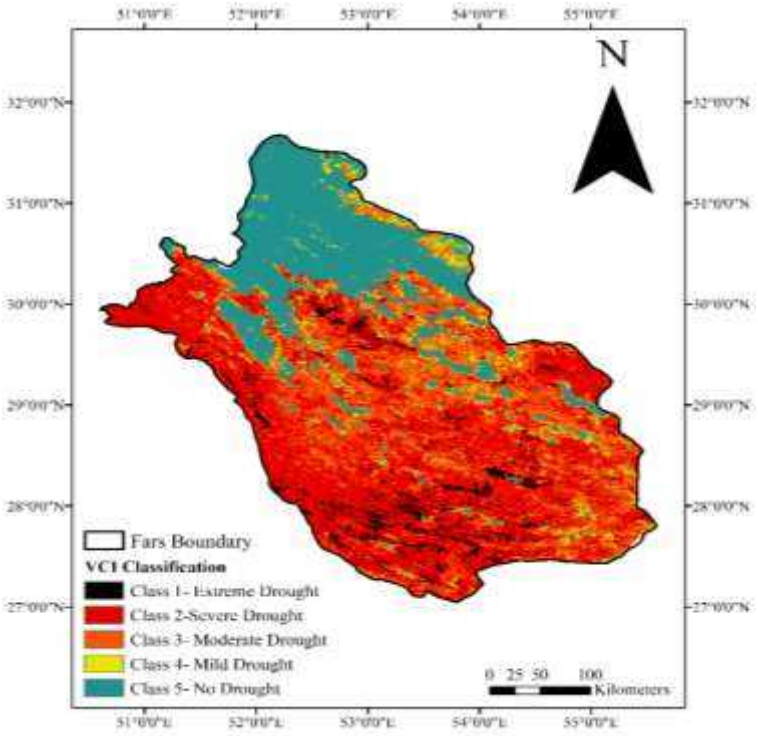
داده‌های استخراج‌شده از محیط GIS پس از نمونه‌برداری و حذف کردن داده‌های نویزی، در محیط پایتون و با استفاده از کتابخانه‌های NumPy و Pandas مورد تحلیل آماری قرار گرفتند و برای بصری سازی نیز از کتابخانه Seaborn استفاده شد. درابتدا توزیع مقادیر تغییرات دمایی و بارش در سه طبقه‌بندی خشکسالی غالب استان شیراز مورد تحلیل قرار می‌گیرد

و سپس برای بررسی روابط بین شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI) و متغیرهای اقلیمی، از دو رویکرد تحلیلی شامل ضریب همبستگی پیرسون، ضریب همبستگی اسپیرمن استفاده شد. ضریب همبستگی پیرسون یکی از روش‌های آماری کلاسیک برای سنجش میزان و جهت رابطه خطی بین دو متغیر کمی است و مقدار آن بین ۱- تا ۱ تغییر می‌کند؛ مقادیر نزدیک به ۱ یا ۱- نشان‌دهنده رابطه قوی مستقیم یا معکوس و مقادیر نزدیک به صفر بیانگر نبود رابطه خطی است. ضریب همبستگی اسپیرمن نیز نوعی همبستگی ناپارامتری بر مبنای رتبه داده‌هاست که توانایی شناسایی روابط یکنواخت (Monotonic) را حتی در غیاب رابطه خطی دارد. این روش برای داده‌هایی که توزیع نرمال ندارند یا دارای مقیاس ترتیبی هستند مناسب است. این روش قادر است همبستگی‌های محتمل پیچیده و غیرخطی بین متغیرها را نیز شناسایی کند. استفاده همزمان این دو روش با یکدیگر، شرایطی را فراهم می‌کند که نخست همبستگی میان پارامترهای اقلیمی و مختصات جغرافیایی شناسایی و تحلیل گردد و سپس همبستگی هریک از متغیرهای ذکر شده با مقدار وضعیت پوشش گیاهی سنجیده شود. در نهایت نیز با مقایسه میزان و جهت همبستگی‌ها، به بررسی کلی داده‌ها و نتیجه‌گیری نهایی رسید.

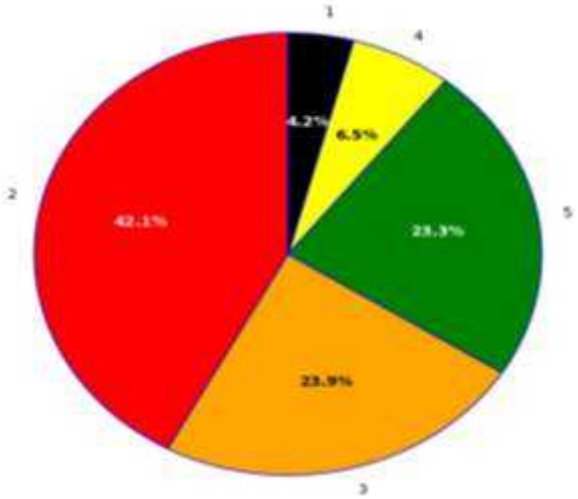
نتایج

پهنه‌بندی خشکسالی استان فارس بر اساس شاخص VCI

پهنه‌بندی خشکسالی در استان فارس بر اساس شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI) نشان‌دهنده الگوی مکانی مشخصی از شدت خشکسالی در سطح استان است (شکل ۳). نتایج حاصل از طبقه‌بندی نشان می‌دهد که خشکسالی شدید (کلاس ۲) بیشترین سهم از مساحت استان را به خود اختصاص داده و حدود ۴۲٫۱ درصد از کل پهنه را شامل می‌شود. این طبقه عمدتاً در بخش‌های مرکزی، جنوبی و جنوب‌شرقی استان گسترش یافته است؛ مناطقی که از نظر اقلیمی دارای بارش کمتر و دمای بالاتر هستند و به‌طور طبیعی مستعد شرایط خشکسالی می‌باشند.در رتبه دوم، خشکسالی متوسط (کلاس ۳) با سهمی معادل ۲۳٫۹ درصد مشاهده می‌شود که به‌طور غالب در حاشیه پهنه‌های دارای خشکسالی شدید قرار دارد. این مناطق ممکن است به دلیل تغییرات فصلی بارش و شرایط خاک، نوسانات بیشتری در شدت خشکسالی تجربه کنند. مناطق فاقد خشکسالی (کلاس ۵) حدود ۲۳٫۳ درصد از مساحت استان را تشکیل می‌دهند که عمدتاً در بخش‌های شمالی و ارتفاعات زاگرس قرار دارند. این نواحی به‌دلیل دریافت بارش بیشتر و شرایط توپوگرافی مناسب، از پوشش گیاهی بهتری برخوردار بوده و کمتر تحت تأثیر تنش خشکسالی قرار گرفته‌اند. خشکسالی ملایم (کلاس ۴) تنها ۶٫۵ درصد از استان را شامل شده و پراکندگی محدودی دارد، در حالی که خشکسالی بسیار شدید (کلاس ۱) کمترین سهم را با ۴٫۲ درصد به خود اختصاص داده و در نقاط خاصی از استان مشاهده می‌شود (شکل ۴).



شکل ۳- نقشه پهنه‌بندی شده خشکسالی استان فارس بر اساس شاخص VCI در بازه زمانی ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۵

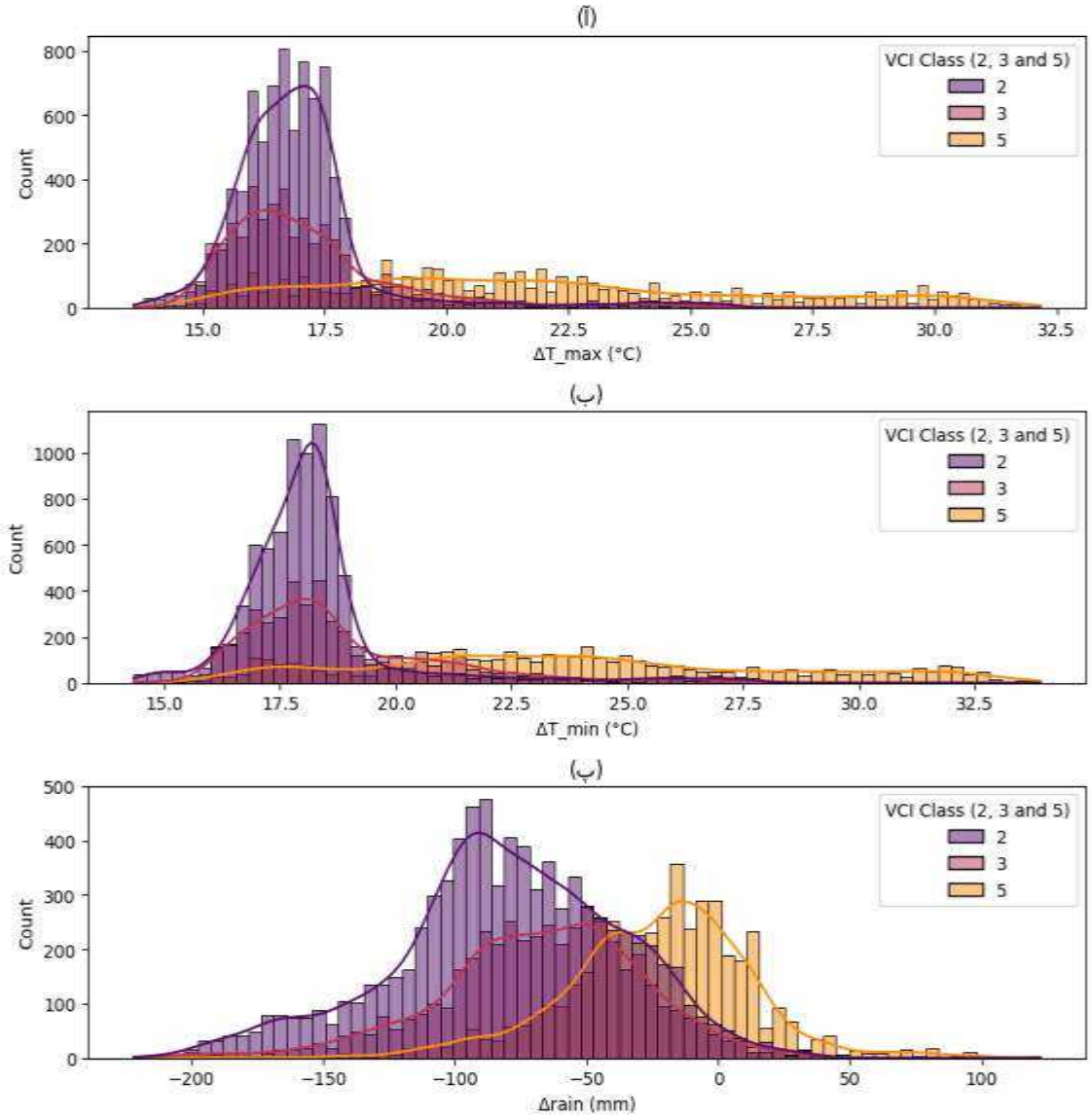


شکل ۴- سهم هر طبقه‌بندی از خشکسالی بر اساس شاخص VCI در استان فارس برحسب درصد

به‌طور کلی، نتایج این تحلیل بیانگر آن است که بیش از دو سوم مساحت استان فارس در شرایط خشکسالی شدید یا متوسط قرار دارد که این امر می‌تواند آثار قابل توجهی بر تولیدات کشاورزی، منابع آب و پایداری اکوسیستم‌های طبیعی منطقه داشته باشد. همچنین تمرکز مناطق بدون خشکسالی در شمال استان، نقش تعیین‌کننده عوامل اقلیمی و توپوگرافی در بهبود شرایط پوشش گیاهی را تأیید می‌کند.

توزیع تغییرات دما و بارش در سه طبقه‌بندی غالب

بررسی هیستوگرام تغییرات دمای بیشینه، دمای کمینه و تغییرات بارش در سه طبقه خشکسالی شامل خشکسالی شدید (کلاس ۲)، خشکسالی متوسط (کلاس ۳) و مناطق بدون خشکسالی (کلاس ۵) نشان‌دهنده الگوهای متمایزی در توزیع داده‌هاست. نتایج نشان می‌دهد که در هر سه متغیر، بیشترین تمرکز داده‌ها مربوط به کلاس ۲ است که بیانگر آن است که این گروه نه‌تنها بیشترین سهم مکانی را در نقشه پهنه‌بندی خشکسالی به خود اختصاص داده، بلکه در دامنه تغییرات اقلیمی نیز حضور پررنگ‌تری دارد. در متغیر تغییرات دمای بیشینه، داده‌های کلاس ۲ عمدتاً در بازه ۱۵ تا ۱۹ درجه سانتی‌گراد متمرکز شده‌اند و دارای اوج توزیع مشخص هستند، در حالی که کلاس‌های ۳ و ۵ پراکندگی بیشتری نشان می‌دهند. برای تغییرات دمای کمینه نیز روند مشابهی مشاهده می‌شود؛ کلاس ۲ دارای تمرکز بالای داده‌ها در محدوده ۱۷ تا ۱۹ درجه سانتی‌گراد است و سایر کلاس‌ها توزیع پهن‌تری دارند که بیانگر تنوع شرایط اقلیمی آنهاست (شکل ۵).



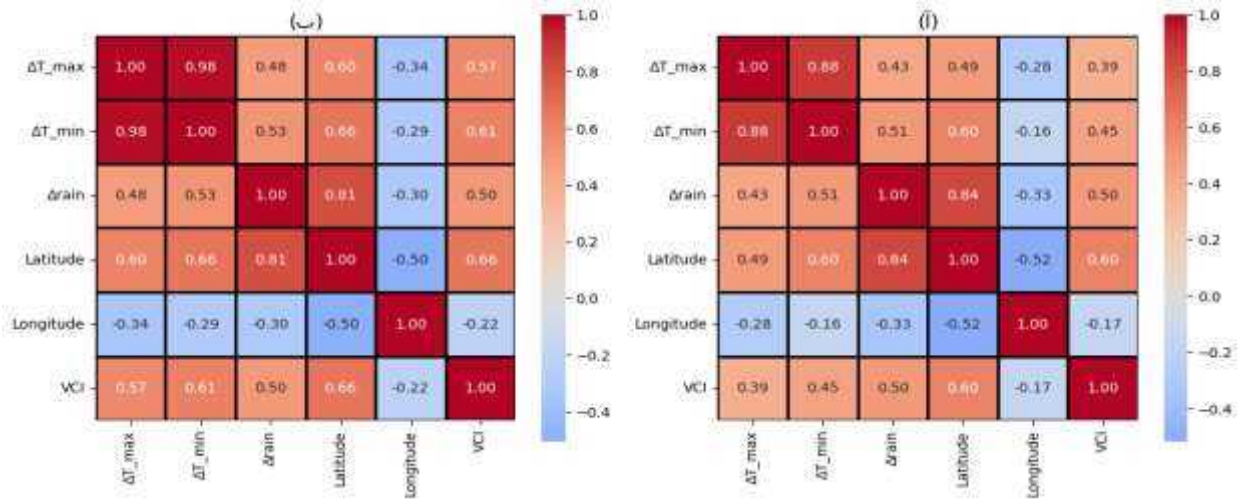
شکل ۵- توزیع تغییرات دمای بیشینه (آ)، دمای کمینه (ب) و بارش (پ) در سه طبقه‌بندی کلاس ۲، ۳ و ۵ خشکسالی برحسب شاخص VCI در استان فارس

در خصوص تغییرات بارش، تمایز میان طبقات به‌مراتب آشکارتر است. توزیع کلاس ۲ به‌طور غالب در محدوده کاهش‌های قابل‌توجه بارش (حدود منفی ۲۰۰ تا منفی ۵۰ میلی‌متر) متمرکز است. این وضعیت نشان می‌دهد که کاهش شدید بارش، مهم‌ترین ویژگی اقلیمی مرتبط با خشکسالی شدید است. کلاس ۳ نیز عمدتاً کاهش بارش را تجربه کرده ولی با شدت کمتری نسبت به کلاس ۲، در حالی که کلاس ۵ پراکندگی گسترده‌تری داشته و بخش قابل‌توجهی از داده‌ها حتی افزایش

بارش نسبت به میانگین دوره‌های مرجع را نشان می‌دهد. به‌طور کلی، نتایج بیانگر آن است که کلاس ۲ در هر سه متغیر مورد بررسی، تراکم بالاتری از داده‌ها را به خود اختصاص داده و این موضوع می‌تواند مؤید نقش بارز تغییرات اقلیمی شدیدتر در شکل‌گیری خشکسالی‌های با شدت بالا در این مناطق باشد. همچنین تغییرات بارش نسبت به تغییرات دمای بیشینه و کمینه، تمایز مکانی و شدت خشکسالی را بهتر آشکار می‌سازد.

تحلیل همبستگی مکانی

بررسی همبستگی مکانی بین شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI) و متغیرهای اقلیمی با استفاده از دو رویکرد آماری پیرسون و اسپیرمن، تفاوت‌هایی را در نوع و میزان ارتباط این متغیرها نشان می‌دهد. در رویکرد پیرسون که روابط خطی را ارزیابی می‌کند، بیشترین ضریب همبستگی VCI با تغییرات دمای کمینه (ΔT_min) به مقدار ۰.۶۱ مشاهده شد. پس از آن، تغییرات دمای بیشینه (ΔT_max) با مقدار ۰.۵۷ و تغییرات بارش ($\Delta Rain$) با مقدار ۰.۵۰ قرار دارند. همچنین همبستگی بین ΔT_max و ΔT_min برابر ۰.۹۸ به دست آمد که بیانگر همزمانی تغییرات این دو پارامتر دمایی است. در رویکرد اسپیرمن که روابط یکنواخت (Monotonic) را بررسی می‌کند، تغییرات بارش با مقدار ۰.۵۰ بیشترین همبستگی را با VCI داشته و پس از آن ΔT_min و ΔT_max به‌ترتیب با مقادیر ۰.۴۵ و ۰.۳۸ قرار می‌گیرند. این جابه‌جایی اولویت متغیرها نشان می‌دهد که رابطه بارش با VCI می‌تواند به‌صورت یکنواخت و غیرخطی نیز توصیف شود (شکل ۶). همانطور که از شکل ۳ قابل برداشت است، در عرض‌های جغرافیایی بالاتر شرایط مساعدتری از خشکسالی مشاهده می‌شود که این مهم بیان‌گر بالاتر بودن درصد شاخص VCI است. ماتریس همبستگی نیز این مورد را تایید می‌کند. در طول‌های جغرافیایی بیشتر شرایط معکوس است و این رابطه بیانگر این بوده که در طول‌های جغرافیایی بیشتر، شرایط خشکسالی وخیم تر بوده و مقدار شاخص VCI کمتر می‌شود. این روند به‌طور مشابهی برای تغییرات بارش و دما نیز رخ داده است. همبستگی یکسان تغییرات بارش با VCI در دو روش نیز تاییدکننده رفتار پیچیده و تصادفی در عین حال هم جهت با VCI می‌باشد.



شکل ۶- ماتریس همبستگی مکانی اسپیرمن (آ) و پیرسون (ب) میان متغیرهای دمایی، بارش و شاخص VCI

از نظر مکانی، این همبستگی‌ها حاکی از آن است که در بخش‌هایی از استان که کاهش بارش مشاهده شده، مقادیر VCI نیز کمتر بوده است. همچنین در مناطقی که تغییرات همزمان در دمای بیشینه و کمینه رخ داده، مقادیر VCI روند کاهشی بیشتری داشته است. این موضوع بیانگر اثر ترکیبی پارامترهای دما و بارش بر تغییرات پوشش گیاهی در مقیاس مکانی است. به طور کلی، استفاده همزمان از دو رویکرد آماری متفاوت این امکان را فراهم می‌کند که علاوه بر شناسایی روابط خطی، روابط یکنواخت بین متغیرهای اقلیمی و پوشش گیاهی نیز مورد بررسی قرار گیرد. این امر باعث می‌شود تحلیل‌ها در بستر مکانی کامل‌تر انجام شده و درک بهتری از تعامل میان اقلیم و پوشش گیاهی حاصل شود.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، به منظور بررسی رابطه بین تغییرات اقلیمی و خشکسالی در استان فارس، شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI)بر اساس داده‌های ماهواره‌ای MODIS محاسبه و پهنه‌بندی شد. همچنین میانگین بارش از مجموعه CHIRPS و میانگین دمای بیشینه و کمینه از مجموعه TerraClimate برای دو بازه زمانی ۱۹۹۵–۲۰۰۰ و ۲۰۲۰–۲۰۲۵ استخراج گردید و در نهایت با اختلاف آن‌ها، نقشه تغییرات دمایی و بارشی منطقه به‌دست آمد. پس از یکسان نمودن وضوح مکانی داده‌ها، نمونه‌برداری شبکه‌ای انجام و ارتباط مکانی بین شاخص VCI و متغیرهای اقلیمی با استفاده از ضرایب همبستگی پیرسون و اسپیرمن بررسی شد. نتایج نشان داد که بیش از دو سوم مساحت استان در طبقات خشکسالی شدید و متوسط قرار دارد و تنها بخش‌های محدودی، عمدتاً در نواحی شمالی و ارتفاعات زاگرس، فاقد خشکسالی هستند. تحلیل توزیع

تغییرات اقلیمی در طبقات خشکسالی بیانگر آن است که بیشترین تراکم داده‌ها در کلاس خشکسالی شدید دیده می‌شود و این کلاس با کاهش قابل‌توجه بارش و تغییرات محدودتر دما همراه است. بررسی همبستگی مکانی نشان داد که در رویکرد پیرسون، تغییرات دمای کمینه بیشترین ارتباط را با VCI دارد، در حالی که در رویکرد اسپیرمن، تغییرات بارش از اهمیت بیشتری برخوردار است. این تفاوت نشان می‌دهد که تغییرات دمای کمینه به‌طور تقریبی رابطه خطی مثبتی با افزایش میزان خشکسالی دارد و تغییرات بارش نیز به دلیل ماهیت تصادفی و پیچیده بودنش، ترکیبی از خطی و غیرخطی بودن رابطه‌اش با میزان VCI به نمایش گذاشت. به طور کلی، این پژوهش بیانگر آن است که در استان فارس، تغییرات بارش و کمینه دما اصلی‌ترین عامل‌های مؤثر بر تغییرات شاخص VCI و وضعیت خشکسالی گیاهی است و دمای بیشینه به عنوان یک عامل پشتیبان در تغییر شدت و گستره خشکسالی عمل می‌کند. برای بررسی خشکسالی عوامل طبیعی بیشتری (مانند رطوبت خاک و شاخص های خشکسالی)، عوامل انسانی (تغییر اراضی و تغییر جمعیت) و سایر عوامل نیز باید در مطالعه لحاظ گردد تا از نتایج اطمینان بیشتری داشت اما در مجموع، استفاده از رویکردهای آماری متنوع و تحلیل مکانی امکان شناسایی دقیق‌تر الگوهای خشکسالی و درک جامع‌تری از تأثیر متغیرهای اقلیمی بر پوشش گیاهی را فراهم می‌آورد که می‌تواند در برنامه‌ریزی و مدیریت منابع طبیعی منطقه مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

Abbass, K., Qasim, M. Z., Song, H., Murshed, M., Mahmood, H., & Younis, I. (2022). A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures. Environmental science and pollution research international, 29(28), 42539–42559. https://doi.org/10.1007/s11356-022-19718-6

Dzvene, A. R., Zhou, L., Slayi, M., & et al. (2025). A scoping review on challenges and measures for climate change in arid and semi-arid agri-food systems. Discover Sustainability, 6, 151. https://doi.org/10.1007/s43621-025-00945-z

El-Beltagy, A., & Madkour, M. (2012). Impact of climate change on arid lands agriculture. Agriculture & Food Security, 1(1), 3. https://doi.org/10.1186/2048-7010-1-3

Scholes, R. J. (2020). The Future of Semi-Arid Regions: A Weak Fabric Unravels. Climate, 8(3), 43. https://doi.org/10.3390/cli8030043

Moradi, H. R., Rajabi, M., & Faragzadeh, M. (2011). Investigation of meteorological drought characteristics in Fars Province, Iran. Catena, 84(1–2), 35–46. https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.08.016

Badarneh, O., Hazaymeh, K., Almagbile, A., & Al Shogoor, S. (2024). Remote sensing-based agricultural drought mapping in Northern Jordan using Landsat and MODIS data. Environmental Advances, 18, 100602. https://doi.org/10.1016/j.envadv.2024.100602

Nouri, M., Nooripoor, M., Hayati, D., Sharifzadeh, M., Warner, L. A., Woosnam, K. M., & Yazdanpanah, M. (2024). Assessment of farmers' resilience to drought and its influencing components: The case of Fars Province, Iran. Climate and Development, 1–15. https://doi.org/10.1080/17565529.2024.2414041

AghaKouchak, A., Farahmand, A., Melton, F. S., Teixeira, J., Anderson, M. C., Wardlow, B. D., & Hain, C. R. (2015). Remote sensing of drought: Progress, challenges and opportunities. Reviews of Geophysics, 53(2), 452–480. https://doi.org/10.1002/2014RG000456

Cullen, K. A. (2023). A review of applications of remote sensing for drought studies in the Andes region. Journal of Hydrology: Regional Studies, 49, 101483. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101483

Lu, X., Li, Z., Yan, H., et al. (2023). Spatiotemporal variations of drought and driving factors based on multiple remote sensing drought indices: A case study in karst areas of southwest China. Journal of Mountain Science, 20, 3215–3232. https://doi.org/10.1007/s11629-023-7927-7

Spatial correlation analysis of temperature and precipitation variations with classified drought based on the Vegetation Condition Index (VCI) in Fars province

Amirhossein Haddadi[1]

B.Sc. student, Civil Engineering Department, Sharif University of Technology, Tehran
(Amir.Haddadi81@sharif.edu)

Abstract

Understanding the relationship between climate change and drought is essential for sustainable management of natural resources and agriculture, especially in arid and semi-arid regions. In this study, the Vegetation Condition Index (VCI) for Fars Province was derived from MODIS satellite imagery and spatially mapped. Differences in maximum and minimum temperatures and precipitation between the periods 1995–2000 and 2020–2025 were obtained from TerraClimate and CHIRPS datasets. After resampling spatial resolution, grid-based sampling using the Fishnet method was applied, and spatial correlations between VCI and climatic variables were evaluated using Pearson and Spearman coefficients. The relative importance of each variable for drought classification was further assessed using the Mutual Information method. Results showed that, according to Pearson's coefficient, maximum temperature difference had the strongest correlation with VCI (0.61), followed by precipitation, whereas Spearman's coefficient ranked precipitation as the most influential variable (0.50). Further investigation of the correlations between geographic coordinates and climate variations also confirms a similar pattern to drought. These findings emphasize the significant influence of precipitation and temperature variability on drought monitoring in Fars Province, Iran.

Keywords: Spatial Correlation, VCI, Climate Change, Remote Sensing, GIS

سومین کنفرانس ملی آب و هواشناسی ایران (با محوریت تغییر اقلیم)
The 3rd National Conference on Climatology of Iran (Focusing on Climate Change)
ارومیه ۱۶ مهر ۱۴۰۴

تحلیل همدیدی بارش سنگین ۲۱دی ماه ۱۳۹۸ (مطالعه موردی:جنوب و جنوب غرب کشور)

احمد صفری[۱]* مریم قیسوندی[۲]

۱-دانشجوی دکتری آب و هواشناسی دانشگاه زنجانAhmadsafariut1@gmail.com

۲- دانشجوی دکتری آب و هواشناسی دانشگاه زنجان Maryam.ghesvandy2018@gmail.com

چکیده

در روز ۲۱دی ماه 1398(11ژانویه (۲۰۲۰به دلیل وقوع بارندگی شدید و جاری شدن سیل خسارت های بسیاری به استان های سیستان و بلوچستان و هرمزگان وارد شد. پژوهش حاضر به منظور مطالعه سازوکارهای همدیدی وقوع این بارش انجام شد. داده های سطوح جو شامل: میانگین فشار سطح دریا (SLP،)ارتفاع ژئوپتان سیل سطوح 500هکتوپاسکال، سرعت قائم جو و جریان باد سطح 500هکتوپاسکال، و جریان رودباد سطح ۵۰۰هکتوپاسکال برای روز مطالعاتی از مرکز ملی پیش بینی محیطی آمریکا/مرکز ملی پژوهش های جویNCEP/NCAR تهیه و نقشـــه ها در نرم افزار متلب رسم و تفسیر شد. نتایج نشان داد: در روز رخداد سیل، مرکز بسته کم ارتفاع با هسته مرکزی در راستای شمال شرق –جنوب غرب سراسر پهنه مطالعاتی را دربر گرفته است. در ادامه پرارتفاع با هسته مرکزی شمال غرب ایران، شمال غرب اروپا و برروی تبت قرار گرفته ا ست و با توجه به قرارگیری پربندهای پرفشار در اطراف کشور ایران و قرارگیری مراکز کم فشار برروی پهنه مطالعاتی و منابع آبی جنوب شیو فشاری شدیدی به وجود آمده است و با افزایش ارتفاع در سطح 500هکتوپاسکال فرودی عمیق در راستای شمال شرق –جنوب غرب برروی ایران قرار گرفته و هسته ناوه کاملا خلیج فارس را دربر گرفته است که منطقه مورد مطالعه در بهترین حالت و درجلو ناوه که با هوای گرم و مرطوب واگرا شده قرار گرفته ا ست. این عمیق شدن چرخند و نفوذ ناوه تا عرضهای پایین، ریزش هوای سرد را باعث شده است که در ادامه باعث تقویت ناوه موثر بر بارش ابر سنگین شده است.

واژه های کلیدی: بارش سنگین، سیل، همدید، متلب

مقدمه

بارش مهم ترین پدیده یا ویژگی محیط زیست است و تاکنون مطالعات فراوانی درباره عوامل ایجاد آن انجام شده است. در هر مکانی بارش زمانی اتفاق می افتد که هوای مرطوب و عامل صعود فراهم شود. هردوی این شرایط به وسیله الگوی گردشی فراهم می شوند علیجانی:(1385)و پهنه مورد مطالعه تحت تاثیر برخی پدیده های آب و هوایی شدید و ناگهانی هم چون بارش سالانه اندک، کوتاه بودن دوره بارش و نزول بارش ها به صورت رگبارهای شدید می باشد. بدین ترتیب این احتمال وجود دارد که بارش های حدی و فراگیر پهنه، از یک الگوی همدید متفاوت ناشی شده با شند. از آنجا که رابطه بین الگوهای گرد شی و بارش رابطه معناداری ا ست.علیجانی، (۱۳۸۱)دستیابی به نتایج قابل قبول در زمینه ارتباط بین این الگوها با بارش حدی و فراگیر پهنه مطالعاتی، نیازمند تحلیل نقشه های همدیدی است. از این رو مهم ترین هدف پژوهش حاضر، بررسی و تحلیل همدیدی بارش ابر سنگین دی ماه 1398پهنه مطالعاتی است. براساس تحقیقات انجام شده در ایران مطالعات متعددی برای یافتن علل همدیدی وقوع بارش های سنگین انجام شده است. مسعودیان و محمدی، (۱۳۸۹)در تحلیل همدید بارش های سنگین ایران به این نتیجه رسیدند که نقش الگوی پرف شار اروپا کم ف شار عراق در رویداد بارش ها قابل توجه است. لشکری و خوزانی، (۱۳۸۹)در بررسی سیستم های سیل زای جنوب به این نتیجه ر سیدند که طوفان های تندری جنوب نا شی از فعالیت سی ستم سودانی و همگرایی دریای سرخ و در مواردی ادغام آن با کمفشار مدیترانه و تشدید شرایط دینامیکی برای ناپایداری است. قائدی و همکاران، (۱۳۹۱)بارش های سنگین ایران را در رابطه با فرود دریای سرخ مطالعه کردند و به این نتیجه ر سیدند که این فرود دلیل برخی از بارش های سنگین ایران می باشد. خوش اخلاق و همکاران، (۱۳۹۳)در بررسی رخداد سیلاب بهبهان به این نتیجه ر سیدند که گسترش کم ف شارمدیترانه سودانی به دلیل قرارگیری بین مراکز پرفشار اروپا و جنب حاره جنوب شرق عربستان سبب تشکیل کمربند همگرایی از روی دریای سرخ می شود. براتی و همکاران، (۱۳۹۴)در برر سی بارش های سیل آسای زنجان نقش رطوبتی دریای مدیترانه را بی شتر از دریای سیاه عنوان کرده و برخورد دو رودباد جنب حاره و جنب قطبی را در تشدید عوامل صعود دخیل می دانند. بلیانی و سلیقه، (1395)در مطالعه خود در خصوص بارش های سنگین شمال خلیج فارس به این نتیجه رسیدند که استیلای ناوه ی دو دامنه ای تأییدی بر زبانه کم فشار شرق مدیترانه در همراهی با زبانه کم فشار شمال شرق و جنوب دریای خزر مهمترین عامل ریزش بارش در این روز بوده که با ناوه سطوح میانی و بالایی همراه شده است .در خارج از ایران نیز مارک و همکاران ,(2010)به برر سی الگوهای سینوپتیک موثر در بارش های سنگین کشور چک پرداختند و به این نتیجه رسیدند که بارش سنگین اغلب در کنار جبهه شبه ساکن مرز لایه های جوی اتفاق می افتد. ریچارد و همکاران ,(۲۰۱۰)به بررسی تاریخچه سینوپتیکی بارش های سنگین پرداخته و از نظر ضخامت

جو الگوها را بررســـی کردند. مبارک و همکاران ,(۲۰۱۱)در بررسی ارتباط بین بارش های شرق ایران با سیکلون واقع در مرکز مدیترانه به افزایش دما در لایه های بالایی جو با حرکات واگرایی و تغییر مســـیر رودباد جنب حاره تاکید کردند. چن ,(2011)به بررســـی تأثیرات ناهمواری ها بر رخداد بارش های سنگین در جنوب غرب تایوان در طول فصل فصل گرم پرداخت و به این نتیجه رســـید که صـــعود توده هوای مرطوب از کوهســـتان علت بار ش های ســـنگین در این منطقه اســـت. اولیوریا و همکاران (2013)به بررسی خصوصیات سینوپتیکی بارش های سنگین در قسمت های شمالی برزیل پرداختند و به این نتیجه رسیدند که توزیع بارندگی در سال های مربوط به لانینا بیشتر و در سال های مربوط به النینو کمتر است.

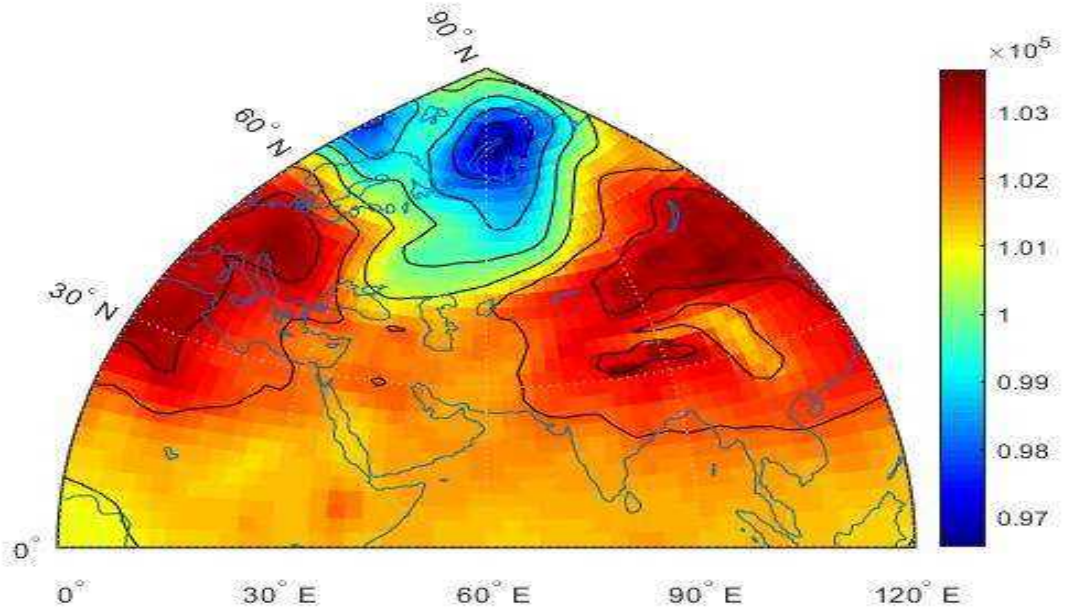
پفال(۲۰۱۴)،نقش الگوی بندالی دوقطبی در شمال اطلس و اروپا را در رخداد بارش سنگین اروپا حائز اهمیت می داند. لی و آلبرتوس (۲۰۱۵)به بررسی مسیر سینوپتیکی رطوبت رسانی در وقوع بارش سنگین 21ژوئیه در منطقه بِیجینگ پرداختند و وُرتکس شـــمال غربی در ترازهای پایین به همراه رطوبت قائم موجود در جو را علل وقوع بارش دان ستند .هدایت و همکاران (2016)در بررسی علل رخداد بارش های سنگین در ف صول مرطوب در دریای جاوا به این نتیجه رسیدند که همرفت بین ن سیم دریا و خ شکی و بازتابش امواج از سطح خشکی علت بارش های سنگین است .فلونی و همکاران , (2016)به مطالعه سینوپتیکی علت وقوع بارش سنگین فصلی در منطقه آتیکا پرداختند. اوین و همکاران (2016)درباره مدل های پیش بینی بارش سنگین مطالعه کردند .کایی و ژوئی (2017)در بررســـی جفت پارامترهای رطوبت دهی در بارش های ســـنگین منطقه ای، به این نتیجه رسیدند واگرایی و همگرایی، اساس تغییرات رودباد برای فراهم کردن رطوبت لازم برای بارش های سنگین ا ست. برر سی مطالعات صورت گرفته در رابطه بارش های سنگین، ن شان می دهد تحلیل سینوپتیکی و در برخی موارد تحلیل های دینامیکی از روش های پرکاربرد در زمینه مطالعه بارش های سنگین می باشند. در مطالعات مذکور عوامل مختلفی برای ایجاد بارش سنگین شناسایی شده است که می توان به مواردی از قبیل سیستم های کمفشار و پرفشار، ناوه های تراز میانی جو، رودبادهای جبهه قطبی و جنب حاره، سردچال، بلاکینگ ها و دورپیوندها اشاره کرد. لذا هر بارش سنگین منشاء و سیستم های فشاری به وجود آورنده خاص خود را دارد و بررسی و شناسایی آنها به منظور انجام پیش بینی و ارائه هشدارهای لازم جهت جلوگیری و کاستن از خسارات جانی و مالی حائز اهمیت می باشد. در تحقیق حاضر، با استفاده از تحلیل های همدیدی به بررســـی ســـازوکارهای جوی ایجاد کننده بارش ســـنگین منجر به ســـیل دی ماه ۱۳۹۸در پهنه مطالعاتی پرداخته شد.

داده ها و روش کار

داده های سطوح جو شامل: میانگین فشار سطح دریا (،SLP)ارتفاع ژئوپتانسیل سطوح 500هکتوپاسکال، سرعت قائم جو و جریان باد سطوح 500هکتوپاسکال، برای روزمطالعاتی از مرکز ملی پیش بینی محیطی آمریکا/مرکز ملی پژوهش های جوی NCEP/NCAR در محدوده ۰ تا ۹۰ درجه عرض شمالی و محدوده ۰ تا ۱۲۰ درجه شرقی تهیه شده است و درنهایت نقشه ها در نرم افزار متلب ترسیم و بعد مورد تحلیل قرار گرفت .

یافته های پژوهش

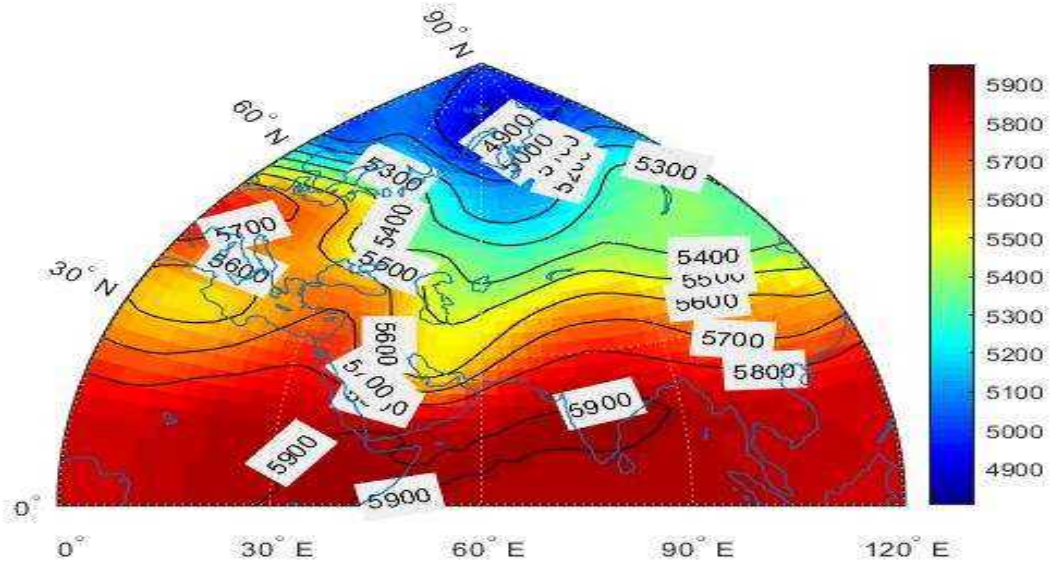
فشار سطح دریا(slp)



شکل ۱:نقشه فشار سطح دریا

پرارتفاع با هسته مرکزی شمال غرب ایران، شمال غرب اروپا و برروی تبت قرار گرفته ا ست و با توجه به قرارگیری پربندهای پرف شار در اطراف ک شور ایران و قرارگیری مراکز کم ف شار برروی پهنه مطالعاتی و منابع آبی جنوب شیو فشاری شدیدی به وجود آمده ا ست و با فرارفت رطوبت منابع آبی جنوب به درون کم فشار مستقر برروی پهنه مطالعاتی بارش ابر سنگین در روز ۲۱ دی ماه 1398در ایستگاه های مطالعاتی رخ داده است.

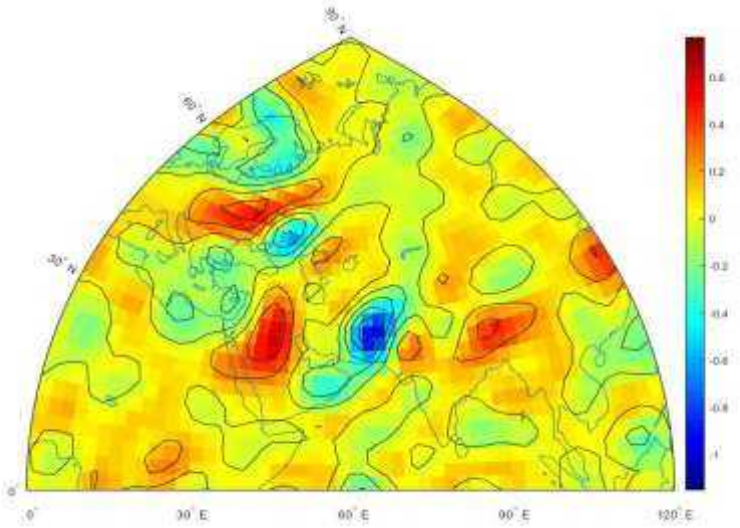
ارتفاع ژئوپتانسیل(hgt)



شکل۲:نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل جو

در ۲۱ دی ماه (شکل ۲) فرود عمیقی شمال شرق –جنوب غرب برروی ایران قرار گرفته و هسته ناوه کاملا خلیج فارس را دربر گرفته ا ست که منطقه مورد مطالعه در بهترین حالت و درجلو ناوه که با هوای گرم و مرطوب واگرا شده قرار گرفته است. این عمیق شدن چرخند و نفوذ ناوه تا عرضهای پایین، ریزش هوای سرد را باعث شده است که در ادامه باعث تقویت ناوه موثر بر بارش ابرسنگین در روز 21دی ماه 1398شده است

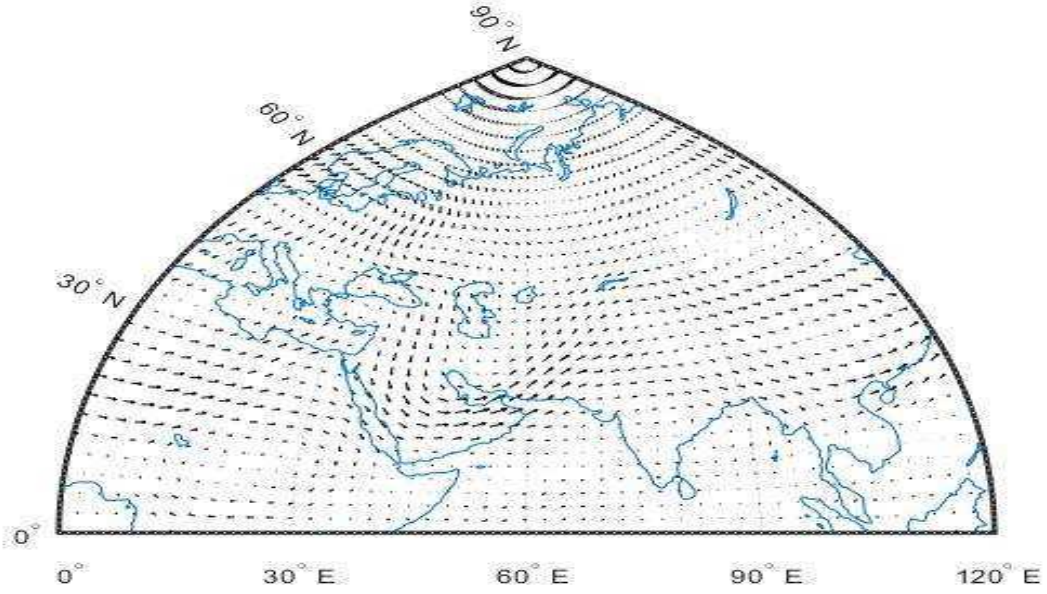
سرعت قائم جو (Omega)



شکل۳: نقشه سرعت قائم هوا

در روز ۲۱ دی ماه ۱۳۹۸ با توجه به شکل ۳ برر سی همدیدی سرعت قائم جو سطح 500هکتوپا سکال نشان می دهد، بیشینه امگای منفی به 0/6-پا سکال برثانیه رسیده است که در راستای شمال شرق –جنوب غرب از زاهدان تا تنگه هرمز را دربر گرفته اســـت. با افزایش مقدار امگا در ســـطوح میانی جو ریزش هوای ســـرد افزایش پیدا کرده اســـــت. به بیان دیگر در ســـــطوح میانی جو با افزایش اختلاف دما بین ســـــطح زمین و ســـــطح ۵۰۰ هکتوپاسکال، بر مقدار بارشها افزوده شده شده است

مولفه مداری و نصف النهاری باد(Uwnd,Vwnd)



شکل ۴: نقشه مولفه مداری و نصفالنهاری باد

جریان باد سطح 500هکتوپاسکال نشان می دهد چرخند با حرکت پادساعتگرد خود هوای عرضهای بالاتر را به درون ناوه موثر بر بارش ابرسنگین تزریق کرده و سبب عمیق شدن آن شده است و به دلیل قرارگیری در جلو ناوه واگرایی شدید در تراز بالا بوده که منجر به همگرایی تراز پایین و تقویت و تشدید ناپایداری ها در مناطق مطالعاتی شده است. از سوی دیگر جریان واچرخند با حرکت ساعتگرد برروی دریای عرب مستقر است که سبب انتقال هوای گرم و مرطوب منابع آبی جنوب و افزایش بارش در منطقه شده است. به عبارت دیگر نحوه قرارگیری پرارتفاع عربستان سبب شده تا رطوبت سطحی با حرکات قائم بالا سو به ترازهای بالاتر برسد.

نتیجه گیری

در روز ۲۱دی ماه ۱۳۹۸(۱۱ ژانویه ۲۰۲۰) به دلیل وقوع بارندگی شدید و جاری شدن سیل خ سارت های ب سیاری به استان های سیستان و بلوچستان و هرمزگان وارد شد. پژوهش حاضر به منظور مطالعه سازوکارهای همدیدی وقوع این بارش انجام شد. نتایج نشان داد: در روز رخداد سیل، مرکز بسته کم ارتفاع با هسته مرکزی در راستای شمال شرق –جنوب

غرب سراسر پهنه مطالعاتی را در برگرفته است. در ادامه پرارتفاع با هسته مرکزی شـــمال غرب ایران، شـــمال غرب اروپا و برروی تبت قرار گرفته اســـت و با توجه به قرارگیری پربندهای پرفشـــار در اطراف کشـــور ایران و قرارگیری مراکز کم فشـــار برروی پهنه مطالعاتی و منابع آبی جنوب شـــیو فشاری شدیدی به وجود آمده است و با فرارفت رطوبت منابع آبی جنوب به درون کم فشار مستقر برروی پهنه مطالعاتی بارش ابر سنگین در روز 21دی ماه 1398در ای ستگاه های مطالعاتی رخ داده ا ست. با افزایش ارتفاع در سطح ۵۰۰ فرودی عمیق در راستای شمال شرق –جنوب غرب برروی ایران قرار گرفته و ه سته ناوه کاملا خلیج فارس را دربر گرفته اســـت که منطقه مورد مطالعه در بهترین حالت و درجلو ناوه که با هوای گرم و مرطوب واگرا شـــده قرار گرفته ا ست. این عمیق شدن چرخند و نفوذ ناوه تا عرضهای پایین، ریزش هوای سرد را باعث شده ا ست که در ادامه باعث تقویت ناوه موثر بر بارش ابرسنگین شده است. وهمچنین نقشه رودباد نشان داد که رودباد با عبور از روی خلیج فارس ســراســر پهنه مطالعاتی را در بر گرفته اســت و باد کاملا نصف النهاری شده ا ست و با توجه به قرارگیری پهنه مطالعاتی باد مقدار بارش در این روز به حداکثر مقدار خود رسیده است در ادامه برر سی همدیدی سرعت قائم جو ن شان میدهد که با افزایش ارتفاع بیشینه امگای منفی افزایش پیدا کرده و به ۰.۶-پاسکال بر ثانیه رسیده و هسته بیشینه امگای منفی کاملا برروی منطقه جنوب و جنوب شرق قرار گرفته است. قرارگیری هسته امگای منفی برروی پهنه مطالعاتی نشان از ناپایداری شدید و صعود هوا و رخداد بارش ابرسنگین در روز مطالعاتی دارد.

منابع

براتی، غ ر؛ مرادی م و ســـلیمی۱۳۹۴ «واکاوی همدید بارش های ســـنگین بهاره اســـتان زنجان»، مجله مخاطرات محیطی طبیعی، (6) : 78-88. 4

بلیاتی، س ،سلیقه.م۱۳۹۵«تحلیل و ا ستخراج الگوهای جوی منجر به بارش های سنگین روزانه منطقه شمالی خلیج فارس»، نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، 2: 79-98.

خوش اخلاق، ف؛ صفایی راد.ر سلمانی.د ۱۳۹۷«واکاوی همدید رخداد سیلاب آبان ماه 1390درشهرستان های بهبهان و لیکک»، فصلنامه پژوهش های جغرافیای طبیعی، 4: 509-524.

علیجانی، ب .۱۳۸۱«شناسایی تیپ های هوایی باران آور تهران براساس محاسبه چرخندگی»،فصلنامه تحقیقات جغرافیایی،

علیجانی، ب۱۳۸۵«اقلیم شناسی سینوپتیک»، چاپ دوم، انتشارات سمت، تهران.

لشگری،ح ۱۳۹۳«اقلیم شناسی دینامیک»،چاپ اول، انتشارات دانشگاه شهید بهشتی،تهران

قائدی، س؛ موحدی.س و مسعودیان س.ا،۱۳۹۱«رابطه فرود دریای سرخ با بارش های سنگین ایران»، ف صلنامه جغرافیا و پایداری محیط، 2: 1-18.

لشکری، ح و پرنده خوزانی.الف۱۳۸۹«بررسی سینوپتیکی سیستم های سیل زا در جنوب کشور»، فصلنامه تحقیقات منابع آب ایران، 1: 66-73.

مسعودیان، س.ا ،محمدی.ب ۱۳۹۶«تحلیل همدید بارش های سنگین ایران مطالعه موردی آبان ماه» ،۱۳۷۳ فصلنامه جغرافیا و توسعه 19: 19 -36.

یارنال، برنت۱۳۹۳«اقلیم شناسی همدید و کاربرد آن در مطالعات محیطی.» ترجمه ابوالفضل مسعودیان. ۱۳۸۵انتشارات دانشگاه اصفهان.

Evin, G., Balanchet, J., Paquet, E,. Garavaglia, F., Penot, D.2016. A regional model for extreme Rainfall based on weather patterns subsampling. Journal of Hydrology, 541: 1185-1198.

Feloni, E., Nastos, P.T., Mastanguras, I.2016 .Seasonal Synoptic characteristics of heavy rain events In the Attica region. 13th International Conference on Meteorology Climatology and Atmospheric Physics, 6: 1-16.

Hidayat, R., Pawitan, H., Aldrian, E., Nuryanto, D.2016. Heavy Rainfall distributions over Java Sea in wet season. Procedia Environmental Sciences, 33: 178-186.

John, M.P., Pauls, J.R.2014. Synoptic Control of Heavy –Rain Producing Convective Training Episodes. MONTHLY WEATHER REVIEW,5: 2464-2482.

Kai, Y., Zhiwei, Z.2017.A pair of new moisture dynamic diagnostic parameters for Heavy rain location. Springer- verlag Wien.

Li L., Albertus J. D.2015.Trajectory Analysis of the Heavy rain in Beijing. Earth and Climate Cluster,7: 23-24.

Marek, K., Miloslav, Muller. 2010.Variants of synoptic-scale patterns inducing heavy Rains in the Czech Republic. Physics and Chemistry of the Earth, 35: 477-483.

Synoptic analysis of heavy rainfall on January 11, 2019

(Case study: South and southwest of the country)

Ahmad Safari[1]* Maryam Ghaisvandy[2]

۱- PhD student in meteorology, University of Zanjan Ahmadsafariut1@gmail.com

۲- PhD student in meteorology, University of Zanjan Maryam.ghesvandy2018@gmail.com

Abstract

On January 11, 2020, due to heavy rainfall and flooding, Sistan and Baluchestan and Hormozgan provinces suffered significant damage. The present study was conducted to study the synoptic mechanisms of this rainfall. Atmospheric surface data including: mean sea level pressure (SLP), geopath height of flood levels at 500 hectopascals, atmospheric vertical speed and wind flow at 500 hectopascals, and wind flow at 500 hectopascals for the study day were obtained from the National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR) and the maps were drawn and interpreted in Matlab software. The results showed that: On the day of the flood, the low-altitude closed center with a central core in the northeast-southwest direction covered the entire study area. The high-altitude closed center with a central core was located in northwest Iran, northwest Europe, and over Tibet. Considering the location of the high-altitude closed centers, the High pressure around Iran and the location of low pressure centers over the study area and water resources south of Shiv have created severe pressure, and with an increase in altitude at the level of 500 hectopascals, a deep depression has formed in the northeast-southwest direction over Iran, and the core of the trough has completely covered the Persian Gulf, which is the study area in the best condition and in front of the trough, which is diverged with warm and humid air. This deepening of the circulation and the penetration of the trough to low latitudes have caused the fall of cold air, which has further strengthened the trough affecting heavy cloud precipitation.

Keywords: Heavy rainfall, Flood, Synoptic, MATLAB

کاربرد مدل‌های داده-مبنا در شبیه‌سازی بارش ماهانه (مطالعه موردی: ایستگاه سینوپتیک سرعین)

محمدرضا نیک‌پور[1]*

۱- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی

* آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول (m_nikpour@uma.ac.ir)

چکیده

در دهه‌های اخیر ارتقاء توان پردازشگرها و توسعه مدل‌های داده-مبنا موجب گردیده تا عرصه‌های جدیدی در زمینه بهبود روش‌های شبیه‌سازی متغیرهای هیدرولوژیکی پیش روی پژوهشگران قرار گیرد. در تحقیق حاضر به منظور شبیه‌سازی بارش ماهانه ایستگاه سینوپتیک سرعین از مدل‌های برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) و حداقل مربعات ماشین بردار پشتیبان (LSSVM) استفاده شد. بر اساس داده‌های موجود، مقادیر بارش ماهانه به‌ازای دوره آماری ۲۰۲۴-۲۰۰۸ مورد استفاده قرار گرفت. برای شبیه‌سازی کوتاه مدت بارش ماهانه (یک ماه بعد) چهار الگوی مختلف بر اساس تأخیر بارش و پارامتر دما (میانگین، کمینه و بیشینه) تعریف شد. برای ارزیابی نتایج مدل از شاخص‌های ضریب تعیین (R2)، حداقل ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و شاخص کارایی نش-ساتکلیف (NSE) استفاده شد. نتایج نشان داد عمکرد مدل LSSVM در مقایسه با مدل GEP تا حدودی بهتر بود. به‌طوری‌که مقادیر R2، NSE و RMSE برای مدل LSSVM به‌ازای بهترین سناریو در مرحله آزمون به‌ترتیب برابر ۰/۸۴۲، ۰/۸۳۶ و ۱۰/۸۶۰ میلی‌متر به‌دست آمد.

کلید واژه‌ها: ایستگاه سرعین، بارش ماهانه، برنامه‌ریزی بیان ژن، حداقل مربعات ماشین بردار پشتیبان.

مقدمه

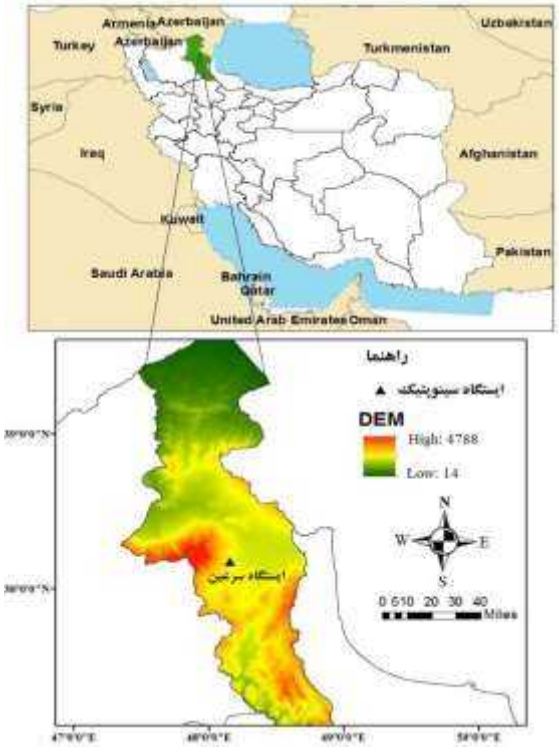
بارش به عنوان یکی از عناصر اصلی چرخه آب در کره زمین، تحت تأثیر روابط پیچیده و غیرخطی بین سامانه اقلیم و عوامل محیطی قرار دارد. از این‌رو، پیش‌بینی دقیق بارش ماهانه نقش اساسی در حفظ، مدیریت و تخصیص منابع آب، تخمین نیاز آبی محصولات کشاورزی و هم‌چنین ارزیابی میزان فرسایش و رسوب‌گذاری در حوضه‌های آبریز دارد (فرجی و همکاران، ۱۴۰۴). با پیشرفت پردازشگرها و توسعه علوم کامپیوتر، استفاده از محاسبات نرم و مدل‌های داده-مبنا به‌منظور تخمین پدیده‌های مختلف هیدرولوژیکی و از جمله بارش، راه‌حلی منطقی و مقرون به صرفه می‌باشد. کدخداحسینی و همکاران (۱۳۹۵) از مدل‌های شبکه‌های عصبی چندلایه (MLP) و ماشین بردار پشتیبان (SVM) برای بازسازی داده‌های بارش ماهانه چهار ایستگاه باران‌سنجی واقع در استان همدان، طی دوره آماری ۱۳۸۹-۱۳۷۰، استفاده کردند. بر اساس نتایج

حاصل شده، مدل MLP در بازسازی داده‌های بارش ماهانه و مدل SVM در بازسازی داده‌های بارش فصلی از عملکرد قابل قبولی برخوردار بودند. سلگی و همکاران (۱۳۹۵) مدل‌های WANN و ANN را برای شبیه‌سازی بارش ایستگاه وراینه در شهرستان نهاوند مورد استفاده قرار دادند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که مدل WANN عملکرد بهتری داشته و می‌تواند با دقت قابل قبول برای پیش‌بینی بارش‌های کوتاه مدت و بلندمدت استفاده شود. گودرزی و روزبهانی (۱۳۹۶) توانایی مدل‌های سری زمانی را در پیش‌بینی دما و بارش ماهانه ایستگاه لتیان مورد بررسی قرار دادند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که مدل‌های آریمای فصلی و هالت‌وینترز قابلیت بالایی در پیش‌بینی مقادیر پیک بارش ماهانه در ایستگاه لتیان ندارند. این مدل‌ها عمدتاً مقادیر بارش‌های پایین و متوسط را بهتر برآورد می‌کنند و تخمین‌گر مناسبی در بارش‌های بالا نیستند. فرجی و همکاران (۱۴۰۴) به منظور پیش‌بینی بارش تجمعی ۲۴ ساعته در مناطق مختلف ایران از مدل MLP و درخت تصمیم (DT) استفاده کردند. در پژوهش مذکور، مدل MLP با حداقل‌سازی پارامتر MSE به میزان ۰/۰۴ کارایی چشمگیری از خود نشان داد. همچنین بر اساس تحلیل‌های درخت تصمیم، استان‌های ایران بر اساس ویژگی‌های بارش به هفت خوشه تقسیم‌بندی شدند. Venkata-Ramana et al. (2025) از مدل‌های WANN و ANN برای شبیه‌سازی بارش ماهانه استفاده کردند که نتایج حاکی از عملکرد بهتر مدل WANN بود. Kumar et al. (2025) از الگوریتم‌های متنوع یادگیری ماشین شامل MLP، RF، XGBoost، CatBoost و LR برای تخمین بارش‌های روزانه و هفتگی استفاده کردند. نتایج حاکی از عملکرد قابل قبول همه مدل‌ها بود و در این میان، مدل XGBoost نتایج نسبتاً بهتری به همراه داشت. با توجه به عملکرد قابل تحسین مدل‌های داده-مبنا در شبیه‌سازی و تخمین میزان بارش، در پژوهش حاضر برای شبیه‌سازی بارش ماهانه ایستگاه سینوپتیک سرعین واقع در استان اردبیل، از مدل‌های برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP) و حداقل مربعات ماشین بردار پشتیبان (LSSVM) استفاده شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

ایستگاه سینوپتیک سرعین در طول جغرافیایی $48^{o}04'50"$ و عرض جغرافیایی $38^{o}08'49"$ در سال ۱۳۸۱ در استان اردبیل تأسیس شده است. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همچنین خصوصیات آماری مقادیر متغیرهای بارش و دما در ایستگاه سینوپتیک سرعین طی دوره آماری ۲۰۲۴-۲۰۰۸ در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

جدول ۱- خصوصیات آماری مقادیر ماهانه بارش و دما در ایستگاه سینوپتیک سرعین طی دوره ۲۰۲۴-۲۰۰۸

متغیر	میانگین	بیشینه	کمینه	انحراف معیار	چولگی
بارش	۳۲/۹۳	۱۳۵/۸	۰	۲۴/۳۲۴	۱/۰۴۶
دما	۱۰/۵۹	۳۹	-۲۲/۶	۷/۵۷۹	-۰/۱۵۴

برنامه‌ریزی بیان ژن (GEP)

برنامه‌ریزی بیان ژن تعمیم‌یافته الگوریتم ژنتیک است که اولین بار توسط فریرا در سال ۱۹۹۹ ارائه شد (Ferreira, 2001). اولین گام در این مدل، تولید جمعیت اولیه از راه حل‌هاست. در گام بعدی، کروموزوم‌ها به‌صورت بیان درختی اظهار شده، که این هم مطابق با یک تابع برازش ارزیابی می‌شود تا میزان متناسب بودن یک راه حل در حیطه مسأله تعیین شود. اگر کیفیت رضایت‌بخش از یک راه‌حل پیدا شود و یا نسل‌ها به تعداد معینی برسد، تکامل متوقف شده و بهترین راه حل یافت

شده تا به حال، گزارش داده می‌شود. از طرف دیگر اگر شرایط توقف یافت نشود، بهترین راه‌حل از نسل حاضر نگه داشته می‌شود و بقیه راه حل‌ها به فرآیندی گزینشی واگذار می‌شوند. گزینش یا انتخاب، نقش بقاء شایستگی را انجام می‌دهد و بر اساس آن بهترین افراد فرصت بهتری برای تولید فرزندان دارند. کل این روند برای چندین نسل تکرار می‌شود و با پیش رفتن نسل به جلو، انتظار می‌رود که کیفیت جمعیت نیز به‌طور متوسط بهبود یابد (Ferreira, 2006). در تحقیق حاضر، برای به‌کارگیری مدل برنامه‌ریزی بیان ژن از نرم‌افزار GeneXproTools استفاده گردید. پس از تحلیل حساسیت مدل برنامه‌ریزی بیان ژن در تخمین دبی، پارامترهای مورد استفاده و نرخ آنها در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- مقادیر پارامترهای مورد استفاده در روش برنامه‌ریزی بیان ژن

تنظیمات کلی		عملکردهای ژنتیکی	
تعداد کروموزوم ها	۳۰	نرخ جهش	۰/۰۴۴
اندازه راس	۷	نرخ وارون سازی	۰/۱
تعداد ژن در هر کروموزوم	۳	نرخ ترانهش درج متوالی	۰/۱
تعداد جمعیت تولیدی	۱۰۰۰	نرخ ترانهش ریشه درج متوالی	۰/۱
تابع پیوند	مجموع (+)	نرخ ترکیب تک نقطه‌ای	۰/۳

حداقل مربعات ماشین بردار پشتیبان (LSSVM)

ایده اصلی ماشین بردار پشتیبان (SVM) که به عنوان روش‌های طبقه‌بندی و رگرسیونی و شناخته می‌شوند، توسط Vapinc (1998) مطرح شد. در این مدل، سعی بر این است تا وابستگی بین مجموعه داده‌های ورودی $X = \{\vec{x}_1, \vec{x}_2, \dots, \vec{x}_n\}$ از فضای Rn و مقادیر خروجی $Y = \{\vec{y}_1, \vec{y}_2, \dots, \vec{y}_n\}$ که در آن $y_i \in R$ از طریق تابع $y(\vec{x_i})$ تخمین زده شود. هم‌چنین فرض بر این است که نمونه‌ها به‌صورت مستقل و از یک توزیع احتمالاتی نامعین جمع‌آوری شده‌اند. در مدل SVM برای حل معادلات از برنامه‌ریزی دوگانه استفاده می‌شود. لذا حل مسائل در ابعاد بزرگ با استفاده از مدل مذکور، هزینه محاسباتی را به‌شدت افزایش می‌دهد. برای رفع این مشکل، Suykens et al. (2002) روش حداقل مربعات ماشین بردار پشتیبان (LSSVM) را ارائه نمودند. در این روش از معادلات خطی ساده برای حل مسائل استفاده می‌شود که به‌طور مؤثری پیچیدگی الگوریتم را کاهش داده و افزایش سرعت محاسبات را نسبت به مدل SVM به دنبال دارد. برای تحلیل حساسیت مدل LSSVM توابع کرنل خطی، چندجمله‌ای و پایه شعاعی مورد آزمون قرار گرفت که از بین توابع مذکور، کرنل پایه شعاعی از بالاترین سرعت و کمترین خطا برخوردار بود.

داده‌های مورد استفاده و تعریف سناریوها

داده‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر شامل مقادیر ماهانه بارش و دما (بیشینه، کمینه و میانگین)، طی دوره زمانی ۲۰۲۴-۲۰۰۸ بود. تعداد داده‌ها در مقیاس ماهانه برابر ۲۰۵ بود که ۷۰٪ آن برای مرحله آموزش و ۳۰٪ برای مرحله آزمون (تست) مورد استفاده قرار گرفت. به‌منظور اولویت‌بندی پارامترهای تأثیرگذار بر میزان بارش ماه فعلی (Rt) و تعریف الگوها، از آزمون همبستگی در محیط SPSS استفاده شد. بر اساس نتایج آزمون همبستگی، بارش ماه قبل (Rt-1) بیشترین همبستگی را با بارش ماه فعلی (Rt) داشت، بنابراین به عنوان تنها متغیر ورودی در اولین الگو به‌کار گرفته شد. متغیرهای دمای میانگین (Tave)، دمای کمینه (Tmin) و دمای بیشینه (Tmax) نیز در الگوهای بعدی به‌کار گرفته شدند. در جدول ۳، الگوهای مورد استفاده در پژوهش حاضر برای شبیه‌سازی بارش ماهانه ایستگاه مورد مطالعه، ارائه شده است.

جدول ۳- الگوهای تعریف شده در پژوهش حاضر برای شبیه‌سازی بارش ماهانه ایستگاه سینوپتیک سرعین

سناریو	متغیرهای ورودی				خروجی
۱	Rt-1				Rt
۲	Rt-1	Tave			Rt
۳	Rt-1	Tave	Tmin		Rt
۴	Rt-1	Tave	Tmin	Tmax	Rt

معیارهای ارزیابی مدل

در تحقیق حاضر، به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل‌ها از شاخص آماری ضریب تعیین (R2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و شاخص کارایی نش-ساتکلیف (NSE) مطابق با روابط ۱ تا ۳ استفاده شد.

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^{N}(R_O-\bar{R}_O)(R_M-\bar{R}_M)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(R_O-\bar{R}_O)^2 \sum_{i=1}^{N}(R_M-\bar{R}_M)^2}} \right) \quad (۱)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(R_O - R_M)^2} \quad (۲)$$

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^{N}(R_O-R_M)^2}{\sum_{i=1}^{N}(R_O-\bar{R}_O)^2}\right], -\infty \le NSE \le 1 \quad (۳)$$

در روابط فوق، N تعداد داده‌ها، R_O مقدار بارش اندازه‌گیری شده و R_M مقدار بارش شبیه‌سازی شده توسط مدل در گام زمانی i ام می‌باشد. همچنین $\bar{R}_O$ متوسط مقدار بارش اندازه‌گیری شده می‌باشد.

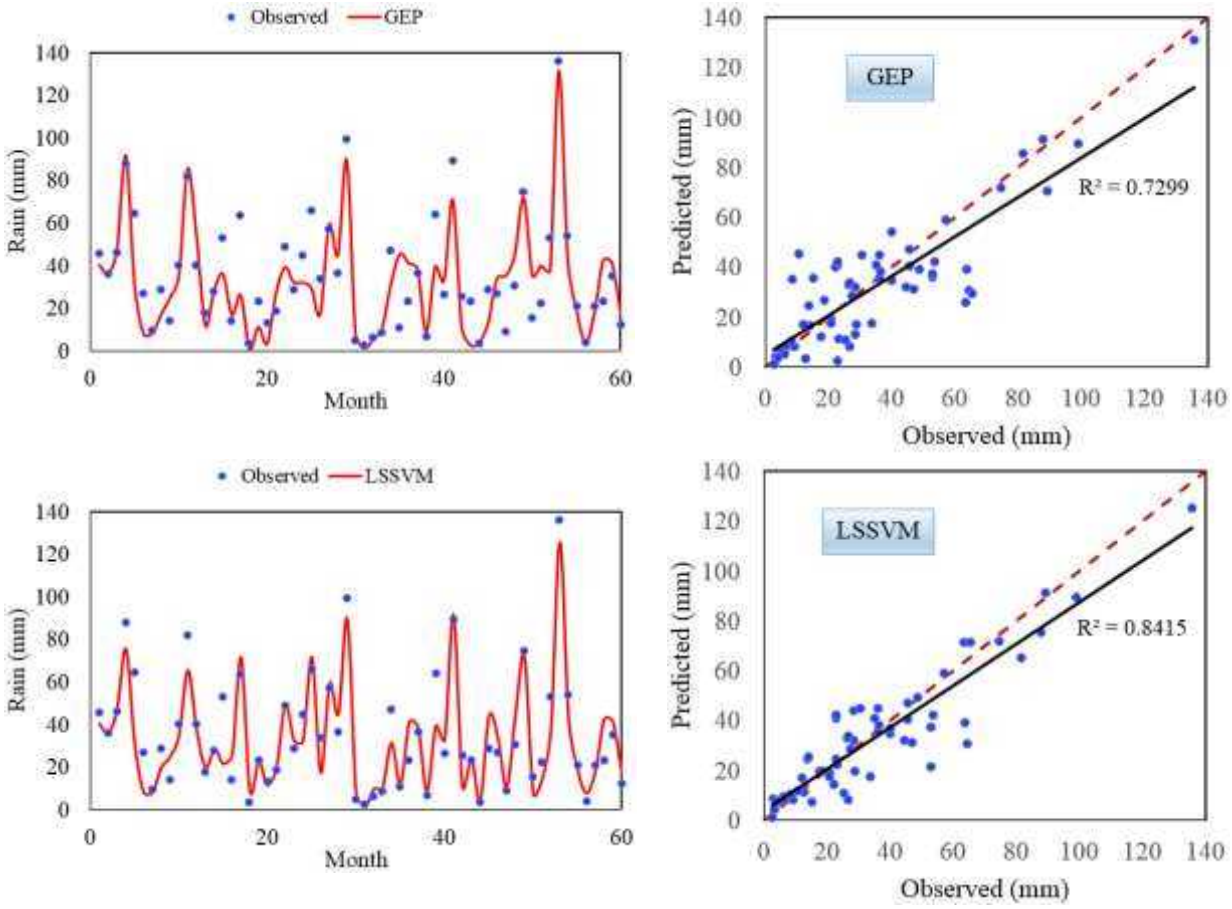
نتایج و بحث

در جدول ۴ عملکرد مدل‌های GEP و LSSVM به‌ازای الگوهای ورودی تعریف شده، مطابق با جدول ۳ در قالب شاخص‌های آماری خطا برای ایستگاه سینوپتیک سرعین در دوره آزمون نشان داده شده است. نتایج حاکی از عملکرد ضعیف مدل‌ها به‌ازای سناریوی اول بود. می‌توان نتیجه گرفت که شبیه‌سازی بارش ماهانه برای ایستگاه سینوپتیک سرعین، صرفاً با به‌کارگیری مقادیر بارش ماه قبل با خطای بالا همراه می‌باشد. هم‌چنین مشاهده می‌شود که اضافه شدن متغیر دما (دمای میانگین، کمینه و بیشینه) به پارامترهای ورودی، به میزان قابل ملاحظه‌ای خطای مدل‌ها را کاهش می‌دهد. طبق نتایج به‌دست آمده، بهترین عملکرد مدل‌های GEP و LSSVM متعلق به سناریوی شماره ۴ (شامل همه متغیرها) می‌باشد. مقادیر R2، NSE و RMSE برای مدل GEP به‌ازای بهترین سناریو در مرحله آزمون به‌ترتیب برابر ۰/۷۳۰، ۰/۷۱۶ و ۱۴/۲۹۰ میلی‌متر به‌دست آمد. هم‌چنین طبق نتایج، مقادیر مذکور برای مدل LSSVM به‌ترتیب برابر ۰/۸۴۲، ۰/۸۳۶ و ۱۰/۸۶۰ میلی‌متر حاصل شد. با مقایسه شاخص‌های آماری، برتری مدل LSSVM در شبیه‌سازی بارش ماهانه ایستگاه مورد مطالعه مشهود است.

در شکل ۲ نمودارهای سری زمانی و پراکندگی حول نیمساز ۴۵ درجه به‌ازای بهترین سناریو (الگوی شماره ۴) برای ایستگاه سرعین در دوره آزمون نمایش داده شده است. با مقایسه نمودارهای سری زمانی، در مدل LSSVM تطابق بهتری بین مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده مشاهده می‌شود. علاوه بر آن، از نظر تجمع نقاط حول خط یک‌به‌یک نیز مدل LSSVM عملکرد بهتری داشته است. با وجود کارایی قابل قبول مدل‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر، برای بهبود نتایج پیشنهاد می‌شود از تبدیل موجک برای پیش‌پردازش (تجزیه) داده‌ها استفاده شود. ضمناً تأثیر سایر پارامترهای اقلیمی شامل رطوبت نسبی و سرعت باد نیز بر روی آموزش بهتر شبکه بررسی شود.

جدول ۴- نتایج مدل‌های هوشمند مورد استفاده در پژوهش حاضر برای شبیه‌سازی بارش ماهانه ایستگاه سرعین به‌ازای سناریوهای مختلف

	مدل GEP			مدل LSSVM		
شماره سناریو	R2	RMSE	NSE	R2	RMSE	NSE
۱	۰/۲۹۱	۱۸/۳۰۹	۰/۲۷۹	۰/۴۷۹	۱۵/۳۷۱	۰/۴۶۳
۲	۰/۶۸۰	۱۶/۵۴۱	۰/۶۷۱	۰/۷۰۲	۱۲/۶۰۹	۰/۶۸۹
۳	۰/۷۰۹	۱۴/۹۷۹	۰/۶۹۲	۰/۸۱۹	۱۱/۰۰۸	۰/۸۰۳
۴	۰/۷۳۰	۱۴/۲۹۰	۰/۷۱۶	۰/۸۴۲	۱۰/۸۶۰	۰/۸۳۶



شکل ۲- تغییرات سری زمانی و پراکندگی مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده بارش ماهانه توسط مدل‌های هوشمند به‌ازای دوره آزمون

منابع

فرجی، م.، رضایی، م.، ساری صراف، ب.، و خورشیددوست، ع.م. (۱۴۰۴). داده‌کاوی داده‌های بارش تجمعی ۲۴ ساعته ایران با استفاده از یادگیری ماشین شبکه عصبی پرسپترون چندلایه و درخت تصمیم. مجله اکو هیدرولوژی، ۱۲(۲)، ۸۱۰-۷۹۹.

سلگی، الف.، زارعی ح.، پورحقی، الف.، و خدابخشی، ح. (۱۳۹۵). پیش‌بینی بارش ماهانه با مدل ترکیبی شبکه عصبی مصنوعی موجک و مقایسه با مدل شبکه عصبی مصنوعی. فصلنامه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب، ۶(۲۳)، ۳۳-۱۸.

کدخداحسینی، م.، شامحمدی، ش.، میرعباسی، ر.، و نوذری، ح. (۱۳۹۵). ارزیابی عملکرد شبکه‌های عصبی مصنوعی و ماشین‌بردار پشتیبان در بازسازی داده‌های ماهانه و فصلی بارش در ایستگاه‌های باران‌سنجی (مطالعه موردی: استان همدان). مجله پژوهش آب ایران، ۱۱(۳)، ۱۰۰-۹۱.

گودرزی، ل.، و روزبهانی، ع. (۱۳۹۶). بررسی کارایی مدل‌های سری زمانی آریما و هالت‌وینترز در پیش‌بینی دما و بارش ماهانه (مطالعه موردی: ایستگاه لتیان). نشریه علوم و مهندسی آبیاری،۴۰(۳)، ۱۴۹-۱۳۷.

Ferreira, C. (2001). Gene Expression Programming: a New Adaptive Algorithm for Solving Problems. Complex Systems. 13(2), 87–129.

Ferreira, C. (2006). Automatically defined functions in gene expression programming. In Genetic Systems Programming. Springer Berlin Heidelberg. 21-56.

Kumar, V., Kedam, N., Kisi, O. et al. (2025). A Comparative Study of Machine Learning Models for Daily and Weekly Rainfall Forecasting. Water Resources Management. 39, 271–290.

Suykens, J.A., De Brabanter, J., Lukas, L., & Vandewalle, J. (2002). Weighted least squares support vector machines: robustness and sparse approximation. Neurocomputing, 48(1), 85-105.

Vapnic, V.N. (1998). Statistical Learning Theory. Wiley, NEW YORK: USA.

Venkata-Ramana, R., Krishna, B., Kumar, S.R., & Pandey, N.G. (2013). Monthly Rainfall Prediction Using Wavelet Neural Network Analysis. Water Resources Management, 27, 3697–3711.

Application of data-driven models in simulating the monthly rainfall (Case study: Sarein synoptic station)

Mohammad Reza Nikpour1*

1* Associate Professor, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
E-mail: m_nikpour@uma.ac.ir

Abstract

In recent decades, the improvement of processor power and the development of data-driven models have opened up new avenues for researchers to improve methods for simulating hydrological variables. In the present study, gene expression programming (GEP) and least squares support vector machine (LSSVM) models were applied to simulate monthly rainfall at the Sarein synoptic station. Based on available data, monthly rainfall values were utilized for the statistical period of 2008-2024. For short-term simulation of monthly rainfall (one month later), four different patterns were defined based on precipitation delay and temperature parameters (average, minimum, and maximum). To evaluate the model results, the statistical indices were used including, the coefficient of determination (R2), root mean square error (RMSE), and

Nash-Sutcliffe efficiency index (NSE). The results of the study indicated a better performance of the LSSVM model compared to the GEP model. So that the R2, NSE and RMSE values for the LSSVM model for the best model in the validation stage were 0.842, 0.836 and 10.860mm, respectively.

Keywords: GEP, LSSVM, Monthly rainfall, Sarein synoptic station

تحلیل روند نیاز های گرمایشی و سرمایشی مطالعه موردی : ایستگاه ارومیه

احمد صفری[1]*

۱- دانشجوی دکترای آب وهواشناسی دانشگاه زنجانAhmadsafariut1@gmail.com

چکیده

یکی از فراسنج های اصلی تعیین کننده اقلیم هر ناحیه دما ، به ویژه درجه- روز می باشد درجه-روز عبارت است از تفاوت دمای آستانه نسبت به میانگین دمای روزانه، که آستانه های دمایی نیز بر حسب اهداف تحقیق مورد نظر انتخاب می شود .در پژوهش حاضر داده های روزانه میانگین ایستگاه هواشناسی ارومیه از سازمان هواشناسی کشور تهیه گردید که دوره آماری سی ساله از تاریخ ۱۹۹۳/۱/۱تا ۲۰۲۲/۱۲/۳۱و با استفاده از نرم افزار اکسل به انجام محاسبات درجه-روز های ماهیانه و فصلی ایستگاه مذکور محاسبه شد و با استفاده از دمای آستانه ۲۱ تا ۱۸ درجه(با توجه به دمای آستانه ارائه شده سازمان هواشناسی کشور) نیازهای گرمایش و سرمایشی ایستگاه ارومیه به دست آمد و در نتیجه با استفاده از محاسبات انجام شده نمودار های روند فصلی نیاز ب گرمایش و سرمایش ایستگاه های مورد مطالعه ب دست آمد ک با توجه به این نمودارها در ایستگاه مورد مطالعه شاهد روند افزایش نیاز به سرد کردن محیط یا سرمایش بیشتر از نیاز ب گرم کردن محیط یا گرمایش هستیم و این روند نشان دهنده تاثیر گرمایش جهانی و تغییرات اقلیمی درایستگاه ارومیه را نشان می دهد.

واژهای کلیدی: گرمایش، سرمایش، دمای آستانه، روند، درجه-روز

۱-مقدمه

پس از بارش، دما یکی از رایج ترین فراسنج هایی است که بیانگر اقلیم یک ناحیه می باشند، معماری ساختمان ها، تولید انرژی، ذوب برف، یخبندان، رشد گیاه، گل دهی، برداشت محصول، انرژی مصرف برای گرمایش و سرمایش شهر های بزرگ، سیستم های حمل ونقل و بیماری همگی مرتبط با ارزش نسبی دما می باشند(خلیلی،۱۳۹۳) درجه-روز یک اندازه ای از میانگین دمای هواست ک بیان کننده آسایش بشر است. در تعریفی دیگر درجه -روز عبارت است از اندازه گیری میانگین دمای هوا با استفاده از دمای آستانه که این آستانه های دمایی انتخاب شده برای محاسبه درجه -روز انتخابی برای آسایش انسان ۱۸ درجه می باشد.(منتظری، ۱۳۹۳) مقدار نیاز به گرم کردن محیط در زمستان و سرکردن آن در تابستان بر حسب

تعریف(جمع تفاوت های میانگین های روزانه دما از آستانه معین در دوره مشخصی از سال است و بر حسب درجه روز بیان می شود.(امیدوار، ۱۳۹۴)

دما های مرجع که برای داده های حقیقی غیر آماری و لحظه ای برای حدود آسایش انسان پیشنهاد شده ۱۹ تا ۲۸ درجه است. ولی در تبدیل این ارقام به میانگین روزانه دما آستانه ها تغیر می یابد که در ایالات متحده ۱۸ تا ۲۳ درجه تعیین کرده است. در ایران سازمان هواشناسی کشور این مقدار را به ترتیب ۱۸ تا ۲۱ درجه سانتی گراد تعیین کرده است.(امیدوار، ۱۳۹۴) اگر متوسط درجه حرارت روزانه هوا از ۲۱ درجه تجاوز کند، در آن روز نیاز به سرد کردن محیط خواهد بود و چنانچه دمای هوا از ۱۸ درجه پایین تر رود، احساس سرما به وجود می آید که محیط باید گرم شود. مقدار درجه روز که به این ترتیب تعریف می شود، در واقع نوعی نمایه انرژی است.(ذوالفقاری ۱۳۸۸) مطالعات گسترده ای که در سطوح ملی و منطقه ای و جهانی انجام شده است بیانگر افزایش دمای کره زمین می باشد. نخست فرمول محاسبه و واکاوی درجه – روز توسط (امیدوار،۱۳۹۵)مورد استفاده قرار گرفت. وی بیان کرد که داده های دمای روزانه باید دارای یک توزیع نرمال باشند که توزیع نرمال برای به دست آمدن رابطه میان میانگین دمای روزانه هوا و دمای روزانه هوا و میزان درجه روز مورد نیاز برای گرمایش و سرمایش استفاده می شود. دیگری با استفاده از فرمول های محاسبه و با استفاده از آستانه های دمایی انتخاب شده و پهنه بندی مناطق بر حسب نیاز به گرمایش و سرمایش پرداختند که می توان به درجه روز های گرمایش نواحی خشک امارات متحده در طی دوره آماری ۱۵ ساله را به دست آوردند. نتایج نشان داد که در ماه های نوامبر تا ژانویه درجه روز گرمایش ماهانه دارای یک روند افزایش می باشد که این روند مناطق جنوبی را نیز قرار می گیرد.(ذوالفقاری،۱۳۹۴) درجه روز های گرمایش ترکیه را از طریق آستانه های دمایی ۱۴ تا ۲۲درجه و درجه روز های سرمایش را از طریق آستانه های دمایی ۱۸ تا ۲۱ درج در یک دوره طولانی مدت محاسبه کردند، نتایج نشان داد که درجه روز گرمایش با ارتفاع و عرض جغرافیایی تغییر می کند.(مسعودیان و همکاران، ۱۳۹۳) نیز در مطالعه ای به ارائه یک مدل جدید برای محاسبه میزان مصرف انرژی برای گرمایش و سرمایش در یونان پرداختند. نتایج به دست آمده بیانگر روند افزایش در میزان انرژی مورد نیاز برای گرمایش و سرمایش در طی ۱۵ سال اخیر می باشد.(مسعودیان و همکاران.۱۳۹۴)درجه روز گرمایش و سرمایش ماهانه و سالانه مورد نیاز صنایع در ۵ شهر ساحلی عربستان را با آستانه های دمایی ۲۰-۱۳ و ۱۸ - ۲۱درجه محاسبه می کند.بیشترین میزان ۲۵ روز به ازای هر سال مشاهده می شود. در سال های اخیر واکاوی روند این فراسنج ها توسط پژوهشگران مختلف مورد استقبال قرار گرفته است.(امیدوار و همکاران،۱۳۹۵).

روند درجه روز گرمایش و سرمایش اگزین چیانگ چین را مورد بررسی قرار دادند. نتایج بیانگر روند کاهشی درجه روز گرمایش در فصول پاییز و زمستان به ویژه درنواحی شمالی این منطقه و روند افزایشی درجه روز سرمایش در فصل تابستان

در بخش های غربی می باشد.(امیدوار،۱۳۹۵) در مطالعه ای به توسعه یک معادله برای محاسبه درجه روز از داده های درجه حرارت با کیفیت پایین از طریق بررسی رابطه بین درجه روز و درجه حرارت سالانه از ۵۵۱۱ نقطه از سراسر جهان، با استفاده از رگرسیون غیر خطی چندگانه پرداخت. نتایج نشان می دهد که رابطه بسیار قوی بین درجه حرارت سالانه و درجه روز وجو دارد.(مسعودیان وهمکاران،۱۳۹۳) ذوالفقاری و همکاران(۱۳۹۳) به محاسبه ی درجه روز با استفاده از داده های دمای کمینه و بیشینه پرداختند. عمده ترین روش های استفاده شده برای محاسبه ی این پراسنج به ترتیب عبارت اند از:۱) روش موج سینوسی یا سینوسی شکل : ۲) روش سه گوشه ای و ۳) روش میانگین گیری، نتایجی که از روش های میانگین گیری و سینوسی به دست آمده، انحراف های بسیار بزرگی را در میزان درجه ی روزهای تجمعی با استفاده از روش سه گوشه ای رد اواخر فصل بهار و ماه های فصل تابستان و مقایسه ی آن با دو روش پیش، نتایج یکسانی را نشان داده است . مسعودیان و همکاران(۱۳۸۷)به واکاوی گرمایشی جهانی و آثار آن بر میزان انرژی مصرفی برای گرمایش چیم پرداختند. عمده ترین کاربرد محاسبه ی این فراسنج، در معماری ساختمان است در واقع میزان انرژی سوخت ذخیره شده و میزان مصرف کمتر انرژی برای فصول سرد سال ناشی از تغییرات اقلیم جهانی است. امیدوار و همکاران(۱۳۹۵)براساس ۵ آستانه ی دمایی، درجه روز گرمایش و ۶ آستانه دمایی درجه روز سرمایشی ترکیه را محاسبه و نقشه های آن را ترسیم کرد. کمینه و بیشینه ی درجه روز گرمایشی مربوط به آستانه دمایی ۱۷.۵درجه سیلیسوس، به ترتیب درآرداهان با ۶۱ و آنلورفا ، ۹۷۰ درجه نمایان است. مقدار نیاز به گرم کردن محیط در دوره سرد سال و سرد کردن آن در دوره گرم سال بر حسب درجه روز بیان می شود.(خلیلی، ۱۳۹۳)

براساس پژوهش انجام شده در ایران، نیاز به سرمایش در فصل گرم سال، به ازای هر کیلو متر افزایش ارتفاع ۵۸۰ درجه - روز کاهش می یابد. اثر طول جغرافیایی ناچیز و از غرب به شرق در حدود ۱۷ درجه روز ولی اثر عرض جغرافیایی بسیار مهم و حدود ۱۴۸درجه روز به ازای هر درجه عرض جغرافیایی به سمت شمال، کاهش می یابد و مقدار نیاز به گرمایش به ازای هر کیلومتر افزایش ارتفاع ۹۷۱درجه روز افزایش یافته و به ازای هر درجه روز افزایش عرض جغرافیایی ۱۶۵ درجه روز زیاد می شود.فرجی و همکاران(۱۳۹۳) در پژوهشی به واکاوی به درجه روزهای گرمایش (HDD) و درجه روز های سرمایش (CDD) برای شمال شرق هند پرداختند.آستانه دمایی ۱۱ درجه معرف دمای کمینه آستانه دمایی ۲۵ درجه معرف دمای پیشینه و آستانه دمایی ۱۸ درجه معرف میانگین دمای کشور می باشد.(کاویانی و مسعودیان، ۱۳۸۷) . محاسبه درجه روز در ایران ، به دلیل تفاوت های دمایی ناشی از قرارگیری در عرض های جغرافیایی متفاوت و همچنین تنوع ارتفاعی و اقلیمی ، از دید مصرف انرژی برای گرمایش و سرمایش، معماری ساختمان ها، فعالیت های کشاورزی در مراحل مختلف رشد گیاه، برآورد و سرمازدگی، گرمازدگی، برآورد ذوب برف نواحی کوهستانی و بیماری، تولید انرژی، یخبندان و موارد دیگر کاربرد دارد. درجه روزهای سرمایش و گرمایش، از جنبه های مختلف شاخص مهم و موثر قلمداد می شود،

معیار درجه روز های گرمایشی و سرمایشی می تواند ضمن ارائه تصویری روشن و دقیق از میزان نیاز های حرارتی ساختمان، شهر و منطقه، در تامین آسایش حرارتی و اصلاح الگوی مصرف انرژی نیز نقش مثبتی ایفا می کند.(منتظری،۱۳۹۳) همچنین در موضوع صرفه جویی در مصرف انرژی از جمله در تهران و شرایط مناسب برای تامین انرژی سرمایش در شهر های بزرگ جهان از جمله تهران کاربرد این شاخص به خوبی به اثبات رسیده است.

از آنجایی که نوع برنامه ریزی اعم از مدیریت انرژی برای گرمایش و سرمایش ساختمان ها، فعالیت های کشاورزی که در طی مراحل مختلف رشد گیاه نیاز به درجه روز های مشخص دارند. لذا بررسی و مطالعه مکانی- زمانی این فراسنج می تواند راهگشای برنامه ریزی های ملی و منطقه ای و محلی باشد.

۲ – مواد و روش پژوهش

در این پژوهش روند کاهشی و افزایش نیاز های گرمایشی و سرمایشی را نشان می دهدو مقایسه ایستگاه به صورت فصلی(سه ماهه) نیاز های گرمایش و سرمایش پرداخته شده است، برای دستیابی به اهداف پژوهش از مقادیر HDD99,CDD100 استفاده شده است. منطقه مورد مطالعه در این پژوهش ایستگاه ارومیه است، از لحاظ زمانی نیز از تاریخ ۱۹۹۳/۱/۱ تا ۲۰۲۲/۱۲/۳۱(سی ساله)لحاظ شده است. برای دست یابی به اهداف تحقیق مقادیر HDD یا درجه روز گرمایش و CDD یا درجه روز سرمایش مربوط به ۳ ایستگاه هواشناسی ارومیه از پایگاه اطلاعات و آمار سازمان هواشناسی کشور برای دوره آماری ۱۹۹۳ تا ۲۰۲۳(دوره سی ساله) دریافت گردید و بعد از بازسازی داده، مقادیر میانگین دمای روزانه مقادیر درجه روز گرمایش و سرمایش ماهانه و سالانه محاسبه شدند و مورد استفاده قرار گرفتند.

روش کار در این پژوهش، توصیفی، تحلیلی و ترسیمی بوده است و آمار های خام اخذ شده از سازمان هواشناسی کشور در محیط Exel وارد شده و پایگاه داده تشکیل گردید و به تجزیه و تحلیل و بررسی آمار پرداخته شده است. با توجه به این پیشتر نیز در قسمت مقدمه اشاره شده مقادیر نیاز به گرم کردن محیط در دوره سرد(گرمایش) و و سرد کردن محیط در دوره گرم سال(سرمایش) بر حسب تعریف جمع تفاضل میانگین دمای روزانه ها از یک آستانه معین در دوره مشخصی از سال است که بر مبنای درجه روز بیان می شود، با توجه به دمای آستانه (سازمان هواشناسی در ایران آستانه های ۱۸ و ۲۱ درجه سانتی گراد را به ترتیب برای گرمایش و سرمایش پیشنهاد داده است) اگر متوسط دمای هوا از مقدار آستانه ۲۱ درجه سانتی گراد تجاوز کند، در آن روز نیاز به خنک سازی یا سرمایش محیط ایجاد خواهد شد میزان نیاز سرمایشی در دوره معین N روزه به درجه روز سرمایش یا CDD معروف است که از رابطه (۱) محاسبه شده است

99 Heating Degree Days

100 Cooling Degree Days

رابطه (۱) $CDD=\sum(T-\Theta),\ \Theta<T$

همچنین در پایین تر از دمای آستانه احساس سرمایش می شود که برای دست یابی به شرایط آسایشی بایستی تا حد معینی گرم شود، میزان درجه روز گرمایش نیز از طریق رابطه (۲) محاسبه شده است.

رابطه(۲) $HDD=\sum(T-\Theta),\ \Theta>T$

که در رابطه های بالا T میانگین دمای روزانه و Θ مقدار دمای آستانه است.

۳- یافته های پژوهش

در این پژوهش با توجه به اهداف پژوهش یعنی نشان دادن روند و مقایسه فصلی نیاز های گرمایشی و سرمایشی در ایستگاه مورد مطالعه می باشد، تعدادی نمودار با تجزیه و تحلیل روند نیازی های گرمایش و سرمایش در فصول مختلف سال در ایستگاه های مورد نظر تهیه شده است.

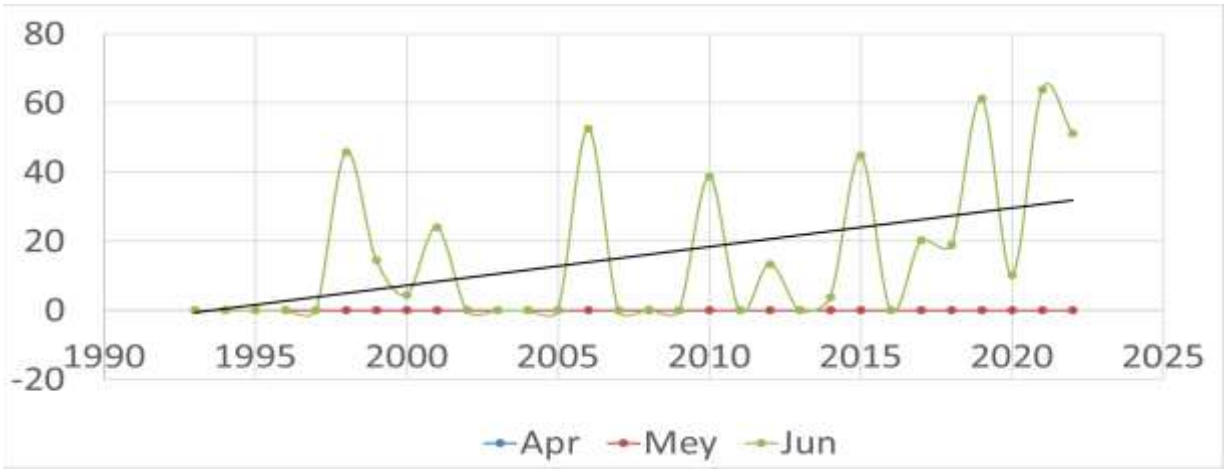
جدول فصلی درجه روز های سرمایشی و گرمایشی ایستگاه های ارومیه واقع در استان آذربایجان غربی در دوره آماری ۳۰ ساله (۱۹۹۳ تا ۲۰۲۳)

جدول ۱: نیاز های سرمایشی در فصول مختلف

	ارومیه
زمستان	-
بهار	*
تابستان	*
پاییز	-

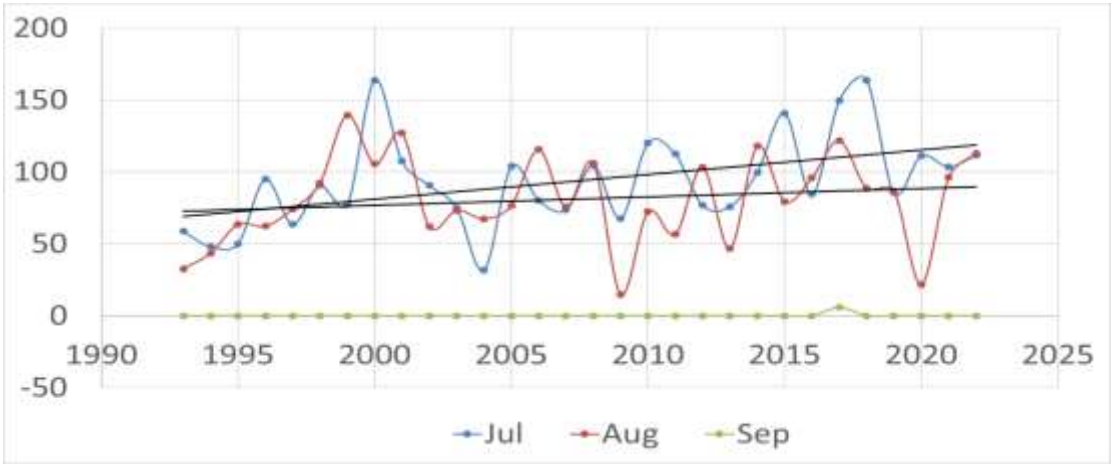
جدول ۲: نیاز های گرمایشی در فصول مختلف

	ارومیه
زمستان	*
بهار	*
تابستان	*
پاییز	*



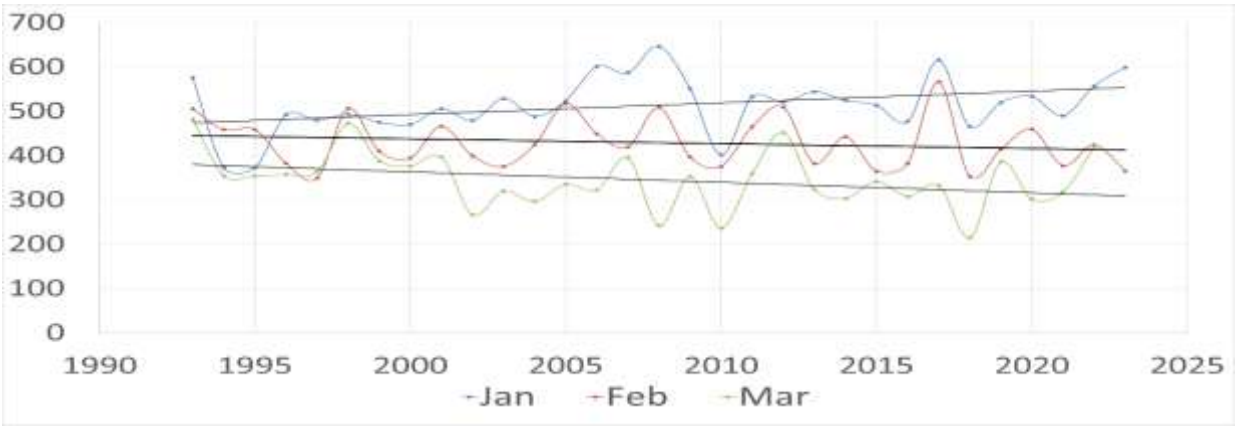
شکل ۱: نیاز های سرمایش فصل بهار

نیاز به سرمایش در ایستگاه ارومیه با توجه به اشکال بالا در فصل بهار نشان می دهد ک فقط در ماه ژوئن(خرداد) وجود دارد و دارای روندی افزایشی است و در ما های دیگر فصل بهار نیاز به سرمایش در این ایستگاه وجود ندارد



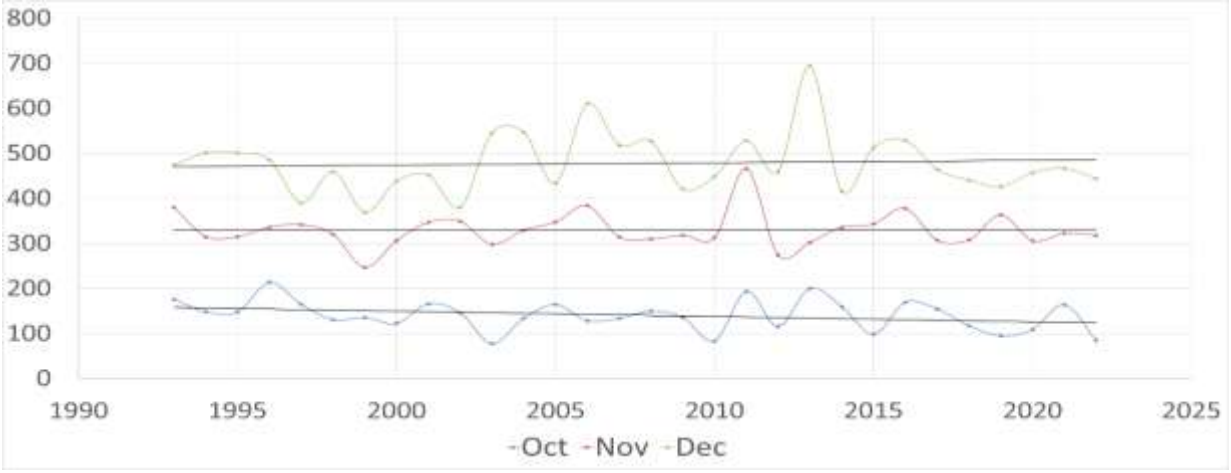
شکل۲: نیاز های سرمایشی فصل تابستان

در فصل تابستان در این ایستگاه به سرمایش محیط وجود دارد و با توجه به شکل بالا در دو ماهه اول تابستان یعنی ماه های جولای و آگوست(تیر و مرداد) مقادیر درجه روز بیشتر از ماه سپتامبر(شهریور) مشاهده می شود و روند نیاز به سرمایش در هر سه ماه افزایشی می باشد



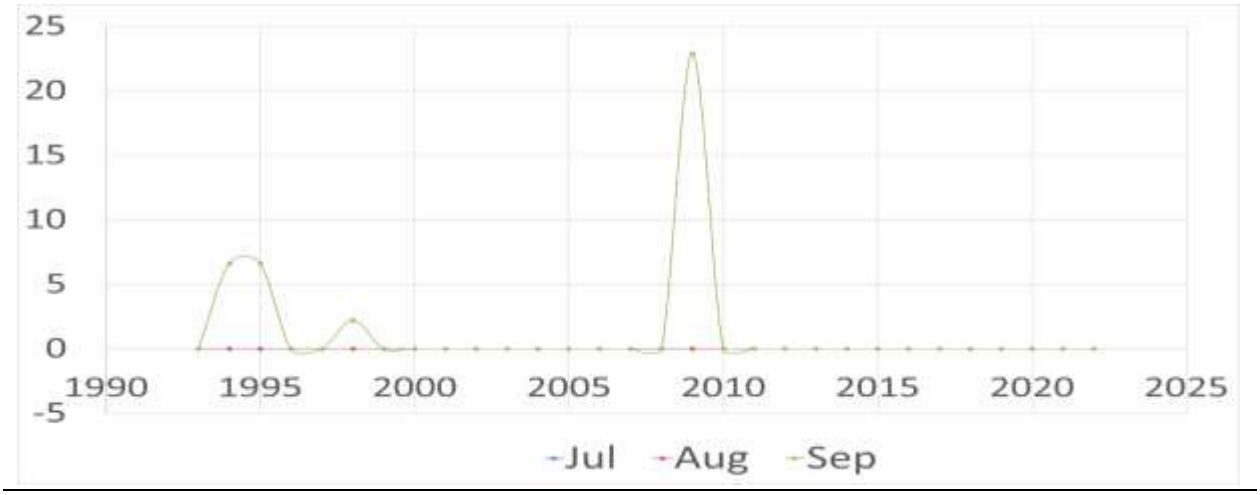
شکل ۳: نیاز های گرمایشی فصل زمستان

نیاز به گرمایش در سه ماه تایستان در ایستگاه های مورد مطالعه وجود دارد و روند نیاز به گرمایش تقریبا کاهشی می باشد یعنی هر چه به سمت سال های پایانی دوره آماری نزدیک تر می شویم مقادیر نیاز به گرمایش کمتر می شود.



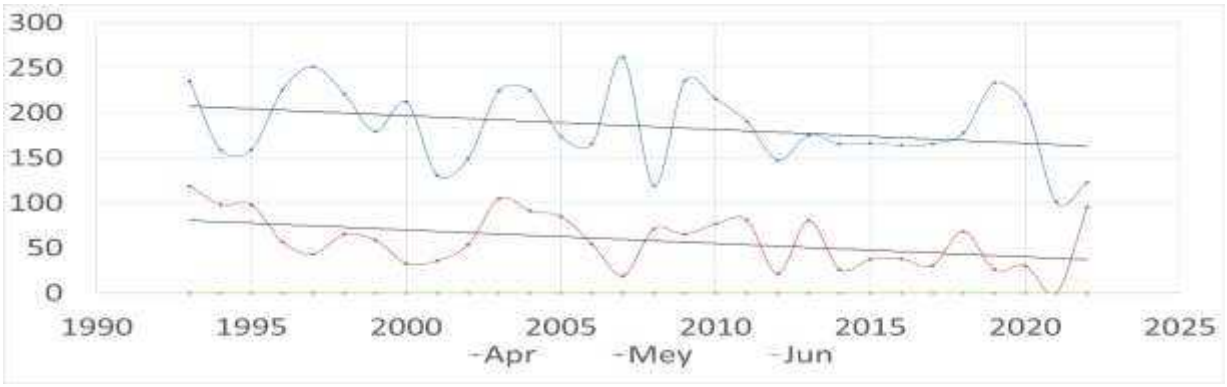
شکل ۴: نیاز های گرمایشی فصل پاییز

نیازبه گرمایش در فصل پاییز در ایستگاه ارومیه وجود دارد مقادیر آن نسبت به فصل زمستان کمتر است که در ماه اکتبر روند نسبتا کاهشی دارد و در ماه نوامبر(آبان) روند محسوس کاهشی و افزایشی مشاهده نمی شود ولی در ماه دسامبر(آذر) روند نقریبا افزایشی را مشاهده می شود.



شکل ۵: نیاز های گرمایشی فصل تابستان

با توجه به نمودار بالا که نیاز به گرم کردن محیط را در ایستگاه ارومیه نشان می دهد مشاهده می شود که فقط در ماه سپتامبر (شهریور) در چند سال محدود نیاز به گرمایش محیط وجود دارد.



شکل ۶ : نیاز های گرمایشی فصل بهار

نیاز به گرمایش در فصل بهار در ماه های آوریل(فروردین) و می (اردیبهشت)مشاهده می شود و دارای روند کاهشی می باشند ولی در ماه دیگر فصل بهار ژوئن (خرداد)نیاز به گرمایش وجود ندارد

۴- نتیجه گیری

برقراری تعادل حرارتی بین انسان و محیط اطرافش یکی از نیاز های اولیه برای تامین سلامتی و راحتی او می باشد، ایجاد چنین تعادلی بین ترکیبات عوامل مختلفی بستگی دارد.بعضی از این عوامل خصوصیات متابولیکی، فعالیت فیزیکی، نوع

لباس و عادت وی به هوای محیط بستگی دارد و بقیه عوامل از قبیل دمای هوا، تابش، رطوبت و جریان هوا هستند که به طور کلی به آن ها عوامل اقلیمی اطلاق می شود.(کسمایی، ۱۳۹۳) با توجه به یافته های پژوهش نیاز های گرمایشی و سرمایشی در ایستگاه ارومیه نشان می دهد که نیاز های سرمایشی فقط در فصول بهار و تابستان وجود دارد که مقادیر درجه -روز در ایستگاه مورد مطالعه روند نیاز به سرمایش محیط روندی افزایشی دارد. نیاز گرمایشی نیز در همه فصول سال مشاهده می شود. در همه فصول نیز در ایستگاه مورد پژوهش شاهد روند کاهشی هستیم و این نشان دهنده این است که در ایستگاه ها ارومیه هوارو به گرم شدن است .

در مجموع در ایستگاه منتخب نیاز به سرمایش محیط بیشتر شده و نیاز به گرمایش محیط کمتر شده و این نشان می دهد که در منطقه مورد مطالعه اقلیم گرم تر شده است و نشان دهنده تغییر اقلیم در ایستگاه ارومیه است، مسئله قابل توجه برای برنامه ریزان مصرف انرژی در منطقه مورد مطالعه باید بیشتر معطوف به نیاز های انرژی گرماساز باشد. چون انرژی سرماساز نیاز اصلی و جدی منطقه نمی باشد

مراجع

[1] مسعودیان،س.الف و کاویانی. م.ر، اقلیم شناسی ایران، انتشارات دانشگاه اصفهان، اصفهان، ۱۳۸۷

[2] کسمایی، مرتضی، اقلیم و معماری ،انتشارات بازتاب،تهران،۱۳۷۸

[3] علیجانی.بهلول، آب و هواشناسی ایران،دانشگاه پیام نور،۱۳۷۴

[4] امیدوار . ک و همکاران، ارائه روش نو برای پهنه بندی روند درجه روز سرمایش ماهانه کشور، پژوهش های جغرافیایی طبیعی، تهران، ۱۳۹۵.

[5] خلیلی، ع، تحلیل سه بعدی درجه-روزهای گرمایش و سرمایش در ایران،فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، ۱۳۹۳.

[6] ذوالفقاری.ح ،.ر ، رادمهر.پ، تحلیلی بر نیاز های سرمایشی و گرمایشی در شمال غرب ایران ، مجله پژوهش های جغرافیایی طبیعی ،۱۳۹۴.

[7] خلیلی.ع،تدوین یک سامانه جدید پهنه بندی اقلیمی از دیدگاه نیاز های گرمایش و سرمایش در ایران ، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی ،۱۳۹۳.

[8] مسعودیان.الف، ابراهیمی.ر و یاراحمدی.الف ،واکاوی مکانی-زمانی میزان روند ماهانه درجه گرمایش در قلمرو ایران، مجله جغرافیا و توسعه
ناحیه ای ، ۱۳۹۳.

[9] منتظری، م، نواحی حرارتی ایران، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، ۱۳۹۳.
[10] فرجی.ع، زاهدی.م،رسولی.ع، پهنه بندی درجه روز های گرمایش و سرمایش در شمال غرب ایران، پژوهش های جغرافیای طبیعی ، ۱۳۸۷

Analysis of heating and cooling demand trends
Case study: Urmia Station

Ahmad Safari[1]*

[1]Ahmadsafariut1@gmail.comPhD student in Meteorology, University of Zanjan

Abstract

One of the main parameters determining the climate of each region is temperature, especially degree-day. Degree-day is the difference between the threshold temperature and the average daily temperature, and the temperature thresholds are also selected according to the objectives of the research. In the present study, the average daily data of the Urmia meteorological station was provided by the National Meteorological Organization for a thirty-year statistical period from 1/1/1993 to 12/31/2022. Using Excel software, the monthly and seasonal degree-days of the said station were calculated. Using a threshold temperature of 21 to 18 degrees (according to the threshold temperature provided by the National Meteorological Organization), the heating and cooling needs of the Urmia station were obtained. As a result, using the calculations, seasonal trend graphs of the heating and cooling needs of the studied stations were obtained. According to these graphs, in the studied station, we witness a trend of increasing need for cooling or cooling the environment more than the need for heating or heating, and this trend indicates the impact of global warming and climate change on the Urmia station.

Keywords: heating, cooling, threshold temperature, trend, degree-day

پیامدهای اقلیمی خشکیدگی دریاچه ارومیه و دریاچه آرال: درس‌هایی برای مدیریت بحران‌های زیست‌محیطی آینده و حکمرانی تطبیقی

هادی سیاسر[۱]

[۱]- استادیار،دانشکده فنی ومهندسی ، دانشگاه پیام نور ،تهران، ایران
hadisiasar@pnu.ac.ir

چکیده

خشکیدگی دریاچه ارومیه در ایران و دریاچه آرال در آسیای میانه نمودارِ برهم‌کنش پیچیده فشارهای انسان‌زاد با سیگنال‌های اقلیمی و پیامدهای چندبعدی اقلیمی–بوم‌شناختی–اجتماعی است. این مرور تطبیقی با اتکا به دو چارچوب «فشار–حالت–اثر–پاسخ «(DPSIR) و «مدیریت یکپارچه منابع آب«(IWRM) ، شواهد موجود را گردآوری و سامان‌دهی می‌کند تا سازوکارهای خشکیدگی، دامنه آثار و کارایی پاسخ‌های مدیریتی تبیین شود. یافته‌ها نشان می‌دهد در حوضه آرال، انحراف گسترده آب برای آبیاری و ترتیبات تخصیصی محرک غالب بوده و حذف نقش تعدیل‌گر دریاچه به افزایش نوسانات دمایی، دگرگونی فصل‌مندی و افت بارش انجامیده است. در مقابل، در حوضه ارومیه هم‌افزایی تغییرات اقلیمی با توسعه منابع آب به افت چشمگیر سطح/حجم، افزایش شوری، برهنگی بستر و شکل‌گیری کانون‌های نمک‌گرد منتهی شده است. بروندادهای اجتماعی–اقتصادی در هر دو حوضه شامل کاهش بهره‌وری کشاورزی و شیلات، افزایش هزینه‌های سلامت و تضعیف تاب‌آوری معیشت‌های محلی است. بر پایه درس‌های آموخته‌شده از تجربه‌های احیایی—از جمله برنامه احیای دریاچه ارومیه و سازوکارهای بین‌دولتی در حوضه آرال—این مطالعه یک «بسته سیاستی» عملی پیشنهاد می‌کند: دیپلماسی آب و همکاری فرامرزی، تعیین و تضمین حقابه‌های زیست‌محیطی، مدیریت تقاضای آب و کشاورزیِ سازگار با اقلیم، کنترل مرحله‌ای گردوغبار نمکی با رویکردهای طبیعت‌مبنا، و استقرار سامانه‌های یکپارچه پایش–هشدار با مشارکت معنادار جامعه می باشد. این چارچوب‌ها نقشه‌راهی برای حکمرانی تطبیقی و مدیریت بحران‌های آبی در حوضه‌های مشابه فراهم می‌کند و انتقال‌پذیری سیاست‌ها را از مقیاس محلی تا منطقه‌ای تقویت می‌سازد.

کلید واژه‌ها: خشکیدگی دریاچه‌ها، دریاچه ارومیه ، دریاچه آرال ،حکمرانی تطبیقی

۱. مقدمه

خشکیدگی شتابان دریاچه‌های داخلی طی دهه‌های اخیر هشداری روشن درباره شکنندگی برهم‌کنش‌های سه‌گانه «اقلیم–جامعه–بوم» است. در این میان، دریاچه ارومیه—که زمانی دومین دریاچه فوق‌شور جهان بود—و دریاچه آرال—از بزرگ‌ترین پهنه‌های آب داخلی—از نیمه دوم قرن بیستم به‌این‌سو با افت معنادار تراز و مساحت روبه‌رو شده‌اند([5–1]) . پیامدهای این دگرگونی‌ها از محدوده بوم‌سازه‌های محلی فراتر می‌رود و در قالب تغییرات ریزاقلیم و الگوی فصلی آن، کوتاه‌شدن فصل رشد کشاورزی ، افزایش شوری آب و خاک، تهدید تنوع زیستی، تشدید رخدادهای گردوغبار/نمک‌گرد و اثرات بهداشتی–اجتماعی گسترده بروز می‌یابد [۷–۱۵، ۱۷–۱۹]. از آنجا که سازوکارهای محرک خشکیدگی و پاسخ‌های مدیریتی در دو حوضه هم شباهت‌های هیدرو–اجتماعی دارند و هم تفاوت‌های نهادی–سیاسی، یک رویکرد تطبیقی می‌تواند فهم علّی از نسبت عوامل انسان‌زاد و سیگنال‌های اقلیمی، دامنه و شدت پیامدها، و کارایی مداخلات مدیریتی را ارتقا دهد. بر این مبنا، تحلیل حاضر با تکیه بر دو چارچوب مکمل فشار–حالت–اثر–پاسخ (DPSIR) و مدیریت یکپارچه منابع آب (IWRM) سامان یافته است تا فشارها را در قالب برداشت‌های کشاورزی، سدسازی و سیاست‌های تخصیصی بازشناسد، حالت سامانه را با شاخص‌های افت تراز، پس‌روی خط ساحل و شوری ردیابی کند، اثرات اقلیمی–زیست‌محیطی–سلامت‌محور را کمّی/کیفی صورت‌بندی نماید، و سرانجام پاسخ‌های سیاستی و نهادی را در مقیاس‌های محلی تا فرامرزی ارزیابی کند [۱۹، ۲۴] . مقاله با ساختاربندی شواهد و تجربه‌های مدیریتی موجود می‌کوشد درس‌های انتقال‌پذیر برای حکمرانی تطبیقی و مدیریت بحران‌های آینده استخراج کند و عطف توجه را از «عرضه‌محوری» صرف به مدیریت تقاضا، حقابه‌های زیست‌محیطی و دیپلماسی آب معطوف سازد[۱، ۵، ۱۹–۲۳، ۲۵؛ همچنین بنگرید به ۲۰–۲۶].

نوآوری این مرور در سه بعد به‌هم‌پیوسته است: نخست، ادغام خوانش اقلیمی–بوم‌شناختی–اجتماعی در دو چارچوب مکمل DPSIRو IWRM برای مقایسه منسجم دو حوضه و افزایش تعمیم‌پذیری نتایج به بسترهای مشابه، همراه با تبیین دقیق زنجیره علت–پیامد از فشارهای انسان‌زاد و اقلیمی تا پاسخ‌های سیاستی [۱۹، ۲۴]. دوم، برجسته‌سازی یک «بسته سیاستی» عمل‌پذیر شامل دیپلماسی آب، تعیین و اجرای حقابه‌های زیست‌محیطی، مدیریت تقاضای آب کشاورزی و کنترل گردوغبار نمکی با اتکا به رویکردهای طبیعت‌مبنا و سامانه‌های یکپارچه پایش–هشدار [۱، ۵، ۱۹–۲۳، ۲۵]. سوم، تبیین مسیرهای انتقال‌پذیر حکمرانی میان دو حوضه—از تجربه‌های فرامرزی و نهادی آرال تا سازوکارهای احیایی ارومیه و بالعکس—با تاکید بر پیش‌نیازهای موفقیت مانند تعهد بلندمدت، شفافیت داده، و مشارکت معنادار جامعه محلی[۲۰–۲۳، ۲۵].

هدف این مقاله آن است که با سنتز انتقادی شواهد موجود، (الف) محرک‌های اصلی خشکیدگی در دو حوضه و نسبت سهم عوامل انسان‌زاد/اقلیمی را تبیین و مقایسه کند، (ب) پیامدهای اقلیمی، زیست‌محیطی و اجتماعی–اقتصادی را به‌صورت

تطبیقی صورت‌بندی و پیوندهای علّی آن‌ها را روشن سازد، و (پ) اثربخشی سازوکارهای مدیریتی و حکمرانی در سطوح محلی، ملی و فرامرزی را ارزیابی کرده و در نهایت بسته‌ای از توصیه‌های سیاستی مبتنی بر شواهد برای ارتقای تاب‌آوری و مسیرهای احیا ارائه دهد[۱۹، ۲۰–۲۶].

۲. روش‌شناسی مرور (Methodology)

این پژوهش یک مرور روایِی ساختاریافته با مؤلفه‌های سیستماتیک است که بر مجموعه منابع فراهم‌شده تکیه دارد و با منطق «تناسب شواهد برای سیاست» سامان یافته است([1–26]) .در گام نخست، پرسش‌های مرور به‌گونه‌ای صورت‌بندی شد که سه محور اصلی را پوشش دهد: نخست، شناسایی و تبیین پیامدهای اقلیمیِ کلیدیِ خشکیدگی در هر یک از دو حوضه مورد مطالعه [۷–۱۲، ۱۴–۱۶]؛ دوم، واکاوی تبعات اجتماعی–اقتصادی و سلامت‌محور با تمرکز بر پیوندهای علّی میان تغییرات ریزاقلیمی، معیشت و پیامدهای بهداشتی[۵، ۹، ۱۳–۱۵، ۱۷–۱۹]؛ و سوم، ارزیابی پاسخ‌های حکمرانی/مدیریتی اثرگذار و دلایل موفقیت یا ناکامی آن‌ها در مقیاس‌های محلی، ملی و فرامرزی[۵، ۱۹–۲۳، ۲۵].

برای هدایت تحلیل و تضمین هم‌سویی میان لایه‌های علّی و سیاستی، از دو چارچوب مکمل استفاده شد: چارچوب فشار–حالت–اثر–پاسخ (DPSIR) برای ردیابی زنجیره فشارها—از جمله انحراف آب، سدسازی و تغییر کاربری—تا حالات سامانه نظیر افت تراز/مساحت و افزایش شوری، و سپس برون‌دادهای اثر در اقلیم محلی، سلامت عمومی و اقتصاد، و نهایتاً پاسخ‌های مدیریتی و نهادی ([۱۹]، [24])؛ و چارچوب مدیریت یکپارچه منابع آب (IWRM) برای همسوسازی عرضه و تقاضای آب، تعریف و اجرای حقابه‌های زیست‌محیطی، و طراحی سازوکارهای همکاری فرامرزی با توجه به پیچیدگی‌های نهادی و سیاسی حوضه‌ها [۱۹، ۲۰–۲۲]. این تلفیق چارچوبی امکان می‌دهد یافته‌ها نه‌تنها توصیفی، بلکه در قالب مسیرهای عمل‌پذیرِ سیاستی صورت‌بندی شوند.

انتخاب شواهد با تمرکز بر گزارش‌های نهادی، ارزیابی‌های اقلیمی/بوم‌سازه‌ای، و مطالعات موردی سیاستی انجام گرفت تا هم پوشش موضوعی و هم اعتبار بیرونی نتایج تقویت شود([1–26]) .سپس، سنتز تحلیلی–مقایسه‌ای بر پایه چهار محور اقلیم، بوم‌شناسی، جامعه–اقتصاد و حکمرانی اجرا شد؛ در این فرآیند، برای ارتقای اعتبار درونی مرور، تقاطع‌سنجی یافته‌ها میان منابع هم‌پوشان صورت گرفت—برای نمونه، نسبت نقش عوامل اقلیمی در برابر مداخلات انسان‌زاد در خشکیدگی دریاچه ارومیه با اتکا به چند منبع مستقل مقایسه شد ([4–6]) و الگوهای گرمایش/سردشدگی فصلی و تغییرات فصل‌مندی در حوضه آرال از شواهد متنوع ارزیابی گردید([10–12]) .به‌منظور سازگاری با انتظارات انتشار در ژورنال‌های بین‌المللی،

تهیه یک ضمیمه روش‌مند شامل کلیدواژه‌های جست‌وجو، معیارهای ورود/خروج و ماتریس استخراج داده‌ها توصیه می‌شود؛ چنین ضمیمه‌ای با الزامات PRISMA-ScR هم‌خوان است و بازتولیدپذیری و شفافیت مرور را تقویت می‌کند.

۳. زمینه تاریخی و بوم‌شناختی

دریاچه ارومیه در شمال‌غرب ایران به‌عنوان یکی از مهم‌ترین پهنه‌های فوق‌شور داخلی، طی دهه‌های متمادی زیستگاهی کلیدی برای پرندگان آبزی و کنارآبزی—با گزارش بیش از ۲۱۱ گونه—و ریزاندامگان و بی‌مهرگانی چون آرتمیا بوده و از رهگذر خدمات بوم‌سازگانی (تنظیم ریزاقلیم، پشتیبانی از زنجیره‌های غذایی، و گردشگری طبیعت‌پایه) نقشی معنادار در معیشت جوامع پیرامونی ایفا کرده است([1–3]) .در مقیاسی گسترده‌تر، دریاچه آرال—میان قزاقستان و ازبکستان—تا نیمه دوم قرن بیستم ستون فقرات شیلات، کشاورزی و تجارت منطقه‌ای به‌شمار می‌رفت و پایداری معیشت صدها هزار نفر به پویایی این پهنه آبی وابسته بود[۵، ۷، ۱۷].

گذار تاریخی هر دو دریاچه از «سامانه‌های تنظیم‌گر» به «کانون‌های بحران» از میانه قرن بیستم آغاز شد، اما منطق محرک‌ها در دو حوضه یکسان نبود. در ارومیه، گسترش برداشت‌های آبیاری در بالادست، سدسازی بر روی ورودی‌ها، و دگرگونی شیوه‌های مدیریت تخصیص آب با سیگنال‌های اقلیمی (نوسان بارش و دما) هم‌زمان شد و به افت تدریجی تراز و پس‌روی خط ساحل انجامید؛ روندی که در دهه‌های اخیر شتاب بیشتری گرفت و نمایه‌های شوری و برهنگی بستر را به‌طور معنادار دگرگون کرد [۳–۶، ۱۵، ۱۹]. در مقابل، در آرال، انحراف عظیم رودخانه‌های تغذیه‌کننده برای توسعه آبیاری—به‌ویژه در خدمت گسترش کشاورزی آبی—محرک غالب بود؛ مداخله‌ای مهندسی–سیاستی که ورودی‌های طبیعی به دریاچه را به‌شدت کاهش داد و زنجیره‌ای از پیامدهای محیطی و اجتماعی–اقتصادی را در پی داشت[۵، ۷، ۱۷، ۲۲].

این سیر تاریخی نشان می‌دهد که گرچه «خشکیدگی» بروندادی مشترک است، اما ریشه‌های علّی و پیکره نهادی–مدیریتی در دو حوضه متفاوت‌اند: ارومیه بیشتر با هم‌افزایی فشارهای انسان‌زاد و سیگنال‌های اقلیمی شناخته می‌شود، حال آن‌که آرال نمونه‌ای کلاسیک از غلبه مداخلات تخصیصی–زیرساختی بر بودجه آب طبیعی است. همین تفاوت‌های بسترین، مبنای مناسبی برای تحلیل تطبیقی در بخش‌های بعدی فراهم می‌کند تا بتوان نسبت سهم عوامل، الگوهای پیامد و مسیرهای سیاستی کارآمد را با دقت بیشتری بازشناسی کرد[۳–۷، ۱۵، ۱۷، ۱۹، ۲۲].

۴. پیامدهای اقلیمی خشکیدگی

۴-۱. خشکیدگی دریاچه آرال با برهم‌زدن نقش تعدیل‌گر حرارتی پهنه آب، به افزایش دماهای تابستانه و خشکی بیشتر از یک‌سو و سردتر و طولانی‌تر شدن زمستان‌ها از سوی دیگر انجامیده است؛ بدین‌ترتیب، دامنه نوسانات فصلی دما افزایش یافته و در برخی برآوردها تغییرات فصلی تا حدود ۶ درجه سلسیوس گزارش شده است، در حالی‌که کاهش بارش در مقیاس محلی–منطقه‌ای نیز مشاهده شده است [۷–۱۲، ۱۶]. دگرگونی الگوی تغییرات فصلی اقلیم ، الگوی تقویم زراعی و طول فصل رشد را مختل کرده، به‌گونه‌ای که آغاز و پایان دوره‌های کشت–برداشت دچار جابه‌جایی و ناپایداری شده و ریسک‌های اقلیمی برای تولید کشاورزی افزایش یافته است؛ این اختلالات، همراه با تشدید رخدادهای حدی و تغییر در توازن انرژی سطحی، پیامدهای زنجیره‌ای برای بهره‌وری کشاورزی و تاب‌آوری معیشت‌های وابسته به زمین در پیرامون حوضه به‌دنبال داشته است[۹–۱۲، ۱۶].

۴-۲. دریاچه ارومیه طی دهه‌های اخیر بیش از ۸۰ تا ۹۰ درصد از مساحت/حجم خود را از دست داده و در نتیجه، شوری آب افزایش یافته، کف دریاچه نمایان شده است و کانون‌های گردوغبار نمکی شکل گرفته‌اند که به‌صورت مستقیم و غیرمستقیم بر ریزاقلیم پیرامونی اثر می‌گذارند [۳–۶، ۱۳–۱۵، ۱۸، ۱۹]. ارزیابی‌های نسبت‌سنجی نشان می‌دهد که در کاهش ورودی‌های آبی، حدود ۶۰ درصد به سیگنال‌های اقلیمی (نظیر تغییرات بارش و دما) و حدود ۴۰ درصد به توسعه منابع آب و مداخلات مدیریتی نسبت داده می‌شود([4–6]) .پیامدهای اقلیمی این افت تراز در مقیاس محلی با تشدید حدهای دمایی، تغییر الگوی بارش و افزایش رخدادهای گردوغبار نمکی همراه بوده است؛ به‌طوری‌که توازن تابشی–آیرودینامیکی سطح مختل و نوسانات دمای روزانه/فصلی برجسته‌تر شده و آثار ثانویه‌ای چون کاهش کیفیت هوا و افزایش مخاطرات سلامت (به‌ویژه در گروه‌های حساس) را رقم زده است[۱۳–۱۵، ۱۸، ۱۹].

۴-۳. در یک مقایسه تطبیقی، سیگنال انسان‌زاد در خشکیدگی آرال غالب‌تر بوده و نقش انحراف‌های گسترده آبیاری در کاهش ورودی‌ها برجسته است، حال‌آن‌که در ارومیه ترکیبی از عوامل اقلیمی و مدیریت منابع آب به‌صورت هم‌افزا عمل کرده‌اند؛ بااین‌همه، در هر دو سامانه، حذف نقش تعدیل‌گر پهنه‌های آبی موجب افزایش نوسانات حرارتی، تغییرات الگوی فصلی و اختلال در چرخه‌های بارش شده است [۴–۷، ۱۰–۱۲، ۱۹]. پیام روشن هر دو مورد، ضرورت تعیین و تضمین جریان‌های زیست‌محیطی حداقلی برای حفظ کارکردهای اقلیمی–بوم‌شناختی و نیز پایش بلندمدتِ منسجمِ اقلیم محلی است تا تغییرات ریزاقلیمی و اثرات ثانویه (مانند گردوغبار نمکی) به‌موقع رصد و مدیریت شوند و ابزارهای سیاستی (از مدیریت تقاضای آب تا تدابیر کنترل گردوغبار) بر پایه شواهد به‌روزشونده تنظیم گردند[۴–۷، ۱۰–۱۲، ۱۹].

۵. پیامدهای اجتماعی–اقتصادی و سلامت

خشکیدگی دریاچه آرال ضربه‌ای عمیق به ستون‌های معیشتی منطقه وارد کرد؛ فروپاشی صنعت شیلات—که در دهه‌های پیشین سالانه ده‌ها هزار تُن صید را پشتیبانی می‌کرد—به کاهش شدید اشتغال مستقیم و غیرمستقیم در زنجیره ارزش

شیلات انجامید و سپس تنها در بخش شمالی آرال (North Aral Sea)با اجرای مداخلات مهندسی–مدیریتی شاهد احیای محدود بود که هرچند نشانه‌ای از امکان ترمیم است، اما از منظر وسعت و پایداری، فاصله معناداری با وضعیت پیشین دارد ([5]) .این فروکاست ظرفیت‌های اقتصادی با مهاجرت اجباری، افزایش آسیب‌پذیری معیشت‌های وابسته به آب، و شکاف‌های فضایی–اجتماعی در دسترسی به فرصت‌های شغلی همراه شد؛ هم‌زمان، تغییرات ریزاقلیمی و افزایش شوری خاک و آب، بهره‌وری کشاورزی را کاهش داده و هزینه‌های تولید را بالا برده است، به‌گونه‌ای که چرخه فقر–تخریب محیط‌زیست تقویت شده و تاب‌آوری اقتصادی جوامع محلی تضعیف گردیده است[۵، ۹].

در حوضه ارومیه نیز پیامدها چندبعدی و زنجیره‌ای بوده است :کاهش توان تولید کشاورزی در اثر افت تراز آب، افزایش شوری و سدیمی‌شدن خاک‌ها، و کاهش کیفیت آب آبیاری، راندمان محصول و درآمد کشاورزان را کاهش داده و زمینه فرونشست زمین و فرسایش خاک را فراهم کرده است؛ پدیده‌ای که علاوه بر خسارات مستقیم به زیرساخت‌ها، هزینه‌های جبران‌پذیری را بر بودجه‌های محلی تحمیل می‌کند و چشم‌انداز سرمایه‌گذاری در بخش‌های مولد را تیره می‌سازد [۱۳–۱۵، ۱۸، ۱۹]. از سوی دیگر، افول جذابیت‌های طبیعی و چشم‌اندازهای ساحلی، گردشگری طبیعت‌پایه را—که زمانی منبع درآمد مکمل برای جوامع پیرامونی بود—به رکود کشانده و اثر تکاثری منفی بر خدمات و مشاغل وابسته برجای گذاشته است[۹، ۱۸، ۱۹].

بُعد سلامت عمومی در هر دو حوضه به‌ویژه نگران‌کننده است .نمایان شدن بستر دریاچه و شکل‌گیری کانون‌های گردوغبار نمکی، با افزایش فراوانی و شدت طوفان‌های گردوغبار، کیفیت هوا را به‌طور محسوس کاهش داده و طیفی از پیامدهای سلامت—از تشدید بیماری‌های تنفسی مزمن (آسم، برونشیت)، تحریکات چشمی–پوستی و احتمال افزایش بیماری‌های قلبی–عروقی—را در جمعیت‌های در معرض ایجاد کرده است؛ در پیرامون آرال، رخدادهای مکرر گردوغبار با کاهش دید افقی همچنین، بروز اختلال در حمل‌ونقل و خدمات اضطراری به‌طور معناداری گزارش شده و به‌عنوان یکی از پیامدهای اصلی مورد توجه قرار گرفته است [۵، ۱۷]. در ارومیه نیز نمک‌گرد و ذرات معلق برخاسته از بسترهای شور و قلیایی می‌توانند با جابه‌جایی فصلی–جهتی، شهرها و روستاهای پایین‌دست را درگیر کنند و هزینه‌های درمانی و غیبت از کار/مدرسه را افزایش دهند؛ هم‌زمان، بار بیماری ناشی از مواجهه طولانی‌مدت، فشار مضاعفی بر شبکه‌های سلامت محلی و بودجه‌های عمومی وارد می‌کند [۱۳–۱۵، ۱۸، ۱۹]. برآیند این اثرات اجتماعی–اقتصادی و سلامت آن است که تاب‌آوری جوامع کاهش یافته، ناامنی معیشتی و غذایی تشدید می‌شود و چرخه‌های بازتولید نابرابری تقویت می‌گردد؛ وضعیتی که ضرورت مداخلات یکپارچه در مدیریت تقاضای آب، احیای جریان‌های زیست‌محیطی، کنترل گردوغبار نمکی، و حمایت‌های هدفمند اجتماعی–سلامت را برجسته می‌کند[۵، ۹، ۱۳–۱۵، ۱۷–۱۹].

۶. حکمرانی تطبیقی و نمونه‌های پاسخ

تجربه دریاچه آرال نشان می‌دهد که چندسطحی‌سازی حکمرانی و حرکت از ترتیب‌های سلسله‌مراتبی به شبکه‌های همکاری میان‌دولتی–میان‌بخشی شرط لازم مهار بحران‌های حوضه‌ای است. در این راستا، سازوکارهای بین‌دولتی و منطقه‌ای—از شوراهای حوضه‌ای تا برنامه‌های مفهومی–عملیاتی ده‌ساله با امکان تمدید—چارچوبی برای هم‌راستاسازی اهداف محیط‌زیستی و نیازهای توسعه‌ای فراهم کرده‌اند [۲۰–۲۳، ۲۵]. افزون بر آن، ابتکارات مشترک سازمانی مانند صندوق امانی ملل متحد برای آرال و اسناد سیاستی منتشرشده توسط GGGIبا فراهم‌سازی منابع مالی هدفمند، طراحی برنامه‌های سازگار با اقلیم در کشاورزی، و تقویت ظرفیت‌های نهادی کشورها، نمونه‌هایی از حکمرانی شبکه‌ای‌اند که به اشتراک‌گذاری ریسک و شتاب‌دهی به یادگیری سیاستی کمک می‌کنند [۲۰–۲۳، ۲۵]. ماهیت تطبیقی این سازوکارها در چرخه‌های «برنامه‌ریزی–اجرا–پایش–بازآرایی» تجلی می‌یابد: تعیین حقابه‌های زیست‌محیطی، سازوکارهای تخصیص انعطاف‌پذیر در دوره‌های خشکسالی، پایش مشترک شاخص‌های کلیدی (تراز، شوری، گردوغبار)، و بازتنظیم تصمیم‌ها با تکیه بر داده‌های به‌روز و ارزیابی پیامدها[۲۰–۲۳، ۲۵].

در ایران، برنامه احیای دریاچه ارومیه (ULRP) مصداقی از پیاده‌سازی مجموعه‌ای از ابزارهای مدیریت تقاضا (بهبود بهره‌وری آبیاری، اصلاح الگوی کشت، مدیریت پساب و بازچرخانی)، همراه با رهاسازی‌های زیست‌محیطی و هم‌زمانی با سال‌های پربارش است که به افزایش موقت سطح آب انجامید؛ بااین‌حال، تداوم اثرگذاری آن مستلزم تثبیت نهادی حقابه‌های محیط‌زیست، پایش مستقل و شفاف، و پیوند دادن مشوق‌های اقتصادی به پرهیز از برداشت‌های مازاد است [۶، ۱۹]. تجربه‌های آرال نیز نشان داده‌اند که هم‌پیوندی اقدامات سازه‌ای و غیرسازه‌ای—از بهسازی زیرساخت‌های اندازه‌گیری و تقسیم‌بندی آب تا اصلاح قواعد تخصیص—باید در کنار سازوکارهای حل‌وفصل اختلافات و هماهنگ‌سازی حقوقی پیش برود تا هزینه‌های مبادله بین شرکا کاهش یابد و پایبندی به توافق‌ها افزایش یابد([23–20]) .

بُعد اجتماعی حکمرانی تطبیقی زمانی کارآمد می‌شود که مشارکت جامعه محلی نه صرفاً در مقام «ذی‌نفع»، بلکه به‌مثابه «همراه سیاست‌گذار» به‌رسمیت شناخته شود. ابتکارات تقویت تاب‌آوری معیشت، آموزش و ترویج مدیریت آب در مزرعه، و توانمندسازی گروه‌های هدف—از جمله زنان روستایی به‌عنوان کنشگران کلیدی مدیریت آب خانگی و کشاورزی—به ارتقای پذیرش اجتماعی سیاست‌ها، کاهش هزینه‌های اجرای تغییر و ایجاد حس مالکیت جمعی بر نتایج می‌انجامد [۲۳، ۲۶]. در این رویکرد، بسته ابزارهای مکمل—تنظیم‌گری هوشمند (استانداردها و قیود برداشت)، مشوق‌های اقتصادی (یارانه‌های مشروط به صرفه‌جویی آب، قراردادهای عملکرد)، و راهکارهای طبیعت‌مبنا برای کنترل گردوغبار نمکی

(پوشش‌های شورپسند، تثبیت مرحله‌ای بسترهای نمایان)—در کنار سامانه‌های یکپارچه پایش–هشدار کیفیت هوا و سلامت عمومی قرار می‌گیرند تا از «سیاست روی کاغذ» به «تغییر روی زمین» پل بزنند [۶، ۱۹، ۲۳، ۲۵، ۲۶]. نتیجه آن‌که، هم در آرال و هم در ارومیه، پایداری نتایج زمانی محتمل است که تعهد مالی پایدار، شفافیت داده، همکاری فرامرزی/بین‌بخشی و مشارکت معنادار جامعه به‌صورت هم‌افزا در چرخه تصمیم‌گیری نهادینه شود[۲۰–۲۳، ۲۵].

۷. درس‌های کلیدی(Lessons Learned)

برآیند تجربه‌های دو حوضه نشان می‌دهد دیپلماسی آب و سازوکارهای فرامرزیِ کارآمد پیش‌شرط هر برنامه احیاست؛ هم‌سویی منافع کشورها/استان‌ها، کاهش تعارضات تخصیصی، و ایجاد نهادهای پایدارِ حل‌وفصل اختلافات، ظرفیت اجرایی سیاست‌ها را چند برابر می‌کند و از بازگشت‌پذیری تصمیم‌ها در بحران‌های خشکسالی می‌کاهد [۱، ۵، ۲۰–۲۲]. بر مبنای همین منطق، تعیین و تضمین حقابه‌های زیست‌محیطی و جریان‌های پایه نقشی محوری در تثبیت هیدرولوژیک دارد؛ بدون این جریان‌های حداقلی، نه پویایی بوم‌سازگان‌ها حفظ می‌شود و نه می‌توان منابع گردوغبار نمکی را مهار کرد، زیرا نمایان شدن بستر و افزایش شوری با فقدان جریان‌های پایدار تشدید می‌شوند([19–21]) .در سطح مزرعه و حوضه نیز مدیریت تقاضای آب باید هسته سیاست‌گذاری باشد: نوسازی آبیاری، اصلاح الگوی کشت به سوی گونه‌های کم‌آب‌بر و سازگار با اقلیم، و ارتقای بهره‌وری آب در همه حلقه‌های زنجیره ارزش کشاورزی، وابستگی به برداشت‌های مازاد را کاهش می‌دهد و امکان تأمین پایدار حقابه‌های محیط‌زیست را فراهم می‌سازد[۱۹، ۲۳].

از سوی دیگر، کنترل گردوغبار نمکی مستلزم بسته‌ای از مداخلات مرحله‌ای و طبیعت‌مبناست :تثبیت فیزیکی–زیستی بسترهای نمایان، بهره‌گیری از مالچ‌های کم‌خطر و ایجاد/گسترش پوشش‌های گیاهی شورپسند در کنار سامانه‌های هشدار زودهنگام برای مدیریت رویدادها، حلقه‌های مکملی هستند که باید با پایش پیوسته رطوبت–باد–کیفیت هوا پشتیبانی شوند ([۱۳–۱۵]، [۱۹]). کارایی این مداخلات زمانی پایدار می‌شود که مشارکت معنادار جوامع محلی—به‌ویژه زنان به‌عنوان کنشگران کلیدی مدیریت آب خانگی و کشاورزی—در تمام مراحل تصمیم‌گیری، اجرا و نظارت نهادینه شود؛ چنین مشارکتی هم عدالت محیط‌زیستی را تقویت می‌کند و هم هزینه‌های گذار رفتاری را کاهش می‌دهد [۲۳، ۲۶]. نهایتاً، اجرای مؤثر همه این اجزا بدون پایش یکپارچه و داده‌باز ممکن نیست: شبکه‌های سنجش سطح و شوری و کیفیت آب، رصد گردوغبار و شاخص‌های سلامت، با دسترس‌پذیری داده برای پژوهش و پاسخ سریع، زیرساخت اطلاع‌رسانی تصمیم‌ها و یادگیری سیاستی تکرارشونده را فراهم می‌آورد و از خطای سیاستی در شرایط عدم‌قطعیت می‌کاهد[۳، ۶، ۱۱، ۱۵].

۸. شکاف‌های دانشی و مسیر آینده

نخست، کمی‌سازی و مقیاس‌پذیر کردن سهم نسبی عوامل اقلیمی در برابر مداخلات انسان‌زاد در زیرحوضه‌های گوناگون دریاچه ارومیه یک خلأ اساسی است. برای کاهش عدم‌قطعیت در «سهم‌سپاری اقلیم/انسان» باید داده‌های بازتحلیل جوی–هیدرولوژیک با مشاهدات زمینی و سنجش‌ازدور ادغام شود، از رویکردهای نسبت‌دهی چندمدلی (multi-model attribution) و کاهش‌مقیاس آماری/دینامیکی بهره گرفته شود، و نقش تله‌کانکشن‌های اقلیمی و الگوهای گردش بزرگ‌مقیاس در نوسانات میان‌سالانه تا چندساله به‌صورت سازگار بررسی گردد تا تصویر زمانی–مکانی دقیق‌تری از محرک‌ها فراهم آید [۴–۶، ۱۰–۱۲]. دوم، پیوند گردوغبار نمکی–سلامت نیازمند چارچوبی داده‌محور و علّی است که نشانگرهای سنجش‌ازدور (شاخص‌های بازتابی/حرارتی و برآوردهای ذرات معلق) را با ثبت‌های اپیدمیولوژیک فردی/جمعیتی، سنجه‌های مواجهه (غلظت، تداوم، رخدادهای حدی) و متغیرهای مداخله‌گر اجتماعی–اقتصادی ادغام کند؛ در این مسیر، به‌کارگیری طرح‌های استنباط علّی مانند متغیرهای ابزاری، اختلاف در اختلاف‌ها و سایر طراحی‌های شبه‌تجربی برای تفکیک «هم‌بستگی» از «علیت» ضروری است تا برآورد بار بیماری و هزینه‌های سلامت به شواهد سخت متکی باشد [۱۳–۱۵، ۱۷–۱۹]. سوم، در حوزه اقتصاد سیاسی آب باید سازوکارهای مشوق/بازدارنده مدیریت تقاضا به‌طور نظام‌مند طراحی و آزمون شوند: از قیمت‌گذاری پلکانی–هوشمند و یارانه‌های مشروط به صرفه‌جویی تا قراردادهای عملکردی و بازارهای محدود حقابه که با الزامات عدالت محیط‌زیستی، پذیرش اجتماعی و قابلیت اجرایی هم‌ساز باشند و در مقیاس‌های محلی تا فرامرزی به مهار برداشت مازاد و تضمین حقابه‌های زیست‌محیطی یاری رسانند([19–24]) .نهایتاً، پیشبرد کارآزمایی‌های سیاستی (policy trials)برای سنجش بسته‌های متنوع احیا—ترکیب اقدامات سازه‌ای و طبیعت‌مبنا، مدیریت تقاضا و برنامه‌های کنترل گردوغبار—همراه با ارزیابی‌های تطبیقی هزینه–فایده، تحلیل حساسیت و ارزش اطلاعات، مسیر یادگیری سیاستی تکرارشونده را تقویت می‌کند و زمینه حکمرانی تطبیقی مبتنی بر چرخه پایش–ارزیابی مستمر و بازتنظیم تصمیم‌ها را فراهم می‌آورد[۱۹–۲۳، ۲۵].

۹. نتیجه گیری

این مرور تطبیقی نشان داد که بی‌توجهی به توازن «بوم–اقلیم–جامعه» به فروپاشی چندبُعدی در سامانه‌های دریاچه‌ای می‌انجامد: در آرال، غلبه انحرافات گسترده آب برای آبیاری، نقش تعدیل‌گر پهنه آبی را از میان برده و به تشدید حدهای دمایی، تغییر فصل‌مندی و کاهش بارش انجامیده است؛ پیامدی که با سقوط صنعت شیلات و بروز بحران‌های سلامت همراه شد [۵، ۷–۱۲، ۱۶].در ارومیه، هم‌افزایی سیگنال‌های اقلیمی و توسعه منابع آب، به افت ۸۰–۹۰٪ مساحت/حجم، افزایش شوری، نمایان شدن بستر و شکل‌گیری کانون‌های نمک‌گرد منجر شده و زنجیره‌ای از آثار اقلیمی، زیست‌محیطی و سلامت‌محور را دامن زده است [۳–۶، ۱۳–۱۵، ۱۸، ۱۹]. در هر دو حوضه، تشدید رخدادهای گردوغبار و کاهش کیفیت

هوا، بار بیماری‌های تنفسی و هزینه‌های اجتماعی–اقتصادی را افزایش داده و تاب‌آوری معیشت‌های محلی را تضعیف کرده است[۵، ۹–۱۵، ۱۷–۱۹].

از منظر پیشبرد دانش و حل مسئله، این پژوهش با ادغام دو چارچوب DPSIR و IWRM، زنجیره علّی «فشار–حالت–اثر–پاسخ» را در دو بستر نهادی متفاوت شفاف‌سازی کرد و سهم نسبی عوامل انسان‌زاد و اقلیمی را به‌صورت مقایسه‌ای برجسته ساخت—از جمله نسبت‌دهی تقریبی ۶۰٪ اقلیم / ۴۰٪ توسعه منابع آب در کاهش ورودی‌های ارومیه([6–4]) .افزون‌براین، یک بسته سیاستیِ عمل‌پذیر را صورت‌بندی کرد که ارکان آن شامل دیپلماسی آب و همکاری فرامرزی، حقابه‌های زیست‌محیطی و جریان‌های پایه، مدیریت تقاضای آب و کشاورزیِ هوشمند اقلیم، کنترل مرحله‌ای گردوغبار نمکی با رویکردهای طبیعت‌مبنا، و پایش–هشدار یکپارچه با دسترسی داده‌باز است؛ بسته‌ای که بر تجربه‌های میدانی از ULRPدر ارومیه و سازوکارهای بین‌دولتی در آرال تکیه دارد و منطق حکمرانی تطبیقی را در چرخه برنامه‌ریزی–اجرا–پایش–بازتنظیم نهادینه می‌کند[۵، ۱۰–۱۲، ۱۹–۲۳، ۲۵، ۲۶].

یافته‌های این مرور یک نقشه راه سیاستی برای مدیریت بحران‌های آبی از مقیاس محلی تا فرامرزی عرضه می‌کند: تعیین و تضمین جریان‌های زیست‌محیطی به‌مثابه خط قرمز پایداری، پیوند مشوق‌های اقتصادی با صرفه‌جویی واقعی آب در مزرعه، طراحی سازوکارهای حل‌وفصل اختلافات و شفافیت داده برای افزایش پایبندی، و توانمندسازی جوامع—به‌ویژه زنان—برای کاهش هزینه‌های گذار و ارتقای عدالت محیط‌زیستی [۱، ۵، ۱۹–۲۳، ۲۵، ۲۶]. به‌علاوه، این چارچوب‌ها قابلیت انتقال به سایر حوضه‌های بسته و نیمه‌بسته را دارند و می‌توانند با اجرای کارآزمایی‌های سیاستی و ارزیابی‌های تطبیقی هزینه–فایده، به‌سرعت با شرایط محلی سازگار شوند و ریسک تصمیم‌گیری در عدم‌قطعیت اقلیمی را بکاهند[۱۹–۲۳، ۲۵]. بدین‌ترتیب، گذار از «سیاست روی کاغذ» به «تغییر روی زمین» نه فقط ممکن، بلکه با تعهد بلندمدت و یادگیری مستمر، دست‌یافتنی است.

منابع)

Allen, T. H. (2002). The Aral Sea crisis: Desiccation and perspectives on recovery [Unpublished manuscript/teaching note]. SUNY Oneonta. https://www.oneonta.edu/faculty/allenth/class-readings-assword/aral%20sea%20crisis.pdf

Aquapedia (Tufts University Water Diplomacy). (n.d.). Efforts to resolve the Aral Sea crisis. ttps://aquapedia.waterdiplomacy.org/wiki/Efforts_to_Resolve_the_Aral_Sea_Crisis (Retrieved September 6, 2025)

Earth.Org. (2024, May 16). Explainer: What happened to the Aral Sea? https://earth.org/the-aral-sea-catastrophe-understanding-one-of-the-worst-ecological-calamities-of-the-last-century/

Encyclopaedia Britannica. (2025). Aral Sea. https://www.britannica.com/place/Aral-Sea

Foreign Policy Association. (2007, April 11). The Aral Sea disaster, part 3: Living the climate change prophecy. https://fpa.org/the-aral-sea-disaster-part-3-living-the-climate-change-prophecy/

Ghale, Y. A. G., et al. (2021). Dried bottom of Urmia Lake as a new source of dust in the Middle East. Atmospheric Environment, 260, 118452. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118452

Global Green Growth Institute & UN Multi-Partner Human Security Trust Fund. (2023). White paper on green, inclusive growth opportunities in the Aral Sea region. https://gggi.org/news/gggi-and-un-mphstf-present-their-white-paper-on-the-aral-sea-region/

International Institute for Applied Systems Analysis. (2015, December 15). Can water diplomacy enable a new future for the Urmia Lake? (Workshop summary). https://previous.iiasa.ac.at/news/20151215-urmia-lake

Jafari-Khounigh, A., Sadeghi-Bazargani, H., & Haghdoost, A. A. (2022). Public perception on the health consequences of an environmental disaster: The case of Lake Urmia drying up. Medical Journal of the Islamic Republic of Iran, 36, 136. https://doi.org/10.47176/mjiri.36.136

Keya, S., Zulfikar, M., & Hossain, M. (2024). Lake Urmia crisis and possible solutions [Preprint]. Tishk International University. https://tishk.org/blog/articles-in-advance/lake-urmia-crisis-and-possible-solutions/

Lioubimtseva, E. (2014). Impact of climate change on the Aral Sea and its basin. Grand Valley State University. https://www.gvsu.edu/cms4/asset/43276A40-0D8F-A887-4E4B2E0B509EA609/lioubimtsevaimpactofclimate.pdf

NASA Earth Observatory. (2023, October 9). Lake Urmia shrivels again. https://earthobservatory.nasa.gov/images/151913/lake-urmia-shrivels-again

NASA Earth Observatory. (n.d.). World of change: Shrinking Aral Sea. https://earthobservatory.nasa.gov/world-of-change/AralSea (Retrieved September 6, 2025)

Pouladi, P., Badiezadeh, S., Pouladi, M., Yousefi, P., Farahmand, H., Kalantari, Z., Yu, D. J., & Sivapalan, M. (2021). Interconnected governance and social barriers impeding the restoration process of Lake Urmia. Journal of Hydrology, 598, 126489. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126489

Rahimi, J., AghaKouchak, A., Moftakhari, H., Mirchi, A., Hassanzadeh, E., Madani, K., … Breuste, J. (2021). Why is Lake Urmia drying up? Prognostic modeling with land-use and climate change scenarios. Frontiers in Earth Science, 9, 631585. https://doi.org/10.3389/feart.2021.631585

Roy, S. B., Smith, M., Morris, L., Orlovsky, N., & Khalilov, A. (2014). Impact of the desiccation of the Aral Sea on summertime surface air temperatures. Journal of Arid Environments, 110, 79–85. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2014.06.008

Schmidt, S., Darabi, H., & Schröder, C. (2021). Environmental degradation at Lake Urmia (Iran): Exploring the causes and consequences. GeoJournal, 86, 2701–2716. https://doi.org/10.1007/s10708-020-10219-9

Schulz, F., Alaghmand, S., Koch, M., & Fohrer, N. (2020). What drives the water level decline of Lake Urmia? Scientific Reports, 10, 18851. https://doi.org/10.1038/s41598-020-75671-3

Shadkam, S., Ludwig, F., van Oel, P. R., Kirmit, Ç., & Kabat, P. (2016). Impacts of climate change and water resources development on the declining inflow into Iran’s Urmia Lake. Journal of Great Lakes Research, 42(5), 942–952. https://doi.org/10.1016/j.jglr.2016.07.033

Sharma, A., Huang, H.-P., Zavialov, P., & Khan, V. (2018). Impact of desiccation of Aral Sea on the regional climate of Central Asia using WRF model. Pure and Applied Geophysics, 175(1), 465–478. https://doi.org/10.1007/s00024-017-1675-y

Small, E. E., Sloan, L. C., & Giorgi, F. (2001). Changes in surface air temperature caused by desiccation of the Aral Sea. Journal of Climate, 14(3), 284–299. https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014%3C0284:CSATCB%3E2.0.CO;2

UNDP. (2018). Mid-term evaluation of the UN Joint Programme "Building the resilience of communities affected by the Aral Sea disaster through a Multi-Partner Human Security Trust Fund for the Aral Sea Region". https://erc.undp.org/evaluation/documents/download/12090

United Nations Development Programme. (n.d.). Enhancing the resilience of the local population in Aral Sea region. https://www.undp.org/uzbekistan/projects/enhancing-resilience-local-population-aral-sea-region (Retrieved September 6, 2025)

United Nations Environment Programme. (2014). The future of the Aral Sea lies in transboundary co-operation. Environmental Development, 10, 120–128. https://www.unep.org/resources/report/future-aral-sea-lies-transboundary-cooperation-wmo-bulletinbased-unep-global

World Bank. (2021, June 17). In search of a desert oasis: Innovative projects imagine a promising future for the Aral Sea and Central Asian drylands. https://www.worldbank.org/en/news/feature/2021/06/17/a-promising-future-for-the-aral-sea-and-central-asian-drylands

Zhang, H., Wang, Y., Li, X., & Sun, Y. (2023). Ecological governance of Aral Sea. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 38(5), 613–623. (English summary available). https://www.jors.cn/bcas/article/abstract/7045 (Landing page)

Comparative Climatic Impacts of the Desiccation of Lake Urmia and the Aral Sea: Lessons for Future Environmental Crisis Management and Adaptive Governance

Hadi Siasar[1]

Assistant Professor, Payame Noor University (PNU).

* Corresponding author: hadisiasar@pnu.ac.ir

Abstract

The desiccation of Lake Urmia in Iran and the Aral Sea in Central Asia represents one of the most striking examples of the complex interplay between human-induced pressures and climatic drivers, resulting in profound climatic, ecological, and socio-economic consequences. Once vibrant ecosystems, both lakes have undergone dramatic transformations due to a combination of unsustainable water use, infrastructure development, and the impacts of climate change.

This comparative review draws on two complementary analytical frameworks: DPSIR (Drivers–Pressures–State–Impact–Response) and IWRM (Integrated Water Resources Management). These frameworks are used to systematically collect and structure existing evidence to explain the mechanisms behind lake desiccation, assess the scale and intensity of its impacts, and evaluate the effectiveness of management responses.

The findings reveal that in the Aral Sea basin, extensive water diversions for large-scale irrigation and rigid allocation policies have been the dominant drivers of desiccation. The loss of the lake's natural moderating effect on the regional climate has amplified temperature extremes, disrupted seasonal climate patterns, and caused a significant decline in precipitation. Conversely, in the Lake Urmia basin, the combined effects of climate change and water resource development have led to a sharp reduction in lake area and volume, a marked increase in salinity, the exposure of the lakebed, and the emergence of widespread salt-dust storm hotspots.

The socio-economic consequences in both regions are profound. These include a significant decline in agricultural and fishery productivity, rising public health costs due to respiratory and other illnesses, and a deterioration in the resilience of local livelihoods. Communities surrounding the lakes face heightened vulnerability as food insecurity, migration, and poverty intensify in response to environmental degradation.

Drawing on lessons from ongoing restoration initiatives—such as the Lake Urmia Restoration Program (ULRP) and transboundary cooperative frameworks developed for the Aral Sea—the study proposes a practical policy package to guide adaptive governance and future environmental crisis management. Key elements of this package include promoting water diplomacy and cross-border collaboration, defining and safeguarding environmental flow allocations, implementing demand-side water management and climate-smart agriculture, applying nature-based solutions for phased control of salt-dust storms, and establishing integrated monitoring and early-warning systems with active community participation.

By integrating these measures, this framework offers a roadmap for adaptive governance in similar water-stressed basins. It emphasizes the importance of long-term commitment, transparent data sharing, and participatory decision-making to improve the transferability of policies across scales—from local to regional—and to strengthen resilience in the face of escalating climate and water crises.

Keywords: Lake desiccation, Lake Urmia, Aral Sea, Adaptive governance

بررسی کاربست فناوری بلاکچین به‌منظور توسعه بانکداری اجتماعیِ آب در ایران: مزایا و چالش‌ها

رامتین طاوسی راد [۱] ، محمد انصاری قوجقار [۲]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

۲- نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.

آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول: ansari.ghojghar@ut.ac.ir

چکیده

بحران آب در ایران به‌عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی و توسعه‌ای، ضرورت بازاندیشی در شیوه‌های حکمرانی منابع آبی را بیش از پیش نمایان ساخته است. در سال‌های اخیر، مفهوم بانکداری اجتماعی آب به‌عنوان رویکردی نوین مطرح شده که با بهره‌گیری از فناوری‌های نوین می‌تواند اصلاح مؤلفه‌های حکمرانی و ارتقاء مشارکت اجتماعی را امکان‌پذیر سازد. این پژوهش با رویکرد توصیفی–تحلیلی و مبتنی بر منابع کتابخانه‌ای، به بررسی ظرفیت‌های فناوری‌های نوین به‌ویژه بلاکچین در پشتیبانی از بانکداری اجتماعی آب پرداخته است. نتایج نشان می‌دهد که کاربرد بلاکچین می‌تواند شفافیت و اعتماد عمومی را در مبادلات آبی افزایش دهد، اینترنت اشیاء امکان پایش هوشمند منابع و مصرف آب را فراهم سازد و هوش مصنوعی نیز در بهینه‌سازی تصمیم‌گیری و پیش‌بینی بحران‌های آبی نقش‌آفرینی کند. تحلیل تطبیقی با مطالعات ایرانی و بین‌المللی حاکی از آن است که ترکیب این فناوری‌ها با سازوکارهای مشارکت اجتماعی می‌تواند به اصلاح شاخص‌هایی چون شفافیت، عدالت توزیعی، کارایی و پاسخگویی در حکمرانی آب منجر شود. بنابراین، استقرار چارچوب مفهومی پیشنهادی این پژوهش می‌تواند گامی مهم در جهت گذار از مدیریت متمرکز به حکمرانی مشارکتی و هوشمند منابع آبی در ایران باشد.

کلیدواژه‌ها: بانکداری هیدرو اجتماعی، حکمرانی آب، بلاکچین، اینترنت اشیاء، هوش مصنوعی.

۱- مقدمه

قرارگیری کشور ایران در کمربند خشکی دنیا، موجب شده است تا بسیاری از مناطق آن با داشتن مشخصه‌های مناطق خشک و نیمه خشک، همواره با خشکسالی و بحران آب مواجه باشند که معضلات اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی متعددی را نیز برای کشور به دنبال داشته است (نصیری و همکاران، ۱۴۰۴). بحث امنیت در ابعاد گسترده به عنوان

بنیادی‌ترین حقوق بشر مورد توجه همه جوامع بین‌الملل بوده است. این مهم در مواجهه با جمعیت رو به رشد کنونی و تشدید بهره برداری از ذخایر محدود و تجدید پذید و ناپذیر، به صورت خاص در دو بعد امنیت آب و امنیت غذا، اهمیت بیش‌تری پیدا می‌کند (حسنپور و ولی سامانی، ۱۴۰۲). براساس گزارش مجمع جهانی اقتصاد، کمیابی منابع آبی طی سال‌های پیش‌رو از جمله ریسک‌های جهانی محسوب می‌شود. بحران شدید آب که اکنون خود را به‌صورت کاهش روزافزون امنیت آبی نشان می‌دهد، برای کشور ایران بسیار جدی و خطرآفرین ارزیابی می‌شود (حسینی و همکاران، ۱۴۰۴). بخش عمده مشکلاتی که در این بخش وجود دارد، مربوط به مدیریت و بحران الگوهای حکمرانی است. از مشکلات عمده این حوزه می‌توان به ناهماهنگی میان ذینفعان، واکنش اضطراری نسبت به بحران ها به جای پیشگیری و بهره‌وری پایین آب در کشاورزی اشاره کرد(اسکوهی و اسماعیلی، ۱۴۰۰). به جهت حل مشکلات و در پاسخ به کاستی های موجود، نیاز است تا از توسعه عرضه عبور کرده و بر مدیریت تقاضا و به کارگیری ساز و کارهای مبتنی بر بازار برای تخصیص منعطف آب تمرکز کنیم(زراعتی نیشابوری و همکاران، ۱۴۰۳). تخصیص مؤثر آب بین کاربری‌های گوناگون از چالش‌های دنیای امروز می‌باشد. بطوریکه میزان آب شیرین موجود در جهان بسیار متغیر و در بسیاری از مناطق سرانه آب شیرین موجود در حال کاهش است. یکی از رویکردهای پربازده مدیریت تقاضای آب، ایجاد بانک آب است. بانک آب یک نهاد حقوقی یا حقیقی است که شرایط داد و ستد قانونی انواع آب سطحی و آب زیرزمینی را فراهم میکند. نهاد بانک آب می‌تواند نقش‌هایی نهادی از جمله تعیین حداقل نیاز زیست محیطی، تأیید صلاحیت فعالان بازار، عقد قراردادهای مبادله آب، تعیین قیمت های مبادله، فراهم نمودن و تعیین کردن شرایط و مقررات مبادلات را به عهده گیرد (آقایی و همکاران، ۱۳۹۸). مفهوم بانکداری اجتماعی آب در ادبیات ایرانی به‌منزله بازتعریفی از رژیم‌های حکمرانی آب طرح می‌شود؛ مدلی که با تکیه بر مشارکت جامعه محلی، اعتبار اجتماعی و حساب‌داری جمعیِ آب، می‌کوشد تخصیص، نظارت و حل اختلافات را به شیوه‌ای عادلانه و سازگار با زمینه‌های اجتماعی سامان دهد (قربانیان و همکاران، ۱۴۰۱).

در مواجهه با چالش‌های پیچیده ای مانند تغییرات اقلیمی، رشد جمعیت و تنش های منابع آبی، نیاز به فناوری های نوآورانه برای بهبود مدیریت و تخصیص منابع آب بیش از پیش احساس می‌شود. فناوری بلاکچین به عنوان یک سیستم ثبت غیرقابل تغییر و شفاف اطلاعات، توانایی ایجاد اعتماد میان ذینفعان را داراست و می‌تواند نقش مهمی در بانکداری اجتماعی آب داشته باشد. فناوری بلاکچین با ویژگی‌هایی مانند دفترکل توزیع‌شده، امنیت بالا و قابلیت اجرا از طریق قراردادهای هوشمند، در بسیاری از حوزه‌ها همچون تأمین مالی، مدیریت زنجیره تأمین و خدمت‌رسانی عمومی کاربرد یافته است؛ با این حال، استفاده از آن برای مدیریت منابع آبی هنوز در مراحل ابتدایی قرار دارد و مطالعات تجربی محدود هستند(Satilmisoglu et al,2024).

کاربست‌های آزمایشی و مرورهای نظام‌مند نشان داده‌اند که بلاکچین می‌تواند بازارهای آب را با ثبت برخط معاملات، انتشار داده‌های قیمتی به‌صورت شفاف و اجرای خودکار قیود حقوقی زیست‌محیطی پشتیبانی کند و همچنین در پایش کیفیت آب و زنجیره تأمین داده‌های سنجش به کاهش عدم‌تقارن اطلاعاتی کمک کند(Zhang,2023). نمونه‌های میدانی در استرالیا نشان داده‌اند که پیاده‌سازی مبتنی بر قراردادهای هوشمند می‌تواند فرآیندهای پیچیده و زمان‌بر مبادله آب را ساده و اعتماد به بازار را تقویت کند، هرچند نیازمند طراحی دقیق حقوق مجوزها و استانداردهای داده است(Buyssens et al, 2024).

۱-۱- بحران آب در کشور ایران و ضرورت رویکردهای نوین در حکمرانی آب

کم‌آبی و بحران آب در ایران نتیجه عوامل فیزیکی و اقتصادی ناشی از مدیریت ضعیف منابع آب است. عوامل دیگری مانند بارش کم سالانه، خشکسالی مداوم، دسترسی محدود به آب، افزایش جمعیت، تغییر اقلیم، پراکنش فضایی متفاوت آب، بهره‌وری نامناسب آب در بخش‌های مختلف کشاورزی و عدم برنامه‌ریزی پایدار آب را نیز نمی‌توان نادیده گرفت (میرشکاران،۱۳۹۹). مشکلات ایجاد شده در طی سال‌های متمادی به‌جای کم‌آبی مطلق، بیشتر پیامد حکمرانی نامطلوب است. اگر به بحران آب توجه کافی نشود، این پدیده باعث افزایش مهاجرت، گسترش بی‌رویه به حاشیه شهرها و به‌طورکلی به خطر افتادن امنیت ملی می‌شود (مومن زاده و همکاران،۱۴۰۲). بنابراین برای غلبه بر بحران موجود، نیاز به اصلاح سازوکارهای حکمرانی و بهره‌گیری از رویکردهای نوین همچون حکمرانی مشارکتی، بانکداری اجتماعی آب و فناوری‌های نوین اطلاعاتی وجود دارد.

۱-۲- بانک آب و بانکداری اجتماعی آب

بانک آب نهادی است که امکان مبادله حقابه‌ها، ذخیره‌سازی و تخصیص بهینه منابع آبی را فراهم می‌آورد. این مفهوم نخستین بار در ایالات متحده و اسپانیا مطرح شد و به‌عنوان ابزاری برای افزایش انعطاف‌پذیری نظام تخصیص آب در شرایط خشکسالی مورد استفاده قرار گرفت (Garrido & Llamas,2009)

بانک آب در کشورهای مختلفی نظیر شیلی، استرالیا، ایالات متحده آمریکا و کشورهای های اروپایی نظیر اسپانیا اجرا شد. با توجه به نتایج به دست آمده در کشورهای مذکور ، مشخص شد که نهاد بانک آب قادر است باعث افزایش امنیت آبی شود اما در عین حال در بعضی کشورها مانند شیلی به دلیل انحصاری شدن بازار و افزایش رانت در این بازار، عدالت اجتماعی از بین رفته و بیشتر سهم آب در اختیار ثروتمندان قرار می‌گرفت. بر همین اساس، با مطالعات صورت گرفته بر موضوع بانک آب، کمبود مفهوم مدیریت مشارکتی در این نهاد دیده می‌شد و به همین دلیل، بانکداری اجتماعی آب معرفی

گردید. در این تعریف، بانکداری اجتماعی آب به عنوان ساختاری سیاسی، اجتماعی و اقتصادی که با بهره‌گیری از مشارکت اجتماعی موجبات امنیت آبی را فراهم می‌کند، مطرح شد. بانک آب باید به اجتماع تکیه کند و هدف اصلی آن ایجاد یا ارتقا امنیت پایدار آبی باشد. در این تعریفِ بانکداری اجتماعی آب به نوعی سیاستگذاری متکی به مشارکت بهره‌برداران در مدیریت و همچنین تغییر ساختار حکمرانی از حکمرانی دستوری و کنترلی به حکمرانی مشارکتی تاکید می‌شود(قربانیان و همکاران،۱۴۰۱). در این رویکرد علاوه بر جنبه‌های اقتصادی، ابعاد اجتماعی، عدالت توزیعی و... مشارکت جامعه محلی نیز مورد توجه قرار می‌گیرد. بانکداری اجتماعی آب می‌تواند بستری برای مشارکت ذی‌نفعان، شفافیت در تخصیص آب و تقویت اعتماد اجتماعی در مدیریت منابع آبی باشد(Boelens et al.,2016).

۳-۱- فناوری بلاکچین و کاربرد آن در حکمرانی منابع طبیعی

فناوری بلاکچین یک دفترکل توزیع‌شده‌ی رمزنگاری‌شده است که با ثبت توالی تراکنش‌ها به‌صورت غیرقابل‌تغییر و توزیع‌شده، امکان شفافیت و ردیابی را بدون نیاز به واسطهِ متمرکز، فراهم می‌کند. از منظر حکمرانی منابع طبیعی، این ویژگی‌ها وعده می‌دهند تا مالکیت، تخصیص و تاریخچه تصمیمات مرتبط با منابعی همچون آب به‌صورت شفاف و پاسخگو به‌ویژه در زمینه‌هایی که اختلافات حقوقی و اطلاعاتی رایج‌اند، ثبت شود (Arafat,2024). با دیجیتال‌سازی و توکنیزه‌سازی(Tokenization) حقابه‌ها و ایجاد پلتفرم‌های مبتنی بر بلاکچین، ذینفعان می‌توانند معاملات آب را شفاف‌تر، سریع‌تر و قابل‌ردیابی کنند؛ تجربه‌های آزمایشی شامل پروژه‌های پایلوت و پلتفرم‌های تجاری نشان داده‌اند که این رویکرد می‌تواند هزینه‌های مبادله و اختلافات مالکیتی را کاهش دهد اما هم‌زمان نیازمند تعیین چارچوب‌های حقوقی و استانداردسازی داده‌هاست که با حقوق مکتوب محلی و ملی هم‌خوان شود (Huang,2025). از دیگر مزیت های استفاده از فناوری بلاکچین، می‌توان به قراردادهای هوشمند اشاره کرد. قراردادهای هوشمند این امکان را فراهم می‌سازند که قواعد تخصیص آب یا محرک‌های جبرانی براساس شاخص‌های از پیش تعریف‌شده مانند سطح آب مخازن یا شاخص‌های خشکسالی به‌صورت خودکار اعمال شوند؛ این خودکارسازی می‌تواند سرعت پاسخ مدیریتی را در شرایط اضطراری افزایش دهد، اما نتیجه‌ای دقیق و عادلانه مستلزم بازنگری حقوقی پیش از اجراست(Le Thui,2025).

پژوهش های بسیار اندکی به منظور انجام کاربست فناوری بلاکچین در مباحث علوم آب به انجام رسیده است. (Chutani et al, 2023) یک سیستم مدیریت آب غیرمتمرکز مبتنی بر بلاکچین با استفاده از دستگاه‌های اتریوم(Ethereum) و اینترنت اشیاء پیشنهاد می‌کند که فساد را از طریق ردیابی تغییرناپذیر تراکنش‌ها از بین برده و همجنین تحمل خطا و قابلیت ردیابی کامل از تأمین‌کنندگان تا مصرف‌کنندگان را فراهم می‌کند. به طور مشابه، (Maulekhi et al, 2022) یک سیستم

هوشمند برداشت آب یکپارچه با بلاکچین توسعه می‌دهد که فرآیندهای انتقال آب را با استفاده از حسگرهای اینترنت اشیاء ، حسگرهای جریان آب و حسگرهای اولتراسونیک خودکار می‌کند، در حالی که تمام داده‌های مصرف آب را در بلاکچین ذخیره شده تا شفافیت و سوابق ضد دستکاری را تضمین کند. (Sriyono, 2020) به چالش‌های کمبود آب در مناطقی مانند شمال آفریقا و آسیای مرکزی می‌پردازد و استدلال می‌کند که فناوری بلاکچین می‌تواند پایداری مدیریت آب را از طریق قراردادهای هوشمند که گردش کار را خودکار می‌کنند و اعتماد، شفافیت و پاسخگویی را در بین ذینفعان تضمین می‌کنند، افزایش دهد. هر سه مطالعه بر پتانسیل بلاکچین برای ایجاد انقلابی در مدیریت سنتی آب از طریق تمرکززدایی، اتوماسیون و بهبود شفافیت تأکید دارند.

از منظر پایداری و محیط‌زیست نیز پژوهش‌های اخیر از پتانسیل بلاکچین در ارتقاء پاسخگویی زیست‌محیطی و حسابداری منابع طبیعی گزارش می‌دهند؛ به‌گونه‌ای که هر تراکنش یا ورود داده می‌تواند نشانگر یک واحد مصرف یا التزام محیط‌زیستی باشد و بدین‌وسیله حسابداری منابع شفاف‌تر می‌شود؛ با این حال، برخی مطالعات هشدار می‌دهند که انتخاب معماری نادرست مثلاً شبکه‌های انرژی‌بر مبتنی بر اثبات کار می‌تواند پیامدهای زیست‌محیطی منفی داشته باشد و لذا باید به جنبه‌های انرژی و انتشار کربن نیز توجه شود(D.Bhatt & Emdad,2025).

علاوه بر مزایای ذکر شده، چالش های متعددی نیز برای اجرایی کردن کاربست مورد مطالعه وجود دارد. در پژوهش‌های (Buyssens et al,2022) و (Satilmisoglu et al, 2024)، ثابت شد که برخی پیاده‌سازی‌های عمومی بلاکچین به‌ویژه الگوریتم‌های اثبات کار هزینه انرژی بالایی دارند و برای تراکنش‌های فراگیر آب مناسب نیستند؛ راه‌حل‌هایی نظیر زنجیره‌های خصوصی و الگوریتم‌های هیبریدی کم‌هزینه‌تر پیشنهاد شده‌اند. همچنین (Samanta & Sarkar, 2023) و (Le Thuy et al, 2025) نشان دادند به این دلیل که تصمیم‌های خودکار بر پایه داده‌های بیرونی اتخاذ می‌شود، تضمین صحت و عدم‌دستکاری داده‌های حسگر و سامانه‌های گزارش‌دهی ضروری است؛ بدون این تضمین، قراردادهای هوشمند به‌راحتی می‌توانند نتایج نادرست به بار آورند. از دیگر چالش های موجود برای عملی کردن این کاربست می‌توان به مسائل حقوقی و پذیرش اجتماعی این فناوری نوین در بین ذینفعان و به ویژه افراد محلی اشاره کرد. در زمینه مطالعات موردی و پیاده‌سازی در سطوح ملی یا محلی، پژوهش‌ها عمدتاً به صورت منطقه ای بوده‌اند. گزارش‌هایی نشان می‌دهند پیاده‌سازی‌های واقعی اغلب با موانع نهادی مانند قوانین تخصیص آب و نظام ثبت مالکیت، فنی مثل مقیاس‌پذیری و اجتماعی نظیر پذیرش کاربران و نگرانی‌های حفظ حریم خصوصی روبه‌رو می‌شود. به‌طور کلی در ایران مطالعات و مقالات پژوهشی کافی مرتبط با ترکیب بلاکچین با راهکارهای حکمرانیِ مشارکتی وجود ندارد.

با تمامی مطالعات صورت گرفته و مبانی نظری موجود در رابطه با تاثیر مثبت ورود بلاکچین و فناوری های نوین در مدیریت منابع آبی و ... ، کاربست فناوری های نوین در حوزه آب چالش های بسیاری را داراست. کمبود زیرساخت های مورد نیاز

فناوری های نوین ،فقدان چارچوب های تنظیم گری و کمبود ظرفیت نهادی از جمله این چالش ها است. بر همین اساس شکاف دانشی مهمی برای اجرای کاربست مورد بحث وجود دارد. بازارهای آب و بانکداری اجتماعی آب در حال رشد است اما ادغام این ساز و کارها با زیرساخت های دیجیتال مبتنی بر بلاکچین و آزمون عملی آن‌ها در زمینه‌های حقوقی، نهادی و اجتماعی کشور هنوز به‌قدر کافی واکاوی نشده است.

هدف این پژوهش، تبیین ظرفیت‌ها و محدودیت‌های به‌کارگیری بلاکچین در توسعه بانکداری اجتماعی آب در ایران و ارائه چارچوبی مفهومی–کاربردی برای طراحی، اجرا و ارزیابی این مداخله است؛ چارچوبی که به فراخوان‌های سیاستی برای نوآوری در حکمرانی آب و افزایش شفافیت بازارها پاسخ می‌دهد.

۲- مواد و روش

این پژوهش از نوع توصیفی ـ تحلیلی است و با رویکردی کیفی انجام شده است. گردآوری داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز بر اساس مطالعات کتابخانه‌ای و اسنادی صورت گرفته و از منابع معتبر علمی شامل کتاب‌ها، مقالات علمی ـ پژوهشی و گزارش‌های تخصصی سازمان‌های بین‌المللی در حوزه حکمرانی آب و منابع طبیعی استفاده شده است. روش تحلیل داده‌ها نیز به‌صورت تحلیل محتوای کیفی و مقایسه تطبیقی بوده است؛ به این معنا که ابتدا ادبیات نظری مرتبط با حکمرانی منابع طبیعی، بانکداری اجتماعی آب و فناوری‌های نوین از جمله بلاکچین مرور شد. سپس با تلفیق یافته‌های پیشین و تحلیل نظریه‌ها و رویکردهای موجود، چارچوب مفهومی پژوهش طراحی و مدل پیشنهادی تدوین گردید. با توجه به ماهیت موضوع و هدف پژوهش، در این مطالعه تمرکز اصلی بر تحلیل نظری و استخراج الگوی پیشنهادی بر مبنای شواهد اسنادی و مطالعات گذشته بوده است.

۳- نتایج و بحث

یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که کاربست فناوری بلاکچین در بانکداری اجتماعی آب می‌تواند راه حل امیدبخشی به منظور حل کردن برخی مشکلات حکمرانی آب در کشور ایران باشد. در ایران که مسئله مدیریت آب با چالش‌های متعددی مانند افت منابع زیرزمینی، کاهش کیفیت آب و تعارضات محلی بر سر تخصیص آب روبه‌رو است، به‌کارگیری چنین فناوری‌هایی می‌تواند نقطه عطفی در بهبود حکمرانی منابع آب محسوب شود. بر اساس تحلیل منابع مختلف علمی، استفاده از فناوری نوین بلاکچین در این حوزه در ابعاد مختلف اجتماعی، اقتصادی و فناورانه موجب افزایش بهره‌وری و بهبود حکمرانی منابع آب میشود. در بعد اجتماعی، ثبت شفاف معاملات و تصمیمات در یک دفترکل توزیع‌شده ریشه بسیاری از بی‌اعتمادی‌های محلی را هدف قرار می‌دهد؛ کشاورزان و ذی‌نفعان محلی می‌توانند سابقه تخصیص‌ها و تعهدات را بدون

تردید بررسی کنند. که در نهایت باعث شفافیت و اعتماد بین ذینفعان می‌شود. همچنین بانکداری اجتماعی آب مبتنی بر پلتفرم دیجیتال، مکانیزم‌های تعامل جمعی مانند پنل‌های محلی و همچنین رای‌گیری‌های مبتنی بر قراردادهای هوشمند برای تخصیص اضطراری را امکان‌پذیر می‌سازد که این امر باعث افزایش مشارکت مابین ذینفعان و همچنین توانمندسازی آن‌ها میگردد. از طرفی با استفاده از بلاکچین، امکان ردیابی سهم واقعی هر کشاورز یا کاربر از منابع آبی، موجب می‌شود بی‌عدالتی‌ها و استفاده‌های غیرمجاز کاهش یابدو عدالت اجتماعی برقرار شود. در نهایت با تقویت سازوکارهای مشارکتی و ایجاد بسترهای اجتماعی و شفاف، زمینه مشارکت تعاونی‌ها و تشکل‌های محلی در مدیریت منابع آب فراهم می‌شود. در بعد اقتصادی، فناوری بلاکچین، باعث کاهش هزینه‌های مبادله می‌شود و با حذف واسطه‌ها در تبادل و توکنیزه شدن حق‌آبه می‌تواند هزینه‌های نهادی و اداری، زمان معاملات و خطاهای ثبت را کاهش دهد. همچنین یکی دیگر از راه های قابل انجام به منظور افزایش انگیزه ذینفعان برای کاهش مصرف، طراحی سازوکار مالیِ تشویقی مانند پاداش دیجیتال برای کاهش مصرف در سال‌های خشکسالی است که از طریق قراردادهای هوشمند قابل پیاده‌سازی می‌باشد و از طرفی باعث صرفه جویی بیش از پیش منابع آب می‌شود. مطالعات انجام شده نشان میدهد که پیاده سازی کاربست پیشنهادی در بعد فناورانه، با اتصال حسگرهای مختلف نظیر حسگرهای دبی قابل اجرا است و مبنای اجرای خودکار قواعد می‌شود که این امر موجب می‌شود پایش روند مورد نظر آسان، دقیق و داده محور باشد. از طرفی قراردادهای هوشمند می‌توانند تخصیص اضطراری، فعال‌سازی خرید مجدد آب یا پرداخت‌های جبرانی را بر اساس شاخص‌های از پیش تعریف‌شده اجرا کنند که باعث صرفه جویی در زمان و به انجام رسیدن دقیق فرآیند اتوماسیون تصمیم گیری میشود.

با این حال، یافته‌ها نشان می‌دهد که چالش‌هایی همچون نبود زیرساخت حقوقی و قانونی، کمبود دانش فنی، مقاومت نهادی و ضعف در زیرساخت‌های ارتباطی از موانع اصلی توسعه این فناوری در ایران به شمار می‌رود. گزارش‌های پایلوت نشان دادند که پلتفرمِ مبتنی بر بلاکچین می‌تواند زمان تأیید معاملات را از هفته‌ها یا ماه‌ها به نزدیکِ زمانِ واقعی کاهش دهد و شفافیت قیمت‌گذاری را افزایش دهد؛ ولی در همان گزارش‌ها نیاز به چارچوب حقوقی و استانداردسازی داده به‌عنوان مانع اصلی برجسته شده است. در مقایسه با مطالعات خارجی، نتایج این پژوهش هم‌خوانی زیادی دارد. برای نمونه، مطالعه‌ای توسط Howson (2020،) در زمینه نقش بلاکچین در مدیریت منابع طبیعیِ نشان داد که این فناوری در کشورهای در حال توسعه به‌ویژه برای ایجاد شفافیت در مدیریت منابع طبیعیِ مشترک مانند آب کارآمد است اما ضعف ساختاری و نهادی می‌تواند مانع موفقیت آن شود. همچنین، (Furones et al, 2023) یافتند که بلاکچین می‌تواند در مدیریت شهری آب و به ویژه در ردیابی و پاسخ‌دهی آلودگی مفید باشد، اما موفقیت بستگی به این دارد که چگونه این فناوری با ساختارهای نهادی و مقرراتی هم‌راستا شود. همچنین (Asgari & Nemati, 2022) نشان دادند که زمینه‌های کاربرد بلاکچین در زمینه

هایی همچون سامانه‌های هوشمند، پایش کیفیت، مدیریت روان‌آب و ... رو به رشد است اما مطالعات میدانی محدود و چالش‌های اجرایی شامل مقیاس‌پذیری و چارچوب‌های حقوقی هستند.

برای پیاده سازی کاربست مورد مطالعه در کشور ایران، میبایست ابتدا به صورت منطقه ای، کنترل شده و با ذینفعان محدود اجرایی سازی شود تا پارامترهای مختلف نظیر کیف پول دیجیتال، سامانه آنلاین بانک آب ، تعریف قواعد و قراردادهای موجود و ... تبیین گردد. این امر باعث یافتن نقاط ضعف و قوت کاربست مورد نظر شده و تجربه مهمی به دست اندرکاران و کادر اجرایی می‌دهد و همچنین نمونه آموزشی مفیدی هم برای سایر ذینفعان و شرکت کنندگان می‌باشد تا به صورت عینی طرح را مشاهده کرده و بسیاری از سوالات و شبهه ها از مرتفع شود. از طرفی به جامعه علمی فرصت میدهد تا با بررسی طرح و مقایسه آن با نمونه های بین المللی اجرایی شده، تفاوت‌های اجرایی را شناسایی کرده و نسخه محلی و کالیبره شده را برای کشور ایران ارائه کنند. برای عملی شدن این مهم در کشور برخی مشکلات حقوقی وجود دارد؛ به عنوان مثال برای کسب و کارهای دیجیتال، ساز و کار مشخصی وجود ندارد. پیشنهاد می‌شود به منظور حل مشکلاتی از این قبیل، اصلاحات حقوقی برای شناسایی ثبت دیجیتال به‌عنوان سند مرجع یا سند کمکی اجرایی شود و همچنین حقوق انتقالی و مکانیسم حل اختلاف برای کاربست مورد نظر تعریف شده تا از بروز اختلاف میان ذینفعان جلوگیری گردد. برای رسیدگی به امور مربوط به بانکداری اجتماعیِ هوشمندِ آب و حل مشکلات این حوزه، ایجاد کمیته نمایندگانِ ذی‌نفعان برای نظارت بر مکانیزم‌ها ضروریست. این چنین طرح های نوینی به سادگی در بین جوامع خصوصا جوامع محلی پذیرفته نمی‌شود. بدین منظور به انجام رساندن یک برنامه آموزشی و معرفی کاربست مورد نظر به زبان ساده و همچنین کاربردی ضروری به نظر می‌رسد. نقاط قوت طرح مورد نظر و همچنین سود حاصل از آن برای جوامع محلی باید به اثبات برسد تا با پذیرش و موافقت آن‌ها همراه شود. همچنین به منظور آشنایی هرچه بیشتر ذینفعان خصوصا ذینفعان محلی می‌بایست برنامه های آموزشی دیجیتال در دستور کار قرار بگیرد. این برنامه‌های فراگیر آموزشی، مطالبی نظیر کار با کیف پول، مکانیسم خرید و فروش و... را آموزش می‌دهند.

یافته‌های این پژوهش نشان داد که به‌کارگیری فناوری بلاکچین در چارچوب بانکداری اجتماعی آب می‌تواند چشم‌انداز تازه‌ای برای ارتقاء شفافیت، افزایش مشارکت ذی‌نفعان و بهبود تخصیص منابع آبی فراهم سازد. با این حال، تحقق این ظرفیت‌ها مستلزم اتخاذ سیاست‌هایی مرحله‌ای، انعطاف‌پذیر و متناسب با شرایط نهادی و اجتماعی ایران است. بر این اساس، چند محور کلیدی به عنوان توصیه‌های سیاستی پیشنهاد می‌شود. اجرای پایلوت‌های منطقه‌ای ضروری به نظر می‌رسد. تجربه‌های داخلی و خارجی نشان داده‌اند که موفقیت فناوری‌های نوین در حکمرانی منابع طبیعی زمانی بیشتر است که در مقیاس کوچک و تحت شرایط کنترل‌شده‌ای آغاز شوند. بنابراین پیشنهاد می‌شود حوضه‌های آبخیز منتخب به‌ویژه مناطقی که هم فشار بالای تقاضا و هم ظرفیت نسبی برای مشارکت محلی دارند به‌عنوان آزمایشگاه‌های زنده برای

بانکداری اجتماعی آب مبتنی بر بلاکچین در نظر گرفته شوند. همچنین استانداردسازی داده‌ها و نظام گواهی‌سنجی حسگرها باید در دستور کار قرار گیرد. یکی از مهم‌ترین موانع اجرای موفق بلاکچین در حوزه آب، کیفیت و صحت داده‌های ورودی است. ایجاد یک نظام ملی برای کالیبراسیون و ممیزی دوره‌ای حسگرها می‌تواند اعتماد ذی‌نفعان را تقویت کرده و ریسک اختلافات نهادی را کاهش دهد. این امر علاوه بر افزایش کارآمدی سامانه، زمینه‌ساز پذیرش اجتماعی فناوری نیز خواهد بود. با توجه به پیچیدگی‌های حقوقی و نهادی در حوزه مالکیت و تخصیص آب، پیشنهاد می‌شود به‌جای تغییر ناگهانی ساختار قانونی، رویکردی مرحله‌ای اتخاذ شود؛ به این معنا که ابتدا اعتبار قراردادهای هوشمند در سطح توافق‌های محلی و انجمن‌های آب‌بران به رسمیت شناخته شود و سپس در مراحل بعد، این رویه در قوانین ملی جایگاه پیدا کند. چنین روندی امکان تطبیق تدریجی بازیگران با الزامات فناوری را فراهم می‌آورد. از سوی دیگر، توانمندسازی نهادی و اجتماعی به عنوان پیش‌شرط حیاتی باید مورد توجه سیاست‌گذاران باشد. آموزش ذی‌نفعان محلی، ایجاد کمیته‌های نمایندگی کشاورزان و کاربران آب و افزایش ظرفیت فنی نهادهای متولی، بستر لازم را برای پذیرش و پایداری بانکداری اجتماعی آب مبتنی بر بلاکچین فراهم می‌سازد. بدون سرمایه‌گذاری در سرمایه اجتماعی و نهادی، حتی پیشرفته‌ترین فناوری‌ها نیز به نتیجه نخواهند رسید. در نهایت، پیوند فناوری با سیاست‌های کلان آب کشور باید به‌صورت هوشمندانه طراحی شود. بلاکچین نباید صرفاً به‌عنوان یک ابزار فناورانه دیده شود، بلکه باید در راستای راهبردهای کلان مدیریت تقاضا، اصلاح الگوی مصرف و ارتقاء امنیت آبی کشور به کار گرفته شود. تنها در این صورت است که می‌توان از ظرفیت‌های آن برای تحقق حکمرانی پایدار آب بهره‌برداری کرد.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش تلاش شد نقش و جایگاه فناوری بلاکچین در توسعه بانکداری اجتماعی آب مورد بررسی قرار گیرد. یافته‌ها نشان داد که بلاکچین می‌تواند شفافیت، اعتماد متقابل و مشارکت ذی‌نفعان را در حکمرانی منابع آبی به‌طور چشمگیری تقویت کند. در شرایطی که ایران با بحران کم‌آبی و چالش‌های ناشی از مدیریت ناکارآمد منابع مواجه است، استفاده از سازوکارهای مبتنی بر دفترکل توزیع‌شده می‌تواند فرصتی نوین برای ایجاد بانکداری اجتماعی آب فراهم آورد. مزایای کلیدی بلاکچین در این حوزه شامل افزایش شفافیت در تخصیص آب، امکان پیگیری تراکنش‌ها، تقویت عدالت و کاهش فساد اداری است. در عین حال، چالش‌هایی همچون زیرساخت‌های ناکافی فناوری اطلاعات، هزینه‌های بالای پیاده‌سازی، ضعف در فرهنگ‌سازی عمومی و خلأهای قانونی و نهادی می‌توانند مانع تحقق کامل این ظرفیت‌ها شوند. مطالعه تطبیقی با پژوهش‌های مشابه در سطح بین‌الملل مانند پروژه‌های پایلوت در استرالیا و نیز تجربه‌های محدود داخلی در زمینه حکمرانی هوشمند آب نشان می‌دهد که شرط اصلی موفقیت، ترکیب فناوری با سیاست‌گذاری بومی و مشارکت واقعی

ذی‌نفعان محلی است. بر اساس یافته‌های این مقاله، پیشنهاد می‌شود دولت و نهادهای متولی آب در ایران آزمایش‌های منطقه‌ای بلاکچین را در مقیاس محدود مثلاً یک حوضه آبخیز یا شبکه آبیاری مشخص اجرا کنند. همچنین چارچوب‌های حقوقی و نهادی لازم برای پذیرش قراردادهای هوشمند در مدیریت آب تدوین شود. آموزش و فرهنگ‌سازی عمومی برای کشاورزان، جوامع محلی و مدیران در زمینه کارکرد بلاکچین صورت گیرد. پژوهش‌های آتی می‌توانند به طراحی مدل‌های ترکیبی بپردازند که بلاکچین را با سایر فناوری‌ها مانند اینترنت اشیاء و هوش مصنوعی تلفیق می‌کند.

به‌طور کلی، اگرچه فناوری بلاکچین به‌تنهایی معجزه‌ای برای حل بحران آب نخواهد بود، اما می‌تواند به‌عنوان یک ابزار توانمندساز، مسیر حرکت به سوی بانکداری اجتماعی آب پایدار، شفاف و مشارکتی را هموار سازد.

منابع

اسکوهی ، م.، و اسماعیلی ، ک. (۱۴۰۰). تحلیلی بر نظریه های حکمرانی و مدیریت منابع آب در ایران. آب و توسعه پایدار، ۸(۱) .

آقایی ، و.، علیزاده ، ح ا.، افشار ، ع.، و احتیاط ، م. (۱۳۹۸). بررسی اثرات بازخرید آب توسط بانک آب با استفاده از مدلسازی عامل- بنیان. تحقیقات منابع آب ایران، (۳)۱۵، ۲۹۴-۳۰۳.

زراعتی نیشابوری ، س.، خزیمه نژاد ، ح.، و بیرانوند ، ز. (۱۴۰۳). درک دقیق تر از سامانه های حکمرانی به منظور مدیریت پایدار آب با نگاهی ویژه به شرایط ایران. مدیریت آب و آبیاری، (۲)۱۴.

حسنپور ، م ح.، و ولی سامانی ، ج م. (۱۴۰۲). ارزیابی کالن جایگاه و اهمیت برنامه‌های امنیت غذایی و امنیت آبی در اسناد باالدستی چهار دهه اخیر کشور. تحقیقات منابع آب ایران، (۵)۱۹ ، ۱۱۴-۱۲۹.

حسینی ، م.، مازندرانی زاده ، ح.، عزیزمحمدلو ، ع.، و محجوب ، م. (۱۴۰۴). برآورد تابع عرضه آب در بازارهای ثانویه و بهره وری مطالعه موردی: بازار سهم آب قزوین. تحقیقات منابع آب ایران، (۱)۲۱ ، ۱۱۲- ۱۲۶.

قربانیان ، م.، فصیحی هرندی ، م.، و لیاقت ، ع. (۱۴۰۱). ساختار و اهداف بانکداری اجتماعی آب در حوضه آبریز زاینده‌رود. تحقیقات آب و خاک ایران، (۷)۵۳ ، ۱۶۷۳-۱۶۹۳.

موسوی میرکلائی ، سید مصطفی.، و خدابنده ، پ. (۱۴۰۱). بررسی کاربرد های اینترنت اشیاء و بلاک چین در مدیریت هوشمند آب شهری. سومین کنفرانس ملی مهارت های نوین در مهندسی برق، کامپیوتر و فن آوری ارتباطات.

مومن زاده ، پ.، پور عزت ، ع ا.، و حمیدی زاده ، ع. (۱۴۰۲). طراحی سیستم پشتیبان خطمشیگذاری برای مهار بحران آب در آینده. تحقیقات منابع آب ایران ، (۴)۱۹ ، ۱-۱۵.

میرشکاران ، ی. (۱۳۹۹). اثر تغییرات آب و هوایی بر پیامدهای امنیتی- انتظامی بحران منابع آب با تاکید بر هیدروپولیتیک مناطق مرزی. پژوهش های تغییرات آب و هوایی، (۲)۱ ، ۷۹-۹۸.

نصیری ، ا.، مشهدی ، م.، شاهنگیان ، ا.، و کراچیان ، ر. (۱۴۰۳). کاربرد نظریه شناخت اجتماعی در مدلسازی رفتار کشاورزان به منظور ترغیب ایشان به انتخاب الگوی کشت کم آب بر. تحقیقات منابع آب ایران، (۴)۲۰ ، ۱۷-۳۳.

1- Arafat, S. (2024). A Study of Blockchain applications in the Water Sector.

2- Asgari, M., & Nemati, M. (2022). Application of Distributed Ledger Platforms in Smart Water Systems—A Literature Review. Water, 4. doi.org/10.3389/frwa.2022.848686

3- Boelens, R., Hoogesteger, J., Swyngedouw, E., Vos, J., & Wester P. (2016). Hydrosocial territories: a political ecology perspective. Water International, 41, 1-14.

4- Buyssens, H., & Viaene, S. (2024). Design principles for a blockchain-based multi-sided platform for the sustainable trade of water: An affordance approach. Cleaner Production, 471.

5- Chutani, G., Garg, S., Arora, T., & Jh, s. (2023). Blockchain for Improved Water Resource Management. Modern Treands In Science and Technology, 9(1), 54-58.

6- D.Bhatt, G., & Emdad, A. (2025). Blockchain's role in environmental sustainability: Bibliometric insights from scopus. Green Technologies and Sustainability, 3(4).

7- Furones, A., & Monzon, J. (2023). Blockchain applicability in the management of urban water supply and sanitation systems in Spain. Journal of Environmental Management, 344. doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118480

8- Garrido, A., & Llamas, M. (2009). Water policy in Spain. doi.org/10.1201/9780203866023

9- Howson, P. (2020). Building trust and equity in marine conservation and fisheries supply chain management with blockchain. Marine Policy, 115: 103873. doi.org/10.1016/j.marpol.2020.103873

10- Huang, W., Han, Y., Gu, Q., Han, X., & Gao, t. (2025). Smart blockchain-powered natural resource asset management and ecological governance countermeasures. Heliyon, 11(2).

11- Maulekhi, A., Patani, K., Sangani, V., & Pawar, M. (2020). The Blockchain-based Smart Water Harvesting System. International Conference on Smart Electronics and Communication (ICOSEC).

12- Le Thuy, T., Nguyen, MK., Bui, T., Hai Ien, H., Hoai, N., Ngam, N., Khedulkar, A., Van, D., Halong, A., & Hoang, T. (2025). Water, 17(17), 2522.

13- Samanta, S., & Sarkar, A. (2023). IoT and Blockchain for Smart Water Quality Management in Future Cities: A Hyperledger Fabric Framework for Smart Water Quality Management and Distribution.

14- Satilmisoglu, TK., Sermet, Y., Kurt, Musa., & Demir, Ibrahim. (2024). Blockchain Opportunities for Water Resources Management: A Comprehensive Review. Sustainability, 16(6).

15- Sriyono, E. (2020). Digitizing water management: Toward the innovative use of blockchain technologies to address sustainability. Cognet Engeneering, 7(1). doi.org/10.1080/23311916.2020.1769366

16- Zhang, J. (2023). Application of blockchain technology in water management and new energy economic development. Water supply, 23(10), 4227-4241.

An Examination of Blockchain Technology Application in the Development of Social Water Banking in Iran: Advantages and Challenges

Ramtin Tavoosi Rad[1] , Mohammad Ansari Ghojghar[2]*

1- Master Candidate, Department of Reclamation of arid and mountainous regions Engineering, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
2- Corresponding Author, Assistant Professor, Department of Reclamation of arid and mountainous regions Engineering, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran.
Corresponding author Email: ansari.ghojghar@ut.ac.ir

Abstract

The water crisis in Iran, as one of the most significant environmental and developmental challenges, has increasingly highlighted the need to rethink water resource governance methods. In recent years, the concept of social water banking has emerged as a novel approach that, by leveraging modern technologies, can enable the reform of governance components and enhance social participation. This research, employing a descriptive-analytical approach based on library resources, examines the potential of modern technologies particularly blockchain in supporting social water banking. The results indicate that the application of blockchain can increase transparency and public trust in water transactions, the Internet of Things (IoT) can enable intelligent monitoring of water resources and consumption and artificial intelligence (AI) can play a role in optimizing decision-making and predicting water crises. A comparative analysis with Iranian and international studies suggests that combining these technologies with social participation mechanisms can lead to improvements in indicators such as transparency, distributive justice, efficiency and accountability in water governance. Therefore, the establishment of the proposed conceptual framework in this research can be an important step towards transitioning from centralized management to participatory and intelligent governance of water resources in Iran.

Keywords: Social Water Banking, Water Governance, Blockchain, IoT, AI.

واکاوی بلندمدت تغییرات تاریخی غلظت دی‌اکسید گوگرد و منواکسید کربن در پنج کلان‌شهر ایران طی دوره ۱۹۸۰–۲۰۲۵

محمد ناجی*[۱]، طیبه اکبری ازیرانی[۲]

۱- دانشجوی دکتری آب‌وهواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.
(mo_naji@sbu.ac.ir)

۲-استادیار آب‌وهواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

چکیده

آلودگی هوا در دهه‌های اخیر به‌دلیل شهرنشینی سریع، مصرف سوخت‌های فسیلی و توسعه صنایع سنگین به چالشی جدی بدل شده است. با توجه به اهمیت پایش بلندمدت این آلاینده‌ها، پژوهش حاضر با بهره‌گیری از داده‌های بازتحلیل MERRA-2 Reanalysis که تلفیقی از مشاهدات ماهواره‌ای و زمینی را فراهم می‌آورد و تاکنون در مطالعات ایران کمتر به‌کار گرفته شده است، روند فضایی–زمانی این دو آلاینده را طی دوره ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۵ بررسی کرده است. داده‌ها از پایگاه Giovanni استخراج و پس از زیرمجموعه‌گیری بر اساس مرزهای سیاسی ایران، برای پنج کلان‌شهر تهران، اصفهان، مشهد، شیراز و تبریز تحلیل شدند. نتایج نشان داد توزیع دی‌اکسید گوگرد عمدتاً در مناطق مرکزی و غربی به‌ویژه تهران و اصفهان متمرکز است، در حالی‌که منواکسید کربن بیشتر در نواحی ساحلی شمالی و جنوبی مشاهده می‌شود که بیانگر نقش توأمان عوامل انسانی و طبیعی در شکل‌دهی به الگوهای انتشار است. از نظر زمانی، هر دو آلاینده روندی افزایشی تا اواخر دهه ۱۹۹۰ و کاهش نسبی پس از آن را تجربه کرده‌اند که می‌تواند بازتابی از اجرای سیاست‌های زیست‌محیطی و بهبود کیفیت سوخت باشد. استمرار مقادیر بالاتر در تهران نشان‌دهنده چالش‌های ساختاری این کلان‌شهر در کنترل آلودگی هواست. نوآوری پژوهش در استفاده از داده‌های بازتحلیل بلندمدت است.

کلید واژه: آلودگی هوا, کلان‌شهرها, پایش بلندمدت, سیاست‌های کاهش آلودگی, تغییر اقلیم

مقدمه

با گسترش سکونتگاه‌های انسانی و تمرکز جمعیت در شهرها، مسئله آلودگی هوا به‌تدریج به‌عنوان یکی از معضلات اصلی محیط زیست شهری نمایان شد. رشد سریع و غالباً بی‌برنامه شهرنشینی، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه که حدود ۷۰ درصد توسعه شهری آن‌ها بدون طرح‌ریزی اصولی صورت می‌گیرد، بر شدت بحران آلودگی افزوده و مدیریت آن را با چالش‌های پیچیده‌تری همراه کرده است (عزیزی و همکاران، ۱۴۰۳؛ احمدی و درویش، ۱۴۰۱). در حقیقت، بیشتر شهرهای جهان با کاهش قابل توجه کیفیت هوا روبه‌رو هستند؛ موضوعی که در دهه‌های اخیر توجه روزافزون پژوهشگران، سیاست‌گذاران و افکار عمومی را جلب کرده و آلودگی هوا را به یکی از دغدغه‌های اصلی جهانی بدل ساخته است (Mayer, 1999; Fan et al., 2020).

یکی از پیامدهای صنعتی‌شدن، افزایش انتشار آلاینده‌های گازی مختلف از جمله ترکیبات گوگردی و کربنی به جو زمین است (Asilian et al., 2007)، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه که کنترل و نظارت زیست‌محیطی در آن‌ها محدودتر است (Zhong et al., 2020).اکسیدهای گوگرد و منواکسید کربن به‌عنوان دو آلاینده فراگیر انسان‌ساخت، در بسیاری از مطالعات علمی مرتبط با آلودگی هوا مورد توجه قرار گرفته‌اند (Soltani et al., 2015).برآوردها نشان می‌دهد که بیش از ۸۰ درصد دی‌اکسید گوگرد ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی است (Ghozikali et al., 2015)و نیروگاه‌های تولید برق سهمی در حدود ۸۵ درصد از انتشار آن دارند (Gharoundi et al., 2016)، در حالی‌که منواکسید کربن عمدتاً از احتراق ناقص سوخت در وسایل نقلیه موتوری، سیستم‌های گرمایشی و فرآیندهای صنعتی تولید می‌شود. دی‌اکسید گوگرد گازی بی‌رنگ با بویی تند و خفه‌کننده است که تقریباً دو برابر سنگین‌تر از هوا بوده و می‌تواند با ذرات معلق و سطوح جامد در جو واکنش داده و نقش مهمی در فرآیندهای شیمیایی اتمسفری ایفا کند (Mohammadi et al., 2016).در مقابل، منواکسید کربن گازی بی‌رنگ، بی‌بو و بسیار سمی است که به‌سادگی با هموگلوبین ترکیب شده و توانایی خون در انتقال اکسیژن را کاهش می‌دهد. از منابع غیراحتراقی انتشار اکسیدهای گوگرد می‌توان به پالایشگاه‌های نفت، صنایع ذوب فلزات و سیمان‌سازی اشاره کرد (Jamshidi Angas et al., 2020)، در حالی‌که انتشار منواکسید کربن از آتش‌سوزی‌های جنگلی، فعالیت‌های کشاورزی و حتی فرایندهای زیست‌محیطی طبیعی نیز گزارش شده است. مواجهه طولانی‌مدت با این آلاینده‌ها پیامدهای جدی به‌دنبال دارد؛ دی‌اکسید گوگرد می‌تواند موجب تحریک مجاری تنفسی، کاهش عملکرد ریه و افزایش خطر بیماری‌های قلبی-عروقی شود (کرمانی و همکاران،۱۳۹۵) و منواکسید کربن نیز با ایجاد هیپوکسی بافتی، خطر مرگ و میر ناشی از بیماری‌های قلبی و عصبی را افزایش می‌دهد.

کلان‌شهرهای ایران از جمله تهران، اصفهان، مشهد، تبریز و شیراز به‌دلیل تمرکز بالای جمعیت، گسترش بی‌رویه شهرنشینی، افزایش مصرف انرژی و وابستگی شدید به سوخت‌های فسیلی، همواره در معرض آلودگی‌های جوی قرار داشته‌اند. در میان آلاینده‌های مختلف، منواکسید کربن (CO) و دی‌اکسید گوگرد (SO_2) از مهم‌ترین ترکیبات سمی و اثرگذار بر کیفیت هوا محسوب می‌شوند که بخش عمده‌ای از آن‌ها ناشی از فعالیت نیروگاه‌ها، صنایع و حمل‌ونقل شهری است. شواهد متعدد نشان می‌دهد این آلاینده‌ها با کاهش کیفیت هوا، بروز بیماری‌های قلبی و تنفسی و تشدید مخاطرات زیست‌محیطی پیوند مستقیم دارند. از این‌رو، پایش و تحلیل روندهای بلندمدت تغییرات این آلاینده‌ها در بازه‌ای گسترده، همچون سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۵، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر برای شناخت الگوهای فضایی-زمانی آلودگی، ارزیابی اثربخشی سیاست‌های کاهش آلاینده‌ها و برنامه‌ریزی بهینه در مدیریت شهری و محیط‌زیست به شمار می‌آید.

مطالعه تغییرات آلودگی هوا خصوصا دی‌اکسید گوگرد و منواکسید کربن همواره یکی از موضوعات مورد توجه محققان بوده است. شیائو و همکاران ویژگی‌های مکانی-زمانی ۶ آلاینده از جمله SO2 در شهر چنگدو واقع جنوب غربی چین با داده‌های ایستگاهی بررسی کردند. نتایج نشان داد میانگین سالانه SO_2طی سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۶ کاهش یافته است. بیشترین غلظت SO_2در مناطق شمالی چنگدو مشاهده شد که دلیل آن وجود صنایع و نیروگاه‌های زغال‌سنگی در این مناطق بود (Xiao et al., 2018). کروتکوف و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای OMI، تغییرات NO_2و SO_2را در مناطق صنعتی جهان طی دوره ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۵ بررسی کردند. نتایج نشان داد که انتشار SO_2در شرق ایالات متحده به دلیل پیشرفت‌های فناورانه و اجرای مقررات سختگیرانه، ۸۰ درصدی کاهش یافته است، در حالی که در هند با افزایش نیروگاه‌های زغال‌سنگی، میزان SO_2دو برابر شده است .علاوه بر این، نقاط داغ انتشار SO_2در خلیج فارس، ناشی از فعالیت‌های نفت و گاز، شناسایی شد (Krotkov et al., 2016). آس و همکاران تغییرات انتشار دی اکسید گوگرد در سطح جهانی طی سال‌های ۱۹۹۰ الی ۲۰۱۵ را بررسی کردند. نتایج، کاهش انتشار SO2در اروپا و آمریکای شمالی و افزایش آن در آسیا را نشان می‌دهد (Aas et al., 2019). ژنگ و همکاران به بررسی روندها و الگوی انتشار دی‌اکسید نیتروژن و دی‌اکسید گوگرد در مناطق شهری مغولستان پرداختند. یافته‌های این مطالعه حاکی از آن است که غلظت SO_2طی دوره ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۷ روند افزایشی داشته، اما از سال ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۶ به‌تدریج کاهش یافته است. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد که بالاترین غلظت این آلاینده در فصل زمستان رخ می‌دهد، در حالی که کمترین مقدار آن در فصل تابستان مشاهده می‌شود (Zheng et al., 2018). در ایران نیز قنادی و همکاران (۱۴۰۱) به پایش آلودگی هوا با استفاده از تصویرهای ماهواره سنتینل-۵ پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که در سال، ۲۰۱۹ تهران آلوده ترین هوا را به لحاظ مجموع گازهای مونوکسید کربن، دی اکسید نیتروژن، دی اکسید گوگرد و ذرات معلق داشته است. شاه محمدی و همکاران (۱۴۰۱) با استفاده از داده‌های سنجنده OMIبه تحلیل آلودگی هوای شهر اصفهان بر مبنای توزیع مکانی و زمانی دی‌اکسید نیتروژن

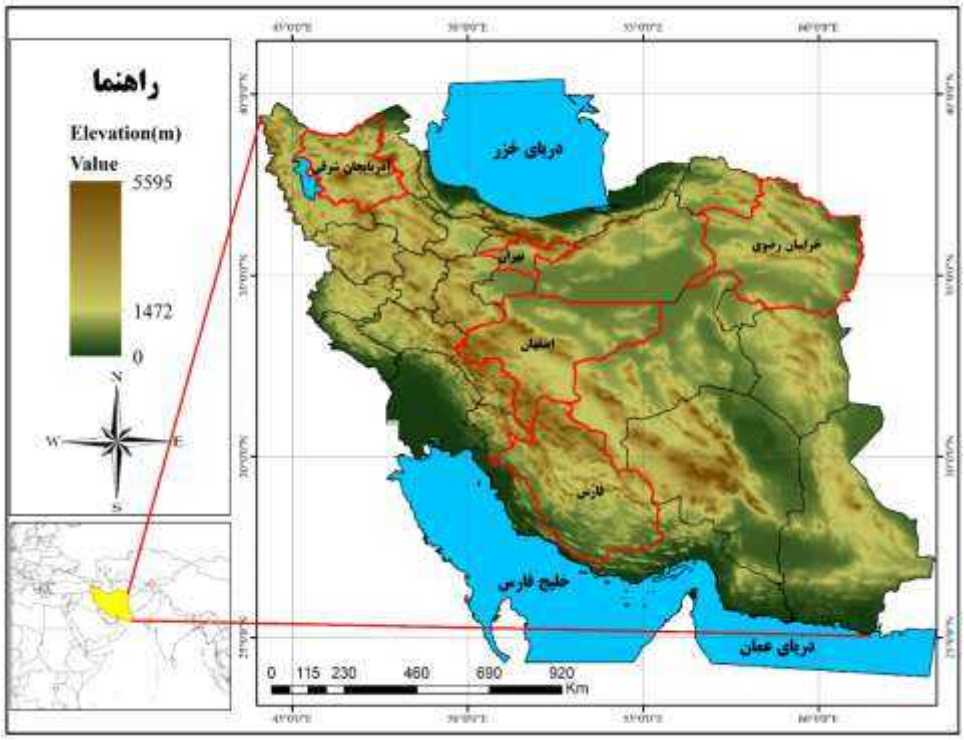
پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که غلظت NO_2 در ماه‌های گرم سال به حداقل مقدار خود می‌رسد، در حالی که در ماه‌های سرد سال بیشترین میزان آن ثبت شده است. شاهمحمدی و همکاران (۱۳۹۶) در پژوهشی دیگر با استفاده از داده‌های سنجنده OMI، روند تغییرات دی‌اکسید نیتروژن در تهران را بررسی کردند. نتایج نشان داد بیشینه غلظت NO_2 در زمستان و کمینه آن در تابستان رخ می‌دهد. زینلی و همکاران (۱۴۰۲) با بهره‌گیری از داده‌های سنجنده ماهواره‌ای سنتینل-۵، به تحلیل فضایی و زمانی آلاینده‌های جوی در استان آذربایجان شرقی پرداختند. یافته‌ها نشان داد که در فصول سرد سال، انتشار آلاینده‌های مونوکسید کربن و دی‌اکسید نیتروژن ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی و فعالیت‌های صنعتی افزایش یافته و مناطق گسترده‌تری را تحت تأثیر قرار می‌دهد. عبدالعظیمی و همکاران (۱۴۰۲) به بررسی و پایش غلظت دی‌اکسید نیتروژن در دوران کووید-۱۹ در کلان‌شهر شیراز با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای سنتینل-۵ پرداخته‌اند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش، بالاترین مقادیر میانگین ماهانه گاز دی‌اکسید نیتروژن در سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ مربوط به فصل پاییز بود.

با توجه به مرور پیشینه پژوهش، بیشتر مطالعات انجام‌شده در ایران عمدتاً به بررسی کوتاه‌مدت آلاینده‌های جوی محدود بوده و یا تنها به یک آلاینده یا یک شهر خاص پرداخته‌اند. در حالی که کلان‌شهرهای بزرگ کشور نظیر تهران، اصفهان، مشهد، تبریز و شیراز با ترکیب پیچیده‌ای از منابع آلاینده صنعتی و شهری مواجه‌اند که اثرات هم‌زمان آلاینده‌های گوناگون از جمله دی‌اکسید گوگرد و منواکسید کربن را به‌دنبال دارد. نبود مطالعات جامع و بلندمدت که روند تغییرات این آلاینده‌ها را در مقیاس زمانی گسترده‌ای مانند سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۵ بررسی کند، یک خلأ اساسی در ادبیات علمی کشور محسوب می‌شود. بنابراین، انجام چنین پژوهشی نه تنها به شناخت الگوهای تغییرات تاریخی این آلاینده‌ها کمک می‌کند، بلکه می‌تواند مبنایی برای ارزیابی سیاست‌های کنترلی گذشته، تدوین راهکارهای کارآمد مدیریتی و کاهش مخاطرات زیست‌محیطی و بهداشتی در آینده باشد.

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، کلان‌شهرهای تهران، مشهد، تبریز، اصفهان و شیراز را دربر می‌گیرد که از مهم‌ترین مراکز جمعیتی، اقتصادی، فرهنگی و سیاسی ایران به شمار می‌روند. این کلان‌شهرها به دلیل تمرکز بالای جمعیت، فعالیت‌های گسترده صنعتی، تجاری و خدماتی و همچنین نقش محوری در نظام شهری کشور، در معرض فشارهای محیطی و چالش‌های متعدد اقلیمی و زیست‌محیطی قرار دارند. از نظر موقعیت جغرافیایی، تهران در دامنه‌های جنوبی رشته‌کوه البرز و در منطقه‌ای کوهستانی ـ دشتی واقع شده و به دلیل شرایط توپوگرافی خاص خود مستعد پدیده وارونگی دما و انباشت آلاینده‌هاست. مشهد در شمال‌شرق کشور و در مجاورت ارتفاعات هزارمسجد و بینالود قرار گرفته و همجواری آن

با دشت‌های وسیع، شرایط متفاوتی از نظر پراکنش آلاینده‌ها ایجاد می‌کند. تبریز در شمال‌غرب ایران و در قلب آذربایجان شرقی، با اقلیم نیمه‌خشک و محاط‌شدن در میان ارتفاعات، ویژگی‌های خاصی در زمینه تهویه و پراکندگی آلاینده‌ها دارد. اصفهان در مرکز فلات ایران و در منطقه‌ای با بارندگی اندک و شرایط خشک قرار گرفته که علاوه بر آلودگی‌های ناشی از فعالیت‌های صنعتی، با محدودیت‌های طبیعی در تجدیدپذیری محیطی نیز روبه‌روست. شیراز در جنوب و در میان چین‌خوردگی‌های زاگرس میانی واقع شده و به دلیل قرارگیری در حوضه‌های محصور، در برخی فصول سال با مشکلات کیفی هوا مواجه می‌شود. این تنوع مکانی، اقلیمی و ارتفاعی سبب می‌شود که الگوهای آلودگی و پویش‌های جوی در هر یک از این کلان‌شهرها متفاوت باشد و ضرورت مطالعه‌ای جامع و تطبیقی برای درک بهتر فرآیندها و پیامدهای زیست‌محیطی در سطح ملی بیش از پیش نمایان گردد.



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه

داده و روش پژوهش

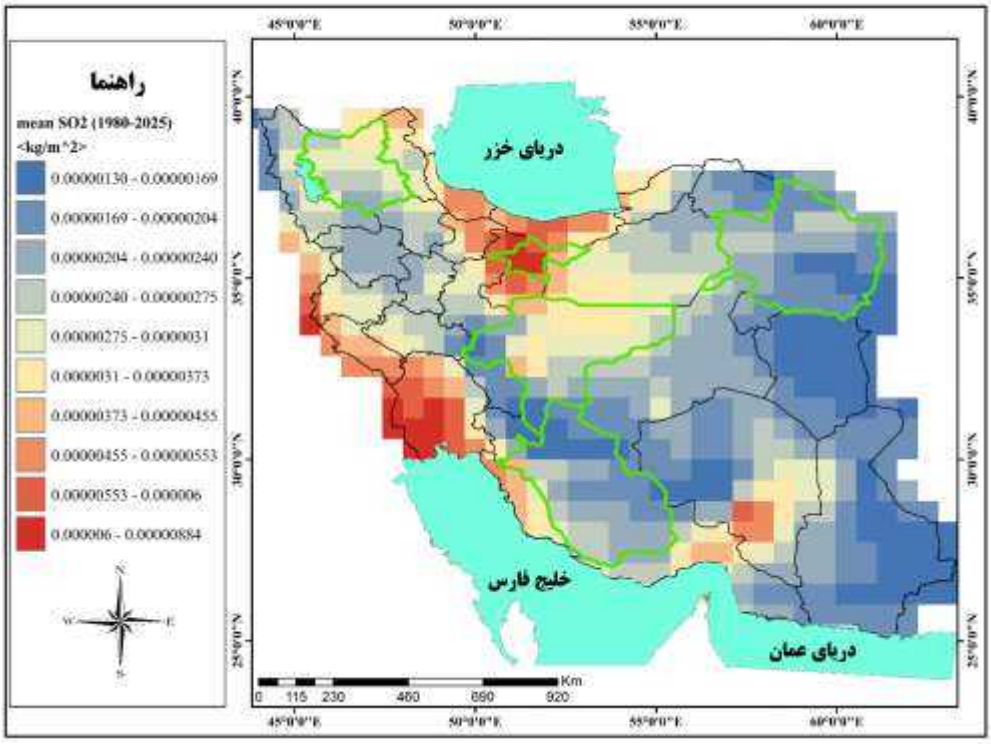
برای دستیابی به اهداف پژوهش، داده‌های مورد نیاز از سامانه Giovanni متعلق به NASA GES DISC دریافت شد. این داده‌ها شامل دو آلاینده‌ی اصلی منواکسید کربن (CO) و دی‌اکسید گوگرد (SO_2) بودند که از پروداکت‌های بازتحلیل MERRA-2 انتخاب شدند. متغیرهای مورد استفاده عبارت‌اند از: CO Column Burden (ENSEMBLE) – M2TMNXCHM v5.12.4 و SO_2 Column Mass Density (ENSEMBLE) – M2TMNXAER v5.12.4 که هر دو به صورت ماهانه و در بازه‌ی زمانی طولانی ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۵ استخراج شدند. بازتحلیل MERRA-2 با بهره‌گیری از مدل سامانه زمین GEOS و همبست‌سازی مشاهدات ماهواره‌ای و زمینی، مجموعه‌ای منسجم و پیوسته از داده‌های جوی و شیمیایی فراهم می‌کند که امکان بررسی تغییرات بلندمدت آلاینده‌ها را با تفکیک مکانی حدود نیم درجه در سطح جهان فراهم ساخته است. هرچند این مجموعه داده‌ها در سطح جهانی کاربرد گسترده‌ای داشته‌اند، اما در پژوهش‌های داخلی ایران کمتر مورد استفاده قرار گرفته‌اند و همین امر ارزش افزوده‌ی ویژه‌ای به این تحقیق بخشیده است. در گام نخست، داده‌های مذکور بر اساس مرز سیاسی ایران زیرمجموعه‌گیری شدند و پس از اعمال کنترل کیفیت، برای تمرکز بر روندهای شهری، میانگین‌گیری مقادیر بر روی پنج کلان‌شهر تهران، مشهد، اصفهان، تبریز و شیراز انجام گرفت. انتخاب این کلان‌شهرها به دلیل تمرکز جمعیتی بالا، سهم قابل توجه از فعالیت‌های صنعتی و ترافیکی، و نقش آن‌ها در ساختار فضایی–اقتصادی کشور صورت گرفت. جهت نمایش الگوهای فضایی، میانگین آلاینده‌ها طی کل دوره ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۵ محاسبه و به صورت نقشه پراکنش مکانی ترسیم گردید تا کانون‌های اصلی آلودگی در ایران نمایان شوند. این نقشه به پژوهش کمک کرد تا روندهای محلی کلان‌شهرها در بستر یک الگوی ملی مقایسه و تفسیر شوند. در نهایت، روند تغییرات هر دو آلاینده در سطح کلان‌شهرها استخراج، در نرم‌افزار Excelمرتب‌سازی و به شکل نمودارهای زمانی و مقایسه‌ای نمایش داده شد تا امکان مشاهده‌ی ساده‌تر و مقایسه‌ی دقیق‌تر تغییرات در طول زمان فراهم شود.

نتایج

میانگین توزیع فضایی دی‌اکسید گوگرد (۲۰۲۵-۱۹۸۰)

نقشه‌ی میانگین توزیع فضایی دی‌اکسید گوگرد طی دوره‌ی ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۵ نشان می‌دهد که پراکنش این آلاینده در سطح ایران از ناهمگنی مکانی قابل توجهی برخوردار است. همان‌گونه که در نقشه مشخص است، مقادیر بالاتر دی‌اکسید گوگرد عمدتاً در نواحی مرکزی و غربی کشور به‌ویژه در اطراف تهران و البرز، بخش‌هایی از اصفهان و همچنین پهنه‌های جنوب‌غربی مشاهده می‌شود. این الگو را می‌توان با تمرکز بالای فعالیت‌های صنعتی، پالایشگاهی و نیروگاهی در این مناطق مرتبط دانست؛ به‌ویژه کلان‌شهرهایی همچون تهران و اصفهان که سهم بالایی در مصرف سوخت‌های فسیلی دارند. در مقابل، بخش‌های شرقی و جنوب‌شرقی کشور عموماً دارای مقادیر پایین‌تری از دی‌اکسید گوگرد هستند که این امر را می‌توان به

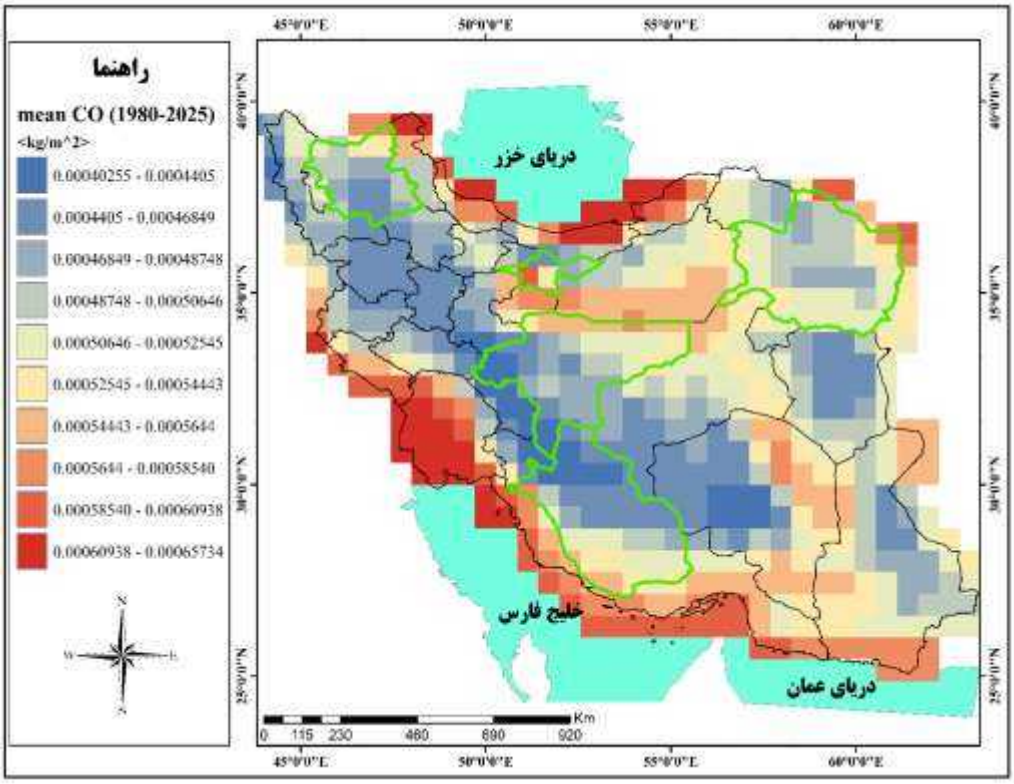
تراکم جمعیتی کمتر، محدود بودن فعالیت‌های صنعتی سنگین و همچنین شرایط تهویه و جابجایی هوا نسبت داد. علاوه بر این، شمال‌شرق ایران نیز در مقایسه با پهنه‌های مرکزی و غربی، مقادیر نسبتاً پایین‌تری را نشان می‌دهد. ویژگی قابل تأمل دیگر در این نقشه، وجود لکه‌های با غلظت بالا در نواحی شمالی البرز و همچنین برخی نقاط جنوب کشور است که می‌تواند ناشی از ترکیب عوامل انسانی (فعالیت‌های صنعتی و شهری) و طبیعی (الگوهای جوی، وارونگی دما و محدودیت تهویه هوا) باشد. از نظر فضایی، تمرکز مقادیر بالا در مجاورت کریدورهای صنعتی–شهری بیانگر نقش کلیدی انسان در انتشار این آلاینده است. به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که توزیع دی‌اکسید گوگرد در ایران نه‌تنها تحت تأثیر تراکم جمعیت و فعالیت‌های صنعتی قرار دارد، بلکه به شرایط جوی و اقلیمی نیز وابسته است. بنابراین، کلان‌شهرهای پرجمعیت و صنعتی بیشترین سهم از میانگین بلندمدت این آلاینده را به خود اختصاص داده‌اند و به عنوان کانون‌های اصلی آلودگی گوگردی در کشور قابل شناسایی هستند.



شکل۲. میانگین توزیع فضایی دی‌اکسید گوگرد (2025–1980)

میانگین توزیع فضایی منواکسید کربن (۲۰۲۵-۱۹۸۰)

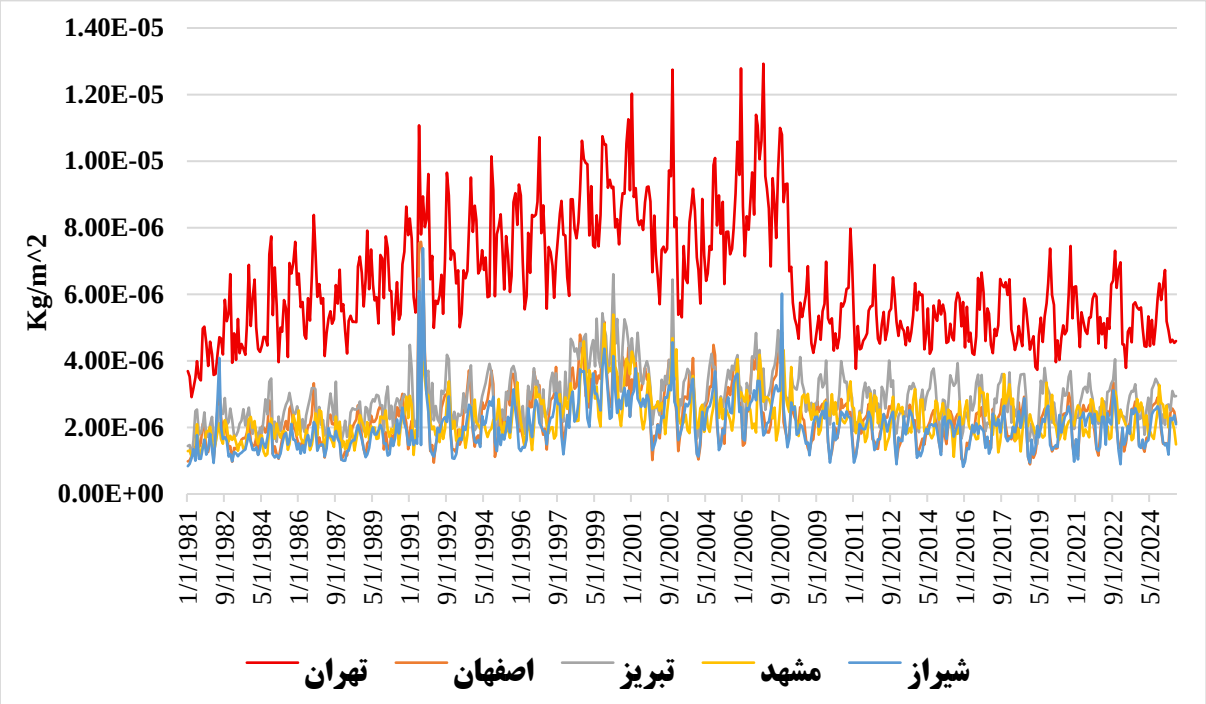
شکل ۳ میانگین توزیع فضایی غلظت منواکسید کربن در ایران طی دوره‌ی ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۵ را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است، بیشترین مقادیر این آلاینده عمدتاً در نواحی ساحلی شمالی در حاشیه‌ی دریای خزر و همچنین نوار جنوبی کشور در امتداد خلیج فارس و دریای عمان متمرکز شده است. مقادیر بالاتر از ۰.۰۰۰۵۸۵ kg/m^2در این نواحی به‌وضوح دیده می‌شود، در حالی‌که بخش‌های داخلی، مرکزی و شرقی کشور سطوح پایین‌تری از این آلاینده را تجربه کرده‌اند که عمدتاً در بازه‌ای کمتر از ۰.۰۰۰۵ kg/m^2قرار دارد. این الگوی فضایی را می‌توان ناشی از ترکیبی از عوامل انسانی و طبیعی دانست؛ از جمله تراکم بالای جمعیت، فعالیت‌های گسترده‌ی صنعتی و حمل‌ونقل در نواحی شمالی و جنوبی، وجود صنایع نفت و گاز و بنادر تجاری در جنوب، و همچنین شرایط اقلیمی و توپوگرافیک که در برخی نواحی موجب حبس آلاینده‌ها در لایه‌های نزدیک به سطح زمین می‌شود. در مقابل، مناطق مرتفع و خشک فلات مرکزی و شرق ایران به دلیل تهویه‌ی طبیعی بهتر و تراکم کمتر جمعیتی، غلظت کمتری از منواکسید کربن را نشان می‌دهند. بنابراین، یافته‌ها بیانگر آن است که غلظت منواکسید کربن در ایران از ناهمگنی مکانی قابل‌توجهی برخوردار بوده و نواحی ساحلی شمالی و جنوبی به‌عنوان کانون‌های اصلی تجمع این آلاینده شناخته می‌شوند، در حالی‌که مناطق داخلی و شرقی کشور شرایط به‌مراتب پاک‌تری را تجربه کرده‌اند.



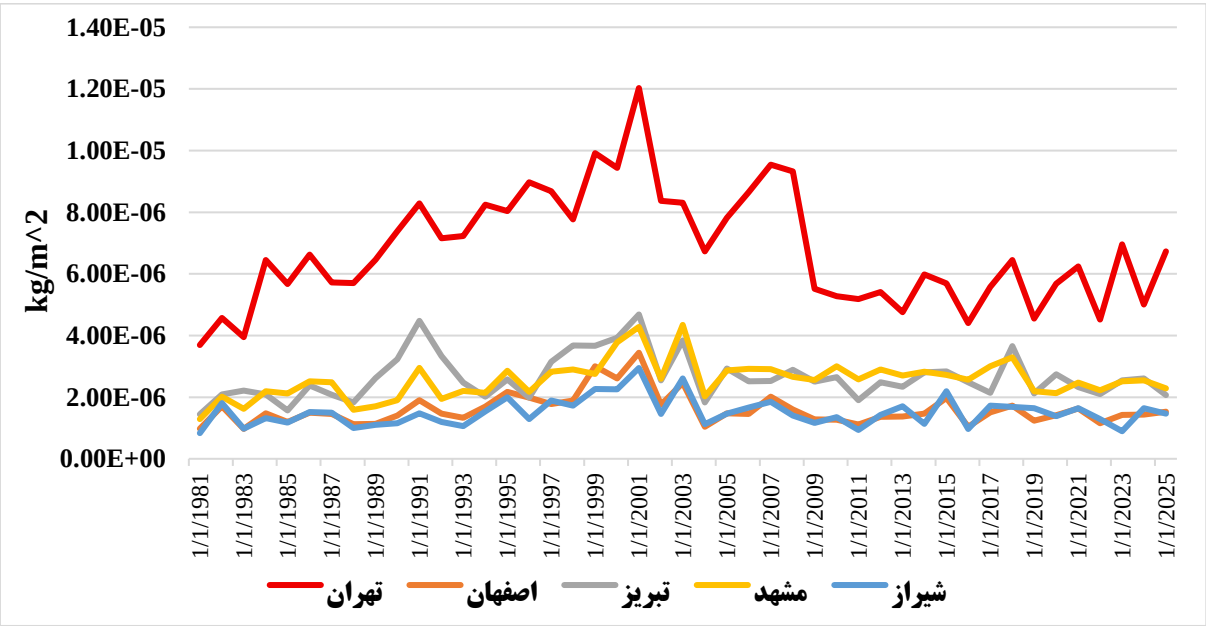
شکل۳. میانگین توزیع فضایی منواکسید کربن (2025–1980)

روند تغییرات آلاینده دی‌اکسید گوگرد و منواکسید کربن طی بازه زمانی ۱۹۸۰ الی ۲۰۲۵

شکل ۴ روند تغییرات غلظت دی‌اکسید گوگرد در پنج کلان‌شهر تهران، مشهد، اصفهان، شیراز و تبریز طی دوره‌ی ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۵ و شکل ۵ در ماه ژانویه را نمایش می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، شهر تهران در تمام دوره‌ها بالاترین مقادیر این آلاینده را نسبت به سایر کلان‌شهرها داشته است، به‌گونه‌ای که از دهه‌ی ۱۹۸۰ تا اوایل دهه‌ی ۲۰۰۰ میلادی روندی افزایشی با نوسانات قابل‌توجه را تجربه کرده و در برخی سال‌ها مقادیر آن به بیش از ۱.۰ E-05 kg/m² نیز رسیده است. نقطه‌ی اوج این روند افزایشی عمدتاً تا سال ۲۰۰۱ ادامه یافته و پس از آن، کاهش نسبی در غلظت دی‌اکسید گوگرد در تهران مشاهده می‌شود. این کاهش می‌تواند ناشی از اعمال سیاست‌های کنترلی، بهبود کیفیت سوخت، توسعه فناوری‌های پاک‌تر در بخش صنعت و حمل‌ونقل و نیز افزایش استانداردهای زیست‌محیطی باشد. در سایر کلان‌شهرها شامل مشهد، اصفهان، شیراز و تبریز، روند تغییرات به‌طور کلی در سطوح پایین‌تری نسبت به تهران قرار دارد و مقادیر عمدتاً کمتر از ۴.۰ E-06 kg/m² باقی مانده است. هرچند این شهرها نیز نوسانات دوره‌ای را تجربه کرده‌اند، اما دامنه‌ی تغییرات نسبت به تهران محدودتر بوده است. مقایسه‌ی میان این شهرها نشان می‌دهد که اصفهان و مشهد در برخی سال‌ها افزایش نسبی بیشتری نسبت به شیراز و تبریز داشته‌اند که می‌تواند ناشی از تمرکز صنایع بزرگ، رشد سریع جمعیت و افزایش حجم تردد وسایل نقلیه باشد. با این حال، حتی در این شهرها نیز روند کلی پس از دهه‌ی ۲۰۰۰ به سمت کاهش تدریجی تمایل یافته است. به‌طور کلی، نتایج این بررسی حاکی از آن است که دی‌اکسید گوگرد در کلان‌شهرهای ایران از یک الگوی زمانی مشخص پیروی می‌کند؛ به‌طوری که تا اوایل دهه‌ی ۲۰۰۰ روندی صعودی و پس از آن روندی نزولی بر غلظت آلاینده حاکم بوده است. شدت این تغییرات در تهران به‌مراتب بیشتر از سایر شهرها بوده که بیانگر نقش محوری این شهر در انتشار آلاینده‌های ناشی از فعالیت‌های انسانی به‌ویژه حمل‌ونقل و صنعت است. بنابراین، یافته‌ها بر ضرورت استمرار سیاست‌های کاهش آلاینده‌های گوگردی در تهران و تعمیم این اقدامات به سایر کلان‌شهرها برای دستیابی به شرایط پایدارتر کیفیت هوا در بلندمدت تأکید دارد.

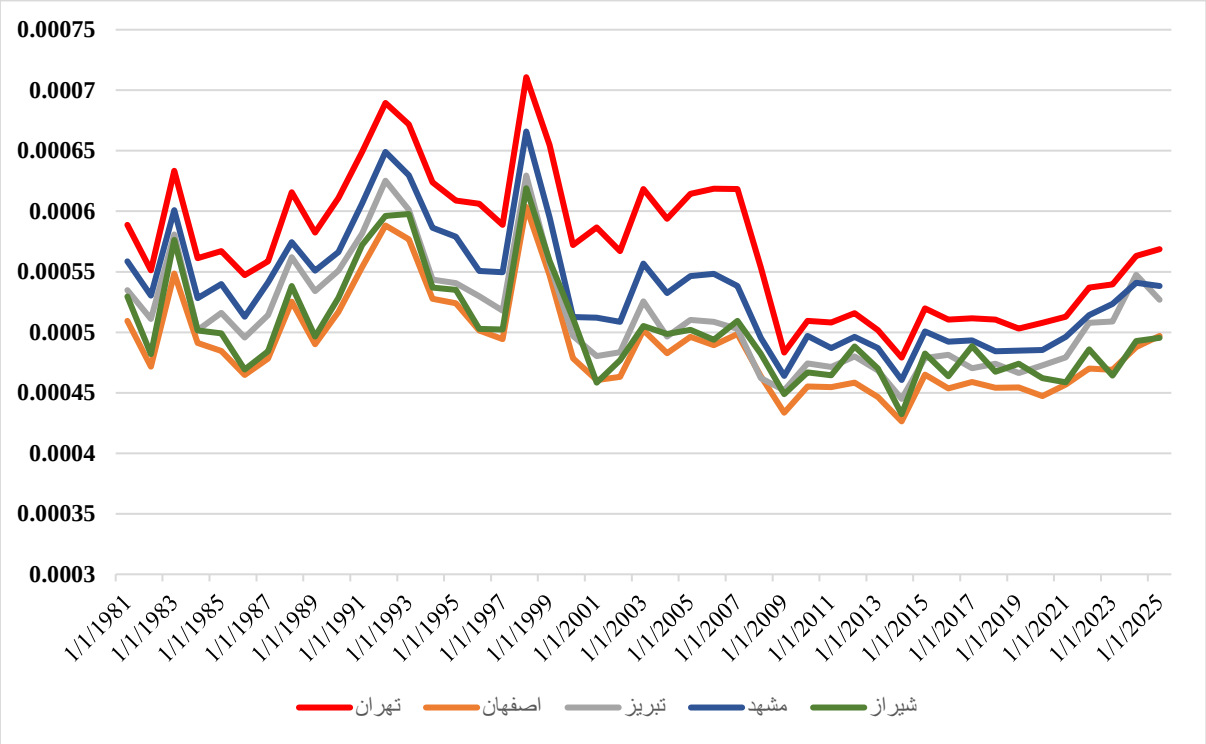


شکل۴. روند تغییرات دی اکسید گوگرد طی سال‌های ۱۹۸۰ الی ۲۰۲۵



شکل۵. روند تغییرات دی اکسید گوگرد طی سال‌های ۱۹۸۰ الی ۲۰۲۵ در ماه ژانویه

شکل ۶ روند تغییرات غلظت منواکسید کربن در پنج کلان‌شهر تهران، مشهد، اصفهان، شیراز و تبریز را طی ماه ژانویه در بازه‌ی زمانی ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۵ نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشخص است، روند کلی این آلاینده تا سال ۱۹۹۹ صعودی بوده و پس از آن کاهش نسبی در غلظت‌ها مشاهده می‌شود. این افزایش اولیه احتمالاً ناشی از رشد سریع جمعیت شهری، افزایش تعداد وسایل نقلیه موتوری، وابستگی به سوخت‌های فسیلی و گسترش فعالیت‌های صنعتی در دهه‌های ۱۹۸۰ و ۱۹۹۰ بوده است. اوج غلظت در اواخر دهه‌ی ۱۹۹۰ میلادی قابل مشاهده است که هم‌زمان با تشدید مشکلات آلودگی هوا در کلان‌شهرهای کشور بوده است. پس از سال ۱۹۹۹ روند غلظت منواکسید کربن به‌ویژه در شهر تهران کاهش پیدا کرده است که می‌تواند تحت تأثیر اجرای سیاست‌های کاهش آلاینده‌ها از طریق ارتقای کیفیت سوخت، توسعه شبکه حمل‌ونقل عمومی و جایگزینی فناوری‌های جدیدتر و کم‌انتشار قرار داشته باشد. هرچند که در دهه‌های اخیر نوساناتی در روند مشاهده می‌شود، اما میانگین مقادیر نسبت به دوره پیش از سال ۲۰۰۰ کمتر باقی مانده است. از منظر مقایسه‌ای، تهران در تمام سال‌ها بالاترین غلظت منواکسید کربن را در میان کلان‌شهرها داشته است که علت آن را می‌توان در تراکم بسیار بالای جمعیت، حجم بالای تردد خودروها، فعالیت‌های صنعتی گسترده و ویژگی‌های اقلیمی و توپوگرافی خاص این شهر جست‌وجو کرد که منجر به انباشت آلاینده‌ها به‌ویژه در فصل سرد سال می‌شود. سایر کلان‌شهرها شامل مشهد، اصفهان، تبریز و شیراز در مقادیر پایین‌تری قرار دارند و روندی مشابه را با دامنه تغییرات محدودتر نشان می‌دهند. به‌طور کلی، نتایج این بررسی بیانگر آن است که منواکسید کربن در کلان‌شهرهای ایران به‌ویژه در ماه ژانویه از یک الگوی افزایشی تا سال ۱۹۹۹ و کاهشی پس از آن پیروی کرده است. استمرار مقادیر بالاتر در تهران نسبت به سایر شهرها بر ضرورت توجه ویژه به این کلان‌شهر در برنامه‌های کاهش انتشار آلاینده‌ها و مدیریت کیفیت هوا تأکید می‌کند.



شکل۶. روند تغییرات منواکسید کربن طی سال‌های ۱۹۸۰ الی ۲۰۲۵ در ماه ژانویه

نتیجه گیری

یافته‌های این پژوهش نشان داد که دو آلاینده‌ی اصلی مورد بررسی یعنی دی‌اکسید گوگرد و منواکسید کربن، طی بازه‌ی زمانی ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۵ نه‌تنها از الگوهای فضایی ناهمگن در سطح ایران تبعیت می‌کنند، بلکه در روندهای زمانی نیز نوسانات معناداری را تجربه کرده‌اند. توزیع فضایی دی‌اکسید گوگرد نشان داد که مناطق مرکزی و غربی ایران، به‌ویژه پیرامون کلان‌شهرهایی همچون تهران و اصفهان، کانون‌های اصلی تجمع این آلاینده محسوب می‌شوند؛ موضوعی که ارتباط مستقیمی با تراکم بالای فعالیت‌های صنعتی، پالایشگاهی و نیروگاهی دارد. در مقابل، منواکسید کربن بیشتر در نواحی ساحلی شمال و جنوب کشور متمرکز بوده و نقش ترکیبی عوامل انسانی (نظیر حمل‌ونقل، صنایع نفت و گاز و تراکم جمعیتی) و طبیعی (مانند شرایط اقلیمی و توپوگرافی) در شکل‌دهی به این الگو قابل‌توجه است. از نظر زمانی، هر دو آلاینده تا اواخر دهه‌ی ۱۹۹۰ و اوایل دهه‌ی ۲۰۰۰ روندی صعودی را طی کرده‌اند که با گسترش شهرنشینی، افزایش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و رشد صنایع همخوانی دارد. با این حال، کاهش نسبی در سطوح آلاینده‌ها پس از این دوره نشان می‌دهد که سیاست‌های زیست‌محیطی، ارتقای استانداردهای سوخت، توسعه فناوری‌های کم‌انتشار و گسترش

زیرساخت‌های حمل‌ونقل عمومی توانسته‌اند در تعدیل بخشی از بحران آلودگی هوا مؤثر واقع شوند. این تغییرات به‌ویژه در تهران بارزتر است؛ هرچند این کلان‌شهر همچنان بالاترین مقادیر را در میان سایر شهرها به خود اختصاص می‌دهد که نشان‌دهنده‌ی استمرار چالش‌های ساختاری در حوزه‌ی مدیریت آلودگی هواست.

نوآوری مهم این پژوهش استفاده از داده‌های MERRA-2 Reanalysis برای بازسازی روندهای بلندمدت آلاینده‌ها است. این رویکرد امکان تحلیل فضایی–زمانی آلودگی هوا در یک بازه‌ی بیش از چهار دهه را فراهم کرده و مزیتی چشمگیر نسبت به مطالعات مبتنی بر داده‌های کوتاه‌مدت یا صرفاً ایستگاهی دارد. بدین ترتیب، نتایج این تحقیق تصویری جامع‌تر از الگوهای تغییرات آلاینده‌ها ارائه کرده و مبنایی علمی برای سیاست‌گذاری‌های ملی و محلی فراهم می‌آورد. به‌طور کلی، نتایج نشان داد که الگوهای فضایی-زمانی آلودگی هوا در ایران تابعی از برهم‌کنش عوامل انسانی و محیطی است. استمرار غلظت‌های بالاتر در کلان‌شهرهایی چون تهران و اصفهان نشان می‌دهد که تمرکز صنعتی و جمعیتی همچنان مهم‌ترین محرک انتشار آلاینده‌هاست، در حالی‌که شرایط اقلیمی و توپوگرافیک می‌تواند بر شدت یا تضعیف آن اثرگذار باشد. این یافته‌ها اهمیت اتخاذ رویکردی تلفیقی در مدیریت آلودگی هوا را برجسته می‌سازد؛ رویکردی که علاوه بر مداخلات فناورانه و اصلاح الگوی مصرف انرژی، نیازمند سیاست‌گذاری‌های پایدار در حوزه‌ی حمل‌ونقل، صنعت و شهرسازی است. در نهایت، پژوهش حاضر بر ضرورت پایش مستمر آلاینده‌ها در مقیاس‌های زمانی و مکانی گسترده تأکید دارد، چرا که تنها از طریق داده‌های بلندمدت و تحلیل‌های فضایی-زمانی می‌توان روندهای واقعی را آشکار ساخت و سیاست‌های کارآمدی برای کاهش آلاینده‌ها طراحی کرد. استمرار توجه به این موضوع در کلان‌شهرهای ایران نه‌تنها برای ارتقای کیفیت هوا و سلامت شهروندان حیاتی است، بلکه در چارچوب تعهدات زیست‌محیطی جهانی و تحقق اهداف توسعه‌ی پایدار نیز جایگاه ویژه‌ای دارد.

منابع

احمدی, محمود و درویش, داود . (۱۴۰۱). بررسی تغییرات آلاینده‌های معلق جوی در کلان‌شهرهای عمدهٔ ایران با استفاده از عمق نوری تصاویر ماهواره‌ای. نشریه محیط زیست طبیعی, ۷۵(۱), ۱۶۵-۱۷۶. doi: 10.22059/jne.2022.338515.2387

شاه محمدی، عاطفه، بیات، علی، و مشهدی زاده ملکی، سعید. (۱۴۰۱). بررسی آلودگی هوای شهر اصفهان براساس آلاینده دی اکسید نیتروژن اندازه گیری شده با سنجنده امی. تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی (علوم جغرافیایی)، ۲۲(۶۷)، ۴۱-۵۵. http://jgs.khu.ac.ir/article-1-3300-fa.html

شاهمحمدی، عاطفه، بیات، علی، و مشهدی زاده ملکی، سعید. (۱۳۹۶). بررسی رفتار و روند دی اکسید نیتروژن هوای تهران با استفاده از اندازه گیری های سنجنده OMI. مجله نجوم و اختر فیزیک ایران، ۴(۲)، ۶۹-۷۸. SID. https://sid.ir/paper/268698/fa

زینالی، بتول؛ ملانوری، الهام؛ صفری، شیوا. (۱۴۰۲). تحلیل زمانی و مکانی آلایندهای هوا در استان آذربایجان شرقی. جغرافیای طبیعی، ۱۵(۶۲)، ۸۹-۱۰۴. https://sanad.iau.ir/Journal/jopg/Article/982904/FullText

عبدالعظیمی، هادی؛ فرهادی، هادی؛ روستا، حسین؛ مختاری، نسرین. (۱۴۰۲). پایش غلظت دی‌اکسید نیتروژن در دوره‌ی کووید-۱۹ با استفاده از داده‌های ماهواره‌ی سنتینل-۵ (مطالعه‌ی موردی: کلان‌شهر شیراز). مخاطرات محیط طبیعی، ۱۲(۳۸)، ۱۱۳-۱۳۰. doi: 10.22111/jneh.2023.45267.1949

عزیزی، قاسم؛ ناجی، محمد؛ کریمی، مصطفی. (۱۴۰۳). .تحلیل همدیدی-دورسنجی تداوم آلودگی هوا در دامنه های جنوبی البرز (تهران، البرز و قزوین). جغرافیا و پایداری محیط، ۱۴(۲)، ۶۵-۸۲. doi: 10.22126/ges.2024.10555.2752

کرمانی, مجید , فلاح جوکندان, سودا , آقائی, مینا و دولتی, محسن . (۱۳۹۵). برآورد تعداد موارد مرگ قلبی- عروقی، سکته قلبی و بیماری انسداد مزمن ریوی منتسب به ذرات معلق و دی اکسید گوگرد موجود در هوای کلان شهر تهران. مجله پژوهش در بهداشت محیط, ۲(۲), ۱۱۶-۱۲۶. doi: 10.22038/jreh.2016.7576

قنادی، محمدامین؛ شهری، متین؛ مرادی، امیررضا . (۱۴۰۱). پایش آلودگی هوا با استفاده از تصاویر ماهواره سنتینل-۵ (مطالعه موردی: شهرهای بزرگ صنعتی ایران). فصلنامه علوم محیطی، ۲۰(۲)، ۸۱-۹۸. doi: 10.52547/envs.2022.1026

Asilian, H., Ghaneian, M. T., & Ghanizadeh, G. (2007). Air pollution: Sources, control methods, regulations, and standards (1st ed.). Tabesh Printing Press.

Aas, W., Mortier, A., Bowersox, V., Cherian, R., Faluvegi, G., Fagerli, H., ... & Xu, X. (2019). Global and regional trends of atmospheric sulfur. Scientific reports, 9(1), 953. https://doi.org/10.1038/s41598-018-37304-0

Fan, H., Zhao, C., & Yang, Y. (2020). A comprehensive analysis of the spatio-temporal variation of urban air pollution in China during 2014–2018. Atmospheric Environment, 220(April 2019). https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117066

Ghozikali, M. G., Mosaferi, M., Safari, G. H., & Jaafari, J. (2015). Effect of exposure to O3, NO2, and SO2 on chronic obstructive pulmonary disease hospitalizations in Tabriz, Iran. Environmental Science and Pollution Research, 22(4), 2817-2823. DOI: 10.1007/s11356-014-3512-5

Gharoundi, S., Goodarzi, G., Soltani, F., Doboradaran, S., Salmanzadeh, Sh., Komai, S., et al. (2016). Sulfur dioxide pollutant and its effects on disease incidence and death among the citizens of Bushehr city. Southern Journal of Medicine, 19(4), 598-607. http://dx.doi.org/10.18869/acadpub.ismj.19.4.598

Krotkov, N. A., McLinden, C. A., Li, C., Lamsal, L. N., Celarier, E. A., Marchenko, S. V., ... & Streets, D. G. (2016). Aura OMI observations of regional SO 2 and NO 2 pollution changes from 2005 to 2015. Atmospheric Chemistry and Physics, 16(7), 4605-4629. https://doi.org/10.5194/acp-16-4605-2016

Mohammadi, M. J., Goudarzi, G., Geravandi, S., Yari, A. R., Ghalani, B., Shirali, S., ... & Esmaili, M. (2016). Dispersion modeling of nitrogen dioxide in ambient air of Ahvaz city. Health Scope, 5(2). https://doi.org/10.17795/jhealthscope-32540

Mayer, H. (1999). Air pollution in cities. Atmospheric Environment, 33(24), 4029–4037. https://doi.org/10.1016/S1352-2310(99)00144-2

Jamshidi Angas, M. J., Jozi, S. A., Hejazi, R., & Rezaian, S. (2020). Dispersion model evaluation of SO2 emission from stack in oil refinery plant using AERMOD 8.9. 0. Jundishapur Journal of Health Sciences, 12(2). https://doi.org/10.5812/jjhs.103964. https://doi.org/10.5812/jjhs.103964

Soltani, F., Goudarzi, G., Geravandi, S., Salmanzadeh, S., Ghomeishi, A., Aslani, Z., ... & Mohammadi, M. (2016). The cardiovascular and respiratory deaths attributed to sulfur dioxide in Kermanshah. Journal of Kermanshah University of Medical Sciences, 19(6). https://doi.org/10.22110/jkums.v19i6.2770

Zhong, Q., Shen, H., Yun, X., Chen, Y., Ren, Y. A., Xu, H., ... & Tao, S. (2020). Global sulfur dioxide emissions and the driving forces. Environmental science & technology, 54(11), 6508-6517. doi: 10.1021/acs.est.9b07696

Zheng, C., Zhao, C., Li, Y., Wu, X., Zhang, K., Gao, J., ... & Chai, F. (2018). Spatial and temporal distribution of NO2 and SO2 in Inner Mongolia urban agglomeration obtained from satellite remote sensing and ground observations. Atmospheric Environment, 188, 50-59. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.06.029

Xiao, K., Wang, Y., Wu, G., Fu, B., & Zhu, Y. (2018). Spatiotemporal characteristics of air pollutants (PM10, PM2. 5, SO2, NO2, O3, and CO) in the inland basin city of Chengdu, southwest China. Atmosphere, 9(2), 74. https://doi.org/10.3390/atmos9020074

Long-term Analysis of Historical Variations in Sulfur Dioxide and Carbon Monoxide Concentrations in Five Major Iranian Cities during 1980–2025

Mohammad naji*[1], Tayebeh Akbari Azirani[2]

PhD Candidate in Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, University of shahid beheshti,Tehran, Iran.(mo_naji@sbu.ac.ir)
Assistant Professor of Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, University of shahid beheshti,Tehran, Iran.

ABSTRACT
Air pollution has emerged as a serious challenge in recent decades due to rapid urbanization, extensive fossil fuel consumption, and the expansion of heavy industries. Considering the importance of long-term monitoring of these pollutants, the present study employs MERRA-2 Reanalysis data, which integrates satellite and ground-based observations and has been rarely used in studies on Iran, to examine the spatiotemporal trends of sulfur dioxide (SO_2) and carbon monoxide (CO) from 1980 to 2025. The data were retrieved from the Giovanni portal and, after subsetting based on Iran's political boundaries, were analyzed for five major cities: Tehran, Isfahan, Mashhad, Shiraz, and Tabriz. Results indicated that SO_2 is predominantly concentrated in central and western regions, particularly Tehran and Isfahan, whereas CO is more prevalent in the northern and southern coastal areas, reflecting the combined influence of anthropogenic and natural factors on emission patterns. Temporally, both pollutants exhibited an increasing trend until the late 1990s, followed by a relative decline, likely reflecting the implementation of environmental policies and improvements in fuel quality. The persistently higher concentrations in Tehran highlight structural challenges in controlling urban air pollution. A key innovation of this study lies in the utilization of long-term reanalysis data.
Keywords: Air Pollution, Climate Change, Long-term Monitoring, Megacities, Pollution Mitigation Policies

بررسی اثرگذاری عوامل کلان مقیاس اقلیمی بر تغییرات ماهانه مساحت پوشش گیاهی ناحیه زاگرس

پویا عاقل‌پور[۱]، وحید ورشاویان[۱]*، علی اکبر سبزی پرور[۱]

۱- گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
v.varshavian@basu.ac.ir

چکیده

تغییرات پوشش گیاهی تحت تأثیر ترکیبی از عوامل طبیعی و انسانی قرار دارند. پدیده‌های پیوند از دور شامل ناهنجاری‌های بزرگ جوی-اقیانوسی هستند که در مقیاس‌های کلان بر روی اقیانوس‌ها و خشکی‌ها اتفاق می‌افتند و در ادامه بر روی آب و هوای نواحی دور دست اثر می‌گذارند. در مقیاس بزرگ‌تر، پدیده‌های جوی-اقیانوسی با ایجاد تغییرات در الگوهای بارش و دما در مناطق مختلف جهان، اثرات قابل توجهی بر تغییرات پوشش گیاهی دارند. مطالعه حاضر در بررسی اثرات پدیده‌های جوی-اقیانوسی بر روی تغییرات مساحت پوشش گیاهی ناحیه زاگرس در ایران طراحی گردید. داده‌های VCA از تصاویر سنجنده MODIS و داده‌های شاخص‌های جوی-اقیانوسی نیز از وبگاه NOAA دریافت شد. شاخص‌های پیوند از دور شامل ۸ سیگنال اثرگذار بر اقلیم ایران بود که عبارتند از: NAO، SOI، ONI، Niño 1+2، Niño 3، Niño 3+4، Niño 4 و NP. همبستگی شاخص‌ها با VCA هم به صورت هم‌زمان و هم با تاخیر زمانی ارزیابی شدند. نتایج حاکی از آن بود که اثرگذاری تمامی این سیگنال‌ها با تغییرات VCA با تاخیر زمانی همراه است. از این بین شاخص NP اثرگذارترین شاخص بر روی تغییرات ماهانه VCA بود؛ بطوری که نتایج نشان داد افزایش این سیگنال در شمال اقیانوس آرام، پس از سه ماه موجب کاهش معنی‌دارِ VCA در منطقه زاگرس می‌گردد. این بررسی می‌تواند به محققان در راستای بازسازی داده‌های VCA برای سال‌هایی که فناوری سنجش از دور وجود نداشت بسیار کارآمد باشد.

کلید واژه‌ها: مساحت پوشش گیاهی، سنجنده MODIS، سیگنال‌های جوی اقیانوسی، پیوند از دور، NAO

۱. مقدمه

پوشش گیاهی نقش حیاتی در حفظ تعادل اکولوژیکی و تداوم زندگی بشر و دیگر موجودات زنده ایفا می‌کند. گیاهان با فتوسنتز، اکسیژن لازم برای تنفس موجودات جانوری و انسانی را تولید کرده و دی‌اکسیدکربن را جذب می‌کنند که این فرآیند به کاهش اثرات تغییرات اقلیمی کمک می‌نماید (FAO, 2023). علاوه بر این، پوشش گیاهی خاک را تثبیت کرده و از فرسایش و کاهش کیفیت زمین جلوگیری می‌کند که برای کشاورزی و تامین منابع غذایی بسیار حیاتی است (Brown & Grant, 2005). همچنین زیستگاه‌های گیاهی، تنوع زیستی بالایی را فراهم می‌آورند که بستر مناسبی برای حیات جانوری است و چرخه‌های زیستی را حفظ می‌کند؛ این موضوع در بهبود سلامت و رفاه انسان‌ها نیز نقش مهمی دارد (Buttke, Hendee, & McKinney, 2004). در نتیجه، حفاظت و توسعه پوشش گیاهی برای حفظ سلامت اکوسیستم‌ها و بهبود کیفیت زندگی انسان‌ها ضروری است.

تغییرات پوشش گیاهی تحت تأثیر ترکیبی از عوامل طبیعی و انسانی قرار دارند. فعالیت‌های انسانی از قبیل تغییر کاربری زمین، قطع درختان و آلودگی‌های زیست‌محیطی فشار مضاعفی بر اکوسیستم‌های گیاهی وارد می‌کند و فرآیندهای تغییر اقلیم را تسریع می‌نماید (Pielke et al., 2011). تغییرات پوشش گیاهی عمدتاً تحت تأثیر عوامل اقلیمی محلی مانند دما، بارش و رطوبت هوا قرار دارند که به طور مستقیم رشد و پراکندگی گونه‌های گیاهی را تنظیم می‌کنند. تغییرات در دما و میزان بارش باعث تغییرات فصلی و سالانه در ترکیب و گستره پوشش گیاهی می‌شوند (Zhang et al., 2017). پدیده‌های پیوند از دور شامل ناهنجاری‌های بزرگ جوی-اقیانوسی هستند که در مقیاس‌های کلان بر روی اقیانوس‌ها و خشکی‌ها اتفاق می‌افتند و در ادامه بر روی آب و هوای نواحی دور دست اثر می‌گذارند. در مقیاس بزرگ‌تر، پدیده‌های جوی-اقیانوسی مانند ال‌نینو و لانینا با ایجاد تغییرات در الگوهای بارش و دما در مناطق مختلف جهان، اثرات قابل توجهی بر تغییرات پوشش گیاهی دارند (McPhaden et al., 2006). همچنین سیگنال‌های جوی دوردست مانند نوسانات شمال اطلس (NAO) نیز نقش مهمی در تغییر شرایط اقلیمی محلی و در نتیجه توزیع گیاهان ایفا می‌کنند (Hurrell, 1995). بنابراین، بررسی همزمان عوامل اقلیمی محلی و جهانی برای درک بهتر دینامیک پوشش گیاهی و پیش‌بینی تغییرات آینده ضروری است.

اندازه‌گیری پوشش گیاهی عموما توسط فناوری سنجش از دور انجام می‌شود. از اصلی ترین و کارامدترین ابزارهای این زمینه می‌توان به سنجنده MODIS[101] و شاخص تفاوت نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI[102]) اشاره کرد. بر این پایه

101 Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

102 Normalized Difference Vegetation Index

تحقیقات متعددی نقش عوامل جوی-اقیانوسی پیوند از دور مانند ENSO۱۰۳، NAO ۱۰۴، AO۱۰۵ و ... را در تغییرات پوشش گیاهی و شاخص NDVI بررسی کرده‌اند. این عوامل جوی باعث ایجاد نوسانات گسترده اقلیمی می‌شوند که به نوبه خود تأثیر قابل توجهی بر وضعیت سلامت پوشش گیاهی و پراکندگی آن در مناطق مختلف جهان دارند. به عنوان مثال، در مطالعات صورت گرفته در مناطق آفریقا، رابطه پیچیده‌ای میان ENSO با تغییرات NDVI یافت شده که غالباً همراه با تاخیرهای فصلی و سالانه است، به طوری که این عوامل باعث ایجاد دوره‌های خشکسالی و بارش‌های نامنظم شده‌اند که تأثیر مستقیمی بر رشد گیاهان دارند (Smith et al., 2017; Johnson & Lee, 2020). در جنوب آفریقا، اثرات ENSO از طریق افزایش رخدادهای خشک‌سالی‌های مکرر و افزایش دماهای بالا موجب کاهش چشمگیر NDVI شده‌است؛ به گونه‌ای که بیش از ۸۰ درصد مناطق تحت مطالعه کاهش پوشش گیاهی را تجربه کرده‌اند و این امر تأثیرات اقتصادی و اکولوژیکی گسترده‌ای در پی داشته است (Johnson & Lee, 2020). در هند و مناطق نیمه‌خشک آسیا نیز، تأثیرENSO به عنوان محرک نوسانات شدید در پوشش گیاهی مشاهده شده است، به طوری که دوره‌های خشکی و رطوبت شدید متناوب باعث تغییرات قابل توجه در سلامت پوشش گیاهی شده‌اند (Kumar et al., 2023). مطالعات آمریکای جنوبی نیز با تحلیل داده‌های NDVI و رطوبت خاک، روابط پیچیده بین این شاخص‌ها و الگوهای پیوند از دور را نشان داده‌اند که بر دینامیک اکوسیستم‌های منطقه اثرگذار بوده است (Garcia et al., 2022).

در اروپا، نقش NAO به عنوان یک عامل مهم تنظیم‌کننده تغییرات فصلی NDVI برجسته شده است. این مطالعات نشان می‌دهند که فازهای مثبت و منفی NAO الگوهای متفاوتی از پوشش گیاهی به خصوص در فصول بهار و تابستان ایجاد می‌کنند، که منجر به تغییر در رشد گیاهان و دوره‌های طولانی‌تر یا کوتاه‌تر پوشش گیاهی می‌شود (Müller & Schmidt, 2024). همچنین در اکوسیستم‌های حفاظت‌شده شرق آفریقا، ارتباط میان چرخه‌های SOI۱۰۶ و روندهای بلندمدت NDVIتایید شده است که این ارتباط‌ها به پیش‌بینی تغییرات آتی پوشش گیاهی کمک می‌کنند (Mwangi et al., 2024). پیشرفت‌های تکنیکی در بازسازی سری‌های زمانی NDVI، به ویژه در مناطقی که پوشش ابر فراوان است، امکان تحلیل‌های دقیق‌تر و قابل اطمینان‌تری از روابط بین سیگنال‌های پیوند از دور و پوشش گیاهی را فراهم آورده است، که این خود موجب افزایش کیفیت داده‌ها و قابلیت استفاده آنها در مطالعات بلندمدت شده است (Lopez et al., 2021). همچنین

103 El-Nino Southern Oscillation

104 North Atlantic Oscillation

105 Arctic Oscillation

106 Southern Oscillation Index

تحقیقات اخیر نشان داده‌اند که تغییرات اقلیمی در تعامل با عوامل جوی-اقیانوسی، اثرات ترکیبی و پیچیده‌ای بر پوشش گیاهی در مقیاس‌های محلی و منطقه‌ای دارند که درک این تعاملات برای مدیریت پایدار منابع طبیعی حیاتی است (Peterson et al., 2019; Zhang & Huang, 2018). مطالعات تکمیلی در جنوب شرق آسیا و آمریکای شمالی نیز به بررسی تأثیر نوسانات SST107 و سیگنال‌های پیوند از دور بر NDVI پرداخته‌اند و نتایج آنها اهمیت بالای این عوامل در تغییرات پوشش گیاهی را به ویژه در حوزه‌های حساس به تغییرات اقلیمی تأیید کرده‌اند (Nguyen et al., 2020; Brown et al., 2022). همچنین در مناطق خشک آمریکا، ارتباط معنادار بین سیگنال‌های پیوند از دور و تغییرات پوشش گیاهی به وضوح مشاهده شده است که این ارتباط می‌تواند به عنوان پایه‌ای برای پیش‌بینی بحران‌های زیست‌محیطی مورد استفاده قرار گیرد (Anderson & Garcia, 2019).

در مجموع، این مجموعه تحقیقات نشان می‌دهد که درک عمیق‌تر نقش پدیده‌های پیوند از دور می‌تواند به پیش‌بینی بهتر روندهای تغییرات پوشش گیاهی کمک کند و شاخص NDVI به عنوان ابزاری حیاتی و گسترده در پایش و تحلیل این تغییرات مورد تأکید قرار گرفته است. ایران نیز جزئ مناطقی است که آب و هوای آن شدیدا تحت تاثیر عوامل پیوند از دور قرار دارد و انتظار می‌رود که این سیگنال‌ها به طبعیت از اثرگذاری بر اقلیم، بر پوش گیاهی نیز اثرگذار باشند؛ اما تا کنون در ایران اثر این پدیده‌ها بر تغییرات پوشش گیاهی بررسی نشده‌است. در نتیجه تحقیق جاری به هدف ارزیابی اثرات سیگنال‌های پیوند از دور بر تغییرات مساحت پوشش گیاهی (VCA108) کوهستان زاگرس طراحی گردیده‌است.

۲. مواد و روش‌ها

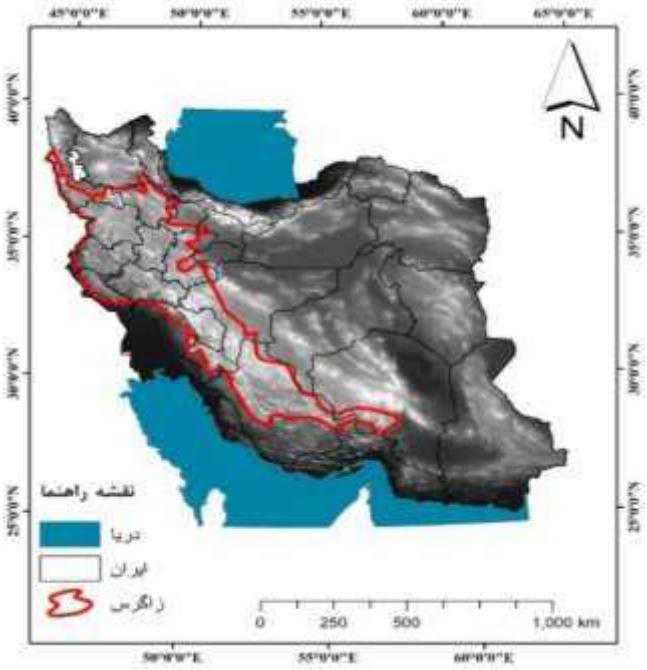
۱.۲. منطقه مورد مطالعه

تحقیق حاضر برروی رشته کوه زاگرس انجام گرفته که در بخش غربی ایران واقع است. کوه‌های زاگرس شامل کمربندی از کوه‌های چین‌خورده است که از برخورد صفحات آفریقا و اوراسیا شکل گرفته‌است. نواحی بیابانی و نیمه‌بیابانی غرب، جنوب و شرق رشته کوه زاگرس را احاطه کرده و بخش شمالی آن به سرزمین کوهستانی ارمنستان و کوه‌های البرز ختم میشود. اقلیم این منطقه غالبا در طبقه نیمه‌خشکِ سرد قرار دارد وبارندگی سالانه آن میان ۲۰۰ تا ۸۰۰ میلیمتر میباشد (Andersson, 1999; Frey & Probst, 1986).

107 Sea Surface Temperature

108 Vegetation Cover Area

پوشش گیاهی در نواحیِ کوهستانیِ زاگرس، غالبا جنگلی و یا از نوع درخت‌زارهای تنک پهن‌برگ خزان‌دار بهمراه بوته‌ها و علف‌های استپی است. درختان شاخص منطقه زاگرس بلوطها هستند که بیش از نیمی از مساحت کوه‌ها را در بر گرفته‌اند. در نقاط کوهستانی زاگرس، در کنار درختان بلوط، درخت‌زارها و بیشه‌زارهای پسته کوهی نیز مشاهده می‌شود. در بخش‌های شمالی این منطقه، در ارتفاعات بالاتر از ۴۰۰ متر استپ‌های درختچه‌ای گَوَن و مریم، به همراه درختان پراکنده وجود دارند. شروع رویش درختان از ارتفاعات ۱۹۰۰-۲۰۰۰ متری بوده که پوشش گیاهی اقلیم کوهستانیِ زاگرس در بالای این ارتفاعات متمرکز است. موقعیت منطقه مورد مطالعه در شکل ۱ قابل مشاهده است.



شکل ۱. موقعیت کوهستان زاگرس در ایران

۲.۲. سنجنده MODIS، شاخص NDVI و سیگنال‌های کلان‌مقیاس پیوند از دور

در این پژوهش داده‌های سنجنده MODIS از ماهواره Tera (محصولِ MODIS/061/MOD13A1)، با رزلوشن زمانیِ ۱۶ روزه و رزلوشن مکانی ۵۰۰ متر مورد استفاد قرار گرفته‌است. داده‌های MODIS-NDVI به صورت (NIR-RED)/(NIR+RED) از باندهای RED (620-670 nm) و NIR (841-876 nm) محاسبه شد (Vermote & Wolfe 2015; Didan et al., 2015). برای محاسبه مقادیر NDVI از نرم افزار Google Earth Engine استفاده گردید. تمامی تصاویر موجود در بازه زمانی ۲۰۰۰-۲۰۲۴ استخراج شده و در ضریب مقیاس ۰/۰۰۰۱ ضرب شدند. سپس نواحیِ با NDVI > 0.3 متمایز شده و مساحت آن نواحی محاسبه گردید. بدین ترتیب یک سری زمانی ماهانه از تغییرات VCA بر حسب کیلومتر

مربع حاصل گردید. پدیده‌های پیوند از دور به صورت الگوهای فشار جوی، دمای سطح دریا، و جریان‌های جوی تعریف می‌شوند که در مقیاس‌های فضایی هزاران کیلومتر گسترش دارند. این الگوها از طریق امواج جت استریم مانند امواج راسبی منتقل می‌شوند و سبب تغییر در سیستم‌های فشار و الگوهای جریان هوایی می‌گردند (Hoskins and Karooly, 1981). از مهم‌ترین پدیده‌های پیوند از دور می‌توان به نوسان جنوبی یا ENSO ، نوسان شمال آتلانتیک، نوسان آرکتیک و نوسان قطبی اشاره کرد. به عنوان مثال، ENSO که ناشی از تغییرات دمای سطح آب در اقیانوس آرام استوایی است، می‌تواند الگوهای بارش، دما و حتی طوفان‌های مناطق مختلف جهان را تحت تأثیر قرار دهد (Philander, 1990). در تحقیق جاری ۸ مورد از اصلی ترین سیگنال‌های پیوند از دور که بر وضعیت اقلیمی ایران اثرگذار هستند در نظر گرفته شدند که از وبسایت NOAA دریافت گردیدند. این شاخص‌ها در جدول ۱ تشریح شده‌اند.

جدول ۱. مشخصات شاخص‌های پیوند از دور مورد بررسی

ردیف	سیگنال پیوند از دور	نام لاتین	شاخص	دوره آماری
۱	نوسانات اقیانوس اطلس شمالی	North Atlantic Oscillation	NAO	۲۰۲۴-۱۹۵۰
۲	شاخص نوسانات جنوبی	Southern Oscillation Index	SOI	۲۰۲۴-۱۹۵۱
۳	شاخص نینو اقیانوسی	Oceanic Niño Index	ONI	۲۰۲۴-۱۹۵۰
۴	SST استوایی شرقی اقیانوس آرام (0-10S, 90W-80W)	Pacific SST Extreme Eastern Tropical (0-10S, 90W-80W)	Niño 1+2	۲۰۲۴-۱۹۵۰
۵	SST استوایی شرقیِ اقیانوس آرام	Eastern Tropical Pacific SST	Niño 3	۲۰۲۴-۱۹۵۰
۶	SST استوایی مرکزیِ شرقیِ اقیانوس آرام (5N-5S, 170-120W)	East Central Tropical Pacific SST (5N-5S, 170-120W)	Niño 3+4	۲۰۲۴-۱۹۵۰
۷	SST استوایی مرکزی اقیانوس آرام (5N-5S, 160E-150W)	Central Tropical Pacific SST (5N-5S, 160E-150W)	Niño 4	۲۰۲۴-۱۹۵۰
۸	الگوی اقیانوس آرام شمالی	North Pacific Pattern	NP	۲۰۲۰-۱۹۴۸

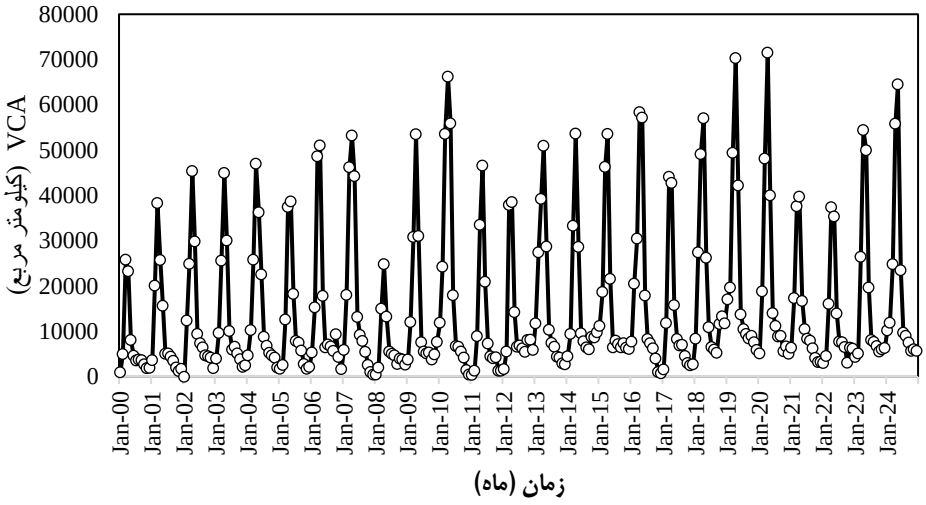
۳.۲. آزمون همبستگی متقاطع (Cross Correlation)

این روش آماری امکان ارزیابی میزان همبستگی بین دو متغیر را در فواصل زمانی مختلف فراهم می‌کند و به کمک آن می‌توان تاخیرهای زمانی را که یکی از متغیرها نسبت به دیگری واکنش نشان می‌دهد؛ شناسایی کرد. برای انجام این آزمون، ابتدا داده‌های سری زمانی به صورت یکنواخت پیش‌پردازش شدند و سپس با محاسبه ضرایب همبستگی پیرسون برای هر تاخیر، میزان تأخیر یا پیش‌آمدگی تغییرات بین دو سری مورد سنجش قرار گرفت. مقادیر مثبت تاخیر نشان‌دهنده

سری اول نسبت به سری دوم با تأخیر زمانی واکنش نشان می‌دهد و مقادیر منفی lag به واکنش زودهنگام اشاره دارد (Shumway and Stoffer, 2017). نتایج این آزمون به کمک نرم‌افزار آماری Minitab استخراج شد.

۳. نتایج و بحث

داده‌های VCA برای دوره ۲۰۰۰-۲۰۲۴ از تصاویر سنجنده MODIS در اختیار است. سری زمانی VCA برای این دوره در شکل ۲ نشان داده شده‌است. همچنین نتایج آزمون همبستگی پیرسون در جدول ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. سری زمانی VCA مستخرج از تصاویر سنجنده MODIS برای دوره ۲۰۰۰-۲۰۲۴

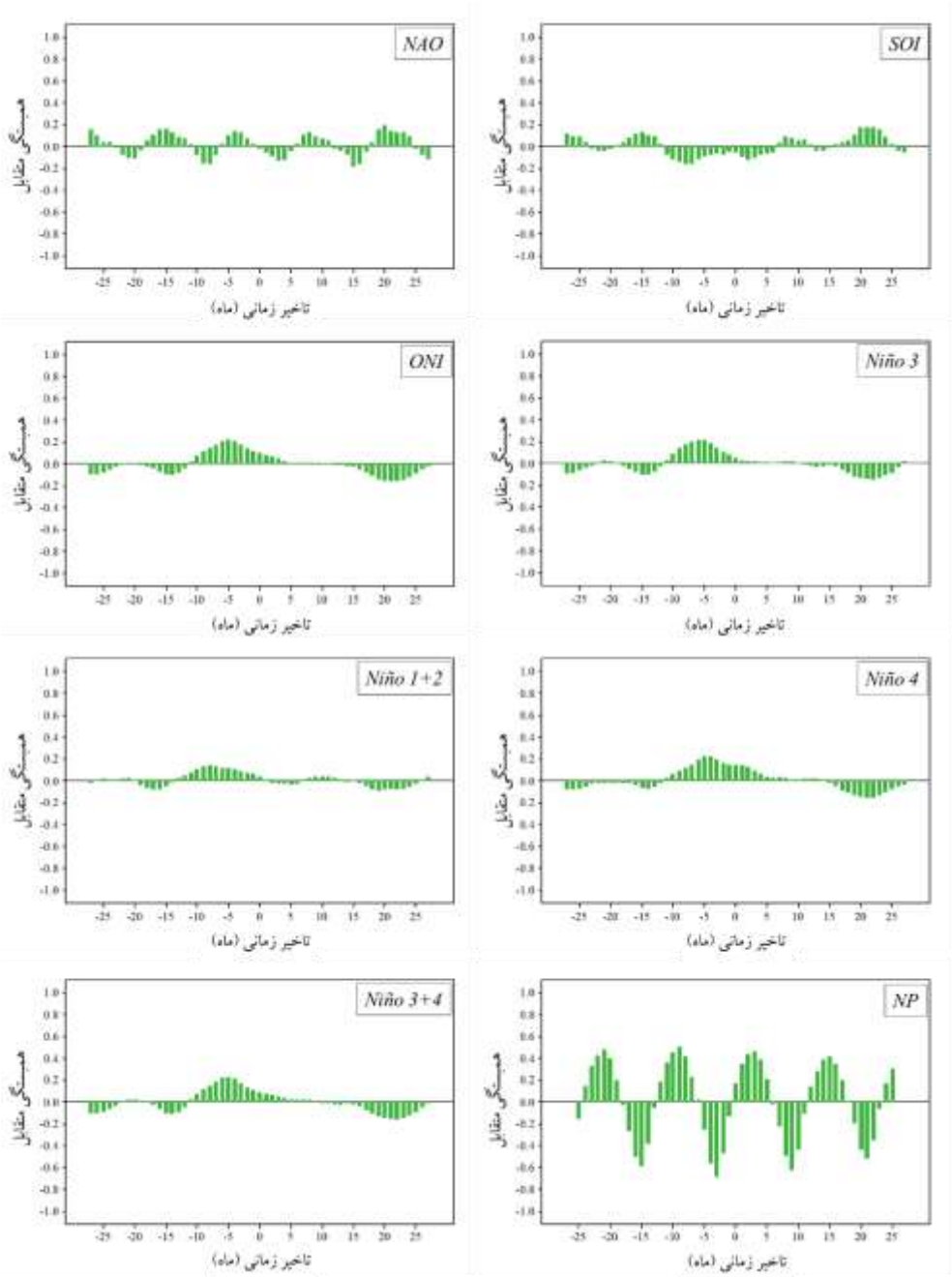
جدول ۲. همبستگی همزمان شاخص‌های پیوند از دور و VCA زاگرس بر اساس آزمون پیرسون

ردیف	شاخص پیوند از دور	همبستگی
۱	NAO	-۰/۰۱۷
۲	SOI	-۰/۰۵۶
۳	ONI	۰/۰۹۶
۴	Niño 1+2	۰/۰۳۹
۵	Niño 3	۰/۰۴۸
۶	Niño 3+4	۰/۰۸۴
۷	Niño 4	۰/۱۴۳*
۸	NP	۰/۱۶۳*

* همبستگی معنی‌دار در سطح اطمینان ۵ درصد

** همبستگی معنی‌دار در سطح اطمینان ۱ درصد

آزمون همبستگی پیرسون (جدول ۱) نشان می‌دهد که همبستگی‌های نسبتا ضعیفی بین شاخص‌های جوی-اقیانوسی و تغییرات ماهانه‌ی VCA زاگرس وجود دارد. از این میان شاخص‌های NAO و SOI در راستای معکوس، و مابقی در راستای مستقیم با تغییرات VCA مرتبط بودند. از بین ۸ شاخص جوی-اقیانوسی، ۶ مورد از آن‌ها شامل NAO، SOI، ONI، Niño 1+2، Niño 3، Niño 3+4 همبستگی معنی‌دار با تغییرات ماهانه VCA زاگرس ندارند. شاخص‌های Niño 4 و NP دارای همبستگی معنی‌دار در سطح اطمینان ۰/۰۵ (با ضرایب همبستگی به ترتیب ۰/۱۴۳ و ۰/۱۶۳) با تغییرات ماهانه VCA زاگرس بودند. از آنجا که خواستگاه این ناهنجاری‌های کلان مقیاس اقلیمی با منطقه تحت مطالعه بسیار قابل ملاحظه بوده، و از طرف دیگر فرآیند اثرگذاری این سیگنال‌ها بر روی آب و هوای منطقه مورد مطالعه در ایران و به دنباله‌ی آن بر روی تغییرات پوشش گیاهی منطقه زمانبر است، منطقی است که همبستگی بین این پدیده‌ها با VCA در تاخیرهای زمانی مختلف نیز مورد ارزیابی واقع شود. برای این امر از نمودارهای همبستگی متقاطع استفاده گردید (شکل ۳).



شکل ۳. نمودارهای همبستگی متقاطع بین شاخص‌های پیوند از دور و VCA زاگرس

در نمودارهای همبستگی متقاطع (شکل ۳) تاخیرهای زمانی مثبت نشان دهنده اثرگذاری تاخیریِ VCA برروی سیگنال-های جوی-اقیانوسی، و تاخیرهای زمانی منفی نشان دهنده اثرگذاری تاخیریِ سیگنال‌ها جوی-اقیانوسی بر روی تغییرات

VCA است؛ لذا فقط به بررسی تاخیرهای زمانی منفی پرداخته خواهد شد. در این نمودارها به وضوح مشخص است که اثر پدیده‌های جوی-اقیانوسی بر تغییرات VCA با تاخیر زمانی آشکار می‌شود، چرا که برای هر کدام از شاخص‌های پیوند از دور همبستگی‌های تاخیری شدت بیشتری از همبستگی‌های هم‌زمان (جدول ۲) دارند. به عنوان مثال شاخص NAO در حالت همزمان با VCA همبستگی بسیار ضعیف (۰/۰۱۷-) داشته، در حالی که در تاخیر زمانی ۴ ماهه شدت همبستگی آن به ۰/۱۳۳ می‌رسد که در سطح اطمینان ۰/۰۵ معنی‌دار است. یا شاخص Niño 3 در حالت هم‌زمان با VCA دارای همبستگی ضعیف (۰/۰۴۸) بود در حالی که در تاخیر زمانی ۶ ماهه همبستگی آن به ۰/۲۱۵ می‌رسد که در سطح اطمینان ۰/۰۱ معنی‌دار می‌باشد. سایر شاخص‌ها نیز در تاخیرهای زمانی دارای افزایش شدت همبستگی با VCA، در مقایسه با همبستگی هم‌زمان خود می‌باشند. همبستگی در تاخیرهای زمانیِ این شاخص‌ها در جدول ۳ به طور مشخص‌تری نشان داده شده‌اند.

جدول ۳. همبستگی تاخیریِ شاخص‌های پیوند از دور و تغییرات VCA زاگرس بر اساس نمودارهای همبستگی متقاطع

ردیف	شاخص پیوند از دور	نزدیکترین تاخیر زمانیِ دارای شدیدترین همبستگی (ماه)	همبستگی
۱	NAO	۴	۰/۱۳۳
۲	SOI	۸	-۰/۱۶۱
۳	ONI	۵	۰/۲۱۶
۴	Niño 1+2	۸	۰/۱۳۹
۵	Niño 3	۶	۰/۲۱۵
۶	Niño 3+4	۵	۰/۲۲۹
۷	Niño 4	۴	۰/۲۱۷
۸	NP	۳	-۰/۶۷۸

در جدول ۳ مشخص است که همبستگی تمام شاخص‌های پیوند از دور با VCA، در تاخیرهای زمانیِ خود به چند برابر رسیده‌است. حتی شاخص NP که بیشترین همبستگی همزمان را در بین شاخص‌ها داشت (۰/۱۶۳) نیز همبستگی اش در تاخیر زمانی ۳ ماهه به ۴ برابر در جهت شدت گرفت (۰/۶۷۸-)؛ بدین معنا که با افزایش شاخص NP، بعد از سه ماه مساحت پوشش گیاهی منطقه زاگرس کاهش معنی‌داری خواهد داشت. تمامِ این همبستگی‌ها در تاخیرهای زمانی، شامل شاخص-

های NAO، SOI و Niño 1+2 در سطح اطمینان ۰/۰۵ و شاخص‌های ONI، Niño 3، Niño 3+4، Niño 3، Niño 4 و NP در سطح اطمینان ۰/۰۱. معنی‌دار بودند.

۴. نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر در بررسی اثرات پدیده‌های جوی-اقیانوسی بر روی تغییرات مساحت پوشش گیاهی ناحیه زاگرس در ایران طراحی گردید. داده های VCA از تصاویر سنجنده MODIS و داده‌های شاخص‌های جوی-اقیانوسی نیز از وبگاه NOAA دریافت شد. همبستگی شاخص‌ها با VCA هم به صورت هم‌زمان و هم با تاخیر زمانی ارزیابی شدند. نتایج حاکی از آن بود که اثرگذاری تمامی این سیگنال‌ها با تغییرات VCA با تاخیر زمانی همراه است. از این بین شاخص NP اثرگذارترین شاخص بر روی تغییرات ماهانه VCA بود. این بررسی می‌تواند به محققان در راستای بازسازی داده‌های VCA برای سال‌هایی که فناوری سنجش از دور وجود نداشت کمک کند. بطوری که از این سیگنال‌ها به عنوان ورودی تخمین زننده VCA در دوره فعلی (۲۰۰۰-۲۰۲۴) استفاده شد، سپس از مدل مستخرج و همچنین شاخص‌های پیوند از دور که برای پیش از سال ۲۰۰۰ موجود هستند، برای بازسازی VCA دوره پیش از ۲۰۰۰ بهره گرفت. این اطلاعات به مدیران منابع طبیعی و بهره‌وران کشاورزی این امکان را می‌دهد تا از وضعیت گذشته‌ی مناطق مهم از نظر پوشش گیاهی مطلع گردند.

سپاسگزاری

بدین وسیله از مساعدت های مالی معاونت پژوهشی دانشگاه بوعلی سینا در قالب قرارداد گرنت شماره ۴۰۲۲۴۳ سپاسگزاری می گردد.

منابع

Anderson, P., & Garcia, L. (2019). Teleconnection effects on vegetation dynamics in arid regions of the USA. Journal of Climate and Ecology, 12(3), 145-160.

Andersson, S. C. (1999). The Lizards of Iran. Society for the study of Amphibians and Reptiles.

Brown, C., & Grant, M. (2005). More biodiversity to improve our health: The benefits to human well-being of favouring functional and diverse ecosystems. Redalyc.

Brown, T., Smith, J., & Lee, H. (2022). Influence of SST variability on NDVI in North America. Environmental Monitoring, 28(1), 75-90.

Buttke, D., Hendee, J., & McKinney, M. (2004). Benefits of biodiversity to human health and well-being. National Park Service.

Chen, Y., & Wang, S. (2023). Machine learning approaches to assess ENSO impacts on agricultural productivity and vegetation cover. Agricultural Systems, 40(2), 110-125.

Didan, K., Munoz, A. B., Solano, R., & Huete, A. (2015). MODIS vegetation index user's guide (MOD13 series). University of Arizona: Vegetation Index and Phenology Lab, 35, 2-33.
FAO. (2023). Seven vital ecosystem services plants provide. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
Frey, W. & Probst, W. (1986). A synopsis of the vegetation of Iran. Contributions to the vegetation of Southwest Asia, 24.
Garcia, M., Silva, R., & Pereira, J. (2022). Soil moisture and teleconnection patterns: Impacts on South American vegetation. Remote Sensing Letters, 14(7), 500-515.
Hoskins, B. J., & Karoly, D. J. (1981). The steady linear response of a spherical atmosphere to thermal and orographic forcing. Journal of the Atmospheric Sciences, 38(6), 1179–1196.
Hurrell, J. W. (1995). Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperatures and precipitation. Science, 269(5224), 676–679.
Johnson, K., & Lee, D. (2020). ENSO-driven droughts and vegetation decline in southern Africa. Climate Dynamics, 35(4), 320-335.
Kumar, R., Singh, P., & Sharma, V. (2023). Combined effects of ENSO and IOD on vegetation variability in semi-arid India. Journal of Arid Environments, 55(6), 670-685.
Lopez, A., Martinez, F., & Ruiz, E. (2021). Improving NDVI time series reconstruction under cloudy conditions. International Journal of Remote Sensing, 42(8), 3000-3015.
McPhaden, M. J., Zebiak, S. E., & Glantz, M. H. (2006). ENSO as an integrating concept in earth science. Science, 314(5806), 1740–1745.
Müller, F., & Schmidt, G. (2024). Seasonal influence of NAO on European vegetation dynamics. Ecological Indicators, 50(1), 120-135.
Mwangi, J., Kamau, S., & Otieno, P. (2024). Long-term NDVI trends and IOD-SOI teleconnections in East African ecosystems. African Journal of Ecology, 60(2), 230-245.
Nguyen, L., Tran, M., & Pham, H. (2020). SST teleconnections and NDVI variability in Southeast Asia. Environmental Research Letters, 15(9), 095001.
Peterson, M., Zhang, L., & Clark, D. (2019). Climate change and teleconnection impacts on vegetation: A regional assessment. Global Change Biology, 25(3), 800-815.
Philander, S. G. (1990). El Niño, La Niña, and the Southern Oscillation. Academic Press.
Pielke, R. A., Marland, G., Betts, R. A., Chase, T. N., Eastman, J. L., Niles, J. O., & Running, S. W. (2011). The influence of land-use change and land-cover change on climate. Global Change Biology, 17(2), 729–736.
Shumway, R. H., & Stoffer, D. S. (2017). Time Series Analysis and Its Applications: With R Examples (4th ed.). Springer.
Smith, J., & Lee, H. (2017). Hemispheric differences in vegetation response to ENSO. Journal of Biogeography, 44(11), 2573-2585.
Smith, J., Brown, A., & Taylor, R. (2017). ENSO impacts on African vegetation cover: A satellite-based study. Remote Sensing of Environment, 198, 40-50.

Vermote, E., & Wolfe, R. (2015). MOD09GA MODIS/Terra surface reflectance daily L2G global 1km and 500m SIN grid V006 [data set]. NASA EOSDIS Land Processes DAAC.
Zhang, Q., & Huang, Y. (2018). Interactions of climate variability and teleconnections on vegetation dynamics. Climate Research, 76(1), 45-60.
Zhang, Y., Chen, H., & Xu, M. (2017). Effects of climate change on vegetation growth and distribution: A review. Environmental Research Letters, 12(10), 103001.

Investigating the effects of macro-scale climatic factors on monthly vegetation coverage area variations in Zagros region

Pouya Aghelpour

Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran (email: p.aghelpour@agr.basu.ac.ir)

Vahid Varshavian

Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran (email: v.varshavian@basu.ac.ir)

Akbar Sabziparvar-Ali

Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran (email: sabziparvar@yahoo.co.uk)

Abstract

Vegetation changes are influenced by a combination of natural and anthropogenic factors. Remote coupling phenomena include large-scale atmospheric-oceanic anomalies that occur on macro-scales over oceans and land and subsequently affect the climate of distant regions. On a larger scale, atmospheric-oceanic phenomena have significant effects on vegetation changes by causing changes in precipitation and temperature patterns in different regions of the world. The present study was designed to investigate the effects of atmospheric-oceanic phenomena on changes in vegetation area of the Zagros region in Iran. VCA data were obtained from MODIS sensor images and atmospheric-oceanic index data were also obtained from the NOAA website. The remotely sensed indices included 8 signals affecting Iran's climate, including: NAO, SOI, ONI, Niño 1+2, Niño 3, Niño 3+4, Niño 4, and NP. The correlation of the indices with VCA was evaluated both simultaneously and with a time lag. The results indicated that the effects of all these signals on VCA changes are associated with time lags. Among them, the NP index was the most influential index on monthly VCA changes; The results showed that the increase in this signal in the North Pacific Ocean, after three months, causes a significant decrease in VCA in the Zagros region. This study can be very useful for researchers in reconstructing VCA data for years when remote sensing technology did not exist.

Keywords: Vegetation area, MODIS sensor, Ocean atmospheric signals, Remote sensing, NAO

نقش چینش باد ترازپایین در مخاطرات هوانوردی در منطقهٔ ایران

عظیمه محسن بیگی[۱]، مریم قرایلو [۲] و سمانه ثابت قدم [۲]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد هواشناسی، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران
۲- دانشیار، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران
آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول (azimeh.beigi@ut.ac.ir)

چکیده

وضع هوا یکی از مهم‌ترین عوامل طبیعی تأثیرگذار در صنعت حمل‌ونقل هوایی می‌باشد. اگرچه تاکنون بسیاری از جزئیات جنبه‌های اقلیمی و تغییرات بلندمدت برخی متغیّرهای اساسی هواشناسی مانند دما، باد و بارش مورد بررسی قرار گرفته‌اند، اما تعداد محدودی از مطالعات بر شرایط هواشناسی تأثیرگذار بر هوانوردی متمرکز شده‌اند. مطالعه حاضر به تحلیل تغییرپذیری مکانی و زمانی و روند بلندمدّت چینش باد ترازپایین (LLWS) که یکی از مهم‌ترین مخاطرات هوانوردی به‌شمار می‌رود، می‌پردازد. در این راستا، از داده‌های بازتحلیل ERA5 برگرفته از مرکز اروپایی پیش‌بینی‌های میان مدت جوّی (ECMWF) استفاده شد تا شرایط جوّی مؤثر بر چینش باد ترازپایین در منطقهٔ ایران ارزیابی شود و مناطق مستعد وقوع چینش باد ترازپایین در ایران طی دورهٔ ۴۵ ساله از ۱۹۷۹-۲۰۲۳ شناسایی شوند. نتایج نشان داد که نواحی واقع در شرق و مرکز ایران و قسمت‌های محدودی از شمال غرب و غرب خوزستان و قسمت عمده‌ای از خلیج فارس، تحت تأثیر مخاطره ناشی از چینش باد ترازپایین (LLWS) قرار دارد. LLWS کمترین گسترهٔ مکانی را در فصل‌های پاییز و تابستان دارد. با این حال، در تابستان، مقادیر بیشینهٔ آن در نواحی شرق ایران مشاهده شد که این امر عمدتاً تحت تأثیر فعّالیّت بادهای ۱۲۰ روزه سیستان است. همچنین، در غرب استان خوزستان و بخش قابل‌توجهی از خلیج‌فارس، بیشینه وقوع این پدیده در همین فصل مشاهده می‌شود. بررسی روند بلندمدت LLWS نشان داد که این مخاطره در قسمت‌های عمده‌ای از تبریز، زنجان(شمال غرب) و نواحی جنوبی سمنان رو به افزایش است و در شرق کشور روندی کاهشی را تجربه می‌کند.

کلیدواژه: توفان تندری، چینش باد ترازپایین، ERA5، منطقهٔ ایران.

۱. مقدمه

به‌طور کلی چینش باد، تغییرات ناگهانی سمت یا سرعت باد و یا تفاوت هم‌زمان هر دو کمیّت در یک مسافت نسبتاً کوتاه تعریف می‌شود. چینش باد می‌تواند افقی و قائم باشد. چینش افقی باد، آهنگ تغییر باد افقی در راستای محورهای افقی و چینش قائم باد، آهنگ تغییر باد افقی در راستای قائم است. واحد چینش قائم باد، نات بر ۱۰۰ پا می‌باشد (Taszarek et al., 2020). چینش قائم باد در ترازهای بالا و پایین به‌طور مجزا بررسی می‌شود. چینش قائم بادِ ترازبالا برای بررسی نحوهٔ تشکیل و ردیابی توفان‌های حارّه‌ای و چینش قائم بادِ ترازپایین در امور هوانوردی به‌کار گرفته می‌شود. چینش قائم بادِ ترازبالا عموماً اختلاف برداری باد در دو تراز ۸۵۰ و ۲۰۰ هکتوپاسکال است و چینش قائم بادِ ترازپایین، در اثر اختلاف برداری باد افقی در یک لایهٔ کم‌عمق زیر ۲۰۰۰ پا (حدود ۶۱۰ متر) در نزدیکی سطح زمین در راستای قائم ایجاد می‌شود (Arkell, 2000)

چینش باد می‌تواند در اثر عوامل همرفتی مانند توفان تندری یا هنگام عبور جبهه رخ دهد و یا در اثر عوامل غیرهمرفتی مانند وارونگی دما و توپوگرافی ایجاد شود. چینش باد منجر به کاهش یا افزایش لحظه‌ای سرعت هواپیما می‌شود. از آنجا که نیروی بالابرندهٔ تولید شده توسط بال‌های هواپیما به شدّت به سرعت هواپیما بستگی دارد، بنابراین چینش باد منجر به افزایش یا کاهش مؤثر نیروی بالابرنده می‌شود و هواپیما از مسیر اصلی پرواز منحرف می‌شود (Mylne and Boxall, 2007). چینش باد ترازپایین از موضوع‌های پیچیده‌ای هستند که در مباحث هواشناسی هوانوردی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. توصیه به بررسی کمیّت چینش باد ترازپایین از اوایل دهه ۶۰ میلادی در دستور کار سازمان هواشناسی جهانی قرار گرفت و نتیجه حاصل از کار پژوهشگران کشورهای مختلف در زمینه چینش قائم باد ترازپایین در سال ۱۹۶۹ به‌وسیله نشریه جداگانه‌ای از سوی این سازمان منتشر شد.

Arkell (2000) اختلاف بین انواع چینش باد و نحوهٔ پیش‌بینی آنها را از دیدگاه هواشناسی هوانوردی بررسی کرد. او به مطالعهٔ چینش باد و اشکال متفاوت آن در زیر ارتفاع ۲۰۰۰ پائی پرداخت. سرویس ملی هواشناسی، چینش باد را به سه دستهٔ ترازپایین همرفتی، ترازپایین غیرهمرفتی و تلاطمی تقسیم می‌کند. Arkell (2000) ضمن بیان تأثیر این تقسیم‌بندی تأکید می‌کند که در صورت تعریف نادرست این دسته‌بندی، امکان سوءتعبیر و تفسیر اشتباه وجود دارد. او به تعریف و تفسیر تعریف‌هایِ سرویس ملی هواشناسی از چینش باد ترازپایین پرداخت که با عنوان TAF، SIGMET و AIRMET شناخته می‌شود. در مطالعهٔ او، تحلیل گزارش‌های ۳۰۰ خلبان از چینش باد ترازپایین اشاره به دو نکتهٔ مهم دارد که عبارتند از: تعیین شرایط جوّی که باعث وقوع این پدیده شده است و دیگری درک نگاه خلبان در روند گزارش‌دهی و برداشت آن از پدیده می‌باشد. مهم‌ترین برداشت در تحلیل گزارش‌ها، مغایرت فهم این پدیده توسط خلبانان با تعاریف ارائه شده توسط

سازمان هواشناسی هوانوردی می‌باشد. او با بررسی شیوه‌های پیش‌بینی چینش باد پیشنهاداتی ارائه داد که می‌تواند منجر به شفاف‌سازی و بهبود پیش‌بینی این پدیدهٔ پیچیده و چندوجهی گردد.

Taszarek et al. (2020) به مطالعهٔ اقلیم مخاطرات جوّی تأثیرگذار بر فرودگاه‌های اروپا پرداختند. آنها به توصیف ماهیت پدیده‌های چینش باد ترازپایین، توفان تندری، بارش برف، دید افقی و علل رخداد این پدیده‌ها پرداختند. آنها دوازده فرودگاه اصلی قارهٔ اروپا را انتخاب کردند و توزیع زمانی- مکانی این پدیده‌ها را بررسی کردند. Lei et al. (2022) نیز ویژگی‌های اقلیمی شرایط جوّی خطرناک از جمله چینش باد ترازپایین را که بر فرودگاه‌های چین تأثیر می‌گذارد را بررسی کردند. آنها نشان دادند که چینش باد ترازپایین بیشتر در فصل زمستان رخ می‌دهد اما در تابستان نادر است و فرودگاه‌های شمال شرق چین باید از فوریه تا مارس و اکتبر تا نوامبر اقدامات احتیاطی بیشتری در مورد این پدیده انجام دهند.

در ایران به‌سبب نبود داده‌های مناسب، بررسی از نقش چینش باد تا سال ۱۳۶۸ بررسی نشده است (مرادی و همکاران، ۱۳۹۳). نصیرزاده (۱۳۶۸) و رزم زن (۱۳۶۹) با به‌کارگیری داده‌های برج هواشناسی سازمان انرژی اتمی تهران قرار داشت، چینش قائم باد را در تهران در لایه‌های مختلف ۱۰- ۴۵، ۱۰-۸۰ و ۱۰-۱۰۰ متری و برای ماه‌های مختلف بررسی کردند. این بررسی‌ها نشان داد که به علت وجود اثرات ناشی از اصطکاک سطح زمین، چینش باد در لایهٔ ۱۰-۴۵ متری بیشتر از لایه‌های دیگر است. همچنین نتایج این پژوهش‌ها نشان داد که چینش قائم باد در برج هواشناسی امیرآباد به سبب ساختار ویژه توپوگرافی و قوی بودن نسیم کوه به دشت و دشت به کوه برای شهر تهران قابل تعمیم نمی‌باشد.

تاج بخش و مرادی (۱۳۸۱) به بررسی اثرات چینش باد ناشی از میکروبرست در کشور به‌طور موردی پرداختند. نتایج حاصل در پژوهش آنها حاکی از آن است که میکروبرست‌هایی با شدّت F0 (۲۳ متر بر ثانیه) در برخی از فرودگاه‌های کشور از جمله همدان و باند ۲۹ فرودگاه مهرآباد گزارش شده‌اند. آنها یادآور شدند که نقش این پدیده در بروز سوانح هوایی انکارناپذیر است و پدیده مزبور یکی از مهم‌ترین پدیده‌های جوّی است که پیش‌بینی آن می‌تواند از بروز سوانح پیشگیری نماید. مرادی و همکاران (۱۳۹۳) به مطالعهٔ پدیده چینش قائم باد ترازپایین جوّ در فرودگاه مهرآباد پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که در ماه ژانویه، پدیده مزبور در اثر عبور جبهه‌های جوّی و وارونگی دما ایجاد شده است و بیشترین مقدار این کمیت در ساعت UTC ۰۰:۰۰ در روزهای چهارم و بیست و سوم و در لایهٔ ۱۰ تا ۷۱ متری رخ داده است. همچنین در ماه ژوئیه نیز این پدیده در اثر وارونگی دما ایجاد شده و بیشترین مقدار آن در ساعت UTC ۱۲:۰۰ در روز چهاردهم و در لایهٔ ۱۰ تا ۷۱ متری می‌باشد.

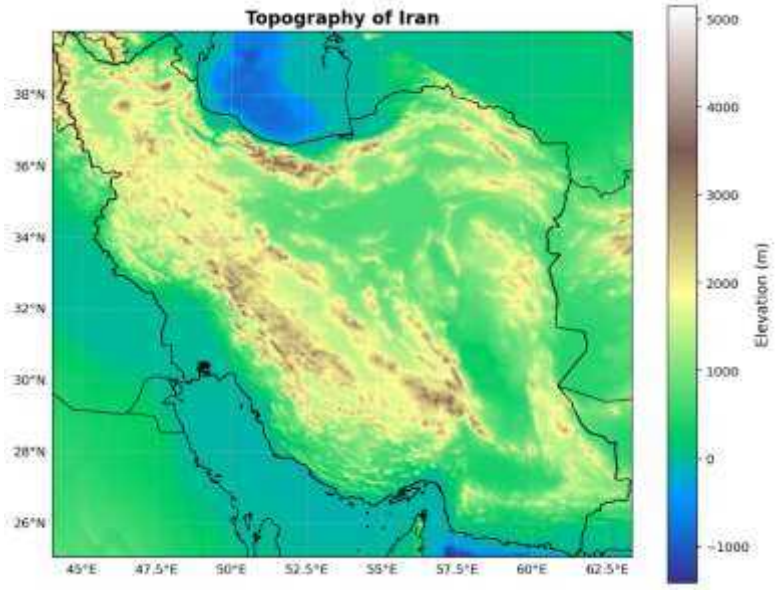
بنابراین، این پژوهش بر یکی از اصلی‌ترین مخاطرات هوانوردی یعنی چینش باد ترازپایین (LLWS) تمرکز دارد که می‌تواند موجب بروز سوانح شود. این پدیده به‌ویژه در مراحل نشست و برخاست اهمّیّت دارد و نمونه‌های تاریخی، مانند سقوط هواپیمایی در دالاس ۱۹۸۵، اهمّیّت بررسی آن را نشان می‌دهد. با توجه به تغییرات اقلیمی و افزایش دما، شدت و فراوانی

این مخاطره در حال تغییر است (Taszarek et al., 2020). در این پژوهش با استفاده از داده‌های بازتحلیل ERA5 مرکز ECMWFطی دوره ۱۹۷۹ تا ۲۰۲۳، الگوی مکانی و زمانی این مخاطره در ایران بررسی و مناطق مستعد وقوع آن شناسایی می‌شوند. در این مطالعه، برای نخستین بار در سطح کشور، مخاطرهٔ ناشی از LLWS با بهره‌گیری از شاخص چینش باد ترازپایین در چارچوب بلندمدت تحلیل شده و مناطق آسیب‌پذیر تعیین می‌گردند. هدف اصلی پژوهش پاسخ به این پرسش‌ها است که الگوی مکانی–زمانی این پدیده در ایران به چه صورتی است و اینکه کدام مناطق آسیب‌پذیرترند و تغییرات اقلیمی چه تأثیری بر شدت و فراوانی آن داشته است.

۲. داده‌ها و روش‌کار

۲. ۱ منطقه مورد مطالعه

منطقهٔ مورد مطالعه کل کشور ایران را دربرمی‌گیرد (شکل ۱) و در محدودهٔ بین عرض‌های جغرافیایی ۲۵ تا۴۰ درجه شمالی و طول‌های جغرافیایی ۴۴ درجه غربی تا ۶۴ درجه شرقی واقع شده است.



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه در پژوهش حاضر. ارتفاع از سطح دریا بر حسب متر (مقیاس رنگی سایه‌دار) مشخص شده است.

۲. ۲ داده‌ها

در پژوهش حاضر برای بررسی نقش مخاطرهٔ چینش باد ترازپایین، از داده‌های بازتحلیل شبکه‌ای ERA5 متعلق به ECMWF استفاده شده است. بدین منظور یک دورهٔ آماری با پوشش چهل‌وپنج ساله از سال ۱۹۷۹ تا ۲۰۲۳ در نظر گرفته شده است. مشخصات این بانک داده در جدول ۱ ارائه شده است. این بانک داده دارای تفکیک افقی ۰/۲۵ درجه در راستای طول و عرض جغرافیایی، ۱۳۷ سطح فشاری و تفکیک زمانی یک‌ساعته می‌باشد. برای محاسبهٔ مؤلفه‌های مورد استفاده در این مطالعه مؤلفه‌های مداری و نصف‌النهاری بردار باد در نظر گرفته شده است. چینش باد ترازپایین، مقدار بردار باد بین ۱۰ و ۱۰۰ متری از بالای سطح زمین می‌باشد.

جدول ۱- مشخصات داده‌های ERA5 مورد استفاده در مطالعه.

تفکیک افقی	۰/۲۵ ° × ۰/۲۵ °
گسترهٔ مداری	۴۴ – ۶۴ oE
گسترهٔ نصف‌النهاری	۲۵ – ۴۴ oN
گام‌های زمانی	۳۸۸۸۰۰
مجموع نقاط شبکه	۴۸۸۰
دورهٔ زمانی	۲۰۲۳-۱۹۷۹

۲. ۳ تعیین آستانه

به‌منظور ارزیابی تعداد رخداد شرایط مخاطره‌آمیز جوّی مشخص، استخراج آستانه به‌عنوان شاخص برای رخداد پدیده ضروری است. مقادیر آستانه برای این پژوهش در جدول ۲ مشخص شده است. تعیین آستانه چینش باد ترازپایین چالش-برانگیز است. طبق گزارش سازمان هوانوردی غیرنظامی بین‌المللی (۲۰۰۵) هر مقداری بیش از ۵ نات به ازای هر ۱۰۰ پا، مهم تلقی شده و قابلیّت تأثیرگذاری بر کارایی هواپیما را دارد. از آنجایی که داده‌های بازتحلیل، چینش قائم باد را فروتخمین می‌کنند (Allen et al., 2011)، مقدار ۳ نات به ازای هر ۱۰۰ پا در این پژوهش اعمال شده است. همچنین لازم به ذکر است که با توجه به محدودیت توان تفکیک دادهٔ بازتحلیل و پارامترسازی بسیاری از فرایندها، چینش باد حاصل در این پژوهش عمدتاً نتیجهٔ یک گرادیان فشار در مقیاس همدیدی است و به پدیده‌های محلی مانند میکروبرست مرتبط نمی‌باشد. اگر چه آستانه‌های تعریف شده، پایهٔ فیزیکی دارند، اما باید در نظر داشت که آنها صرفاً شاخص‌هایی برای وضعیّتی بالقوه جهت رخداد مخاطره می‌باشند. چنین تحلیل‌هایی مشمول تفسیر احتمالی بوده و ممکن است با عدم قطعیّت همراه باشد (Allen and Karoly, 2014). بنابراین، نتیجه به‌دست آمده باید با احتیاط تفسیر شود.

جدول ۲- مقادیر آستانه برای شاخص‌های تعیین‌کنندهٔ مخاطره

نوع مخاطره	مقادیر آستانه

چینش باد ترازپایین	in 0–100 m AGL (Above Ground Level) vertical wind shear gradient >3 kt per 100 ft

۲. ۴ روش کار

اندازهٔ چینش باد ترازپایین به‌صورت زیر بیان می‌شود (Zhao et al., 2006):

$$llws = \frac{1}{\delta z}\sqrt{(u_a - u_b)^2 + (v_a - v_b)^2} \quad (۱)$$

که در آن u و v به‌ترتیب نشان‌دهندهٔ مؤلفه‌های مداری و نصف النهاری بردار باد، $llws$ چینش قائم باد ترازپایین، پایین‌نویس‌های a و b به‌ترتیب متناظر با ترازهای بالا و پایین و δz نیز اختلاف ارتفاع بر حسب متر می‌باشد. مخاطره ناشی از چینش باد در لایه پایین جوّ (LLWS) با استفاده از داده‌های ساعتی مربوط به مؤلفه‌های باد افقی u و v در دو ارتفاع ۱۰ و ۱۰۰ متری برای ۲ برای هر یک از ۴۸۸۰ نقطه شبکه و حدود ۳۸۸۸۰۰ گام زمانی محاسبه شد. پس از محاسبهٔ LLWS، ساعاتی که این شاخص از مقدار آستانه تعیین‌شده فراتر می‌رفت، به‌عنوان ساعات مخاطره به‌ازای تمام نقاط شبکه‌ای و گام‌های زمانی ذکرشده شمارش و جمع‌آوری شدند. سپس برای هر فصل و در طول ۴۵ سال (۱۹۷۹–۲۰۲۳)، میانگین تعداد ساعات همراه با مخاطره چینش باد ترازپایین بر سال، در هر نقطه از شبکه محاسبه شد.

تعداد ساعات مخاطره در هر سال با جمع ساعات برآوردکنندهٔ این شرایط محاسبه شدند. سپس، داده‌های سالانه برای کل دوره ۴۵ ساله تجمیع شده و روند تغییرات در هر نقطه شبکه با رگرسیون خطی محاسبه شد. شیب روند (در واحد ساعات/سال) برای دوره ۴۵ ساله (۱۹۷۹-۲۰۲۳) به‌دست آمد و با ضرب در ۱۰، به‌صورت ساعات/دهه بیان شد. معنی‌داری آماری روندها با استفاده از آزمون معنی‌داری (p-value <۰/۰۵) ارزیابی شد. فرمول رگرسیون خطی مورد استفاده برای محاسبهٔ شیب روند (Slope) به‌صورت زیر است:

$$\text{Slope} = \frac{\sum(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sum(x_i-\bar{x})^2} \quad (۲)$$

که در آن x_i سالها (۱۹۷۹-۲۰۲۳)، y_i تعداد ساعات مخاطره در هر سال برای یک نقطه شبکه‌ای خاص، $\bar{x}$ میانگین سالها و $\bar{y}$ میانگین ساعات مخاطره در ۴۵ سال را نشان می‌دهد.

۳. بحث‌ونتایج

۳. ۱ تغییرپذیری مکانی

شکل ۲ توزیع مکانیِ میانگین فصلی تعداد ساعت‌های همراه با مخاطرهٔ چینش باد ترازپایین در طی سال‌های ۱۹۷۹-۲۰۲۳ با در نظر گرفتن مقادیر آستانه را نشان می‌دهد. تحلیل این توزیع در فصل زمستان نشان‌دهندهٔ پوشش وسیعی از مناطقی است که چینش باد ترازپایین را تجربه می‌کنند (شکل ۲د). مناطق در معرض این مخاطره طی این فصل، سالانه حدود ۱۰ تا ۸۰ ساعت را تجربه می‌کنند ولی قسمت‌هایی از سیستان و بلوچستان، کرمان و شمال شرق اهواز مقادیر مخاطره ناشی

از چینش باد بین ۸۰ تا ۱۶۰ ساعت در سال را تجربه می‌کنند. همان‌طور که در شکل ۲د مشاهده می‌شود، رشته کوه‌های البرز و زاگرس احتمالاً به مقادیر بالاتر چینش باد کمک می‌کنند. در فصل زمستان، پرفشار سیبری با نفوذ از شمال شرق (و گاهی جنوب غرب) ایران موجب شکل‌گیری الگوهای جوّی پایدار می‌شود (علیجانی و کاویانی، ۱۳۹۵). اگرچه علیجانی و کاویانی (۱۳۹۵) به‌طور مستقیم به نقش این پایداری‌ها در شکل‌گیری چینش باد اشاره نکرده است، اما با توجه به نتایج این پژوهش که چینش باد گسترده‌ای را در زمستان نشان می‌دهد، می‌توان احتمال داد که این شرایط پایدار جوّی زمینه‌ساز وقوع چینش گسترده‌تر در این فصل باشند. مرادی و همکاران (۱۳۹۳) اشاره کرده‌اند که وارونگی دما که در فصل زمستان رایج است، می‌تواند با افزایش تلاطم، شرایط را برای تقویت چینش باد در تراز پایین فراهم کند. نتایج این پژوهش نیز نشان می‌دهد که چینش باد وسیعی در زمستان رخ داده است که ممکن است با چنین سازوکاری مرتبط باشد. ماهیت گستردگی چینش باد ترازپایین در فصل زمستان مخاطرهٔ ثابتی برای فعّالیّت‌هایی مانند هوانوردی محسوب می‌شود.

انتقال از فصل زمستان به تابستان می‌تواند منجر به ایجاد شرایط جوّی‌ای شود که چینش باد را به میزان قابل توجهی افزایش دهد، اما ممکن است به‌اندازهٔ سامانه‌های زمستانی منطقه وسیعی را پوشش ندهد. تحلیل ساعت‌های همراه با چینش باد ترازپایین در فصل تابستان افزایش قابل توجهی در مقادیر چینش باد ترازپایین در حدود ۱۰۰۰ ساعت در سال به‌ویژه در محدوده‌ای از شرق ایران را نشان می‌دهد (شکل ۲ب). افزایش ساعات همراه با چینش باد در حوضه سیستان را می‌توان تحت تأثیر بادهای موسمی صد و بیست روزه دانست؛ بادهایی که نقش کلیدی در شکل‌گیری توفان‌های خاک در این منطقه ایفا می‌کنند. این بادها از نیمه ماه مه تا نیمه ماه سپتامبر به اوج شدت خود می‌رسند، زمانی که یک سامانهٔ پرفشار پایدار بر فراز کوه‌های هندوکش در شمال افغانستان به‌همراه یک کم‌فشار گرمایی تابستانی بر روی اراضی بیابانی شرق ایران و غرب افغانستان، یک گرادیان فشار قوی ایجاد می‌کند (علیزاده چوبری، ۲۰۱۳). این بادها از برهم‌کنش محیط اطراف با کوه‌های پلنگان در غرب و کوه‌های هندوکش و بابایی در شمال شرق منطقه شتاب می‌گیرند (Whitney, 2006). جت ترازپایین در امتداد مرز ایران و افغانستان در ماه ژوئیه در قوی‌ترین حالت خود با سرعت باد میانگین ماهانه ۲۰ متر بر ثانیه در شب‌هنگام در ارتفاع ۳۰۰–۵۰۰ متری قرار دارد (علیزاده چوبری، ۲۰۱۳).

فصول بهار و پاییز دوره‌های انتقالی محسوب می‌شوند. ناحیهٔ بسیار محدودی از جنوب شرق بیرجند و زابل در فصل پاییز به‌سبب بادهای ۱۲۰ روزه ساعات قابل توجهی (حدود ۴۰۰ ساعت در سال) از چینش باد ترازپایین را تجربه می‌کنند (شکل ۲ج). در فصل بهار هم مشابه فصل پاییز، شرق ایران همچنان چینش باد ترازپایین قابل توجهی را دارد ولی فراوانی تعداد ساعات آن کاهش می‌یابد (شکل ۲الف). آشکار است که در فصل پاییز، گسترهٔ مکانی تحت تأثیر چینش باد ترازپایین نسبت به فصل بهار کاهش یافته است (مقایسهٔ شکل‌های ۲الف و ۲ج).

به‌طور کلی می‌توان چنین برداشت کرد که فصول زمستان و بهار بیشترین گسترهٔ مکانی وقوع پدیدهٔ چینش باد ترازپایین را به خود اختصاص داده‌اند. در مقابل، در فصول تابستان و پاییز، از وسعت مناطق تحت تأثیر این پدیده کاسته می‌شود. در فصل تابستان، تنها تعداد محدودی از مناطق شرقی ایران هستند که ساعات بیشتری از این پدیده را تجربه می‌کنند. در این میان، پاییز فصلی است که کمترین گسترهٔ مکانی را برای وقوع چینش نشان می‌دهد؛ البته با یک استثنا و آن هم مربوط به مناطقی در شرق ایران است که در همین فصل، تعداد ساعات وقوع این پدیده را بیش از بهار و زمستان تجربه می‌کنند.

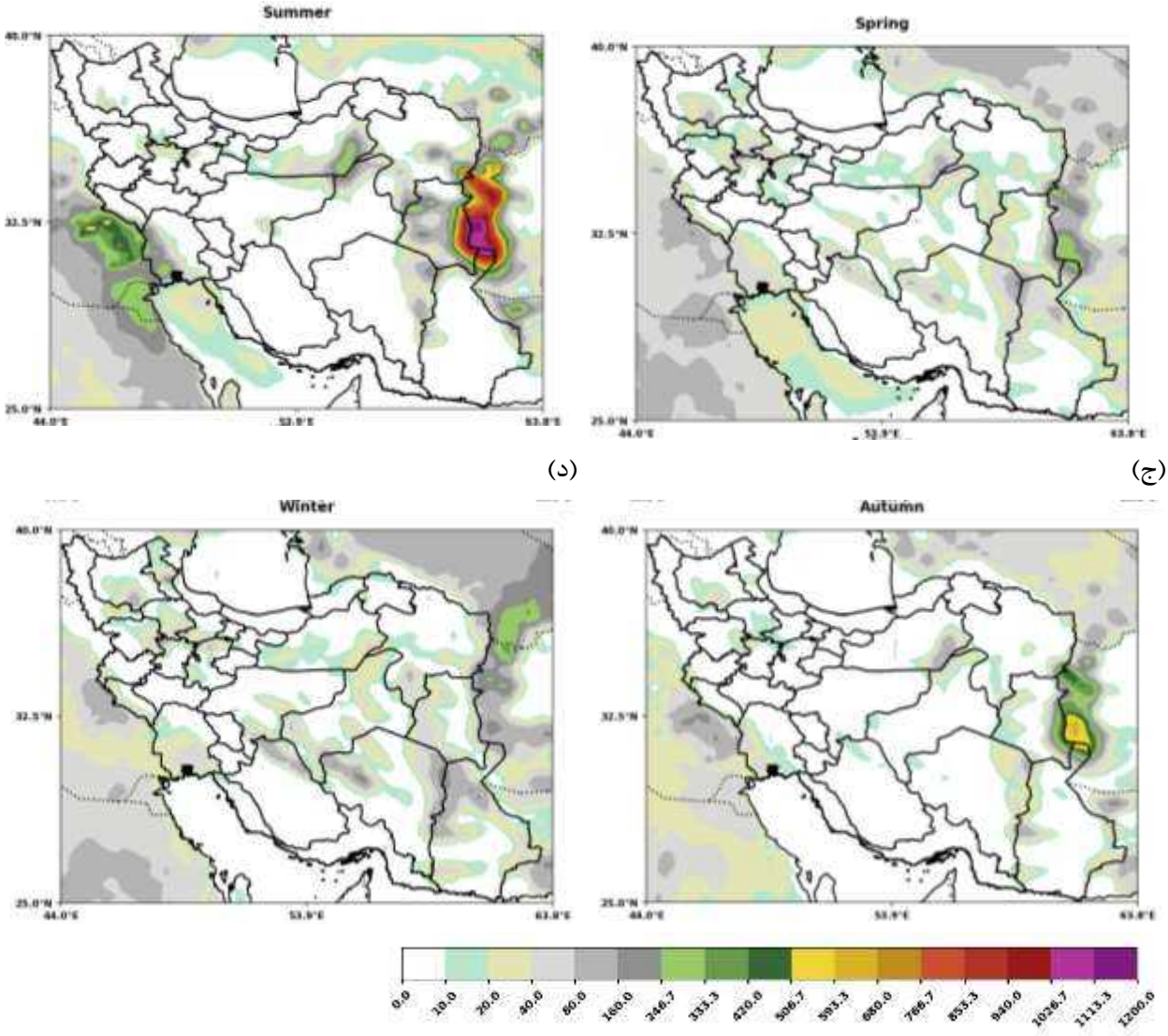
همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، بخش‌های عمده‌ای از خلیج فارس و شرق خوزستان در فصول تابستان و بهار، ساعات قابل‌توجهی از مخاطره ناشی از چینش باد را تجربه می‌کنند. در همین راستا، Yu et al. (2016) در مطالعه‌ای درباره اقلیم باد شَمال تابستانی در خاورمیانه تأکید کردند که نواحی حوزهٔ دجله و فرات، کویت و خلیج فارس و شرق شبه جزایر عربی تحت تأثیر جریان‌های باد شَمال با ویژگی‌های خاص تابستانه قرار دارند. از آنجا که آنها این مناطق را به‌عنوان نواحی تحت تأثیر فعّالیّت دینامیکی باد شمال معرفی کرده‌اند، می‌توان نتایج پژوهش حاضر را با در تطابق با یافته‌های آنان دانست. به‌عبارتی، این نواحی به دلیل قرار گرفتن در مسیر فعّالیّت دینامیکی باد شَمال، ظرفیت ایجاد شرایط چینش باد را دارا هست. شایان ذکر است که این پدیده در پهنه‌های آبی کشور ما تقریباً مشاهده نمی‌شود؛ به‌جز خلیج فارس که پیش‌تر علت وقوع آن را به فعّالیّت دینامیکی باد شَمال نسبت دادیم. به‌طور کلی، پهنه‌های آبی کشور به‌خودی‌خود تحت تأثیر مخاطره ناشی از چینش باد نیستند. مطابق با مطالعه Taszarek et al. (2018)، این پدیده در اروپا نیز کمتر روی پهنه‌های آبی مشاهده شده و بیشتر روی خشکی رخ می‌دهد. آنها علت این موضوع را وجود اصطکاک در مناطق خشکی عنوان کرده‌اند؛ زیرا اصطکاک باعث کاهش سرعت باد در لایه سطحی و در نتیجه افزایش بزرگی چینش می‌شود.

۳. ۲ روند تغییرات بلندمدت

شکل ۳ روند تغییرات بلندمدت تعداد ساعات وقوع چینش باد مخاطره‌آمیز (بر اساس تعریف: چینش باد بیش از ۴/۵ متر بر ثانیه بین ارتفاع‌های ۱۰ و ۱۰۰ متر) در ایران را طی دورهٔ ۱۹۷۹ تا ۲۰۲۳ نشان می‌دهد. این روند به‌صورت ساعت بر دهه نمایش داده شده و نقاط دارای معنی‌داری آماری ($p\text{-value} < 0.05$) در شکل مشخص شده‌اند. دامنهٔ تغییرات از حدود ۹۰– ساعت بر دهه تا ۲۶+ ساعت بر دهه متغیّر است. به‌طور کلی، قسمت‌هایی از شمال شرق، شرق و جنوب شرق کشور همچنین ناحیهٔ محدودی از کرمان، روندی کاهشی و در مواردی شدیداً منفی در تعداد ساعات LLWS را تجربه کرده‌اند. عامل اساسی در تغییرات سرعت باد را می‌توان به تغییرات انرژی تابشی رسیده به سطح زمین، تغییر دما و در نتیجه تغییر در الگوهای فشار گرمایی نسبت داد. روند بلندمدت تغییرات در شکل ۳، کاهش تعداد ساعات همراه با LLWS را در قسمت‌های بسیار محدودی از اردبیل نشان می‌دهد؛ کاهشی که با آهنگ حدود ۳ ساعت بر دهه ادامه دارد. با نگاهی به

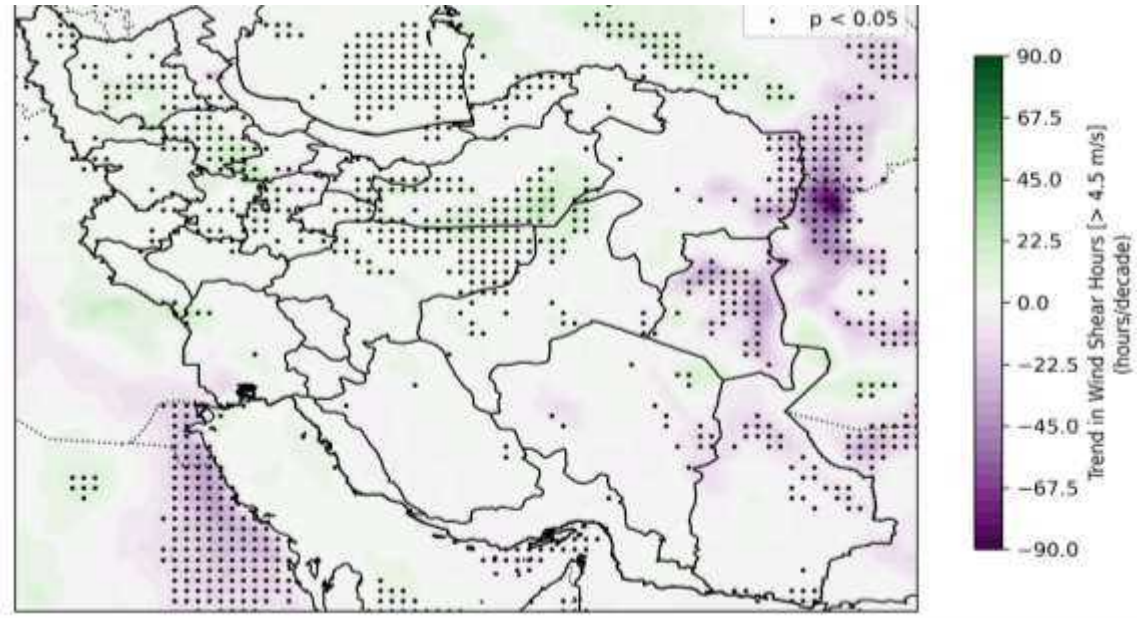
شکل ۳ می‌توان دریافت که شهرهای شمالی کشور از جمله رشت، ساری، گرگان و بجنورد طی ۴۵ سال گذشته تقریباً روند مشخصی نداشته‌اند و بدون تغییر قابل‌توجه باقی مانده‌اند. روند افزایشی معنی‌داری در برخی نواحی شهر تبریز با آهنگ حدود دو ساعت در هر دهه مشاهده می‌شود. همچنین، روند افزایشی نسبتاً منظم و پیوسته‌ای در برخی نواحی شهر زنجان با میزان تقریبی حدود ۸ ساعت در هر دهه مشاهده می‌شود. مشاهده می‌شود که شهرهای کرج و تهران بدون تغییر چشمگیری باقی مانده‌اند و روند مشخصی را نشان نمی‌دهد.

(الف) (ب)



(ج) (د)

شکل ۲- توزیع مکانیِ میانگین فصلی تعداد ساعت‌های همراه با مخاطره ناشی از چینش باد ترازپایین بر اساس داده‌های ساعتی ERA5 از ۱۹۷۹-۲۰۲۳.



شکل ۳- توزیع مکانی روند بلندمدت ساعت‌های همراه با چینش باد ترازپایین (محاسبه شده با استفاده از شیب معادلهٔ وایازش[109] بهنجارشدهٔ ۱۰ ساله). نقاط سیاه‌رنگ نشان‌دهندهٔ روند آماری معنی‌دار ($\mathbf{p-value < 0.05}$) بر اساس داده‌های ساعتی ERA5 از سال ۱۹۷۹ تا ۲۰۲۳ هستند.

۴. نتیجه‌گیری

در این مطالعه نقش چینش باد ترازپایین به‌عنوان یکی از مهم‌ترین پدیده‌های مخاطره‌آمیز در مراحل نشست و برخاست هواپیماها بررسی شده است. برای انجام این بررسی از داده‌های ساعتی ERA5 در یک دورهٔ چهل‌وپنج ساله از سال ۱۹۷۹ تا ۲۰۲۳ استفاده شده است. برای محاسبهٔ مؤلفه‌های مورد استفاده در این مطالعه مؤلفه‌های مداری و نصف‌النهاری بردار باد در نظر گرفته شده است. مقادیر آستانهٔ تعیین‌شده، تقریبی از شرایط هواشناختی معین است. علی‌رغم اینکه چنین تحلیل‌هایی مشمول تفسیر احتمالی بوده و ممکن است با عدم قطعیّت همراه باشد، این مطالعه دید کلی از اینکه چه زمانی

109 regression

و در چه مکانی، بیشترین احتمال رخداد مخاطره ویژه وجود دارد را فراهم می‌کند. این تحلیل، نتایجی را دربرداشت که مهم‌ترین آنها به شرح ذیل می‌باشد:.

LLWS در تابستان، در نواحی محدودی از شرق ایران دارای مقادیر بیشینه ناشی از بادهای ۱۲۰ روزه می‌باشد. همچنین، غرب استان خوزستان و بخش قابل‌توجهی از خلیج‌فارس نیز در این فصل با بیشینهٔ وقوع این مخاطره از انجایی که تحت تأثیر فعّالیّت دینامیکی باد شَمال تابستانی قرار دارند مواجه هستند. در مقابل، فصل‌های بهار و زمستان شرایطی نسبتاً مشابه از نظر توزیع مکانی تجربه می‌کنند. کمترین گستره‌ی مکانی این مخاطره در فصول پاییز و تابستان مشاهده شد.

همین‌طور روند بلندمدت LLWS در قسمت‌های عمده‌ای از تبریز، زنجان (شمال غرب) و نواحی جنوبی سمنان رو به افزایش است. به نظر می‌رسد این مخاطره در شرق کشور روندی کاهشی را تجربه می‌کنند.

منابع

تاج‌بخش، س. و مرادی، ا. (۱۳۸۱). نقش پدیده های جوی در بروز سوانح هوایی، دومین همایش ایمنی هوانوردی، تهران.

تاج‌بخش، س.، غفاریان، پ. و میرزایی، ا. (۲۰۱۰). روشی برای پیش‌بینی رخداد توفان‌های تندری با طرح دو بررسی موردی. فیزیک زمین و فضا، ۳۵(۴)، ۱۴۷-۱۶۶.

رزم زن، م. (۱۳۶۹). بررسی چینش قائم باد در تهران و برآورد آن از داده‌های سطحی. پایان نامه کارشناسی ارشد. مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.

علیجانی، ب. و کاویانی، م. (۱۳۹۵). مبانی آب و هواشناسی. چاپ نوزدهم، تهران، انتشارات سمت.

مرادی، م.، رضازاده، پ. و وظیفه، ا. (۱۳۹۳). بررسی موردی چینش قائم باد سطوح پایین در فرودگاه مهرآباد. پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، ۱۷، ۳۳-۴۶.

نصیرزاده، م. (۱۳۶۸). چینش قائم باد روی تهران. پایان نامه نهایی کارشناسی ارشد. مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران.

Allen, J. T., & Karoly, D. J. (2014). A climatology of Australian severe thunderstorm environments 1979–2011: inter-annual variability and ENSO influence. International Journal of Climatology, 34(1), 81-97.

Allen, J. T., Karoly, D. J., & Mills, G. A. (2011). A severe thunderstorm climatology for Australia and associated thunderstorm environments. Australian Meteorological and Oceanographic Journal, 61(3), 143.

Alizadeh-Choobari, O., Zawar-Reza, P., & Sturman, A. (2014). The “wind of 120 days” and dust storm activity over the Sistan Basin. Atmospheric research, 143, 328-341.

Arkell, R. E. (2000). Differentiating between types of wind shear in aviation forecasting. National Weather Digest, 24(3), 39-51.

Lei, T., Jin, C., & Qi, C. (2022). Spatio-temporal characteristics of hazardous weather affecting Chinese airports based on the ERA5/ERA5-land reanalysis dataset. Frontiers in Climate, 4, 835362.

Mylne, N.,.Boxall, K. (2007). Air Law (vol.1). oxford aviation training.
National Weather Service (2020). NATIONAL WEATHER SERVICE INSTRUCTION, 10-813.
Taszrek, M., Brissette, F. P., & Arsenault, R. (2020). Evaluation of the ERA5 reanalysis as a potential reference dataset for hydrological modelling over North America. Hydrology and Earth System Sciences, 24(5), 2527-2544.
Taszarek, M., Brooks, H. E., Czernecki, B., Szuster, P., & Fortuniak, K. (2018). Climatological aspects of convective parameters over Europe: A comparison of ERA-Interim and sounding data. Journal of Climate, 31(11), 4281-4308.
Taszarek, M., Kendzierski, S., & Pilguj, N. (2020). Hazardous weather affecting European airports: Climatological estimates of situations with limited visibility, thunderstorm, low-level wind shear and snowfall from ERA5. Weather and Climate Extremes, 28, 100243.
Whitney, J. W. (2006). Geology, water, and wind in the lower Helmand Basin, southern Afghanistan (No. 2006-5182).
Zhao, B., Duan, Y. H., Yu, H., & Du, B. (2006). A statistical analysis on the effect of vertical wind shear on tropical cyclone development. ACTA METEOROLOGICA SINICA-ENGLISH EDITION, 20(3), 383.
Yu, Y., Notaro, M., Kalashnikova, O. V., & Garay, M. J. (2016). Climatology of summer Shamal wind in the Middle East. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 121(1), 289-305.

The role of low level wind shear on aviation hazards in Iran

Azimeh Mohsenbeigi[1], Maryam Gharaylou[2], and Samaneh Sabetghadam[2]

MSc. student in Meteorology, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran
Associate Professor, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran

* Corresponding author: azimeh.beigi@ut.ac.ir

Abstract

Weather is one of the most important natural factors affecting the aviation industry. Although many details of climatic aspects and long-term changes in some basic meteorological variables such as temperature, wind, and precipitation have been investigated so far, a limited number of studies have focused on meteorological conditions affecting aviation. The present study analyzes the spatial and temporal variability and long-term trend of low-level wind shear (LLWS), which is one of the most important aviation hazards. In this regard, ERA5 reanalysis data from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) have been used to assess the meteorological conditions affecting low-level wind shear in the Iranian region. Also, the areas susceptible to low-level wind shear in Iran during the 45-year period from 1979-2023 are identified. The results showed that the areas located in the east and center of Iran and limited parts of the northwest and west of Khuzestan and a major part of the Persian Gulf are affected by the risk caused by the

low-level wind arrangement. LLWS has the lowest spatial extent in the autumn and summer seasons. However, in the summer, its maximum values were observed in limited areas of eastern Iran. This is mainly influenced by the activity of the 120-day Sistan winds. LLWS also occurs in the west of Khuzestan province and a significant part of the Persian Gulf in the same season. Similarly, the long-term trend of LLWS is increasing in major parts of Tabriz, Zanjan (northwest) and southern Semnan. This risk is experiencing a decreasing trend in the east of the country.

Keywords: low-level wind shear, ERA5, Iran

تحلیل عوامل مؤثر بر تاب‌آوری اجتماعی در مناطق متأثر از خشک شدن دریاچه ارومیه: بررسی نقش سیاست‌های آمایش سرزمین

سهند آذر[۱]

۱- دانشجوی دکتری رشته برنامه‌ریزی آمایش‌سرزمین، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه ارومیه

آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول : s.azar@urmia.ac.ir

چکیده

خشک‌شدن دریاچه ارومیه به‌عنوان یکی از بحرانی‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی ایران، پیامدهای گسترده‌ای بر جوامع محلی حوضه آبریز بر جای گذاشته است. این پژوهش با هدف تحلیل عوامل مؤثر بر تاب‌آوری اجتماعی در سکونتگاه‌های روستایی پیرامون دریاچه و بررسی نقش سیاست‌های آمایش سرزمین انجام شد. مطالعه حاضر از نوع کاربردی و با رویکرد تحلیلی–تبیینی است و داده‌ها از طریق پیمایش میدانی در میان ۳۸۴ خانوار روستایی گردآوری شد. ابزار گردآوری پرسشنامه محقق‌ساخته بر مبنای ابعاد تاب‌آوری اجتماعی (سرمایه اجتماعی، توان اقتصادی، مشارکت محلی و انسجام اجتماعی) و سیاست‌های آمایشی (مدیریت منابع آب، الگوی کشاورزی و خدمات زیربنایی) طراحی گردید. تحلیل عاملی اکتشافی ساختار ابعاد را تأیید و پایایی ابزار در دامنه‌ای مطلوب (α=0.74–0.86) گزارش شد. نتایج توصیفی نشان داد انسجام اجتماعی و سرمایه اجتماعی در سطح نسبتاً مطلوب قرار دارند، در حالی‌که توان اقتصادی و شاخص‌های مرتبط با حکمرانی آب پایین‌تر از میانگین ارزیابی شدند. آزمون‌های همبستگی و رگرسیون چندگانه نشان دادند مدیریت منابع آب قوی‌ترین اثر را بر تاب‌آوری اجتماعی دارد، سپس خدمات زیربنایی و الگوی کشاورزی در مراتب بعدی قرار گرفتند. این نتایج بیانگر آن است که تاب‌آوری اجتماعی در مناطق متأثر از بحران، بیش از هر چیز به اصلاح حکمرانی آب و هم‌زمان بهبود زیرساخت‌ها و معیشت جایگزین وابسته است. بر این اساس، بازتعریف سیاست‌های احیای دریاچه ارومیه به‌عنوان یک برنامه توسعه منطقه‌ای با محوریت تاب‌آوری اجتماعی ضروری به نظر می‌رسد.

کلید واژه‌ها: تاب‌آوری اجتماعی، دریاچه ارومیه، آمایش سرزمین، مدیریت منابع آب، توسعه روستایی.

مقدمه

بحران‌های محیطی، به‌ویژه بحران‌های ناشی از کمبود و تغییرات اقلیمی، یکی از جدی‌ترین تهدیدات پیش روی توسعه پایدار در قرن حاضر محسوب می‌شوند. در ایران، به عنوان کشوری در کمربند خشک و نیمه‌خشک، این بحران‌ها ابعاد

گسترده‌ای یافته‌اند. در این میان، بحران دریاچه ارومیه به مثابه یک نمونه بارز و هشداردهنده از تعامل پیچیده عوامل طبیعی و انسانی، توجه پژوهشگران و سیاست‌گذاران را به خود جلب کرده است. این دریاچه، که زمانی یکی از بزرگ‌ترین تالاب‌های شور جهان بود، طی دو دهه اخیر با کاهش شدید سطح آب و در نتیجه، خشک شدن بخش‌های وسیعی از خود مواجه شده است. پیامدهای این خشکیدگی، صرفاً به تخریب اکوسیستم و تهدید گونه‌های زیستی محدود نمی‌شود، بلکه ابعاد اجتماعی و اقتصادی عمیقی را بر جوامع محلی حوضه آبریز تحمیل کرده است (بارانی‌بسیان و همکاران، ۱۳۹۶). مهاجرت، افزایش نرخ بیکاری، تغییر الگوهای معیشتی از کشاورزی به مشاغل کاذب و گسترش فقر، تنها بخشی از این پیامدها هستند که ساختار اجتماعی منطقه را دستخوش تغییرات اساسی کرده‌اند (نیکجو و همکاران، ۱۳۹۶).

پاسخ‌گویی به این بحران‌ها نیازمند درک عمیقی از تاب‌آوری اجتماعی جوامع در معرض خطر است. تاب‌آوری اجتماعی، مفهومی است که به توانایی یک جامعه برای جذب، سازگاری، بازسازی و حتی تحول در برابر تنش‌ها و شوک‌های محیطی اشاره دارد (رحیمی و چوبینه، ۱۴۰۳). این مفهوم فراتر از مقاومت ساده در برابر بحران است و بر پویایی جامعه در جهت یافتن راه‌حل‌های خلاقانه و پایدار تأکید می‌کند. در حقیقت، سنجش تاب‌آوری اجتماعی به ما کمک می‌کند تا بفهمیم که چرا برخی جوامع در مواجهه با بحران‌ها فرو می‌پاشند، در حالی که برخی دیگر موفق به بقا و حتی شکوفایی می‌شوند. در این راستا، سیاست‌ها و برنامه‌ریزی‌های فضایی، به‌ویژه در چارچوب آمایش سرزمین، نقشی حیاتی در تعیین میزان تاب‌آوری اجتماعی ایفا می‌کنند. آمایش سرزمین، به عنوان یک فرایند راهبردی و بلندمدت، به دنبال توزیع بهینه فعالیت‌ها و جمعیت در فضا، مدیریت پایدار منابع و کاهش آسیب‌پذیری در برابر مخاطرات است (زیاری، ۱۳۹۵). با توجه به نقش محوری آمایش سرزمین در شکل‌دهی به ساختارهای فضایی و اجتماعی، این سؤال اساسی مطرح می‌شود که آیا برنامه‌های آمایشی موجود در حوضه آبریز دریاچه ارومیه، به تقویت یا تضعیف تاب‌آوری اجتماعی در این منطقه منجر شده‌اند؟

تاکنون، بسیاری از پژوهش‌ها در خصوص بحران دریاچه ارومیه بر ابعاد هیدرولوژیکی، اقلیمی و زیست‌محیطی متمرکز بوده‌اند. با وجود این، تحقیقاتی که به صورت کمی و با رویکرد میدانی به بررسی پیامدهای اجتماعی بحران و نقش سیاست‌های آمایشی در این پیامدها پرداخته‌اند، محدود است. این شکاف پژوهشی، نیاز به یک تحلیل عمیق و مستند را برجسته می‌سازد. از این رو، پژوهش حاضر بر این مبنا استوار است که بین متغیرهای مرتبط با سیاست‌های آمایش سرزمین (شامل مدیریت منابع آب، سیاست‌های توسعه کشاورزی، و توزیع خدمات زیربنایی) و سطح تاب‌آوری اجتماعی ساکنان حوضه آبریز دریاچه ارومیه، یک رابطه معنادار و قابل سنجش وجود دارد. به عبارت دقیق‌تر، این مطالعه قصد دارد با بهره‌گیری از داده‌های میدانی، تاب‌آوری اجتماعی را در ابعاد مختلف (مانند سرمایه اجتماعی، مشارکت مردمی و توانمندی اقتصادی) اندازه‌گیری کرده و با استفاده از روش تحلیل رگرسیون چندگانه، تأثیر متغیرهای آمایشی بر آن را مورد بررسی قرار دهد.

ضرورت این پژوهش از چند منظر قابل توجیه است. اولاً، یافته‌های این تحقیق می‌تواند برای مدیران و برنامه‌ریزان در تصمیم‌گیری‌هایشان مورد استفاده قرار بگیرد و سیاست‌هایی را اتخاذ کنند که به طور مستقیم بر افزایش تاب‌آوری جامعه در برابر بحران‌های مشابه مؤثر است. ثانیاً، با شناسایی عوامل کلیدی مؤثر بر تاب‌آوری، می‌توان رویکردهای آمایشی آینده را به گونه‌ای طراحی کرد که نه تنها به پایداری محیطی، بلکه به پایداری اجتماعی نیز توجه کنند. در نهایت، این پژوهش فراتر از یک تحلیل توصیفی، به دنبال تبیین برای درک عمیق‌تر پویایی‌های اجتماعی در مواجهه با بحران‌های محیطی است تا راه را برای اقدامات عملی و مؤثر هموار می‌سازد.

ادبیات نظری

۱) مفهوم و چارچوب‌های نظری تاب‌آوری اجتماعی

تاب‌آوری اجتماعی در ادبیات جهانی به‌عنوان یک فرایند پویا تعریف می‌شود که به جوامع امکان می‌دهد در برابر شوک‌ها و بحران‌ها مقاومت کرده و مسیرهای جدیدی برای سازگاری بیابند. در چارچوب‌های کلاسیک، چهار بعد اصلی برای سنجش تاب‌آوری اجتماعی مطرح است: سرمایه اقتصادی، سرمایه اجتماعی، اطلاعات و ارتباطات، و حکمرانی/رهبری (Norris et al., 2008). از منظر نظری، پیوند میان تاب‌آوری اجتماعی و تاب‌آوری بوم‌شناختی اهمیت دارد. هرچند تاب‌آوری اکوسیستم می‌تواند زیربنای معیشت پایدار باشد، اما این دو الزاماً همپوشان نیستند و روابط قدرت، سیاست‌های توسعه و نهادهای محلی بر آن‌ها میانجی‌گری می‌کنند (Adger, 2000). علاوه بر این، شاخص‌هایی همچون نمایه آسیب‌پذیری اجتماعی (SoVI) ابزار مهمی برای سنجش ابعاد آسیب‌پذیری به شمار می‌روند و در کنار شاخص‌های تاب‌آوری به تحلیل جوامع در معرض بحران‌های محیطی کمک می‌کنند (Cutter et al., 2003). مرورهای جدید نیز بر اهمیت عواملی چون آگاهی محلی، شبکه‌های اجتماعی، سلامت عمومی، حکمرانی، سرمایه‌گذاری اقتصادی و انسجام اجتماعی به‌عنوان ارکان اصلی تاب‌آوری تأکید کرده‌اند (Patel et al., 2017).

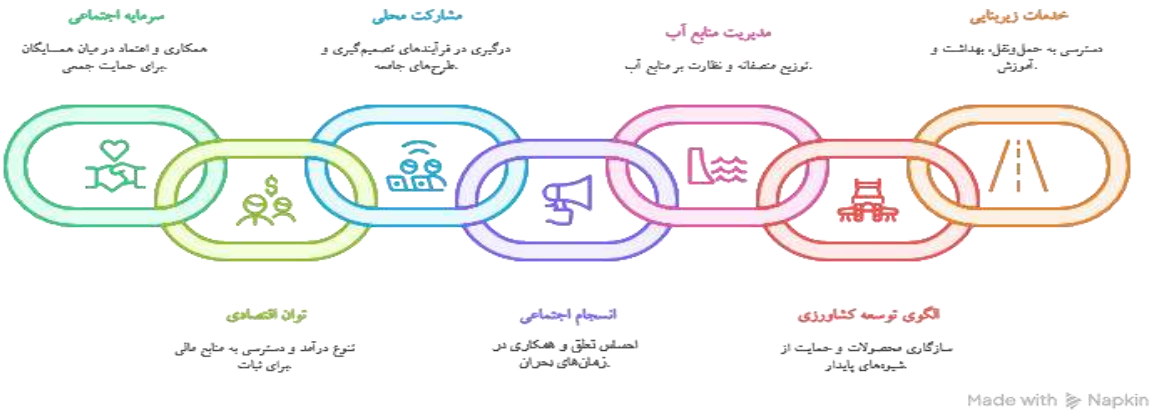
۲) خشک شدن دریاچه ارومیه و پیامدهای اجتماعی–اقتصادی

خشک شدن دریاچه ارومیه یکی از شاخص‌ترین نمونه‌های بحران‌های زیست‌محیطی ایران است که ریشه در ترکیب تغییرات اقلیمی و سیاست‌های ناپایدار توسعه کشاورزی دارد (Schmidt, 2021). تحلیل‌های سیاست‌پژوهی اخیر نشان داده‌اند که بسیاری از برنامه‌های احیای دریاچه، به‌ویژه «برنامه احیای دریاچه ارومیه (ULRP)»، با غلبه اقدامات کم‌هزینه و سیاسی و غفلت از اقدامات پرهزینه اما مؤثر (مانند کاهش سطح زیرکشت و آیش مزارع) همراه بوده‌اند (Mirnezami et al., 2024). مطالعه کمیته ملی احیای دریاچه ارومیه (Salimi et al., 2019) نیز بیانگر آن است که کمبود بودجه واقعی، تعارض

سیاست‌های ملی کشاورزی با اهداف احیا، و نبود مسئولیت‌پذیری استانی مهم‌ترین دلایل ناکامی در اجرای برنامه‌های احیا بوده‌اند. پیامدهای اجتماعی این بحران گسترده‌اند: از کاهش کیفیت زندگی به دلیل بیکاری و ناامنی معیشتی تا مهاجرت اجباری، تضعیف خدمات عمومی و تشدید فقر روستایی. از منظر زیست‌محیطی، افزایش رخدادهای گردوغبار نمکی، شور شدن خاک و افت آبخوان‌ها بر سلامت و امنیت غذایی اثرات جدی داشته است (Schmidt, 2021؛ Majnouni Toutakhaneh et al., 2018). افزون بر آن، مطالعات اخیر بر افزایش خطر بیماری‌های تنفسی و قلبی–عروقی در میان ساکنان اطراف دریاچه تأکید کرده‌اند (Rezapour et al., 2024).

۳) شواهد تاب‌آوری اجتماعی در مناطق پیرامون دریاچه

پژوهش‌های میدانی در سطح روستاهای پیرامون دریاچه نشان می‌دهند که ابعاد تاب‌آوری بسیار ناهمگن‌اند. در یک مطالعه پیمایشی روی ۳۷۰ خانوار از ۴۲ روستا، مشخص شد که تاب‌آوری اقتصادی و اجتماعی در نواحی شرق و جنوب بالاتر است، در حالی که تاب‌آوری محیطی در نواحی شمال و غرب وضعیت بهتری دارد (Majnouni Toutakhaneh et al., 2018). این ناهمگنی فضایی نشان می‌دهد که سیاست‌گذاری باید منطقه‌ای و متناسب با ویژگی‌های محلی طراحی شود. از سوی دیگر، بررسی شبکه نهادی احیای دریاچه ارومیه نشان داده که چگالی و تقارن روابط نهادی در موضوعات حیاتی مانند الگوی کشت و معیشت پایین است؛ به عبارتی نهادهای کلیدی هنوز نتوانسته‌اند همکاری مؤثر و هماهنگ برای ارتقای تاب‌آوری اجتماعی داشته باشند (Salimi et al., 2019).



شکل1 . چارچوب اجتماع تاب‌آور

ماخذ: Afkhami et al.,2025; Raju & Samah.,2025; Lipscomb et al.,2025

۴) نقش سیاست‌های آمایش سرزمین

«سند ملی آمایش سرزمین» مصوب ۱۳۹۹، به‌عنوان بالاترین سند فضایی کشور، چارچوبی برای ساماندهی جمعیت و فعالیت‌ها بر اساس ظرفیت‌های محیطی ارائه می‌دهد. در این سند بر مدیریت یکپارچه حوضه‌های آبخیز، انطباق فعالیت‌های اقتصادی با «آب قابل برنامه‌ریزی»، تدوین الگوی کشت ملی–منطقه‌ای و الزام به پایش مکانی طرح‌ها تأکید شده است (مرکز پژوهش‌های توسعه و آینده‌نگری، ۱۳۹۹). این سیاست‌ها در صورت اجرا می‌توانند به‌طور مستقیم ابعاد مختلف تاب‌آوری اجتماعی را تقویت کنند. برای نمونه: در بُعد اقتصادی، با تنوع‌بخشی به فعالیت‌های روستایی (گردشگری محیط‌محور، صنایع کم‌آب‌بر) می‌توان وابستگی به کشاورزی پرمصرف را کاهش داد. در بُعد اجتماعی، با طراحی سازوکارهای مشارکت محلی (دهیاری‌ها، شوراها، سمن‌ها) می‌توان انسجام نهادی و اعتماد اجتماعی را افزایش داد. در بُعد اطلاعات و ارتباطات، نهادینه‌سازی سامانه‌های پایش و «حسابرسی آب» (WA+) می‌تواند شفافیت و پاسخگویی را ارتقا دهد (FAO, 2022). در بُعد حکمرانی، هماهنگی عمودی و افقی میان وزارتخانه‌ها، استانداری‌ها و نهادهای محلی می‌تواند از تضاد منافع در اجرای طرح‌ها جلوگیری کند (Salimi et al., 2019). در بُعد سلامت عمومی، ادغام ارزیابی‌های سلامت در طرح‌های آمایشی می‌تواند آثار خشکی دریاچه بر بیماری‌های قلبی–تنفسی را به‌موقع شناسایی و کاهش دهد (Rezapour et al., 2024).



شکل2 . نقش سیاست‌های آمایش سرزمین در تاب‌آوری اجتماعی

با تلفیق یافته‌های نظری و تجربی، می‌توان مدلی مفهومی ترسیم کرد که در آن سیاست‌های آمایشی به‌عنوان اهرم تقویت ظرفیت‌های تاب‌آوری اجتماعی عمل می‌کنند. این سیاست‌ها از طریق تنوع‌بخشی معیشت، تقویت مشارکت، شفاف‌سازی

داده‌ها، بهبود حکمرانی و ارتقای سلامت عمومی، توان جوامع محلی را برای سازگاری با بحران خشک شدن دریاچه افزایش می‌دهند. ادبیات نشان می‌دهد که بدون بازنگری نهادی و فضایی، ارتقای تاب‌آوری اجتماعی در مناطق پیرامون دریاچه ارومیه دشوار خواهد بود. سیاست‌های موجود، برداشت‌های غیرمجاز آب و توسعه بی‌رویه کشاورزی باید هم‌زمان با بسته‌های معیشتی جایگزین و جبران منصفانه اصلاح شوند (Mirnezami et al., 2024).

روش تحقیق

پژوهش حاضر از نظر هدف، کاربردی است، زیرا در پی ارائه راه‌حل‌های عملی برای مسئله کاهش تاب‌آوری اجتماعی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه می‌باشد. از حیث ماهیت، مطالعه حاضر یک تحقیق کمی با رویکرد تحلیلی–تبیینی است که به کمک داده‌های آماری، روابط علّی میان متغیرهای مستقل و وابسته را بررسی می‌کند. چارچوب نظری تحقیق بر مبنای ادبیات تاب‌آوری اجتماعی و اصول آمایش سرزمین بنا شده است. در این چارچوب، تاب‌آوری اجتماعی به‌عنوان متغیر وابسته تعریف می‌شود و نشان‌دهنده ظرفیت جوامع محلی در مواجهه با تنش‌های محیطی است؛ در حالی که متغیرهای مستقل شامل سیاست‌ها و اقدامات آمایشی (مانند مدیریت منابع آب، الگوهای توسعه کشاورزی و سطح دسترسی به خدمات زیربنایی) در نظر گرفته می‌شوند. این رویکرد امکان می‌دهد که پژوهش، فراتر از توصیف وضع موجود، به تبیین چرایی و چگونگی تأثیر عوامل آمایشی بر تاب‌آوری اجتماعی بپردازد. جامعه آماری تحقیق شامل سرپرستان خانوارهای روستایی در محدوده حوضه آبریز دریاچه ارومیه است که به‌طور مستقیم از پیامدهای خشک‌شدن دریاچه متأثر شده‌اند. برای تعیین حجم نمونه از فرمول کوکران استفاده می‌شود تا نمونه‌ای معتبر با سطح اطمینان کافی حاصل گردد. روش نمونه‌گیری به‌صورت تصادفی طبقه‌ای خواهد بود؛ بدین معنا که ابتدا شهرستان‌های واقع در حوضه به‌عنوان طبقه‌ها مشخص شده، سپس از هر طبقه تعدادی روستا به‌طور تصادفی انتخاب می‌شود. در نهایت، از میان خانوارهای هر روستا، نمونه‌ها به روش تصادفی ساده گزینش می‌شوند.

ابزار گردآوری داده‌ها پرسشنامه محقق‌ساخته است که بر مبنای شاخص‌های تاب‌آوری اجتماعی و اصول آمایشی طراحی شده و با طیف لیکرت پنج‌گزینه‌ای (از کاملاً مخالف تا کاملاً موافق) پاسخ داده می‌شود. تاب‌آوری اجتماعی از طریق مؤلفه‌هایی چون سرمایه اجتماعی، توان اقتصادی، مشارکت محلی و انسجام اجتماعی سنجیده می‌شود. متغیرهای مستقل (عوامل آمایشی) نیز شامل شاخص‌هایی در خصوص مدیریت منابع آب، الگوهای کشت غالب و دسترسی به خدمات زیربنایی خواهند بود. برای تأیید روایی محتوایی، پرسشنامه در اختیار اساتید و متخصصان حوزه جغرافیا و برنامه‌ریزی قرار می‌گیرد. همچنین، برای بررسی پایایی، یک مطالعه مقدماتی روی ۳۰ نفر از جامعه آماری انجام شده و آلفای کرونباخ محاسبه

می‌گردد. روش تحلیل داده‌ها شامل دو بخش است: آمار توصیفی (میانگین، انحراف معیار و فراوانی) برای توصیف ویژگی‌های جمعیت نمونه و وضعیت متغیرهای اصلی. آمار استنباطی برای آزمون فرضیه‌ها. ابتدا از آزمون ضریب همبستگی پیرسون برای بررسی رابطه دو متغیر استفاده می‌شود. سپس جهت تحلیل تأثیر همزمان چندین متغیر مستقل بر تاب‌آوری اجتماعی، از رگرسیون چندگانه خطی استفاده خواهد شد. برای اطمینان از اعتبار مدل، آزمون‌هایی مانند کولموگروف–اسمیرنوف (بررسی نرمال بودن داده‌ها)، آزمون همخطی VIF و آزمون دوربین–واتسون (بررسی استقلال خطاها) نیز به‌کار گرفته می‌شود. این رویکرد یکپارچه به پژوهشگر امکان می‌دهد تا ضمن شناسایی میزان و جهت اثرگذاری سیاست‌های آمایشی بر تاب‌آوری اجتماعی، قدرت پیش‌بینی هریک از عوامل را به‌صورت کمی مشخص کند. بدین ترتیب نتایج تحقیق می‌تواند مبنای علمی و عملی برای برنامه‌ریزی توسعه‌ای و تصمیم‌سازی‌های مرتبط با مدیریت بحران در حوضه آبریز دریاچه ارومیه قرار گیرد.

جدول2 . ابعاد، مولفه‌ها و گویه‌های مورد مطالعه در تحقیق

توضیح کوتاه	متن گویه	کُد گویه	مؤلفه	بُعد اصلی
میزان همکاری و پیوند افقی بین اهالی	همسایگان در کارهای جمعی (مانند آبیاری، مرمت راه یا قنات) با هم همکاری می‌کنند.	SC1	سرمایه اجتماعی	تاب‌آوری اجتماعی
اعتماد و حمایت اجتماعی در مواقع بحران	در صورت بروز مشکل می‌توان روی کمک همسایه‌ها حساب کرد.	SC2		
کارآمدی نهادهای محلی در ارتباطات اجتماعی	شورا یا دهیاری محلی کانال مؤثری برای بیان مطالبات است.	SC3		
تنوع معیشتی و کاهش ریسک اقتصادی	منابع درآمدی خانوار متنوع است (بیش از یک فعالیت).	EC1	توان اقتصادی	
امکان جبران خسارت یا سرمایه‌گذاری	دسترسی به وام یا تسهیلات مالی وجود دارد.	EC2		
پایداری اقتصادی در برابر شوک‌ها	درآمد خانوار در برابر نوسانات آب و بازار پایدار است.	EC3		

سطح درگیری در فرآیند تصمیم‌سازی	در جلسات تصمیم‌گیری محلی (آب، کشاورزی) شرکت می‌کنم.	PR1	مشارکت محلی	
همراهی در اجرای سیاست‌های محلی	در طرح‌های صرفه‌جویی یا تغییر الگوی کشت مشارکت داشته‌ام.	PR2		
هویت و وابستگی مکانی	احساس تعلق بالایی به روستا دارم.	CO1	انسجام اجتماعی	
انسجام و همکاری جمعی در شرایط بحرانی	در زمان بحران، همبستگی و همکاری در روستا افزایش می‌یابد.	CO2		
عدالت و شفافیت در تخصیص آب	توزیع آب کشاورزی منصفانه و شفاف است.	WM1	مدیریت منابع آب	عوامل آمایشی
کنترل بهره‌برداری از منابع	نظارت بر برداشت آب (سطحی و زیرزمینی) مؤثر است.	WM2		
میزان انتقال دانش و تکنیک‌های نوین	آموزش و ترویج روش‌های آبیاری نوین کافی است.	WM3		
تناسب عرضه آب با تقاضای کشاورزی	زمان‌بندی تحویل آب متناسب با نیاز محصول است.	WM4		
سازگاری نوع محصول با منابع آبی	محصولات رایج با شرایط کم‌آبی منطقه سازگارند.	AG1	الگوی توسعه کشاورزی	
حمایت نهادی برای تغییر الگو	مشوق‌هایی برای تغییر به محصولات کم‌آب‌بر وجود دارد.	AG2		
دسترسی به زیرساخت‌های تغییر کشت	خدمات فنی و نهاده‌ها برای تغییر الگوی کشت در دسترس است.	AG3		
زیرساخت حمل‌ونقل و بازاریابی	راه مناسب برای دسترسی به بازار محصولات وجود دارد.	IN1	خدمات زیربنایی	
وضعیت خدمات سلامت	دسترسی کافی به مراکز بهداشتی–درمانی دارم.	IN2		
دسترسی به آموزش و مهارت‌های تخصصی	دسترسی به خدمات آموزشی و ترویجی کشاورزی کافی است.	IN3		

یافته‌ها

ویژگی‌های جامعه و نمونه آماری

جامعه آماری این پژوهش را کلیه خانوارهای روستایی ساکن در حوضه آبریز دریاچه ارومیه تشکیل می‌دهند که به‌طور مستقیم از پیامدهای زیست‌محیطی و اجتماعی خشک‌شدن دریاچه متأثر شده‌اند. بر اساس نتایج سرشماری عمومی نفوس و مسکن سال ۱۳۹۵ مرکز آمار ایران، جمعیت روستایی این حوضه در استان‌های آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی و کردستان بالغ بر چند صد هزار خانوار برآورد می‌شود. از این میان، با استفاده از فرمول کوکران و سطح اطمینان ۹۵ درصد، حجم نمونه ۳۸۴ خانوار تعیین گردید. نمونه‌ها به روش تصادفی طبقه‌ای متناسب انتخاب شدند؛ به این معنا که ابتدا شهرستان‌های واقع در حوضه به‌عنوان طبقات اصلی در نظر گرفته شدند و سهم هر شهرستان از کل نمونه بر اساس نسبت جمعیت روستایی آن شهرستان تعیین شد. در هر شهرستان، چند روستا به‌صورت تصادفی انتخاب و سپس از میان خانوارهای روستای منتخب، افراد نمونه به روش تصادفی ساده گزینش گردیدند. توزیع ویژگی‌های فردی و خانواری پاسخگویان نشان داد که اکثریت سرپرستان خانوار را مردان تشکیل می‌دهند و میانگین سنی آن‌ها در بازه میانسالی قرار دارد. از حیث سطح تحصیلات، بیشتر پاسخگویان دارای تحصیلات ابتدایی و راهنمایی بودند و سهم کمتری از آن‌ها تحصیلات متوسطه و عالی داشتند. همچنین، الگوی معیشتی خانوارها نشان داد که کشاورزی و دامداری همچنان فعالیت اصلی روستاییان محسوب می‌شود و وابستگی بالای این معیشت به منابع آب، آسیب‌پذیری آن‌ها را در برابر بحران خشکی دریاچه افزایش داده است. اعتبار عاملی (EFA) و بارهای نمونه نشان می‌دهد که ساختار نظری پژوهش به‌خوبی در داده‌ها بازتاب یافته است. این جدول حاصل تحلیل عاملی اکتشافی با روش مؤلفه‌های اصلی و چرخش Varimax است که پس از تأیید کفایت نمونه‌گیری (KMO=0.872)و معناداری آزمون بارتلت ($p<0.001p<0.001p<0.001$) انجام شد. در نتیجه هفت مؤلفه استخراج شد که ۶۸.۴ درصد از واریانس کل را تبیین کردند. بارهای عاملی همگی بالاتر از ۰.۴۰ بوده و هر گویه بر عامل مورد انتظار خود قرار گرفت. تحلیل بارها نشان داد قوی‌ترین انسجام در بعد «مدیریت منابع آب» دیده می‌شود (۰.۶۴—۰.۸۱)؛ این موضوع نشان می‌دهد برداشت، توزیع و آموزش مصرف آب برای پاسخگویان یک ساختار ادراکی یکپارچه دارد. در مقابل، ابعاد دوگویه‌ای مانند «انسجام اجتماعی» و «مشارکت محلی» هرچند بارهای کافی (۰.۵۵—۰.۷۴) داشتند، اما به‌لحاظ پایایی بالقوه شکننده‌تر هستند و این نکته به‌عنوان محدودیت ابزار قابل ذکر است. بارهای بالای «توان اقتصادی» (۰.۶۲—۰.۷۹) نیز نشان می‌دهد شاخص‌های تنوع درآمد و دسترسی به تسهیلات مالی باهم هم‌افزایی بالایی دارند و به‌درستی ظرفیت اقتصادی را نمایندگی می‌کنند.

نکته کلیدی این است که ساختار ساده و نبود بارهای متقاطع نشان می‌دهد ابعاد اجتماعی و آمایشی به‌خوبی از هم تفکیک می‌شوند. به بیان دیگر، جامعه مورد مطالعه میان «سرمایه اجتماعی» و «مدیریت منابع آب» یا میان «انسجام اجتماعی» و

«خدمات زیربنایی» مرزبندی ادراکی قائل است. این کیفیت بالای ساختاری باعث می‌شود نتایج رگرسیونی بعدی بر پایه ابزاری معتبر بنا شود. مهم‌تر اینکه، قوی‌ترین سیگنال اندازه‌گیری در بعد «مدیریت منابع آب» ظاهر شد، که هم از نظر آماری و هم نظری تأیید می‌کند نقطه گره‌ای تاب‌آوری اجتماعی در مناطق متأثر از خشک شدن دریاچه ارومیه، سیاست‌ها و شیوه‌های حکمرانی آب است.

جدول ۳. خلاصه اعتبار عاملی (EFA) و بارهای نمونه

مؤلفه (بُعد)	نمونه گویه‌ها	دامنه بار عاملی
سرمایه/شبکه اجتماعی	SC1-SC3	۰.۷۶–۰.۵۸
توان اقتصادی	EC1-EC3	۰.۷۹–۰.۶۲
مشارکت محلی	PR1-PR2	۰.۷۲–۰.۵۵
انسجام/هویت	CO1-CO2	۰.۷۴–۰.۶۰
مدیریت منابع آب	WM1-WM4	۰.۸۱–۰.۶۴
الگوی کشاورزی	AG1-AG3	۰.۷۷–۰.۵۹
خدمات زیربنایی	IN1-IN3	۰.۷۸–۰.۶۱

جدول پایایی ابعاد (Cronbach’s α) و شاخص‌های کمکی در واقع آزمونی برای سنجش ثبات درونی گویه‌هاست و نشان می‌دهد که هر بعد تا چه حد با مجموعه‌ای منسجم از پرسش‌ها اندازه‌گیری شده است. در این پژوهش دامنه آلفا بین ۰.۷۴ تا ۰.۸۶ گزارش شد؛ این یعنی همه ابعاد از حداقل معیار پذیرفتنی (۰.۷۰) بالاترند و می‌توانند نتایج قابل اتکایی تولید کنند. ابعادی مانند «مدیریت منابع آب (α=0.86) «و «سرمایه اجتماعی (α=0.83) «بالاترین پایایی را نشان داده‌اند. این مسئله دو پیام مهم دارد: نخست آنکه پاسخگویان درک مشترک و ثابتی از عدالت توزیع آب، نظارت و آموزش مصرف آب دارند؛ دوم اینکه اعتماد و همکاری اجتماعی نیز سازه‌ای است که گویه‌های مختلف آن در یک راستا هم‌افزایی می‌کنند. به عبارت دیگر، هم بعد نهادی–حکمرانی و هم بعد اجتماعی–ارتباطی در ابزار پژوهش بیشترین انسجام را دارند. در سوی دیگر، ابعاد دوگویه‌ای مثل «مشارکت محلی (α=0.74) «و «انسجام اجتماعی (α=0.78) «در مرز پایایی قابل قبول قرار دارند. این مقدار نشان می‌دهد که اگرچه گویه‌های انتخابی توانسته‌اند مفهوم مورد نظر را پوشش دهند، اما از نظر روش‌شناختی مقیاس‌های کوتاه‌تر همیشه خطر کاهش ثبات را دارند. اضافه‌کردن یک گویه جدید در نسخه‌های آتی پرسشنامه می‌تواند این مشکل را تعدیل کند. دامنه همبستگی آیتم–کل نیز بین ۰.۳۸ تا ۰.۷۲ بوده است که همگرایی درونی قابل قبول را نشان می‌دهد. نکته مهم اینجاست که در هیچ بعدی α» در صورت حذف آیتم» به‌طور چشمگیر بالاتر

از مقدار اصلی نشده است؛ بنابراین همه گویه‌ها در انسجام مقیاس نقش دارند و حذف هیچ‌کدام ضروری نیست. به‌طور کلی، تحلیل جدول پایایی ابعاد تأیید می‌کند که ابزار پژوهش از ثبات و قابلیت اعتماد مناسبی برخوردار است. بالاتر بودن پایایی در ابعاد نهادی و اجتماعی نسبت به ابعاد اقتصادی و مشارکتی همسو با شواهد میدانی است؛ یعنی جامعه روستایی در حوضه ارومیه شبکه‌های اجتماعی و درک مشترک از مدیریت آب را انسجام‌یافته‌تر تجربه می‌کند، اما ابعاد مشارکت رسمی و توان اقتصادی همچنان شکننده‌تر و کم‌ثبات‌ترند.

جدول ۴.پایایی ابعاد (Cronbach’s α) و شاخص‌های کمکی

بُعد	تعداد گویه	کرونباخα	همبستگی آیتم–کل (دامنه)	در صورت حذف بدترین آیتم α
سرمایه/شبکه اجتماعی	۳	۰.۸۳	۰.۶۸–۰.۴۲	۰.۸۱
توان اقتصادی	۳	۰.۸۱	۰.۶۳–۰.۳۹	۰.۷۹
مشارکت محلی	۲	۰.۷۴	۰.۵۷–۰.۴۶	۰.۷۳
انسجام/هویت	۲	۰.۷۸	۰.۶۱–۰.۵۰	۰.۷۷
مدیریت منابع آب	۴	۰.۸۶	۰.۷۲–۰.۴۴	۰.۸۴
الگوی کشاورزی	۳	۰.۸۰	۰.۶۶–۰.۳۸	۰.۷۸
خدمات زیربنایی	۳	۰.۸۲	۰.۶۴–۰.۴۱	۰.۸۰

جدول آمار توصیفی و آزمون نرمال‌بودن ابعاد تصویر دقیقی از وضعیت متغیرهای اصلی در جامعه آماری ارائه می‌دهد. میانگین‌ها (M) و انحراف معیارها (SD) نخستین شاخص‌هایی‌اند که نشان می‌دهند هر بُعد در چه سطحی قرار دارد. در این پژوهش، «انسجام اجتماعی» با میانگین ۳.۳۹ بالاترین مقدار را داشته است؛ این بدان معناست که پیوندهای اجتماعی، احساس تعلق و همبستگی در شرایط بحرانی هنوز در روستاهای پیرامون دریاچه ارومیه نسبتاً قوی باقی مانده‌اند. در مقابل، «توان اقتصادی» با میانگین ۲.۷۲ پایین‌ترین مقدار را نشان می‌دهد و این واقعیت را تأیید می‌کند که شکنندگی معیشتی، کمبود تنوع درآمدی و آسیب‌پذیری مالی از مهم‌ترین موانع تاب‌آوری اجتماعی در این منطقه هستند. سایر ابعاد، مانند «سرمایه اجتماعی» (۳.۱۵) و «مشارکت محلی» (۲.۸۸)، در سطح متوسط قرار گرفته‌اند که نشان می‌دهد اعتماد و همکاری در سطح فردی و غیررسمی تا حدی وجود دارد، اما مشارکت سازمان‌یافته و نهادمند در طرح‌ها و تصمیمات توسعه‌ای هنوز ضعیف است.

در میان عوامل آمایشی نیز الگوی مشابهی دیده می‌شود. «خدمات زیربنایی» با میانگین ۲.۹۶ در سطح نسبتاً بهتر قرار دارد و بیانگر آن است که دسترسی نسبی به راه، بازار و خدمات پایه وجود دارد. اما «مدیریت منابع آب» با میانگین ۲.۶۷

و «الگوی کشاورزی» با میانگین ۲.۸۵ در مرز پایین طیف قرار دارند. این نتایج نشان می‌دهد حکمرانی آب، توزیع منصفانه منابع و سازگاری محصولات با کم‌آبی همچنان از ضعف‌های اصلی سیاست‌های آمایشی در حوضه ارومیه محسوب می‌شوند. انحراف معیارها در بازه ۰.۷۹ تا ۰.۹۰ قرار گرفته‌اند که نشان‌دهنده پراکندگی متوسط پاسخ‌هاست؛ به عبارت دیگر، اجماع نسبی در میان پاسخگویان وجود دارد اما اختلاف نظر هم در حدی محسوس دیده می‌شود، به‌ویژه در ابعاد اقتصادی و مدیریتی که تنوع تجربه‌های معیشتی و دسترسی به منابع بیشتر است.

از منظر نرمال‌بودن، آزمون کولموگروف–اسمیرنوف برای برخی ابعاد (توان اقتصادی و مدیریت منابع آب) معنادار شد ($p<0.05$)که ظاهراً انحراف از توزیع نرمال را نشان می‌دهد. با این حال شاخص‌های چولگی و کشیدگی برای همه ابعاد در بازه قابل قبول |Skewness|<1 و |Kurtosis|<1) قرار دارند و همین موضوع در کنار حجم نمونه بزرگ (N=384) توجیه کافی برای استفاده از آزمون‌های پارامتریک مانند رگرسیون را فراهم می‌کند. در صورت لزوم، می‌توان از برآوردگرهای مقاوم برای خطاهای استاندارد استفاده کرد، اما نیاز به تبدیل نمرات یا روش‌های غیرپارامتریک احساس نمی‌شود. به‌طور کلی، تحلیل جدول نشان می‌دهد که جامعه مورد مطالعه از نظر اجتماعی همبسته و از نظر اقتصادی شکننده است، و این همان شکافی است که سیاست‌های آمایشی ناکارآمد در مدیریت آب و کشاورزی آن را تشدید کرده‌اند. بنابراین، نتایج توصیفی همسو با چارچوب نظری پژوهش تأکید می‌کنند که مسیر ارتقای تاب‌آوری اجتماعی در حوضه ارومیه، بیش از هر چیز از اصلاح حکمرانی منابع آب و حمایت از معیشت اقتصادی می‌گذرد.

جدول ۵.آمار توصیفی و آزمون نرمال‌بودن ابعاد (لیکرت ۵-۱)

بُعد	M	SD	چولگی	کشیدگی	K–S (Z)	p
سرمایه/شبکه اجتماعی	۳.۱۵	۰.۸۱	-۰.۱۸	-۰.۴۲	۱.۲۱	۰.۱۰
توان اقتصادی	۲.۷۲	۰.۸۸	۰.۲۱	-۰.۳۱	۱.۴۳	*۰.۰۳
مشارکت محلی	۲.۸۸	۰.۸۲	-۰.۰۷	-۰.۲۸	۱.۱۷	۰.۱۳
انسجام/هویت	۳.۳۹	۰.۷۹	-۰.۲۴	-۰.۳۶	۰.۹۸	۰.۲۸
مدیریت منابع آب	۲.۶۷	۰.۹۰	۰.۱۵	-۰.۳۳	۱.۳۹	*۰.۰۴
الگوی کشاورزی	۲.۸۵	۰.۸۶	۰.۰۵	-۰.۳۵	۱.۱۲	۰.۱۷
خدمات زیربنایی	۲.۹۶	۰.۸۴	-۰.۰۹	-۰.۲۹	۱.۰۳	۰.۲۳

جدول هم‌بستگی پیرسون نشان می‌دهد که رابطه بین شاخص‌های آمایشی و تاب‌آوری اجتماعی چگونه است و تا چه حد این عوامل می‌توانند به‌صورت مستقیم در ارتقای ظرفیت‌های اجتماعی نقش داشته باشند. ضرایب محاسبه‌شده همگی مثبت و معنادار هستند و این مسئله از نظر آماری به آن معناست که با بهبود سیاست‌های آمایشی، سطح تاب‌آوری اجتماعی

نیز افزایش می‌یابد. قوی‌ترین رابطه در این جدول بین «مدیریت منابع آب» و تاب‌آوری اجتماعی با ضریب ۰.۵۲ و سطح معناداری $p<0.01p<0.01p<0.01$ گزارش شده است. این یافته تأیید می‌کند که درک پاسخگویان از عدالت در توزیع آب، نظارت بر برداشت‌ها و آموزش روش‌های آبیاری، بیشترین هم‌پوشانی را با احساس توانمندی اجتماعی و انسجام محلی دارد. به بیان دیگر، آب در این حوضه نه‌تنها منبع معیشتی بلکه عامل پیوند اجتماعی است و ضعف در مدیریت آن مستقیماً تاب‌آوری جامعه را تضعیف می‌کند. در رتبه دوم «خدمات زیربنایی» با ضریب ۰.۴۷ قرار دارد. این مقدار نسبتاً بالا نشان می‌دهد که وجود راه‌های ارتباطی، دسترسی به خدمات بهداشتی و آموزشی و دسترسی به بازار، همگی به‌طور محسوسی اعتماد، مشارکت و توان اقتصادی روستاییان را تقویت می‌کنند. در واقع، خدمات زیربنایی همان بستری است که شبکه‌های اجتماعی و اقتصادی در آن پایدار می‌مانند. «الگوی کشاورزی» نیز همبستگی ۰.۴۳ با تاب‌آوری اجتماعی دارد. اگرچه این ضریب از دو شاخص قبلی کمتر است، اما همچنان قابل توجه و معنادار است. این نتیجه نشان می‌دهد که هر چه کشت محصولات با شرایط کم‌آبی سازگارتر شود و مشوق‌های تغییر الگوی کشت در دسترس باشد، جوامع روستایی توان بیشتری برای انطباق با بحران‌ها پیدا می‌کنند. ضعف در این حوزه به معنای فشار بیشتر بر معیشت و افزایش آسیب‌پذیری اجتماعی است. نکته مهم دیگر همبستگی‌های بین خود شاخص‌های آمایشی است. ضریب ۰.۳۶ بین مدیریت منابع آب و الگوی کشاورزی، و ۰.۳۳ بین مدیریت آب و خدمات زیربنایی نشان می‌دهد این حوزه‌ها در عمل از هم جدا نیستند بلکه به‌صورت شبکه‌ای عمل می‌کنند؛ مثلاً اصلاح الگوی کشت بدون تأمین آب و بدون زیرساخت‌های بازاریابی پایدار نخواهد بود. در مجموع، جدول همبستگی دو نکته کلیدی را آشکار می‌کند: نخست اینکه رابطه مثبت و معنادار همه ابعاد آمایشی با تاب‌آوری اجتماعی فرضیه اصلی پژوهش را تقویت می‌کند؛ دوم اینکه شدت بالاتر همبستگی مدیریت آب نسبت به سایر ابعاد تأیید می‌کند که نقطه کانونی تاب‌آوری اجتماعی در حوضه ارومیه مسأله حکمرانی منابع آب است، در حالی که خدمات زیربنایی و الگوهای کشاورزی نقش‌های مکمل و تقویتی دارند.

جدول ۶. هم‌بستگی پیرسون بین تاب‌آوری اجتماعی و عوامل آمایشی

متغیر	۱	۲	۳	۴
۱) تاب‌آوری اجتماعی (مرکب)	۱			
۲) مدیریت منابع آب	‡۰.۵۲	۱		
۳) الگوی کشاورزی	‡۰.۴۳	‡۰.۳۶	۱	
۴) خدمات زیربنایی	‡۰.۴۷	‡۰.۳۳	‡۰.۲۹	۱

نتیجه‌گیری

خشک‌شدن دریاچه ارومیه صرفاً یک بحران هیدرولوژیک نیست؛ پدیده‌ای چندبعدی است که در لایه‌های معیشتی، نهادی و اجتماعی سکونتگاه‌های روستایی پیرامون اثر می‌گذارد. این مقاله با رویکرد کمی و تحلیلی–تبیینی و با اتکا به چارچوب «تاب‌آوری اجتماعی» و اصول «آمایش سرزمین»، نشان داد که چگونه کیفیت حکمرانی آب، الگوی توسعه کشاورزی و کفایت خدمات زیربنایی، ظرفیت سازگاری جوامع روستایی را شکل می‌دهند. شواهد سنجشی—از اعتبار سازه‌ای ابزار تا الگوی توصیفی شاخص‌ها و سپس روابط همبستگی و رگرسیونی—به یک پیام مرکزی می‌رسند: نقطه کانونی تاب‌آوری اجتماعی در این حوضه، «مدیریت منابع آب» است و دو مؤلفه «خدمات زیربنایی» و «الگوی کشاورزی سازگار با کم‌آبی» نقشی مکمل و تقویت‌کننده دارند. از منظر سنجش، تحلیل عاملی اکتشافی با KMO بالا و آزمون بارتلت معنادار، ساختار هفت‌بعدیِ فرض‌شده را تأیید کرد و بیش از دوسوم واریانس کل را توضیح داد؛ بارهای عاملیِ منظم و نبودِ بارهای متقاطع مزاحم، همگرایی و تمایز ابعاد را نشان دادند. پایایی داخلی ابعاد نیز در دامنه مطلوب قرار داشت ($\alpha\approx0.74$–0.86) و به‌ویژه در «مدیریت منابع آب» و «سرمایه اجتماعی» به اوج رسید؛ بدین معنا که پاسخگویان مفاهیم عدالت و شفافیت در تخصیص آب، نظارت بر برداشت‌ها، آموزش آبیاری نوین و نیز همکاری و اعتماد اجتماعی را با انسجام ادراکی بالایی تجربه می‌کنند. در لایه‌ی توصیفی، «انسجام اجتماعی» میانگین بالاتری نسبت به سایر مؤلفه‌ها داشت، در حالی‌که «توان اقتصادی» در پایین‌ترین سطح قرار گرفت؛ تصویری که از یک‌سو حفظ پیوندها و هویت محلی را نشان می‌دهد و از سوی دیگر شکنندگی معیشت و وابستگی به کشاورزی پرمصرف را برجسته می‌کند. این شکاف اجتماعی–اقتصادی، بستر تفسیر نتایج استنباطی شد.

تحلیل همبستگی و رگرسیون چندگانه وزنی، فرضیه‌های نظری را به‌صورت تجربی تقویت کرد. «مدیریت منابع آب» قوی‌ترین همبستگی را با تاب‌آوری اجتماعی نشان داد و در مدل رگرسیونی نیز بزرگ‌ترین اثر استاندارد را ثبت کرد($\beta\approx0.42$)، سپس «خدمات زیربنایی($\beta\approx0.35$)» و «الگوی کشاورزی» ($\beta\approx0.29$) قرار گرفتند؛ توان تبیین مدل نیز معنادار و در حد قابل اتکا بود ($\text{Adj. } R^2$ در میانه). این الگو چند دلالت مهم دارد: نخست، تاب‌آوری اجتماعی نه با مداخلات نمادین بلکه با اصلاحات نهادی آب تقویت می‌شود—عدالت در تخصیص، شفافیت قواعد، کنترل برداشت و هم‌زمان آموزش و ترویج فناوری‌های کم‌مصرف. دوم، حتی بهترین طراحی‌های بخشی بدون بستر زیرساختی کافی (راه، بهداشت، آموزش و دسترسی به بازار) به ظرفیت اجتماعیِ پایدار منجر نمی‌شود؛ خدمات زیربنایی همان «بافت نگهدارنده»ای است که سرمایه اجتماعی، مشارکت و تنوع معیشت در آن می‌بالند. سوم، تغییر الگوی کشت—به‌تنهایی—اگر با مشوق‌های اقتصادی، خدمات فنی و سازوکارهای بازاریابی همراه نشود، به تاب‌آوری اجتماعی نمی‌انجامد؛ پیام روشن سیاستی این است که «آمایش» باید هم‌زمان بر اهرم‌های آب، زیرساخت و اقتصاد روستایی سوار شود.

بر پایه‌ی این نتایج، مسیر ارتقای تاب‌آوری اجتماعی در حوضه ارومیه باید از «بازآرایی حکمرانی آب» بگذرد؛ یعنی حرکت از مدیریت عرضه‌محور به تنظیم تقاضا، استقرار قواعد شفاف و قابل اجرا برای تخصیص و برداشت، نهادینه‌کردن رصد و حسابرسی آب (WA+) و پیوند دادن تصمیم‌های تخصیصی با اطلاعات مکانی–زمانی معتبر. اجرای این اصلاحات، بدون افزایش مشروعیت اجتماعی امکان‌پذیر نیست؛ بنابراین طراحی سازوکارهای مشارکت واقعی (نه صوری) با انجمن‌های آب‌بران، شوراهای محلی و تشکل‌های کشاورزی، و نیز بازتوزیع منافع و هزینه‌ها (از طریق جبران عادلانه، بیمه‌های کشاورزی، و تسهیلات هدفمند انتقال معیشت) باید در قلب مداخله‌ها قرار گیرد. هم‌زمان، ارتقای خدمات زیربناییِ پایه—به‌ویژه راه‌های دسترسی به بازار و خدمات بهداشتی–آموزشی—شرط لازم برای کاهش هزینه‌های مبادله، افزایش مشارکت و حفظ سرمایه اجتماعی است. در حوزه کشاورزی نیز، بسته‌های سیاستی باید از «توصیه به تغییر کشت» فراتر رفته و زنجیره‌ای از ابزارها (قیمت‌گذاری، خرید تضمینی محصولات کم‌آب‌بر، خدمات ترویج/فنی، تأمین نهاده‌های سازگار و تضمین دسترسی به بازار) را هم‌زمان فعال کنند تا ریسک انتقال برای کشاورز قابل مدیریت شود.

از نظر نظری، یافته‌ها بر این نکته تأکید می‌کنند که تاب‌آوری اجتماعی نتیجه‌ی جمع جبری شاخص‌ها نیست؛ محصولِ برهم‌کنشِ ظرفیت‌های سازگارانه در یک بستر نهادی–فضایی است که آمایش سرزمین می‌تواند آن را مهندسی کند. برتری تبیینیِ بعدِ «مدیریت منابع آب» نشان می‌دهد که در مناطق «بحران‌زده از آب»، سرمایه اجتماعی بدون عدالت و شفافیت نهادی به تاب‌آوری تبدیل نمی‌شود و برعکس، اصلاحات نهادیِ فاقد سرمایه اجتماعی و زیرساخت، اثربخشی پایدار ندارند. به‌عبارت دیگر، تاب‌آوری اجتماعی زمانی پدید می‌آید که سه حلقه‌ی آب–زیرساخت–معیشت، با حلقه‌ی چهارم یعنی «اعتماد و مشارکت» قفل شود. از نظر عملی، پیشنهاد می‌شود برنامه احیای دریاچه ارومیه از یک «پروژه محیط‌زیستی» به یک «برنامه توسعه منطقه‌ای با محوریت تاب‌آوری اجتماعی» بازتعریف شود؛ برنامه‌ای که در آن، تخصیص آب و تغییر الگوی کشت تنها زمانی تصویب و اجرا شوند که بسته‌های جبرانی، خدمات زیربنایی و سازوکارهای مشارکتِ محلی نیز هم‌زمان در دسترس باشند. پیاده‌سازی داشبوردهای پایش مکانی، گزارش‌دهی عمومیِ تخصیص‌ها، و ارزیابی سلامت‌محور (برای مواجهه با گردوغبار نمکی و ریسک‌های تنفسی/قلبی) باید اجزای استاندارد چرخه سیاست‌گذاری شوند. همچنین توصیه می‌شود کانون‌های پرریسک (بر اساس فاصله تا پهنه‌های خشک، جهت بادهای غالب و وضعیت آبخوان‌ها) در قالب زون‌های مدیریت ویژه تعریف و منابع مالی و فنی به‌صورت ترجیحی به آن‌ها اختصاص یابد تا نابرابری فضایی تاب‌آوری کاهش پیدا کند.

این پژوهش، با وجود اتکای قوی به سنجه‌های معتبر و تحلیل‌های چندسطحی، محدودیت‌هایی نیز دارد: داده‌ها خوداظهاری‌اند و بخشی از ابعاد (مانند مشارکت و انسجام) با دو گویه سنجیده شده‌اند؛ گرچه پایایی قابل قبول است، افزودن گویه‌های تکمیلی و اجرای تحلیل عاملی تأییدی در نمونه‌های بزرگ‌تر می‌تواند پایداری نتایج را افزایش دهد. همچنین،

بررسی طولی برای رصد اثراتِ زمانیِ سیاست‌ها (پیش و پس از مداخله) و ادغام سنجه‌های عینی (مصرف واقعی آب، درآمد واقعی، شاخص‌های سلامت) با سنجه‌های ادراکی، مسیر گام‌های بعدی پژوهش را روشن می‌کند. تاب‌آوری اجتماعی در حوضه ارومیه زمانی تقویت می‌شود که عدالت و شفافیت در حکمرانی آب برقرار شود، بسته‌های «زیرساخت + معیشت جایگزین + ترویج و خدمات فنی» هم‌زمان فعال گردد و مشارکت معنادار جوامع محلی از سطح مشاوره فراتر رفته و به هم‌آفرینی سیاست برسد. تنها در این صورت است که می‌توان انتظار داشت جوامع روستایی نه‌تنها از فشارهای کنونی عبور کنند، بلکه برای مواجهه با نوسانات اقلیمی آینده نیز آماده‌تر و پایدارتر شوند.

منابع

بارانی‌پسیان، و.، پوراکرمی، م.، فتوحی‌مهربانی، ب.، پوراکرمی، س. (۱۳۹۶). تحلیل روند خشک شدن دریاچه ارومیه و مهم‌ترین تأثیرات آن بر سکونتگاه‌های پیرامونی .فصلنامه پژوهش‌های روستایی، ۸(۳)، صفحات [حدود ۱۶ صفحه].

رحیمی، ل.، و چوبینه، م. (۱۴۰۳). سنجش و ارزیابی شاخص‌های تاب‌آوری اجتماعی در محلات تاریخی شهر تبریز (نمونه موردی: محله سرخاب تبریز) .فصلنامه برنامه‌ریزی فضایی (جغرافیا)، ۱۴)۲(، ۹۳-۱۲۴.

زیاری، کرامت‌الله (۱۳۹۵). مبانی و مدل‌های برنامه‌ریزی آمایش سرزمین. چاپ دوم. تهران: انتشارات دانشگاه تهران.

مرکز پژوهش‌های توسعه و آینده‌نگری. (۱۳۹۹). سند ملی آمایش سرزمین. سازمان برنامه و بودجه کشور.

نیکجو، ب.، عبدشاهی، ع.، یزدان‌پناه، م. (۱۳۹۶). بررسی و اولویت‌بندی پیامدهای خشک‌شدن دریاچه ارومیه بر وضعیت اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی مناطق روستایی شهرستان ملکان .فصلنامه علوم محیطی، ۱۵(1)، ۴۴-۷۲.

Adger, W. N. (2000). Social and ecological resilience: Are they related? Progress in Human Geography, 24(3), 347–364.

Afkhami, M., Ghorbani, M., & Babaei, S. (2025). Application of Social Network Analysis in Evaluating Social Capital with an Emphasis on Participatory Water Governance: A Case Study of Borujerd County. Journal of Rural Research, 16(1), 39-57.

Cutter, S. L., Boruff, B. J., & Shirley, W. L. (2003). Social vulnerability to environmental hazards. Social Science Quarterly, 84(2), 242–261.

FAO. (2022). Water Accounting Plus (WA+) for sustainable water management. Rome: Food and Agriculture Organization.

Lipscomb, M., Montalvo, C., & Novak, B. (2025). The impact of infrastructure investment on resilience to environmental shocks: Evidence from Ecuador. World Development, 188, 106903.

Majnouni Toutakhaneh, S., Shayan, H., & Maleki, S. (2018). Measuring rural resilience around Lake Urmia. Journal of Rural Research, 8(3), 45–62.

Mirnezami, S., Ahmadian, A., & Alipour, H. (2024). Lake Urmia Restoration Program: Policy failure or governance gap? Water Policy, 26(2), 123–140.

Norris, F. H., Stevens, S. P., Pfefferbaum, B., Wyche, K. F., & Pfefferbaum, R. L. (2008). Community resilience as a metaphor, theory, set of capacities, and strategy. American Journal of Community Psychology, 41, 127–150.
Patel, S. S., Rogers, M. B., Amlôt, R., & Rubin, G. J. (2017). What do we mean by 'community resilience'? International Journal of Disaster Risk Reduction, 24, 124–133.
Raju, C. S., & Samah, A. A. (2025). a systematic literature review of community resilience and adaptation towards sustainable water security. Malaysian Journal of Tropical Geography (MJTG), 51(1), 31-45.
Rezapour, R., et al. (2024). Health impacts of Lake Urmia desiccation: Study protocol. Journal of Environmental Health Research, 34(1), 55–70.
Salimi, A., Gohari, A., & Madani, K. (2019). Institutional challenges of Lake Urmia restoration. Water International, 44(5), 616–634.
Schmidt, M. (2021). Lake Urmia: Environmental disaster and socio-economic consequences. Environmental Research Letters, 16(10), 104021.

Analysis of Factors Affecting Social Resilience in Areas Impacted by the Drying of Lake Urmia: Examining the Role of Spatial Planning Policies

Sahand Azar[1]
Ph.D student in Spatial Planning, Urmia University.
* Corresponding author: s.azar@urmia.ac.ir

Abstract
The drying of Lake Urmia, one of Iran's most critical environmental crises, has imposed extensive socio-economic consequences on local communities within its basin. This study aims to analyze the factors influencing social resilience in rural settlements surrounding the lake, with a particular focus on the role of spatial planning policies. The research is applied in nature and follows an analytical–explanatory approach. Data were collected through a field survey of 384 rural households. The main instrument was a researcher-designed questionnaire based on the dimensions of social resilience (social capital, economic capacity, local participation, and social cohesion) and spatial planning policies (water resource management, agricultural patterns, and infrastructural services). Exploratory factor analysis confirmed the dimensional structure, and reliability indices were within an acceptable range ($\alpha = 0.74–0.86$). Descriptive findings revealed that social cohesion and social capital were at relatively favorable levels, while economic capacity and water governance indicators were below average. Correlation and multiple regression analyses indicated that water resource management exerted the strongest influence on social resilience, followed by infrastructural services and agricultural patterns. These findings highlight that strengthening social resilience in crisis-affected regions depends primarily on reforming water governance, alongside improving infrastructure and supporting livelihood diversification. Accordingly, redefining Lake Urmia's restoration policies as a comprehensive regional development program centered on social resilience is essential.

Keywords: Social resilience, Lake Urmia, spatial planning, water resource management, rural development.

ارزیابی دقت پایگاه داده TerraClimate در برآورد بارش ماهانه ایستگاه‌های سینوپتیک ارومیه و تبریز(حوضه آبریز دریاچه ارومیه)

شیما مجیدی سکان[۱]، مهدی عرفانیان[۲*]، ایوب میرزائی حسنلو[۳]

۱- دانش آموخته دوره کارشناسی ارشد علوم و مهندسی آبخیز، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه
۲- دانشیار گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه (نویسنده مسؤل: (Erfanian.ma@gmail.com
۳- دکتری علوم و مهندسی آبخیز، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه

چکیده

در بسیاری از مناطق جهان، کمبود داده‌های بارش یکی از موانع اصلی در انجام گسترده مطالعات زیست‌محیطی محسوب می‌شود. یافته‌های پژوهش‌های اخیر حاکی از آن است که داده‌های بارش شبکه‌ای، می‌توانند به‌عنوان جایگزینی قابل‌اعتماد برای داده‌های اندازه‌گیری‌شده توسط ایستگاه‌های زمینی مورد استفاده قرار گیرند. این مطالعه با هدف ارزیابی دقت پایگاه جهانی داده‌های شبکه‌ای بارش TerraClimate در دو ایستگاه حوضه آبریز دریاچه ارومیه طی دوره آماری ۱۹۸۹ تا ۲۰۱۸ انجام شد. بدین منظور، از سه شاخص آماری KGE، PBIAS و RMSE جهت بررسی تطابق داده‌ها با مشاهدات استفاده گردید. نتایج مقایسه شاخص‌ها بیانگر آن است که عملکرد پایگاه داده در بازتولید بارش ایستگاه ارومیه قابل قبول بوده و با KGE بیشتر (۰/۸۱۶)، PBIAS پایین‌تر (۴/۳۲۷-) و RMSE کمتر (۱۲/۳۷۳) نسبت به تبریز همراه است. با این حال، در ایستگاه تبریز پایگاه داده تمایل به کم‌برآورد بارش داشته و اختلاف قابل‌توجهی با داده‌های مشاهداتی مشاهده شد. به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که پایگاه داده TerraClimate قادر است الگوهای کلی تغییرات فصلی و سالانه بارش را بازتولید کند و می‌تواند به‌عنوان منبع داده‌ای مناسب برای مطالعات هیدرولوژیکی و محیط‌زیستی در مناطق با کمبود داده‌های مشاهداتی مورد استفاده قرار گیرد اگرچه در تحلیل‌های دقیق بارش ماهانه و سال‌های پربارش، دقت آن کمتر است.

کلید واژه‌ها: پایگاه داده بارش، دریاچه ارومیه، TerraClimate

مقدمه

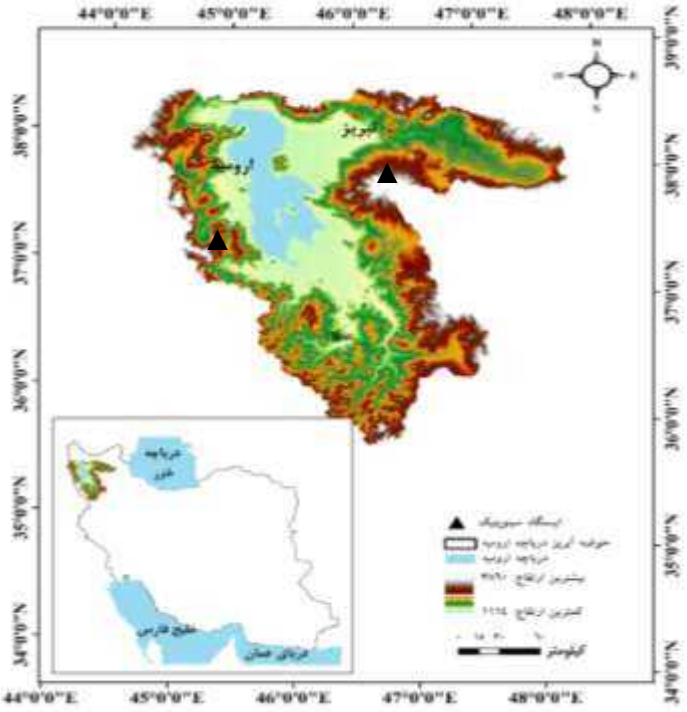
داده‌های دقیق هواشناسی برای درک الگوهای جوی و اقلیمی در مقیاس منطقه‌ای و جهانی، و همچنین برای توسعه مدل‌های قابل اعتماد هواشناسی و اقلیمی، بسیار حیاتی هستند (Boushaki et al., 2009) در میان متغیرهای مختلف هواشناسی، بارش به‌ویژه برای کاربردهای هیدرواقلیمی از اهمیت بالایی برخوردار است. بارش به‌عنوان یک مؤلفه کلیدی از چرخه آب جهانی، به‌طور مستقیم بر منابع آب، توسعه اقتصادی-اجتماعی، پایداری زیست‌محیطی و زندگی بر روی زمین تأثیر می‌گذارد (Dahri et al., 2021). همچنین، بارش بر فرآیندهایی مانند رواناب سطحی، رطوبت خاک، رشد پوشش‌گیاهی، تغذیه آب زیرزمینی، و تخلیه آب‌های سطحی تأثیرگذار است (Zhang et al., 2020). در کشورهای در حال توسعه، شبکه‌های باران‌سنجی از نظر پوشش مکانی و زمانی ضعیف هستند (Ghjarnia et al., 2015). نمونه خوبی از این وضعیت، دریاچه ارومیه در شمال‌غرب ایران است؛ جایی که بهره‌برداری بیش از حد از منابع آبی منجر به خشکی دریاچه شده است (Fazel et al., 2017) و کمبود شدید داده‌های میدانی در این حوضه، سیاست‌گذاری برای احیای دریاچه را تحت تأثیر قرار داده است. همچنین در برآورد بارش، که یکی دیگر از عناصر کلیدی مدیریت منابع آب در این حوضه است، مشکلاتی وجود دارد؛ این امر عمدتاً به دلیل کمبود ایستگاه‌های باران‌سنجی، به‌ویژه در ارتفاعات بالا که بخش قابل‌توجهی از بارش حوضه در آن نواحی رخ می‌دهد، است. یکی از راه‌حل‌های ممکن برای این مشکل، استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در برآورد بارش است (Ghjarnia et al., 2015; Huffman et al., 2007; Sun et al., 2018). اگرچه داده‌های ایستگاه‌های باران‌سنج برای مطالعات هیدرواقلیمی غیرقابل جایگزین هستند، اما اغلب با محدودیت‌هایی مواجه‌اند. از جمله شبکه‌های ایستگاهی پراکنده، پوشش مکانی نامتوازن، و تأخیر در به‌روزرسانی داده‌ها، به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه (Ahmed et al., 2019). برای رفع این محدودیت‌ها، مجموعه‌داده‌های جایگزینی برای بارش توسعه یافته‌اند که شامل برآوردهای مبتنی بر ماهواره، محصولات مبتنی بر ایستگاه‌های زمینی، و داده‌های بازتحلیل هستند (Beck et al., 2019). مجموعه داده‌های جهانی بارش، شامل داده‌های مبتنی بر ایستگاه، داده‌های ماهواره‌ای، و داده‌های بازتحلیل (Reanalysis) در طیف وسیعی از حوزه‌های پژوهشی مفید واقع شده‌اند (Sun et a., 2018) دقت این مجموعه داده‌ها در مطالعات موردی مختلف مورد بررسی قرار گرفته است (Ghajarnia et al., 2015; Moazami et al., 2013). معظمی و همکاران (2013) عملکرد دو مجموعه داده بارش شامل برآورد بارش از اطلاعات دورسنجی با استفاده از (PERSIANN) و (TRMM) در ایران بررسی کردند، نتایج آن‌ها نشان داد که TRMM بر اساس معیارهای آماری عملکرد بهتری دارد. در پژوهش دیگری شش مجموعه داده بارش با تفکیک‌پذیری بالا PERSIANN، CMORPH-RAW، CMORPH-CRT، TRMM 3B42، TRMM 3B43 V7 و APHRODITE را در حوضه دریاچه ارومیه مقایسه کردند، آن‌ها دریافتند که APHRODITE و TRMM 3B43 V7

تخمین‌های بهتری را در این حوضه ارائه می‌دهند (Ghajarnia et al., 2018). این مطالعه با هدف ارزیابی عملکرد پایگاه داده بارش شبکه‌ای TerraClimate در دو ایستگاه ارومیه و تبریز انجام شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز دریاچه ارومیه، یکی از مهم‌ترین حوضه‌های داخلی ایران، در شمال‌غرب کشور واقع شده است. این حوضه حدود ۵۲۰۰۰ کیلومتر مربع وسعت دارد که بین عرض جغرافیایی ´۴۰ °۳۵ تا ´۳۰ °۳۸ شمالی و طول جغرافیایی ´۷ °۴۴ تا ´۵۳ °۴۷ شرقی قرار دارد این حوضه دارای اقلیم نیمه‌خشک تا خشک بوده و نقش و اثرات تغییراقلیم و کاهش بارش‌ها در کاهش سطح تراز دریاچه گزارش شده است (Aghayi et al., 2023). دو ایستگاه سینوپتیک منتخب ارومیه و تبریز واقع در حوضه آبریز دریاچه ارومیه در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های سینوپتیک منتخب حوضه آبریز دریاچه ارومیه

داده‌ها

در این پژوهش، برای ارزیابی دقت پایگاه TerraClimate داده‌های ماهانه بارش این پایگاه در بازه زمانی ۲۰۱۸ـ۱۹۸۹، از وب‌سایت رسمی آن دریافت شد. همچنین داده‌های ماهانه بارش دو ایستگاه سینوپتیک منتخب ارومیه و تبریز به‌عنوان داده‌های مشاهده‌ای (۲۰۲۱-۱۹۸۱) مورد استفاده قرار گرفت.

پایگاه‌های جهانی داده‌های شبکه‌ای بارش

پایگاه داده TerraClimate (Abatzoglo et al., 2018)، یک مجموعه داده اقلیمی شبکه‌بندی‌شده جهانی با دقت مکانی بالا است که مقادیر ماهانه متغیرهای مختلف اقلیمی از جمله تابش خورشیدی، دمای بیشینه و کمینه، بارش، فشار بخار و سرعت باد را ارائه می‌دهد (Aragh et al., 2023). این پایگاه سطح‌های خشکی سراسر جهان را از سال ۱۹۵۸ تا ۲۰۲۳ پوشش می‌دهد. تمامی این داده‌ها دارای دقت مکانی حدود ۴ کیلومتر بوده و پوشش زمانی آن که به‌طور مداوم به‌روزرسانی می‌شود، در حال حاضر از سال ۱۹۵۸ تا ۲۰۲۳ را در بر می‌گیرد (Aragh et al., 2023; Schneider et al., 2018). در مطالعه حاضر، داده‌های ماهانه TerraClimate از سال ۱۹۸۹ تا ۲۰۱۸ با قدرت تفکیک مکانی ۰/۰۴ درجه مورد ارزیابی قرار گرفت.

شاخص‌های ارزیابی دقت یا کارایی

برای ارزیابی دقت پایگاه جهانی داده شبکه‌ای بارش، از سه شاخص آماری زیر استفاده شد:

جذر میانگین مربعات خطا(RMSE)

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(m_i - O_i)^2} \quad (۱)$$

ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) یکی از شاخص‌های رایج ارزیابی دقت مدل‌ها است که میانگین مجذور تفاضل مقادیر شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌شده را محاسبه می‌کند. مقدار کمتر RMSE نشان‌دهنده نزدیکی بیشتر داده‌های شبیه‌سازی‌شده به داده‌های واقعی و دقت بالاتر مدل است.(Willmott and Matsuura; 2005)

درصد اریبی (PBIAS)

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^{n}(m_i - O_i) \times 100}{\sum_{i=1}^{n} O_i} \quad (۲)$$

میزان تمایل سیستم مدل‌سازی یا داده‌های شبیه‌سازی‌شده به کم‌برآوردی یا بیش‌برآوردی مقادیر مشاهده‌ای را نشان می‌دهد. مقدار صفر برای این شاخص به‌معنای تطابق کامل با داده‌های واقعی است و مقادیر مثبت و منفی به‌ترتیب بیانگر برآورد بیشتر و برآورد کم هستند (Moriasi et l., 2007).

ضریب کارایی کلینگ-گوپتا(KGE)

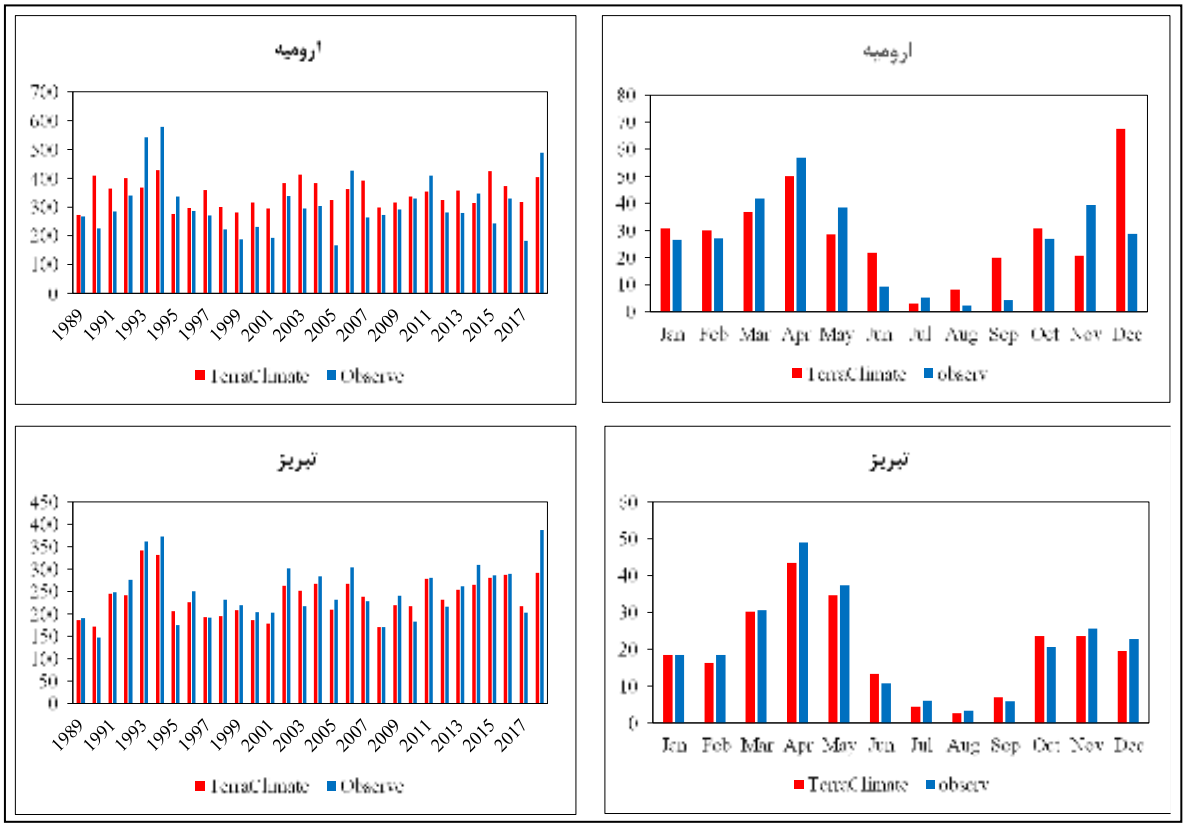
$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + (\beta-1)^2 + (\gamma-1)^2} \quad (۳)$$

KGE شاخصی ترکیبی برای ارزیابی دقت مدل‌های هیدرولوژیکی و داده‌های شبیه‌سازی‌شده است که هم‌زمان سه مؤلفه نسبت میانگین‌ها، همبستگی و واریانس را مدنظر قرار می‌دهد. مقدار آن هرچه به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده عملکرد بهتر مدل یا داده مورد بررسی است (Gupta et al., 2009).

بحث و نتایج

شکل (۲) میانگین بارش ماهانه و مقادیر بارش سالانه طی دوره ۱۹۸۹–۲۰۱۸ در دو ایستگاه ارومیه و تبریز را بر اساس داده‌های مشاهداتی و پایگاه داده TerraClimate نشان می‌دهد. در بخش ماهانه، مشاهده می‌شود که در هر دو ایستگاه بیشترین بارش در فصل زمستان و اوایل بهار رخ داده و ماه آوریل (فروردین) بیشترین سهم از بارندگی سالانه را به خود اختصاص داده است. در ایستگاه ارومیه، TerraClimate در ماه‌های اکتبر، سپتامبر و دسامبر (شهریور، مهر و آذر) بارش را به‌طور قابل توجهی بیش‌برآورد کرده است، در حالی‌که در ماه‌های آوریل و ژوئن (فروردین و اردیبهشت) مقادیر برآوردی کمتر از داده‌های مشاهداتی بوده است.

در ایستگاه تبریز نیز الگوی مشابهی دیده می‌شود، با این تفاوت که بیشترین اختلاف بین داده‌های مشاهداتی و TerraClimateدر ماه‌های آوریل و مه (فروردین و اردیبهشت) مشاهده می‌شود؛ به‌طوری که پایگاه تمایل به کم‌برآورد بارندگی در این بازه زمانی دارد. در فصل تابستان (ژوئیه تا سپتامبر) بارش بسیار ناچیز بوده و پایگاه تقریباً مشابه مشاهدات عمل کرده است. این موضوع نشان می‌دهد که در بازه‌های کم‌بارش، داده‌های TerraClimate دقت بالاتری دارند.
در مقیاس سالانه نیز روند کلی تغییرات بارش در هر دو ایستگاه توسط TerraClimate بازنمایی شده است. با این حال، در برخی سال‌های پربارش مانند ۱۹۹۵ و ۲۰۱۷، اختلاف قابل‌توجهی میان مقادیر برآوردی و مشاهدات دیده می‌شود. در ایستگاه ارومیه، پایگاه تمایل بیشتری به بیش‌برآورد بارندگی در سال‌های ترسالی دارد، در حالی‌که در ایستگاه تبریز الگوی بارش در برخی سال‌ها به‌ویژه در دهه ۱۹۹۰ کمتر از مقادیر واقعی تخمین زده شده است. نتایج نشان می‌دهد پایگاه داده TerraClimate توانسته است الگوی کلی تغییرات فصلی و سالانه بارش را در هر دو ایستگاه بازتولید کند اما اختلافات جزئی در مقیاس ماهانه در برخی سال‌های آماری مشاهده گردید.



شکل ۲- میانگین بارندگی ماهانه و سالانه مشاهداتی و پایگاه داده بارش TerraClimate

نتایج حاصل از شاخص‌های ارزیابی عملکرد در جدول (۱) نشان داد که پایگاه داده TerraClimate در ایستگاه ارومیه دقت بالاتری نسبت به ایستگاه تبریز دارد. مقدار KGE در ارومیه برابر با ۰/۸۱۶ بود که نشان‌دهنده همبستگی و تطابق مناسب داده‌های برآوردی با مشاهدات است. در حالی‌که این شاخص در ایستگاه تبریز ۰/۳۱۶ بود و بیانگر کاهش دقت TerraClimate در این ایستگاه می‌باشد. از نظرPBIAS ، در ایستگاه ارومیه مقدار ۴/۳۲۷- ثبت گردید که حاکی از انحراف اندک داده‌های برآوردی نسبت به مقادیر مشاهده‌ای است. با این حال، مقدار ۳۴/۸۵۳- در ایستگاه تبریز نشان می‌دهد که پایگاه داده بارش را به‌طور قابل توجهی کمتر از واقعیت برآورد کرده است. این امر بیانگر وجود کم‌برآورد بارز در ایستگاه تبریز است.

بررسی شاخص RMSE نیز گویای برتری نسبی ایستگاه ارومیه است به‌طوری که مقدار این شاخص در ارومیه ۱۲/۳۷۳ میلی‌متر و در تبریز ۱۳/۸۴۴ میلی‌متر به‌دست آمد. اختلاف مقادیر نشان می‌دهد که میزان خطای بازسازی داده‌ها در ارومیه کمتر بوده و پایگاه داده توانسته است بازنمایی دقیق‌تری از بارش‌های این ایستگاه ارائه کند. در مطالعه‌ای که توسط عراقی

و آداموسکی (2024) انجام شد، ۳۰ پایگاه داده بارندگی مختلف مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج این تحقیق نشان داد که پایگاه‌های TerraClimate و GPCC بهترین عملکرد را در ارائه داده‌های بارندگی داشتند، نتایج مشابه به یافته‌های پژوهش حاضر است که نشان‌دهنده دقت بالای این پایگاه داده در برآورد بارش است.

جدول ۱- مقادیر معیارهای آماری بارش ماهانه مشاهداتی و پایگاه داده TerraClimate

ایستگاه	KGE	PBIAS(%)	RMSE (mm)
ارومیه	۰/۸۱۶	-۴/۳۲۷	۱۲/۳۷۳
تبریز	۰/۶۱۳	-۳۴/۸۵۳	۱۳/۸۴۴

نتیجه‌گیری

این پژوهش نشان داد پایگاه داده TerraClimate توانایی مناسبی در بازتولید الگوهای کلی بارش فصلی و سالانه در دو ایستگاه ارومیه و تبریز دارد. در مقیاس ماهانه، این پایگاه در بازه‌های پربارش و برخی ماه‌ها (مانند آوریل و مه در تبریز و اکتبر تا دسامبر در ارومیه) دارای اختلاف با داده‌های مشاهداتی بوده و تمایل به کم‌برآورد یا بیش‌برآورد مقادیر بارش دارد. با این حال، در فصل‌های کم‌بارش (تابستان) دقت پایگاه بالاتر بوده و مقادیر برآوردی نزدیک به مشاهدات است.

در مقیاس سالانه نیز روند کلی تغییرات بارش توسط TerraClimate بازنمایی شده است، اما در سال‌های پربارش (مانند ۱۹۹۵ و ۲۰۱۷) اختلاف قابل توجهی مشاهده شد. تحلیل شاخص‌های آماری (KGE، PBIAS و RMSE) نشان داد که دقت پایگاه در ایستگاه ارومیه بالاتر از تبریز است؛ به‌طوری که KGE بالا و RMSE کمتر در ارومیه گویای تطابق بهتر داده‌های برآوردی با مشاهدات است، در حالی که تبریز دارای کم‌برآوردی بارز و خطای بیشتر بود.

با توجه به نتایج حاصل از دوره ۳۰ ساله مورد مطالعه، می‌توان نتیجه گرفت که پایگاه داده TerraClimate گزینه مناسبی برای مطالعات اقلیمی و هیدرولوژیکی در حوضه دریاچه ارومیه است. استفاده از این پایگاه می‌تواند موجب بهبود تحلیل‌های محیطی، مدل‌سازی بارش و تصمیم‌گیری‌های مرتبط با مدیریت منابع آب شود. با این حال، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده با بهره‌گیری از ترکیب داده‌های چند پایگاه، دقت مدل‌سازی‌ها ارتقا یابد.

منابع

Aghayi, M.M., Tajrishy, M., and Guan, H. 2023. Assessing mountain block water storage changes in river basins using water balance and GRACE: A case study on Lake Urmia Basin of Iran. Journal of Hydrology, 49, 101511.

Ahmed, K., Shahid, S., Wang, X., Nawaz, N., and Khan, N. (2019). Evaluation of gridded precipitation datasets over arid regions of Pakistan. Water, 11(2), 210.

Araghi, A., & Adamowski, J. F. (2024). Assessment of 30 gridded precipitation datasets over different climates on a country scale. Earth Science Informatics, 17(2), 1301-1313.

Araghi, A., Martinez, C.J., and Adamowski, J.F. (2023). Evaluation of TerraClimate gridded data across diverse climates in Iran. Earth Science Informatics, 16(2), 1347–1358.

Beck, H.E., Pan, M., Roy, T., Weedon, G.P., Pappenberger, F., Van Dijk, A.I., and Wood, E.F. (2019). Daily evaluation of 26 precipitation datasets using Stage-IV gauge-radar data for the CONUS. Hydrology and Earth System Sciences, 23(1), 207–224.

Boushaki, F.I., Hsu, K.L., Sorooshian, S., Park, G.H., Mahani, S., and Shi, W. (2009). Bias adjustment of satellite precipitation estimation using ground-based measurement: A case study evaluation over the southwestern United States. Journal of Hydrometeorology, 10(5), 1231–1242.

Dahri, Z.H., Ludwig, F., Moors, E., Ahmad, S., Ahmad, B., Shoaib, M., and Kabat, P. (2021). Spatio-temporal evaluation of gridded precipitation products for the high-altitude Indus basin. International Journal of Climatology, 41(8), 4283–4306.

Fazel, N., Haghighi, A.T., and Klove, B. (2017). Land use and climate change impacts are analyzed by comparing river flow records for headwaters and lowland reaches. Global Planetary Change, 4, 47–56.

Ghajarnia, N., Daneshkar, A.P., Liaghat, M., and Araghinejad, S. (2018). Error analysis on PERSIANN precipitation estimations: Case study of Urmia Lake Basin, Iran. Journal of Hydrologic Engineering, 23, 05018006.

Ghajarnia, N., Liaghat, A., and Daneshkar, A.P. (2015). Comparison and evaluation of high-resolution precipitation estimation products in Urmia Basin-Iran. Atmospheric Research, 158, 50–65.

Gupta, H.V., Kling, H., Yilmaz, K.K., and Martinez, G.F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. Journal of Hydrology, 377(1–2), 80–91.

Huffman, G.J., Adler, R., Bolvin, D., Gu, G., Nelkin, E., Bowman, K., Stocker, E., and Wolff, D. (2007). The TRMM multi-satellite precipitation analysis: Quasiglobal, multi-year, combined-sensor precipitation estimates at fine scale. Journal of Hydrometeorology, 8, 38–55.

Moazami, S., Golian, S., Kavianpour, M.R., and Yang, H. (2013). Comparison of PERSIANN and V7 TRMM multi-satellite precipitation analysis (TMPA) products with rain gauge data over Iran. International Journal of Remote Sensing, 34, 8156–8171.

Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., and Veith, T.L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Transactions of the ASABE, 50(3), 885–900.

Schneider, U., Becker, A., Finger, P., Meyer-Christoffer, A., and Ziese, M. (2018). GPCC Full Data Monthly Product Version 2018 at 2.5°: Monthly land-surface precipitation from rain-gauges built on GTS-based and historical data. DOI: 10.5676/DWD_GPCC/FD_M_V2018_250.

Sun, Q., Miao, C., Duan, Q., Ashouri, H., Sorooshian, S., and Hsu, K.L. (2018). A review of global precipitation data sets: Data sources, estimation, and intercomparisons. Reviews of Geophysics, 56, 79–107.

Zhang, P., Xiao, P., Yao, W., Liu, G., and Sun, W. (2020). Profile distribution of soil moisture response to precipitation on the Pisha sandstone hillslopes of China. Scientific Reports, 10(1), 9136.

Evaluation of TerraClimate Database Accuracy in Estimating Monthly Precipitation at Synoptic Stations in Urmia and Tabriz (Lake Urmia Basin)

Shima Majidi Sakan [1], Mahdi Erfanian[2], Ayub Mirzaei Hassanlu[3]

M.Sc., Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran.
Associate Professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran.
Ph.D., Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran.

* Corresponding author: Erfanian.ma@gmail.com

Abstract

In many regions globally, limited access to precipitation data presents a significant barrier to conducting comprehensive environmental assessments. Recent studies indicate that gridded precipitation datasets offer a viable alternative to ground-based observations, particularly in data-scarce areas. This study evaluates the accuracy of the global gridded precipitation dataset TerraClimate at two synoptic stations within the Lake Urmia basin over the period 1989–2018. Three statistical metrics—Kling-Gupta Efficiency (KGE), Percent Bias (PBIAS), and Root Mean Square Error (RMSE)—were applied to quantify the agreement between the gridded data and station-based measurements. Results show that TerraClimate exhibits satisfactory performance at the Urmia station, with higher KGE (0.816), lower PBIAS (−4.327), and reduced RMSE (12.373) relative to the Tabriz station. In contrast, the dataset tends to underestimate precipitation at the Tabriz station, resulting in a marked deviation from observed values. Overall, the analysis demonstrates that TerraClimate effectively captures broad seasonal and annual precipitation patterns and can be considered a reliable data source for hydrological and environmental studies in regions with limited observational coverage. However, its performance may be constrained in high-resolution monthly analyses and during years characterized by anomalously high precipitation.

Keywords: Gridded Precipitation Data, TerraClimate, Lake Urmia.

پهنه‌بندی شاخص‌های آماری یخبندان‌های زودرس پاییزه و دیررس بهاره ایران

سیما عسگری[۱]، وحید ورشاویان*[۲]

۱- دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آب، هواشناسی‌کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان.
۲- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه بوعلی سینا همدان، ایران.
*v.varshavian@basu.ac.ir

چکیده:

تغییراقلیم یکی از معضلات کنونی جامعه بشری و تهدید و بلایی برای سیاره زمین به شمار می‌آید. طبق گزارش‌های IPCC تغییراقلیم باعث تغییرات هیدرولوژی چند دهه اخیر در سطح جهان شده به گونه‌ای که احتمال مواجهه با رخدادهای حداکثر اقلیمی افزایش یافته است. یخبندان یکی از پدیده های حدی آب و هوایی است که جوانب مختلف زندگی انسان از جمله کشاورزی، حمل و نقل و انرژی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در این پژوهش به منظور پهنه‌بندی شاخص‌های آماری یخبندان‌ها در کشور ایران، داده‌های مربوط به۳۱ ایستگاه سینوپتیک برای یک دوره ۴۰ ساله (۲۰۲۴-۱۹۸۵) از سازمان هواشناسی کشور اخذ و پنج شاخص آماری شامل متوسط تاریخ آغاز یخبندان، متوسط تاریخ پایان یخبندان، متوسط تعداد سالانه روزهای یخبندان، متوسط طول دوره یخبندان و متوسط طول دوره رشد مورد بررسی و با سه عامل ارتفاع و طول و عرض جغرافیایی نقشه‌های پهنه‌بندی تهیه گردید. الگوی فضایی نشان از یک الگوی غربی به شرقی در مقادیر شاخص‌های مختلف یخبندان دارد. هر چه از سمت غرب به شرق حرکت می‌کنیم تعداد فراوانی روزهای یخبندان و همچنین طول دوره یخبندان کاهش و متعاقب آن فصل رشد افزایش پیدا می‌کند. متناسب با این تغییرات، وقوع اولین روز و آخرین روز یخبندان نیز با تأخیرهای زیادی در بین نیمه شرقی و غربی قابل مشاهده است. نتایج نشان می‌دهد که یخبندان در ایران پدیده‌ای ناهمگن و ارتفاع محور است و توجه به زمان آغاز و پایان یخبندان و طول دوره رشد در هر منطقه می‌تواند مبنای مناسبی برای برنامه‌ریزی کشاورزی، انتخاب گونه‌های مقاوم به سرما و کاهش خسارات ناشی از سرمازدگی باشد.

کلیدواژه ها: یخبندان، پهنه‌بندی، شاخص‌های آماری، ایستگاه‌های سینوپتیک، ایران.

مقدمه:

تغییراقلیم یکی از معضلات کنونی جامعه بشری است و تهدید و بلایی برای سیاره زمین به شمار می آید (KHalili Aghdam,2009). تغییر آب و هوا اغلب به تشدید حوادث آب و هوایی می‌انجامد. طبق گزارش‌ها (Intergovernmental

IPCC (panel on climate change تغییراقلیم باعث تغییرات هیدرولوژی چند دهه اخیر در سطح جهان شده، به گونه‌ای که احتمال مواجهه با رخدادهای حداکثر اقلیمی افزایش یافته است (حجازی زاده و همکاران ۱۳۸۴). یخبندان یکی از پدیده های حدی آب و هوایی است که جوانب مختلف زندگی انسان از جمله کشاورزی، حمل و نقل و انرژی را تحت تأثیر قرار می‌دهد و به شرایطی اطلاق می‌شود که در آن دمای سطح زمین و اشیائی که در مجاورت با آن هستند به کمتر از صفر درجه سلسیوس برسد (بذرافشان و رحیمی، ۱۳۹۳). در هواشناسی کشاورزی، یخبندان به وقوع دماهای پایین در حدی که منجر به خسارت به بافت‌های گیاهی شود گفته می‌شود (میان آبادی و همکاران، ۱۳۸۸). اثرات یخبندان در بخش کشاورزی بیشتر از بخش‌های دیگر می‌باشد و بیشتر از جنبه زودرس یا دیررس بودن آن نمود پیدا می‌کند (حجازی زاده و همکاران، ۱۳۸۴). اولین یخبندانی که در شروع دوره یخبندان هر سال رخ می‌دهد، یخبندان زودرس پائیزه آن سال و آخرین یخبندانی که در انتهای دوره یخبندان رخ می‌دهد، یخبندان دیررس بهاره نامیده می‌شود. یخبندان‌های غیرمنتظره میتواند اثرات بسیار مخربی بر عملکرد گیاهان زراعی داشته باشند (سیاری و همکاران، ۱۳۸۹). کشور ایران در منطقه‌ای از آسیا قرار گرفته که اقلیم آن خشک و نیمه خشک بوده و در بخش‌های متعددی از آن پدیده یخبندان‌های پاییزه و بهاره به وفور رخ داده و موجب خسارت می‌شود که در مطالعات متعدد نیز اثبات شده است (رحیم زاده و همکاران ۲۰۱۷). از این‌رو بررسی و شناخت دقیق و تخمینی از زمان وقوع این یخبندان‌ها در برنامه‌ریزی‌های محیطی به دلیل آسیب کمتر کشاورزان لازم و ضروری می‌باشد. با توجه به اهمیت یخبندان در بین پدیده‌های اقلیمی و تاثیر آن بر جنبه‌های مختلف زندگی بشر، اقلیم‌شناسان همواره نگاهی ویژه نسبت به این پدیده داشته‌اند. ساکلینگ با استفاد از شاخص‌های اقلیمی به بررسی نوسانات یخبندان‌های پاییزه و بهاره در ایالات متحده پرداخته و نتایج آن نشان داده که در دهه ۱۹۵۰ تا ۱۹۷۰ تاریخ وقوع آخرین یخبندان‌های بهاری و اولین یخبندان‌های پاییزی نرمال بوده است (Suckling,1988). وایلن با بررسی ویژگی‌های یخبندان و ریسک وقوع دوره‌های سرد با توزیع های آماری در فلوریدای مرکزی رخداد احتمالی یخبندان را پیش‌بینی و تحلیل کرد (Waylon,1988). در مطالعات دیگر خطرات یخبندان برای نیویورک (Schmidlin & Detheir,1986) و خصوصیات مکانی و زمانی پدیده یخبندان از قبیل شدت و مدت و وقوع آن برای کشور پرو بررسی شده است (Trasmonte & et al.,2008). تحلیل منطقه‌ای نمایه‌های فرین حوضه رودخانه‌های چین در ۲۰۰۲-۱۹۶۰ نشان داده در سراسر این حوضه نمایه های فرین سرد روزهای یخبندان، روزهای یخی، شب‌های سرد روند منفی معناداری را نشان می‌دهند (Zhao & et al.,2012). در ایران مطالعات مختلفی در خصوص جنبه‌های مختلف این پدیده، جهت پیش‌بینی تاریخ وقوع یخبندان (بهاره و پاییزه) صورت گرفته است همچون تعیین اولین یخبندان‌های پاییزه و آخرین یخبندان‌های بهاره (خلجی، ۱۳۸۰ ؛ کاویانی و همکاران؛ ۱۳۸۱)، تداوم روزهای یخبندان (حجازی زاده و ناصرزاده، ۱۳۸۴ ؛ عساکره، ۱۳۸۹ ؛ علیجانی و همکاران، ۱۳۸۹)، با استفاده از روش‌های آماری و در مقیاس های استانی انجام شده است. الگوهای سینوپتیکی

مرتبط با یخبندان‌ها نیز توسط برخی از محققان برای برخی قسمت‌های ایران استخراج گردیده است (علیجانی و هوشیار، ۱۳۸۷ و فتاحی و صالحی پاک، ۱۳۸۸). استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی برای پهنه بندی ویژگی‌های آماری یخبندان به طور محدودی در برخی مطالعات در مقیاس‌های خرد همچون مطالعات (خسروی و همکاران ،۱۳۸۷) که با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی اقدام به پهنه‌بندی خطر سرمازدگی بر روی محصولات باغی در شهرستان مه‌ولات در استان خراسان رضوی نمودند و با همپوشانی نقشه‌های وقوع مکانی – زمانی آخرین سرمازدگی‌های دیررس بهاره و نقشه‌های گونه‌های غالب باغی، سه منطقه پرخطر، خطر و کم خطر را در این شهرستان شناسایی کردند. در مطالعه‌ای دیگر (میان آبادی و همکاران ،۱۳۸۸) با استفاده از GIS به بررسی و پهنه‌بندی یخبندان‌های زود هنگام پاییزه، دیرهنگام بهاره و زمستانه در استان خراسان رضوی پرداختند و برای یخبندان‌های بهاره و پاییزه مبنای صفر درجه و برای یخبندان‌های زمستانه مبنای ۱۰- و ۱۵- در نظر گرفتند که یافته‌ها نشان داد وقوع یخبندان‌های پاییزه از شمال استان آغاز و یخبندان‌های بهاره در جنوب استان زودتر به پایان می‌رسد. (فرج زاده و حسینی ،۱۳۸۹) با تحلیل و پهنه‌بندی زمانی– مکانی یخبندان در ایران، میانگین سالانهٔ روزهای یخبندان را ۶۲ روز با میانگین دمای ۳- درجهٔ سلسیوس محاسبه نموده و در یک پهنه‌بندی، منطقه غرب، شمال غرب و البرز را توأم با یخبندان های بسیار شدید و شمال را با یخبندان کم مقدار پهنه بندی کردند. (ذوالفقاری و همکاران ،۱۳۹۱) تاریخ آخرین یخبندان‌های بهاری را در غرب و شمال غرب کشور پیش‌بینی و نتایج بررسی آنها نشان داد که پیش‌بینی آخرین روز یخبندان بهاری در تمامی ایستگاه‌های همدید هواشناسی در شمال غرب و غرب ایران بر اساس شبکه پس انتشار خطا، با دقت بالایی امکان‌پذیر است. (Graczyk & Kundzewicz,2015) در بررسی شاخص‌های اقلیم کشاورزی مرتبط با درجه حرارت در لهستان، وقوع آخرین یخبندان بهاره و اولین یخبندان پاییزی؛ و مجموع سالانه درجه-روز در حال رشد برای سه آستانه دما برای دوره ۲۰۱۰-۱۹۵۱ را مورد بررسی و مشخص کردند که تاریخ رخداد یخبندان‌های دیررس بهاره در اثر گرمایش جهانی در آینده تغییر یافته و زمان وقوع آنها جلوتر می‌افتد. (لشکری و کیخسروی ،۱۳۹۶) با تمرکز بر شهر تهران و بررسی روند تغییرات دمایی و پهنه‌بندی آغاز و پایان یخبندان‌ها به این نتیجه رسیدند که وقوع یخبندان در مناطق شمالی شهر طولانی‌تر و با تعداد روزهای بیشتری نسبت به مناطق مرکزی و جنوبی است و تغییرات دمایی سالانه بر زمان‌بندی یخبندان‌ها تأثیر محسوسی دارد. (دارایی و همکاران ،۱۳۹۷) با هدف استخراج تاریخ وقوع اولین و آخرین یخبندان زودرس و دیررس در سطوح احتمالاتی مختلف برای ۴۴ ایستگاه همدید از توزیع احتمالاتی مختلف و سپس برازش توزیع‌های احتمالاتی مختلف بر روی سری‌های زمانی تاریخ وقوع اولین و آخرین یخبندان با استفاده از آزمون نکوئی برازش آندرسن-دارلینگ، توزیع ویبکی را به عنوان مناسب‌ترین توزیع احتمالاتی معرفی و بر اساس این توزیع احتمالاتی نقشه‌های پهنه‌بندی ویژگی شاخص‌های آماری یخبندان‌های ایران را تهیه کردند. (حسن زاده و همکاران، ۱۳۹۸) یخبندان‌های استان کرمانشاه را به صورت آماری- همدید بررسی کرده و با

استفاده از تکنیک تحلیل مؤلفه‌های اصلی و روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی، ۱۰ الگوی همدید حاکم بر سرماهای دیررس بهاره در منطقه مورد مطالعه را شناسایی و بر اساس نتایج، شکل‌گیری کم فشارها و ناوه‌های حاصل از آنها را نقش مهمی در یخبندان‌های بهاره منطقه تلقی کردند. (بی آزار و فردوسی ،۲۰۲۰) روند زمانی و مکانی پنج شاخص یخبندان را در ۱۲ ایستگاه سینوپتیک شمال ایران را بررسی کردند، براساس یافته‌ها در قسمت غربی منطقه مورد مطالعه، روند تعداد روزهای یخبندان افزایشی و در قسمت شرقی روند تعداد روزهای یخبندان کاهشی می‌باشد. (Graczyk & Szwed ,2020) تغییرات وقوع یخبندان بهاره را برای سه آستانه حداقل دمای هوای روزانه در ارتفاع دو متری و نزدیک به زمین برای شش ایستگاه هواشناسی واقع در دو منطقه کشاورزی در لهستان مورد بررسی و نتایج نشان داد که برای اکثر سری‌های زمانی، آخرین یخبندان بهاره، نشان دهنده ظهور اولیه آن از ۱/۶ تا حدود ۳/۵ روز در هر دهه است و تغییرات آماری معنی داری کمی در تاریخ آخرین یخبندان یافت شده که وقوع یخبندان‌های دیررس بهاره در دوره‌ای مورد بررسی زودتر از موعد رخ می‌دهد. (هلالی و همکاران، ۱۴۰۱) با استفاده از شاخص دورپیوندی ENSO در نمونه‌های اقلیمی ایران برای دوره بلند مدت اقلیمی ۲۰۱۹-۱۹۶۰ نشان دادند احتمالات رخداد تاریخ یخبندان بهاره، پاییزه و در نتیجه طول دوره بدون یخبندان در فاز ENSO نسبت به دوره بلند مدت با تقدم یا تأخر همراه است که بسته به شدت یخبندان و نوع اقلیم متفاوت است و روند آخرین یخبندان بهاره در بهار زودتر و آخرین یخبندان پاییزه در پاییز دیرتر رخ داده است. اما امروزه هواشناسان و اقلیم شناسان به دنبال استفاده از روش‌هایی می‌باشند که بتوانند با حداقل خطا، واقعیت‌های موجود در پهنه‌های اقلیمی را آشکار سازند، یکی از این روش‌ها استفاده از روش‌های هوش مصنوعی است که در این مقاله از نرم افزار متلب و پایتون بهره گرفته شده و نقشه‌های پهنه‌بندی تهیه گردیده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

برای بررسی یخبندان های زودرس پاییزه و دیررس بهاره ایستگاه‌های سینوپتیک مراکز استان‌های کشور ایران به عنوان نماینده هر استان به منظور ایجاد یک پوشش متوازن از شمال تا جنوب و از غرب تا شرق کشور با سابقه ثبت داده‌های هواشناسی بلندمدت، پیوسته و با کیفیت مناسب در نظرگرفته شده‌اند.کشور ایران در جنوب غرب آسیا با مساحت ۱/۶۴۸/۰۰۰ کیلومتر مربع واقع است که از نظر توپوگرافی، نواحی غربی تا جنوبی با رشته‌کوه‌های زاگرس و نوار شمالی با رشته‌کوه البرز احاطه شده است در حالی که بخش مرکزی شامل فلات مرکزی و مناطق خشک دشت کویر و کویر لوت است. با توجه به موقعیت جغرافیایی ایران، این کشور از تنوع اقلیمی بیشتری برخوردار است که اقلیم نیمه مرطوب خزری در شمال، اقلیم کوهستانی سرد در شمال غرب، اقلیم خشک تا بیابانی در مرکز، شرق و جنوب کشورگسترده شده است که

ناشی از عواملی چون عرض جغرافیایی، توپوگرافی و فاصله با دریاها و قرار گرفتن در کمربند خشک جهانی است. مطالعات نشان داده که مناطق با عرض جغرافیایی و ارتفاع بالا، بیشتر مستعد یخبندان هستند. مشخصات جغرافیایی و طول دوره آماری هر کدام از ایستگاه ها در جدول (۱) و پراکنش ایستگاه‌ها در سطح کشور نیز در (شکل۱) نشان داده شده است.



شکل ۱- نقشه موقعیت و پراکندگی ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه

جدول ۱- مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه (۲۰۲۴-۱۹۸۵)

ردیف	ایستگاه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ارتفاع	ردیف	ایستگاه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ارتفاع
۱	اراک	۳۴/۰۷	۴۹/۷۸	۱۷۰۲/۸	۱۶	سمنان	۳۵/۵۹	۵۳/۴۲	۱۱۲۷
۲	اردبیل	۳۸/۲۲	۴۸/۳۳	۱۳۳۵/۲	۱۷	سنندج	۳۵/۲۵	۴۷/۰۱	۱۳۷۳/۴
۳	ارومیه	۳۷/۶۶	۴۵/۰۶	۱۳۲۸	۱۸	شهرکرد	۳۲/۲۹	۵۰/۸۴	۲۰۴۸/۹
۴	اصفهان	۳۲/۷۴	۵۱/۸۶	۱۵۵۱/۹	۱۹	شیراز	۲۹/۵۶	۵۲/۶۰	۱۴۸۸
۵	اهواز	۳۱/۳۴	۴۸/۷۴	۲۲/۵	۲۰	قزوین	۳۶/۲۶	۵۰/۰۶	۱۲۷۹/۱
۶	ایلام	۳۳/۵۹	۴۶/۴۰	۱۳۳۷	۲۱	قم	۳۴/۷۷	۵۰/۸۶	۸۷۹/۱
۷	بجنورد	۳۷/۴۹	۵۷/۳۰	۱۰۶۵	۲۲	کرج	۳۵/۸۱	۵۰/۹۵	۱۲۹۲/۹
۸	بیرجند	۳۲/۸۹	۵۹/۲۸	۱۴۹۱	۲۳	کرمان	۳۰/۲۶	۵۶/۹۶	۱۷۵۴
۹	تبریز	۳۸/۱۲	۴۶/۲۴	۱۳۶۱	۲۴	کرمانشاه	۳۴/۳۵	۴۷/۱۵	۱۳۱۸/۵
۱۰	تهران مهرآباد	۳۵/۶۹	۵۱/۳۱	۱۱۹۱	۲۵	گرگان	۳۶/۹۱	۵۴/۴۱	۰
۱۱	خرم اباد	۳۳/۴۴	۴۸/۲۸	۱۱۴۷/۸	۲۶	مشهد	۳۶/۲۴	۵۹/۶۳	۹۹۹/۲

۱۲	رشت	۳۷/۳۲	۴۹/۶۲	-۸/۶۰	۲۷	همدان	۳۴/۸۷	۴۸/۵۳	۱۷۴۰/۸
۱۳	زاهدان	۲۹/۴۷	۶۰/۹۰	۱۳۷۰	۲۸	یاسوج	۳۰/۷۰	۵۱/۵۶	۱۸۱۶/۳
۱۴	زنجان	۳۶/۶۶	۴۸/۵۲	۱۶۵۹/۴	۲۹	یزد	۳۱/۹۰	۵۴/۲۹	۱۲۳۰/۲
۱۵	ساری	۳۶/۵۴	۵۲/۹۹	۲۳	-	-	-	-	-

در این پژوهش، برای بررسی یخبندان‌های دیررس بهاره و زودرس پاییزه در ایران، داده‌های روزانه دمای کمینه‌ی ۳۱ ایستگاه سینوپتیک کشور از سازمان هواشناسی کشور اخذ و پس از بررسی، دو ایستگاه بندرعباس و بوشهر فاقد یخبندان شناسایی شدند و از ادامه روند حذف گردیدند و در نهایت ۲۹ ایستگاه سینوپتیک با دوره‌ی مشترک۴۰ ساله (۲۰۲۴-۱۹۸۵) برای تحلیل و پهنه‌بندی یخبندان‌های دیررس بهاره و زودرس پاییزه انتخاب شدند و تشکیل بانک اطلاعاتی آن انجام و داده‌های مفقودی آنها استخراج و بازسازی شدند و مشاهده گردید که در بعضی ایستگاه‌ها یخبندان‌های زودهنگام در ماه اکتبر (مهر ماه) آغاز می‌شوند، به همین علت تاریخ اول اکتبر (۹ مهر) به عنوان تاریخ مبنا انتخاب و ما بقی روزها به ترتیب نسبت به این مبدأ شمارش شدند، بعد از تنظیم داده‌ها بر اساس روز ژولیوسی (۱ اکتبر) پنج شاخص یخبندان شامل: متوسط تاریخ آغاز یخبندان، متوسط تاریخ خاتمه یخبندان، متوسط تعداد سالانه روزهای یخبندان، متوسط طول فصل یخبندان و متوسط طول فصل رشد برای هر ایستگاه به صورت جداگانه با استفاده از نرم افزار متلب استخراج گردیدند و طبق تعریف سازمان جهانی هواشناسی (WMO,2011) دمای صفر درجه سلسیوس و کمتر از آن به‌عنوان روز یخبندان در نظرگرفته شد، سپس تاریخ‌های دقیق یخبندان زودهنگام و دیرهنگام (با دمای حداقل مساوی یا کمتر از صفر درجه سلسیوس) برای هر ایستگاه طی دوره پایه استخراج شدند. علاوه بر این، بازه زمانی بین تاریخ‌های یخبندان زودهنگام و دیرهنگام به‌عنوان دوره یخبندان ؛ فاصله زمانی بین پایان یخبندان در بهار و آغاز آن در پاییز به عنوان طول دوره رشد ؛ تاریخ رخداد اولین یخبندان در پاییز در آستانه حرارتی صفر درجه سانتی‌گراد به عنوان رخداد اولین تاریخ یخبندان؛ تاریخ رخداد آخرین یخبندان در بهار در آستانه حرارتی صفر درجه سانتی‌گراد به عنوان تاریخ رخداد آخرین یخبندان ؛ مجموع روزهایی که در آنها دمای حداقل روزانه معادل صفر یا پایین تر از صفر درجه سانتی‌گراد است به عنوان فروانی روزهای یخبندان در نظر گرفته شد و نتایج در جدول (۲) نشان داده شده است. در گام بعدی، پنج شاخص آماری یخبندان‌های ایستگاه‌ها که در مرحله اول استخراج شده بودند به طور جداگانه با سه عامل زمین- اقلیم یعنی ارتفاع، طول جغرافیایی و عرض جغرافیایی ایستگاه‌ها با استفاده از نرم افزار پایتون پهنه‌بندی و نقشه‌ها تهیه گردیدند. پهنه‌بندی انجام شده متکی بر درون یابی شاخص‌های مختلف یخبندان در یک مقیاس ایستگاهی با استفاده از روش درون‌یابی وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW) است. این روش بر مبنای اصل کاهش شباهت با افزایش فاصله عمل می‌کند؛ بدین معنا که مقادیر نزدیک‌تر به

نقطه هدف وزن بیشتری در برآورد خواهند داشت و در نتیجه دقت تخمین در مناطق دارای تراکم ایستگاه بالاتر خواهد بود. انتخاب این روش به دلیل سادگی، کارایی در مقیاس‌های محلی و قابلیت نمایش تغییرات پیوسته اقلیمی انجام گرفت.

جدول۲- متوسط شاخص‌های یخبندان ایستگاه‌های مورد مطالعه

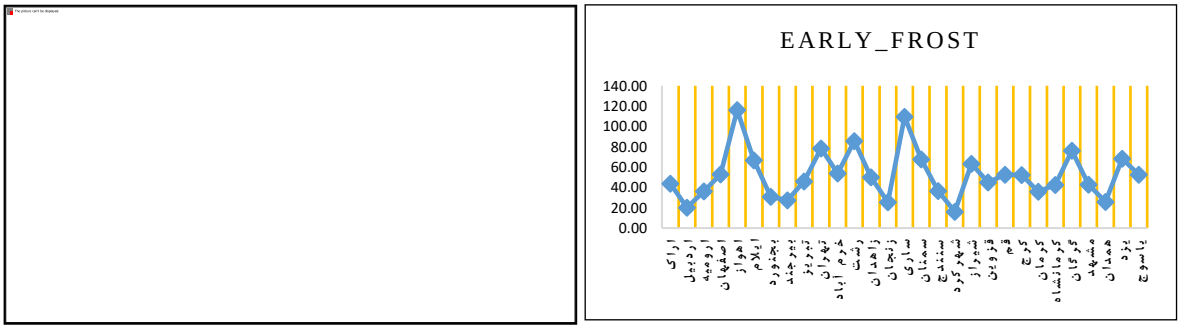
ایستگاه سینوپتیک	اولین روز ژولیوسی وقوع یخبندان	روز و ماه شروع	ماه شروع	آخرین روز ژولیوسی وقوع یخبندان	روز و ماه خاتمه	ماه خاتمه	تعداد روز یخبندان	طول دوره یخبندان	طول دوره رشد
اراک	۴۴	۲۳ آبان	نوامبر	۱۸۰	۱۰فروردین	مارس	۹۲	۱۳۷	۲۲۹
اردبیل	۲۰	۲۹ مهر	اکتبر	۲۴۸	۱۶خرداد	ژوئن	۱۲۲	۲۲۹	۱۴۰
ارومیه	۳۶	۱۴ آبان	نوامبر	۱۹۱	۲۱فروردین	آوریل	۱۱۲	۱۵۶	۲۱۰
اصفهان	۵۳	۲ آذر	نوامبر	۱۶۲	۲۱اسفند	مارس	۶۷	۱۱۰	۲۵۴
اهواز	۱۱۶	۵ بهمن	ژانویه	۱۱۶	۵ بهمن	ژانویه	۱	۱	۰
ایلام	۶۷	۱۶ آذر	دسامبر	۱۶۵	۲۴اسفند	مارس	۳۹	۹۹	۲۶۶
بجنورد	۳۱	۹ آبان	اکتبر	۱۸۲	۱۲فروردین	مارس	۹۳	۱۵۲	۲۱۳
بیرجند	۲۷	۵ آبان	اکتبر	۱۷۲	۲فروردین	مارس	۷۴	۱۴۶	۲۱۹
تبریز	۴۶	۲۵ آبان	نوامبر	۱۸۲	۱۲فروردین	مارس	۹۳	۱۳۷	۲۲۸
تهران	۷۸	۲۷ آذر	دسامبر	۱۵۹	۱۸اسفند	مارس	۲۶	۸۲	۲۸۴
خرم آباد	۵۴	۳ آذر	نوامبر	۱۷۱	۱فروردین	مارس	۵۸	۱۱۸	۲۴۷
رشت	۸۶	۵ دی	دسامبر	۱۴۸	۷ اسفند	فوریه	۱۴	۶۳	۳۰۳
زاهدان	۵۰	۲۹ آبان	نوامبر	۱۵۵	۱۴ اسفند	مارس	۴۶	۱۰۷	۲۵۹
زنجان	۲۶	۴ آبان	اکتبر	۲۰۹	۸ اردیبهشت	آوریل	۱۱۴	۱۸۴	۱۸۱
ساری	۱۱۰	۳۰ دی	ژانویه	۱۲۴	۱۳ بهمن	ژانویه	۲	۹	۳۵۱
سمنان	۶۸	۱۷ آذر	دسامبر	۱۵۵	۱۴ اسفند	مارس	۳۶	۸۸	۲۷۷
سنندج	۳۷	۱۵ آبان	نوامبر	۱۸۶	۱۶ فروردین	آوریل	۹۶	۱۵۰	۲۱۶
شهرکرد	۱۶	۲۵ مهر	اکتبر	۲۲۰	۱۹اردیبهشت	مه	۱۳۲	۲۰۵	۱۶۰
شیراز	۶۳	۱۲ آذر	دسامبر	۱۵۴	۱۳ اسفند	مارس	۳۹	۹۱	۲۷۴
قزوین	۴۵	۲۴ آبان	نوامبر	۱۸۶	۱۶ فروردین	آوریل	۸۲	۱۴۱	۲۲۴
قم	۵۳	۲ آذر	نوامبر	۱۶۲	۲۱ اسفند	مارس	۵۸	۱۱۰	۲۵۵
کرج	۵۲	۱ آذر	نوامبر	۱۷۹	۹ فروردین	مارس	۶۱	۱۲۸	۲۳۷
کرمان	۳۶	۱۴ آبان	نوامبر	۱۷۱	۱ فروردین	مارس	۷۹	۱۳۶	۲۳۰
کرمانشاه	۴۳	۲۲ آبان	نوامبر	۱۸۵	۱۵ فروردین	آوریل	۸۱	۱۴۳	۲۲۳
گرگان	۷۶	۲۵ آذر	دسامبر	۱۵۹	۱۸ اسفند	مارس	۲۰	۸۴	۲۸۲
مشهد	۴۳	۲۲ آبان	نوامبر	۱۷۰	۲۹ اسفند	مارس	۶۳	۱۲۹	۲۳۷

همدان	۲۶	۴ آبان	اکتبر	۱۹۴	۲۴ فروردین	آوریل	۱۲۰	۱۶۹	۱۹۷
یاسوج	۵۲	۱ آذر	نوامبر	۱۷۱	۱ فروردین	مارس	۶۹	۱۲۰	۲۴۵
یزد	۶۸	۱۷ آذر	دسامبر	۱۴۷	۶ اسفند	فوریه	۳۳	۸۰	۲۸۶

نتایج

متوسط تاریخ وقوع اولین روز یخبندان

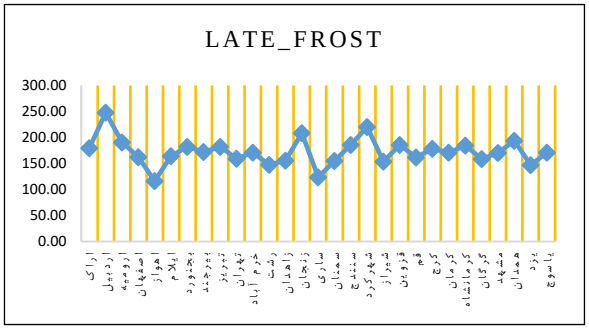
نتایج حاصل از تغییرات زمانی آغاز و پایان یخبندان در ایستگاه‌های مورد بررسی نشان می‌دهد زودترین تاریخ یخبندان (یخبندان‌های زودرس پاییزه) عمدتاً در مناطق شمال غرب و غرب کشور در ماه اکتبر ثبت گردیده است. ایستگاه‌های اردبیل و شهرکرد (۲۵ و ۲۹ مهر) و ایستگاه‌های زنجان و همدان (۵ آبان) نخستین ایستگاه‌هایی هستند که یخبندان‌های زودهنگام را به خود اختصاص داده و در مقابل دیرترین وقوع اولین روز یخبندان نیز در مناطق جنوب و شمالی کشور مربوط به ایستگاه‌های اهواز و ساری در ماه ژانویه (۵ بهمن و ۲۹ دی) رخ داده است (شکل ۲). از نظر شدت دمایی، سردترین دمای یخبندان زودرس پاییزه ۷/۲- درجه سانتیگراد مربوط به ایستگاه شهرکرد (۲ مهر ۱۳۹۰) است و سپس ایستگاه‌های بیرجند و کرمان با دمای ۵/۶- درجه سانتیگراد (۲۵ و ۲۶ مهر ۱۳۶۶)، اردبیل با دمای ۴/۸- درجه سانتیگراد (۷ آبان ۱۳۶۴)، زنجان و سنندج با دمای ۴/۶- درجه سانتیگراد (۲ آبان ۱۳۶۸ و ۸ آبان ۱۳۶۴)، همدان با دمای ۴/۴- درجه سانتیگراد (۲ آبان ۱۳۸۴ و ۱ آبان ۱۳۹۰) سردترین دمای شروع زودهنگام یخبندان را داشته‌اند. در شمال شرق کشور نیز ایستگاه مشهد با دمای ۵- درجه سانتیگراد (۲۷ مهر ۱۳۷۴) سردترین دمای یخبندان زودرس پاییزه را به خود اختصاص داده است.

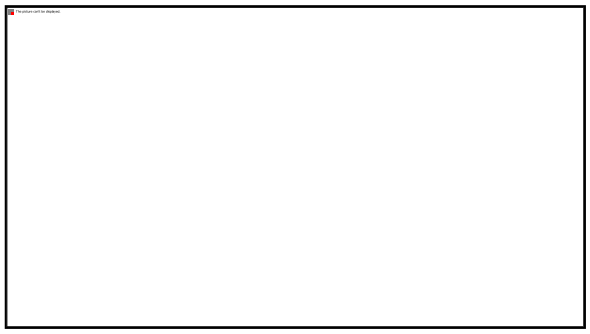


شکل (۲) متوسط اولین روز یخبندان

متوسط تاریخ وقوع آخرین روز یخبندان

در نقشه پهنه‌بندی وقوع آخرین روز یخبندان مشاهده می‌شود که زودترین وقوع آخرین روز یخبندان (یخبندان‌های دیررس بهاره) در ایستگاه‌های اردبیل و شهرکرد در ماه ژوئن و می (۱۶ خرداد و ۱۹ اردیبهشت) و بعد از آن زنجان و همدان در ماه آوریل (۸ اردیبهشت و ۲۴ فروردین) رخ داده است (شکل ۳). از نظر شدت سرمای ثبت شده در روزهای پایانی یخبندان در فصل بهار، سردترین دمای پایانی یخبندان ۰/۲- درجه سانتی‌گراد (۲ تیر ۱۳۷۲) مربوط به ایستگاه اردبیل و در ماه می (اردیبهشت) بیشترین روزهای یخبندان‌های دیررس بهاره را به خود اختصاص داده که در طول دوره (۲۰۲۴-۱۹۸۵) سردترین دمای ثبت شده برای آن برابر با ۸/۵- درجه سانتیگراد (۱۶ اردیبهشت ۱۳۷۱) و شهرکرد با دمای ۲/۴- درجه سانتیگراد در (۱۵ و ۱۶ اردیبهشت ۱۳۸۹) در رتبه دوم قرار دارد. ایستگاه‌های زنجان و ارومیه با دمای ۱/۶- درجه سانتی‌گراد (۱۶ اردیبهشت ۱۳۷۱) و (۱۳ اردیبهشت ۱۳۶۹) را تجربه کرده‌اند، در ادامه همدان، سنندج و مشهد با دمای مشترک ۱- درجه سانتی‌گراد (۱۵ اردیبهشت ۱۳۶۴ و ۱۳ اردیبهشت ۱۳۶۸) سردترین دمای یخبندان دیررس بهاره را به خود اختصاص داده اند.



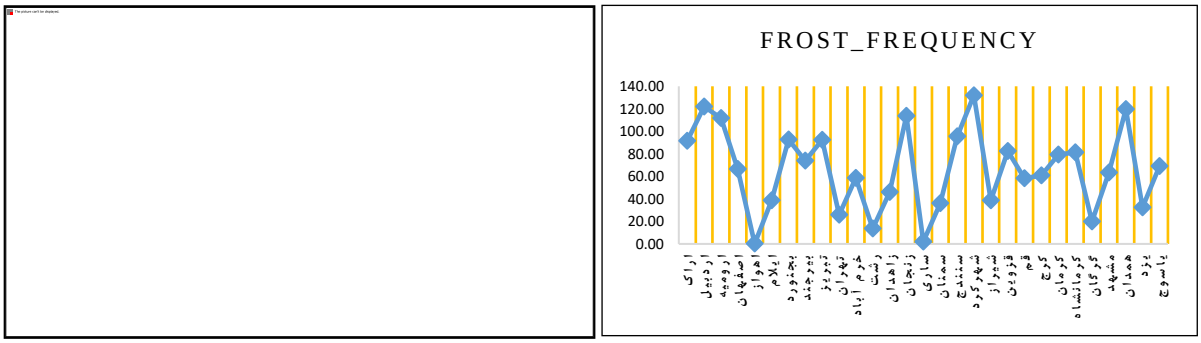


شکل (۳) متوسط آخرین روز یخبندان

میانگین فراوانی تعداد روزهای یخبندان

فراوانی وقوع یخبندان یا تعداد روزهای یخبندان سومین شاخصی بود که برای کل ایستگاه‌های مورد مطالعه استخراج گردید. از تعداد ۳۱ ایستگاه منتخب، ایستگاه‌های بندرعباس و بوشهر که جز نوار ساحلی جنوب ایران می‌باشند در کل دوره آماری (۲۰۲۴-۱۹۸۵) فاقد یخبندان شناسایی شدند. میانگین سالانه‌ی یخبندان ایستگاه‌ها در طول دوره ۶۶ روز بوده است. شهرکرد با میانگین فراوانی ۱۳۲ روز و اهواز با میانگین فراوانی ۱ روز در طول دوره، بالاترین و پایین‌ترین میانگین روزهای یخبندان را به خود اختصاص داده‌اند. با توجه به نقشه پهنه‌بندی فراوانی وقوع یخبندان (شکل ۴) مشاهده می‌شود توزیع پراکندگی ایستگاه‌ها بدین صورت است که ایستگاه‌های با میانگین یخبندان بالای ۶۶ روز در غرب، شمال غرب، دامنه‌های جنوبی البرز و شمال شرق واقع شده‌اند. ایستگاه‌های با میانگین متوسط به صورت پراکنده در شرق، غرب و مرکز ایران مشخص هستند، همچنین ایستگاه‌های با میانگین پایین‌تر از ۶۶ روز در شمال، جنوب غرب،

جنوب شرق و مرکز کشور دیده می‌شوند. بیشترین ایستگاه‌های دارای بیشترین فراوانی روزهای یخبندان در غرب، شمال غرب، دامنه‌های جنوبی البرز و شمال شرق ایران واقع شده‌اند. شکل (۴) میانگین فراوانی یخبندان در ایستگاه‌های سینوپتیک را در پهنه‌ی کشور ایران نشان می‌دهد.

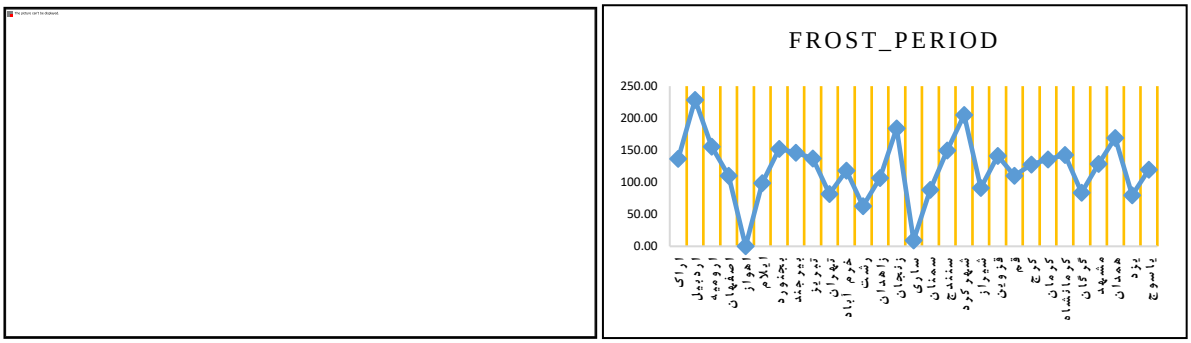


شکل (۴) متوسط فراوانی یخبندان

میانگین طول دوره یخبندان

بر اساس نتایج حاصل از نقشه پهنه‌بندی طول دوره یخبندان در ایستگاه‌های مورد مطالعه (شکل ۵)، تفاوت قابل‌توجهی در توزیع مکانی این پدیده مشاهده می‌شود. بیشترین طول دوره یخبندان مربوط به نواحی سردسیر و مرتفع شمال‌غرب کشور است. ایستگاه اردبیل با ۲۲۹ روز، شهرکرد با ۲۰۵ روز، زنجان با ۱۸۴ روز و همدان با ۱۶۹ روز یخبندان در سال به‌عنوان ایستگاه‌هایی با طولانی‌ترین دوره یخبندان شناخته می‌شوند. شرایط اقلیمی سرد و کوهستانی، ارتفاع زیاد از سطح دریا و نفوذ توده‌های هوای سرد از عرض‌های بالاتر، از مهم‌ترین عوامل مؤثر در افزایش طول یخبندان در این مناطق به شمار می‌روند. در مقابل، ایستگاه‌های واقع در نواحی شمال و جنوب‌غرب کشور نظیر اهواز، ساری و رشت، به‌ترتیب با تنها ۱، ۹ و ۶۲ روز یخبندان در سال کمترین طول دوره یخبندان را دارند. این مناطق به دلیل اقلیم معتدل خزری (در ساری و رشت) و اقلیم گرم بیابانی تا نیمه‌بیابانی (در اهواز) دارای زمستان‌های ملایم و کوتاه هستند که موجب کاهش احتمال بروز یخبندان می‌شود. در نواحی مرکزی کشور مانند اصفهان، قم، سمنان و یزد، طول دوره یخبندان بین ۸۰ تا ۱۱۰ روز متغیر است که نشان‌دهنده اقلیم نیمه‌خشک با زمستان‌های نسبتاً سرد است. این اختلاف مکانی گسترده در طول دوره یخبندان، نمایانگر تنوع اقلیمی قابل توجه در کشور است و نقش مهمی در برنامه‌ریزی‌های کشاورزی، تعیین نوع گیاهان قابل‌کشت، زمان کاشت و برداشت و حتی طراحی زیرساخت‌ها و سازه‌های مقاوم در برابر سرما دارد. در مناطق با یخبندان طولانی انتخاب گونه‌های مقاوم به سرما و زمان‌بندی دقیق عملیات زراعی اهمیت دوچندان پیدا می‌کند. افزون بر این، تغییرات

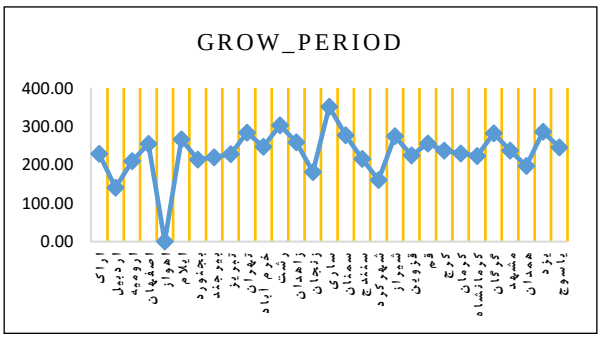
سالانه در طول دوره یخبندان می‌تواند یکی از شاخص‌های بررسی روند تغییرات اقلیمی در بلندمدت باشد. مطالعه و پایش مداوم این پارامتر در ایستگاه‌های مختلف می‌تواند به شناسایی الگوهای جدید اقلیمی و ارزیابی میزان آسیب‌پذیری مناطق مختلف کشور در برابر مخاطرات مرتبط با یخبندان کمک کند.



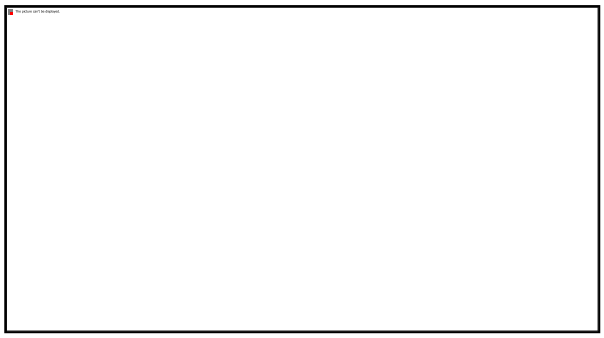
شکل (۵) متوسط طول دوره یخبندان

متوسط طول فصل رشد

طول فصل رشد به عنوان یکی از ویژگی‌های آماری یخبندان اهمیت زیادی دارد؛ چرا که عمده انرژی مورد نیاز برای رشد گیاه که از عوامل تعیین نوع کشت است در این دوره تأمین می‌شود و در تمام روزهای فصل رشد دمای حداقل روزانه در بالای آستانه مورد نظر قرار دارد که مستقیماً ظرفیت کشاورزی هر منطقه را تعیین می‌کند. طول فصل رشد برعکس طول دوره یخبندان است به این صورت که اگر ایستگاهی دارای طول دوره یخبندان طولانی است قاعدتاً طول دوره رشد آن نیز کوتاه خواهد بود. بر اساس نقشه پهنه‌بندی به دست آمده، نتایج نشان می‌دهد طولانی‌ترین دوره رشد به مناطق شمالی و جنوب‌غربی کشور تعلق دارد؛ به‌ویژه ایستگاه‌های اهواز، ساری و رشت که به ترتیب دارای میانگین روزهای بدون یخبندان برابر با صفر، ۳۵۱ و ۳۰۲ روز در سال هستند. این ارقام بیانگر شرایط اقلیمی نسبتاً گرم و مرطوب این مناطق و نبود محدودیت جدی از منظر یخبندان برای کشت و کار در بیشتر ایام سال است و در مقابل کوتاه‌ترین دوره رشد عمدتاً در نواحی شمال‌غرب، غرب و شمال‌شرق کشور مشاهده می‌شود به طوری که ایستگاه‌های اردبیل و شهرکرد به‌ترتیب با میانگین‌های ۱۴۰و ۱۶۰ روز در سال دارای کمترین طول فصل رشد در بین ایستگاه‌های مورد بررسی هستند. این مناطق به‌طور معمول در معرض یخبندان‌های زودرس پاییزی و دیررس بهاری قرار داشته و محدودیت‌های جدی در انتخاب تقویم زراعی و نوع کشت دارند. به‌دنبال آن ایستگاه‌های



ارومیه، همدان و زنجان نیز با میانگین‌های ۲۱۰، ۱۹۷ و ۱۸۱ روز در زمره مناطق با فصل رشد محدود قرار می‌گیرند که این امر می‌تواند بر الگوهای تولید کشاورزی و امنیت غذایی آن‌ها تأثیرگذار باشد و در مقابل ایستگاه‌های رشت و ساری با ۳۰۳ و ۳۵۱ روز، بلندترین طول دوره رشد در میان ایستگاه ها را دارا هستند و در نوار جنوبی کشور نیز با توجه به عدم وقوع یخبندان دارای حداکثر طول فصل رشد یعنی ۳۶۵ روز در سال می باشند . این الگو بیانگر آن است که که تغییرات مکانی و اقلیمی در ایران نقشی اساسی در تعیین مدت زمان دوره رشد ایفا کرده و ارتباط مستقیمی با توزیع فضایی یخبندان دارد.



شکل (۶) متوسط طول فصل رشد یخبندان

طبقه بندی فراوانی یخبندان بر اساس ارتفاع

با توجه به اینکه طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع سه متغییری هستند که تغیرات مکانی یخبندان را توجیه می‌کنند بررسی میانگین فراوانی یخبندان در طبقات ارتفاعی مختلف نشان می‌دهد که رابطه مستقیمی میان افزایش ارتفاع و افزایش فراوانی یخبندان وجود دارد (جدول ۳). در ارتفاع کمتر از ۵۰۰ متر، میانگین فراوانی یخبندان تنها ۹روز بوده که بیانگر شرایط اقلیمی معتدل و نبود محدودیت جدی از نظر سرمای زمستانه است. در طبقه ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ متر، فراوانی یخبندان به حدود ۶۱ روز رسیده و نشان‌دهنده تأثیر محسوس افزایش ارتفاع است. بیشترین ایستگاه‌ها در طبقه ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ متر (۱۶ ایستگاه) قرار دارند که میانگین یخبندان آن‌ها حدود ۶۸ روز است و این طبقه بخش بزرگی از فلات مرکزی و نواحی کوهپایه‌ای ایران را در بر می‌گیرد. در طبقه ۱۵۰۰ تا ۲۰۰۰ متر، فراوانی یخبندان با رشد چشمگیری به ۹۰ روز افزایش یافته و در ارتفاع بیش از ۲۰۰۰ متر (مانند ایستگاه شهرکرد) میانگین فراوانی یخبندان به بیش از ۱۳۲ روز رسیده که به‌عنوان شدیدترین و طولانی‌ترین شرایط یخبندان در کشور شناخته می‌شود. این روند نشان می‌دهد که ارتفاع از سطح دریا عامل کلیدی در تعیین الگوی یخبندان ایران است به‌گونه‌ای که هر چه ارتفاع افزایش یابد فراوانی و طول مدت یخبندان به‌طور تصاعدی افزایش پیدا می‌کند. اما عرض جغرافیایی و توپوگرافی محلی به‌عنوان عوامل مکمل نقش مهمی در تشدید یا کاهش طول دوره یخبندان ایفا می‌کنند. این یافته‌ها بیانگر آن است که توزیع فضایی یخبندان در ایران دارای الگوی ناهمگن بوده و برنامه‌ریزی کشاورزی و انتخاب الگوهای کشت باید با توجه به این شرایط متنوع اقلیمی و جغرافیایی انجام گیرد.

جدول ۳ - طبقه‌بندی فراوانی یخبندان ایستگاه‌ها بر اساس ارتفاع

ارتفاع	تعداد ایستگاه	درصد ایستگاه در طبقه ها	میانگین فراوانی یخبندان در هر طبقه
کمتر از ۵۰۰	۴	۱۳/۸	۹
۵۰۰-۱۰۰۰	۲	۶/۹	۶۱
۱۰۰۰-۱۵۰۰	۱۶	۵۵/۲	۶۸
۱۵۰۰-۲۰۰۰	۶	۲۰/۷	۹۰
بیشتر از ۲۰۰۰	۱	۳/۴۴	۱۳۲
مجموع	۲۹	۱۰۰	-

بحث و نتیجه‌گیری

در این پژوهش، پنج شاخص آماری یخبندان با استفاده از روش های آماری در ۳۱ ایستگاه سینوپتیک مراکز استان‌های ایران مورد تحلیل قرار گرفت. ابتدا پس از آماده کردن داده‌های حداقل دما در مقیاس روزانه، تاریخ‌های وقوع دمای صفر و زیرصفر درجه استخراج و این تاریخ‌ها به روز ژولیوسی تبدیل شد و در گام بعد پنج شاخص آماری یخبندان‌های ایستگاه‌ها که در مرحله اول استخراج شده بودند به طور جداگانه با سه عامل زمین- اقلیم یعنی ارتفاع، طول جغرافیایی و عرض جغرافیایی ایستگاه‌ها با استفاده از نرم افزار پایتون پهنه‌بندی و نقشه‌ها تهیه گردید. پهنه‌بندی انجام شده متکی بر درون‌یابی شاخص‌های مختلف یخبندان در یک مقیاس ایستگاهی با استفاده از روش درون‌یابی وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW) است. بیشترین میانگین روزهای یخبندان و بالاترین دماهای زیر صفر درجه سانتیگراد در طول دوره مورد مطالعه را ایستگاه‌های شمال غرب، غرب و دامنه‌های جنوبی البرز مانند اردبیل، زنجان، همدان، شهرکرد دارا بوده و مناطق مرکزی کشور در حد متوسط می‌باشند. ماه شروع یخبندان در مناطقی از جمله غرب، شمال غرب و شمال شرق و جنوب کوه‌های البرز، ماه اکتبر (مهر) بوده که در ایستگاه‌های شمالی ماه دسامبر (آذر) و در نوار جنوبی تا ماه ژانویه (دی) به تأخیر می‌افتد. ماه پایان یخبندان در ایستگاه‌های غرب و شمال غرب کشور مانند اردبیل تا ماه ژوئن (خرداد) و در ایستگاه‌های شهرکرد، زنجان و همدان، ماه آوریل و می (اردیبهشت) به عنوان ماه پایانی یخبندان تلقی می‌شود. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که پراکنش زمانی و مکانی یخبندان در ایران تابعی از شرایط اقلیمی، ارتفاع از سطح دریا و موقعیت جغرافیایی است و سردترین دماها در مناطقی قرار دارند که محل وقوع بیشترین فراوانی‌هاست و بین دماهای بسیار پایین و زودترین آغازها و طول دوره ارتباط وجود دارد به طوری که مناطقی که دارای سردترین دماها بوده اند یخبندان زودتر آغاز شده و طول دوره‌ی بیشتری داشته، ایستگاه‌های سردسیر و مرتفع در غرب و شمال‌غرب کشور از جمله اردبیل، همدان و شهرکرد، با طولانی‌ترین

دوره‌های یخبندان و کوتاه‌ترین دوره‌های رشد، محدودیت‌های جدی برای فعالیت‌های کشاورزی دارند. این اختلاف مکانی گسترده در طول دوره یخبندان، نمایانگر تنوع اقلیمی قابل توجه در کشور است و نقش مهمی در برنامه‌ریزی‌های کشاورزی، تعیین نوع گیاهان قابل‌کشت، زمان کاشت و برداشت و حتی طراحی زیرساخت‌ها و سازه‌های مقاوم در برابر سرما دارد. در مناطق با یخبندان طولانی انتخاب گونه‌های مقاوم به سرما و زمان‌بندی دقیق عملیات زراعی اهمیت دوچندان پیدا می‌کند. افزون بر این، تغییرات سالانه در طول دوره یخبندان می‌تواند یکی از شاخص‌های بررسی روند تغییرات اقلیمی در بلندمدت باشد. مطالعه و پایش مداوم این پارامتر در ایستگاه‌های مختلف می‌تواند به شناسایی الگوهای جدید اقلیمی و ارزیابی میزان آسیب‌پذیری مناطق مختلف کشور در برابر مخاطرات مرتبط با یخبندان کمک کند. علت فقدان یا وقوع کوتاه مدت یخبندان در ایستگاه‌های واقع در نواحی خزری نظیر ساری و رشت با وجود واقع شدن در عرض‌های بالاتر، رطوبت بوده و همچنین ایستگاه‌های نواحی جنوبی نظیر اهواز و بندرعباس به دلیل واقع شدن در عرض‌های جغرافیایی پایین، نزدیکی به خط استوا و عامل رطوبت باعث شده از طول دوره رشد بسیار بالایی برخوردار و ظرفیت بالاتری برای کشت‌های متنوع و چندمحصولی داشته باشند. به‌طورکلی می‌توان گفت که الگوی یخبندان در ایران بیش از آن‌که تحت تأثیر عرض جغرافیایی باشد وابسته به ارتفاع و شرایط توپوگرافی و رطوبت است. بنابراین توجه به زمان آغاز و پایان یخبندان و طول دوره رشد در هر منطقه می‌تواند مبنای مناسبی برای برنامه‌ریزی کشاورزی، انتخاب گونه‌های مقاوم به سرما و کاهش خسارات ناشی از سرمازدگی باشد. یافته‌های این تحقیق می‌تواند در تدوین الگوی کشت منطقه‌ای و مدیریت بهینه منابع آب و خاک نقش مؤثری ایفا کند.

منابع

بذرافشان، ج .، رحیمی،ج. (۱۳۹۳). تحلیل و پهنه بندی ریسک وقوع یخبندان و سرماهای تشعشعی، جبهه‌ای و مختلط در گستره ایران. نشریه هواشناسی کشاورزی، ۲ (۱)، ۶۷-۷۹.

حجازی زاده، ز ، ناصر زاده، م. (۱۳۸۴). محاسبه و تجزیه و تحلیل ساعت‌های تداوم یخبندان با استفاده از برنامه نویسی به زبان دلفی «مطالعه موردی: استان لرستان». فصلنامه تحقیقات جغرافیائی، سال بیستم، ۷۶ ، ۱۵۰-۱۳۹.

حسن زاده، ع.، عطایی، ه.، نادر، پ.، گندمکار، ا. (۱۳۹۸). الگوهای سینوپتیکی حاکم بر یخبندان‌های بهاره در استان کرمانشاه، تحلیل فضایی، مخاطرات محیطی،(۱)۶، ۱۵۶-۱۳۹.

خسروی، م.؛ جبیبی نوخندان، م.؛ اسماعیلی، ر. (۱۳۸۷). پهنه‌بندی اثر خطر سرمازدگی دیررس بر روی باغات؛ مطالعه‌ی موردی: شهرستان مه‌ولات. فصلنامه جغرافیا و توسعه،۶ ، ۲.

خلجی، م. (۱۳۸۰). پیش بینی سرمای دیررس بهاره و یخبندان زودرس پاییزه برای تعدادی از گیاهان زراعی و باغی در استان چهارمحال بختیاری، فصلنامه نهال و بذر، (۲)۱۷، ۱۲۶-۱۳۹.

دارائی، م.، محمودی، پ.، ساری‌صراف، ب.، خورشیددوست، ع.(۱۳۹۷).تعیین تابع توزیع احتمالاتی یخبندان‌های ایران طی ۲۰۱۰–۱۹۸۱. فصلنامه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۵۰ ، ۱–۱۵.

ذوالفقاری، ح.،زاهدی، غ.، سجادی‌فر، ط.(۱۳۹۱). پیش بینی تاریخ آخرین یخبندان‌های بهاری در غرب و شمال غرب ایران، جغرافیا و پایداری محیط،۴، ۵۹-۷۴ .

سیاری، ن.، بنایان، م.، علیزاده، ا.، بهیار، م. (۱۳۸۹). بررسی امکان پیش بینی زمان وقوع یخبندان با استفاده از روش تشخیص الگوها، نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، (۳)۸۲ ، ۱۱۷-۱۰۷.

عساکره، ح. (۱۳۸۹). احتمال تواتر و تداوم یخبندان های زودرس و دیررس در شهر زنجان. مجله جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، سال ۲۱، (۱)۳۷، ۱-۱۶.

علیجانی،ب.، هوشیار،م. (۱۳۸۷). شناسایی الگوهای سینوپتیکی سرماهای شدید شمالغرب ایران، پژوهش های جغرافیایی طبیعی،۶۵، ۱-۱۶.

فتاحی،ا.، صالحی پاک، ت. (۱۳۸۸). تحلیل الگوهای سینوپتیکی یخبندان های زمستانه ایران. جغرافیا و توسعه، ۱۳، ۱۲۷-۱۳۶.

فرج زاده، م.، حسینی ، س ا. (۱۳۸۹). تحلیل و پهنه بندی زمانی – مکانی یخبندان در ایران. جغرافیا و توسعه ناحیه ای ، ۶.

کاویانی، م.، حسینی ابری، س ح.، اسدی بروجنی، ا.(۱۳۸۱). تعیین احتمال وقوع تجربی و دوره بازگشت حداقل دما در ماه های اسفند، فروردین و اردیبهشت، در باغ های بادام منطقه سامان، مجله علوم کشاورزی و منابع طبیعی، (۳)۹، ۴۹-۵۷.

لشکری، ح.، کیخسروی، ق (۱۳۹۶). روند تغییرات دمایی و پهنه‌بندی آغاز و پایان یخبندان شهر تهران. فصلنامه مخاطرات محیط طبیعی، (۱۴)۶، ۶۳–۸۶.

مجرد قره باغ، ف؛ تحلیل و پیش بینی یخبندان در آذربایجان (۱۳۷۷). رساله دکتری، دانشگاه تربیت مدرس.

میان آبادی، آ.، موسوی بایگی، م.، ثنایی نژاد، ح.، نظامی، ا.، (۱۳۸۸). بررسی و پهنه‌بندی یخبندان‌های زودهنگام پاییزه، دیرهنگام بهاره و زمستانه با استفاده از GIS در استان خراسان رضوی، مجله آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی).

میان آبادی، آ. سلاجقه، م. (۱۴۰۳). پیش نگری تغییر در تاریخ آخرین سرمازدگی بهاره و تعداد روزهای سرمازدگی در ایستگاه‌های پسته خیز استان کرمان با استفاده از برونداد مدل های اقلیمی CMIP6، نشریه پژوهش های تغییرات آب و هوایی، ۵(۱۸)، ۶۷-۹۲.

میرمحمدی میبدی، ع.، ترکش اصفهانی،س. (۱۳۸۳). مدیریت تنش‌های سرما و یخ زدگی گیاهان زراعی و باغی، چاپ اول،جهاد دانشگاهی،واحد صنعتی اصفهان.

هلالی، ج.، اسعدی اسکویی،ا.، حسین زاده،ت.، چراغعلی زاده، م.، کوهی، م. (۱۴۰۱). تحلیل روند یخبندان‌های بهاره، پاییزه و طول فصل بدون یخبندان و بررسی احتمال رخداد آن بر پایه شاخص دورپیوندی انسو در نمونه‌های اقلیمی ایران، پژوهش های اقلیم شناسی، (۵۱)۱۴۰۱، ۲۱۲-۱۹۹.

هوشیار، م.، حسینی، س، ا.، مسگری، ا. (۱۳۹۱). مدل سازی دماهای حداقل شهرستان ارومیه با استفاده از مدل های رگرسیونی خطی، غیرخطی و چندگانه و شبکه های عصبی. مجله اندیشه جغرافیایی، ۱۲ (۸۲)، ۲۴-۴۲.

Biazar S. M, Banan Ferdosi, F. (2020.) An investigation on spatial and temporal trends in frost indices in Northern Iran, Theor Appl Climatol, 141, 907–920.

Graczyk, D. and Szwed, M., (2020). Changes in the Occurrence of Late Spring Frost in Poland. Agronomy. 10 (11), 18-35.

Graczyk, D. and Kundzewicz, Z.W. (2015). Changes of Temperature- Related AgroClimatic Indices in Poland. Theoretical and Applied Climatology, 124, 401-410.

Graczyk, D. and Szwed, M. (2020). Changes in the Occurrence of Late Spring Frost in Poland. Agronomy,10 (11),18-35.

Khalili Aghdam, N., Soltani, A. (2009). Assessment of climate change during last fifty years in URMIA. journal of water and soil conservation ,journal of agricultural sciences and natural resources, 16(4), 141-151.

Schmidlin, T.W., Detheir, B.C., 1986. Astatistical analysis of Freeze hazard in NewYork State. Phys. Geogr., 7(3), 246- 257.

Suckling, P. W. (1988). Fluctuations of last springfreeze dates in the Southeastern United States.Physical Geography.7 (3), 239-245.

Trasmonte, G., Chavez, R., Segura, B., Rosales, J.L., (2008). Frost risks in the Mantaro river basin. Adv. Geosci., 14(14), 265-270.

Waylon, P. R., (1988). Statistical Analysis of Freezing Temperatures in Central and Southern Florida. Journal of Climatology, 8 (6), 607-628.

Rahimzadeh, A. (2017). Impact of early fall frosts on agricultural productivity in Iran. Agricultural Climate Review, 8(2), 112-120.

Zhao, C., Wang, W., and Xing, W. (2012). Regional Analysis of Extreme Temperature Indices for the Haihe River Basin from 1960 to 2009. International Conference on Modern Hydraulic Engineering. 28, 604-607.

Spatial Zoning of Statistical Indices of Early Autumn and Late Spring Frosts in Iran

Sima Asgari[1], Vahid Varshavian[2]

v.varshavian@basu.ac.ir:* Corresponding author

Agrometeorology, Bu-Ali Sina University, –1- Ph.D. Candidate in in Water Science and Engineering

.Hamedan

2- Assistant Professor, Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamadan, Iran

Abstract:
Climate change is one of the major challenges facing human society today and poses a serious threat to planet Earth. According to IPCC reports, climate change has altered the global hydrological cycle over recent decades, increasing the likelihood of extreme climatic events. Frost is one of the significant weather extremes that affects various aspects of human life, including agriculture, transportation, and energy. In this study, in order to spatially analyze frost-related statistical indices across Iran, data from 31 synoptic stations over a 40-year period (1985–2024) were obtained from the Iranian Meteorological Organization. Five statistical indices, including mean frost onset date, mean frost end date, mean annual number of frost days, mean frost duration, and mean growing season length, were examined. Zoning maps were then generated based on three factors: altitude, longitude, and latitude. The spatial pattern reveals a west-to-east gradient in frost indices across the country. Moving eastward, both the frequency of frost days and the length of the frost period decrease, while the growing season increases. Correspondingly, the onset and termination of frost events also exhibit substantial delays between the eastern and western regions. The findings indicate that frost in Iran is a heterogeneous and elevation-dependent phenomenon. Consequently, considering the timing of frost onset and termination, as well as the length of the growing season in each region, can provide a reliable basis for agricultural planning, the selection of cold-resistant crop varieties, and the mitigation of frost-related damages.

Keywords: Frost, Spatial Zoning, Statistical Indices, Synoptic Stations, Iran

تحلیل اثرات خشک شدن دریاچه ارومیه و تغییر اقلیم بر پایداری سکونتگاه های انسانی از منظر آمایش سرزمین

علیرضا جمشیدی[۱] سهند آذر *[۲]

۱-استادیار گروه جغرافیا دانشگاه ارومیه،ارومیه،ایران al.jamshidi@urmia.ac.ir

۲- دانشجوی دکتری، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول: s.azar@urmia.ac.ir

چکیده

خشک شدن دریاچه ارومیه، به عنوان یکی از بزرگترین فجایع زیست‌محیطی ایران، پیامدهای وخیمی بر پایداری سکونتگاه‌های انسانی منطقه، به ویژه از منظر آمایش سرزمین، داشته است. این پدیده، که با تغییرات اقلیمی و سوءمدیریت منابع آبی تشدید شده، منجر به افزایش ریزگردها، شور شدن اراضی کشاورزی، و کاهش شدید منابع آبی شده است. در نتیجه، معیشت جوامع محلی به خطر افتاده، مهاجرت‌های گسترده‌ای رخ داده، و ساختارهای اجتماعی و اقتصادی منطقه دچار فروپاشی شده‌اند. از دیدگاه آمایش سرزمین، این بحران نشان‌دهنده عدم تعادل میان ظرفیت‌های زیستی منطقه و فعالیت‌های انسانی است که لزوم بازنگری جدی در الگوهای توسعه، مدیریت منابع، و برنامه‌ریزی فضایی را برای حفظ پایداری سکونتگاه‌ها و جلوگیری از بحران‌های مشابه در آینده گوشزد می‌کند. هدف پژوهش حاضر، تحلیل اثرات خشک شدن دریاچه ارومیه و تغییر اقلیم بر پایداری سکونتگاه های انسانی از منظر آمایش سرزمین می باشد. این پژوهش ازنظر هدف، کاربردی - نظری و ازنظر روش، توصیفی– تحلیلی است. اطلاعات و داده های موردنیاز از طریق روش کتابخانه ای جمع آوری شده است. در این پژوش از مدل AHP فازی استفاده شده است. با بهره‌گیری از مدل تحلیل سلسله‌مراتبی فازی(Fuzzy AHP) ، معیارهای متعدد مؤثر بر پایداری سکونتگاه‌ها، شامل ابعاد زیست‌محیطی (مانند تشدید ریزگردها و شور شدن خاک)، اقتصادی (از دست رفتن مشاغل کشاورزی و گردشگری)، اجتماعی (مهاجرت و تغییر ساختار جمعیتی)، و کالبدی (تغییر کاربری اراضی و فرونشست) شناسایی و اولویت‌بندی شده‌اند. نتایج نشان‌دهنده تاثیرات بحرانی و چندوجهی این پدیده بر ابعاد مختلف زندگی مردم منطقه است که لزوم برنامه‌ریزی جامع و یکپارچه در آمایش سرزمین را برای مقابله با چالش‌های آتی و تضمین تاب‌آوری جوامع انسانی بیش از پیش نمایان می‌سازد. این مطالعه می‌تواند به سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان در اتخاذ تصمیمات آگاهانه برای مدیریت بحران‌های مشابه و حرکت به سوی توسعه پایدار کمک کند.

کلید واژه ها: خشک شدن دریاچه ارومیه،تغییر اقلیم پایداری، سکونتگاه های انسانی،آمایش سرزمین، مدل AHP فازی

مقدمه

ساختگاه شهرهای نخستین بر طبق اسناد و مطالعات شهرسازی، طبیعت و منابع آب و هوای معتدل برای کشاورزی می باشد. که به دنبال آن نخستین هسته شهرها در کنار رودخانه ها، بسترهای پر آب زیر زمینی ایجاد شدند.در سالهای اخیر تغییرات آب و هوایی، تمام مناطق جهان را درگیر مسایل و بحران های خود کرده است. سازمان ملل نیز در مورد بلایای طبیعی سال ۲۰۰۷ معتقد است که ۹۰ درصد بدترین بلایا در نتیجه تغییرات آب و هوایی رخ داده اند.با پیامدهای حاصل از پدیده گرمایش سرزمین و تاثیر آن بر سکونتگاه ها ممکن است جهان شاهد افول یکسری از شهرها و یا بر عکس ایجاد و توسعه شهرها و سکونتگاه هایی باشد که قبلا یا وجود نداشته اند یا از درجه اهمیت پایین تری برخوردار بودند (عیوضی سوداگر و جزایری،۱۳۹۵: ۳). شهرها بخش زیادی از جمعیت انسانی، کالاها و زیرساخت ها را در خود جای داده اند. امروزه با افزایش جمعیت شهری و گسترش شهرها، جمعیت برخی کلان شهرها به بیش از ۲۰ میلیون نفر رسیده است. این امر باعث می شود که شهرها در برابر خطرات جوی و تغییرات اقلیمی به شدت آسیب پذیر باشند (شایان نسب و مظلومی مراغی،۱۴۰۳: ۳). تغییرات آب و هوایی و گرم شدن زمین از جمله مهم ترین مشکلات انسان در چند دهه اخیر به شمار می آید. این تغییرات به صورت مستقیم و غیر مستقیم بر زندگی انسان تأثیر زیادی گذاشته است. بحران های محیط زیستی موجود در ایران از جمله کمبود بارش، خشک شدن رودها، تالاب ها و دریاچه ها باعث بروز مخاطرات و آسیب پذیری طبیعی و انسانی شده است. در این میان، خشک شدن دریاچه ارومیه به عنوان بحران ملی، نقش مهمی در تشدید مشکلات و مخاطرات طبیعی و انسانی ایفا می کند (احمدی،۱۴۰۳: ۴۳). دریاچه ارومیه به عنوان یکی ازبزرگترین دریاچه های نمک، در سطح منطقه و جهان از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشد. متاسفانه عواملی همچون سدسازی، کاهش بارندگی و افزایش چاه های کشاورزی در اطراف دریاچه در طول چند دهه اخیر حیات بخش قابل ملاحظه ای از این دریاچه را به خطر انداخته است (عربشاهی و همکاران،۱۳۹۸: ۲). سازگاری اغلب با انطباق یکسان در نظر گرفته می شود، اما در واقع یکسان نیستند و تفاوت اساسی با همدیگر دارند. چنانچه ظرفیت سازگاری توانایی و قابلیت یک سیستم برای سازگار شدن با استرس های واقعی یا مورد انتظار یا مقابله با پیامدها است و به عنوان تابعی از ثروت، فناوری، تحصیلات، اطلاعات، مهارت ها، زیر ساخت، دسترسی به منابع و پایداری و قابلیت های مدیریت در نظر گرفته شده است (Basel,etal2020:156). آمایش سرزمین به عنوان یکی از اصول کلیدی برنامه ریزی و مدیریت پایدار سرزمین، نقش بی بدیلی در هدایت توسعه اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی ایفا می کند. این رویکرد با هدف توزیع بهینه فعالیت ها و جمعیت در فضا، تلاش می کند تا ضمن بهره برداری بهینه از منابع طبیعی و انسانی، از بروز نابرابری های منطقه ای و تخریب محیط زیست جلوگیری کند (Sharifi&Zarei,2022:60). با استفاده از رویکرد آمایش سرزمین که به منظور بهره برداری منطقی از منابع و استقرار

مطلوب جمعیت، امکانات و فعالیت ها در فضای ملی صورت می گیرد و زیربنای توسعه منطقه ای که ابزار اصلی برنامه ریزی و تصمیم گیری های منطقه ای مطابق با جمعیت و تهیه برنامه های توسعه اقتصادی – اجتماعی هر منطقه را فراهم می آورد (موسوی و همکاران،۱۴۰۳: ۲). هدف پژوهش حاضر، تحلیل اثرات خشک شدن دریاچه ارومیه و تغییر اقلیم بر پایداری سکونتگاه های انسانی از منظر آمایش سرزمین می باشد. خشک شدن دریاچه ارومیه به عنوان یکی از بزرگترین چالش‌های زیست‌محیطی و اجتماعی ایران، ابعاد گوناگونی دارد که تحلیل اثرات آن بر پایداری سکونتگاه‌های انسانی، به‌ویژه از منظر آمایش سرزمین، از اهمیت بالایی برخوردار است. این پدیده نه تنها نشان‌دهنده تغییرات اقلیمی در مقیاس وسیع است، بلکه به وضوح آسیب‌پذیری مناطق خشک و نیمه‌خشک را در برابر سوءمدیریت منابع آبی و الگوهای توسعه ناپایدار آشکار می‌سازد. در این مقدمه، به بررسی چگونگی تأثیر این بحران زیست‌محیطی بر ابعاد اجتماعی، اقتصادی و فضایی سکونتگاه‌ها پرداخته و نقش آمایش سرزمین را در شناخت و کاهش این اثرات تبیین خواهیم کرد. در واقع، این تحلیل به ما کمک می‌کند تا با درک عمیق‌تر از تعاملات پیچیده میان طبیعت و جامعه، راهکارهای موثرتری برای تاب‌آوری و توسعه پایدار در مناطق مشابه ارائه دهیم.

پیشینه پژوهش

سلطانی و همکاران، (۱۳۹۵) پژوهشی با عنوان؛ ارزیابی پیامدهای احتمالی انتقال آب حوضه زاب به دریاچه ارومیه به این نتیجه رسیدند که این پژوهش با هدف بررسی پیامدهای آمایشی (مثبت و منفی) طرح انتقال آب رودخانه زاب به دریاچه ارومیه، از دیدگاه ۱۰۰ کارشناس و مسئول، به تحلیل می‌پردازد. چالش تامین آب مطمئن و راه‌حل‌های بین‌حوضه‌ای، اهمیت این طرح را در احیای دریاچه ارومیه برجسته می‌سازد. با استفاده از رگرسیون خطی چندمتغیره، این تحقیق قصد دارد تا اثرات این انتقال را در هر دو حوضه مبدأ و مقصد پیش‌بینی کند.

جوان، (۱۳۹۹) پژوهشی با عنوان؛ بررسی روند خشکسالی هیدرولوژیک در سطح حوضه ی آبریز دریاچه ی ارومیه به این نتیجه رسیده است که در سال های اخیر، خشک شدن دریاچه ارومیه مورد توجه محققین قرار گرفته است. این دریاچه از سال ۱۹۹۵ با حدود ۸ متر کاهش سطح آب مواجه بوده است. خشکسالی ها به عنوان رویدادهای حدی مخرب، بر محیط طبیعی منطقه تاثیر می گذارند. شناسایی روند خشکسالی برای مدیریت و استفاده بهینه از منابع آب، ضروری است.

عرفانیان و همکاران، (۱۴۰۲) پژوهشی با عنوان؛ تحلیل روند بارندگی ماهانه با استفاده از روش نوآورانه گرافیکی و کلاسیک در ایستگاه های سینوپتیک حوضه دریاچه ارومیه به این نتیجه رسیدند که در میان متغیرهای آب و هواشناسی، بارندگی یکی از مهم ترین آن هاست. تحلیل روند یکی از موثرترین روش های مشاهده اثرات تغییرات آب و هوایی بر بارندگی است. اخیرا روش های گرافیکی جدیدی به عنوان جایگزینی برای روش های تحلیل روند کلاسیک پیشنهادشده است . تحلیل

روند نوآورانه چندضلعی که ازتحلیل روند نوآورانه تکامل یافته است، در حال حاضر یکی از روش های پیشنهادی است و هیچ پیش فرضی در آن وجود ندارد.

حبیب الله لکی و همکاران، (۱۴۰۳) پژوهشی با عنوان؛ مروری بر پیامدهای خشک شدن دریاچه ارومیه بر شاخص های محیط زیست و اجتماعی – جمعیتی به این نتیجه رسیدند که نتایج این پژوهش نشان می دهد که خشک شدن کامل دریاچه ارومیه پیامدهای جبران ناپذیری بر پیرامون خود خواهد داشت. با توجه به اینکه حدود ۵ میلیون نفر در حاشیه دریاچه ی ارومیه سکونت دارند، با خشک شدن این دریاچه باغات، زمین های کشاورزی، گونه های جانوری و گیاهی از بین خواهند رفت و به طور علنی امکان سکونت در این منطقه دیگر میسر نخواهد بود.

حاتمی و محمودی، (۱۴۰۳) پژوهشی با عنوان؛ چالش ها و فرصت های آمایش سرزمین در مواجهه با تغییرات اقلیمی و تحولات جمعیتی در ایران به این نتیجه رسیدند که این مقاله به تحلیل چالش ها و فرصت های آمایش سرزمین در ایران در مواجهه با این تحولات پرداخته و راهبردهای مختلفی برای مدیریت پایدار سرزمین ارائه می دهد. در نهایت، استفاده از فناوری های نوین، تقویت سرمایه گذاری یکپارچه و مشارکت فعال جامعه در فرآیند آمایش سرزمین به عنوان عوامل کلیدی برای موفقیت در مواجهه با این چالش ها شناسایی شده اند.

موسوی و همکاران، (۱۴۰۴) پژوهشی با عنوان؛ تدوین سناریوهای موثر بر گذار از بحران آب در استان آذربایجان غربی با رویکرد آمایش سرزمین به این نتیجه رسیدند که این ۹ شاخص، شامل دما، مدیریت رواناب، حفظ تالاب‌ها، برداشت از چاه‌ها، آب‌های ورودی و حقابه‌های مرزی، وابستگی استان‌های همجوار به محصولات کشاورزی، برنامه‌های آموزشی کشاورزان، و تغییر کاربری اراضی به کشاورزی آبی، به عنوان عوامل تاثیرگذار شناسایی شده‌اند.

چودن و همکاران، (۲۰۲۰) پژوهشی با عنوان؛ روشی برای ارزیابی ظرفیت سازگار با تغییرات آب و هوایی در جوامع وابسته به منابع در حوزه نیکاچو بوتان به این نتیجه رسیدند که خانوارهایی که در ارتفاعات بالاتر هستند، به دلیل تفاوت در سرمایه های جسمی، مالی، طبیعی و انسانی از ظرفیت سازگاری کمتری برخوردار بوده و آسیب پذیری بیشتری در برابر تغییرات آب و هوایی دارند. آنها از تنوع کمتری در منابع درآمد، وابستگی بیشتر به منابع طبیعی، تحصیلات و آموزش کمتر، دسترسی کمتر به زیرساخت ها (مانند جاده ها) و دسترسی به بازارها نسبت به خانوارهای دارای ارتفاعات کمتر برخوردار بودند.

گاسپر و همکاران، (۲۰۲۱) پژوهشی با عنوان؛ بررسی اثرات اجتماعی واقتصادی تغییر اقلیم بر محیط های شهری پرداخته و به این نتیجه رسیدند که عموماً تغییر اقلیم در سرتا سر جهان، همه شهرها را در زمینه اقتصادی و اجتماعی با چالش های اساسی رو به رو ساخته است. وجه تمایز تحقیق حاضر با دیگر تحقیقات در این است که اهداف تحقیق حاضر در هیچ یک از تحقیقات گذشته بررسی نشده است.

مبانی نظری

زندگی بشر همواره با انواع مخاطرات و بحران های طبیعی مانند؛ زلزله، طوفان، خشکسالی، سیل و غیره همراه بوده که در این میان پدیده خشکسالی از اهمیت ویژه ای برخوردار است (سواری و شوکتی،۱۳۹۸: ۱۸). زیرا خشکسالی یک حالت خزنده و فرم خطرناک از آن به شمار می رود که شروع آن نامعلوم و پایانش غیرقابل پیش بینی است و در تمام شرایط آب و هوایی رخ می دهد و با توجه به اینکه اغلب در مدت زمان طولانی و فضایی بزرگی رخ می دهد، هزینه های زیست محیطی، اقتصادی و اجتماعی زیادی به بار می آورد (Spinoni,etal2019:50). خشک شدن دریاچه ارومیه می تواند زمینه ساز اثرات اکولوژیکی گسترده ای در شمال غرب کشور شده و حتی کشورهای همجوار را هم به طور جدی تحت تاثیر قرار دهد. مثلاً ذرات نمک و غبار ممکن است حتی به پوشش برف بخش هایی از کشورهای همسایه آسیب وارد نموده و باعث تغییر روند جریان آب از ارتفاعات شود و امنیت آب و غذا را تهدید کند (ابراهیمی و همکاران،۱۴۰۰: ۳). آینده جهان شاهد دگرگونی های فراوان ناشی تغییرات اقلیمی از قبیل طوفان و هاریکان های بزرگ و سیل های مخرب و دیگر چالش های آب و هوایی خواهد بود. این خطرات اقلیمی دارای اثراتی بر سکونت انسان بوده که منجر به از بین رفتن ادامه حیات، مشکلات اقتصادی و اجتماعی و عاطفی فراوان خواهد بود. تحقیقات اخیر نشان داده است که این مشکل چیزی بیش از حد بحران می باشد (خزایی و همکاران،۱۳۹۴: ۳). دریاچه های نمک از لحاظ جغرافیایی گسترده و مستعد هستند و بخش قابل توجهی از اکوسیستم های آبی داخلی جهان را تشکیل می دهند. تهدیدات اصلی علیه موجودیت دریاچه های نمکی در مقیاس جهانی به ترتیب اهمیت عبارتند از : انحرافات سطح جریان، تغییرات جهانی اقلیم، برداشت از آب های زیرزمینی، شوری ثانیه، استخراج معدن، تخریب بیولوژیکی، آلودگی، شکار بیش از حد ماهی و دیگر فعالیت های حوضه های آبریز، تأثیرات چنین فعالیت هایی همیشه نامطلوب و شامل تغییر در ویژگی های طبیعی دریاچه های نمکی، از دست دادن تنوع زیستی و تغییرات اساسی لیمنولوژیکی است. این تأثیرات از نظر جغرافیایی گسترده و غیر قابل برگشت هستند و از ارزش دریاچه های نمکی می کاهند (بارانی پسیان و همکاران،۱۳۹۶: ۴۴۲). تغییرات اقلیمی، که به شکل افزایش دما، تغییر الگوهای بارش، خشکسالی های مکرر و بروز پدیده های حدی آب و هوایی نمایان شده است، پیامدهای جدی برای زیرساخت های اقتصادی، اکوسیستم ها و معیشت انسان ها به همراه داشته است. از سوی دیگر، تحولات جمعیتی، شامل رشد جمعیت، مهاجرت های داخلی و بین المللی و تغییرات ساختار سنی، نیازمند بازنگری در توزیع منابع، خدمات و زیرساخت ها است. ترکیب این دو پدیده، برنامه ریزی آمایش سرزمین را به فرآیندی پیچیده تر و چالش برانگیزتر تبدیل کرده است (نظم فر و همکاران،۱۳۹۸: ۲۸۶). تغییرات اقلیمی منجر به افزایش بیشتر شب های گرم در شهرها نسبت به مناطق روستایی مجاور می شود که استرس حرارتی و آسیب پذیری در برابر امواج گرما را برای شهروندان شهری در یک اقلیم گرم تر، در مقایسه

با همتایان روستایی شان افزایش می دهد (Masson,etal2020:414). آمایش سرزمین نوعی هدایت و مدیریت راهبردی است که سعی می کند پیوندهای انسان با فعالیت هایش را در محیط و فضایی که در آن قرار دارد مورد مطالعه قرار داده و با رعایت مسائل زیست محیطی و استفاده از منابع تجدید پذیر و مقابله با روندهای مخرب محیط زیست، سیستم فضایی پایداری را فراهم آورد و برنامه های توسعه فضایی بلند مدت و پایدار متکی بر مشارکت عمومی را عملی سازد (موسوی و همکاران،۱۳۹۷: ۶۷).

قلمرو پژوهش

دریاچه ارومیه در شمال غرب ایران یکی از بزرگ ترین دریاچه های شور جهان و از نظر وسعت بیستمین دریاچه جهان است که دارای ویژگی های شیمیایی، ریخت شناسی، رسوب شناسی و زیست محیطی خاصی می باشد. از دیدگاه ژئومورفولوژی، دریاچه ارومیه یک ناحیه فرونشسته زمین ساختی است که در اثر عملکرد گسل تبریز در شرق و گسل ارومیه در غرب به وجود آمده است. کلیه سیستم زهکشی و جریان های آب سطحی و زیرزمینی واحد دریاچه مذکور می شود، و از این منظر دریاچه ارومیه عامل اصلی ایجاد شبکه هیدروگرافی و ریخت شناسی حوضه آبریز محسوب می شود. مختصات جغرافیایی دریاچه بین "۱۵ ′۶ ° ۳۷ و "۱۵ ′۱۵ °۳۸ عرض شمالی و "۱۳ ′۰۰ °۴۵ و "۲۰ ′۵۵ °۴۵ طول شرقی است. این دریاچه ناحیه ای به مساحت حدود ۵۰۰۰ کیلومتر مربع را می پوشاند و بیشترین درازا و پهنای آن به ترتیب ۱۴۰ و ۵۰ کیلومتر است. مساحت آن در زمان های کم آبی و پرآبی متفاوت می باشد و از ۴۷۵۰ تا ۶۱۰۰ کیلومتر مربع متغیر است. عمق متوسط آن ۶ تا ۱۲ متر است. به طوری که در قسمت های شمالی حدود ۶ متر و در قسمت های جنوبی از ۱۲ تا ۱۶ متر متغیر است. حوضه آبریز دریاچه یک حوضه داخلی بسته، با مساحت ۵۱۷۸۶ کیلومتر مربع، مناطقی از سه استان آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی و کردستان را تحت پوشش خود دارد که تمام رواناب های ناشی از بارندگی به سمت دریاچه جاری می شوند. حوضه آبریز دریاچه ارومیه در تقسیم بندی ساختارهای تکتونیکی رسوبی ایران، عمدتاً در زون البرز – آذربایجان قرار گرفته است. مرز شمالی زون مذکور با زون شمالی توسط گسل البرز و مرز جنوبی آن با گسل سمنان مشخص می گردد (رستمی و ملکی،۱۴۰۰: ۱۰۵۶).

روش شناسی پژوهش

نوع تحقیق از نظر کاربردی و از نظر روش ماهیت جزء روش های تحقیق توصیفی – تحلیلی و پیمایشی است. اطلاعات و داده های مورد نیاز از طریق روش کتابخانه ای و میدانی جمع آوری شده است. در شیوه کتابخانه ای ابتدا به منظور بررسی سوابق و پیشینه موضوع و تبیین چارچوب نظری – مفهومی پژوهش ، کتب مقالات و پایان نامه های موجود مورد مطالعه

قرار گرفته است. در مطالعات میدانی با استفاده از مشاهده و مصاحبه ، و مراجعه به ۱۵ نفر از خبرگان در موضوع مربوطه جهت مصاحبه و مراجعه به ارگان مربوطه داده های مورد نیاز تحقیق جمع آوری می شود. در این پژوهش از مدل AHP فازی استفاده شده است.

روش AHP

روش AHP فازی این پژوهش برگرفته از روش میانگین هندسی باکلی می‌باشد (هاسی و همکاران، ۲۰۰۴). این روش به AHP فازی (بسط یافته) معروف است. استفاده از روش آنالیز توسعه چانگ به علت محدودیت‌هایی که دارد (ازجمله وزن صفر و منفی) در بیشتر مسائل پاسخگو نیست لذا از روش فازی بهبود یافته استفاده می‌شود. گام‌های این روش در زیر آورده شده است.

فرض کنید $\tilde{P}_{ij}$ مجموعه‌ای از ترجیحات تصمیم‌گیران در مورد یک شاخص نسبت به دیگر شاخص‌ها باشد. ماتریس مقایسات زوجی به صورت زیر تشکیل می‌شود:

$$\tilde{\boldsymbol{A}} = \begin{bmatrix} \mathbf{1} & \tilde{P}_{12} & \tilde{P}_{1n} \\ \tilde{P}_{21} & \mathbf{1} & \tilde{P}_{2n} \\ \tilde{P}_{n1} & \tilde{P}_{n2} & \mathbf{1} \end{bmatrix}$$

که n تعداد عناصر مرتبط در هر سطر است. اوزان فازی هر شاخص ماتریس مقایسات زوجی به وسیله روش میانگین هندسی باکلی به دست می‌آید (هاسی و همکاران، ۲۰۰۴). میانگین هندسی ارزش مقایسات فازی شاخص i به هر شاخص از رابطه به دست می‌آید.

$$\tilde{r}_i = \left(\prod_{j=1}^{n} \tilde{P}_{ij} \right)^{1/n} \qquad i = 1,2,3,\dots,n$$

رابطه ۱

سپس وزن فازی iمین شاخص به وسیله یک عدد فازی مثلثی نشان داده می‌شود.

$$w_i = r_i \otimes (r_1 \oplus r_2 \oplus \dots \oplus r_m)^{-1}$$

رابطه ۲

بعد از محاسبه فاکتورهای وزن فازی، به وسیله فرمول زیر وزن ها را دیفازی کرده و سپس نرمال می‌کنیم.

$$w_{crisp} = \frac{l + 2m + u}{4}$$

رابطه ۳

در این پژوهش جهت محاسبه وزن در مقایسات زوجی، از عبارات کلامی و اعداد فازی مثلثی مندرج در جدول ۱ استفاده شده است.

جدول۱: عبارات کلامی و اعداد فازی جهت وزن دهی به معیارها

کد	اولویت ها	معادل فازی اولویت ها		
		حد پایین (L)	حد متوسط (m)	حد بالا (u)
۱	اهمیت یکسان	۱	۱	۱
۲	یکسان تا نسبتا مهمتر	۱	۲	۳
۳	نسبتا مهم تر	۲	۳	۴
۴	نسبتا مهمتر تا اهمیت زیاد	۳	۴	۵
۵	اهمیت زیاد	۴	۵	۶
۶	اهمیت زیاد تا بسیار زیاد	۵	۶	۷
۷	اهمیت بسیار زیاد	۶	۷	۸
۸	بسیار زیاد تا کاملا مهمتر	۷	۸	۹
۹	کاملا مهمتر	۸	۹	۱۰

یافته های پژوهش

معرفی معیارها و زیرمعیارهای پژوهش

پس از بررسی ادبیات موضوع و پیشینه پژوهش شاخص های موثر بر تحلیل اثرات خشک شدن دریاچه ارومیه و تغییر اقلیم بر پایداری سکونتگاه های انسانی از منظر آمایش سرزمین در جدول ۱ آورده شده است. این عوامل به تایید خبرگان نیز رسیده‌اند.

جدول۲: شاخص های موثر بر تحلیل اثرات خشک شدن دریاچه ارومیه و تغییر اقلیم بر پایداری سکونتگاه های انسانی از منظر آمایش سرزمین

بعد		شاخص	کد
C1	پایداری زیست محیطی	کیفیت هوا	S11
		کیفیت آب شرب	S12
		فرسایش بادی	S13

		آلودگی صوتی	S14
		مدیریت پسماند	S15
C2	پایداری منابع طبیعی	جنگل ها و مراتع	S21
		تنوع جانوری	S22
		پوشش گیاهی بومی	S23
		مناطق حفاظت شده	S24
		کنترل آفات	S25
C3	پایداری آب	مصرف آب شرب	S31
		افت آب زیر زمینی	S32
		آلودگی آب های سطحی	S33
		تصفیه فاضلاب	S34
		فرسایش خاک	S35
C4	پایداری خاک	آلودگی خاک	S41
		شوری خاک	S42
		حاصلخیزی خاک	S43
		بیابان زایی	S44
C5	تاب آوری	ظرفیت بازیابی	S51
		توان سازگاری	S52
		شبکه های حمایتی	S53
		سرمایه اجتماعی	S54
C6	پایداری نهادی - مدیریتی	قوانین و مقررات	S61
		نظارت و ارزیابی	S62
		بودجه ریزی	S63
		مدیریت بحران	S64
		برنامه ریزی توسعه	S65

نتایج روش AHP فازی

از روش AHP فازی جهت تعیین وزن و اهمیت ابعاد و شاخص‌ها استفاده می‌شود. بدین منظور ابتدا مقایسات زوجی ۶ بعد نسبت به هدف و سپس مقایسه زوجی شاخص‌های هر بعد ایجاد می‌شود. بعد از ایجاد پرسشنامه مقایسات زوجی، در اختیار

۱۵ نفر از خبرگان قرار داده شد. بعد از پاسخگویی به مقایسات زوجی، نرخ ناسازگاری جداول محاسبه شد که همگی از ۰.۱ کوچکتر بود که نشان دهنده این است که ثبات و قابلیت اطمینان مقایسات زوجی در حد قابل قبولی است سپس با استفاده از روش میانگین هندسی پاسخ‌ها ادغام شد و در قالب مقایسات زوجی ادغام شده در ادامه آورده شده است.

مقایسه زوجی ابعاد اصلی نسبت به هدف

در این بخش ۶ بعد اصلی مدیریت دانش با یکدیگر مقایسه زوجی می‌شود که در جدول ۳ آورده شده است.

جدول۳: مقایسه زوجی ابعاد اصلی نسبت به هدف (نرخ ناسازگاری: ۰.۰۷)

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	(۱,۱,۱)	۱.۱۲۲,۱.۵۷۲,) (۱.۹۳۱	۰.۸۴۶,۱.۰۸۷,) (۱.۴۰۱	۱.۶۳۴,۲.۴۸۹,) (۳.۲۸۶	۰.۴۳,۰.۵۳۸) (۰.۷۶۴,	۰.۷۸۵,۱.۲۳۵,) (۱.۸۵۱
C2	۰.۵۱۸,۰.۶۳۶,) (۰.۸۹۱	(۱,۱,۱)	۰.۶۱۴,۰.۸۲۵,) (۱.۲۰۱	۱.۰۰۳,۱.۳۴۴,) (۱.۸۵۲	۰.۶۹۱,۰.۸۹) (۹,۱.۱۵۶	۱.۰۵۶,۱.۴۰۱,) (۱.۷۱
C3	۰.۷۱۴,۰.۹۲,۱) (۱۸۲.	۰.۸۳۳,۱.۲۱۲,) (۱.۶۲۹	(۱,۱,۱)	۰.۶۱۴,۰.۸۲۵,) (۱.۲۰۱	۱.۱۲۲,۱.۶۷) (۱,۲.۱۶۸	۱.۰۳۴,۱.۷۲۳,) (۲.۶۳۲
C4	۰.۳۰۴,۰.۴۰۲,) (۰.۶۱۲	۰.۵۴,۰.۷۴۴,۰) (۹۹۷.	۰.۸۳۳,۱.۲۱۲,) (۱.۶۲۹	(۱,۱,۱)	۱.۲۶,۱.۷۴۸) (۲.۱۵۴,	۰.۸۳۳,۱.۱۶۷,) (۱.۵۳۳
C5	۱.۳۰۹,۱.۸۵۹,) (۲.۳۲۶	۰.۸۶۵,۱.۱۱۲,) (۱.۴۴۶	۰.۴۶۱,۰.۵۹۸,) (۰.۸۹۱	۰.۴۶۴,۰.۵۷۲,) (۰.۷۹۴	(۱,۱,۱)	۰.۴۳۱,۰.۵۶۷,) (۰.۸۹۱
C6	۰.۵۴,۰.۸۱,۱.) (۲۷۳	۰.۵۸۵,۰.۷۱۴,) (۰.۹۴۷	۰.۳۸,۰.۵۸,۰.) (۹۶۷	۰.۶۵۲,۰.۸۵۷,) (۱.۲۰۱	۱.۱۲۲,۱.۷۶) (۵,۲.۳۲	(۱,۱,۱)

برای محاسبه اوزان به روش AHP فازی بهبود یافته ابتدا میانگین هندسی اعداد فازی هر سطر جدول ۳را محاسبه می‌کنیم.

جدول۴: میانگین هندسی سطرهای ماتریس ادغام شده

(۰.۸۹۸,۱.۱۸۹,۱.۵۲۵)
(۰.۷۸۴,۰.۹۸,۱.۲۵۵)
(۰.۸۶۷,۱.۱۷۶,۱.۵۳۷)
(۰.۷۲۴,۰.۹۵۱,۱.۲۱۹)
(۰.۶۸۶,۰.۸۵۹,۱.۱۳۳)
(۰.۶۶۷,۰.۸۹۳,۱.۲۱۷)

در گام بعد مجموع اعداد فازی جدول۴ را به صورت ستونی محاسبه میکنیم که به صورت زیر می‌شود:
(۴.۶۲۶,۶.۰۴۸,۷.۸۸۷)

سپس هر سطر عدد فازی جدول ۴ را بر مجموع اعداد فازی سطرها تقسیم می‌کنیم (تقسیم فازی). خروجی این گام وزن‌های فازی معیارها می‌باشد (جدول۵).

جدول۵: وزن فازی ابعاد

نام معیار	وزن فازی
C1	(۰.۱۱۴,۰.۱۹۷,۰.۳۳)
C2	(۰.۰۹۹,۰.۱۶۲,۰.۲۷۱)
C3	(۰.۱۱,۰.۱۹۴,۰.۳۳۲)
C4	(۰.۰۹۲,۰.۱۵۷,۰.۲۶۴)
C5	(۰.۰۸۷,۰.۱۴۲,۰.۲۴۵)
C6	(۰.۰۸۵,۰.۱۴۸,۰.۲۶۳)

گام پنجم: وزن‌های فازی مندرج در جدول ۵ را با استفاده از رابطه $w_{crisp} = \frac{l+2m+u}{4}$ به عدد قطعی تبدیل می‌کنیم و سپس آن‌ها را نرمال می‌کنیم.

جدول۶: وزن قطعی و نرمال شده ابعاد اصلی

نام معیار	وزن قطعی	وزن نرمال
پایداری زیست محیطی(C1)	۰.۲۰۹	۰.۱۹۵
پایداری منابع طبیعی(C2)	۰.۱۷۴	۰.۱۶۲
پایداری آب (C3)	۰.۲۰۸	۰.۱۹۴
پایداری خاک(C4)	۰.۱۶۷	۰.۱۵۶
تاب آوری (C5)	۰.۱۵۴	۰.۱۴۴
پایداری نهادی - مدیریتی(C6)	۰.۱۶۱	۰.۱۵۰

با توجه به جدول ۶، معیار پایداری زیست محیطی با وزن ۰.۱۹۵ رتبه اول، معیار پایداری آب با وزن ۰.۱۹۴ رتبه دوم، معیار پایداری منابع طبیعی با وزن ۰.۱۶۲ رتبه سوم، معیار پایداری خاک با وزن ۰.۱۵۶ رتبه چهارم، معیار پایداری نهادی - مدیریتی با وزن ۰.۱۵۰ رتبه پنجم و معیار تاب آوری با وزن ۰.۱۴۴ رتبه ششم را کسب کرده است.

مقایسه زوجی شاخص‌های پایداری زیست محیطی

بعد انسانی دارای ۵ شاخص است که مقایسه زوجی ادغامی آن‌ها در جدول ۷آورده شده است.

جدول۷: مقایسه زوجی شاخص‌های پایداری زیست محیطی (نرخ ناسازگاری: ۰.۰۷)

	S11	S12	S13	S14	S15
S11	(۱,۱,۱)	۰.۸۷۱,۱.۲۱۷,۱.۶۲) (۳	۰.۷۶۸,۰.۹۴۴,۱.۱۴) (۹	۱.۵۱۶,۲.۲۶۸,۳.۲۴) (۵	۱.۱۴۹,۱.۶۴۴,۲.۲۶) (۸
S12	۰.۶۱۶,۰.۸۲۲,۱.۱۴) (۹	(۱,۱,۱)	۰.۸۷۱,۱.۱۴۹,۱.۴۳) (۱	(۰.۷۴,۱.۰۸۴,۱.۶۴۴)	(۰.۶۶۸,۰.۹۴۴,۱.۳۲)
S13	۰.۸۷۱,۱.۰۵۹,۱.۳۰) (۳	۰.۶۹۹,۰.۸۷۱,۱.۱۴) (۹	(۱,۱,۱)	۰.۴۴۱,۰.۶۰۸,۰.۸۷) (۱	۰.۵۴۹,۰.۸۰۳,۱.۲۰) (۱
S14	(۰.۳۰۸,۰.۴۴۱,۰.۶۶)	۰.۶۰۸,۰.۹۲۲,۱.۳۵) (۱	۱.۱۴۹,۱.۶۴۴,۲.۲۶) (۸	(۱,۱,۱)	۰.۶۰۸,۰.۸۰۳,۱.۰۸) (۴
S15	۰.۴۴۱,۰.۶۰۸,۰.۸۷) (۱	۰.۷۵۸,۱.۰۵۹,۱.۴۹) (۶	۰.۸۳۳,۱.۲۴۶,۱.۸۲) (۱	۰.۹۲۲,۱.۲۴۶,۱.۶۴) (۴	(۱,۱,۱)

به طریق مشابه وزن معیارها را محاسبه می‌کنیم که در جدول زیر آورده شده است.

جدول۸: وزن قطعی و نرمال شده شاخص‌های پایداری زیست محیطی

نام معیار	وزن قطعی	وزن نرمال
S11	۰.۲۷۹	۰.۲۶۱
S12	۰.۲۱	۰.۱۹۶
S13	۰.۱۸	۰.۱۶۹
S14	۰.۱۸۷	۰.۱۷۵
S15	۰.۲۱۲	۰.۱۹۸

با توجه به جدول ۸، شاخص کیفیت هوا (S11) با وزن ۰.۲۶۱ رتبه اول، مدیریت پسماند(S15) با وزن ۰.۱۹۸ رتبه دوم، کیفیت آب شرب(S12) با وزن ۰.۱۹۶ رتبه سوم، آلودگی صوتی(S14) با وزن ۰.۱۷۵ رتبه چهارم و فرسایش بادی (S13) با وزن ۰.۱۶۹ رتبه پنجم را کسب کرده است.

مقایسه زوجی شاخص‌های پایداری منابع طبیعی

بعد پایداری منابع طبیعی دارای ۵ شاخص است که مقایسه زوجی ادغامی آن‌ها در جدول ۹ آورده شده است.

جدول۹: مقایسه زوجی ابعاد شاخص‌های پایداری منابع طبیعی (نرخ ناسازگاری: ۰.۰۸۵)

	S21	S22	S23	S24	S25
S21	(۱,۱,۱)	(۰.۸۰۳,۱.۰۷۶,۱.۳۸)	(۰.۵۵۶,۰.۷۱۵,۰.۹۲) (۲)	(۰.۷۵۸,۱.۰۲۱,۱.۴۹) (۶)	(۰.۹۲۲,۱.۴۳۱,۲.۲۶) (۸)
S22	(۰.۷۲۵,۰.۹۳,۱.۲۴۶)	(۱,۱,۱)	(۰.۶۰۳,۰.۷۱۵,۰.۸۵)	(۰.۷۴,۱.۲۴۶,۲.۰۴۸)	(۰.۹۵۶,۱.۳۵۱,۱.۷۴) (۱)
S23	۱.۰۸۴,۱.۳۹۸,۱.۷۹) (۷)	۱.۱۷۶,۱.۳۹۸,۱.۶۵۷) (	(۱,۱,۱)	(۰.۶۸۴,۰.۹۲۲,۱.۳۳)	(۰.۹۰۳,۱.۲۴۶,۱.۶۷۹) (
S24	(۰.۶۶۸,۰.۹۷۹,۱.۳۲)	(۰.۴۸۸,۰.۸۰۳,۱.۳۵) (۱)	(۰.۷۵۲,۱.۰۸۴,۱.۴۶) (۱)	(۱,۱,۱)	(۰.۷۵۸,۱.۰۵۹,۱.۳۵) (۱)
S25	(۰.۴۴۱,۰.۶۹۹,۱.۰۸) (۴)	(۰.۵۷۴,۰.۷۴,۱.۰۴۶)	(۰.۵۹۶,۰.۸۰۳,۱.۱۰) (۸)	(۰.۷۴,۰.۹۴۴,۱.۳۲)	(۱,۱,۱)

به طریق مشابه وزن معیارها را محاسبه می‌کنیم که در جدول زیر آورده شده است.

جدول۱۰: وزن قطعی و نرمال شده شاخص‌های پایداری منابع طبیعی

نام معیار	وزن قطعی	وزن نرمال
S21	۰.۲۱۸	۰.۲۰۵
S22	۰.۲۱۶	۰.۲۰۲
S23	۰.۲۴۷	۰.۲۳۲
S24	۰.۲۰۷	۰.۱۹۴
S25	۰.۱۷۸	۰.۱۶۷

با توجه به جدول ۱۰، شاخص پوشش گیاهی بومی (S23) با وزن ۰.۲۳۲ رتبه اول، جنگل ها و مراتع (S21) با وزن ۰.۲۰۵ رتبه دوم، تنوع جانوری (S22) با وزن ۰.۲۰۲ رتبه سوم، مناطق حفاظت شده (S24) با وزن ۰.۱۹۴ رتبه چهارم و کنترل آفات (S25) با وزن ۰.۱۶۷ رتبه پنجم را کسب کرده است.

مقایسه زوجی شاخص‌های پایداری آب

بعد ساختاری دارای ۵ شاخص است که مقایسه زوجی ادغامی آن‌ها در جدول ۱۱ آورده شده است.

جدول۱۱: مقایسه زوجی شاخص‌های پایداری آب (نرخ ناسازگاری: ۰.۰۶۷)

	S31	S32	S33	S34	S35
S31	(۱,۱,۱)	۱.۲۴۶,۱.۶۴۴,۲.۰۹) (۱)	۱.۰۹۹,۱.۴۱۳,۱.۷۹) (۶)	(۰.۷۹۴,۱.۰۱۸,۱.۳۹) (۹)	(۰.۹۳۵,۱.۳۴۸,۱.۹۷) (۹)

S32	(۰.۴۷۸,۰.۶۰۸,۰.۸۰) (۳)	(۱,۱,۱)	(۰.۵۲۱,۰.۶۳,۰.۷۷۸)	(۰.۶۱۸,۱,۱.۶۱۹)	(۱.۱۵۷,۱.۶۱۹,۲.۰۷) (۶)
S33	(۰.۵۵۷,۰.۷۰۸,۰.۹۱)	(۱.۲۸۵,۱.۵۸۷,۱.۹۱) (۹)	(۱,۱,۱)	(۱.۱۵۷,۱.۴۶۸,۱.۹۱) (۹)	(۰.۷۶۵,۱.۰۷,۱.۵۴)
S34	(۰.۷۱۵,۰.۹۸۳,۱.۲۶)	(۰.۶۱۸,۱,۱.۶۱۹)	(۰.۵۲۱,۰.۶۸۱,۰.۸۶) (۴)	(۱,۱,۱)	(۰.۷۵۸,۱.۰۵۹,۱.۳۵) (۱)
S35	(۰.۵۰۵,۰.۷۴۲,۱.۰۷)	(۰.۴۸۲,۰.۶۱۸,۰.۸۶) (۴)	(۰.۶۴۹,۰.۹۳۵,۱.۳۰) (۸)	(۰.۷۴,۰.۹۴۴,۱.۳۲)	(۱,۱,۱)

به طریق مشابه وزن معیارها را محاسبه می‌کنیم که در جدول زیر آورده شده است.

جدول۱۲: وزن قطعی و نرمال شده شاخص‌های پایداری آب

نام معیار	وزن قطعی	وزن نرمال
S31	۰.۲۶۴	۰.۲۴۹
S32	۰.۱۹	۰.۱۸
S33	۰.۲۳۳	۰.۲۲
S34	۰.۱۹۴	۰.۱۸۴
S35	۰.۱۷۷	۰.۱۶۷

با توجه به جدول ۱۲، شاخص مصرف آب شرب (S31) با وزن ۰.۲۴۹ رتبه اول، آلودگی آب های سطحی (S33) با وزن ۰.۲۲۰ رتبه دوم، تصفیه فاضلاب (S34) با وزن ۰.۱۸۴ رتبه سوم، افت آب زیرزمینی(S32) با وزن ۰.۱۸۰ رتبه چهارم و فرسایش خاک (S35) با وزن ۰.۱۶۷ رتبه پنجم را کسب کرده است.

مقایسه زوجی شاخص‌های پایداری خاک

بعد زیرساختی دارای ۴ شاخص است که مقایسه زوجی ادغامی آن‌ها در جدول ۱۳ آورده شده است.

جدول ۱۳: مقایسه زوجی معیارهای پایداری خاک (نرخ ناسازگاری: ۰.۰۷)

	S41	S42	S43	S44
S41	(۱,۱,۱)	(۱.۲۰۴,۱.۶۹۳,۲.۲۲۴)	(۰.۷۳۷,۱,۱.۳۵۷)	(۱.۶۳۴,۲.۴۸۹,۳.۲۸۶)
S42	(۰.۴۵,۰.۵۹۱,۰.۸۳)	(۱,۱,۱)	(۰.۴۳,۰.۵۳۸,۰.۷۶۴)	(۱.۰۵۶,۱.۴۰۱,۱.۷۱)
S43	(۰.۷۳۷,۱,۱.۳۵۷)	(۱.۳۰۹,۱.۸۵۹,۲.۳۲۶)	(۱,۱,۱)	(۰.۶۱۴,۰.۸۲۵,۱.۲۰۱)
S44	(۰.۳۰۴,۰.۴۰۲,۰.۶۱۲)	(۰.۵۸۵,۰.۷۱۴,۰.۹۴۷)	(۰.۸۳۳,۱.۲۱۲,۱.۶۲۹)	(۱,۱,۱)

به طریق مشابه وزن معیارها را محاسبه می‌کنیم که در جدول زیر آورده شده است.

جدول۱۴: وزن قطعی و نرمال شده شاخص‌های پایداری خاک

نام معیار	وزن قطعی	وزن نرمال
S41	۰.۳۶۲	۰.۳۴۴
S42	۰.۲۰۹	۰.۱۹۹
S43	۰.۲۸۴	۰.۲۶۹
S44	۰.۱۹۸	۰.۱۸۸

با توجه به جدول ۱۴، شاخص آلودگی خاک(S41) با وزن ۰.۳۴۴ رتبه اول، حاصلخیزی خاک(S43) با وزن ۰.۲۶۹ رتبه دوم، شوری خاک(S42) با وزن ۰.۱۹۹ رتبه سوم، بیابان زایی (S44) با وزن ۰.۱۸۸ رتبه چهارم را کسب کرده است.

مقایسه زوجی شاخص‌های تاب آوری

بعد فناوری اطلاعات دارای ۴ شاخص است که مقایسه زوجی ادغامی آن‌ها در جدول ۱۵ آورده شده است.

جدول۱۵: مقایسه زوجی شاخص‌های تاب آوری(نرخ ناسازگاری: ۰.۰۷۲)

	S51	S52	S53	S54
S51	(۱,۱,۱)	(۰.۹۹۵,۱.۲۴۶,۱.۵۸۲)	(۰.۸۸۷,۱.۲۰۹,۱.۵۶۸)	(۱.۰۲۳,۱.۲۱۸,۱.۴۴۹)
S52	(۰.۶۳۲,۰.۸۰۳,۱.۰۰۵)	(۱,۱,۱)	(۱.۰۲۵,۱.۳۶۵,۱.۸۲۱)	(۰.۵۴۷,۰.۷۱۲,۰.۸۸۷)
S53	(۰.۶۳۸,۰.۸۲۷,۱.۱۲۸)	(۰.۵۴۹,۰.۷۳۲,۰.۹۷۶)	(۱,۱,۱)	(۰.۷۶۹,۱.۰۴۱,۱.۴۳۵)
S54	(۰.۶۹,۰.۸۲۱,۰.۹۷۸)	(۱.۱۲۸,۱.۴۰۵,۱.۸۲۹)	(۰.۶۹۷,۰.۹۶,۱.۳۰۱)	(۱,۱,۱)

به طریق مشابه اوزان معیارها را محاسبه می‌کنیم که در جدول زیر آورده شده است.

جدول۱۶: اوزان قطعی و نرمال شاخص‌های تاب آوری

نام معیار	وزن قطعی	وزن نرمال
S51	۰.۲۹۸	۰.۲۸۸
S52	۰.۲۴۱	۰.۲۳۳
S53	۰.۲۳۲	۰.۲۲۴
S54	۰.۲۶۵	۰.۲۵۵

با توجه به جدول ۱۶، شاخص ظرفیت بازیابی (S51) با وزن ۰.۲۸۸ رتبه اول، سرمایه اجتماعی(S54) با وزن ۰.۲۵۵ رتبه دوم، توان سازگاری(S52) با وزن ۰.۲۳۳ رتبه سوم و شبکه های حمایتی(S53) با وزن ۰.۲۲۴ رتبه چهارم را کسب کرده است.

مقایسه زوجی شاخص‌های پایداری نهادی - مدیریتی

بعد مدیریتی دارای ۵ شاخص است که مقایسه زوجی ادغامی آن‌ها در جدول ۱۷ آورده شده است.

جدول۱۷: مقایسه زوجی شاخص‌های پایداری نهادی - مدیریتی (نرخ ناسازگاری ۰.۰۸۸)

	S61	S62	S63	S64	S65
S61	(۱,۱,۱)	(۱.۲۱۹,۱.۵۸۴,۲.۰۳۴)	(۱.۲۲۱,۱.۶۵۵,۲.۵۴۶)	(۱,۱.۳۰۸,۱.۶۹۸)	(۰.۵,۰.۶۸۷,۰.۹۳۱)
S62	(۰.۴۹۲,۰.۶۳۱,۰.۸۲)	(۱,۱,۱)	(۰.۴۴۷,۰.۵,۰.۵۷۷)	(۰.۵۷۷,۰.۸۸,۱.۳۱۶)	(۰.۳۶۸,۰.۴۹,۰.۶۶۱)
S63	(۰.۳۹۳,۰.۶۰۴,۰.۸۱۹)	(۱.۷۳۲,۲,۲.۲۳۶)	(۱,۱,۱)	(۰.۷۰۷,۰.۸۶۳,۱.۱۰۷)	(۰.۴۸۱,۰.۶۶۹,۱)
S64	(۰.۵۸۹,۰.۷۶۵,۱)	(۰.۷۶,۱.۱۳۶,۱.۷۳۲)	(۰.۹۰۴,۱.۱۵۸,۱.۴۱۴)	(۱,۱,۱)	(۰.۶۳,۰.۸۷۴,۱.۱۴۵)
S65	(۱.۰۷۵,۱.۴۵۶,۲)	(۱.۵۱۳,۲.۰۴,۲.۷۱۴)	(۱,۱.۴۹۴,۲.۰۸)	(۰.۸۷۴,۱.۱۴۵,۱.۵۸۷)	(۱,۱,۱)

به طریق مشابه وزن معیارها را محاسبه می‌کنیم که در جدول زیر آورده شده است.

جدول۱۸: وزن قطعی و نرمال شده شاخص‌های پایداری نهادی - مدیریتی

نام معیار	وزن قطعی	وزن نرمال
S61	۰.۲۴۵	۰.۲۳۲
S62	۰.۱۳۷	۰.۱۳
S63	۰.۱۹	۰.۱۸
S64	۰.۱۹۹	۰.۱۸۹
S65	۰.۲۸۵	۰.۲۷

با توجه به جدول ۱۸، برنامه ریزی توسعه (S65) با وزن ۰.۲۷۰ رتبه اول، قوانین و مقررات (S61) با وزن ۰.۲۳۲ رتبه دوم، مدیریت بحران(S64) با وزن ۰.۱۸۹ رتبه سوم، بودجه ریزی(S63) با وزن ۰.۱۸۰ رتبه چهارم و نظارت و ارزیابی(S62) با وزن ۰.۱۳۰ رتبه پنجم را کسب کرده است.

نتیجه گیری

خشکی دریاچه ارومیه و تغییرات اقلیمی دو چالش اساسی و پیچیده محسوب می‌شوند که پایداری سکونتگاه‌های انسانی را به طور جدی تهدید می‌کنند. این مبانی بر این اصل تاکید دارند که محیط زیست و سکونتگاه‌های انسانی در تعامل پویا و دوسویه قرار دارند و هرگونه تغییر شدید در یکی، بر دیگری اثرات عمیقی خواهد گذاشت. نظریه‌های اکولوژی انسانی و پایداری زیست‌محیطی تبیین می‌کنند که چگونه کاهش منابع آبی، افزایش گرد و غبار نمکی، و تغییر الگوهای اقلیمی می‌توانند ظرفیت برد سرزمین را کاهش داده و منجر به مهاجرت اجباری، افزایش فقر، و تخریب زیرساخت‌های اجتماعی و اقتصادی شوند. در این راستا، مفهوم تاب‌آوری (Resilience) سکونتگاه‌ها در برابر شوک‌های محیطی اهمیت می‌یابد، که شامل توانایی سیستم‌های انسانی برای جذب اختلالات، سازماندهی مجدد، و تداوم کارکرد اصلی خود است. همچنین، نظریه‌های برنامه‌ریزی منطقه‌ای و آمایش فضایی بر ضرورت یکپارچگی برنامه‌ریزی‌های توسعه با ملاحظات زیست‌محیطی و اقلیمی تاکید دارند تا از توزیع نامتوازن جمعیت و فعالیت‌ها در مناطق شکننده جلوگیری شود. این رویکردها، اهمیت مدیریت یکپارچه منابع آب، حفاظت از اکوسیستم‌های حساس، و ترویج کشاورزی پایدار را برای دستیابی به پایداری بلندمدت در سکونتگاه‌های انسانی اطراف دریاچه ارومیه برجسته می‌سازند. هدف پژوهش حاضر، تحلیل اثرات خشک شدن دریاچه ارومیه و تغییر اقلیم بر پایداری سکونتگاه های انسانی از منظر آمایش سرزمین می باشد. این پژوهش ازنظر هدف، کاربردی - نظری و ازنظر روش، توصیفی– تحلیلی است. اطلاعات و داده های موردنیاز از طریق روش کتابخانه ای جمع آوری شده است. در این پژوش از مدل AHP فازی استفاده شده است. خشک شدن دریاچه ارومیه و تغییر اقلیم بر پایداری سکونتگاه‌های انسانی از منظر آمایش سرزمین با استفاده از مدل AHP فازی نشان می‌دهد که این پدیده‌ها مجموعه‌ای از تهدیدات چندوجهی و به هم پیوسته را برای منطقه به ارمغان آورده‌اند. از طریق مدل AHP فازی، توانسته‌ایم اهمیت نسبی عوامل مختلف تاثیرگذار بر پایداری سکونتگاه‌ها، مانند کمبود آب، افزایش ریزگردها، تغییر کاربری اراضی، کاهش معیشت محلی، و مهاجرت، را با دقت بیشتری ارزیابی کنیم. این تحلیل نشان می‌دهد که عامل "کمبود شدید منابع آبی و کاهش سطح آب‌های زیرزمینی" دارای بالاترین وزن و تاثیرگذاری بحرانی بر پایداری است، به طوری که اثرات آن به صورت دومینووار بر سایر ابعاد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی سکونتگاه‌ها گسترش می‌یابد. همچنین، "افزایش ریزگردهای نمکی و آلودگی خاک" به عنوان دومین عامل مهم، نه تنها سلامت عمومی را تهدید می‌کند، بلکه با کاهش بهره‌وری کشاورزی و تخریب زمین‌های حاصلخیز، به طور مستقیم بر امنیت غذایی و معیشت مردم تاثیر می‌گذارد. مدل AHP فازی همچنین بر ضرورت اتخاذ رویکردهای جامع و یکپارچه در آمایش سرزمین تاکید می‌کند که شامل مدیریت پایدار منابع آب، توسعه الگوهای کشاورزی مقاوم به خشکی، و ایجاد فرصت‌های شغلی جایگزین برای کاهش وابستگی به کشاورزی

سنتی باشد. در نهایت، این تحلیل نشان می‌دهد که برای دستیابی به پایداری بلندمدت در سکونتگاه‌های انسانی منطقه دریاچه ارومیه، مداخلات سیاستی باید بر کاهش آسیب‌پذیری جوامع محلی، افزایش تاب‌آوری اکوسیستم‌ها، و ترویج مشارکت ذینفعان در فرآیندهای تصمیم‌گیری متمرکز شوند تا بتوان با چالش‌های پیچیده تغییرات اقلیمی و خشکی دریاچه به نحو موثرتری مقابله کرد.

منابع

احمدی، سعیده، (۱۴۰۳)، بررسی علل و پیامدهای خشک شدن دریاچه ارومیه، ماهنامه علمی امنیت اقتصادی، سال دوازدهم، شماره ۲.

ابراهیمی، ثریا، رحمانی فضلی، عبدالرضا، عزیزپور، فرهاد، (۱۴۰۰)، سنجش ظرفیت سازگاری سکونتگاه های روستایی پیرامون دریاچه ارومیه (مورد مطالعه: شهرستان میاندوآب)، فصلنامه مطالعات جغرافیایی مناطق کوهستانی، سال دوم، شماره ۱.

بارانی پسیان، وحید، پور اکرمی، محمد، فتوحی مهربانی، باقر، پور اکرمی، سعید، (۱۳۹۶)، تحلیل روند خشک شدن دریاچه ارومیه و مهم ترین تأثیرات آن بر سکونتگاه های پیرامونی، فصلنامه پژوهش های روستایی، دوره ۸، شماره ۳.

جوان، خدیجه، (۱۳۹۹)، بررسی روند خشکسالی هیدرولوژیک در سطح حوضه ی آبریز دریاچه ی ارومیه،فصلنامه هیدروژئومورفولوژی، سال هفتم، شماره ۲۵.

حبیب الله لکی، سحر، ممی نژاد، روژین، درگاهی، الهه، (۱۴۰۳)، مروری بر پیامدهای خشک شدن دریاچه ارومیه بر شاخص های محیط زیست و اجتماعی – جمعیتی، سومین همایش ملی بیابان (فرصت ها و چالش ها).

حاتمی، زهرا، محمودی، معصومه، (۱۴۰۳)، چالش ها و فرصت های آمایش سرزمین در مواجهه با تغییرات اقلیمی و تحولات جمعیتی در ایران، چهارمین همایش بین المللی معماری، عمران، علوم زمین و محیط زیست سالم.

خزایی، محمد، بختیار پور، علی، احمدی، محمد، بابایی، محمد، (۱۳۹۴)، سکونتگاه های انسانی، تغییرات اقلیمی و مخاطرات، سومین همایش منطقه ای تغییر اقلیم و گرمایش زمین.

رستمی، هما، ملکی، سحر، (۱۴۰۰)، بررسی پارامترهای موثر بر خشک شدن دریاچه ارومیه با استفاده از فرآیند تحلیل شبکه ای فازی، فصلنامه کواترنری ایران، دوره ۷، شماره ۴ و ۳.

سواری، مسلم، شوکتی آمقانی، محمد، (۱۳۹۸)، شناسایی راهکارهای سازگاری کشاورزان کوچک مقیاس در مقابله با خشکسالی در استان آذربایجان غربی، فصلنامه برنامه ریزی فضایی، شماره ۴.

سلطانی، ناصر، موسوی، میر نجف، احمد اقبال، گلاویژ، (۱۳۹۵)، ارزیابی پیامدهای احتمالی انتقال آب حوضه زاب به دریاچه ارومیه، فصلنامه جغرافیا و پایداری، شماره ۱۹.

شایان نسب، آرین، مظلومی مراغی، فائزه، (۱۴۰۳)، بررسی اثرات تغییرات اقلیمی بر ابنیه تاریخی سکونتگاه های انسانی، اولین کنفرانس ملی محیط زیست شهری.

عربشاهی، وحید، قاسمی، عباس، کدخداپور، رضا، نظر صیدی، علی، (۱۳۹۸)، بررسی خطرات و تهدیدات ناشی از خشک شدن دریاچه ارومیه، نخستین کنفرانس ملی جغرافیا و برنامه ریزی شهری و روستایی.

عیوضی سوداگر، فاطمه، جزایری، سید عباس، (۱۳۹۵)، چالش ها و فرصت های تغییر اقلیم بر روند تکامل سکونتگاه های شهری، اولین کنفرانس بین المللی تغییر اقلیم.

عرفانیان، مهدی، میرزائی حسنلو، ایوب، جوان، خدیجه، (۱۴۰۲)، تحلیل روند بارندگی ماهانه با استفاده از روش نوآورانه گرافیکی و کلاسیک در ایستگاه های سینوپتیک حوضه دریاچه ارومیه، نشریه علمی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، سال هفدهم، شماره ۶۲.

موسوی، میر نجف، رحیمی عیبلو، امیر محمد، سلطانی، ناصر، (۱۴۰۴)، تدوین سناریوهای موثر بر گذار از بحران آب در استان آذربایجان غربی با رویکرد آمایش سرزمین، فصلنامه مطالعات توسعه پایدار شهری و منطقه ای، دوره ۶، شماره ۱.

موسوی، میر نجف، نظری امستجان، خدیجه، تقیلو، علی اکبر، (۱۴۰۳)، تدوین پیشران ها و سناریوهای موثر بر سیاست گذاری های جمعیتی در استان آذربایجان غربی با رویکرد آمایش سرزمین، فصلنامه مطالعات توسعه پایدار شهری و منطقه ای، دوره ۵، شماره ۳.

موسوی، میرنجف، قادری، رضا، تقیلو، علی اکبر، سادات کهکی، فاطمه، (۱۳۹۷)، تدوین سناریوهای تحقق پذیری آمایش سرزمین (مطالعه موردی: استان خراسان رضوی)، فصلنامه آمایش سرزمین، دوره ۱۰، شماره اول.

نظم فر، حسین، محمدی حمیدی، سمیه، یزدانی، محمد حسن، رضایان قیه باشی، احد، (۱۳۹۸)، بررسی و تحلیل اثرات کاهش سطح آب دریاچه ارومیه بر سطوح توسعه شهرستان های پیرامون، فصلنامه آمایش سرزمین، دوره ۱۱، شماره دوم.

Basel, B., Goby, G., & Johnson, J. 2020. Community -based adaptation to climate change in villages of Western Province, Solomon Islands. Marine Pollution Bulletin, 156, 111266.

Choden, K., Keenan, R. J., & Nitschke, C. R. 2020. An approach for assessing adaptive capacity to climate change in resource dependent communities in the Nikachu watershed, Bhutan. Ecological Indicators, 114, 106293.

Gasper, R., Blohm, A. and Ruth, M.(2021) Social and economic impacts of climate change on the urban environment. Journal of Current Opinion in Environmental Sustainability, 3(3), 150-157.

Hsieh, T.Y., Lu, S.T. and Tzeng, G.H., 2004. Fuzzy MCDM approach for planning and design tenders selection in public office buildings. International journal of project management, 22(7), pp.573-584.

Masson, V., Lemonsu, A., Hidalgo, J., & Voogt, J. (2020). Urban Climates and Climate Change. Annual Review of Environment and Resources, 411-444.
Sharifi, Gh. &Zarei, A. (2022), Regional Development Leveling in Iran (Application of the Combined Indicator Approach). Journal of Urban and Regional Studies and Research, 4 (13). 41-62.
Spinoni, Jonathan, Naumann, Gustavo, Vogt. Jürgen, Paulo Barbosa., 2019. European drought climatologies and trends based on a multi -indicator approach, Global and Planetary Change. Vol 127.pp. 50 –57.

Analyzing the effects of the drying up of Lake Urmia and climate change on the sustainability of human settlements from the perspective of land planning

Sahand Azar[1]*

1- PhD Student, Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, Urmia University, Urmia, Iran
* Corresponding author: Email: s.azar@urmia.ac.ir

Abstract
The drying of Lake Urmia, as one of Iran's largest environmental disasters, has had severe consequences for the sustainability of human settlements in the region, particularly from a land-use planning perspective. This phenomenon, exacerbated by climate change and mismanagement of water resources, has led to increased dust storms, salinization of agricultural lands, and a drastic reduction in water resources. Consequently, the livelihoods of local communities have been endangered, extensive migrations have occurred, and the social and economic structures of the region have collapsed. From a land-use planning perspective, this crisis indicates an imbalance between the region's ecological capacities and human activities, underscoring the necessity for a serious review of development patterns, resource management, and spatial planning to preserve the sustainability of settlements and prevent similar crises in the future. The present research aims to analyze the effects of Lake Urmia's drying and climate change on the sustainability of human settlements from a land-use planning perspective. This research is applied-theoretical in terms of its objective and descriptive-analytical in terms of its method. The required information and data have been collected through library research. This study utilized the Fuzzy AHP model. By employing the Fuzzy Analytical Hierarchy Process (Fuzzy AHP) model, multiple criteria affecting the sustainability of settlements, including environmental dimensions (such as intensified dust storms and soil salinization), economic dimensions (loss of agricultural and tourism jobs), social dimensions (migration and changes in population structure), and physical dimensions (land-use change and subsidence), have been identified and prioritized. The results indicate the critical and multifaceted impacts of this phenomenon on various aspects of life for the region's inhabitants, which further highlights the necessity for comprehensive and integrated land-use planning to address future challenges and ensure the resilience of human communities. This study can assist policymakers and planners in making informed decisions for managing similar crises and moving towards sustainable development.

Keywords: Drying of Lake Urmia, Climate Change, Sustainability, Human Settlements, Land Use Planning, Fuzzy AHP Model

چالش‌های نظارت بر رودخانه‌ها با فناوری اینترنت اشیاء (IoT) در ایران و مقایسه آن با سایر نقاط جهان

محمّد خرّمی آرانی
شرکت تحقیق و توسعه تتیس
info@ttis.ir

چکیده

نظارت بر رودخانه‌ها با فناوری اینترنت اشیاء (IoT) در ایران با چالش‌هایی مانند کمبود زیرساخت، مسائل امنیتی، هزینه‌های بالا، نبود استانداردهای یکپارچه و محدودیت منابع انسانی مواجه است. این مقاله، با استناد به پروژه‌های محلی مانند زاب کوچک و قره‌چای و سند نقشه راه کاربرد هوش مصنوعی در مدیریت منابع آب، این چالش‌ها را بررسی و با پروژه‌های جهانی شرکت‌هایی مانند Libelium (اروپا)، Xylem (آمریکای شمالی)، Umitron (آسیای جنوب شرقی) و RiverCore (آمریکای جنوبی) مقایسه می‌کند. در ایران، پروژه‌ها از سنسورهای pH و DO و فناوری‌های LoRaWAN و ZigBee استفاده می‌کنند، اما مقیاس کوچک و اتکاپذیری پایین (۹۰-۹۵٪) دارند. در مقابل، Xylem با اتکاپذیری ۹۹.۹۹٪ و فناوری 5G پیشرو است. تحلیل SWOT نشان می‌دهد که ایران نیاز به سرمایه‌گذاری در زیرساخت، استانداردسازی و آموزش دارد تا با تجارب جهانی همگام شود [۱][۲][۳].

کلمات کلیدی: اینترنت اشیاء، نظارت بر رودخانه، ، هیدرولیک آب، مقایسه جهانی، اتکاپذیری.

۱. مقدمه

ایران با بیش از ۱۰۰ رودخانه اصلی، مانند کارون، زاینده‌رود و زاب، با چالش‌های مانند آلودگی صنعتی، تغییرات اقلیمی و سیلاب مواجه هستند. روش‌های سنتی نظارت بر کیفیت آب، مانند نمونه‌برداری دستی و آزمایش‌های دوره‌ای، محدودیت‌های زیادی دارند. این روش‌ها معمولاً زمان‌بر، پرهزینه و وابسته به نیروی انسانی هستند و نمی‌توانند تغییرات لحظه‌ای کیفیت آب را به‌صورت پیوسته رصد کنند. همچنین، این روش‌ها ممکن است پوشش جغرافیایی محدودی داشته باشند و در مناطق دورافتاده یا گسترده کارایی کمتری داشته باشند. [۴]

برای رفع این ناکارآمدی‌ها، روش‌های نوین مانند استفاده از حسگرهای هوشمند، اینترنت اشیا (IoT)، و سیستم‌های نظارت آنلاین استفاده می‌شود. این فناوری‌ها امکان پایش بلادرنگ (real-time) کیفیت آب، جمع‌آوری داده‌های گسترده، و تحلیل خودکار را فراهم می‌کنند. فناوری IoT امکان پایش واقعی‌زمان کیفیت آب و جریان را فراهم می‌کند [۴۰]، اما پیاده‌سازی

آن در ایران با موانع ساختاری روبرو است [۴]. این مقاله چالش‌های نظارت بر رودخانه‌ها با IoT در ایران را بررسی می‌کند، پروژه‌های اجراشده را تحلیل می‌نماید و با نقاط جهان مقایسه می‌کند. این مقایسه بر پایه هیدرولیک آب، تجهیزات، سنسورها و فناوری‌های ارتباطی گردآوری شده است. که شامل شرکت‌هایی مانند Libelium (با تمرکز بر LoRaWAN) و Xylem (با 5G) است [۵][۶]. هدف، شناسایی نقاط ضعف ایران و پیشنهاد راهکارها است.

۲. تجهیزات و استانداردها در پروژه‌های ایران

پروژه‌های IoT در ایران عمدتاً از سنسورهای محلی یا وارداتی مانند Libelium-inspired استفاده می‌کنند. تجهیزات کلیدی آن شامل سنسورهای کیفیت آب که برای اندازه‌گیری پارامترهایی مانند pH، اکسیژن محلول (DO)، رسانایی، کدورت و دما با دقت ±۰.۱ mg/L. در پروژه مزارع ماهی، سنسورهای هوشمند (مانند Waspmote) برای پایش واقعی‌زمان استفاده شده است [۹]. برای ارسال داده‌ها از فناوری LoRaWAN برای انتقال داده‌های بلندبرد (تا ۱۵ کیلومتر) و ارسال به سرورها استفاده میشود [۱۰]. روش‌های تحلیل عمدتاً با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) برای بهینه‌سازی مکان ایستگاه‌ها و مدل‌سازی تغییرات زمانی-مکانی کیفیت آب استفاده شده است [۱۱]. استانداردهای رعایت‌شده شامل استانداردهای ملی ISIRI ۱۰۵۳ برای کیفیت آب شرب و استانداردهای بین‌المللی مانند ISO ۲۷۰۰۱ برای امنیت داده است [۱۲]. داده‌ها اغلب با نرم‌افزارهایی مانند MATLAB یا Python تحلیل می‌شوند [۱۳].

۳. بررسی بعضی از پروژه های اجرا شده در ایران

۳-۱. نظارت بر کیفیت آب رودخانه زاب کوچک (شمال غرب ایران)

در بازه زمانی ۲۰۲۴ تا ۲۰۲۵، پروژه‌ای ملی با هدف پایش کیفیت آب رودخانه زاب کوچک در شمال‌غرب ایران، به‌ویژه در استان‌های کردستان و آذربایجان غربی، اجرا شد. این پروژه با بهره‌گیری از سنسورهای بی‌سیم مبتنی بر فناوری LoRaWAN و تحلیل داده‌ها از طریق شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN)، به بررسی تغییرات زمانی و مکانی شاخص‌های کیفی آب از جمله pH، اکسیژن محلول (DO) و غلظت آلاینده‌ها در ایستگاه‌های متوالی پرداخت. نتایج حاصل از این پایش نشان‌دهنده افزایش قابل‌توجه آلودگی در بخش‌های پایین‌دست رودخانه بود که عمدتاً ناشی از فعالیت‌های صنعتی و

کشاورزی در منطقه است. اجرای این پروژه با اخذ مجوزهای زیست‌محیطی از سازمان حفاظت محیط زیست ایران و تحت مدیریت مشترک وزارت نیرو و این سازمان انجام شد.

۳-۲. نظارت بر کیفیت آب رودخانه قره‌چای (استان مرکزی)

در سال ۲۰۲۲، پروژه‌ای با هدف بهینه‌سازی مکان‌یابی ایستگاه‌های نظارت بر کیفیت آب و پیشگیری از سیلاب در استان مرکزی ایران اجرا شد. این پروژه با بهره‌گیری از الگوریتم‌های شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و مدل‌سازی فضایی از طریق نرم‌افزارهای سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)، توانست نقاط بهینه برای نصب سنسورهای پایش را شناسایی کند. سنسورهای اینترنت اشیاء (IoT) مورد استفاده در این طرح برای اندازه‌گیری اکسیژن محلول (DO) و کدورت آب طراحی شده بودند. دسترسی به داده‌ها از طریق مجوزهای تحقیقاتی و به‌صورت عمومی فراهم شد و مدیریت پروژه به‌صورت محلی توسط شرکت آب منطقه‌ای انجام گرفت.

۳-۳. کنترل کیفیت آب مزارع ماهی در رودخانه‌های ایران

از سال ۲۰۱۸ تاکنون، پروژه‌ای با هدف ارتقاء بهره‌وری اقتصادی در صنعت شیلات و کاهش نرخ مرگ‌ومیر ماهی‌ها در مزارع رودخانه‌ای در ایران، به‌ویژه در حوزه‌های رودخانه‌ای کارون و زاینده‌رود، در حال اجراست. این طرح با بهره‌گیری از سنسورهای هوشمند الهام‌گرفته از فناوری Libelium برای اندازه‌گیری شاخص‌های pH و اکسیژن محلول (DO)، امکان پایش دقیق و لحظه‌ای کیفیت آب را فراهم ساخته است. داده‌های جمع‌آوری‌شده از طریق این سنسورها با اپلیکیشن‌های موبایل ادغام شده‌اند تا مدیریت مزرعه به‌صورت هوشمند و قابل‌دسترس انجام گیرد. اجرای پروژه با اخذ مجوزهای شیلاتی و تحت مدیریت بخش خصوصی، با نظارت وزارت جهاد کشاورزی صورت گرفته است. هدف اصلی این طرح، افزایش تولید، بهبود سلامت زیستی ماهی‌ها و ارتقاء کارایی اقتصادی در واحدهای پرورش ماهی رودخانه‌ای است.

۴. بررسی بعضی از پروژه های اجرا شده در جهان

پروژه‌های نظارت بر رودخانه‌ها با فناوری IoT در جهان، اغلب توسط شرکت‌های پیشرو مانند Libelium (اروپا)، Xylem (آمریکای شمالی)، Umitron (آسیای جنوب شرقی) و RiverCore (آمریکای جنوبی) اجرا می‌شوند. این پروژه‌ها با استفاده از سنسورهای پیشرفته برای پایش کیفیت آب، جریان و آلاینده‌ها، و فناوری‌های ارتباطی مانند LoRaWAN، Sigfox و5G، چالش‌های جهانی مانند سیلاب و آلودگی را مدیریت می‌کنند. در ادامه، پروژه‌های کلیدی بررسی می‌شوند [۱۷][۱۸][۱۹].

۴-۱ .پروژه رودخانه دانوب (اروپا) توسط Libelium

رودخانه دانوب، که از ۱۰ کشور اروپایی عبور می‌کند، یکی از بزرگ‌ترین پروژه‌های نظارت IoT را توسط شرکت Libelium تجربه کرده است. این پروژه از سال ۲۰۱۵ آغاز شده و از سنسورهای Waspmote برای اندازه‌گیری پارامترهایی مانند pH، DO، کدورت و جریان آب استفاده می‌کند. فناوری LoRaWAN و Sigfox برای انتقال داده‌ها به کار رفته و دقت اندازه‌گیری ±۰.۱ mg/L است. مدیریت پروژه بین‌المللی توسط کمیسیون حفاظت دانوب (ICPDR) انجام می‌شود و چالش اصلی هماهنگی بین کشورها و امنیت داده‌ها است. نتایج نشان‌دهنده کاهش ۴۰٪ زمان پاسخ به سیلاب‌هاست [۲۰].

۴-۲. پروژه رودخانه می‌سی‌سی‌پی (ایالات متحده) توسط Xylem

رودخانه می‌سی‌سی‌پی، که از ۱۰ ایالت عبور می‌کند، تحت نظارت شرکت Xylem قرار دارد. پروژه از سال ۲۰۱۸ آغاز شده و از سنسورهای آمپرومتریک برای پایش DO، pH و یون‌ها با دقت ±۰.۰۱ mg/L استفاده می‌کند. فناوری 5G برای انتقال داده‌ها و مدل‌های هوش مصنوعی (Deep Learning) برای پیش‌بینی سیلاب به کار رفته است. مدیریت توسط آژانس حفاظت محیط زیست آمریکا (EPA) است و چالش اصلی هزینه‌های بالا و زیرساخت‌های پیچیده است. نتایج شامل بهبود ۹۰٪ دقت پیش‌بینی سیل است [۲۱][۲۲].

۴-۳ .پروژه رودخانه کولینا (مکزیک) توسط RiverCore

رودخانه کولینا در مکزیک، پروژه‌ای محلی توسط RiverCore از سال ۲۰۱۹ اجرا شده است. سنسورهای کیفیت آب برای اندازه‌گیری pH و کدورت با دقت ±۰.۲ mg/L استفاده می‌شوند و فناوری MQTT برای انتقال داده‌ها به کار رفته است. مدیریت محلی توسط محققان دانشگاهی است و چالش اصلی بودجه محدود و مقیاس کوچک (۲۰+ سنسور) است. نتایج شامل بهبود مدیریت آلودگی محلی است [۲۳].

۴-۴ .پروژه رودخانه مکونگ (آسیای جنوب شرقی) توسط Umitron

رودخانه مکونگ، که از چهار کشور (تایلند، لائوس، کامبوج، ویتنام) عبور می‌کند، تحت نظارت Umitron از سال ۲۰۲۰ قرار دارد. سنسورهای شیلاتی برای DO و دما با دقت ±۰.۲ mg/L استفاده می‌شوند و فناوری G۵LoRaWAN/ برای

انتقال داده‌ها به کار رفته است. مدیریت بین‌المللی است و چالش اصلی وابستگی به زیرساخت 5G در مناطق روستایی است. نتایج شامل افزایش ٪۳۰ تولید شیلات است [۲۴][۲۵].

۵ .چالش‌های نظارت بر رودخانه‌ها با IoT در ایران

چالش‌های اصلی در ایران شامل کمبود زیرساخت‌های شبکه‌ای (مانند پوشش محدود LoRaWAN)، مسائل امنیتی داده‌ها (ریسک نفوذ سایبری بدون استانداردهای جهانی مانند GDPR)، هزینه‌های بالا برای واردات سنسورها، نبود استانداردهای یکپارچه (مانند WFD اروپا)، و محدودیت منابع انسانی متخصص است. در پروژه زاب کوچک، چالش اصلی تحلیل داده‌های بزرگ بدون ابزارهای پیشرفته AI بود، در حالی که در قره‌چای، بهینه‌سازی مکان ایستگاه‌ها با محدودیت GIS مواجه شد. در مزارع ماهی، وابستگی به اپلیکیشن‌های موبایل چالش دسترسی در مناطق دورافتاده ایجاد کرد [۲۶][۲۷][۲۸].

۶ .مقایسه پروژه‌های ایران با جهان

پروژه‌های ایران در دقت اندازه‌گیری (±۰.۱ mg/L) مشابه Libelium و Xylem هستند، اما در مقیاس (۱۰+ پروژه در مقابل ۵۰+ برای Libelium و ۱۰۰+ برای Xylem) و اتکاپذیری (٪۹۵-۹۰ در مقابل ٪۹۹.۹۹ Xylem) محدودترند. در ایران، فناوری LoRaWAN محدود به 3G است، در حالی که Xylem از 5G استفاده می‌کند. RiverCore در آمریکای جنوبی مشابه ایران بودجه محدود دارد، اما Umitron در مکونگ از AI پیشرفته برای پیش‌بینی بهره می‌برد. تحلیل SWOT نشان می‌دهد که ایران قوت در منابع محلی دارد اما ضعف در زیرساخت و تهدیدهای تغییرات اقلیمی بیشتر است [۲۹][۳۰][۳۱].

۷ .پیشنهادها برای ایران

برای غلبه بر چالش‌های نظارت بر رودخانه‌ها با فناوری اینترنت اشیاء (IoT) در ایران، با توجه به محدودیت‌های ناشی از تحریم‌ها و عدم تمایل شرکت‌های اروپایی و آمریکایی به انتقال فناوری، مجموعه‌ای از راهکارهای عملی و پایدار پیشنهاد می‌شود. ابتدا، سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های شبکه‌ای مانند LoRaWAN و 5G ضروری است تا انتقال داده‌های واقعی‌زمان از سنسورها بهبود یابد. استانداردسازی با چارچوب‌های بین‌المللی مانند WFD (چارچوب آب اتحادیه اروپا) و GDPR (مقررات حفاظت از داده‌ها) می‌تواند امنیت و هماهنگی داده‌ها را تضمین کند، در حالی که آموزش متخصصان هوش مصنوعی (AI) برای توسعه مدل‌های پیشرفته مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANN) به تحلیل دقیق‌تر داده‌های هیدرولیکی کمک می‌کند. برای کاهش هزینه‌ها و دور زدن محدودیت‌های انتقال فناوری، تولید سنسورهای IoT بومی (مانند سنسورهای pH و DO با دقت ±۰.۱ mg/L) در داخل کشور، از طریق شرکت‌های داخلی یا استارت‌آپ‌های فناوری،

باید اولویت‌بندی شود. همچنین، ادغام مدل‌های پیشرفته AI، مانند ANNهای بهبودیافته، برای تحلیل داده‌های رودخانه‌ها (مانند پیش‌بینی سیلاب یا آلودگی) حیاتی است و می‌تواند کارایی نظارت را تا ۳۰٪ افزایش دهد[۱]. ایجاد شبکه‌ای قوی برای انتقال و پایش داده‌ها، با تمرکز بر جمع‌آوری داده‌های محلی از رودخانه‌هایی مانند کارون و زاینده‌رود، زیربنای مدل‌سازی‌های آینده AI را فراهم می‌کند. در نهایت، توسعه تحقیق و توسعه (R&D) در شرکت‌های داخلی، با حمایت از پارک‌های علم و فناوری و استفاده از داده‌های بومی رودخانه‌ها، نه تنها چالش‌های IoT را حل می‌کند، بلکه اکوسیستم AI ایران را برای کاربردهای هیدرولیکی و فراتر از آن تقویت می‌کند.

۸ .نتیجه‌گیری

نظارت بر رودخانه‌ها با IoT در ایران چالش‌های ساختاری دارد، اما با مقایسه با جهان، پتانسیل بالایی برای پیشرفت نشان می‌دهد. پروژه‌های محلی مانند زاب کوچک و قره‌چای دقت خوبی دارند، اما نیاز به مقیاس‌پذیری و زیرساخت دارند. با سرمایه‌گذاری و استانداردسازی، ایران می‌تواند با تجربیات جهانی همگام شود.

۹ .مراجع

]۱ [وزارت نیرو ایران. (۲۰۲۳). سند نقشه راه کاربرد هوش مصنوعی در مدیریت منابع آب. تهران: شرکت مدیریت منابع آب ایران/https://wnn.wrm.ir/cs/NewsCrawler/559/70722 .

[۲] Karimi, A., & Mohammadi, F. (۲۰۲۲). Optimal Location of Water Quality Monitoring Stations Using ANN in Qara-Chay River, Iran. Journal of Physical Geography Research, ۵۲(۳), ۷۹۴-۷۸۳. https://jphgr.ut.ac.ir/article_۹۸۱۳۱.html

[۳] Hosseini, M., & Razavi, S. (۲۰۱۸). Controlling Fish Farms Water Quality with Smart Sensors in Iran. IoT Now Magazine. https://www.iot-now.com/2018/02/06/75353-controlling-fish-farms-water-quality-smart-sensors-iran/

[۴] Ghafari, G. (۲۰۲۴). Applications of Artificial Intelligence in Water Resources Management in Iran. Iranian Journal of Civil Engineering, ۱۵(۲), ۱۲۵-۱۱۲. https://www.isna.ir/news/1403121309044/

[۵] Mollaei, H. (۲۰۲۵). The Role of IoT in Real-Time Water Quality Monitoring in Iranian Rivers. Econews Journal, ۱۰(۱), ۵۸-۴۵. http://econews.ir/fa/content/4093534

[۶] Gerdab Institute. (۲۰۲۳). National Development Roadmap for Artificial Intelligence in Iran. Tehran: Center for Innovation and AI Development. https://gerdab.ir/files/fa/news/1402/1/19/70254_427.pdf

[۷] Libelium. (۲۰۲۴). Water Management in Green Areas Using IoT. Libelium Whitepaper. https://www.libelium.com/libeliumworld/water-management-green-areas/

[۸] Xylem Inc. (۲۰۲۳). Global Water Quality Monitoring Market Forecast 2023-2032. Xylem Report. https://www.inkwoodresearch.com/reports/global-water-quality-monitoring-market/

[۹] Hamidi, S., et al. (۲۰۲۴). Investigating Changes in Water Quality of the Karun River Using IoT and Simulation Models. Iranian Journal of Soil and Water Research, ۵۵(۲), ۷۳۰-۷۱۸. https://ijswr.ut.ac.ir/article_98131_64fb9e8cd948b21e99b5a1b4e24ff298.pdf

[۱۰] Udwadia, F., & Trifunac, M. (۲۰۱۹). IoT-Based Real-Time River Water Quality Monitoring System in Developing Countries. Procedia Computer Science, ۲۲۳, ۱۲۰-۱۰۵. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050924332155

[۱۱] Atluri, S., & Shen, S. (۲۰۲۲). Optimal Location of Water Quality Monitoring Stations Using ANN. Journal of Hydrology, ۶۱۰, ۱۲۷۸۵۴. https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002216942200039X

[۱۲] Iranian Standards Organization. (۲۰۲۳). ISIRI 1053: Standard for Drinking Water Quality. Tehran: ISIRI. https://www.isiri.gov.ir/portal/home/?332757/ISIRI-1053

[۱۳] MATLAB Documentation. (۲۰۲۵). MATLAB for Water Quality Analysis. MathWorks. https://www.mathworks.com/solutions/water-resources.html

[۱۴] Taghinejhad, E., et al. (۲۰۲۵). Changes in Water Quality Condition at Sequential Monitoring Stations Along the Little Zab River in Northwestern Iran. Scientific Reports, ۱۵, ۱۴۹۸۲. https://www.nature.com/articles/s41598-025-14982-1

[۱۵] Hedayati Aghmashhadi, A., et al. (۲۰۲۲). Optimal Location of Water Quality Monitoring Stations Using an Artificial Neural Network Modeling in the Qarah-Chay River Basin, Iran. Water, ۱۴(۶), ۸۷۰. https://www.mdpi.com/2073-4441/14/6/870

[۱۶] Libelium. (۲۰۱۸). Controlling Fish Farms Water Quality with Smart Sensors in Iran. Libelium Case Study. https://www.libelium.com/libeliumworld/success-stories/controlling-fish-farms-water-quality-with-smart-sensors-in-iran/

[۱۷] Hamidi, S. (۲۰۲۴). Evaluation of Fish Farm Effluent Effects on Sirvan River Water Quality. Iranian Journal of Soil and Water Research, ۵۵(۱), ۱۱۵-۱۰۰. https://ijswr.ut.ac.ir/article_98131_64fb9e8cd948b21e99b5a1b4e24ff298.pdf

[۱۸] Libelium. (۲۰۲۴). Danube River Monitoring Project with IoT. Libelium Case Study. https://www.libelium.com/libeliumworld/danube-river-monitoring/

[۱۹] Xylem. (۲۰۲۵). Mississippi River Water Quality Monitoring with 5G IoT. Xylem Report. https://www.xylem.com/en-us/solutions/mississippi-river/

[۲۰] ICPDR. (۲۰۲۵). Danube River Basin Management Plan Update. ICPDR Report. https://www.icpdr.org/main/publications/danube-river-basin-management-plan-update-2021

[۲۱] EPA. (۲۰۲۵). Mississippi River Water Quality Standards. EPA Report. https://www.epa.gov/ms-htf/mississippi-river-basin-water-quality-standards

[۲۲] Xylem. (۲۰۲۴). AI-Driven Flood Prediction in Mississippi. Xylem Case Study. https://www.xylem.com/en-us/solutions/flood-prediction-mississippi/

[۲۳] MDPI. (۲۰۱۹). RiverCore: IoT Device for River Water Level Monitoring in Colima. Sensors Journal, ۱۹(۲۴), ۵۵۱۳. https://www.mdpi.com/1424-8220/19/24/5513

[۲۴] Umitron. (۲۰۲۵). Smart Aquaculture in Mekong Delta. Umitron Report. https://umitron.com/en/blog/mekong-delta-aquaculture/

[۲۵] Frost & Sullivan. (۲۰۲۵). IoT Connectivity in Southeast Asia: Mekong Case. Frost Report. https://www.prnewswire.com/news-releases/singtel-receives-frost--sullivans-2025-singapore-and-southeast-asia-company-of-the-year-recognitions-for-its-iot-connectivity-platform-302047074.html

[۲۶] Gerdab Institute. (۲۰۲۳). Challenges of IoT in Iranian Water Management. Gerdab Report. https://gerdab.ir/files/fa/news/1402/1/19/70254_427.pdf

[۲۷] WRM Iran. (۲۰۲۳). AI Roadmap for Water Resources in Iran. WRM Report. https://wnn.wrm.ir/cs/NewsCrawler/559/70722/

[۲۸] ISNA. (۲۰۲۴). AI Strategies for Smart Water Management in Yazd. ISNA News. https://www.isna.ir/news/1403121309044/

[۲۹] Spherical Insights. (۲۰۲۵). Top 50 Companies in Global IoT in Energy Market 2035. Spherical Report. https://www.sphericalinsights.com/reports/iot-in-energy-market

[۳۰] Inkwood Research. (۲۰۲۳). Global Water Quality Monitoring Market Forecast 2023-2032. Inkwood Report. https://www.inkwoodresearch.com/reports/global-water-quality-monitoring-market/

[۳۱] GoodFirms. (۲۰۲۵). Top IoT Companies in USA - July 2025 Reviews. GoodFirms Survey. https://www.goodfirms.co/big-data-analytics/iot-companies

[۳۲] Gartner. (۲۰۲۵). Best Infrastructure Monitoring Tools Reviews 2025. Gartner Report. https://www.gartner.com/reviews/market/infrastructure-monitoring-tools

[۳۳] Fortune Business Insights. (۲۰۲۳). South America Internet of Things (IoT) Market Growth [2030]. Fortune Report. https://www.fortunebusinessinsights.com/south-america-internet-of-things-iot-market-107059

Challenges of River Monitoring Using IoT Technology in Iran and Comparison with Global Practices

Mohammad Khorrami Arani
Tethys Research and Development Company
info@ttis.ir

Abstract
River monitoring using Internet of Things (IoT) technology in Iran faces challenges such as inadequate infrastructure, security concerns, high costs, lack of unified standards, and limited human resources. This study examines these challenges by referencing local projects, such as Zab-e Kuchak and Qareh-Chay, and the roadmap for the application of artificial intelligence in water resource management. It further compares these efforts with global initiatives by companies such as Libelium (Europe), Xylem (North America), Umitron (Southeast Asia), and RiverCore (South America). In Iran, projects utilize pH and DO sensors alongside LoRaWAN and ZigBee technologies but are characterized by small-scale implementation and lower reliability (90–95%). In contrast, Xylem demonstrates superior reliability (99.99%) and leverages 5G technology. A SWOT analysis indicates that Iran requires investment in infrastructure, standardization, and training to align with global best practices [1][2][3].

Keywords: Internet of Things, River Monitoring, Water Hydraulics, Global Comparison, Reliability.

پایش تغییرات دمای سطح زمین (LST) در حوضه دریاچه ارومیه طی دو دهه اخیر با استفاده از داده‌های MODIS و تحلیل ارتباط آن با شاخص‌های حدی اقلیمی

بتول زینالی[۱]، ابوذر صادقی[۲]، رقیه آذری سنجبد[۳]

۱- استاد اقلیم شناسی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی اردبیل، ایران.
۲- دانش آموخته دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه محقق اردیبلی اردبیل، ایران.
۳- دانش آموخته کارشناسی ارشد آب و هواشناسی، دانشگاه محقق اردبیلی اردبیل، ایران.
Zeynali.b@uma.ac.ir

چکیده

بحران‌های زیست‌محیطی، به‌ویژه در حوضه‌های آبریز بسته مانند دریاچه ارومیه، تحت تأثیر مستقیم تغییرات اقلیمی و افزایش رخدادهای حدی قرار دارند. در این پژوهش، از داده‌های سنجش از دور در بستر سامانه (GEE) استفاده شد. روند دمای سطح زمین (LST) با استفاده از تصاویر سنجنده MODIS (MOD11A2) برای بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۵ تحلیل گردید. همچنین، شاخص‌های حدی اقلیمی شامل فراوانی روزهای بسیار گرم (TX90p) و شب‌های بسیار گرم (TN90p) با بهره‌گیری از داده‌های بازتحلیل ERA5 برای دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰ محاسبه و سری زمانی آن‌ها استخراج و تحلیل شد. نتایج نشان داد که میانگین سالانه دمای سطح زمین (LST) در بازه مورد مطالعه دارای نوسانات شدید و فاقد یک روند خطی پایدار بوده و بالاترین دما در سال ۲۰۲۱ ثبت شده است. تحلیل شاخص‌های حدی نیز بیانگر بی‌ثباتی و نوسانات شدید سالانه بود. مهم‌ترین یافته، وجود همبستگی بسیار بالا و معنادار بین شاخص‌های TX90p و TN90p بود؛ به طوری که سال ۲۰۱۷ به عنوان یک سال حدی با بیشترین فراوانی روزها و شب‌های گرم و سال ۲۰۲۰ با کمترین مقدار، در هر دو شاخص مشترک بودند. همبستگی قوی بین شاخص‌های گرمای روزانه و شبانه نشان می‌دهد که حوضه دریاچه ارومیه در دو دهه اخیر با پدیده امواج گرمای پایدار مواجه بوده است.

کلید واژه‌ها: دمای سطح زمین، حوضه دریاچه ارومیه، LST، شاخص حدی اقلیمی.

مقدمه

در حال حاضر حدود پنج دهه از سلطه صنعت بر جوامع انسانی می‌گذرد و این سلطه منجر به تغییرات عمده‌ای در اقلیم، گرمایش جهانی زمین و در پی آن ایجاد چالش‌های جدی و گسترده برای محیط زیست کره زمین شده است. یکی از دلایل اصلی این تغییرات، تشدید فعالیت‌های صنعتی انسان است. افزایش دمای جهانی باعث ذوب شدن یخ‌های قطبی، بالا آمدن سطح آب‌های آزاد اقیانوسی و ناپایداری در پدیده‌های جوی شده است. در مطالعات مرتبط با تغییر اقلیم، یکی از عوامل کلیدی، بررسی روند تغییرات و وقایع حدی اقلیمی است (Zwiers et al., 2013). به طور میانگین، احتمال رخدادهای حدی برابر با ۵٪ برآورد می‌شود (Zhu & Toth, 2001). در دهه‌های اخیر، وقایع حدی آب و هوایی به دلیل تأثیرات گسترده‌ای که بر زندگی انسان، اقتصاد و اکوسیستم‌های طبیعی دارند، به یکی از مسائل اساسی جهانی تبدیل شده‌اند (Rosenzweig et al., 2001; Aguilar et al., 2009). تعداد روزها و شب‌های بسیار گرم با احتمال بالای بیش از ۷۰٪ در مناطق خشک کره زمین افزایش می‌یابد، در حالی که تعداد روزها و شب‌های بسیار سرد نیز با احتمال زیادی کاهش می‌یابد (Alexander et al., 2006; IPCC., 2014 & 2007). تغییرات قابل ملاحظه گرمایش جهانی یک از مهمترین جنبه های تغییر اقلیم بوده که در قرن اخیر رخ داده است. همچنین پدیده های سیل، خشکسالی، طوفان و افزایش حشرات موذی نیز از آثار تغییر اقلیم خصوصا افزایش دماست که بر جنبه های مختلف زندگی انسان تاثیرگذار است (Lloyd-Hughes & Saunders, 2002). مطالعه رخدادهای اقلیمی حدی سطح زمین در سطح جهانی بر اساس مشاهدات میدانی، از طریق استفاده از مجموعه‌ای از شاخص‌های اقلیمی انجام شده است. مهم‌ترین مجموعه این شاخص‌ها توسط تیم تخصصی شناسایی تغییر اقلیم و شاخص‌ها (ETCCDI) ایجاد شد، که زیرمجموعه‌ای از سازمان جهانی هواشناسی (WMO)، برنامه جهانی تحقیقات اقلیمی (WCRP) و کمیسیون بین‌دولتی اقیانوس‌شناسی یونسکو (IOC) بود (Alexander et al., 2019; Thorne et al., 2017; Zhang et al., 2011). یکی از پارامترهای اقلیمی مهم که روند افزایشی قابل توجهی را نشان می‌دهد، به‌ویژه در ماه‌های تابستان، دمای حداقل بسیار بالا (Extreme High Minimum Temperatures) است که آثار گسترده‌ای بر بخش‌های مختلف دارد (Yosef, 2019). محصولات سنجش از دور (RS) نه تنها اطلاعات هواشناسی ارائه می‌دهند، بلکه می‌توانند تغییرات در سطح زمین را نیز پایش کنند (صادقی و همکاران۱۴۰۴). فناوری‌های سنجش از دور (RS) و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) باعث شده‌اند که افراد بتوانند با استفاده از حسگرها، تغییرات سطح زمین را در طول زمان به‌خوبی مشاهده کنند. یکی از مهم‌ترین مزایای این فناوری‌ها، دسترسی به داده‌های پیوسته و گسترده از نظر مکانی و زمانی است (صادقی و همکاران ۱۴۰۴). در سال‌های اخیر، پلتفرم Google Earth Engine (GEE) که یک سامانه ابری برای پایش داده‌های مکانی و فضایی است، به‌طور گسترده‌ای در کاربردهای مختلف هواشناسی و هیدرولوژی مورد استفاده

قرار گرفته است. این پلتفرم داده‌های ماهواره‌ای خام و پردازش‌شده را محاسبه و نمایش می‌دهد (صادقی و همکاران ۱۴۰۴). تصاویر سری زمانی سنجنده مودیس، سری های زمانی جهانی کامل VIسنجنده های Terra و Aqua، با دارا بودن اطلاعات طیفی ارزشمند، قدرت تفکیک مکانی متفاوت (۲۵۰متری، ۱کیلومتری و ۰/۰۵ درجه) و قدرت تفکیک زمانی(۱۶ روزه و ماهانه) برای پاسخگویی به نیاز های جوامع پژوهشی و کاربردی در دسترس هستند (NASA_MODIS). جینگ ران و همکاران (۲۰۲۳) پژوهش‌های انجام‌شده در شمال چین نشان می‌دهد که با وجود روند افزایشی NDVI در چند دهه اخیر، وقوع دماهای حدی بالا نیز افزایش یافته است. نتایج بیانگر همبستگی منفی معنادار بین شاخص‌های دمای حدی و پوشش گیاهی، به‌ویژه در ماه‌های گرم سال، هستند. همچنین مراتع بیشترین حساسیت را به دماهای حدی نشان داده‌اند، در حالی‌که جنگل‌ها واکنش معناداری نداشته‌اند. محمد جمالی و همکاران (۱۴۰۳) در مطالعه ای که انجام دادند در پژوهش خود از آمار و اطلاعات ۳۴ تا ۷۰ ساله استفاده کردند. روند داده ها در سطح معنی دارای ۹۵درصد بررسی شد. نتایج نشان داد که شاخص‌های TX90 و TN90 در اکثر ایستگاه‌های مورد بررسی دارای روند افزایشی بوده‌اند(بجز شهرکرد و بیرجند) که نشان دهنده گرم شدن هوا در تابستان است.

محدوده مورد مطالعه

حوضه آبریز دریاچه ارومیه با وسعت ۵۱۸۰۰ کیلومترمربع در ناحیه کوهستانی شمال غربی ایران و بین استان‌های آذربایجان غربی، شرقی، کردستان و قسمت خیلی کوچکی از زنجان واقع شده است. دریاچه ارومیه به عنوان بزرگ‌ترین دریاچه داخلی ایران و از مهم‌ترین و با ارزش‌ترین اکوسیستم‌های آبی ایران و جهان به شمار می‌آید. اکوسیستم این دریاچه نمونه‌ای شاخص از یک حوضه آبریز بسته است که کلیه رواناب‌های جاری در رودخانه‌های حوضه به آن تخلیه می‌گردد. این حوضه آبریز در ارتفاعی بین ۱۲۳۱ تا ۳۷۵۵ متر بالاتر از سطح دریا قرار گرفته است که پست‌ترین نقطه آن دریاچه ارومیه و دشت‌های وسیع اطراف آن هست

روش پژوهش

در این پژوهش، روند تغییرات دمای سطح زمین (LST) برای میانگین سالانه طی بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۵ و شاخص‌های حدی اقلیمی TX90p و TN90p در حوضه دریاچه ارومیه طی بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰ که در سامانه GEE موجود بود مورد بررسی قرار گرفت. داده‌های LST از سنجنده MODIS (MOD11A2) با وضوح مکانی ۱ کیلومتر و بازه زمانی ۸ روزه استخراج شد و با استفاده از سامانه GEE، تصاویر میانگین سالانه برای کل حوضه محاسبه گردید. برای شاخص‌های حدی، داده‌های بازتحلیل ERA5 Daily شامل دمای بیشینه و کمینه روزانه به سلسیوس تبدیل شد و صدک ۹۰ برای هر روز سال بر اساس دوره مرجع محاسبه شد. سپس تعداد روزهای خیلی گرم (TX90p) و شب‌های خیلی گرم (TN90p) در هر

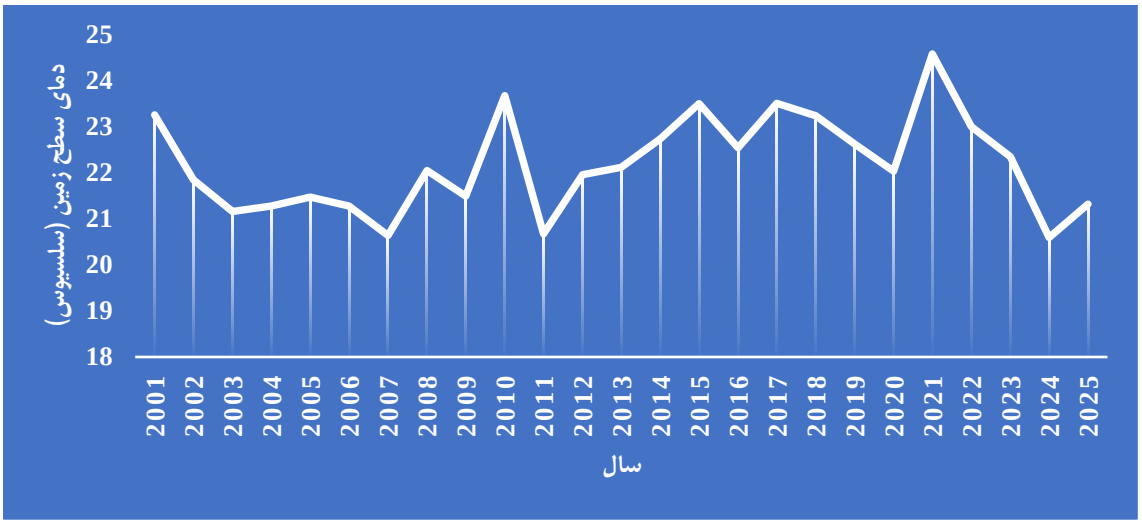
سال مورد محاسبه قرار گرفت. در نهایت، روند زمانی LST با استفاده از نمودارهای سری زمانی نمایش داده شد و ارتباط آن با شاخص‌های حدی اقلیمی (TX90p) و (TN90p)که در جدول (۱) نمایش داده شده است از طریق مقایسه سری‌های زمانی و محاسبه همبستگی مورد تحلیل قرار گرفت تا تاثیر تغییرات اقلیمی بر دما و رخدادهای حدی در حوضه مشخص شود.

جدول ۱- شاخص‌های حدی استفاده شده

Index	Descriptive Name	Definition	Unites
TN90p	Hot night frequency	percentage of days when TN>90th percentile of 2000-2020	%
TX90p	Hot day frequency	percentage of days when TX>90th percentile of 2000-2020	%

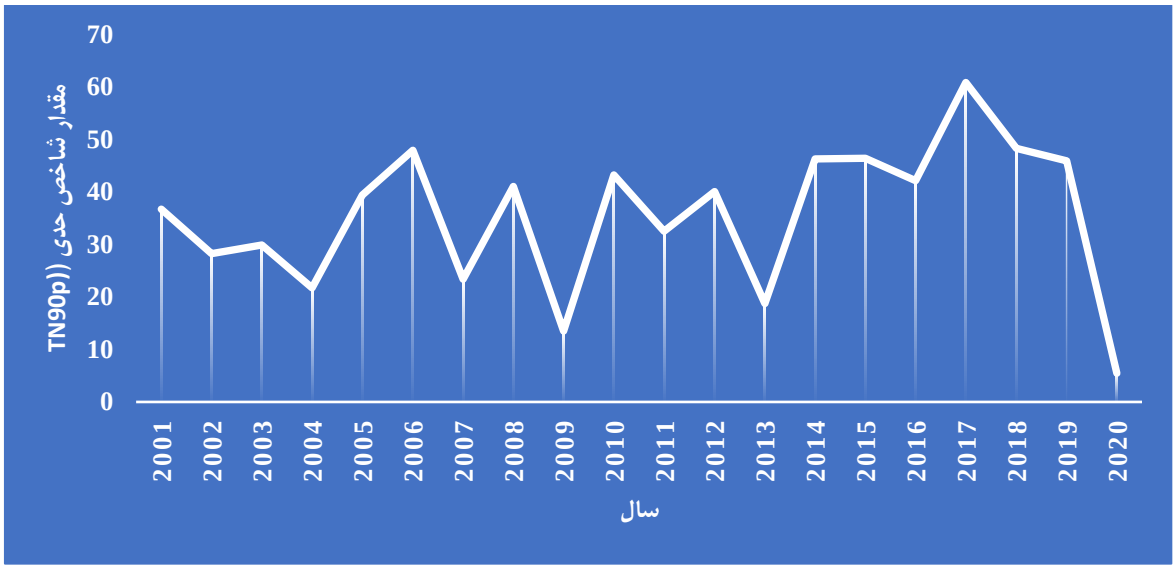
یافته‌های پژوهش

شکل (۲) روند تغییرات دمای سطح زمین (بر حسب درجه سلسیوس) را در بازه زمانی ۲۵ ساله (میانگین سالانه)، از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۵، نمایش می‌دهد. محور افقی (X) نشان‌دهنده سال و محور عمودی (Y) نشان‌دهنده دما (Temperature) با واحد سلسیوس است. دما در طول این دوره با فراز و فرودهای قابل توجهی همراه بوده است که بیانگر وجود متغیرهای تاثیرگذار متعدد در کوتاه‌مدت است. چندین نقطه اوج دمایی در این بازه زمانی قابل شناسایی است. برجسته‌ترین آن‌ها در سال ۲۰۲۱ رخ داده است، جایی که میانگین سالانه دما به بالاترین میزان خود در این دوره یعنی حدود ۲۴/۵ درجه سلسیوس رسیده است. نقاط اوج دیگری نیز در سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۱۵ مشاهده می‌شود که به ترتیب ۲۳/۶۷ و ۲۲/۷۳ رسیده است. پایین‌ترین دماها در حوالی سال‌های ۲۰۰۸، ۲۰۱۱ و به طور مشخص در سال ۲۰۲۴ ثبت شده است که دما به کمترین (میانگین سالانه) مقدار خود یعنی حدود ۲۰.۵ درجه سلسیوس کاهش یافته است. یکی از ویژگی‌های بارز نمودار، نوسانات شدید و سریع سالانه است که جهش دما بین سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۰ و همچنین افت شدید دما پس از نقطه اوج سال ۲۰۲۱ تا سال ۲۰۲۴، نشان‌دهنده بی‌ثباتی و پویایی بالای سیستم مورد بررسی در این بازه زمانی است. این نمودار نشان می‌دهد که میانگین سالانه دمای سطح زمین در محدوده مورد مطالعه در بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۵ از یک الگوی ثابت پیروی نکرده است. نوسانات شدید مشاهده شده است.



شکل ۲- نمودار سری زمانی میانگین سالانه دمای سطح زمین

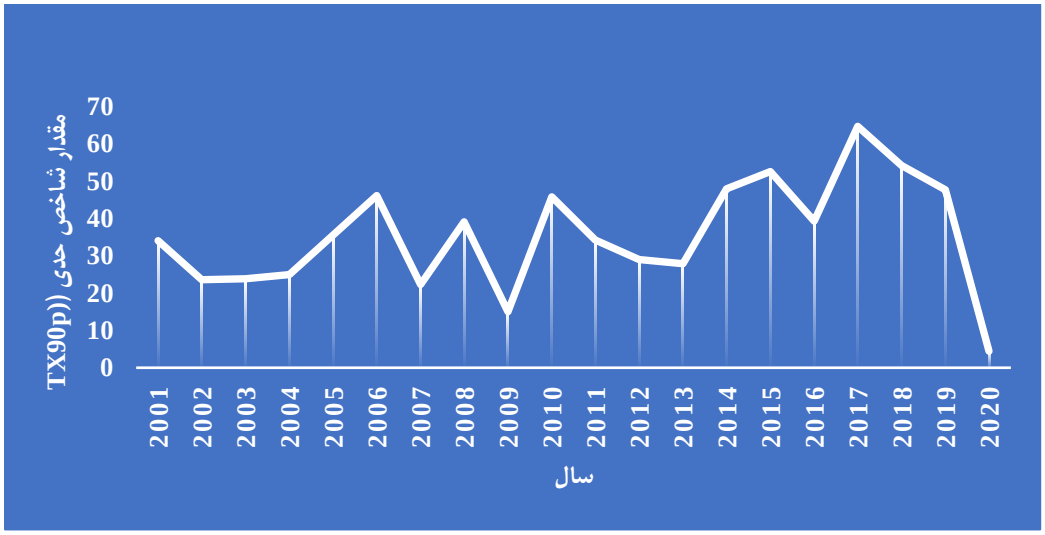
شکل (۳) که تغییرات مقدار شاخص حدی TN90p را برای میانگین سالانه طی یک دوره ۲۰ ساله، از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰، نمایش می‌دهد. شاخص TN90p یکی از شاخص‌های استاندارد در مطالعات اقلیمی است و به درصد روزهایی که دمای حداقل شبانه (TN) بالاتر از صدک ۹۰ام دوره پایه است اشاره دارد. به بیان ساده‌تر، این شاخص فراوانی وقوع شب‌های بسیار گرم یا شب‌های گرم غیرعادی را در یک سال مشخص اندازه‌گیری می‌کند. مقدار بالاتر این شاخص به معنای تعداد بیشتر شب‌های گرم در آن سال است. ویژگی جالب توجه در این شاخص حدی، نوسانات بسیار شدید و بی‌ثباتی بالا (High Volatility) در مقادیر شاخص از سالی به سال دیگر است. هیچ روند خطی پایدار (چه صعودی و چه نزولی) در کل بازه زمانی مشاهده نمی‌شود و داده‌ها الگویی بسیار نامنظم دارند. نقطه اوج در سال ۲۰۱۷ رخ داده است، که در آن مقدار شاخص به حدود ۶۱ رسیده است. این موضوع نشان می‌دهد که سال ۲۰۱۷ از نظر تعداد شب‌های گرم، یک سال کاملاً استثنایی و حدی (Extreme) بوده است. قله‌های کوچکتر دیگری در سال‌های ۲۰۰۶ (مقدار تقریبی ۴۸) و ۲۰۱۵ (مقدار تقریبی ۴۷) نیز دیده می‌شوند. کم‌ترین مقدار شاخص در سال ۲۰۲۰ با مقداری کمتر از ۱۰ (حدود ۷) ثبت شده است. این افت ناگهانی و شدید، به ویژه پس از چند سال با مقادیر نسبتا بالا، یک رویداد قابل توجه است. سال ۲۰۰۹ نیز با مقدار تقریبی ۱۳، یکی دیگر از سال‌ها با تعداد کم شب‌های گرم بوده است. دامنه تغییرات این شاخص بسیار وسیع است و از حدود ۷ تا ۶۱ متغیر است. این گستردگی، بیانگر تغییرات شدید در شرایط حدی اقلیمی منطقه مورد مطالعه در این دو دهه است.



شکل ۳- نمودار سری زمانی میانگین سالانه شاخص حدی TN90p

شکل (۴)، مقادیر شاخص حدی TX90p برای میانگین سالانه را در بازه زمانی ۲۰ ساله (۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰) نشان می‌دهد. شاخص TX90p نیز از شاخص‌های استاندارد اقلیمی است و به درصد روزهایی که دمای حداکثر روزانه (TX) بالاتر از صدک ۹۰ام دوره پایه است اطلاق می‌شود. این شاخص به طور مستقیم، فراوانی روزهای بسیار گرم یا وقوع امواج گرما (Heatwaves) را اندازه‌گیری می‌کند. مقدار بالاتر آن به معنای تعداد بیشتر روزهای داغ و سوزان در یک سال است. الگوی کلی این نمودار به مشابه نمودار شماره ۳ است و با نوسانات شدید و قابل توجه سالانه مشخص می‌شود. این بی‌ثباتی نشان می‌دهد که وقوع روزهای بسیار گرم نیز از یک روند ثابت پیروی نمی‌کند. سال ۲۰۱۷ با ثبت مقدار تقریبی ۶۵، به عنوان سالی با بیشترین تعداد روزهای داغ، رکورددار این دوره بیست ساله است. این سال به وضوح یک سال حدی (Extreme) از نظر گرمای روزانه بوده است. سال‌های ۲۰۱۵ (با مقدار تقریبی ۵۳) و ۲۰۱۰ (با مقدار تقریبی ۴۸) نیز دوره‌هایی با گرمای شدید روزانه را نشان می‌دهند. سال ۲۰۲۰ با یک افت بسیار شدید، کمترین مقدار شاخص (حدود ۵) را به خود اختصاص داده است که نشان‌دهنده سالی معتدل‌تر با کمترین تعداد روزهای موج گرما است. سال ۲۰۰۹ نیز از سال‌های خنک‌تر در این دوره محسوب می‌شود. الگوی نوسانات شاخص TX90p (روزهای گرم) همبستگی بسیار بالایی با شاخص TN90p (شب‌های گرم) دارد. سال‌های اوج (۲۰۱۷، ۲۰۱۵، ۲۰۱۰) و سال‌های فرود (۲۰۲۰، ۲۰۰۹) در هر دو نمودار تقریباً یکسان هستند. این تطابق قوی یک نتیجه‌گیری علمی مهم را در پی دارد: در منطقه مورد مطالعه، پدیده‌های گرمایی به صورت موج گرما رخ می‌دهند؛ یعنی سال‌هایی که روزهای داغ دارند، شب‌های گرمی را نیز تجربه می‌کنند. سال حدی ۲۰۱۷ که

این سال به عنوان یک نمونه کامل از یک موج گرمای شدید و پایدار عمل می‌کند که هم دمای روز و هم دمای شب را به طور بی‌سابقه‌ای بیشتر نمایش داده است.



شکل ۴- نمودار سری زمانی میانگین سالانه شاخص حدی TX90p

بحث و نتیجه‌گیری

تحلیل یکپارچه نمودارهای دمایی و شاخص‌های حدی در بازه زمانی مورد مطالعه، شواهد مهمی از فشارهای اقلیمی موثر بر بحران زیست‌محیطی حوضه آبریز دریاچه ارومیه ارائه می‌دهد. مهم‌ترین یافته، همبستگی بسیار قوی و الگوی مشابه بین نمودارهای شاخص TX90p (روزهای بسیار گرم) و TN90p (شب‌های بسیار گرم) است. این تطابق نشان می‌دهد که منطقه صرفا با افزایش تعداد روزهای گرم مواجه نبوده، بلکه امواج گرمای پایدار را تجربه کرده است؛ دوره‌هایی که در آن هم دمای روز و هم دمای شب به طور غیرعادی بالا باقی می‌ماند. این موج گرما به طور مستقیم دو فرآیند را تشدید می‌کند؛ افزایش تبخیر (Evaporation) که افزایش دمای پایدار، نرخ تبخیر آب از سطح وسیع و کم‌عمق دریاچه را به شدت بالا می‌برد که یکی از عوامل اصلی کاهش مستقیم تراز آب است. افزایش تعرق و نیاز آبی گیاهان (Evapotranspiration) که گرمای شدید و مداوم، نیاز آبی بخش کشاورزی در حوضه را افزایش داده و منجر به برداشت بیشتر آب از رودخانه‌های ورودی به دریاچه و سفره‌های زیرزمینی می‌شود. هر سه شکل‌های (۱، ۲ و ۳)، به ویژه نمودارهای شاخص‌های حدی، نشان‌دهنده نوسانات شدید سالانه هستند. این بی‌ثباتی، پیش‌بینی‌پذیری شرایط اقلیمی را کاهش داده و مدیریت منابع آب را با چالش جدی

مواجه می‌کند. سال ۲۰۱۷ به عنوان یک سال حدی با اوج فراوانی روزها و شب‌های گرم، نمونه بارزی از یک دوره تنش گرمایی شدید بر کل حوضه بوده است. در مقابل، سال ۲۰۲۰ با افت شدید این شاخص‌ها، یک دوره موقت بهبودی را نشان می‌دهد.

منابع

۱- جمالی، م.، گوهری، س ع.، اخوان صراف، غ. (۱۴۰۳). ارزیابی مکانی و زمانی روند شاخص های حدی دما و بارش ایران تحت تاثیر تغییر اقلیم. نشریه مدیریت آب و آبیاری،۱۴(۳)، ۷۴۳-۷۵۲.

۲- صادقی، ا.، عابدینی، م.، آذری سنجبد، ر. (۱۴۰۴). پایش و تحلیل خشکسالی حوضه دریاچه ارومیه با شاخص‌های VCI و TCI در محیط گوگل ارث انجین. یازدهمین همایش ملی انجمن ایرانی ژئومورفولوژی.

3- Aguilar, E., Aziz Barry, A., Brunet, M., Ekang, L., Fernandes, A., Massoukina, M., Mbah, J., Mhanda, A., do Nascimento, D. J., Peterson, T. C., Thamba Umba, O., Tomou, M., & Zhang, X. (2009). Changes in temperature and precipitation extremes in western central Africa, Guinea Conakry, and Zimbabwe, 1955–2006. Journal of Geophysical Research, 114(D2). https://doi.org/10.1029/2008jd011010

4- Alexander, L. V., Fowler, H. J., Bador, M., Behrangi, A., Donat, M. G., Dunn, R., Funk, C., Goldie, J., Lewis, E., Rogé, M., Seneviratne, S. I., & Venugopal, V. (2019). On the use of indices to study extreme precipitation on sub-daily and daily timescales. Environmental Research Letters, 14(12), 125008. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab51b6

5- Alexander, L. V., Zhang, X., Peterson, T. C., Caesar, J., Gleason, B., Klein Tank, A. M. G., Haylock, M., Collins, D., Trewin, B., Rahimzadeh, F., Tagipour, A., Rupa Kumar, K., Revadekar, J., Griffiths, G., Vincent, L., Stephenson, D. B., Burn, J., Aguilar, E., Brunet, M., & Taylor, M. (2006). Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. Journal of Geophysical Research, 111(D5). https://doi.org/10.1029/2005jd006290

6- IPCC (2014). “Summary for Policymakers.” In Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, edited by Stocker, T.F., et al., Cambridge: Cambridge University Press (online at http://climatechange2013.org/).

7- IPCC (2014). Climate Change., 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press (online at http://climatechange2013.org/)

8- IPCC., 2007. In: Solomon,S., Qin,D., Manning,M., Chen,Z., Marquis,M., Averyt,K.B., Tignor,M., Miller,H.L. (Eds.) Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to The Fourth Assessment Report of The Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom/ New York, USA. 996.

9- Lloyd-Hughes, B., & Saunders, M. A. (2002). A drought climatology for Europe. International Journal of22(13), 1571–1592. https://doi.org/10.1002/joc.846

10- NASA. MODIS-specifications. Weitere Details. https://modis.gsfc.nasa.gov/ data/dataprod /mod13.12p.
11- Rosenzweig, C., Iglesias, A., Yang, X., Epstein, P.R., Chivian, E., 2001. Climate change and extreme weather events; implications for food production, plant diseases, and pests. Glob. Chang. Hum. Health. 2: 90–104.
12- Thorne, P. W., Allan, R. J., Ashcroft, L., Brohan, P., Dunn, R. J. H., Menne, M. J., et al. (2017). Toward an integrated set of surface meteorological observations for climate science and applications. Bulletin of the American Meteorological Society, 98(12), 2689–2702. https://doi.org/10. 1175/bams-d-16-0165.1
13- Yang, Q., Jiang, C., & Ding, T. (2023). Impacts of extreme-high-temperature events on vegetation in North 15(18), 4542. https://doi.org/10.3390/rs15184542
14- Yosef, Y., Aguilar, E. & Alpert, P. Changes in extreme temperature and precipitation indices: using an innovative daily homogenized database in Israel. Int. J. Climatol. 39, 5022–5045 (2019)
15- Zhang, X., Alexander, L., Hegerl, G. C., Jones, P., Tank, A. K., Peterson, T. C., et al. (2011). Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 2(6), 851–870. https://doi.org/10.1002/wcc.147
16- Zhu, Y and Toth, Z., 2001. Extreme Weather Events and their Probabilistic Prediction by the NCEP Ensemble Forecast System, Proceedings of the symposium on Precipitation Extremes: Prediction, Impact, and Responses, Albuquerque, USA, 1-38.
17- Zwiers, F.W., Alexander, L.V., Hegerl, G.C., Knutson, T.R., Kossin, J.P., Naveau, P., Nicholls, N., Schär, C., Seneviratne, S.I., Zhang, X., 2013. Climate extremes: challenges in estimating and understanding recent changes in the frequency and intensity of extreme climate and weather events. Climate Science for Serving Society. Springer, 339–389.

Monitoring Land Surface Temperature (LST) Changes in the Lake Urmia Basin over the Last Two Decades using MODIS Data and Analysis of its Relationship with Extreme Climate Indices

Aboozar Sadeghi[1], Batol Zeinali[2], Roghayeh Azari Sanjebad

Professor of Climatology, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
PhD in Geomorphology, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
MSc in Climatology, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
* Zeynali.b@uma.ac.ir

Abstract

Environmental crises, particularly in closed water basins like Lake Urmia, are directly impacted by climate change and an increase in extreme events. In this study, remote sensing data were utilized through the Google Earth Engine (GEE) platform. The trend of Land Surface Temperature (LST) was analyzed using imagery from the MODIS sensor (MOD11A2) for the period of 2001 to 2025. Additionally, extreme climate indices, including the frequency of very hot days (TX90p) and very warm nights (TN90p), were calculated

using ERA5 reanalysis data for the 2001 to 2020 period, and their time series were extracted and analyzed. The results indicated that the annual mean Land Surface Temperature (LST) exhibited significant fluctuations during the study period and lacked a stable linear trend, with the highest temperature being recorded in 2021. The analysis of extreme indices also revealed instability and severe annual fluctuations. The most significant finding was the existence of a very high and meaningful correlation between the TX90p and TN90p indices. Both indices shared 2017 as an extreme year with the highest frequency of hot days and warm nights, and 2020 as the year with the lowest values. This strong correlation between daytime and nighttime heat indices indicates that the Lake Urmia basin has experienced persistent heat waves over the last two decades.

Keywords: Land Surface Temperature, Lake Urmia Basin, LST, Extreme Climate Index.

تحلیل عوامل مؤثر بر آموزش تغییر اقلیم درآینده

فاطمه پرک[۱]، احمد روشنی[۲]

۱- استادیار گروه آموزش جغرافیا، دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران
۲- گروه شهرسازی، دانشکده هنر و معماری، واحد تهران جنوب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
parak@cfu.ac.ir

چکیده

این پژوهش با هدف تحلیل آینده‌پژوهانه عوامل مؤثر بر آموزش تغییر اقلیم درجغرافیا در آینده، با بهره‌گیری از دیدگاه‌های ۲۶ خبره و روش‌های ترکیبی تحلیل محتوا و کدگذاری در نرم‌افزار MAXQDA و تحلیل ساختاری-تأثیرگذاری با نرم‌افزار میک‌مک انجام شده است. یافته‌ها نشان می‌دهند که نظام آموزشی جغرافیا از پایداری نسبی برخوردار است، اما برای پاسخ‌گویی به تحولات پرشتاب علمی، فناورانه و محیط‌زیستی آینده، نیازمند بازتعریف راهبردی در سطوح سیاست‌گذاری، محتوای درسی و شیوه‌های آموزشی است. در این میان، نیروهای پیشران کلان (مانند سیاست‌گذاری آموزشی و برنامه‌ریزی درسی ملی) به‌عنوان عوامل اثرگذار اصلی شناسایی شدند، در حالی که عواملی چون صلاحیت مدرسان، امکانات و زیرساخت‌های آموزشی به‌عنوان پایه‌های پایداری سیستم مطرح هستند. متغیرهای استراتژیک همچون «سطح آموزش‌های تخصصی» و «سازماندهی محتوای آموزشی» نیازمند بازنگری جدی و تقویت هم‌زمان منابع انسانی و زیرساختی‌اند. همچنین، متغیرهای هدف مانند «کاربست الگوهای نوین یاددهی-یادگیری» به تحولات سایر بخش‌ها وابسته‌اند. این پژوهش پیشنهاد می‌کند که هماهنگی بیشتر میان سطوح سیاست‌گذاری و اجرا، بازطراحی محتوای درسی با ادغام دانش بومی و جهانی، و توسعه برنامه‌های مهارت‌محور برای مدرسان از جمله راهبردهای کلیدی برای تحول آموزش جغرافیا هستند. در نهایت، آینده آموزش جغرافیا در گرو تعامل سازنده میان «سیاست»، «محتوا»، «روش» و «منابع انسانی» خواهد بود تا بتواند نقش مؤثری در تربیت شهروندان آگاه و توانمند برای مواجهه با مسائل آینده ایفا کند.

کلید واژه‌ها:

مقدمه

در دنیای پیچیده و پویای امروز، نظام‌های آموزشی نقشی حیاتی در شکل‌دهی آینده جوامع ایفا می‌کنند. دانشگاه‌ها به‌عنوان قلب تپنده این نظام‌ها، وظیفه‌ای خطیر در پرورش نسلی آگاه، خلاق و مسئولیت‌پذیر بر عهده دارند. رشته‌های تحصیلی به‌عنوان واحدهای سازنده دانشگاه‌ها، نقشی کلیدی در تحقق اهداف آموزش عالی ایفا می‌کنند. بنابراین، طراحی، بازنگری و به‌روزرسانی مداوم رشته‌ها امری ضروری است که باید با توجه به نیازهای جامعه، تحولات بازار کار و ارزش‌های بومی و محلی انجام شود (نارسی و رمضان‌پور، ۲۰۱۵؛ لارگانی حسینی، ۲۰۱۸). رشته جغرافیا به‌عنوان «علم مطالعه تعامل انسان، جامعه و محیط» (وایکارت، ۲۰۰۳؛ کونها، ۲۰۰۶) نقشی بی‌بدیل در درک پیچیدگی‌های روابط بین انسان و محیط ایفا می‌کند. آموزش جغرافیا با هدف پرورش دانش، مهارت‌ها و نگرش‌های جغرافیایی در فراگیران، به دنبال توانمندسازی افراد برای درک این پیچیدگی‌ها و دستیابی به سواد جغرافیایی است. این آموزش به دانش‌آموزان کمک می‌کند تا با فرهنگ‌ها و جوامع مختلف آشنا شده و به تفکر درباره جایگاه خود در جهان، ارزش‌ها، حقوق و مسئولیت‌هایشان در قبال همنوعان و محیط‌زیست ترغیب شوند (شایان، ۱۳۸۳ به نقل از یاری، ۱۶: ۳۹۲).

با افزایش روزافزون بحران‌های زیست‌محیطی، گسترش فناوری‌های نوین و تغییرات اجتماعی-اقتصادی، نیاز به آگاهی و دانش جغرافیایی بیش از پیش احساس می‌شود. جغرافیدانان وظیفه دارند جامعه را نسبت به این چالش‌ها حساس کرده و راهکارهایی برای پیشگیری و مقابله با آن‌ها ارائه دهند. با این حال، مطالعات نشان می‌دهد که درک بسیاری از دانش‌آموزان و دانشجویان از اهمیت و کاربرد جغرافیا محدود است و این موضوع موجب کاهش علاقه آن‌ها به این رشته شده است (ساریتا و موکش، ۲۰۱۵؛ مولایی).

آینده‌پژوهی در حوزه آموزش، به‌ویژه با توجه به چالش‌های پیچیده و درهم‌تنیده‌ای مانند تغییر اقلیم، شهرنشینی شتابان و تحولات فناورانه، از اهمیت بالایی برخوردار شده است. رشته جغرافیا به‌عنوان یکی از رشته‌های کلیدی در درک و تحلیل پدیده‌های محیطی و اجتماعی، نقش محوری در این زمینه ایفا می‌کند. یافته‌ها و تحولات کلیدی در حوزه آموزش جغرافیا بر اهمیت دانش دقیق و درک تأثیرات تغییرات محیطی و اجتماعی به‌عنوان عوامل ضروری برای اقدامات مؤثر و شکل‌گیری عزم فردی و جمعی برای مقابله با چالش‌های آینده تأکید می‌کند (کرمی، شبیری و همکاران، ۲۰۱۶). تحقیقات نشان داده‌اند که ادغام موضوعات نوینی چون تغییرات اقلیمی، توسعه پایدار، عدالت محیطی و تحولات فضایی در سیستم‌های آموزشی رسمی، مانند برنامه درسی، می‌تواند آگاهی و درک مفاهیم کلیدی جغرافیا، شرایط فعلی، علل، پیامدها و استراتژی‌های مقابله را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد (کرمی، شبیری و همکاران، ۲۰۱۶). علاوه بر این، توسعه

چارچوب‌های درسی جدید در آموزش عالی که ابعاد مختلف جغرافیای انسانی و طبیعی را پوشش می‌دهند، می‌تواند درک عمیق‌تر و تفکر انتقادی در مورد رابطه انسان و محیط را تقویت کند (کرمی، ۲۰۰۹).

چالش‌هایی همچون تغییرات اقلیمی، افزایش دمای زمین، ذوب یخچال‌ها، وقوع بلایای طبیعی شدیدتر و مکررتر، و اختلال در اکوسیستم‌ها تنها بخشی از پیامدهای جهانی‌اند که بقای انسان و دیگر گونه‌ها را تهدید می‌کنند. در این میان، آموزش جغرافیا به‌عنوان ابزاری کلیدی برای مواجهه با این بحران‌ها شناخته می‌شود؛ ابزاری که نه تنها آگاهی‌بخش است، بلکه توانایی تغییر نگرش‌ها، اصلاح رفتارها، و تقویت تاب‌آوری جوامع را در برابر تغییرات اجتناب‌ناپذیر دارد. اما چگونه می‌توان آموزش جغرافیا را به گونه‌ای طراحی کرد که نه تنها پاسخگوی نیازهای امروز باشد، بلکه آینده‌ای پایدار را نیز پیش‌بینی و شکل دهد؟ اینجاست که آینده‌پژوهی به مثابه پلی میان دانش کنونی و سناریوهای محتمل فردا وارد عمل می‌شود.

آینده‌پژوهی آموزش جغرافیا، فراتر از انتقال مفاهیم علمی، به دنبال پرورش سواد جغرافیایی، تفکر انتقادی و خلاقیت راهبردی در نسل‌های حاضر و آینده است. این حوزه با ترکیب روش‌های پیش‌بینانه، سناریوسازی و مشارکت جمعی، می‌کوشد تا جامعه را برای مواجهه با عدم قطعیت‌های آینده آماده کند و راهکارهایی نوآورانه در سطوح فردی، محلی و جهانی ارائه دهد. از آموزش کشاورزان برای سازگاری با الگوهای بارشی متغیر تا توانمندسازی دانش‌آموزان در طراحی شهرهای هوشمند و کم‌کربن، آینده‌پژوهی آموزش جغرافیا به مثابه موتوری برای تحول است.

با این حال، این مسیر با چالش‌هایی روبه‌روست: چگونه می‌توان بین اولویت‌های کنونی جوامع و نیازهای بلندمدت سیاره‌ای تعادل برقرار کرد؟ چگونه فناوری‌های نوین را در خدمت آموزش جغرافیا و پایداری قرار داد؟ و چگونه فرهنگ همکاری بین‌رشته‌ای و فرامرزی را تقویت نمود؟ پاسخ به این پرسش‌ها مستلزم بازاندیشی در نظام‌های آموزشی، به‌کارگیری ابزارهای دیجیتال، و تلفیق دانش بومی با یافته‌های علمی روز است. آنچه در این میان امیدبخش است، ظرفیت بی‌پایان آموزش جغرافیا برای خلق آینده‌ای است که در آن انسان نه مخرب طبیعت، بلکه همگام با آن گام برمی‌دارد.

آینده‌پژوهی به‌عنوان یک چارچوب تحلیلی، این توانایی را دارد که نظام‌های آموزشی را از حالت منفعلانه به سمت پیش‌کنشی سوق دهد. در حالی که آموزش سنتی اغلب بر انتقال دانش موجود متمرکز است، آینده‌پژوهی با شناسایی روندها، عدم قطعیت‌ها و سناریوهای محتمل، به دانش‌آموزان و جوامع می‌آموزد چگونه برای شرایطی آماده شوند که هنوز رخ نداده‌اند. برای مثال، با پیش‌بینی تأثیرات گرمایش جهانی بر الگوهای کشاورزی در منطقه‌ای خاص، می‌توان برنامه‌های آموزشی جغرافیایی را طراحی کرد که به کشاورزان مهارت‌های سازگاری با خشکسالی یا تغییر الگوی کشت را بیاموزد. این رویکرد نه تنها تاب‌آوری را افزایش می‌دهد، بلکه نوآوری در حل مسئله را نیز تقویت می‌کند.

علاوه بر این، ضرورت بازنگری برنامه‌های آموزشی و درسی در سطح دانشگاهی با تأکید بر آموزش محیط زیست، جغرافیای انسانی، فناوری‌های نوین و تغییرات اقلیمی برای رسیدگی به بحران‌های جهانی و نیازهای متغیر انسان ناشی از تغییرات

فضایی و اجتماعی مورد تأکید قرار گرفته است (نمین، پور و همکاران، ۲۰۱۷). این شامل پیشنهاد اضافه کردن دوره‌های اختیاری و اجباری مرتبط با موضوعات نوین جغرافیایی در تمام رشته‌های دانشگاهی برای افزایش اثربخشی برنامه‌های آموزشی و بهبود شاخص‌های آموزش محیط زیست و جغرافیا در کشور است (نمین، پور و همکاران، ۲۰۱۷). در مجموع، این تحولات نشان‌دهنده افزایش شناخت نسبت به ضرورت رویکردهای جامع و یکپارچه در آموزش جغرافیا در سطوح و بخش‌های مختلف است، با هدف تجهیز افراد و جوامع به دانش و مهارت‌های لازم برای مقابله و سازگاری با چالش‌های آینده.

پیشینه پژوهش

مطالعات آینده‌پژوهی در حوزه آموزش عالی نشان می‌دهد که کشورهای مختلفی همچون تایلند، مالزی و سنگاپور با اجرای برنامه‌هایی نظیر «مردم تایلند ۴.۰»، «چارچوب نسل ۱۴ آموزش عالی مالزی» و «ابتکار عمل ملت هوشمند» به آینده آموزش عالی خود شکل می‌دهند (Kim, ۲۰۱۷; Tarin et al., ۲۰۲۳). همزمان با این تحولات، حوزه تربیت معلم نیز دستخوش تغییرات اساسی شده است. پژوهش‌ها نشان می‌دهند که دانشگاه‌های تربیت معلم برای بقاء و ارتقای کیفیت آموزش، نیازمند خودارزیابی مستمر و بهبود مداوم هستند (McGreal & Danielson, ۲۰۱۱). همچنین، توانایی دانشجومعلمان در استفاده از روش‌های نوین تدریس، یکی از عوامل کلیدی در شکل‌دهی آینده آموزش و پرورش و به‌تبع آن آموزش جغرافیا خواهد بود (Michael et al., ۲۰۱۷).

در دنیای امروز که تغییرات اقلیمی، تحولات اجتماعی-اقتصادی و روندهای فناورانه به مهم‌ترین چالش‌های جهانی تبدیل شده‌اند، نقش آموزش جغرافیا بیش از پیش برجسته شده است. جغرافیا به‌عنوان علمی که به مطالعه روابط متقابل انسان و محیط می‌پردازد، ابزاری قدرتمند برای درک پیچیدگی‌های تغییرات محیطی و اجتماعی و ارائه راهکارهای مناسب برای مقابله با آن‌ها است. با توجه به تحولات گسترده جهانی در زمینه‌های سیاسی، اقتصادی، زیست‌محیطی و نظامی، اهمیت آموزش علوم زمین، به‌ویژه جغرافیا و زمین‌شناسی، به‌طور چشمگیری افزایش یافته است (صادقی، ۱۳۹۶، ص. ۸۶). آموزش علوم زمین به‌عنوان ابزاری مؤثر برای برنامه‌ریزان، سیاست‌گذاران و دانش‌آموزان در تحلیل مسائل پیچیده محیطی و اجتماعی، نقش کلیدی ایفا می‌کند. جغرافیا به‌عنوان دانشی که به ما کمک می‌کند تا جهان را بهتر بشناسیم، قادر است فرایندهای اجتماعی-اقتصادی را تفسیر کرده و درک ما را از پیچیدگی‌های محیط پیرامون افزایش دهد (Estives, ۲۰۱۵). آموزش جغرافیا نه تنها دانش و مهارت‌های جغرافیایی را به افراد منتقل می‌کند، بلکه به آن‌ها کمک می‌کند تا تعاملات

انسان-محیط و جامعه را در سطح جهانی درک کرده و به سواد جغرافیایی دست یابند. به‌طور خلاصه، آموزش جغرافیا در عصر حاضر به‌عنوان ضرورتی برای توسعه پایدار جوامع شناخته می‌شود.

آموزش جغرافیا به‌عنوان یک رشته علمی، تلفیقی از حوزه‌های جغرافیا و علوم تربیتی است. این رشته با هدف ارتقای دانش، مهارت‌ها و نگرش‌های جغرافیایی در فراگیران طراحی شده است تا آن‌ها قادر شوند تعاملات پیچیده انسان، محیط و جامعه را در سطح جهانی درک کنند (صادقی، ۱۳۹۹). آموزش جغرافیا با ایجاد یک درک جامع و یکپارچه از ارتباطات بین پدیده‌ها و اجزای مکان‌ها، سه بعد کلیدی جغرافیایی یعنی مکان، محیط و فضا را تلفیق می‌کند. این رویکرد موجب می‌شود دانش‌آموزان و دانشجویان بتوانند ارتباط بین موضوعات تخصصی مختلف را دریابند و دیدگاهی بین‌رشته‌ای کسب کنند. همچنین آن‌ها می‌آموزند تا با استفاده از روش‌های مختلف به تحلیل و تفسیر پدیده‌ها بپردازند و با نگاهی بازتر به مسائل پیچیده بنگرند (معافی، ۱۳۹۹).

آموزش جغرافیا فراتر از معرفی ساده محیط اطراف، به دنبال پرورش توانایی‌های لازم برای حفاظت و بهره‌برداری منطقی از آن است. بر اساس نظر صادقی (۱۳۹۶)، اهداف اصلی آموزش جغرافیا عبارت‌اند از: ایجاد درک عمیق از مفاهیم و اصول جغرافیایی، تقویت مهارت‌های مرتبط با این علم و پرورش تفکر انتقادی و نگرش‌های منطقی در فراگیران. به عبارت دیگر، هدف نهایی آموزش جغرافیا تربیت شهروندانی آگاه و مسئول است که بتوانند با شناخت کامل از محیط زیست، راهکارهای مناسب برای بهره‌برداری پایدار از آن ارائه دهند.

با توجه به اهمیت آموزش جغرافیا در نظام‌های آموزشی جهانی، برنامه‌های درسی این رشته در ایران نیز همواره مورد توجه برنامه‌ریزان قرار داشته است (نظری و همکاران، ۱۴۰۲). با این حال، آموزش جغرافیا در طول دهه‌های اخیر تحولات چشمگیری را تجربه کرده است. گذار از جغرافیای توصیفی به جغرافیای اثباتی و سپس انتقادی، بیانگر تغییر رویکردها و دغدغه‌های اصلی در این حوزه است. عوامل متعددی از جمله تحولات اجتماعی، سیاست‌های آموزشی و تأثیر فلسفه‌های مختلف علمی بر جغرافیا در این تحولات مؤثر بوده‌اند.

امروزه نه تنها روش‌ها و ابزارهای آموزش جغرافیا تغییر کرده‌اند، بلکه خود موضوع آموزش نیز دارای ماهیتی پویا و متغیر شده است. به همین دلیل، «چرخش فضایی» در آموزش و یادگیری جغرافیا به یکی از اصول اساسی در نظام‌های آموزشی تبدیل شده است (شورچه، ۱۴۰۲). رشد سریع فناوری‌های اطلاعاتی و ارتباطی و تغییرات پرشتاب اجتماعی، چالش‌های جدیدی را برای آموزش جغرافیا ایجاد کرده است. برای مقابله با این چالش‌ها و آماده‌سازی دانش‌آموزان و دانشجویان برای آینده، استفاده از روش‌های آینده‌پژوهی در آموزش جغرافیا ضروری است. آینده‌پژوهی به فراگیران کمک می‌کند تا با دانش و مهارت‌های لازم برای مشارکت مؤثر در جامعه مجهز شوند. آینده‌پژوهی به‌عنوان یک حوزه میان‌رشته‌ای، با ارائه مجموعه‌ای از روش‌ها و ابزارهای پیش‌بینی، به پیشرفت سایر علوم، از جمله جغرافیا، یاری می‌رساند. هدف اصلی آن، ترسیم تصویری

روشن از آینده مطلوب و برنامه‌ریزی برای دستیابی به آن است (امینی و همکاران، ۱۳۹۹). به عبارت دیگر، آینده‌پژوهی به ما کمک می‌کند تا با بررسی روندهای کنونی و پیش‌بینی تغییرات آتی، سناریوهای مختلف را طراحی کرده و برای چالش‌هایی همچون تغییرات اقلیمی، شهرنشینی، مهاجرت و مسائل محیط‌زیستی برنامه‌ریزی کنیم.

در حوزه جغرافیا، آینده‌پژوهی با تمرکز بر جنبه‌های فضایی و مکانی پدیده‌ها، به ما امکان می‌دهد تغییرات آینده را در مقیاس‌های مختلف، از محلی تا جهانی، پیش‌بینی کنیم. برای مثال، با استفاده از روش‌های آینده‌پژوهی می‌توان تغییرات کاربری اراضی، رشد شهرها و تأثیر تحولات اقلیمی بر محیط زیست را تحلیل نمود. نظام تعلیم و تربیت، به‌ویژه آموزش جغرافیا، به دلیل پیچیدگی و اهمیت آن، نیازمند توجه جدی به تغییرات آینده است. غفلت از این تغییرات می‌تواند پیامدهای جبران‌ناپذیری برای نظام آموزشی و جامعه در پی داشته باشد. به همین دلیل، انجام مطالعات آینده‌نگر و تدوین برنامه‌های راهبردی، ضرورتی دوچندان دارد. سند تحول بنیادین آموزش و پرورش نیز بر اهمیت آینده‌پژوهی در آموزش تأکید کرده است. در بند ۲۹ فصل دوم این سند، بر ضرورت «آینده‌پژوهی و پایش تحولات مؤثر بر تعلیم و تربیت رسمی عمومی» اشاره شده و در راهکار ۴-۲۲ فصل هفتم آن، بر «انجام مطالعات راهبردی آینده‌نگر در آموزش و پرورش» تأکید شده است (سند تحول بنیادین آموزش و پرورش، ۱۳۹۰، ص. ۱۹ و ۵۸).

بنابراین، برای آماده‌سازی نظام آموزشی جغرافیا در مواجهه با تغییرات آینده، باید به مفهوم آینده‌پژوهی توجهی ویژه داشت. آینده، ادامه ساده گذشته نیست و سازوکارهای خاص خود را خواهد داشت. ازاین‌رو، ضروری است با انجام پژوهش‌های علمی و آینده‌نگر، عوامل مؤثر بر آموزش جغرافیا در آینده شناسایی و راهبردهای کارآمد برای ارتقای آن تدوین شوند.

آینده پژوهی

جهان امروز با سرعتی بی‌سابقه در حال تغییر است. پیشرفت‌های فناوری، جهانی‌شدن و تحولات اجتماعی، آینده را به پدیده‌ای پیچیده و پر از ابهام تبدیل کرده است. در چنین شرایطی، آینده‌پژوهی به عنوان ابزاری قدرتمند برای درک بهتر آینده و برنامه‌ریزی برای آن، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. آینده‌پژوهی فرایندی است که به ما کمک می‌کند با بررسی روندهای کنونی و گذشته، سناریوهای مختلف آینده را پیش‌بینی کنیم و بر اساس آن تصمیم‌گیری‌های استراتژیک انجام دهیم. این روش، با گردآوری دیدگاه‌های مختلف و استفاده از ابزارهای علمی، چشم‌اندازی میان‌مدت تا بلندمدت از آینده را ترسیم می‌کند.

روش پژوهش

این پژوهش با رویکرد اکتشافی و هدف کاربردی، به بررسی عوامل مؤثر بر آموزش جغرافیا در آینده پرداخته است. جامعه آماری پژوهش را متخصصان حوزه جغرافیا و آموزش جغرافیا تشکیل می‌دهند. در مرحله اول، برای شناسایی عوامل کلیدی،

مصاحبه‌های عمیق با ۲۶ نفر از این متخصصین انجام شد. داده‌های حاصل از مصاحبه‌ها با استفاده از نرم‌افزار MAXQDA تحلیل شدند. برای اطمینان از اعتبار داده‌ها، مصاحبه‌شوندگان به کدگذاری‌های انجام شده بازخورد دادند و همچنین از یک کدگذار ثانویه برای بررسی همخوانی کدها استفاده شد. در مرحله بعد، به منظور بررسی تأثیر متقابل عوامل شناسایی شده، از متخصصین خواسته شد تا شدت تأثیر هر عامل بر عوامل دیگر را بر روی یک مقیاس پنج‌نقطه‌ای ارزیابی کنند. این ارزیابی به تعیین شدت روابط بین عوامل مختلف کمک کرد. پس از رونویسی و کدگذاری مصاحبه‌ها، نتایج با مصاحبه‌شوندگان به اشتراک گذاشته شد تا صحت و اعتبار آن‌ها تأیید شود. همچنین، از یک کدگذار ثانویه برای بررسی همخوانی و سازگاری کدها استفاده شد. در مرحله بعدی، برای بررسی روابط بین عوامل شناسایی شده، از یک روش ارزیابی کیفی استفاده شد. متخصصین با استفاده از یک مقیاس پنج‌نقطه‌ای، شدت تأثیر هر عامل بر عوامل دیگر را ارزیابی کردند. نتایج این ارزیابی در نرم‌افزار MICMACوارد شد و با استفاده از تحلیل شبکه‌ای، مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار و تأثیرپذیر شناسایی شدند. این عوامل که به عنوان متغیرهای دووجهی شناخته می‌شوند، بیشترین تأثیر را بر سایر عوامل برای آینده آموزش جغرافیا دارند.

یافته‌های پژوهش

در نخستین مرحله از تحلیل داده‌ها، مصاحبه‌های انجام شده با متخصصان به روش تحلیل تم مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به اهمیت نظر متخصصین در انتخاب تم‌ها، روایی مصاحبه‌ها به دقت مورد توجه قرار گرفت. پرسش‌های مصاحبه به گونه‌ای طراحی شده بودند که دیدگاه متخصصین را در مورد آینده آموزش جغرافیا مشخص کنند. در ادامه، فرایند کدگذاری داده‌ها در سه مرحله انجام شد: کدگذاری باز، محوری و گزینشی. در این فرایند، تم‌های اصلی و فرعی از متن مصاحبه‌ها استخراج شد.

در مرحله بعدی، برای بررسی تعاملات بین عوامل شناسایی‌شده، از متخصصین خواسته شد تا شدت تأثیر هر عامل بر عوامل دیگر را بر اساس یک مقیاس پنج‌نقطه‌ای ارزیابی کنند. داده‌های حاصل از این ارزیابی در نرم‌افزار MICMACوارد شد تا شبکه ارتباطی بین عوامل مشخص شود. با استفاده از تحلیل شبکه‌ای، عوامل کلیدی که به صورت همزمان بیشترین تأثیر را بر سایر عوامل می‌گذارند و بیشترین تأثیر را از سایر عوامل می‌پذیرند (عوامل دووجهی) شناسایی شدند. این عوامل به عنوان هسته مرکزی سیستم در نظر گرفته شده و در نمودارهای شبکه‌ای نمایش داده شدند.

جدول ۱: ویژگی های ماتریس پیشران ها، منبع: نگارندگان

ابعاد ماتریس	تکرار	بدون تأثیر	تأثیرگذار	تقویت کننده	توانمند ساز	درجه پرشدگی	جمع

۲۱×۲۱	۲	۲۱	۱۳۲	۲۰۱	۸۷	٪ ۹۵/۲۳	۴۲۰

جدول ۲: تأثیرپذیری و تأثیرگذاری مستقیم و غیرمستقیم پیشران ها، منبع: نگارندگان

شماره	پیشران ها	تأثیرگذاری (مستقیم)	تأثیرپذیری (مستقیم)	تأثیرگذاری (غیرمستقیم)	تأثیرپذیری (غیرمستقیم)
۱	افزایش سطح آموزش عمومی	38	42	55350	60065
۲	سیاست گذاری و برنامه ریزی	57	36	80277	51437
۳	سازماندهی محتوای آموزشی کتب درسی	42	39	61507	55880
۴	ماهیت فرا رشته ای، سیستمی و جامع نگرانه	30	31	43588	45313
۵	کاربردی بودن دانش و مهارت های سازگاری	41	35	59449	51073
۶	صلاحیت حرفه ای آموزشی ـ پژوهشی مدرسان	32	37	46050	53609
۷	الگو های آموزشی نوین	42	41	59405	59593
۸	استفاده از تکنولوژی های نوین	41	38	59539	55058
۹	نوآوری و متنوع سازی محتوا	45	37	64268	53446
۱۰	آموزش نظری و عملی	44	38	62618	55422
۱۱	حساسیت به ارزش های زیست محیطی	27	36	39684	51639
۱۲	سطح آموزش های تخصصی	46	46	64937	66005
۱۳	انرژی پایدار و تجدیدپذیر	23	36	33454	51879
۱۴	مهارت حفاظت از محیط زیست	34	39	49597	55923
۱۵	ارتقای دانش و بینش محیط زیست	43	37	62489	52853
۱۶	کارآیی دانش در زندگی آینده	43	33	62254	47550
۱۷	انتقال دانش و تجارب جهانی	44	36	62624	51946
۱۸	توسعه و تجهیز امکانات کمک آموزشی	28	34	40138	49037
۱۹	افزایش تولید محصولات پژوهشی	38	42	54958	60030
۲۰	جذب و دعوت از اساتید جوان	30	44	43936	63142
۲۱	کیفیت دانشجویان و فراگیران ورودی	27	38	39588	54810

نیروهای پیشران واقع در بخش شمال غربی نمودار که بر روند فعالیت سیستم آموزش جغرافیا بسیار تأثیرگذار بوده و از سایر مؤلفه‌های سیستم نیز تأثیر کمی می‌پذیرند، عبارتند از: کارآیی دانش در زندگی آینده، کاربردی بودن دانش و

مهارت‌های سازگاری، انتقال دانش و تجارب جهانی، نوآوری و متنوع‌سازی محتوا، ارتقای دانش و بینش محیطی، آموزش نظری و عملی، و سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی. در این بین، نیروی پیشران سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی بیشترین تأثیرگذاری را خواهد داشت.

نیروهای پیشران در سمت شمال شرقی نمودار، تقریباً در یک مسیر از محور عمودی و در راستای نسبی محور افقی، خود به سه دسته متغیرهای دووجهی، استراتژیک و هدف تقسیم می‌شوند. در این بررسی، نیروی پیشران «سازماندهی محتوای آموزشی کتب درسی» به عنوان متغیر دووجهی (بسیار تأثیرگذار و کمتر تأثیرپذیر) در نظر گرفته شد. همچنین، نیروی پیشران «الگوهای آموزشی نوین» از جمله متغیرهای هدف (کمتر تأثیرگذار و بیشتر تأثیرپذیر) است و نیروی پیشران «سطح آموزش‌های تخصصی» به عنوان متغیر استراتژیک (هم تأثیرگذار و هم تأثیرپذیر) شناخته می‌شود.

نیروهای پیشران واقع در بخش جنوب شرقی نمودار، مؤلفه‌های وابسته و تأثیرپذیر سیستم هستند که به راحتی از شرایط حاکم بر آن متأثر می‌شوند و شامل «مهارت حفاظت از محیط زیست»، «افزایش تولید محصولات پژوهشی»، «افزایش سطح آموزش عمومی» و «جذب و دعوت از اساتید جوان» هستند. برخی از این مؤلفه‌ها خروجی و برونداد این سیستم محسوب می‌شوند.

نیروهای پیشران واقع در جنوب غربی نمودار شامل «توسعه و تجهیز امکانات کمک‌آموزشی»، «صلاحیت حرفه‌ای آموزشی ـ پژوهشی مدرسان»، «حساسیت به ارزش‌های محیطی»، «توسعه انرژی‌های پایدار و تجدیدپذیر»، و «کیفیت دانشجویان و فراگیران ورودی» هستند که در صورت تقویت، می‌توانند در بهبود وضعیت آموزش جغرافیا تأثیرگذار بوده و به پایداری سیستم کمک نمایند.

تأملی بر نتایج به دست آمده مشخص می‌سازد که به طور کلی بسیاری از نیروهای پیشران در محدوده شمال غربی و جنوب غربی متمرکز شده‌اند که نشانه پایداری نسبی است. از نظر خبرگان، عمده‌ترین تغییرات آتی در آموزش جغرافیا به «سرفصل‌ها»، «شیوه‌ها و روش‌های تدریس» و «سطح آموزش‌های تخصصی» اختصاص خواهد یافت.

جدول ۳: انواع پیشران های موثر بر آموزش تغییر اقلیم در رشته جغرافیا

ناحیه نمودار	ویژگی پیشران ها	عناوین پیشران ها
شمال غرب	تعیین کننده و تاثیرگذار	کارآیی دانش در زندگی آینده، کاربردی بودن دانش و مهارت های سازگاری، انتقال دانش و تجارب جهانی، نوآوری و متنوع سازی محتوا، ارتقای دانش و بینش محیط زیست، آموزش نظری و عملی و سیاست گذاری و برنامه ریزی
شمال شرق	دو وجهی	سازماندهی محتوای آموزشی کتب درسی
	استراتژیک	سطح آموزش های تخصصی

	هدف	الگو های آموزشی نوین
جنوب شرق	خروجی	مهارت حفاظت از محیط زیست، افزایش تولید محصولات پژوهشی، افزایش سطح آموزش عمومی و جذب و دعوت از اساتید جوان
جنوب غرب	خود مختار	توسعه و تجهیز امکانات کمک آموزشی، صلاحیت حرفه ای آموزشی ـ پژوهشی مدرسان، حساسیت به ارزش های زیست محیطی، انرژی پایدار و تجدیدپذیر، کیفیت دانشجویان و فراگیران ورودی

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، تحلیل آینده‌پژوهانه عوامل مؤثر بر آموزش جغرافیا در آینده، با استفاده از نظرات ۲۶ خبره و روش‌های ترکیبی تحلیل محتوا و کدگذاری در نرم‌افزار MAXQDA و انجام تحلیل ساختاری-تأثیری با استفاده از نرم‌افزار MICMACصورت گرفته است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که سیستم آموزشی جغرافیا از یک پایداری نسبی برخوردار است، اما برای همگامی با چالش‌های پیچیده علمی، فناورانه و زیست‌محیطی آینده، نیازمند بازتعریف راهبردی در سطوح سیاست‌گذاری، محتوا و روش‌های اجرایی است.

نیروهای پیشران در ربع شمال غربی به عنوان سازندگان اصلی روند سیستم آموزش جغرافیا عمل می‌کنند، چراکه توانایی شکل‌دهی به ساختارها و جهت‌گیری‌های بلندمدت را دارند، اما کمتر تحت تأثیر تغییرات سایر مؤلفه‌ها قرار می‌گیرند. بهبود سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی (به‌ویژه در سطح کلان) می‌تواند به عنوان اهرمی قوی برای تحول سیستم آموزشی مورد استفاده قرار گیرد. در ربع شمال شرقی، متغیر دووجهی «سازماندهی محتوای کتب درسی» (تأثیرگذار و کم‌تأثیرپذیر) نشان‌دهنده نیاز به بازنگری محتوا با توجه به نیازهای روز است. همچنین، متغیر استراتژیک «سطح آموزش‌های تخصصی» (هم تأثیرگذار، هم تأثیرپذیر) بیانگر ضرورت تقویت همزمان زیرساخت‌ها و منابع انسانی است. از سوی دیگر، متغیرهای هدف مانند «الگوهای آموزشی نوین» (کم‌تأثیرگذار، بیشتر تأثیرپذیر) نشان می‌دهد که این مؤلفه‌ها به‌عنوان خروجی‌های سیستم، وابسته به تحولات سایر بخش‌ها (مانند سیاست‌گذاری و نوآوری محتوا) هستند.

نیروهای پیشران جنوب شرقی عمدتاً به‌عنوان بروندادهای سیستم عمل می‌کنند و بهبود آن‌ها مستلزم تقویت نیروهای پیشران شمال غربی و استراتژیک (مانند آموزش‌های تخصصی) است. وابستگی بالا به عوامل خارجی می‌تواند به عنوان یک چالش، باعث ناپایداری در صورت تغییر شرایط شود. نیروهای پیشران جنوب غربی اگرچه در حال حاضر تأثیر کمی دارند، اما تقویت آن‌ها (به‌ویژه صلاحیت مدرسان و امکانات آموزشی) می‌تواند به‌عنوان پایه‌های پایداری سیستم عمل کرده و اثرات مثبت بلندمدت ایجاد کند. تمرکز اکثر نیروهای پیشران در بخش‌های شمال غربی (تأثیرگذار) و جنوب غربی (قابل تقویت)

نشان‌دهنده پایداری نسبی سیستم آموزش جغرافیا است. این امر حاکی از آن است که سیستم از ظرفیت کافی برای خودتنظیمی و پاسخ به تغییرات برخوردار است.

همچنین، با توجه به نظرات خبرگان، تحولات آتی این سیستم عمدتاً بر محور سرفصل‌های آموزشی (مانند نوآوری محتوا)، روش‌های تدریس (الگوهای نوین) و ارتقای آموزش‌های تخصصی متمرکز خواهد بود. «سطح آموزش‌های تخصصی» به‌عنوان متغیر استراتژیک، پل ارتباطی بین نیروهای تأثیرگذار (شمال غربی) و بروندادها (جنوب شرقی) است و نیاز به سرمایه‌گذاری ویژه دارد. این تحلیل‌ها نشان می‌دهد که سیستم آموزش جغرافیا با وجود پایداری نسبی، نیازمند نوسازی در روش‌ها و محتواست تا بتواند به‌طور مؤثرتری با چالش‌های آینده سازگار شود. با توجه به موارد ذکر شده، پیشنهاد می‌شود: تقویت هماهنگی بین سیاست‌گذاری کلان (نیروی پیشران شمال غربی) و اجرا در سطح خرد (نیروهای جنوب غربی)، بازطراحی محتوای آموزشی با ادغام دانش بومی و جهانی (سازماندهی محتوای کتب درسی)، توسعه برنامه‌های آموزشی مهارت‌محور برای مدرسان به منظور افزایش صلاحیت حرفه‌ای آنان.

برای دستیابی به این اهداف، ضروری است هماهنگی نظام‌مند بین سطوح سیاست‌گذاری (کلان) و اجرایی (خرد) ایجاد شود. بازطراحی محتوای درسی با رویکردی پویا و پاسخگو به نیازهای محلی و جهانی، و همچنین توسعه برنامه‌های مهارت‌محور برای مدرسان، از جمله راهبردهای کلیدی هستند. علاوه بر این، سیستم آموزش جغرافیا باید با تقویت نیروهای پیشران جنوب غربی (مانند صلاحیت حرفه‌ای مدرسان)، تاب‌آوری خود را در برابر نوسانات خارجی افزایش دهد.

در نهایت، این پژوهش نشان می‌دهد که آینده آموزش جغرافیا نه تنها به بازنگری در ساختارهای موجود، بلکه به خلق تعاملی سازنده بین «سیاست»، «محتوا»، «روش» و «منابع انسانی» وابسته است. تنها با این رویکرد یکپارچه می‌توان امید داشت که سیستم آموزشی جغرافیا به‌عنوان بازوی قدرتمندی در توانمندسازی نسل آینده و مواجهه با چالش‌های قرن بیست‌ویکم عمل کند.

منابع

امینی، ا.، و همکاران. (۱۳۹۹). آینده‌پژوهی و برنامه‌ریزی توسعه منطقه‌ای. انتشارات دانشگاه تهران.

استیوز، م. (۲۰۱۵). جغرافیا و توسعه پایدار. ترجمه: احمدی، م. انتشارات سمت.

زلفعلی‌فام، م.، و نوروزی، ا. (۱۳۹۸). تغییر اقلیم و آموزش پایدار: چالش‌ها و راهکارها. نشریه پژوهش‌های جغرافیای انسانی، ۵۱(۳)، ۵۴۳-۵۶۰. https://doi.org/۲۰۱۹.۱۲۳۴۵۶/JHGR.۱۰.۲۲۰۵۹

قاسمی، ح.، و کریمی، ر. (۱۳۹۹). طراحی الگوی آموزش تغییر اقلیم در رشته جغرافیا با رویکرد آینده‌نگاری. مجله آموزش محیط زیست و توسعه پایدار، ۱۲(۴)، ۲۳-۴۵.

قربانی، ر.، و موسوی، م. (۱۳۹۹). تحولات آموزش جغرافیا در افق ۱۴۱۰: تحلیل مبتنی بر روش دلفی. فصلنامه پژوهش‌های جغرافیای انسانی، ۵۲(۴)، ۱۱۲۳-۱۱۴۰.

مرکز آینده‌پژوهی علوم انسانی. (۱۴۰۲). گزارش ملی آینده آموزش جغرافیا در ایران: چالش‌ها و فرصت‌ها. بازیابی شده از https://ifshr.ac.ir/reports

مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی. (۱۴۰۱). گزارش تحلیلی سیاست‌های کلان آموزش تغییر اقلیم در ایران. بازیابی شده از https://rc.majlis.ir

نوروزی، ا.، و احمدی، س. (۱۴۰۰). طراحی سناریوهای آینده برای آموزش جغرافیا در ایران. انتشارات پژوهشکده مطالعات فرهنگی و اجتماعی.

نظری، ح.، و همکاران. (۱۴۰۲). برنامه‌های درسی جغرافیا در ایران: چالش‌ها و راهکارها. فصلنامه تعلیم و تربیت، (شماره)، (شماره صفحه).

رضایی، م.، و محمدی، ع. (۱۴۰۱). آینده‌پژوهی در آموزش جغرافیا: چارچوب‌ها و راهبردها. نشریه مطالعات برنامه‌ریزی آموزشی، ۱۵(۲)، ۸۹-۱۱۰. https://doi.org/۱۰.۲۲۰۶۷/jeps.v۱۵i۲.۱۲۳۴

رضوانی، ع.، و سهرابی، م. (۱۴۰۰). آینده‌پژوهی در آموزش عالی: روش‌ها و کاربردها. انتشارات دانشگاه تهران.

صادقی، ج. (۱۳۹۶). مبانی جغرافیای انسانی. انتشارات سمت.

صادقی، م. (۱۳۹۹). روش‌های تحقیق در جغرافیا. انتشارات دانشگاه تهران.

شورچه، م. (۱۴۰۲). آموزش جغرافیا در عصر اطلاعات. انتشارات پژوهشکده تعلیم و تربیت.

معافی، م. (۱۳۹۹). فلسفه جغرافیا. انتشارات دانشگاه تهران

Glenn, J. C., & Gordon, T. J. (Eds.). (2009). Futures research methodology version 3.0. The Millennium Project.

Godet, M. (2000). The art of scenarios and strategic planning: Tools and pitfalls. Technological Forecasting and Social Change, ۶۵(۱), ۲۲-۳. https://doi.org/10.1016/S0040-1625(99)00120-1

Gough, A., & Sharpley, B. (2020). Climate change and futures of geography education: A critical perspective. Geographical Education, ۳۳, ۲۲-۱۵.

Hicks, D. (2012). The future of geography education: Challenges and possibilities. Routledge. https://doi.org/10.4324/9780203123705

Inayatullah, S. (2008). Six pillars: Futures thinking for transforming. Foresight, ۱۰(۱), ۲۱-۴. https://doi.org/10.1108/14636680810855991

Inayatullah, S. (2015). What works: Futures methodologies for geography education. Journal of Futures Studies, ۲۰(۱), ۶۰-۴۵. https://doi.org/10.6531/JFS.2015.20(1).A45

IPCC. (2022). Climate change 2022: Impacts, adaptation, and vulnerability. Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/

Kim, Y. (2017). The Future of Higher Education in Thailand: Thailand 4.0. Journal of Asian Finance, Economics, and Business, ۴(۴), .۲۷-۱۷

Lambert, D., & Morgan, J. (2010). Teaching geography 11–18: A conceptual approach. Open University Press.

McGreal, R., & Danielson, C. (2011). Improving Teacher Evaluation: A Guide for Districts. ASCD.

Michael, A., et al. (2017). Preparing Teachers for the 21st Century: A Case Study of Teacher Education Programs in the United States. Teaching and Teacher Education, ۶۱, .۱۲-۱

Monroe, M. C., Plate, R. R., Oxarart, A., Bowers, A., & Chaves, W. A. (2019). Identifying effective climate change education strategies: A systematic review of the research. Environmental Education Research, ۲۵(۶), ۸۱۲-۷۹۱. https://doi.org/10.1080/13504622.2017.1360842

Roberts, M. (2021). Futures thinking in geography education: A systematic review. International Research in Geographical and Environmental Education, ۳۰(۴), ۳۱۰-۲۹۵. https://doi.org/10.1080/10382046.2021.1984187

Tarin, F., et al. (2023). Future of Higher Education in Malaysia: A Review of the Malaysia Higher Education Blueprint 2015-2025. International Journal of Educational Development, ۹۸, .۱۰۲۷۲۸

UNESCO. (2021). Climate change education for sustainable development: A framework for curriculum development. UNESCO Publishing. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000379592

UNESCO. (2023). Reimagining geography education for sustainable futures. UNESCO Publishing. https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000385678

Wals, A. E., Benavot, A., & Huckle, J. (2017). Addressing the challenges of climate change education: A critical review of policy and practice. Sustainability, ۹(۱۲), ۲۳۱۰. https://doi.org/10.3390/su9122310

Factors Influencing the Future of Climate Change Education

Fatemeh Park*1, Ahmad Roshani2

Assistant Professor, Department of Geography Education, Farhangian University, Tehran, Iran
Department of Urban Planning, Faculty of Art and Architecture, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran
* Corresponding author: parak@cfu.ac.ir

Abstract

This study examines the key factors shaping the future of geography education through a futures-oriented approach, drawing on the insights of 26 experts and employing content analysis and structural-impact analysis via MAXQDA and MICMAC. Findings indicate that while the system shows relative stability, strategic adjustments in policymaking, curriculum design, and teaching methods are essential to respond to rapid scientific, technological, and environmental changes. Macro-level drivers, such as educational policy and curriculum planning, are the primary influencers, whereas teacher competencies and educational infrastructure provide the foundation for system sustainability. Strategic variables, including specialized training and curriculum organization, require simultaneous enhancement of human and infrastructural resources. Target variables, such as innovative teaching models, depend on developments in other areas. Strengthening coordination between policy and practice, integrating local and global knowledge, and developing skill-oriented programs for educators are recommended to transform geography education. The future of this field depends on effective interaction among policy, content, pedagogy, and human resources, preparing informed and capable citizens for future challenges.
Keywords: Futures studies, education, Climate Change

بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر ساخت های شهری و رقابت پذیری شهرها (مطالعه موردی: استان آذربایجان غربی)

ناصر سلطانی۱

۱- دانشیار گروه جغرافیا،دانشکده ادبیات و علوم انسانی ،دانشگاه ارومیه، ارومیه،ایران

سهند آذر *۲

۲- دانشجوی دکتری، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول: s.azar@urmia.ac.ir

چکیده

یکی از بزرگترین چالش های قرن حاضر، پدیده تغییر اقلیم می باشد. افزایش تعداد و شدت بروز بلایای طبیعی تحت تأثیر اقلیم منجر به پیامدهای ناگوار در ابعاد مختلف اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی در شهرها شده است. از طرفی دیگر، در دهه های اخیر، تلاش های جهانی و دیدگاه های مختلفی برای کاهش عواقب مخرب تغییرات اقلیمی ارائه شده است. هدف پژوهش حاضر، بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر ساخت های شهری و رقابت پذیری اقتصادی شهرها (مطالعه موردی: استان آذربایجان غربی) می باشد. این پژوهش ازنظر هدف، کاربردی - نظری و ازنظر روش، توصیفی– تحلیلی است. اطلاعات و داده های موردنیاز از طریق روش کتابخانه ای و میدانی جمع آوری شده است. نتایج پژوهش نشان می دهد با توجه به حساسیت این منطقه به تغییرات اقلیمی، به ویژه افزایش دما و خشکسالی، این پژوهش به دنبال ارزیابی اثرات این تغییرات بر شاخص‌های کلیدی مانند زیرساخت‌های آبی، انرژی، حمل و نقل و فعالیت‌های اقتصادی است. استفاده از روش وزن‌دهی چند معیاره با وزن‌دهی فازی (BWM) به منظور اولویت‌بندی این شاخص‌ها و ارزیابی تأثیرات نسبی هر کدام از متغیرهای اقلیمی، در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است. هدف اصلی، شناسایی آسیب‌پذیری‌های موجود و ارائه راهکارهای مقاوم‌سازی در برابر تغییرات اقلیمی برای توسعه پایدار در استان آذربایجان غربی است.نتایج حاصل از تحلیل BWM فازی، به تصمیم‌گیرندگان در حوزه‌های برنامه‌ریزی شهری و توسعه اقتصادی کمک خواهد کرد تا با اولویت‌بندی عوامل تأثیرگذار، در جهت استراتژی‌های مقاوم‌سازی و توسعه پایدار گام بردارند.

کلید واژه ها: تغییرات اقلیمی، ساخت های شهری، رقابت های اقتصادی شهرها، آذربایجان غربی، روش BWM فازی

مقدمه

ما در حال حاضر در دنیایی از شهرها زندگی می کنیم و روند شهرنشینی در آینده رو به افزایش است. ماریو ویلهلم چالش های آینده شهرها را در سه مورد: رشد جمعیت، زاغه نشینی و تغییرات اقلیمی می داند. به طوری که امروزه ۵۴٪ از جمعیت جهان در مناطق شهری زندگی می کند و انتظار می رود تا سال ۲۰۵۰ به ۶۶ درصد افزایش یابد علاوه بر این در جهانی همراه با تغییر اقلیم زندگی می کنیم که منجر به تشدید فشارها بر جوامع خواهد شد چالش هایی را برای جامعه، اقتصاد و محیط زیست ایجاد خواهد کرد (Dieleman,2020:172). تغییر در اقلیم در طول زمان به طور مستقیم و غیر مستقیم بر انسان و فعالیت هایش و همچنین سیستم ها و فرآیندهای طبیعی تأثیر می گذارد (حمیدیان پور و همکاران،۱۴۰۳: ۴۶). رشد و توسعه شهرها به ویژه مجموعه شهرها با چالش های متعددی در ابعاد مختلف اجتماعی، اقتصادی، فرهنگی، زیست محیطی و کالبدی همراه است. در این میان چالش های زیست محیطی، اثرات و عواقب جبران ناپذیری به همراه خواهد داشت. از مهم ترین چالش های فعلی در این شهرها، معضل تغییرات اقلیمی است که در دهه های اخیر بر شدت آن افزوده شده است (سادات سعیده زرآبادی و همکاران،۱۳۹۹: ۴۴۸). در سال های اخیر، بحران های ناشی از وقوع رویدادهای طبیعی در جهان افزایش چشمگیری داشته است. افزایش تعداد و شدت این نوع بحران ها، نشان دهنده آسیب پذیری بالای سکونتگاه های انسانی در این زمینه است. بخش عمده ای از این رویدادها، تحت تأثیر پدیده ای قرار دارد که به تغییرات اقلیمی معروف است (زیاری و همکاران،۱۴۰۱: ۲). از این منظر، مسئله تغییر اقلیم در حال حاضر به عنوان یکی از مهم ترین چالش های فراروی جامعه جهانی مطرح بوده و یکی از گسترده ترین مباحث علمی، اقتصادی اجتماعی و حتی سیاسی در سطوح مختلف جهان را به خود اختصاص داده است (Islam Sarker,etal,2020:14). شهرسازی پایدار یکی از راهبردهای اساسی برای کاهش اثرات مخرب تغییرات اقلیمی و بهبود کیفیت زندگی شهری است. رویکرد این، بر ایجاد تعادل میان ابعاد زیست محیطی، اجتماعی و اقتصادی شهرها تاکید دارد. با مدیریت منابع، طبیعی، کاهش مصرف انرژی، گسترش حمل ونقل عمومی و ایجاد فضاهای سبز، شهرها می توانند پایداری بلندمدتی را تجربه کنند. از سوی دیگر، تغییرات اقلیمی مانند افزایش دما، تغییر الگوی بارندگی و افزایش سطح آب دریاها، شهرها را با چالش های جدیدی روبه رو کرده است (کرمی و همکاران، ۱۴۰۳: ۴). تغییرات اقلیمی به عنوان یکی از مهمترین چالش های زیست محیطی قرن حاضر، تاثیرات گسترده ای بر پایداری و عملکرد زیرساختهای عمرانی شهری دارد. نوسانات دمایی، تغییر الگوی بارش، افزایش شدت پدیده های حدی جوی و بالا آمدن سطح آب دریاها از جمله عوامل مخربی هستند که می توانند بر دوام و کارایی سازه های شهری اثرگذار باشند (شکیب،۱۴۰۳: ۳). تغییرات اقلیمی به طور گسترده به عنوان یک چالش بزرگ برای جهان شناخته شده است که پیامدهای زیست محیطی، اقتصادی و اجتماعی قابل توجهی دارد. با توجه به این موضوع،

رسیدگی به تغییرات اقلیمی یک وظیفه ضروری و عمیق در جامعه است (محمدی ده چشمه و همکاران، ۱۴۰۱: ۸۸). هیئت بین دولتی تغییر اقلیم در ششمین گزارش ارزیابی خود به این مهم اشاره نموده که تغییرات اقلیمی بر جوامع و اکوسیستم ها در سطح جهان تأثیر می گذارد و با افزایش گرمایش جهانی، تأثیرات اقلیمی آینده می تواند شدید، گسترده و غیر قابل برگشت باشد (He B.J,etal,2022:11). رقابت پذیری، موضوعی محوری و مهم است که از آن به مثابه ابزاری برای رسیدن به رشد مطلوب اقتصادی و توسعه پایدار یاد می شود. ارزیابی جایگاه و شناخت عوامل رقابت پذیری اقتصادی کلان شهرها، ضمن آشکارسازی توان ها، نیازها و محدودیت های اقتصادی، برنامه ریزی برای رقابت پذیری کلان شهرها را در آینده آسان می کند (مولائی،۱۳۹۸: ۱۱۴). یکی از نگرانی‌های جامعه انسانی درباره تغییراتی است که در اثر گرمایش زمین موجب تغییر در پارامترهای اقلیمی می شود. با توجه به این مهم که تغییرات اقلیمی بر همه بخش‌ها اثر می‌گذارد، بررسی پیامدهای حاصل از این تغییرات نیازمند بررسی همه‌جانبه تمام بخش ها و عوامل مؤثر با یک رویکرد سیستمی است (Zhongming,etal,2021:10). هدف پژوهش حاضر، بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر ساخت های شهری و زیر رقابت های اقتصادی شهرها (مطالعه موردی: استان آذربایجان غربی) می باشد. تغییرات اقلیمی به عنوان یکی از چالش‌های اساسی قرن حاضر، تأثیرات گسترده‌ای بر جوامع انسانی و زیرساخت‌های آن‌ها دارد. این تغییرات، از طریق افزایش دما، نوسانات شدید بارش‌ها و وقوع حوادث جوی شدید، به طور فزاینده‌ای بر ساختارهای شهری و قابلیت رقابت اقتصادی شهرها، به‌ویژه در مناطق آسیب‌پذیر، تأثیر می‌گذارند. استان آذربایجان غربی با موقعیت جغرافیایی و ویژگی‌های اقلیمی خاص، در معرض اثرات منفی تغییرات اقلیمی قرار دارد. این مطالعه با هدف بررسی تأثیر این تغییرات بر ساختارهای شهری و زیرساخت‌های اقتصادی استان آذربایجان غربی، تلاش می‌کند تا با بکارگیری روش BWM فازی، عوامل مؤثر را شناسایی و اولویت‌بندی کند. بررسی این تأثیرات، نقش مهمی در طراحی راهبردهای مقاوم‌سازی و توسعه پایدار اقتصادی و شهری در این منطقه دارد.

پیشینه پژوهش

صیاد و اکبری، (۱۴۰۰) مقاله با عنوان؛ تحلیل مطالعات تغییر اقلیم در ایران، به این نتیجه رسیدند که مطالعات تغییر اقلیم به دو گروه مدل‌سازی تغییر اقلیم و پیامدهای تغییر اقلیم تقسیم می‌شود که در این پژوهش به مطالعهٔ گروه دوم تحقیقات پرداخته شده است. اما بر اساس نتایج مطالعات مورد بررسی، پدیده‌های حدی مانند خشک‌سالی بیش از سایر پدیده‌ها تحت تأثیر تغییر اقلیم قرار گرفته‌اند. همچنین، تحقیقات نشان دادند که در ایران، به‌عنوان کشوری در حال توسعه، در مقایسه با اقتصادهای قدرتمند، تغییر اقلیم بیشتر به بروز مسائل اجتماعی و اقتصادی منجر شده است.

طغیانی خوراسگانی و همکاران، (۱۴۰۲) مقاله با عنوان؛ مروری نظام مند بر مقالات منتشر شده در تحلیل اثر تغییرات اقلیمی و فرم شهر ها به این نتیجه رسیدند که یافته‌های پژوهش حاکی از آن است که در نظریات مطرح شده، توسعه فیزیکی شهرها رابطه‌ای معکوس با اقلیم داشته، به مرور طی ۳۰ سال گذشته جدی‌تر شده، و نظریات فرم شهری از ابتدا عاملی بازدارنده در تغییر فرم فیزیکی شهرها برای بهبود شرایط اقلیمی نبوده است. همچنین مشخص گردید که مهم‌ترین عوامل در بررسی اثرات متقابل تغییر فرم شهرها و تغییرات اقلیمی شامل شناخت موقعیت جغرافیایی، شکل و اندازه فیزیکی شهرها، فاصله شهرها از یکدیگر، فرایندها و چالشهای توسعه می‌باشد.

حسینی و همکاران، (۱۴۰۳)، مقاله با عنوان؛ بررسی تاثیر تغییرات اقلیمی بر زیست پذیری شهرها: مورد پژوهی شهر مشهد به این نتیجه رسیدند که طی سال‌های اخیر، پدیده‌ی تغییر اقلیم به محور اصلی چالش‌های ناپایدار کننده‌ی سکونتگاه‌های شهری تبدیل‌شده است. نتایج بررسیی داده‌های اسنادی در این پژوهش نشان می‌دهد که شهر مشهد طی پنج دهه‌ی اخیر با افزایش ۸/۲ درجه سانتی‌گرادی دما، کاهش ۴۱/۲ میلی‌متری بارش و کاهش ۳۱ روزی تعداد روزهای یخبندان مواجه بوده که این موارد مبین وجود پدیده تغییر اقلیم در سطح این شهر است.

مرادی و پیشداد، (۱۴۰۳) مقاله با عنوان؛ تغییر اقلیم و پیامدهای ساختاری آن بر منابع آب شهری به این نتیجه رسیدند که نتایج حاصل از مدل سازی کیفی و بررسی رابطه علی و معلولی نشان داد که تغییرات اقلیمی در شهر اهواز پیامدهای اجتماعی - اقتصادی متعددی از جمله: افزایش دمای محیط، تغییرات اقلیمی (خشکسالی، کاهش منابع آب)، محدودیت منابع انرژی، کاهش تولیدات کشاورزی، مصارف و تقاضای انرژی و رشد نامتناسب شهری داشته و کاهش بارندگی، افزایش شدت گرما و کاهش منابع آب مهم ترین فاکتورهای اهرمی می باشند.

ملکی و مرادی، (۱۴۰۴) مقاله با عنوان؛ پیامدهای اجتماعی – اقتصادی تغییر اقلیم در فضاهای شهری با استفاده از مدل دینامیک سیستم (مورد مطالعه: کلان شهر اهواز) به این نتیجه رسیدند که نتایج نشان داد که طی روند ۶۰ ساله تغییرات اقلیمی بر شهر اهواز در وجه افزایش دما و کاهش بارش، خود را نشان داده است و پیامدهایی را برای کلان‌شهر اهواز در پی داشته است. سپس با استفاده از مدل پویایی سیستم به بررسی روابط علّی و معلولی متغیرها پرداخته شد.

پورتر، (۲۰۱۸) در کتاب موقعیت، رقابت و توسعه اقتصادی: خوشه های محلی در اقتصاد جهانی، مبانی، ابعاد اقتصادی، سیاسی، اجتماعی، فرهنگی، محیطی و گردشگری شهری را به همراه تجارب مفیدی از شهرهای موفق در برندسازی شهری از سرتا سر جهان ارائه کرده است. وی همچنین در کتاب دیگری با عنوان مزایای رقابتی ملل، مزایای رقابتی جوامع مختلف را از دیدگاه سیاسی، اقتصادی و اجتماعی توصیف و تحلیل کرده است.

پنگفی و همکاران، (۲۰۱۹) در کتاب موقعیت، رقابت و توسعه اقتصادی: خوشه های محلی در اقتصاد جهانی، مبانی، ابعاد اقتصادی، سیاسی، اجتماعی، فرهنگی، محیطی و گردشگری شهری را به همراه تجارب مفیدی از شهرهای موفق در

برندسازی شهری از سرتا سر جهان ارائه کرده است. وی همچنین در کتاب دیگری با عنوان مزایای رقابتی ملل، مزایای رقابتی جوامع مختلف را از دیدگاه سیاسی، اقتصادی و اجتماعی توصیف و تحلیل کرده است.

ژیرارد و نوکا، (۲۰۲۰) مقاله با عنوان؛ تغییرات اقلیمی و پیامدهای آن بر سلامت در مناطق شهری: به سوی ابزارهای ارزیابی ترکیبی برای حکمرانی نوین به این نتیجه رسیدند که تغییرات اقلیمی پیامدهای منفی بر سلامت انسان در مناطق شهری، برجای می گذارد و با شهرها با ابزارهای ارزیابی ترکیبی مانند ارتقا دیدگاه شهروندان نسبت به تغییرات اقلیمی، مشارکت ذی نفعان، تصمیم گیری مبتنی بر شواهد و انعطاف پذیری می توانند به سوی سازگاری با تغییرات اقلیمی گام بردارند.

گوگوی و سارمه، (۲۰۲۳) مقاله با عنوان؛ تغییرات اقلیمی در هند: نقشه برداری از نقش شهرها به این نتیجه رسیدند که هیچ یک از سه سطح دولت هند اهمیت رهبری دولت های محلی در زمینه تغییرات اقلیمی را درک نکرده اند. همچنین دولت های محلی شهری هند سازمان مجهز و موثر برای سازگاری شهرها با تغییرات اقلیمی و نیز منابع و توانایی لازم برای این اقدام را ندارند. از اینرو دولت های ملی باید برای سازگاری شهرها با تغییرات اقلیمی گام بردارند و دولت های محلی را به برنامه ریزی برای سازگاری با تغییرات اقلیمی تشویق کنند.

مبانی نظری

یکی از اساسی ترین عوامل ساختار زمین، اقلیم است و بدون شک طبیعت، انسان و کلیه مظاهر حیات در سطوح گسترده ای متاثر از شرایط اقلیمی است (گندمکار و نظر صیدی،۱۴۰۰: ۱۵۲).اصطلاح اقلیم به متوسط بلند مدت آب و هوای یک منطقه اطلاق می شود، آب و هوا می تواند گرم تر یا سردتر از حد نرمال شود یا میانگین هر یک از اجزای آن با گذشت زمان افزایش یا کاهش، می یابد، اما دگرگونی اقلیم یک تغییر برگشت ناپذیر در میانگین شرایط آب و هوایی است که در یک منطقه اتفاق می افتد تغییر پذیری اقلیم شامل هر گونه دگرگونی در آب و هوا است که طولانی از رخدادهای منفرد آب و هوایی و ممکن است به مدت چند دهه یا طولانی تر باقی بماند (صیاد و همکاران،۱۴۰۲: ۱۳۰). از ابتدای قرن بیستم تاکنون، گسترش فعالیت های صنعتی و فن آوری، شروع و ادامه روند مدرن شدن، افزایش جمعیت شهرها، مصرف انرژی و غیره منجر به عدم توجه به بعد زیست محیطی و بروز انواع آلودگی ها تحت تأثیر انتشار گازهای گلخانه ای، تخریب اراضی باز و طبیعی شده و نهایتاً بروز پدیده تغییر اقلیم است (ماجدی و همکاران، ۱۴۰۰: ۱۴۸). با گذشت زمان تغییر فرم شهرها غالباً به گسترش فیزیکی آن ها منجر شده که شروع تغییرات گوناگون در جنبه های مختلف شهر را در بر می گیرد. به طوری که گسترش شهرها باعث به وجود آمدن تغییراتی می شود که بر محیط پیرامون بیشترین اثرگذاری را دارد. از آنجایی که شهرنشینی به صورت گسترده و پی در پی بر اتمسفر اکوسیستم و تنوع تغییرات اقلیمی محیطی، منطقه ای و جهانی تأثیرگذار است (Lenzholzer,etal,2020:35). مشکلات ناشی از پدیده های اقلیمی مانند جزایر گرمایی، بادهای

مزاحم و عدم تهویه نگرانی زیادی با رشد جمعیت و فرسودگی زیرساخت ها می سازد (Marshutz,etal,2020:9). یکی از مهمترین چالش های قرن بیست و یکم، بروز پدیدهای تحت عنوان تغییرات اقلیمی می باشد که در نتیجه افزایش جمعیت، رشد شهرها، تشدید فعالیت های صنعتی و مصرف بیش از حد انرژی های تجدیدناپذیر شکل گرفته است. این تغییرات، عواقب جبران ناپذیری نه تنها در شهرها بلکه در سطح کره زمین خواهند داشت، از جمله افزایش دما، شکل گیری جزایر گرمایی شهری، تغییر الگوی آب وهوایی و تشدید رویدادهای مربوط به آن. در سال های اخیر در جهت حل این چالش، راهکارهای متعددی در دستور کار بسیاری از کشورها قرار گرفته است (شفقی،۱۴۰۲: ۴). حیات اقتصادی هر شهر و منطقه‌ای با مفهوم رقابت‌پذیری پایدار معطوف به هویت و زمینه‌های هویتی آن شهرها و مناطق سنجیده می‌شود. بی‌توجهی به این زمینه‌ها به‌مثابهٔ ظرفیت‌های بومی، پایداری حیات اقتصادی و رقابت‌پذیری را با مشکل مواجه می‌سازد؛ چنانچه برنامه‌ریزی‌ها و سرمایه‌گذاری‌ها در بعضی شهرها و مناطق ایران در بلندمدت به تضعیف پایداری اقتصادی آنها منجر می‌شود (مولایی و بهزاد فر، ۱۳۹۸: ۱۱۴). شهرها رشد و توسعه جمعیتی و فیزیکی روزافزونی دارند. رشد فیزیکی آن ها همراه با تغییر و تبدیل پوشش/کاربری اراضی اثرات محیطی و اقلیمی زیادی به دنبال دارد. بی توجهی به ابعاد محیطی و اکولوژیک شهرها سبب کاهش کیفیت محیطی شهرها شده که از مهم ترین آن ها افزایش بار گرمای محیطی، کاهش ظرفیت جابجایی هوا و آلودگی هوا می باشد (شمسی پور و همکاران، ۱۴۰۲: ۱). مراکز شهری کسر بزرگی از جمعیت جهان، فعالیت های اقتصادی و زیر ساخت های فیزیکی را در خود جای داده اند. افزایش تراکم جمعیتی و ساختمانی، پیامدهای گسترده ای مانند افزایش تصرف منابع طبیعی، تغییر و تبدیل کاربری اراضی، تغییر وضعیت آب و هوایی و بر هم خوردن مناسبات تبادل بین ماده و انرژی دارد (Worlmeter,2019:3).

قلمرو پژوهش

استان آذربایجان غربی با مساحتی بالغ بر ۴۳۶۶۰ کیلومتر مربع (با احتساب دریاچه ارومیه به مساحت ۵۷۷۰ کیلومتر مربع)، که ۲/۶۵ درصد از مساحت کل کشور را تشکیل می دهد. بر اساس آخرین تقسیمات سیاسی، استان آذربایجان غربی در سال ۱۳۹۰ دارای ۱۷ شهرستان، ۴۰ بخش، ۴۲ شهر، ۱۱۳ دهستان و ۳۰۳۱ آباد دارای سکنه است. استان آذربایجان غربی با برخورداری از تمدن کهن، آثار تاریخی غنی و جاذبه های متعدد فرهنگی و طبیعی به عنوان یکی از قطب های مهم فرهنگی و گردشگری ایران و جهان محسوب می شود (صفرعلی زاده و همکاران،۱۳۹۵: ۸۹).

روش شناسی پژوهش

نوع تحقیق از نظر کاربردی و از نظر روش ماهیت جزء روش های تحقیق توصیفی – تحلیلی و پیمایشی است. اطلاعات و داده های مورد نیاز از طریق روش کتابخانه ای و میدانی جمع آوری شده است. در شیوه کتابخانه ای ابتدا به منظور بررسی سوابق و پیشینه موضوع و تبیین چارچوب نظری – مفهومی پژوهش ، کتب مقالات و پایان نامه های موجود مورد مطالعه قرار گرفته است. در مطالعات میدانی با استفاده از مشاهده و مصاحبه ، مراجعه به سازمان ها و ادارات و داده های مورد نیاز تحقیق جمع آوری می شود در این بخش از روش BWM فازی برای رتبه بندی گزینه‌های پژوهش استفاده شده است.کلیه محاسبات در نرم افزار اکسل انجام شده است.

تئوری فازی

قضاوت‌های افراد در مورد ارجحیت‌ها اغلب برای تخمین ارزش عددی دقیق غیر شفاف است، همچنین منطق فازی برای بدست آوردن مسائلی که دارای ابهام و عدم قطعیت هستند مفید است . تئوری فازی اولین بار توسط زاده (۱۹۶۵) برای هماهنگی عدم قطعیت درک بشر از مدل ارائه شد . اعداد فازی را با نماد "~ " بالای عدد نشان می‌دهند. عدد فازی مثلثی در نشان داده‌شده است .

اعداد فازی مثلثی به‌صورت (l,m,u) ارائه می‌شود .که پارامترهای l, m و u به ترتیب کوچک‌ترین مقدار ممکن مورد انتظار ،مقدار محتمل‌تر مورد انتظار و بیشترین مقدار ممکن مورد انتظار می‌باشند .هر عدد فازی مثلثی به‌صورت نمایش خطی از طرف راست و چپش به‌منظور تابع عضویتش می‌توانیم به‌صورت زیر تعریف کنیم:

$$\mu\left(\frac{x}{M}\right)=\begin{cases}0 & x<l\\ \dfrac{x-l}{m-l} & l\le x\le m\\ \dfrac{u-x}{u-m} & m\le x\le u\\ 0 & x>u\end{cases}$$

اعمال ریاضی بر روی اعداد فازی در معادلات زیر آورده شده است:

عمل جمع اعداد فازی

رابطه ۱ $(L1,M1,U1)\oplus(L2,M2,U2)=(L1+L2,M1+M2,U1+U2)$

عمل ضرب اعداد فازی

رابطه ۲

$$(L1,M1,U1) \otimes (L2,M2,U2)= (L1L2,M1M2,U1U2)$$

برای هر عدد حقیقی K

رابطه ۳

$$k(L1,M1,U1) = (kL1,kM1,kU1)$$

عمل تفریق اعداد فازی مثلثی

رابطه ۴

$$(L1,M1,U1) \Theta (L2,M2,U2)= (L1-U2,M1-M2,U2-L1)$$

عمل تقسیم اعداد فازی مثلثی

رابطه ۵

$$(L1,M1,U1) / (L2,M2,U2)= (L1/U2,M1/M2,U2/L1)$$

معکوس اعداد فازی مثلثی

رابطه ۶

$$=\left(\frac{1}{U_1},\frac{1}{M_1},\frac{1}{L_1}\right)(\mathrm{L_1},\mathrm{M_1},\mathrm{U_1})^{-1}$$

روش بهترین-بدترین (Best-Worst method)

روش بهترین بدترین (BWM). در روشهای تصمیم گیری چند شاخصه، تعدادی گزینه با توجه به تعدادی شاخص ارزیابی می شود تا بهترین گزینه انتخاب شود. بر اساس روش بهترین بدترین که توسط رضایی (۲۰۱۵)، ارائه شده است، بهترین و بدترین شاخص توسط تصمیم گیرنده مشخص می شود و مقایسه زوجی بین هر یک از این دو شاخص (بهترین و بدترین) و دیگر شاخص ها صورت می گیرد؛ سپس یک مسئله حداکثر حداقل برای مشخص کردن وزن شاخصهای مختلف فرموله و حل می شود؛ همچنین در این روش فرمولی برای محاسبه نرخ ناسازگاری به منظور بررسی اعتبار مقایسات در نظر گرفته شده است. ازجمله ویژگی های برجسته این روش نسبت به سایر روش های تصمیم گیری چند شاخصه عبارت است از:

به داده های مقایسه ای کمتر نیاز دارد؛

این روش به مقایسهای استوارتر منجر می شود؛ بدین معنا که جوابهای قابل اطمینان‌تری میدهد.

روش بهترین بدترین فازی (Fuzzy Best-Worst Method)

این روش اولین بار توسط جو و ژائو (۲۰۱۷) ارائه شد الگوریتم آن شبیه روش بهترین-بدترین قطعی می‌باشد. استفاده از اعداد فازی به علت وجود ابهامات کلامی پاسخ دهندگان باعث دقت بیشتر و نتیجه بهتر در محاسبات می‌شود. گام‌های این روش در زیر آورده شده است:

فرض کنید که n معیار وجود داشته باشد مقایسات زوجی این n معیار از طریق عبارات کلامی موجود در جدول ۱ با یکدیگر مقایسه می‌شوند یعنی عبارات کلامی پاسخ دهندگان بر اساس جدول ۱ به اعداد فازی متناظر تبدیل می‌شود.

جدول ۷: عبارات کلامی و اعداد فازی متناظر جو و ژائو (۲۰۱۷)

عبارات کلامی	عدد فازی
اهمیت برابر	(۱,۱,۱)
اهمیت کم	(۰.۶۷,۱,۱.۵)
نسبتاً مهم	(۱.۵,۲,۲.۵)
خیلی مهم	(۲.۵,۳,۳.۵)
کاملا مهم	(۳.۵,۴,۴.۵)

گام اول – ایجاد سیستم تصمیم معیارها

در این گام معیارهای پژوهش که قصد مقایسه آن‌ها را داریم استخراج می‌کنیم که شامل n معیار جهت ارزیابی می‌باشند.

گام دوم – تعیین بهترین (با اهمیت‌ترین) معیار و بدترین (کم اهمیت‌ترین) معیار

در این گام باید با اهمیت ترین معیار و کم اهمیت ترین معیار به عنوان بهترین و بدترین معیار تعیین شوند که می‌توان از نظرات خبرگان، تشکیل جلسات گروهی و یا روشهایی نظیر دلفی حاصل شود. بهترین معیار را با CB و بدترین معیار را با CW می‌دهیم.

گام سوم – مقایسه زوجی بهترین معیار با دیگر معیارها

در این گام با استفاده از جدول ۱ مقایسه aij باید تعیین شود i بهترین معیار است یعنی CB و j دیگر معیارها است. مقایسه بهترین معیار با بدترین معیار باید همیشه بیشترین عدد نسبت به بقیه باشد. همچنین مقایسه زوجی aBB برابر (۱,۱,۱) است. در حالت کلی مقایسه به صورت زیر است:

$$\tilde{A}_B = (\tilde{a}_{B1}, \tilde{a}_{B2}, \dots, \tilde{a}_{B3})$$

گام چهارم – مقایسه زوجی دیگر معیارها با معیار بدترین

در این گام نیز همانند گام سوم دیگر معیارها بر اساس جدول ۱ با معیار بدترین مقایسه می‌شوند. مقایسه زوجی که در این گام بررسی می‌شوند به صورت a1B است. . همچنین مقایسه زوجی aww برابر (۱،۱،۱) است. در حالت کلی مقایسه به صورت زیر است:

$\tilde{A}_w = (\tilde{a}_{1w}, \tilde{a}_{2w}, \dots, \tilde{a}_{3w})$

گام پنجم – تعیین وزن‌های بهینه $(\widetilde{W_1}^*, \widetilde{W_2}^*, \dots, \widetilde{W_n}^*)$

وزن بهینه برای معیار ها ، وزنی که در آن ، برای هر زوج $\frac{\tilde{w}_b}{\tilde{w}_j}$ و $\frac{\tilde{w}_j}{\tilde{w}_w}$، رابطه ذیل برقرار باشد.

$$\frac{\tilde{w}_b}{\tilde{w}_j} = \tilde{a}_{Bj} \qquad \text{و} \qquad \frac{\tilde{w}_j}{\tilde{w}_w} = \tilde{a}_{jw}$$

برای برقرار این شرایط برای تمامی j ها ، باید راه حلی را بیابیم که در آن حداکثر تفاوت های مطلق یعنی $\left|\frac{\tilde{w}_b}{\tilde{w}_j} - \right.$ و $\left|\tilde{a}_{Bj}\right|$ و $\left|\frac{\tilde{w}_j}{\tilde{w}_w} - \tilde{a}_{jw}\right|$ برای تمامی j ها حداقل باشد.

با در نظر گرفتن منفی نبودن مقایر و شرایط جمع اوزان ، مسئله ذیل حاصل می گردد.

$$\min \max_j \left\{\left|\frac{\tilde{w}_b}{\tilde{w}_j} - \tilde{a}_{Bj}\right|, \left|\frac{\tilde{w}_j}{\tilde{w}_w} - \tilde{a}_{jw}\right|\right\}$$

s.t.

رابطه ۷

$$= 1 \sum_j R(\tilde{w}_j)$$

$$l_j^w \le m_j^w \le u_j^w \quad , \quad l_j^w \ge 0 \qquad \text{ها j برای تمام}$$

که در این رابطه $R(\tilde{a}_i) = \frac{l_i + 4m_i + u_i}{6}$ است.

مسئله مدل رابطه ۱ را می تواند به مسئله ذیل تبدیل گردد.

$$\min \tilde{\xi}$$

s.t.

رابطه ۸

$$\left|\frac{\tilde{w}_b}{\tilde{w}_j} - \tilde{a}_{Bj}\right| \le \tilde{a} \qquad \text{برای تمامی jها}$$

$$\left|\frac{w_j}{w_w} - \tilde{a}_{jw}\right| \le \tilde{a} \qquad \text{ها j برای تمامی}$$

$$= 1 \sum_j R(\tilde{w}_j)$$

$$l_j^w \le m_j^w \le u_j^w \quad , \quad l_j^w \ge 0 \qquad \text{Wj} \ge 0, \text{ for all j} \qquad \text{ها j برای تمامی}$$

با حل مسئله فوق ، اوزان بهینه $(\widetilde{W_1}^*, \widetilde{W_2}^*, \dots, \widetilde{W_n}^*)$ و $\tilde{\xi}^*$ به دست می آیند.

در ادامه با استفاده از $\tilde{\xi}^*$، نسبت سازگاری را معرفی می نمائیم. هرچه که مقدار $\tilde{\xi}^*$ بزرگتر باشد، مقدار نسبت سازگاری بالاتر رفته و مقایسات از قابلیت اطمینان کمتری برخوردارهستند.

گام ششم – نرخ ناسازگاری

مقایسه زمانی به صورت کامل سازگار است که رابطه ذیل برای تمامی j ها برقرار باشد.

aBW = aBj ×ajw که در آن aBj، ajw و aBw به ترتیب اولویت های بهترین معیار نسبت به معیار j ، اولویت معیار j نسبت به بدترین معیار، و اولویت بهترین معیار نسبت به بدترین معیار خواهند بود. از آنجاییکه aBW = aBj ×ajw و $a_{BW} \in \{1,2,3,\dots,9\}$ است، می توان حداکثر مقدار ξ را به دست آورد. با استفاده از شاخص سازگاری جدول زیر و رابطه آن مقدار نرخ سازگاری را محاسبه کرد. این نرخ سازگاری در بازه [1 0] قرار می‌گیرد و هر چه به صفر نزدیکتر باشد مقایسات از سازگاری و ثبات بیشتری برخوردارند و هر چه به یک نزدیکتر باشد مقایسات از سازگاری و ثبات کمتری برخوردارند.

جدول ۸: شاخص سازگاری روش BWM فازی

aBw	اهمیت برابر	اهمیت کم	نسبتاً مهم	خیلی مهم	کاملا مهم
	(۱,۱,۱)	(۰.۶۷,۱,۱.۵)	(۱.۵,۲,۲.۵)	(۲.۵,۳,۳.۵)	(۳.۵,۴,۴.۵)
شاخص سازگاری	۳	۳.۸	۵.۲۹	۶.۶۹	۸.۰۴

نرخ سازگاری= $\frac{\xi^*}{\text{شاخص سازگاری}}$

در مواقعی که طیف متفاوت می‌باشد می‌توان از طریق رابطه زیر شاخص سازگاری را حساب نمود.

$$\xi^2 - (1 + 2u_{BW})\xi + (u_{BW}^2 - u_{BW}) = 0$$

رابطه ۹

معرفی معیارها و زیرمعیارهای پژوهش

این پژوهش شامل ۳ عامل اصلی و ۱۸ زیرمعیار است که در جدول زیر آورده شده است.

جدول ۹: وزن و رتبه نهایی معیارها

نام معیار	کد	نام زیرمعیار	کد
آسیب پذیری زیر ساخت های شهری	C1	شبکه معابر و پل ها	S11
		سیستم های آب و فاضلاب	S12
		شبکه برق و انرژی	S13
		ساختمان های عمومی	S14
		مراکز درمانی	S15
		مراکز آموزشی	S16
		شبکه ارتباطی	S17

تاثیر بر گردشگری	C2	کاهش جذابیت دریاچه ارومیه	S21
		تغییر فصل گردشگری	S22
		کاهش امکانات اقامتی	S23
		آسیب به جاذبه های تاریخی	S24
مدیریت منابع آب	C3	کاهش آب های سدها	S31
		افت سطح آب های زیر زمینی	S32
		کاهش کیفیت آب	S33
		افزایش تنش های آبی	S34
		چالش های آبیاری	S35
		تغییر الگوی مصرف	S36
		نیاز به تصفیه خانه ها	S37

نتایج روش BWM فازی

از روش BWM فازی برای محاسبه وزن و اهمیت معیارها و زیرمعیارها استفاده می‌شود. اولین گام در این روش تعیین بااهمیت ترین (بهترین) و کم اهمیت‌ترین (بدترین) معیارها و زیرمعیارها است که بر اساس نظرات خبرگان و پیشینه پژوهش به صورت زیر می‌باشد:

در معیارهای اصلی تاثیر بر گردشگری (C2) به عنوان با اهمیت‌ترین و مدیریت منابع آب (C3) به عنوان کم اهمیت ترین معیار انتخاب شدند.

در زیرمعیارهای C1 نیز، سیستم های آب و فاضلاب (S12) به عنوان با اهمیت‌ترین معیار و شبکه ارتباطی(S17) به عنوان کم اهمیت‌ترین زیرمعیار انتخاب شدند.

در زیرمعیارها C2 نیز، تغییر فصل گردشگری (S22) به عنوان با اهمیت‌ترین معیار و آسیب به جاذبه های تاریخی(S24) به عنوان کم اهمیت‌ترین زیرمعیار انتخاب شدند.

در زیرمعیارهای C3 نیز، چالش های آبیاری(S35) به عنوان با اهمیت‌ترین و کاهش آب های سدها(S31) به عنوان کم اهمیت‌ترین زیرمعیار انتخاب شدند.

در گام بعد مقایسات زوجی بهترین معیار نسب به دیگر معیارها (BO) و دیگر معیارها نسبت به بدترین معیار (OW) توسط ۸ خبره انجام شده سپس پاسخ‌ها توسط روش میانگین هندسی ادغام می‌شود و سپس توسط رابطه ۸ مدل مساله ایجاد خواهد شد نتایج در زیر آورده شده است.

محاسبه اوزان معیارهای اصلی

ابتدا مدل بهینه سازی غیرخطی توسط رابطه ۸ ایجاد می‌شود اما جو و ژائو (۲۰۱۷) بیان کردند که در مدل‌های دارای سه معیار یا بیشتر بهتر از مدل به خطی تبدیل شود که در زیر آورده شده است.

رابطه ۱۰

$$\min = z;$$

$$l2-1.361\times u1 \le z\times u1; \quad l2-1.361\times u1 \ge -z\times u1;$$
$$m2-1.834\times m1 \le z\times m1; \quad m2-1.834\times m1 \ge -z\times m1;$$
$$u2-2.368\times l1 \le z\times l1; \quad u2-2.368\times l1 \ge -z\times l1;$$
$$l2-2.028\times u3 \le z\times u3; \quad l2-2.028\times u3 \ge -z\times u3;$$
$$m2-2.539\times m3 \le z\times m3; \quad m2-2.539\times m3 \ge -z\times m3;$$
$$u2-3.082\times l3 \le z\times l3; \quad u2-3.082\times l3 \ge -z\times l3;$$
$$l1-1.483\times u3 \le z\times u3; \quad l1-1.483\times u3 \ge -z\times u3;$$
$$m1-1.958\times m3 \le z\times m3; \quad m1-1.958\times m3 \ge -z\times m3;$$
$$u1-2.496\times l3 \le z\times l3; \quad u1-2.496\times l3 \ge -z\times l3;$$
$$0.167\times l1+0.668\times m1+0.167\times u1+0.167\times l2+0.668\times m2+0.167\times u2+0.167\times l3 +0.668\times m3+0.167\times u3=1;$$
$$l1 \le m1;\ m1 \le u1;\ l2 \le m2;\ m2 \le u2;\ l3 \le m3;\ m3 \le u3;$$
$$l1>0;\ l2>0;\ l3>0;$$

این مدل توسط نرم افزار لینگو ۹ حل گردید و نتایج در جدول ۶ آورده شده است.

جدول ۱۰: وزن و اولویت معیارهای اصلی

نام معیار	وزن فازی	وزن قطعی	وزن نرمال	اولویت
آسیب پذیری زیر ساخت های شهری (C1)	(۰.۲۴۱,۰.۳۲۴,۰.۳۵۵)	۰.۳۱۵	۰.۳۱۸	۲
تاثیر بر گردشگری (C2)	(۰.۴۰۲,۰.۵۲۰,۰.۵۲۰)	۰.۵۰۰	۰.۵۰۶	۱
مدیریت منابع آب (C3)	(۰.۱۵۷,۰.۱۸۸,۰.۱۸۸)	۰.۱۷۴	۰.۱۷۶	۳
نرخ سازگاری= $\frac{0.23}{6.112} = 0.038$				

با توجه به جدول ۴ وزن معیارهای اصلی محاسبه شده است. وزن فازی مستقیما از حل مدل در نرم افزار لینگو حاصل شده است سپس این اوزان فازی توسط رابطه $R(\tilde{a}_i) = \frac{l_i+4m_i+u_i}{6}$ تبدیل به وزن قطعی شده است. در انتها نیز برای نرمال سازی اوزان (مجموع اوزان یک شود) هر وزن را بر مجموع اوزان تقسیم می‌کنیم. نتایج به این صورت است که معیار تاثیر بر گردشگری (C2) با وزن ۰.۵۰۶ اولویت اول، معیار آسیب پذیری زیر ساخت های شهری (C1) با وزن ۰.۳۱۸ اولویت دوم،

معیار مدیریت منابع آب (C3) با وزن ۰.۱۷۶ اولویت سوم را کسب کرده است. همچنین نرخ سازگاری پژوهش ۰.۰۳۸ شده است که نشان دهنده سازگاری بالای مقایسه زوجی است.

محاسبه اوزان زیرمعیارهای C1

به طریق مشابه مدل را برای زیرمعیارهای C1 ایجاد می‌کنیم و بعد از حل آن نتایج در جدول زیر آورده شده است. با توجه به وزن‌های هر زیرمعیار، اولویت آن‌ها مشخص شده است. با توجه به جدول ۵، سیستم های آب و فاضلاب(S12) با وزن ۰.۲۵۶ اولویت اول، شبکه معابر و پل ها(S11) با وزن ۰.۱۶۹ اولویت دوم، ساختمان های عمومی(S14) با وزن ۰.۱۳۷ اولویت سوم، شبکه برق و انرژی(S13) با وزن ۰.۱۳۵ اولویت چهارم، مراکز درمانی(S15) با وزن ۰.۱۰۶ اولویت پنجم، مراکز آموزشی(S16) با وزن ۰.۱۰۴ اولویت ششم و شبکه ارتباطی(S17) با وزن ۰.۰۹۳ اولویت هفتم را کسب کرده است. نرخ سازگاری مقایسات زوجی نیز ۰.۰۳۶ می‌باشد.

جدول ۱۱: وزن و اولویت زیرمعیارها C1

نام معیار	وزن فازی	وزن قطعی	وزن نرمال	اولویت
شبکه معابر و پل ها (S11)	(۰.۱۴۷,۰.۱۷۳,۰.۱۷۳)	۰.۱۶۹	۰.۱۶۹	۲
سیستم های آب و فاضلاب(S12)	(۰.۲۰۹,۰.۲۶۴,۰.۲۶۴)	۰.۲۵۵	۰.۲۵۶	۱
شبکه برق و انرژی (S13)	(۰.۱۱۸,۰.۱۳۸,۰.۱۳۸)	۰.۱۳۵	۰.۱۳۵	۴
ساختمان های عمومی (S14)	(۰.۱۱۴,۰.۱۴۲,۰.۱۴۲)	۰.۱۳۷	۰.۱۳۷	۳
مراکز درمانی(S15)	(۰.۰۹۲,۰.۱۰۸,۰.۱۰۸)	۰.۱۰۵	۰.۱۰۶	۵
مراکز آموزشی(S16)	(۰.۰۸۵,۰.۱۰۸,۰.۱۰۸)	۰.۱۰۴	۰.۱۰۴	۶
شبکه ارتباطی (S17)	(۰.۰۷۷,۰.۰۹۶,۰.۰۹۶)	۰.۰۹۳	۰.۰۹۳	۷
نرخ سازگاری= $\frac{0.234}{6.541} = 0.036$				

محاسبه اوزان زیرمعیارهای C2

به طریق مشابه مدل را برای زیرمعیارهای C2 ایجاد می‌کنیم و بعد از حل آن نتایج در جدول زیر آورده شده است. با توجه به وزن‌های هر زیرمعیار، اولویت آن‌ها مشخص شده است. با توجه به جدول ۶، معیار تغییر فصل گردشگری(S22) با وزن ۰.۴۴۴ اولویت اول، کاهش امکانات اقامتی(S23) با وزن ۰.۲۱۷ اولویت دوم، کاهش جذابیت دریاچه ارومیه(S21) با وزن ۰.۱۸۷ اولویت سوم و آسیب به جاذبه های تاریخی(S24) با وزن ۰.۱۵۲ اولویت چهارم را کسب کرده است.

جدول ۱۲: وزن و اولویت زیرمعیارها C2

نام معیار	وزن فازی	وزن قطعی	وزن نرمال	اولویت
کاهش جذابیت دریاچه ارومیه(S21)	(۰.۱۶۸,۰.۱۹۰,۰.۱۹۳)	۰.۱۸۷	۰.۱۸۷	۳
تغییر فصل گردشگری (S22)	(۰.۴۰۰,۰.۴۵۲,۰.۴۵۲)	۰.۴۴۳	۰.۴۴۴	۱
کاهش امکانات اقامتی(S23)	(۰.۱۷۶,۰.۲۲۰,۰.۲۴۱)	۰.۲۱۶	۰.۲۱۷	۲
آسیب به جاذبه های تاریخی(S24)	(۰.۱۳۶,۰.۱۵۴,۰.۱۵۷)	۰.۱۵۲	۰.۱۵۲	۴
نرخ سازگاری= $\frac{0.274}{6.078} = 0.045$				

محاسبه اوزان زیرمعیارهای C3

به طریق مشابه مدل را برای زیرمعیارهای C3 ایجاد می‌کنیم و بعد از حل آن نتایج در جدول زیر آورده شده است. با توجه به وزن‌های هر زیرمعیار، اولویت آن‌ها مشخص شده است. با توجه به جدول ۷، چالش های آبیاری (S35) با وزن ۰.۲۶۷ اولویت اول، تغییر الگوی مصرف(S36) با وزن ۰.۱۴۷ اولویت دوم، افزایش تنش های آبی(S34) با وزن ۰.۱۳۶ اولویت سوم، کاهش کیفیت آب(S33) با وزن ۰.۱۲۷ اولویت چهارم، نیاز به تصفیه خانه ها(S37) با وزن ۰.۱۲۶ اولویت پنجم، افت سطح آب های زیرزمینی(S32) با وزن ۰.۱۱۴ اولویت ششم و کاهش آب های سدها(S31) با وزن ۰.۰۸۲ اولویت هفتم را کسب کرده‌اند.

جدول ۱۳: وزن و اولویت زیرمعیارها C3

نام معیار	وزن فازی	وزن قطعی	وزن نرمال	اولویت
کاهش آب های سدها(S31)	(۰.۰۷۴,۰.۰۸۳,۰.۰۸۳)	۰.۰۸۲	۰.۰۸۲	۷
افت سطح آب های زیرزمینی(S32)	(۰.۰۹۵,۰.۱۱۵,۰.۱۲۹)	۰.۱۱۴	۰.۱۱۴	۶
کاهش کیفیت آب (S33)	(۰.۱۰۷,۰.۱۲۹,۰.۱۳۷)	۰.۱۲۷	۰.۱۲۷	۴
افزایش تنش های آبی (S34)	(۰.۱۰۳,۰.۱۲۹,۰.۱۹۸)	۰.۱۳۶	۰.۱۳۶	۳
چالش های آبیاری (S35)	(۰.۲۳۷,۰.۲۷۳,۰.۲۷۳)	۰.۲۶۷	۰.۲۶۷	۱
تغییر الگوی مصرف(S36)	(۰.۱۳۰,۰.۱۴۱,۰.۱۸۶)	۰.۱۴۷	۰.۱۴۷	۲
نیاز به تصفیه خانه ها (S37)	(۰.۰۹۶,۰.۱۲۳,۰.۱۶۶)	۰.۱۲۶	۰.۱۲۶	۵
نرخ سازگاری= $\frac{0.407}{6.354} = 0.064$				

اوزان نهایی زیرمعیارها نسبت به هدف

با ضرب وزن معیارها در وزن زیرمعیارهایشان، اوزان نهایی زیرمعیارها نسبت به هدف حاصل می‌شود. که در جدول ۸ آورده شده است. با توجه جدول ۸، تغییر فصل گردشگری(S22) ، کاهش امکانات اقامتی(S23) و کاهش جذابیت دریاچه ارومیه (S21) به ترتیب با اوزان ۰.۲۲۴۷ و ۰.۱۰۹۸ و ۰.۰۹۴۶ رتبه‌های اول تا سوم را به خود اختصاص داده‌اند این سه معیار بیش از ۴۰درصد اهمیت کل را به خود اختصاص داده‌اند که نشان دهنده اهمیت ویژه آن‌ها است. همچنین تسریع در فرایند دادرسی (S31) با وزن ۰.۰۱۴۴ رتبه آخر را در بین ۱۸ زیرمعیار کسب کرده است.

جدول ۱۴: وزن و اولویت نهایی زیرمعیارها نسبت به هدف

معیار	وزن معیار	زیرمعیار	وزن نسبی زیرمعیار	وزن نهایی زیرمعیار	رتبه نهایی
C1	۰.۳۱۸	s11	۰.۱۶۹	۰.۰۵۳۷	۶
		s12	۰.۲۵۶	۰.۰۸۱۴	۴
		s13	۰.۱۳۵	۰.۰۴۲۹	۹
		s14	۰.۱۳۷	۰.۰۴۳۶	۸
		s15	۰.۱۰۶	۰.۰۳۳۷	۱۰
		s16	۰.۱۰۴	۰.۰۳۳۱	۱۱
		s17	۰.۰۹۳	۰.۰۲۹۶	۱۲
C2	۰.۵۰۶	S21	۰.۱۸۷	۰.۰۹۴۶	۳
		S22	۰.۴۴۴	۰.۲۲۴۷	۱
		S23	۰.۲۱۷	۰.۱۰۹۸	۲
		S24	۰.۱۵۲	۰.۰۷۶۹	۵
C3	۰.۱۷۶	S31	۰.۰۸۲	۰.۰۱۴۴	۱۸
		S32	۰.۱۱۴	۰.۰۲۰۱	۱۷
		S33	۰.۱۲۷	۰.۰۲۲۴	۱۵
		S34	۰.۱۳۶	۰.۰۲۳۹	۱۴
		S35	۰.۲۶۷	۰.۰۴۷۰	۷
		S36	۰.۱۴۷	۰.۰۲۵۹	۱۳
		S37	۰.۱۲۶	۰.۰۲۲۲	۱۶

نتیجه

افزایش دمای هوا، وقوع خشکسالی‌ها و سیلاب‌ها، و افزایش حوادث شدید جوی، به طور مستقیم بر زیرساخت‌های آبی، انرژی، حمل و نقل و فعالیت‌های اقتصادی تأثیر می‌گذارند. این تأثیرات می‌توانند از طریق افزایش هزینه‌های تعمیر و نگهداری، کاهش بهره‌وری، و ایجاد اختلال در زنجیره‌های تأمین، منجر به کاهش رقابتی بودن شهرها در بازارهای جهانی شوند. نتایج مطالعه موردی استان آذربایجان غربی، نقش کلیدی تغییرات اقلیمی در کاهش رقابتی بودن منطقه را نشان می‌دهد. راهکارهای مقاوم‌سازی در برابر این تغییرات، علاوه بر ایجاد زیرساخت‌های مقاوم، به تنوع‌بخشی اقتصادی و ارتقای بهره‌وری در بخش‌های مختلف نیاز دارد. به طور کلی، برای حفظ و ارتقای پایداری و رقابتی بودن شهرها در آینده، ضرورت توجه به استراتژی‌های سازگاری با تغییرات اقلیمی کاملاً مشهود است. این امر مستلزم همکاری بین بخش‌های دولتی، خصوصی و جامعه مدنی است تا بتوانند با برنامه‌ریزی‌های بلندمدت و اقدامات عملی، شهرها را در برابر اثرات مخرب تغییرات اقلیمی مقاوم کنند. هدف پژوهش حاضر، بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر ساخت های شهری و رقابت پذیری اقتصادی شهرها (مطالعه موردی: استان آذربایجان غربی) می باشد. این پژوهش ازنظر هدف، کاربردی - نظری و ازنظر روش، توصیفی– تحلیلی است. نتایج نشان داد که این تغییرات به طور قابل توجهی بر قابلیت رقابت اقتصادی منطقه اثرگذار است. نتایج نشان می‌دهد که عواملی مانند افزایش دمای هوا، وقوع حوادث شدید جوی و تغییرات بارش، به صورت فزاینده‌ای بر زیرساخت‌های آبی، انرژی و حمل و نقل، و فعالیت‌های اقتصادی تأثیر منفی می‌گذارند. استفاده از روش BWM فازی، به دلیل ماهیت ذهنی و پیچیدگی عوامل مدنظر، نقش مهمی در ارزیابی دقیق‌تر این تأثیرات ایفا کرد. این مطالعه به اهمیت توجه به تغییرات اقلیمی در برنامه‌ریزی شهری و توسعه اقتصادی منطقه، به‌ویژه در مناطق آسیب‌پذیر مانند آذربایجان غربی، تأکید می‌کند. نتیجه‌گیری کلی، ضرورت اتخاذ استراتژی‌های مقاوم‌سازی در برابر تغییرات اقلیمی و توسعه زیرساخت‌های پایدار برای حفظ و ارتقای رقابت‌پذیری اقتصادی شهرها را نشان می‌دهد.

منابع

حمیدیان پور، محسن، قاسمی، سجاد، هادیانی، زهره، (۱۴۰۳)، شناسایی پیشران های کلیدی موثر بر آینده تغییر اقلیم و تاب آوری شهر اصفهان، فصلنامه چشم انداز شهرهای آینده، دوره پنجم، شماره اول.

حسینی، علی، حاتمی نژاد، حسین، منصوری اطمینان، ابوالفضل، بایرامی، مریم، (۱۴۰۳)، بررسی تاثیر تغییرات اقلیمی بر زیست پذیری شهرها: مورد پژوهی شهر مشهد، دوره ۱۱، شماره ۴۰.

زیاری، کرامت اله، منصوری اطمینان، ابوالفضل، محمدی یل سویی، مهرداد، (۱۴۰۱)، بررسی و تحلیل نقش تاب آوری نهادی در مواجه با اثرات تغییرات اقلیمی بر شهرها (مورد پژوهی: شهر مشهد)، فصلنامه جغرافیا و توسعه فضای شهری، دوره ۹، شماره ۴.

سادات سعیده زرآبادی، زهرا، منافلویان، ساناز، بهزادفر، مصطفی، (۱۳۹۹)، شناسایی و بررسی وضعیت موجود تغییرات اقلیمی و چالش های آن در تاب آوری بوم شناسانه، فصلنامه علمی پژوهشی جغرافیا (برنامه ریزی منطقه ای)، سال دهم، شماره ۳.

شکیب، علی، (۱۴۰۳)، تحلیل و ارزیابی اثرات تغییرات اقلیمی بر زیرساختهای عمرانی شهری: چالش ها و راهکارهای مهندسی، یازدهمین کنفرانس بین المللی ایده های راهبردی در معماری، عمران و شهرسازی ایران.

شفقی، میلاد، (۱۴۰۲)، بررسی نقش تاب آوری شهری در مواجهه با تغییرات اقلیمی، نهمین کنفرانس بین المللی مطالعات نوین مهندسی عمران، معماری، شهرسازی و محیط زیست در قرن ۲۱.

شمسی پور، علی اکبر، کورکی نژاد، محمد حسن، حبیبی، کیومرث، (۱۴۰۲)، دستور العمل های برنامه ریزی با نقشه های اقلیم شهری مطالعه موردی: شهر تهران، فصلنامه پژوهش های جغرافیای برنامه ریزی شهری، دوره ۱۱، شماره ۳.

صیاد، وحیده، اکبری، مهری، (۱۴۰۰)، تحلیل مطالعات تغییر اقلیم در ایران، فصلنامه پژوهش های جغرافیای طبیعی، دوره ۵۳، شماره ۱.

صفر علی زاده، اسماعیل، عاشری، امامعلی، حسین زاده، رباب، (۱۳۹۵)، ارزیابی وضعیت اقلیم گردشگری استان آذربایجان غربی، مجله آمایش جغرافیایی فضا، سال ششم، شماره بیستم.

طغیانی خوراسگانی، شیرین، ملک عباسی، علی، شبانی، امیر حسین، مدبری، سروش، (۱۴۰۲)، مروری نظام مند بر مقالات منتشر شده در تحلیل اثر تغییرات اقلیمی و فرم شهرها، فصلنامه علمی نگرش های نو در جغرافیای انسانی، سال پانزدهم، شماره سوم.

کرمی، بهاره، گودرزی، آیدا، مشکسار، پریسا، (۱۴۰۳)، شهرسازی پایدار و تغییرات اقلیمی، نهمین همایش بین المللی عمران، معماری و شهر سبز پایدار.

گندمکار، امیر، صیدی، علی نظر، (۱۴۰۰)، بررسی تغییرات اقلیم شهر اهواز در رابطه با توسعه منطقه ای و برنامه ریزی شهری، فصلنامه علمی پژوهشی نگرش های نو در جغرافیای انسانی، سال سیزدهم، شماره دوم.

مولائی، اصغر، (۱۳۹۸)، واکاوی قابلیت های رقابت پذیری شهری و منطقه ای زمینه گرا (نمونه موردی شهر تبریز)، فصلنامه علمی پژوهشی برنامه ریزی فضایی (جغرافیا)، سال نهم، شماره چهارم.

محمدی ده چشمه، مصطفی، قائدی، سهراب، شنبه پور، فرشته، (۱۴۰۱)، مدل سازی پیامدهای ساختاری تغییرات اقلیمی در شهر اهواز با بهره گیری از مدل System Dynamic ، فصلنامه علمی پژوهشی اطلاعات جغرافیایی سپهر، دوره ۳۱، شماره ۱۲۴.

ماجدی، حمید، ملکی، لادن، سادات سعیده زرآبادی، زهرا، (۱۴۰۰)، تحلیل نقش رویکردهای شهری در پاسخ به تغییرات اقلیم با تأکید بر شهرسازی بیوفیلیک، مورد پژوهی: شهر تنکابن، فصلنامه دانش شهرسازی، دوره ۵، شماره ۱.

مولایی، اصغر، بهزادفر، مصطفی، (۱۳۹۸)، تبیین ابعاد و ظرفیت های رقابت پذیری هویتی شهری با رویکرد زمینه گرا در شهرهای ایران، فصلنامه علمی پژوهشی برنامه ریزی و آمایش فضا، دوره ۲۴، شماره ۲.

ملکی، سعید، مرادی، هوشنگ، (۱۴۰۴)، پیامدهای اجتماعی – اقتصادی تغییر اقلیم در فضاهای شهری با استفاده از مدل دینامیک سیستم (مورد مطالعه: کلان شهر اهواز)، فصلنامه فضای شهری و حیات اجتماعی، دوره ۴، شماره ۱۲.

مرادی، هوشنگ، پیشداد، الهام، (۱۴۰۳)، تغییر اقلیم و پیامدهای ساختاری آن بر منابع آب شهری، اولین همایش ملی هیدرولوژی و منابع آب ایران.

Dieleman, H., (2013). Organizational learning for resilient cities, through realizing eco-cultural innovations. Journal of cleaner production, volm.50, 171-180.

Guo, S. and Zhao, H., 2017. Fuzzy best-worst multi-criteria decision-making method and its applications. Knowledge-Based Systems, 121, pp.23-31.

He, B. J., Sharifi, A., Feng, Ch., Yang, J. 2022. Climate Change and Environmental Sustainability – Volume 1, Project: Climate Change and Environmental Sustainability (CCES) conference Lab: Urban Climate and Human Settlements Labs.

Islam Sarker, M. N., Yang, B., Lv, Y., Huq, M. E., & Kamruzzaman, M M. (2020). Climate Change Adaptation and Resilience through Big Data, (IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications,Vol. 11, No. 3, 2020.

Lenzholzer, S., Gorsjens, G., Brown, R., Tavares, S., Vanos, J., Kim, Y., Lee, K. (2020). Awareness of urban climate adaptation strategies an international overview. Urban Climate. Elsevier. 34.

Marschutz, B., Bremer, S., Runhaar, H., Hegger, D., Mees, H., Vervoort, J., Wardekker, A., (2020). Local narratives of change as an entry point for building urban climate resilience. Climate Risk Management.

Ntontis, E., Drury, J., Amlôt, R., Rubin, G. J., & Williams, R. (2020). What lies beyond social capital? The role of social psychology in building community resilience to climate change. Traumatology, 26(3), 253.

Pengfei, Ni., Marco, K., Ruxi, D., (2019). Cities Network Along the Silk Road the Global Urban Competitiveness Report 2017, Springer Nature Singapore Pte Ltd.

Porter, Michael E., (2018). Location, Competition, and Economic Development: Local Clusters in a Global Economy, Economic Development Quarterly, Vol 1, No 14, Pp 34-15.

Susskind, L., & Kim, A. (2023). Building local capacity to adapt to climate change. Climate Policy, 22(5), 593-606.

Rezaei, J., 2015. Best-worst multi-criteria decision-making method. Omega, 53, pp.49-57.
Worldmeter. (2019). Largest cities in the world. http://worldmeters.info.
Zhongming, Z., Linong, L., Xiaona, Y., Wangqiang, Z., & Wei, L. 2021. AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis.

Investigating the impact of climate change on urban structures and the economic competitiveness of cities (Case study: West Azerbaijan Province)

[1]Naser solatani

sahand azar[2]

- PhD Student, Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, Urmia University, ۲

Urmia, Iran

* Corresponding author: Email: s.azar@urmia.ac.ir

Abstract

One of the greatest challenges of the present century is the phenomenon of climate change. The increase in the number and severity of natural disasters under the influence of climate has led to adverse consequences in various economic, social and environmental dimensions in cities. On the other hand, in recent decades, global efforts and various perspectives have been presented to reduce the destructive consequences of climate change. The aim of the present study is to investigate the impact of climate change on urban structures and the economic competitiveness of cities (case study: West Azerbaijan Province). This study is applied-theoretical in terms of purpose and descriptive-analytical in terms of method. The required information and data have been collected through library and field methods. The results of the study show that given the sensitivity of this region to climate change, especially increasing temperature and drought, this study seeks to evaluate the effects of these changes on key indicators such as water infrastructure, energy, transportation and economic activities. The use of multi-criteria weighting method with fuzzy weighting (BWM) has been used in this research to prioritize these indicators and assess the relative impacts of each of the climate variables. The main goal is to identify existing vulnerabilities and provide resilience solutions to climate change for sustainable development in West Azerbaijan Province. The results of the fuzzy BWM analysis will help decision-makers in the fields of urban planning and economic development to prioritize influential factors and take steps towards resilience and sustainable development strategies.

Keywords: Climate change, urban construction, economic competition of cities, West Azerbaijan, fuzzy BWM method

تحلیل همبستگی و رگرسیون بین الگوهای پیوند از دور و بارش ایستگاه‌های منتخب استان اصفهان با استفاده از نقشه‌های ماهواره‌ای CHIRPS در محیط Google Earth Engine

کمال امیدوار[۱]، الهام علی محمدی[۲]، زهره تقی زاده[۳]

۱- استاد تمام رشته آب و هواشناسی دانشگاه یزد
۲- دانشجو دکتری رشته آب و هواشناسی دانشگاه یزد
۳- کارشناسی ارشد رشته جغرافیا و برنامه ریزی شهری
آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول: yazd.ac.ir@komidvar

چکیده

هدف این پژوهش، بررسی تأثیر الگوهای پیوند از دور بر روی ایستگاه‌های منتخب استان اصفهان طی دوره آماری (۲۰۰۱-۲۰۲۰) است. در این تحقیق، از داده‌های بارش ماهانه ایستگاه‌های اصفهان، اردستان، خور و بیابانک، نایین و نطنز استفاده شد. با استفاده از همبستگی پیرسون و رگرسیون خطی چند متغیره در نرم‌افزار SPSS، تأثیر الگوهای WP، EP/NP، PNA، SCA، POL و EA/WR بر بارش هر ایستگاه تحلیل گردید.نتایج نشان داد که الگوی EA/WR بیشترین تأثیر و الگوی POL کمترین تأثیر را بر بارش ایستگاه‌ها داشته است. متغیرهای PNA و SCA به عنوان مهم‌ترین پیش‌بین‌های بارش در ایستگاه‌های مختلف شناسایی شدند، به‌ویژه در ایستگاه‌های نایین، نطنز و خور و بیابانک که مدل‌های رگرسیونی معنادار و معتبری را نشان دادند. تفسیر نقشه‌های جغرافیایی که بر اساس داده‌های CHIRPS و همان دوره آماری (۲۰۰۱-۲۰۲۰) تهیه شده‌اند، نتایج آماری را تأیید و تکمیل می‌کند. این نقشه‌ها نشان می‌دهند که کل استان اصفهان با یک روند کاهشی بارش مواجه است، با این حال، مناطق غربی استان، که به طور طبیعی پربارش‌تر هستند، شدیدترین روند کاهشی را تجربه می‌کنند (با مقادیر -۷۹ تا -۴۶ میلی‌متر بر دهه). در مقابل، مناطق شرقی استان با وجود کم‌بارش بودن، روند کاهشی بسیار کندتری را نشان می‌دهند. این همبستگی بین مناطق پربارش و روند کاهشی شدید، یک هشدار جدی برای مدیریت منابع آب در آینده است.

کلمات کلیدی:CHIRPS ، EA/NA، EP/NP، PNA، POL، SCA،WP.

۱.مقدمه

یکی از چالش‌های مهم در قرن ۲۱، موضوع نوسانات و تغییرات اقلیمی است. بارش یک عنصر مهم از منابع آبی در تمام نقاط جهان از جمله منابع خشک و نیمه خشک می‌باشد. بارندگی یکی از پیچیده‌ترین و اتفاقی‌ترین پدیده‌های طبیعی

است. پیوند از دور یکی از ویژگی‌های اقلیمی بزرگ مقیاس جهانی است که ساختار و ویژگی‌های آب و هوایی در دو منطقه دور جغرافیایی را به هم پیوند می‌دهد، طی این سازوکار، تغییرات در الگوی دما یا فشار در منطقه‌ای از کره زمین از طریق سامانه‌های بزرگ مقیاس به نواحی دیگر منتقل شده و به صورتهای مختلف، وضع هوا و اقلیم را تحت تأثیر قرار می‌دهد (خوش اخلاق و همکاران، ۱۳۸۷). پیوند از دور ارتباط همزمان بین نوسانات عناصر اقلیمی یک مکان با تغییرات الگوهای فشار و درجه حرارت سطح دریا در نقاط جغرافیایی دیگر است. الگوهای پیوند از دور جوی اقیانوسی شرایطی الاکلنگی در جو و اقیانوس‌ها هستند که جهت توازن و بیلان انرژی سامانه اقلیم ایجاد می‌شوند و هماهنگ با رخنمود آنها، شرایط را برای رخداد برخی پدیده‌های دیگر جوی مهیا و فراهم می‌کنند. از آنجایی که بارش در ایران شرایط خاصی از جو را می‌طلبد که شناخت سازوکار و مکانیسم رخنمود آن می‌تواند ابزار سودمندی جهت پیش‌بینی بسامد و نرخ شدت رخداد آن باشد. بدون شک هماهنگ با رخداد گرمایش جهانی و تغییر اقلیم، بارش‌ها نیز دچار دگرگونی می‌شوند. بارش به عنوان یکی از مهمترین متغیرهای اقلیمی و هیدروژیکی از اهمیت بالایی در کشاورزی دیم و مدیریت منابع آب سطحی و زیرزمینی برخوردار است که پیش‌بینی و مدیریت آن را با اهمیت می‌کند. از سوی دیگر نمایه‌های دور پیوندی به عنوان عواملی موثر بر اقلیم در مقیاس بزرگ شناخته شده و تاثیر آن‌ها بر بارش در ایران و جهان مورد مطالعه قرار گرفته است. (هلستروم ،۲۰۰۵) شرایط جو را در زمان رخداد بارشهای سنگین و غیرسنگین در سوئد

مطالعه کرد. وی تفاوتهای میانگین شرایط جوی در زمان رویداد بارشهای سنگین تابستانی (ژوئن تا آگوست) و غیر سنگین در سوئد را بر اساس تیپ های هوای لامب (چرخندی، واچرخندی و جهت دار) تحلیل نمود.وی بارش‌های بیش از ۴۰ میلیمتر را سنگین و بارشهای کمتر از ۴۰ میلیمتر را غیرسنگین تعریف کرده است. نتایج نشان داد که سهم رویدادهای بارشی که در زمان تیپ چرخندی رخ داده بود، برای رویداد بارش‌های غیر سنگین45 درصد و برای بارشهای سنگین حدود ۷۰ درصد است و این می‌تواند با میانگین بالاتر سرعت عمودی تیپ‌های چرخندی در مقایسه با تیپ‌های واچرخندی و جهت دار و همچنین میانگین بالاتر تیپ‌های چرخندی در مقایسه با تیپ هوای جهت دار مرتبط باشد.الیحیایی و روشن (۲۰۱۵) در مقاله ی تأثیر الگوهای ارتباط از راه دور آتلانتیک اوراسیا بر رژیم‌های دما در مناطق ساحلی دریای خزر جنوبی، استان گلستان شمال ایران، در دوره ۴۰ ساله تأثیر ۹ شاخص آب و هوا بر دما در منطقه مورد نظر را مورد مطالعه قرار دادند. ماریو میگلیتا و نیرکراکائر (۲۰۱۹) در تحقیقی بارش و حداکثر دما طی سال‌های ۱۹۹۲ تا ۲۰۱۰ در استان اصفهان با استفاده از مدل REMO و نظریه کوپولا مورد بررسی قرار می‌دهند و به نتیجه می‌رسند که بررسی تغییرات در حداکثر دما، مقادیر شدید بارش در دوره‌های تاریخی و آینده، دارای تغییرات افزایشی و کاهشی بودند، در حالی که بعضی شاخص‌ها در ایستگاه داران روند افزایشی معنی داری داشتند. تغییرات از بارش شدید در ایستگاه‌های داران و شهرضا نشان داد که

شدت بارش، کل بارش سالانه، بارش سنگین، بارش بسیار سنگین، روزهای بسیار مرطوب و حداکثر در آینده در مقایسه با روزهای بسیار مرطوب کاهش خواهد یافت. کاهش شاخص‌های بارش شدید نشان داد که منطقه مورد مطالعه در آینده بارش با شدت کمتری را تجربه خواهد کرد. عطایی (۱۳۹۴) در پژوهشی تاثیر شاخص‌های اطلس شمالی به عنوان نماینده‌ای از الگوهای پیوند از دور بر سری‌های دمایی استان اصفهان بررسی کرده است. نتایج حاصل شده بیانگر آن است که دمای حداقل استان اصفهان در ماه‌های فوریه، مارس و ژوئن با شاخص نوسانات اطلس شمالی همبستگی معکوس داشته است. یعنی در فاز سرد نوسانات اطلس شمالی دمای حداقل استان اصفهان رو به افزایش بوده است. فاطمی (۱۳۹۵) الگوهای گردش جوّی دوره‌های ترسالی و خشکسالی و ارتباط آن با شاخص‌های پیوند از دور در ایران مرکزی را بررسی و نشان داد الگوهای اقیانوس آرام/آمریکای شمالی(PNA) در استان اصفهان و الگوی اطلس شرقی(EA) و الگوی اطلس شرقی و روسیه غربی (EA/WR) در استان کرمان و الگوی حارّه‌ای جنوب اقیانوس اطلس(TSA) و الگوی قطبی (POL) در استان یزد به عنوان موثرترین الگوها، تغییرات SPI سالانه را درایران مرکزی توجیه می‌نماید. امیدوار و همکاران (۱۴۰۰) در مقاله واکاوی ارتباط بین بارش‌های سنگین جنوب و جنوب غرب ایران با رودخانه‌های جوی (Ars) با استفاده از بارش روزانه‌ی ۱۷ ایستگاه سینوپتیک در بازه‌ی زمانی ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۵ در جنوب و جنوب غرب ایران که بازه‌ی زمانی مشترک دارند و مجموعه داده‌های مراکز ملی پیش‌بینی محیطی/ مرکز ملی تحقیقات جوی (NCEP/NCAR) مرکز پیش بینی‌های میان مدت اروپا (ECMWF) و داده‌های تحلیل مجدد (ERA-interim) با قدرت تفکیک مکانی ۰/۷۵ در۰/۷۵ طول و عرض جغرافیایی با تفکیک زمانی ۶ ساعته به نتیجه رسیدند که منبع اصلی رطوبت بارندگی در جنوب و جنوب غربی ایران، جنوب دریای سرخ و خلیج عدن می‌باشد. البته خروجی نقشه‌ها نشان می‌دهد که دریای عرب نیز در تامین رطوبت این بارش‌ها بی تاثیر نبوده است. شبه جزیره عربستان نیز با توجه به میزان بالای انتقال رطوبت، به عنوان مسیر انتقالی، حجم بسیار زیادی از رطوبت را به سمت منطقه‌ی مورد مطالعه گسیل می‌کند. در انتها، مسیر رطوبت به منطقه ی مورد مطالعه ترسیم و شناسایی شد و نتیجتا با در نظر گرفتن ۳ شرط اصلی برای رودخانه‌ی جوی، میتوان گفت مسیر به دست آمده، همان مسیر رودخانه‌ی جوی می‌باشد. طلایی و همکاران(۱۴۰۱) در مقاله اثر تغییر اقلیم بر بارش، دما و کیفیت آب سطحی در حوزه اسکندری اصفهان با استفاده از داده‌های روزانه دمای حداقل و حداکثر و بارش روزانه ایستگاه سینوپتیک داران در بازه زمانی پایه (۲۰۱۳-۱۹۹۳) تحت مدل بزرگ مقیاس گردش عمومی جو HadCM3 شبیه سازی و با استفاده از مدل ریز مقیاس گردانی WG-LARS و سناریوهای A1B، A2 و B1 برای دوره آتی ۲۰۲۰-۲۰۳۰ پیش‌بینی کردند، سپس با برقراری رابطهای تجربی بین هر کدام از داده‌های کیفیت آب در دوره پایه با دادههای اقلیمی معادله‌ای چند متغیره برای محاسبه پارامترهای کیفیت آب بدست آوردند و با جایگزین کردن دادههای هر سناریو اقلیمی مقدار پارامترهای کیفیت آب در آن سناریو در دوره آتی محاسبه کردند و به نتیجه رسیدند که دمای حداقل روزانه در دوره آتی تحت هر سه سناریو

روند افزایشی خواهد داشت و روند دمای حداکثر روزانه در سناریو B1 ثابت بوده اما در سناریو A1B و A2 افزایش می‌یابد. همچنین بارندگی سااالنه روند کاهشی داشته که اثر مستقیم بر کیفیت آب دارد. بر اساس نتایج، مقدار EC تحت هر سه سناریو اقلیمی نسبت به دوره پایه افزایش

و برعکس مقدار pH کاهش یافته است. همچنین SAR به طور متوسط ۱۷ ٪افزایش می‌یابد. افرادی که از آنان در پیشینه تحقیق نامبرده شده است به بررسی تاثیرالگوی‌های پیوند از دور اطلس بر روی اقلیم برخی نواحی کار کرده اند. انجام پژوهشی که به طور خاص ساز و کار حاکم بر وقوع دوره‌های خشک و مرطوب در استان اصفهان و ارتباط آن با شاخص پیوند از دور اطلس را بررسی نموده و ساختار گردش جو بر روی منطقه را مورد تجزیه و تحلیل قرار دهد ضروری است..پس از مطالعه پژوهش‌های صورت گرفته، در این پژوهش سعی بر این است به تاثیر الگوی گردشی جو و شناسایی الگوهای بارش بر روی ایستگاه های منتخب استان اصفهان و ارتباط این دوره با شاخص پیوند از دور پرداخت.

۲. مواد و روش‌ها

۲-۱. منطقه مورد مطالعه

استان اصفهان با مساحت ۱۰۷۰۴۵ کیلومتر مربع (معادل ۶.۵۷ درصد از مساحت کشور) بین ۳۰درجه و۴۳ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۲۷ دقیقه عرض شمالی و ۴۹ درجه و ۳۶ دقیقه تا ۵۵ درجه و۳۱ دقیقه طول شرقی در بخش مرکزی ایران در دشت حاصلخیز واقع شده و به طور خلاصه می‌توان گفت اکثر شهرها و روستاهای آن حاصل جریان زاینده رود است .

جدول ۱.مشخصات ایستگاه های مورد مطالعه

نام ایستگاه	طول جغرافیایی(شرقی)		عرض جغرافیایی(شمالی)		ارتفاع به متر
	درجه	دقیقه	درجه	دقیقه	
اردستان	۵۲	۲۲	۳۳	۲۳	۱۲۳۸
اصفهان	۵۱	۳۹	۳۲	۳۸	۱۵۰۰
خور و بیابانک	۵۵	۰۵	۳۳	۴۶	۷۹۶
نطنز	۵۱	۲۵	۳۳	۲۵	۱۶۰۰
نایین	۵۲	۳۵	۳۲	۳۰	۱۵۸۰

۲-۲.جمع آوری اطلاعات مورد نیاز

برای انجام این تحقیق ابتدا داده‌های آماری بارش ۲۴ ساعته طی بازه زمانی ۲۴ ساله ایستگاه‌های منتخب استان اصفهان به صورت ماهانه از طریق سازمان هواشناسی و داده‌های آماری پیوند از دور از پایگاه داده Noaa اخذ گردید.

۳.روش کار

داده‌های اخذ شده از سازمان هواشناسی و داده‌های آماری الگوهای پیوند از دور با استفاده از روش ضریب همبستگی پیرسون به صورت ماهانه و یکماهه تاخیری مشخص شد و از طریق رگرسیون چند متغیره بارش‌های سالانه مشخص و نمودار ناپارامتری من-کندال ترسیم و در بحث و نتایج به طور کامل توضیح داده شد.

۱-۳. بحث

۲-۳.بررسی رابطه بارش با استفاده از روش همبسنگی پیرسون

در نتایج به دست آمده همبستگی ماهانه الگوی پیوند از دور در سطح آلفای ۰.۰۵ و ۰.۰۱ ارائه شده است که در ماه مارس ایستگاه نایین با الگوی پیوند از دور SCA در سطح ۹۹ درصد ، در ماه آوریل ایستگاه خور و بیابانک با الگوهای پیوند ازدور PNA و SCA در سطح ۹۵ درصد، در ماه ژوئن در ایستگاه نایین الگوی پیوند از دور SCA در سطح اطمینان ۹۵ درصد ، ماه آگوست در ایستگاه نطنز شاخص EP/NP در سطح اطمینان ۹۵ درصد، ماه سپتامبر در ایستگاه اصفهان شاخص WP با سطح اطمینان ۹۵ درصد، ماه نوامبر ایسنگاه اصفهان الگوی پیوند از دور SCA با سطح آلفای ۰.۰۵ رابطه معنادار داشته اند.

۳-۳. بررسی رابطه بارش با الگوهای پیوند از دور با استفاده از رگرسیون چند متغیره

برای محاسبه رگرسیون سالانه در دوره آماری (۲۰۰۱-۲۰۲۰) هر ایستگاه با شاخص پیوند از دور از طریق رگرسیون چند متغیره محاسبه شد که نتایج به صورت زیر بیان شده است.

در ایستگاه نایین است در ایستگاه نایین است که خلاصه مدل به ترتیب مقدار ضریب همبستگی ۰.۲۳۶، ضریب تعیین ۰.۰۵۶، ضریب تعیین اصلاح شده ۰.۰۳۹ و خطای استاندارد برآورد ۰.۹۸۰۴۴۷۱۴ برآورد شده است. در جدول ANOVA تحلیل واریانس مدل آورده شد که چون sig یا سطح معنی داری آن ۰.۰۰۸ از ۰.۰۵ کمتر است پس مدل در سطح اطمینان ۹۹٪ معتبر است. بر پایه آنچه که در جدول Coefficients ارائه شد، طی این گام متغیر SCA با ضریب بتای استاندارد ۰.۱۴۵ و متغیر PNA با ضریب بتای ۰.۱۲۵- توان پیش‌بینی بارش را دارند. همچنین سایر شاخص های مورد بررسی شامل POL با ضریب بتای ۰.۰۹۸-، EP/NP با ضریب بتای ۰.۰۰۱- و WP با ضریب بتای ۰.۰۳۷ در این مدل حضور داشته اند که تنها SCA و PNA از نظر آماری معنادار بوده

اند. همچنین در ایستگاه اصفهان است که خلاصه مدل به ترتیب مقدار ضریب همبستگی ۰.۲۳۵، ضریب تعیین ۰.۰۵۵، ضریب تعیین اصلاح شده ۰.۰۳۵ و خطای استاندارد برآورد ۰.۹۸۲ برآورد شده است. در جدول ANOVA تحلیل واریانس مدل آورده شد که چون sig یا سطح معنی داری آن ۰.۰۲۰ از ۰.۰۵ کمتر است پس مدل در سطح اطمینان ۹۵٪ معتبر است. بر پایه آنچه که در جدول Coefficients ارائه شد، طی این گام تنها متغیر PNA با ضریب بتای استاندارد ۰.۱۳۴- توان پیش‌بینی بارش را دارد. همچنین سایر شاخص های مورد بررسی شامل POL با ضریب بتای ۰.۰۴۸-، SCA با ضریب بتای ۰.۱۰۵، EP/NP با ضریب بتای ۰.۱۰۶- و WP با ضریب بتای ۰.۰۶۴ در این مدل حضور داشته اند که تنها PNA از نظر آماری معنادار بوده است. در ایستگاه نظنز است که خلاصه مدل به ترتیب مقدار ضریب همبستگی ۰.۲۲۸، ضریب تعیین ۰.۰۵۲، ضریب تعیین اصلاح شده ۰.۰۳۲ و خطای استاندارد برآورد ۰.۹۸۴ برآورد شده است. در جدول ANOVA تحلیل واریانس مدل آورده شد که چون sig یا سطح معنی داری آن ۰.۰۲۸ از ۰.۰۵ کمتر است پس مدل در سطح اطمینان ۹۵٪ معتبر است. بر پایه آنچه که در جدول Coefficients ارائه شد، طی این گام متغیر SCA با ضریب بتای استاندارد ۰.۱۳۸ و متغیر PNA با ضریب بتای ۰.۱۴۱- توان پیش‌بینی بارش را دارند. همچنین سایر شاخص های مورد بررسی شامل POL با ضریب بتای ۰.۰۳۸-، EP/NP با ضریب بتای ۰.۰۲۰- و WP با ضریب بتای ۰.۰۸۱ در این مدل حضور داشته اند که تنها SCA و PNA از نظر آماری معنادار بوده اند. در ایستگاه اردستان است که خلاصه مدل به ترتیب مقدار ضریب همبستگی ۰.۲۷۵، ضریب تعیین ۰.۰۷۶، ضریب تعیین اصلاح شده ۰.۰۵۶ و خطای استاندارد برآورد ۰.۹۷۲ برآورد شده است. در جدول ANOVA تحلیل واریانس مدل آورده شد که چون sig یا سطح معنی داری آن ۰.۰۰۲ از ۰.۰۵ کمتر است پس مدل در سطح اطمینان ۹۹٪ معتبر است. بر پایه آنچه که در جدول Coefficients ارائه شد، طی این گام متغیر PNA با ضریب بتای استاندارد ۰.۱۶۹- و متغیر EP/NP با ضریب بتای ۰.۱۴۴- توان پیش‌بینی بارش را دارند. همچنین سایر شاخص های مورد بررسی شامل POL با ضریب بتای ۰.۰۶۰-، SCA با ضریب بتای ۰.۰۹۶ و WP با ضریب بتای ۰.۰۵۰ در این مدل حضور داشته اند که تنها PNA و EP/NP از نظر آماری معنادار بوده اند. در ایستگاه خور و بیابانک است که خلاصه مدل به ترتیب مقدار ضریب همبستگی ۰.۳۴۶، ضریب تعیین ۰.۱۲۰، ضریب تعیین اصلاح شده ۰.۱۰۱ و خطای استاندارد برآورد ۰.۹۴۸ برآورد شده است. در جدول ANOVA تحلیل واریانس مدل آورده شد که چون sig یا سطح معنی داری آن ۰.۰۰۰ از ۰.۰۵ کمتر است پس مدل در سطح اطمینان ۹۹٪ معتبر است. بر پایه آنچه که در جدول Coefficients ارائه شد، طی این گام متغیر SCA با ضریب بتای استاندارد ۰.۱۸۲، متغیر PHA با ضریب بتای ۰.۲۰۵- و متغیر WP با ضریب بتای ۰.۱۶۳ توان پیش‌بینی بارش را دارند. همچنین سایر شاخص های مورد بررسی شامل pol با ضریب بتای ۰.۰۷۳- و EP/NP با ضریب بتای ۰.۰۳۲- در این مدل حضور داشته اند که تنها SCA، PHA و WP از نظر آماری معنادار بوده اند.

۳-۴.تفسیر نقشه تحلیل بارش استان اصفهان

این نقشه‌ها بر اساس داده‌های ماهواره‌ای CHIRPS و برای دوره ۲۰ ساله (۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰) تهیه شده‌اند(شکل شماره ۲). تحلیل شامل دو بخش اصلی است: نقشه روند تغییرات بارش و نقشه میانگین سالانه بارش.

نقشه روند بارش :این نقشه نشان‌دهنده تغییرات بارش در هر دهه است. مقادیر منفی (مثلاً -۷۹ تا -۴۶ میلی‌متر) نشان‌دهنده کاهش بارش و مقادیر نزدیک به صفر (مثلاً -۱۲ تا ۳ میلی‌متر) نشان‌دهنده کاهش بسیار کمتر هستند. مناطق غربی و جنوب غربی استان با شدیدترین روند کاهشی مواجه هستند، در حالی که مناطق شرقی کاهش کمتری را تجربه کرده‌اند.

نقشه میانگین بارش :این نقشه میانگین بارش سالانه را نشان می‌دهد. پربارش‌ترین مناطق (با مقادیر تا ۳۴۸ میلی‌متر) در غرب استان قرار دارند، در حالی که مناطق شرقی و مرکزی با کمترین میزان بارش (تا ۴۰ میلی‌متر) روبرو هستند.

۳-۵.نمودار ماهانه بارش

این نمودارها(شکل شماره ۳) ، داده‌های مربوط به میزان بارندگی ماهانه در پنج شهر استان اصفهان، شامل اصفهان، نایین، نطنز، اردستان و خور و بیابانک، برای یک دوره زمانی طولانی را نمایش می‌دهند. این نمودارها الگوهای اقلیمی هر منطقه را به صورت بصری نشان می‌دهند. در نمودارهای اصفهان و نطنز، الگوی بارندگی فصلی مشخصی مشاهده می‌شود، به طوری که بارش‌ها به طور عمده در ماه‌های سرد سال (پاییز و زمستان) رخ می‌دهند و در تابستان میزان بارش بسیار کم است. با این حال، نمودار نطنز در برخی سال‌ها پیک‌های بارشی قابل توجه و بالاتری نسبت به اصفهان دارد که نشان‌دهنده پتانسیل بیشتر این منطقه برای بارش‌های شدید در دوره‌های خاص است. نمودار اردستان نشان می‌دهد که این شهر در مقایسه با شهرهای کویری، از الگوی بارشی منظم‌تر و با مقادیر بیشتری برخوردار است. میزان بارندگی در این شهر به طور میانگین از نایین و خور و بیابانک بالاتر است و این امر منعکس‌کننده شرایط اقلیمی نیمه‌خشک این منطقه است. در مقابل، نمودارهای نایین و خور و بیابانک به وضوح نشان‌دهنده اقلیم خشک و بیابانی این مناطق هستند. میزان بارش در آن‌ها به طور کلی بسیار پایین و نامنظم است و در بسیاری از ماه‌ها بارشی ثبت نشده یا مقادیر آن بسیار ناچیز است. به طور کلی، این نمودارها ابزار ارزشمندی برای مقایسه شرایط اقلیمی و هیدرولوژیکی مناطق مختلف استان اصفهان هستند و تفاوت چشمگیر بین مناطق نیمه‌خشک و خشک را به خوبی نشان می‌دهند. این تحلیل‌ها می‌توانند در مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی‌های زیست‌محیطی مورد استفاده قرار گیرند.

۴.نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی رابطه بارش با الگوهای پیوند از دور در ایستگاه‌های مختلف پرداخته شد. نتایج حاصل از تحلیل همبستگی نشان داد که در ماه مارس ایستگاه نایین با الگوی پیوند از دور SCA در سطح ۹۹ درصد رابطه معناداری دارد. در ماه آوریل ایستگاه خور و بیابانک با الگوهای PNA و SCA در سطح ۹۵ درصد همبستگی نشان داد. در ماه ژوئن ایستگاه نایین با الگوی SCA در سطح ۹۵ درصد رابطه معنادار داشت. در ماه آگوست ایستگاه نطنز با شاخص EP/NP در سطح ۹۵ درصد همبستگی نشان داد. در ماه سپتامبر ایستگاه اصفهان با شاخص WP در سطح ۹۵ درصد و در ماه نوامبر ایستگاه اصفهان با الگوی SCA در سطح ۹۵ درصد رابطه معنادار داشتند.در بخش رگرسیون چندمتغیره، نتایج نشان داد که در ایستگاه نایین مدل با ضریب تعیین ۰.۰۵۶ و سطح معنی‌داری ۰.۰۰۸ معتبر بوده و متغیرهای SCA و PNA توان پیش‌بینی بارش را دارند. در ایستگاه اصفهان مدل با ضریب تعیین ۰.۰۵۵ و سطح معنی‌داری ۰.۰۲۰ معتبر بوده و تنها متغیر PNA توان پیش‌بینی بارش را نشان داد. در ایستگاه نطنز مدل با ضریب تعیین ۰.۰۵۲ و سطح معنی‌داری ۰.۰۲۸ معتبر بوده و متغیرهای SCA و PNA پیش‌بین‌های معنادار بارش بودند. در ایستگاه اردستان مدل با ضریب تعیین ۰.۰۷۶ و سطح معنی‌داری ۰.۰۰۲ معتبر بوده و متغیرهای PNA و EP/NP توان پیش‌بینی بارش را داشتند. در ایستگاه خور و بیابانک مدل با ضریب تعیین ۰.۱۲۰ و سطح معنی‌داری ۰.۰۰۰ معتبر بوده و متغیرهای SCA، PHA و WP پیش‌بین‌های معنادار بارش بودند. به طور کلی، یافته‌ها نشان می‌دهد که الگوهای پیوند از دور به ویژه SCA، PNA و EP/NP تأثیر معناداری بر بارش ایستگاه‌های مورد مطالعه داشته و می‌توانند در پیش‌بینی بارش مورد استفاده قرار گیرند. همچنین با مقایسه این دو نقشه، مشخص شد که پربارش‌ترین مناطق استان اصفهان (غرب استان)، همزمان شدیدترین روند کاهش بارش را نیز تجربه می‌کنند .این تحلیل نشان می‌دهد که این مناطق با سرعت زیادی در حال از دست دادن منابع آبی خود هستند که یک هشدار جدی برای مدیریت منابع آب در آینده است بر اساس تحلیل داده‌های بارندگی در پنج شهر استان اصفهان، می‌توان نتیجه گرفت که تفاوت‌های اقلیمی قابل توجهی در این منطقه وجود دارد. در حالی که شهرهایی مانند اصفهان، نطنز و اردستان دارای الگوی بارشی فصلی و مقادیر نسبتاً بیشتری از بارش هستند، مناطق بیابانی مانند نایین و خور و بیابانک با خشکی شدید و بارش‌های بسیار اندک و نامنظم مواجه‌اند. این الگوها بر اهمیت مدیریت هدفمند منابع آب و لزوم سازگاری با شرایط آب و هوایی متفاوت در هر منطقه تأکید دارند.

۵.منابع

۱-امیدوار، کمال، سپندار، نسا (۱۴۰۰) واکاوی ارتباط بین بارش‌های سنگین جنوب و جنوب غرب ایران با رودخانه‌های جوی(ARS)، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، سال بیست و یکم، شماره ۶۱، صفحات ۲۹۵ الی ۳۱۴.

۲-امیدوار، کمال (۱۳۹۹)، رابطه آب و هوایی اتمسفر و اقیانوس، انتشارات دانشگاه یزد.

۳-امیدوار، کمال، آب و هواشناسی دینامیک، انتشارات دانشگاه یزد.

۴-خوش اخلاق،فرامرز و قنبری،نوذر و معصوم پور سماکش،جعفر(۱۳۸۷)، مطالعه اثرات نوسان اطلس شمالی بر رژیم بارشو دمای سواحل جنوبی دریای خزر،پژوهش‌های جغرافیای طبیعی،شماره ،۶۶صص .۷۰-۵.

۵-سالنامه آماری استان اصفهان(۱۳۸۷)، استانداری اصفهان، معاونت برنامه ریزی، دفتر آمارو اطلاعات.

۶-صفری شمالی، رضا (۱۳۸۸)، "راهنمای تدوین طرح تحقیق"؛ اصفهان، انتشارات جامعه و فرهنگ.

۷-عطایی،هوشمند(۱۳۹۴)، مقاله"تاثیر شاخص‌های اطلس شمالی به عنوان نماینده‌ای از الگوهای پیوند از دور بر سری‌ها دمایی استان اصفهان".

۸-علیجانی، بهلول و کاویانی، محمدرضا، مبانی آب و هوا شناسی، (۱۳۷۴)،انتشارات سمت، صص، .۵۸.

۹-فاطمی، مهران؛۱۳۹۵؛ رساله دکتری، تاثیر الگوهای پیوند از دور بر مناطق ایران مرکزی.

۱۰-کاویانی، محمد رضا ؛ علیجانی، بهلول ؛ ۱۳۸۲ ؛ مبانی آب و هوا شناسی ؛ سمت ؛ تهران ؛ چاپ دوازدهم،۱۳۸۷.

۱۱-Al,Yahyai,S (2015) The influence of Atlantic-Eurasian teleconnection patterns on temperature Regimes in South Caspian Sea coastal areas: a study of Golestan Province, North Iran.

۱۲-Cecilia Hellstrom, (2005), Atmospheric conditions during extreme and non-extreme precipitation events in Sweden, Int. J. Clamato. 25: 631–648.

۱۳-Kaplan, R., Kaplan, S. (2006), "The Experience of Nature", Cambridge University Press, Cambridge

۱۴--Mario M. Miglietta (2019) Observed and projected trends of extreme precipitation and Maximum temperature during 1992–2100 in Isfahan province, Iran using REMO model and copula theory.

Correlation and Regression Analysis between Teleconnection Patterns and Precipitation of Selected Stations in Isfahan Province Using CHIRPS Satellite Maps in Google Earth Engine

Kamal Omidvar[1], Elham Alimohammadi[2], Zahreh Taghizadeh[3]

۱- Professor of Climatology, Yazd University

۲- PhD Student in Climatology, Yazd University

MA in Geography and Urban Planning۳-

yazd.ac.ir@Corresponding author: komidvar

Abstract

This study investigates the influence of North and East Atlantic teleconnection patterns on selected meteorological stations in Isfahan province, Iran, during the statistical period of 2001-2020. We used monthly precipitation data from the Isfahan, Ardestan, Khour and Biabank, Naein, and Natanz stations, provided by the Isfahan Meteorological Organization. Using Pearson's correlation and multiple linear regression in SPSS, we analyzed the relationship between precipitation and teleconnection indices, including WP, EP/NP, PNA, SCA, POL, and EA/WR.The results showed that

the EA/WR pattern had the most significant impact, while the POL pattern had the least influence on precipitation at the selected stations. The PNA and SCA variables were identified as the most important predictors of precipitation, particularly at the Naein, Natanz, and Khour and Biabank stations, where the regression models were statistically significant and valid. The geospatial interpretation of precipitation maps, derived from CHIRPS satellite data for the same period (2001-2020), corroborates and complements these statistical findings. The maps reveal that the entire Isfahan province is experiencing a negative precipitation trend. However, the western regions of the province, which are naturally more humid, are undergoing the most severe decline in precipitation (with values ranging from -79 to -46 mm per decade). In contrast, the eastern regions, despite being drier, show a much slower rate of precipitation decrease. This correlation between high-precipitation areas and a rapid drying trend serves as a critical warning for future water resource management in the region.

Keywords: CHIRPS, EA/WR, EP/NP, PNA, POL, SCA, WP.

پایش تغییرات شاخص‌های گیاهی (NDVI/EVI) حوضه دریاچه ارومیه تحت تاثیر تغییر اقلیم با داده‌های MODIS در GEE

بتول زینالی[۱]، ابوذر صادقی[۲]، صیاد اصغری سراسکانرود[۳]، رقیه آذری سنجبد[۴]

۱- استاد اقلیم شناسی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی اردبیل، ایران.
۲- دانش آموخته دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه محقق اردیبلی اردبیل، ایران.
۳- استاد ژئومورفولوژی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی اردبیل، ایران.
٤- دانش آموخته کارشناسی ارشد آب و هواشناسی، دانشگاه محقق اردبیلی اردبیل، ایران.
Zeynali.b@uma.ac.ir

چکیده

حوضه آبریز دریاچه ارومیه، به عنوان یکی از مهم‌ترین اکوسیستم‌های آبی ایران، با چالش‌های زیست‌محیطی جدی مواجه است. این پژوهش با هدف پایش تغییرات پوشش گیاهی و ارزیابی تاثیر متغیرهای اقلیمی بر آن، به تحلیل داده‌های سنجش از دور در بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴ در بستر سامانه گوگل ارث انجین (GEE) می‌پردازد. بدین منظور، سری زمانی شاخص‌های پوشش گیاهی (NDVI و EVI) از محصول MOD13Q1، دمای سطح زمین (LST) از محصول MOD11A2 و داده‌های بارش از مجموعه داده CHIRPS استخراج و تحلیل شدند. نتایج نشان داد که دمای سطح زمین و شاخص‌های پوشش گیاهی از یک چرخه فصلی قدرتمند و پایدار پیروی می‌کنند، در حالی که بارش دارای ماهیتی نامنظم و پراکنده است. مهم‌ترین یافته، عدم وجود هرگونه روند خطی آماری معنادار در تمام متغیرهای مورد بررسی بود که با مقادیر بسیار ناچیز ضریب تعیین (R^2) تایید شد. نتیجه‌گیری می‌شود که دینامیک اکوسیستم حوضه بیش از آنکه تحت تاثیر یک روند بلندمدت تدریجی (مانند گرمایش یا تخریب خطی) باشد، توسط ریتم پایدار فصلی و نوسانات غیرقابل پیش‌بینی بارش کنترل می‌شود. این یافته بر اهمیت تحلیل رخدادهای حدی به جای روندهای میانگین، برای درک بهتر بحران منطقه تاکید دارد.

کلید واژه‌ها: پوشش گیاهی، حوضه دریاچه ارومیه، MODIS، NDVI، EVI.

مقدمه

در دهه‌های اخیر تغییر اقلیم اثرات گسترده ای بر جنبه‌های گوناگون مناطق کوهستانی و سامانه های اکولوژیکی و اجتماعی آن داشته است. پدیده تغییر اقلیم اثرات و پیامدهای متحمل ناشی از آن به موضوعی چالش برانگیز برای مدیران و برنامه‌ریزان شده‌اند. این پدیده به علت جوانب و اثرات مختلف آن در حال حاضر مرکز توجه دانشمندان جهان قرار گرفته است (صادقی و همکاران، ۱۴۰۴). تغییرات در پوشش سطح زمین، محیط زیست را هم تحت تاثیر قرار می‌دهد. شکی نیست مهم‌ترین اثری که تغییرات برجای می‌گذارند، بر روی میزان دما است. به بیان دیگر، با تبدیل جنگل‌ها، مراتع و پوشش گیاهی به سطوح غیر قابل نفوذ، افزایش دما به طور قابل محسوسی اتفاق میافتد. در بین عناصر اقلیمی تاثیر دما در یک منطقه و تغییرات آن اثرات چشمگیری بر تاب آوری زمین دارد و می‌تواند پوشش و کاربری اراضی یک مکان را دچار تنش کند. در این میان دمای سطح زمین در مطالعات گرمایشی جهانی و بعنوان یک نماینده برای تغییرات آب و هوا و برآورد بیلان تابش در مطالعاات توازن انرژی بکار می‌رود (رمضانی و همکاران،۱۳۸۹). پوشش‌های سطح زمین از جمله کاربری های پوشش گیاهی، زمین‌های بایر، منابع آبی، مقداری از انرژی های تابشی خود را جذب و باعث افزایش دمای پوشش سطح زمین می‌گردد، در نهایت این گرما بصورت تابش‌های طول موج بلند، از سطح انواع پوشش‌ها به محیز ساطع می‌شود. در صورت محاسبه دمای سطح زمین در دوره‌های مختلف روند افزایش و یا کاهش دما در سطح انواع پوشش‌های سطح زمین را می‌توان مدل سازی کرد (خالدی و همکاران،۱۴۰۱). شاخص‌های پوشش گیاهی حاصل از سنجش‌ازدور باید به گونه‌ای باشند که تحت تاثیر عوامل غیرزیستی قرار نگیرند تا بتوان از آن‌ها برای پایش فعالیت پوشش گیاهی (Kong et al., 2017; Yang et al., 2015), تشخیص فنولوژی گیاهان (Chen et al., 2004; Jönsson and Eklundh, 2002; Zhang et al., 2018; Zhang, 2015) طبقه‌بندی انواع پوشش زمین (Shao et al., 2016; Xiong et al., 2017; Zhang et al., 2015) پایش خشکسالی (Klisch and Atzberger, 2016; Kogan, 1995) و بررسی تعامل تغییرات اقلیمی با فعالیت پوشش گیاهی (Kong et al., 2017) استفاده کرد. تفکیک زمانی بالا، تفکیک مکانی نسبتا متوسط و در دسترس بودن رایگان داده‌های MODIS تا حدی می‌تواند دلیل این توجه پژوهشگران باشد (Sakamoto et al, 2005). سنجنده MODIS (طیف‌سنج تصویربرداری با قدرت تفکیک متوسط) نصب شده بر روی ماهواره‌های Terraو Aquaناسا، برای پایش جو، اقیانوس‌ها و سطح خشکی طراحی شده است (MODISE,1999). دو شاخص اصلی پوشش گیاهی تولیدشده توسط MODISشامل شاخص نرمال تفاضلی پوشش گیاهی (NDVI) و شاخص بهبود یافته پوشش گیاهی (EVI) هستند. این شاخص‌ها که در بازه عددی منفی یک (-۱) تا مثبت یک (+1) محاسبه می‌شوند، بیانگر میزان سبزینگی نسبی، ویژگی‌های فنولوژیک و بهره‌وری زیستی پوشش گیاهی سطح زمین هستند. داده‌های این شاخص‌ها با پوشش جهانی، در بازه‌های زمانی

یک تا دو روزه و در سه قدرت تفکیک مکانی ۲۵۰ متر، ۵۰۰ متر و ۱ کیلومتر تولید می‌شوند (Running, S.W et al, 1999., Behrenfeld, M.J et al, 2001). برخلاف MODIS-NDVI، شاخص MODIS-EVI اثرات پوشش‌های گیاهی متراکم، پراکندگی آئروسل‌های جوی و بازتاب پس‌زمینه متغیر خاک را در نظر می‌گیرد (Onder & Fatih، 2008). امضاهای چندزمانه حاصل از سری‌های زمانی داده‌های EVI و NDVI نشان داده‌اند که قادر به ثبت شاخص‌های فنولوژیک اساسی انواع کاربری‌های طبیعی زمین (مانند جنگل، مرتع و بوته‌زار) هستند و واکنش‌های متفاوتی نسبت به نوع پوشش زمین، ساختار تاج پوشش و رژیم‌های اقلیمی نشان می‌دهند (Huete et al, 2002., Huete 1988., Liu & Huete, 1995). Google Earth Engine (GEE) یک پلتفرم جهانی برای داده‌ها و تحلیل‌های علوم زمین است که کاتالوگی چند پتابایتی از تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های ژئومکانی را در اختیار کاربران قرار می‌دهد و امکان تحلیل در مقیاس سیاره‌ای را فراهم می‌کند تا بتوان تغییرات را شناسایی، روندها را نقشه‌برداری و تفاوت‌ها را بر سطح زمین کمی‌سازی کرد (Gorelick et al, 2017). اِورندیلک و گول بیاز (۲۰۱۹)، به تحلیل هم‌زمان روندهای مکانی-زمانی پوشش گیاهی در ترکیه پرداختند کاربرد داده‌های MODIS این مطالعه نشان داد که داده‌های MODIS NDVI و EVI ابزارهای مؤثری برای تحلیل روندهای پوشش گیاهی در مقیاس وسیع هستند و می‌توانند به‌عنوان مبنای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در زمینه حفاظت از منابع طبیعی و برنامه‌ریزی‌های زیست‌محیطی مورد استفاده قرار گیرند. مریم حیدرزاده (۱۴۰۲)، پژوهشی انجام دادکه این مطالعه این مطالعه به درک بهتر روابط میان پوشش گیاهی و ویژگی‌های محیطی کمک کرده و ابزارهای مختلف سنجش از دور را برای تحلیل‌های مقایسه‌ای معرفی می‌کند. همچنین نتایج نشان میدهد ضریب همبستگی اسپیرمن بین شاخص‌های NDVIو EVI در سطح ۹۹ درصد معنادار و به‌ترتیب برابر با ۰،۸۴ و ۰،۶۷ بود.

محدوده مورد مطالعه

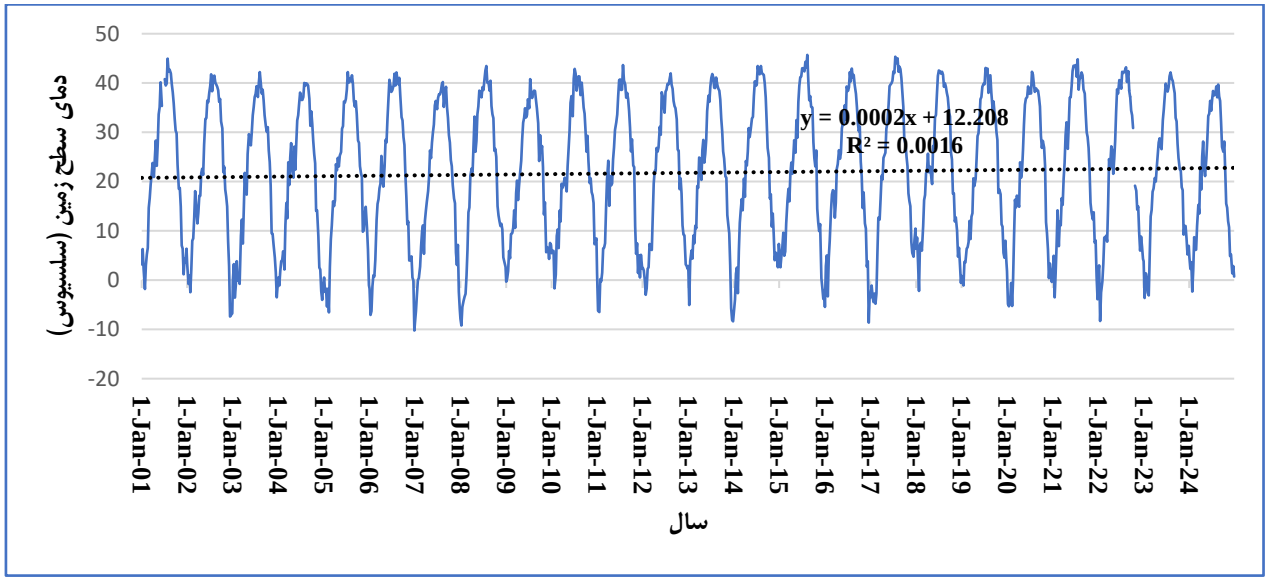
حوضه آبریز دریاچه ارومیه با وسعت ۵۱۸۰۰ کیلومترمربع در ناحیه کوهستانی شمال غربی ایران و بین استان‌های آذربایجان غربی، شرقی، کردستان و قسمت خیلی کوچکی از زنجان واقع شده است. دریاچه ارومیه به عنوان بزرگ‌ترین دریاچه داخلی ایران و از مهم‌ترین و با ارزش‌ترین اکوسیستم‌های آبی ایران و جهان به شمار می‌آید. اکوسیستم این دریاچه نمونه‌ای شاخص از یک حوضه آبریز بسته است که کلیه رواناب‌های جاری در رودخانه‌های حوضه به آن تخلیه می‌گردد. این حوضه آبریز در ارتفاعی بین ۱۲۳۱ تا ۳۷۵۵ متر بالاتر از سطح دریا قرار گرفته است که پست‌ترین نقطه آن دریاچه ارومیه و دشت‌های وسیع اطراف آن هست.

روش پژوهش

این پژوهش با هدف پایش تغییرات زمانی شاخص‌های پوشش گیاهی و ارزیابی تاثیر متغیرهای اقلیمی بر آن در حوضه آبریز دریاچه ارومیه انجام شده است. روش پژوهش حاضر مبتنی بر تحلیل‌های کمی و سری زمانی داده‌های سنجش از دور است که تمامی مراحل فراخوانی، پردازش و تحلیل داده‌ها در سامانه GEE انجام گرفته است. در این پژوهش از سه مجموعه داده اصلی که در گوگل ارث انجین موجود است، استفاده شد؛ داده‌های پوشش گیاهی: به منظور پایش تغییرات پوشش گیاهی، از شاخص‌های NDVI و EVI محصول MOD13Q1 V6 سنجنده MODIS استفاده شد. این محصول دارای قدرت تفکیک مکانی ۲۵۰ متر و تفکیک زمانی ۱۶ روزه است که داده‌های مورد نیاز برای بازه زمانی پژوهش (از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۴) از آن استخراج گردید. داده‌های دما: برای بررسی متغیر دمای سطح زمین (LST)، از محصول MOD11A2 V6 سنجنده MODIS استفاده شد. این محصول، دمای سطح زمین را با قدرت تفکیک مکانی ۱ کیلومتر و بازه زمانی ۸ روزه ارائه می‌دهد. داده‌های بارش: داده‌های بارش از مجموعه داده CHIRPS (Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data) استخراج شد. این مجموعه داده، برآورد بارش روزانه را با قدرت تفکیک مکانی حدود ۵ کیلومتر فراهم می‌کند و یکی از معتبرترین منابع داده بارش در سامانه GEE است.

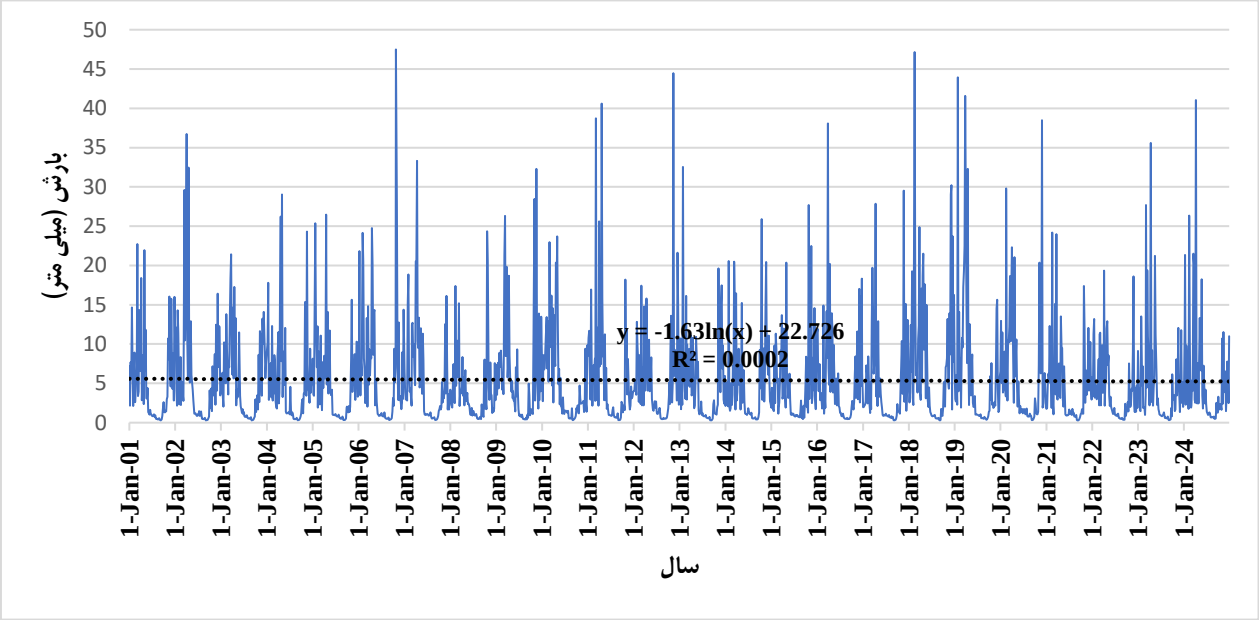
یافته‌های پژوهش

شکل (۲)، نمودار سری زمانی دمای سطح زمین (LST) را در حوضه آبریز دریاچه ارومیه برای بازه زمانی ژانویه ۲۰۰۱ تا ژانویه ۲۰۲۴ نمایش می‌دهد. مهم‌ترین و بارزترین ویژگی این نمودار، وجود یک الگوی چرخه‌ای بسیار منظم و قوی است که به وضوح نوسانات فصلی دما را در منطقه نشان می‌دهد. نوسانات فصلی در هر سال، دما در فصول گرم (تابستان) به حداکثر مقدار خود، یعنی حدود ۴۰ تا ۴۵ درجه سلسیوس، می‌رسد و در فصول سرد (زمستان) به حداقل مقدار خود، یعنی حدود صفر تا ۱۰- درجه سلسیوس، کاهش می‌یابد. این دامنه نوسان بالا، بیانگر اقلیم قاره‌ای حاکم بر منطقه است. این چرخه فصلی با نظم قابل توجهی در تمام طول دوره ۲۴ ساله تکرار شده است که نشان‌دهنده پایداری رژیم حرارتی فصلی در حوضه است. بر روی داده‌ها یک خط روند خطی (Linear Trendline) ترسیم شده است تا روند بلندمدت دما بررسی شود. تحلیل آماری این خط روند نشان می‌دهد؛ معادله خط روند به صورت $y = 0.0002x + 12.208$ است. ضریب زاویه (شیب) این خط که برابر با ۰/۰۰۰۲ است، مقداری بسیار ناچیز و نزدیک به صفر دارد. این موضوع نشان‌دهنده یک روند افزایشی بسیار ضعیف و جزئی در طول دوره است. ضریب تعیین (R^2) که مقدار ضریب تعیین ($R^2 = 0.0016$) بسیار پایین و نزدیک به صفر است. این مقدار نشان می‌دهد که خط روند خطی تنها ۰/۱۶درصد از کل تغییرات مشاهده شده در دمای سطح زمین را تبیین می‌کند.



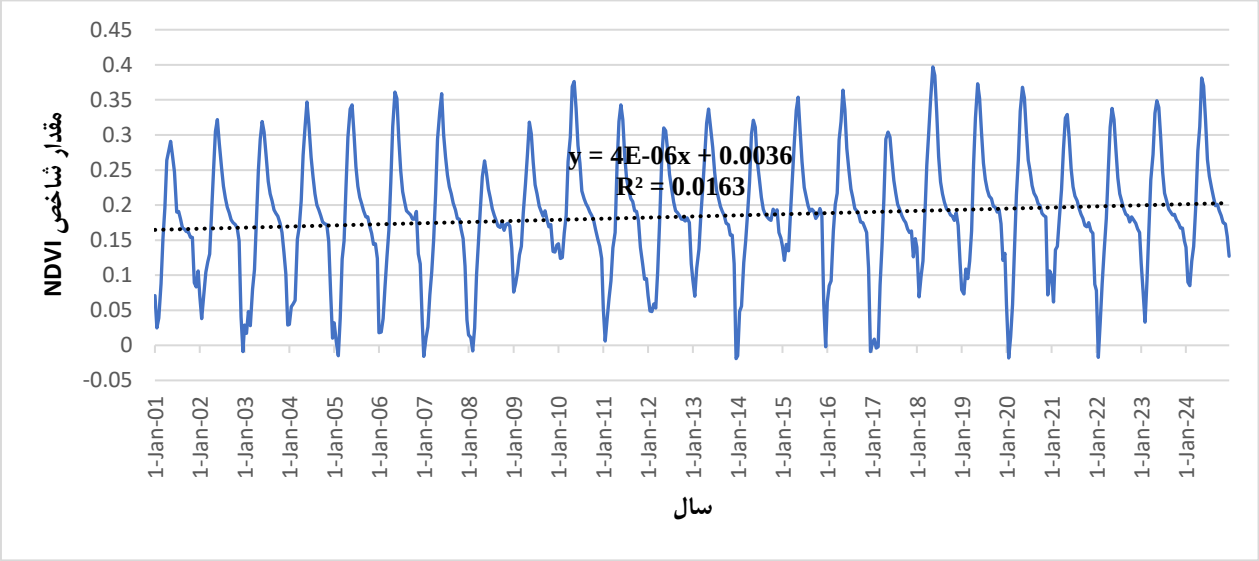
شکل ۲- نمودار سری زمانی دمای سطح زمین

شکل (۳)، سری زمانی بارش (بر حسب میلی‌متر) را در حوضه آبریز دریاچه ارومیه برای بازه زمانی ژانویه ۲۰۰۱ تا ژانویه ۲۰۲۴ نمایش می‌دهد. داده‌ها از یک چرخه منظم و قابل پیش‌بینی پیروی نمی‌کنند. در عوض، دوره‌های طولانی با بارش کم یا صفر مشاهده می‌شود که توسط رخدادهای بارشی تیز و با شدت بالا قطع می‌شوند. قله‌های بارش که مقادیر آن‌ها به حدود ۴۵ تا ۵۰ میلی‌متر نیز می‌رسد، به صورت نامنظم و بدون یک الگوی سالانه مشخص در طول سری زمانی رخ داده‌اند. این موضوع بر ماهیت غیرقابل پیش‌بینی بارش‌های قابل توجه در حوضه تاکید دارد. معادله خط روند که معادله $y = -1.63\ln(x) + 22.726$ دارای یک ضریب منفی (۱/۶۳-) است که یک تمایل جزئی به کاهش بارش را در طول دوره ۲۴ ساله نشان می‌دهد. ضریب تعیین (R^2) که مقدار ضریب تعیین برابر با ۰/۰۰۰۲ است. این مقدار فوق‌العاده پایین در تفسیر بسیار حائز اهمیت است و نشان می‌دهد که خط روند لگاریتمی تنها ۰/۰۲ درصد از کل نوسانات موجود در داده‌های بارش را تبیین می‌کند. تحلیل سری زمانی بارش در حوضه دریاچه ارومیه نشان می‌دهد که ویژگی غالب آن، نوسانات شدید زمانی و ماهیت نامنظم و پراکنده آن است. اگرچه خط روند لگاریتمی یک تمایل کاهشی بسیار ضعیف را نشان می‌دهد، اما مقدار R^2 نزدیک به صفر (۰/۰۰۰۲) تأیید می‌کند.



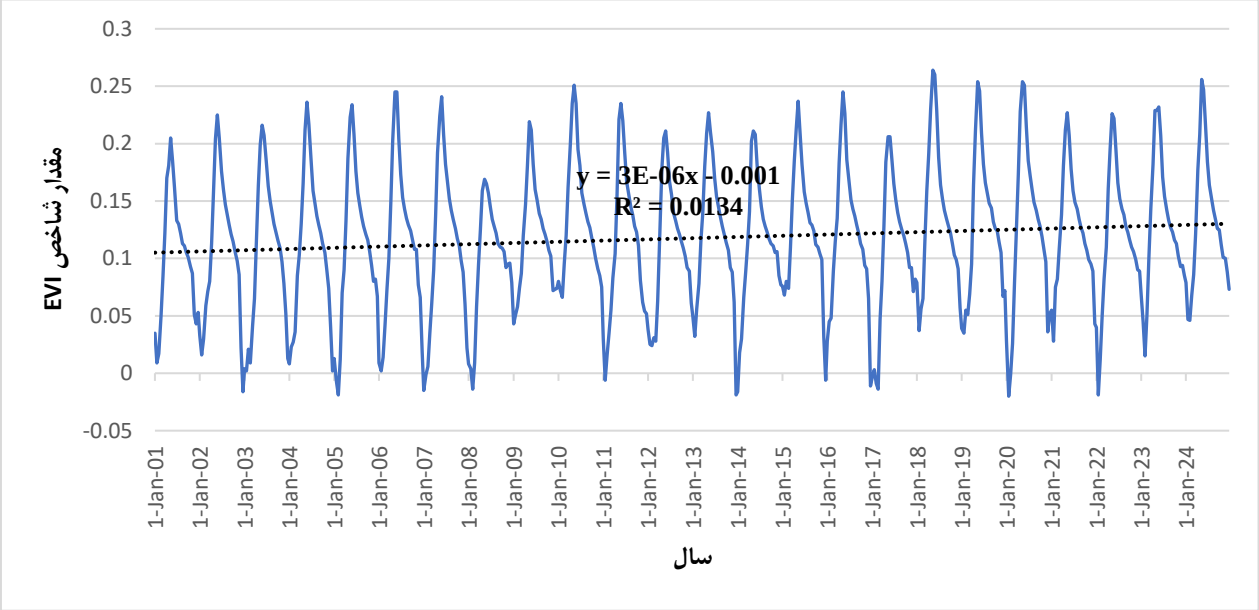
شکل ۳- نمودار سری زمانی بارش

شکل (۴)، سری زمانی شاخص نرمال‌شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI) را برای حوضه آبریز دریاچه ارومیه در بازه زمانی ژانویه ۲۰۰۱ تا ژانویه ۲۰۲۴ نمایش می‌دهد. شاخص NDVI یک معیار استاندارد در سنجش از دور است که برای ارزیابی میزان سلامت، تراکم و سرسبزی پوشش گیاهی به کار می‌رود. مقادیر بالاتر این شاخص نمایانگر پوشش گیاهی متراکم‌تر و سالم‌تر است. مقادیر NDVI در هر سال طی فصل رشد که معمولاً منطبق بر بهار و اوایل تابستان است، به اوج خود (حدود ۰.۳۵ تا ۰.۴) می‌رسد. پس از آن، در فصول خشک یا دوره خواب گیاهان یعنی اواخر تابستان، پاییز و زمستان، به حداقل مقدار خود (نزدیک به صفر یا کمی بالاتر) کاهش می‌یابد. این الگوی منظم به طور مستقیم پاسخ اکوسیستم گیاهی منطقه به تغییرات فصلی دما و بارش را منعکس می‌کند. با افزایش دما و رطوبت در بهار، پوشش گیاهی به سرعت رشد کرده و با کاهش دما و بارش، فعالیت آن متوقف می‌شود. معادله خط به صورت y = 4E-06x + 0.0036 است. شیب این خط (E-064 یا ۰/۰۰۰۰۰۰۴) یک مقدار مثبت بسیار ناچیز و نزدیک به صفر است که یک روند افزایشی بسیار جزئی و تقریبا افقی را در بلندمدت نشان می‌دهد. ضریب تعیین این مدل برابر با ۰/۰۱۶۳ است. این مقدار پایین نشان می‌دهد که مدل خطی تنها ۱/۶۳ درصد از کل نوسانات مشاهده‌شده در مقادیر NDVI را توضیح می‌دهد.



شکل ۴- نمودار سری زمانی NDVI

شکل (۵)، سری زمانی شاخص بهبودیافته پوشش گیاهی (EVI) را در حوضه آبریز دریاچه ارومیه طی بازه زمانی از ژانویه ۲۰۰۱ تا ژانویه ۲۰۲۴ نشان می‌دهد. شاخص EVI، همانند NDVI، معیاری برای سنجش سلامت و تراکم پوشش گیاهی است اما حساسیت آن در مناطقی با زیست‌توده بالا بیشتر بوده و اثرات جوی و خاک پس‌زمینه را بهتر کاهش می‌دهد. الگوی زمانی EVI شباهت بسیار زیادی به الگوی NDVI دارد و یک چرخه فصلی واضح و پایدار را به نمایش می‌دهد. مقادیر EVI نیز مطابق با فصل رشد گیاهان، در بهار و اوایل تابستان به حداکثر خود (حدود ۰/۲۵) می‌رسد و در فصول خواب گیاهی به حداقل مقدار خود (نزدیک به صفر) کاهش می‌یابد. این الگوی منظم، نتایج به‌دست‌آمده از تحلیل شاخص NDVI را کاملا تایید می‌کند و نشان می‌دهد که هر دو شاخص به طور هماهنگ به تغییرات اقلیمی فصلی در منطقه واکنش نشان می‌دهند. معادله خط به صورت y = 3E-06x - 0.001 است. شیب این خط (E-063 یا ۰/۰۰۰۰۰۰۳) نیز یک مقدار مثبت بسیار ناچیز است که روندی تقریباً افقی و فاقد تغییرات محسوس در بلندمدت را نشان می‌دهد. ضریب تعیین (R^2) مقدار R^2 در این مدل برابر با ۰/۰۱۳۴ است. این مقدار پایین نشان می‌دهد که خط روند خطی تنها ۱/۳۴ درصد از نوسانات کلی EVI را تبیین می‌کند. تحلیل شاخص EVI نیز همانند NDVI تایید می‌کند که دینامیک پوشش گیاهی در حوضه دریاچه ارومیه اساسا فصلی است و از یک ریتم سالانه منظم پیروی می‌کند.



شکل ۵- نمودار سری زمانی EVI

بحث و نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش، تصویری چندوجهی از دینامیک اقلیمی و اکولوژیکی حوضه آبریز دریاچه ارومیه طی دو دهه اخیر ارائه می‌دهد. مهم‌ترین یافته، عدم وجود روندهای خطی آماری معنادار در هر چهار متغیر کلیدی مورد بررسی (دمای سطح زمین، بارش، NDVI و EVI) است. مقادیر ناچیز ضریب تعیین (R^2) در تمامی تحلیل‌های رگرسیون، نشان می‌دهد که نمی‌توان تغییرات مشاهده شده را به یک روند گرمایش، سرمایش، یا تخریب و بهبود پوشش گیاهی پایدار و خطی در بازه زمانی مورد مطالعه نسبت داد. در عوض، تحلیل‌ها نشانگر حاکمیت دو الگوی متضاد است: از یک سو، پایداری چرخه‌های فصلی قدرتمند که ریتم اصلی دمای سطح زمین و پاسخ پوشش گیاهی (NDVI و EVI) را تعیین می‌کند؛ و از سوی دیگر، ماهیت نامنظم و پراکنده بارش که به عنوان یک عامل محدودکننده و غیرقابل پیش‌بینی عمل می‌نماید. این دوگانگی حاکی از آن است که اگرچه اکوسیستم منطقه به یک رژیم حرارتی فصلی پایدار سازگار شده، اما در برابر نوسانات شدید و غیرقابل پیش‌بینی منابع آبی بسیار آسیب‌پذیر است. بنابراین، این پژوهش استدلال می‌کند که تمرکز صرف بر روندهای میانگین بلندمدت ممکن است تصویر کاملی از فشارهای اقلیمی بر حوضه ارائه ندهد. در مقابل، به نظر می‌رسد که تحلیل فرکانس و شدت رخدادهای حدی (Extreme Events)، مانند خشکسالی‌های کوتاه‌مدت و امواج گرمای درون‌فصلی، که تاثیرات آنی

و عمیق‌تری بر سلامت پوشش گیاهی و تراز هیدرولوژیکی دارند، برای درک جامع‌تر بحران زیست‌محیطی منطقه از اهمیت بالاتری برخوردار باشد.

منابع

۱- حیدرزاده، م. (۱۴۰۲). ارزیابی همبستگی شاخص‌های گیاهی با متغیرهای هواشناسی و بیولوژیکی با استفاده از سامانه گوگل ارث انجین .مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، (۳۰)۲، ۲۶-۱.

۲- خالدی، ش.، کیخسروی، ق.، احمدی براتی، ف.(۱۴۰۱). بررسی اثر تغییرات پوشش زمین بر دمای رویه سطحی زمین با استفاده از تصاویر ماهواره ای سنجنده مودیس مطالعه موردی: شمال شرق ایران. فصلنامه علمی-پژوهشی اطلاعات جغرافیایی(۳۱)۱۲۳، ۱۹۷-۱۷۹.

۳- رمضانی، ب.، دخت محمد، س م. (۱۳۸۹). شناخت محدوده مکانی تشکیل محدوده جزیره گرمایی در شهر رشت. مجله پژوهش و برنامه ریزی شهری(۱)، ۶۴-۴۹.

۴- صادقی، ا.، صلاحی، ب.، آذری سنجبد، ر. (۱۴۰۴). بررسی تغییرات سطحی پوشش برف در ارتباط با دمای سطح زمین، تبخیر و تعرق و پوشش گیاهی در حوضه آبخیز ارس. پژوهش نامه مدیریت حوضه آبخیز، سال شانزدهم(۱)،۱۰۶-۸۴.

5- Behrenfeld, M.J.; Randerson, J.T.; McClain, C.R.; Feldman, G.C.; Los, S.O.; Tucker, C.J.; Falkowski, P.G.; Field, C.B.; Frouin, R.; Esaias, W.E.; Kolber, D.D.; Pollack, N.H. Biospheric primary production during an ENSO transition. Science 2001, 291, 2594-2597.

6- Chen, J., Jönsson, P., Tamura, M., Gu, Z., Matsushita, B., Eklundh, L., 2004. A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky-Golay filter. Remote Sens. Environ. 91, 332–344. https://doi.org/10.1016/j. rse.2004.03.014.

7- Fatih Evrendilek and Onder Gulbeyaz. Deriving Vegetation Dynamics of Natural Terrestrial Ecosystems from MODIS NDVI/EVI Data over Turkey. 2008, 8, 5270-5302; DOI: 10.3390/s8095270.

8- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., Moore, R., 2017. Google earth engine: planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sens. Environ. 202, 18–27. https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031.

9- Huete, A.; Didan, K.; Miura, T.; Rodriguez, E.P.; Gao, X.; Ferreira, L.G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. Remote Sens. Environ. 2002, 83, 195-213.

10- Huete, A.R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). Remote Sens. Environ. 1988, 25, 295-309.

11- Jönsson, P., Eklundh, L., 2002. Seasonality extraction by function fitting to time-series of satellite sensor data. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 40, 1824–1832. https://doi. org/10.1109/TGRS.2002.802519.

12- Klisch, A., Atzberger, C., 2016. Operational drought monitoring in Kenya using MODIS NDVI time series. Remote Sens. 8. https://doi.org/10.3390/rs8040267.

13- Kogan, F.N., 1995. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. Adv. Sp. Res. 15, 91–100. https://doi.org/10.1016/0273 1177(95)00079-T.

14- Kong, D., Zhang, Q., Singh, V.P., Shi, P., 2017. Seasonal vegetation response to climate change in the Northern Hemisphere (1982–2013). Glob. Planet. Change 148, 1–8. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.10.020.
15- Liu, H.Q.; Huete, A. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. IEEE T. Geosci. Remote 1995, 33, 457-465.
16- MODIS. MODIS Vegetation Index (MOD 13): Algorithm Theoretical Basis Document (Version 3); http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod13.pdf; 1999.
17- Running, S.W.; Nemani, R.; Glassy, J.M.; Thornton, P. MODIS Daily Photosynthesis (PSN) and Annual Net Primary Production (NPP) Product (MOD17), Algorithm Theoretical Basis Document; Version 3.0, 1999.
18- Sakamoto, T.; Yokozawa, M.; Toritani, H.; Shibayama, M.; Ishitsuka, N.; Oho, H. A crop phenology detection method using time-series MODIS data. Remote Sens. Environ. 2005, 96, 366 374.
19- Shao, Y., Lunetta, R.S., Wheeler, B., Iiames, J.S., Campbell, J.B., 2016. An evaluation of time-series smoothing algorithms for land-cover classifications using MODIS-NDVI multi-temporal data. Remote Sens. Environ. 174, 258–265. https://doi.org/10.1016/ j.rse.2015.12.023.
20- Xiong, J., Thenkabail, P.S., Gumma, M.K., Teluguntla, P., Poehnelt, J., Congalton, R.G., Yadav, K., Thau, D., 2017. Automated cropland mapping of continental Africa using Google Earth Engine cloud computing. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 126, 225–244. https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.01.019.
21- Yang, G., Shen, H., Zhang, L., He, Z., Li, X., 2015. A moving weighted harmonic analysis method for reconstructing high-quality SPOT VEGETATION NDVI time-series data. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 53, 6008–6021. https://doi.org/10.1109/TGRS. 2015.2431315.
22- Zhang, X., 2015. Reconstruction of a complete global time series of daily vegetation index trajectory from long-term AVHRR data. Remote Sens. Environ. 156, 457–472. https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.10.012.
23- Zhang, Y., Xiao, X., Wolf, S., Wu, J., Wu, X., Gioli, B., Wohlfahrt, G., Cescatti, A., van der Tol, C., Zhou, S., Gough, C.M., Gentine, P., Zhang, Yongguang, Steinbrecher, R., Ardö, J., 2018b. Spatio-temporal convergence of maximum daily light-use efficiency based on radiation absorption by canopy chlorophyll. Geophys. Res. Lett. 45, 3508–3519. https://doi.org/10.1029/2017GL076354.

Monitoring Vegetation Index (NDVI/EVI) Changes in the Urmia Lake Basin Under the Impact of Climate Change Using MODIS Data in GEE

Aboozar Sadeghi[1], Batol Zeinali[2],Sayyad Asghari Saraskanrood[3],Roghayeh Azari Sanjebad[4]
Professor of climatology, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
PhD in Geomorphology, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
Professor of Geomorphology, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
MSc in Climatology, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.
* Zeynali.b@uma.ac.ir

Abstract

The Urmia Lake Basin, as one of Iran's most significant aquatic ecosystems, is facing serious environmental challenges. This research aims to monitor vegetation changes and assess the impact of climatic variables by analyzing remote sensing data from 2001 to 2024 within the Google Earth Engine (GEE) platform. To this end, time-series data of vegetation indices (NDVI and EVI) from the MOD13Q1 product, Land Surface Temperature (LST) from the MOD11A2 product, and precipitation data from the CHIRPS dataset were extracted and analyzed. The results indicated that Land Surface Temperature and vegetation indices follow a strong and stable seasonal cycle, whereas precipitation exhibits an irregular and sporadic nature. The most significant finding was the absence of any statistically significant linear trend in all the studied variables, which was confirmed by negligible coefficient of determination (R^2) values. It is concluded that the basin's ecosystem dynamics are controlled more by the stable seasonal rhythm and unpredictable precipitation fluctuations than by a gradual, long-term trend (such as linear warming or degradation). This finding emphasizes the importance of analyzing extreme events, rather than mean trends, for a better understanding of the region's crisis.

Keywords: Vegetation Cover, Urmia Lake Basin, Modis, NDVI, EVI.

ارزیابی نقش عملکردی بهره برداران در مدیریت منابع سرزمینی

سهند آذر *[۱]، علی اکبر تقی لو[۲]

۱- دانشجوی دکتری برنامه ریزی آمایش سرزمین ، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول: s.azar@urmia.ac.ir

۲ - استاد تمام گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

a.taghiloo@urmia.ac.ir

چکیده

ارزیابی نقش بهره‌برداران در مدیریت منابع سرزمینی، فرآیندی حیاتی برای پایداری این منابع است. این ارزیابی، عملکرد بهره‌برداران را در استفاده از منابعی نظیر آب، خاک و جنگل‌ها مورد بررسی قرار می‌دهد. هدف، شناسایی تاثیرات فعالیت‌ها بر محیط‌زیست و میزان پایبندی به قوانین است. عوامل اقتصادی، اجتماعی و سیاسی مؤثر بر عملکرد بهره‌برداران شناسایی می‌شوند. این ارزیابی، زمینه‌ساز ارائه راهکارهایی برای بهبود عملکرد و ارتقای مدیریت منابع می‌شود. راهکارها شامل اصلاح قوانین، آموزش، ایجاد مشوق‌ها و تقویت مشارکت بهره‌برداران است. در نهایت، هدف دستیابی به یک مدیریت پایدار و منصفانه از منابع سرزمینی است. پایش و ارزیابی مداوم نیز برای اطمینان از اثربخشی اقدامات ضروری است. هدف پژوهش حاضر برر سی ارزیابی نقش عملکردی بهره وران در مدیریت منابع سرزمینی می باشد. این پژوهش ازنظر هدف، کاربردی - نظری و ازنظر روش، توصیفی– تحلیلی است. اطلاعات و داده های موردنیاز از طریق روش کتابخانه ای و میدانی جمع آوری شده است. در این پژوهش از روش روش بهترین-بدترین (Best-Worst method)نتایج پژوهش نشان می دهد که در این پژوهش ۸ معیار را به کار بردیم. در این قسمت مقایسات زوجی بهترین معیار نسب به دیگر معیارها (BO) و دیگر معیارها نسبت به بدترین معیار (OW) انجام می‌شود که در این پژوهش ابتدا مقایسات زوجی تشکیل و در اختیار ۳ نفر از خبرگان قرار داده شد تا بر اساس طیف ۵ تایی فازی، میزان ارجحیت در مقایسات زوجی را مشخص کنند بعد از پاسخگویی، مقایسات زوجی با روش میانگین هندسی ادغام شدند. در این بخش به محاسبه نرخ ناسازگاری مقایسات زوجی پژوهش پرداخته می‌شود ابتدا با استفاده از رابطه ۸ با حل یک معادله درجه دو برای هر جدول مقایسه زوجی مقدار مجهول ξ را محاسبه می‌کنیم که همان شاخص سازگاری است سپس مقدار بهینه تابع هدف ($\tilde{\xi}$*) هر مدل خطی برای جداول مقایسه

زوجی را بر این مقدار شاخص سازگاری تقسیم می‌کنیم تا نرخ ناسازگاری حاصل شود به بیان ریاضی نرخ ناسازگاری برابر است با: $\frac{\xi^*}{\xi}$. هر چه نرخ ناسازگاری به صفر نزدیکتر باشد نشان از سازگارتر بودن مقایسه زوجی است.

کلید واژه ها: مدیریت منابع طبیعی، مدیریت پایدار زمین، بهره‌برداران، روش بهترین-بدترین (Best-Worst method)

مقدمه

خاک عملکردهای حیاتی متعددی دارد. مدیریت موثر منابع زمین برای حفظ سلامت اکوسیستم و حمایت از توسعه پایدار بسیار مهم است. خاک به عنوان یک جزء حیاتی از منابع زمین، خدمات اکوسیستمی متعددی از جمله بهره وری اولیه، تصفیه آب، ترسیب کربن، تامین زیستگاه تنوع زیستی و چرخه مواد مغذی را ارائه می دهد (Coyle et al,2016; Vrebos et al,2017; Davis et al,2015). با این حال، فعالیت‌های انسانی منجر به تخریب گسترده خاک شده است، به طوری که تخمین زده می‌شود که یک سوم از زمین‌ها در سطح جهانی از سطح متوسط تا شدید تخریب شده است. از آنجایی که جمعیت جهانی به رشد خود ادامه می‌دهد و فشار فزاینده‌ای بر منابع زمین وارد می‌کند، اتخاذ رویکردهای جامع‌تر برای مدیریت زمین که کارکردها و ذینفعان متعدد را در نظر می‌گیرد، ضروری شده است (O'Sullivan et al,2018)؛ ارزیابی نقش عملکردی بهره‌برداران خاک در مدیریت منابع زمین برای بهینه سازی استفاده از منابع زمین محدود سیاره ما در عین حفظ خدمات اکوسیستم و پایداری حیاتی است (Davis et al,2015)؛ کشاورزان، سیاست گذاران و حافظان محیط زیست، نقش محوری در حکمرانی کشاورزی-محیطی و نقش حیاتی در شکل دادن به نحوه مدیریت زمین دارند. تصمیمات آنها بر تعادل بین بهره وری زراعی و پایداری محیطی تأثیر می گذارد. به عنوان مثال، شیوه های کشاورزی می تواند حاصلخیزی خاک را افزایش دهد اما ممکن است ظرفیت ذخیره کربن آن را به خطر بیندازد. ارزیابی نقش عملکردی کاربران خاک شامل ارزیابی چگونگی تأثیر اقدامات آنها بر ارائه این خدمات اکوسیستمی و شناسایی استراتژی‌هایی برای بهینه‌سازی عملکرد خاک در حین برآورده کردن نیازهای اجتماعی است (O'Sullivan et al,2022;O'Sullivan et al,2018)؛ کاربری های مختلف زمین، مانند جنگل های بومی در مقابل شیوه های کشاورزی، به طور قابل توجهی بر ویژگی ها و عملکردهای خاک، از جمله حفظ آب و مقاومت در برابر فرسایش تأثیر می گذارد؛ مطالعات نشان می دهد که تبدیل جنگل های بومی به زمین های کشاورزی می تواند کیفیت خاک و پتانسیل تغذیه آب را کاهش دهد و نیاز به تصمیم گیری آگاهانه در مورد استفاده از زمین را برجسته می کند (Santana et al,2023). این فرآیند ارزیابی برای توسعه سیاست‌ها و شیوه‌هایی که استفاده پایدار از زمین را تضمین می‌کنند، حیاتی است. این نیاز به درک جامعی از تأثیر متقابل بین عملکردهای خاک، انواع کاربری زمین و شیوه های مدیریت دارد. با بررسی نقش عملکردی کاربران خاک، می‌توانیم استراتژی‌های مدیریت

زمین را با اهداف زیست‌محیطی و زراعی بهتر هماهنگ کنیم و در نهایت به مدیریت پایدارتر منابع زمین کمک کنیم. در حالی که تمرکز بر کاربران خاک بر نقش حیاتی آنها در مدیریت منابع زمین تأکید می‌کند، شناخت پتانسیل منافع متضاد در بین ذینفعان نیز مهم است که می‌تواند اجرای شیوه‌های پایدار را پیچیده کند. ایجاد تعادل بین این منافع برای دستیابی به اهداف بلندمدت مدیریت زمین حیاتی است (Vrebos et al,2017). مکانیسم‌های مدیریت مؤثر زمین باید ایمنی اکولوژیکی و بهره‌وری زمین‌های کشاورزی را تضمین کند که مستلزم مشارکت فعال استفاده‌کنندگان از خاک است (Hreshchuk,2023). همسویی شیوه های مدیریت زمین محلی با اهداف زیست محیطی ملی و بین المللی برای توسعه پایدار بسیار مهم است سیاستگذاران باید تفاوت‌های منطقه‌ای در عملکرد خاک و کاربری زمین را در نظر بگیرند تا استراتژی‌های مدیریتی مؤثری را ایجاد کنند که هم از رشد اقتصادی و هم از پایداری زیست‌محیطی حمایت می‌کند (Valujeva et al,2020). بررسی و شناخت نقش بهره‌برداران در مدیریت منابع سرزمینی از اهمیت زیادی برخوردار است، شرکت این افراد در برنامه‌ریزی، اجرا، نظارت و ارزیابی برنامه‌های می‌تواند به موفقیت این برنامه‌ها کمک کنند. مشارکت بهره‌برداران در برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری‌های مدیریت منابع طبیعی به ترویج توسعه پایدار و حفاظت از منابع کمک می‌کند، زیرا این افراد به عنوان ذینفعان اصلی در حفاظت و بهره‌برداری از منابع طبیعی نقش کلیدی ایفا می‌کنند. در مشارکت جوامع محلی در مدیریت پایدار ذینفعان مختلف با نقش‌های متفاوت در تصمیم‌گیری‌ها شرکت می‌کنند تا به هدف نهایی حفاظت و بهره‌برداری پایدار از منابع طبیعی دست یابند. در سیستم‌های پیچیده اجتماعی-بوم‌شناختی، مشارکت بهره‌برداران مرتعی و کشاورزی به عنوان زیربنای مدیریت پایدار شناخته شده است. این مشارکت به همافزایی اجتماع‌های بهره‌بردار محلی برای حفاظت از منابع کمک می‌کند (سامیان و خلیلی،۱۳۹۱: ۶). در این راستا هدف پژوهش حاضر ارزیابی نقش عملکردی بهره برداران در مدیریت منابع سرزمینی (خاک) می‌باشد. ارزیابی نقش عملکردی بهره برداران در مدیریت منابع سرزمینی در این راستا، مدیریت پایدار منابع سرزمینی یک موضوع مهم و حیاتی به شمار می رود، که در عین حال، چالشی بزرگ است. به دلیل پیچیدگی و تنوع در این حوزه، ارزیابی نقش عملکردی بهره‌برداران در این زمینه، بسیار حیاتی و ضروری به نظر می رسد. با بررسی نقش عملکردی بهره برداران، می توان به طور دقیق، تأثیر آن ها در مدیریت پایدار منابع سرزمینی را مورد ارزیابی قرار داد. در واقع، این ارزیابی می تواند منجر به شناسایی نقاط قوت و ضعف، تعیین راهکارهای مناسب جهت بهبود عملکردهای مدیریتی، و همچنین، بهینه سازی شیوه های بهره‌برداری از منابع در جهت حفظ پایداری محیطی گردد. ارزیابی عملکرد بهره‌برداران در مدیریت منابع سرزمینی نه تنها منجر به بهینه سازی شیوه های بهره‌برداری از منابع، بلکه باعث ارتقای آگاهی و دانش بهره‌برداران در مورد اهمیت مدیریت پایدار منابع نیز می شود.

ادبیات نظری

در این بخش رویکردهای مدیریت خاک در سال های اخیر آورده شده است که نشان می‌دهد ادبیات نظری در مورد مدیریت خاک تغییر به سمت رویکردهای جامع‌تر و پایدار را نشان داده است. روندهای کلیدی در رویکردهای مدیریت خاک که در این بخش بررسی شده است رویکرد ذینفعمحور، رویکرد ادغام خدمات زیست محیطی، رویکرد ملاحظات چند وجهی، تمرکز بر مواد آلی خاک و رویکردهای مشارکتی هستند.

رویکرد ذینفع محور:

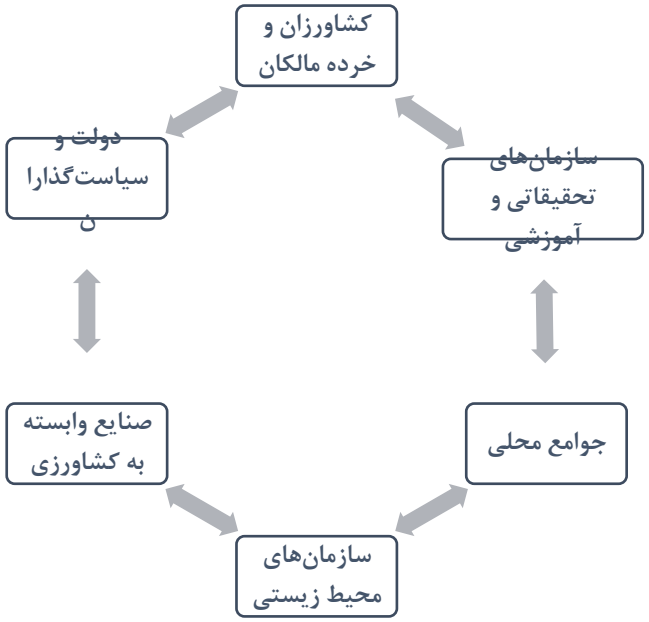
درک روزافزونی از اهمیت در نظر گرفتن دیدگاه های ذینفعان متعدد در مدیریت خاک وجود دارد.گروه‌های ذینفع مختلف (مانند کشاورزان، سیاست‌گذاران، سازمان‌های غیردولتی محیط‌زیست) توصیه‌ها و اولویت‌های متفاوتی برای مدیریت خاک دارند. رویکرد ادغام خدمات زیست محیطی: تأکید فزاینده ای بر گنجاندن خدمات اکولوژیکی در استراتژی های مدیریت خاک وجود دارد. اقداماتی مانند حفظ پوشش خاک و کاهش بار خاک برای حفاظت از تنوع زیستی و تنظیم آب توصیه می شود (Strauss et al,2023). رویکرد ملاحظات چند وجهی: مدیریت خاک در حال حاضر شامل جنبه های اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی-فرهنگی است. ذینفعان نیاز به تعادل منافع اقتصادی با ملاحظات زیست محیطی و اجتماعی را تشخیص می دهند. رویکرد تمرکز بر مواد آلی خاک(SOM): نگرانی فزاینده ای در مورد جلوگیری از کاهش SOM در اکوسیستم های کشاورزی وجود دارد. اقدامات مختلف مدیریت کشاورزی پایدار (SMM) برای افزایش محتوای SOM در حال بررسی است. رویکردهای مشارکتی: گرایشی به سمت مشارکت ذینفعان در شناسایی و ارزیابی اقدامات مدیریت خاک وجود دارد. کارگاه‌ها و فرآیندهای مشارکتی برای جمع‌آوری اطلاعات از گروه‌های مختلف ذینفع استفاده می‌شود (Dal Ferro et al,2020). ادبیات نظری در مورد مدیریت خاک به سمت یک رویکرد جامع تر و ذینفع محور تکامل‌یافته است. نیاز به ایجاد تعادل بین عوامل اقتصادی، زیست محیطی و اجتماعی-فرهنگی در تصمیم‌گیری‌های مدیریت خاک به طور فزاینده‌ای درک می‌شود. روش‌های مشارکتی که کشاورزان، محققان، سیاست‌گذاران و سایر ذینفعان را در بر می‌گیرد رواج بیشتری می‌یابد. تمرکز از ملاحظات صرفاً اقتصادی به جنبه‌های اکولوژیکی و اجتماعی گسترده‌تر سلامت و پایداری خاک تغییر کرده است. میزان مداخله و مشارکت بهره‌برداران خاک در مدیریت منابع سرزمینی باید به گونه‌ای باشد که آنها به عنوان ذینفعان اصلی در تصمیم‌گیری‌ها و برنامه‌ریزی‌های مربوط به مدیریت پایدار خاک و آب مشارکت فعال داشته باشند (بذرافشان و همکاران،۱۳۹۶: ۳۴۷). انواع مختلف مشارکت بهره‌برداران در مدیریت پایدار منابع سرزمینی از جمله خاک وجود دارد. سازماندهی بهره‌برداران در تشکل‌های آب‌بران و سایر نهادهای مرتبط با مدیریت آب و خاک، از مهم‌ترین راهبردهای بهره‌برداری بهینه از منابع است (مرادی‌نژاد،۱۳۹۸: ۸۶). مشارکت در اقدامات حفاظتی، بهره‌برداران باید در

اقدامات حفاظتی از خاک مانند کنترل فرسایش، استفاده از کودهای آلی، و بهبود ساختار خاک مشارکت کنند. این اقدامات به افزایش حاصلخیزی خاک و پایداری تولید کمک می‌کند (بذرافشان و همکاران،۱۳۹۶: ۳۵۰). مشارکت بهره‌برداران در مدیریت پایدار خاک و آب می‌تواند به توسعه پایدار کشاورزی و افزایش امنیت غذایی کمک کند. این مشارکت با ترویج شیوه‌های پایدار و کاهش تخریب منابع همراه است (زارع و همکاران،۱۴۰۲: ۲). رویکرد مدیریت پایدار خاک[110] بر اساس حفاظت از خدمات بوم‌سازگان خاک و تضمین پایداری طولانی‌مدت آن است. این رویکرد شامل اقدامات مختلفی است که به حفظ کیفیت خاک، کاهش تخریب محیط زیست، و ارتقای بهره‌وری کشاورزی کمک می‌کند. برخی از جنبه‌های مهم این رویکرد عبارتند از: حفظ خدمات خاک: مدیریت پایدار خاک زمانی تحقق می‌یابد که خدمات ارائه شده توسط خاک، مانند خدمات حمایتی، تامین کننده، تنظیمی و فرهنگی، حفظ یا ارتقا یابد (زاره‌مبارک،۲۰۱۷). حفاظت از محیط زیست: این رویکرد بر حفاظت از محیط زیست و جلوگیری از تخریب خاک تأکید دارد. اقدامات حفاظتی شامل کنترل فرسایش، کاهش آلودگی خاک، و بهبود ساختار خاک است (محمدی،۱۳۹۹: ۲). مدیریت پایدار خاک از آن بابت اهمیت دارد چون منجر به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و حفظ منابع زیستی می‌شود. مدیریت صحیح خاک می‌تواند به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک کند و در مبارزه با تغییرات آب و هوایی مؤثر باشد (میرزایی و همکاران،۱۴۰۰: ۱۹۰)؛ همچنین خاک نقش مهمی در حفظ تنوع زیستی و ترسیب کربن دارد. بنابراین، مدیریت پایدار خاک برای دستیابی به اهداف توسعه پایدار سازمان ملل ضروری است (محمدی،۱۳۹۹: ۳). از جمله شیوه‌های مدیریت پایدار خاک عبارتند از: کشاورزی پایدار: کشاورزی پایدار الگویی از توسعه است که از زمین، آب، و منابع ژنتیکی حفاظت می‌کند و از نظر محیط زیستی بدون تخریب است (موسسه تحقیقات خاک و آب کشور). کشاورزی هوشمند: استفاده از فناوری‌های کشاورزی هوشمند می‌تواند به تسهیل حفاظت از خاک کمک کند و شرایطی را برای کشاورزان فراهم کند تا آینده‌ای قابل قبول‌تر داشته باشند (محمدرضایی و راهدان،۱۴۰۰: ۴). تناوب زراعی و خاکورزی حفاظتی: به‌کارگیری روش‌های خاکورزی حفاظتی و تناوب زراعی می‌تواند به کاهش فرسایش خاک و بهبود ساختار آن کمک کند (میرزایی و همکاران،۱۴۰۰: ۱۹۰). جهت مدیریت پایدار خاک اقداماتی لازم است از جمله: پذیرش کشاورزی حفاظتی: این شامل اقداماتی است که اختلال خاک را به حداقل می رساند و پوشش خاک را حفظ می کند، که می تواند سلامت و بهره وری خاک را افزایش دهد (Renshu et al., 2024). اجرای فن آوری های نوآورانه: استفاده از کشاورزی دقیق و نانومواد می تواند استفاده از منابع را بهینه کرده و نتایج مدیریت خاک را بهبود بخشد (Futa et al,2024). مشارکت جامعه و آموزش: افزایش آگاهی در مورد اهمیت سلامت خاک و مشارکت دانش محلی در طرح های SSM می تواند نرخ پذیرش را افزایش دهد (Sharna et al,2023).

110 sustainable soil management

ذینفعان مدیریت پایدار خاک(SSM) :

ذینفعان مدیریت پایدار خاک شامل افراد، گروه‌ها و سازمان‌هایی هستند که از نتایج و تصمیمات مرتبط با مدیریت خاک تأثیر می‌پذیرند یا می‌توانند بر آن تأثیر بگذارند. ذینفعان مدیریت پایدار خاک (SSM) طیف وسیعی از ذینفعان، از جمله کشاورزان، سیاستگذاران، سازمان‌های زیست‌محیطی و جامعه وسیع‌تر وابسته به خدمات اکوسیستم را در بر می‌گیرند. این گروه ها باید اقدامات خاصی را برای تضمین پایداری منابع خاک، که برای امنیت غذایی و سلامت محیط زیست حیاتی هستند، اتخاذ کنند. کشاورزان: آنها برای تولید محصول مستقیماً به سلامت خاک وابسته هستند و باید اقداماتی مانند کوددهی ارگانیک، تناوب زراعی متنوع و خاکورزی حفاظتی را برای افزایش کیفیت خاک اجرا کنند. آنها به طور مستقیم از مدیریت پایدار خاک بهره می‌برند، زیرا این مدیریت به حفظ کیفیت خاک و افزایش بهره‌وری کشاورزی کمک می‌کند (Strauss et al,2023). سیاستگذاران: آن‌ها در تدوین و اجرای سیاست‌های مرتبط با مدیریت خاک و محیط زیست نقش دارند و از نتایج آن تأثیر می‌پذیرند و نقش مهمی در ایجاد چارچوب هایی دارند که از شیوه های پایدار حمایت می کند و کشاورزان را تشویق می کند تا تکنیک های SSM را اتخاذ کنند (Renshu et al., 2024). سازمان‌های زیست‌محیطی: این گروه‌ها از حفظ و احیای خاک حمایت می‌کنند و بر اهمیت خاک‌های سالم در مبارزه با تغییرات اقلیمی و ارتقای تنوع زیستی تأکید می‌کنند (Rathore & Joshi, 2024). سازمان‌های تحقیقاتی و آموزشی: این سازمان‌ها در توسعه و ترویج روش‌های مدیریت پایدار خاک نقش دارند و به عنوان ذینفعان در این زمینه محسوب می‌شوند. جوامع محلی: جوامع اطراف مناطق کشاورزی از مزایای مدیریت پایدار خاک مانند امنیت غذایی و حفاظت از محیط زیست بهره می‌برند. صنایع وابسته به کشاورزی: صنایع غذایی و سایر صنایع که به محصولات کشاورزی وابسته هستند، از مدیریت پایدار خاک سود می‌برند (Rathore & Joshi, 2024).



شکل۱. بهره‌برداران و ذی‌نفعان موثر در مدیریت خاک

منبع: Rathore & Joshi, 2024; Renshu et al., 2024; Strauss et al,2023

نقش بهره‌برداران در مدیریت خاک

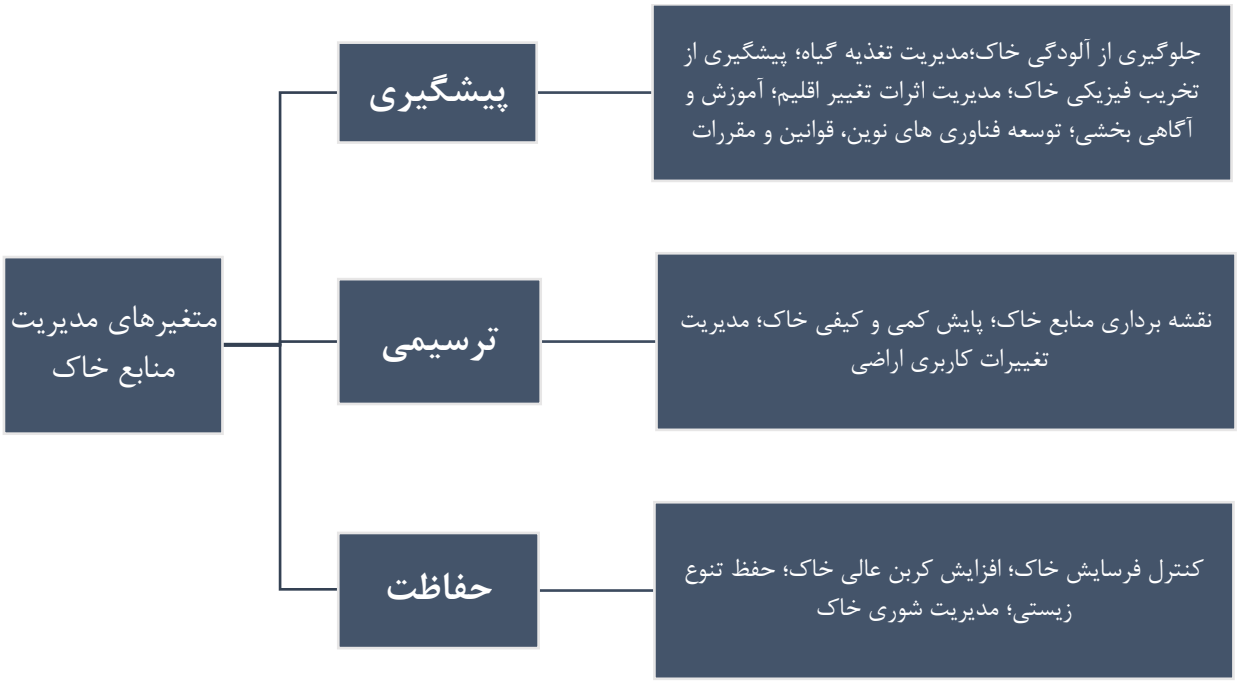
بهره‌برداران در مدیریت خاک نقش کلیدی در بخش‌های حفاظت، ترسیمی و پیشگیری دارند. اقدامات حفاظتی مانند تثبیت خاک و مالچ‌پاشی به‌عنوان روش‌های مؤثر در این زمینه شناخته می‌شوند. در وهله اول، بهره‌برداران باید با روش‌های مدیریت پایدار خاک آشنا شوند. آموزش‌های لازم در زمینه تکنیک‌های حفاظت از خاک، مانند مالچ‌پاشی و تثبیت خاک، می‌تواند به افزایش آگاهی آنان کمک کند (گرجی،۱۴۰۰: ۳). مشارکت بهره‌برداران در فرآیندهای تصمیم‌گیری مرتبط با مدیریت آب و خاک بسیار ضروری است. این مشارکت می‌تواند شامل ارائه نظرات و تجربیات آنان در زمینه‌های مختلف باشد که به بهبود روش‌های مدیریتی کمک می‌کند (مؤسسه تحقیقات خاک و آب،۱۳۹۴). بهره‌برداران باید اقداماتی مانند تثبیت خاک، مالچ‌پاشی و استفاده از پوشش‌های گیاهی را در مزارع خود پیاده‌سازی کنند. این اقدامات به کاهش فرسایش خاک و حفظ رطوبت کمک می‌کند (زارع و همکاران،۱۴۰۲: ۵). چند نمونه از اقدامات حفاظتی در ادامه آورده شده است: تثبیت خاک: این عمل معمولاً با استفاده از گیاهان پوششی یا مصالح دیگر انجام می‌شود تا از فرسایش خاک جلوگیری کند. تثبیت خاک می‌تواند به حفظ ساختار خاک و افزایش کیفیت آن کمک کند (گرجی،۱۴۰۰: ۴). مالچ‌پاشی: استفاده از مالچ (پوشش سطحی) بر روی خاک به منظور کاهش تبخیر آب، کنترل علف‌های هرز، و حفظ رطوبت خاک انجام می‌شود. این روش

همچنین به بهبود کیفیت خاک و کاهش فرسایش کمک می‌کند (موسسه تحقیقات خاک و آب کشور). مدیریت پوشش گیاهی: حفظ و افزایش پوشش گیاهی در زمین‌های کشاورزی می‌تواند به تثبیت خاک و جلوگیری از فرسایش کمک کند. این کار همچنین باعث افزایش تنوع زیستی و حفظ اکوسیستم‌های محلی می‌شود (مؤسسه تحقیقات خاک و آب،۱۳۹۴). کاهش خاک‌ورزی: کاهش میزان خاک‌ورزی و دست خوردگی خاک می‌تواند به حفظ ساختار طبیعی آن کمک کند و از تخریب آن جلوگیری نماید (گرجی،۱۴۰۰: ۴).

اقدامات ترسیمی مانند کشت علوفه و سایر روش‌های کشاورزی می‌توانند تأثیرات مثبتی بر روی کیفیت خاک و بهره‌وری آن داشته باشند. بهره‌برداران با کشت علوفه می‌توانند از فرسایش خاک جلوگیری کنند و به حفظ رطوبت خاک کمک نمایند. علوفه‌ها به عنوان پوشش گیاهی عمل کرده و از خاک در برابر عوامل جوی محافظت می‌کنند. بهره‌برداران باید با روش‌های کشاورزی حفاظتی آشنا شوند که شامل کاهش خاک‌ورزی، تناوب زراعی، و استفاده از گیاهان پوششی است. این تکنیک‌ها به حفظ ساختار خاک و افزایش حاصلخیزی آن کمک می‌کنند. بهره‌برداران همچنین باید در دوره‌های آموزشی شرکت کنند تا با روش‌های نوین مدیریت خاک آشنا شوند و بتوانند بهترین شیوه‌ها را در مزارع خود پیاده‌سازی کنند. بهره‌برداران باید در مدیریت منابع آب نیز فعال باشند، زیرا آب و خاک دو عنصر حیاتی برای تولید محصولات کشاورزی هستند. همکاری با نهادهای محلی برای بهبود سیستم‌های آبیاری و زهکشی می‌تواند تأثیر زیادی بر روی کیفیت خاک داشته باشد (مؤسسه تحقیقات خاک و آب،۱۳۹۴). برخی از اقدامات ترسیمی عبارتند از: کشت علوفه: کشت علوفه به عنوان یک روش ترسیمی می‌تواند به تثبیت خاک، جلوگیری از فرسایش، و افزایش تنوع زیستی کمک کند. علوفه‌ها علاوه بر تأمین غذای دام، باعث افزایش ماده آلی در خاک نیز می‌شوند. استفاده از پوشش‌های گیاهی: ایجاد پوشش‌های گیاهی مناسب بر روی زمین‌های کشاورزی می‌تواند به حفظ رطوبت و کاهش تبخیر کمک کند. این کار همچنین باعث کاهش دما و حفظ اکوسیستم‌های محلی می‌شود. تناوب زراعی: اجرای تناوب زراعی مناسب می‌تواند به حفظ حاصلخیزی خاک کمک کند و از بروز آفات و بیماری‌ها جلوگیری نماید. این روش به تنوع کشت و استفاده بهینه از منابع آب نیز کمک می‌کند. کاهش خاک‌ورزی: کاهش میزان خاک‌ورزی منجر به حفظ ساختار طبیعی خاک شده و از تخریب آن جلوگیری می‌کند. این کار همچنین به افزایش ذخیره رطوبت در خاک کمک می‌کند (بلالی و همکاران،۱۴۰۳).

بهره‌برداران در مدیریت خاک نقش اساسی در پیشگیری از آلودگی و فرسایش خاک ایفا می‌کنند. برخی از اقدامات پیشگیرانه در این زمینه عبارتند از: تناوب زراعی: این روش شامل کشت انواع مختلف گیاهان در یک زمین در دوره‌های زمانی متفاوت است. این کار به جلوگیری از کاهش حاصلخیزی خاک، کنترل آفات، و کاهش نیاز به کودهای شیمیایی کمک می‌کند. خارج کردن اراضی شیب‌دار از کشت محصولات سالانه: اراضی با شیب زیاد مستعد فرسایش هستند. خارج کردن این اراضی از چرخه کشت محصولات سالانه می‌تواند به کاهش فرسایش خاک و حفظ رطوبت آن کمک کند (بلالی و همکاران،۱۴۰۳).

کشت گیاهان پوششی: استفاده از گیاهان پوششی در فصول غیرزراعی می‌تواند به تثبیت خاک، جلوگیری از فرسایش، و حفظ رطوبت کمک کند. این گیاهان همچنین می‌توانند مواد مغذی را به خاک برگردانند (کریمی،۱۳۸۶: ۴). مدیریت آب: استفاده از سیستم‌های آبیاری مناسب و کنترل مصرف آب می‌تواند به کاهش آلودگی خاک ناشی از شستشوی مواد شیمیایی کمک کند. همچنین، جمع‌آوری آب باران و استفاده مجدد از آن نیز مؤثر است.ذآموزش و افزایش آگاهی: برگزاری دوره‌های آموزشی برای بهره‌برداران درباره اهمیت حفاظت از خاک و روش‌های پیشگیری از آلودگی ضروری است. این آموزش‌ها می‌توانند شامل کارگاه‌ها، سمینارها، و انتشار مطالب آموزشی باشند (بلالی و همکاران،۱۴۰۳). در زیر متغیرهای مربوط به مدیریت منابع خاک توسط بهره‌برداران در بخش‌های مختلف نشان داده شده است.



شکل ۲. متغیرهای مدیریت منابع خاک

منابع: موسسه تحقیقات خاک و آب کشور؛ صادق‌مزیدی و وصالی،۱۳۸۷؛ میرزایی و همکاران،۱۳۸۷؛ اسدی و همکاران،۱۴۰۱

روش پژوهش

تحقیق حاضر به لحاظ هدف، کاربردی و ازلحاظ ماهیت و روش، توصیفی – تحلیلی پیمایشی می‌باشد. اطلاعات و داده‌های موردنیاز از طریق روش کتابخانه‌ای و میدانی جمع‌آوری‌شده است. در شیوه کتابخانه‌ای ابتدا به‌منظور بررسی سوابق و

پیشینه موضوع و تبیین چارچوب نظری – مفهومی پژوهش، کتب مقالات و پایان‌نامه‌های موجود موردمطالعه قرارگرفته است. در مطالعات میدانی نیز با استفاده از مشاهده ، مراجعه به سازمان‌ها و ادارات، داده‌های موردنیاز تحقیق جمع‌آوری می‌شود. .... در تنظیم اطلاعات و محاسبات در این پژوهش از ابزارها و تکنیک‌های جغرافیایی، نرم‌افزار GIS و روش بهترین-بدترین (Best-Worst method)استفاده‌شده است.

روش بهترین-بدترین (Best-Worst method)

روش بهترین بدترین (BWM). در روشهای تصمیم گیری چند شاخصه، تعدادی گزینه با توجه به تعدادی شاخص ارزیابی می شود تا بهترین گزینه انتخاب شود. بر اساس روش بهترین بدترین که توسط رضایی (۲۰۱۵)، ارائه شده است، بهترین و بدترین شاخص توسط تصمیم گیرنده مشخص می شود و مقایسه زوجی بین هر یک از این دو شاخص (بهترین و بدترین) و دیگر شاخص ها صورت می گیرد؛ سپس یک مسئله حداکثر حداقل برای مشخص کردن وزن شاخصهای مختلف فرموله و حل می شود؛ همچنین در این روش فرمولی برای محاسبه نرخ ناسازگاری به منظور بررسی اعتبار مقایسات در نظر گرفته شده است. ازجمله ویژگی های برجسته این روش نسبت به سایر روش های تصمیم گیری چند شاخصه عبارت است از:

به داده های مقایسه ای کمتر نیاز دارد؛

این روش به مقایسهای استوارتر منجر می شود؛ بدین معنا که جوابهای قابل اطمینان‌تری میدهد.

روش بهترین بدترین فازی (Fuzzy Best-Worst Method)

این روش اولین بار توسط جو و ژائو (۲۰۱۷) ارائه شد الگوریتم آن شبیه روش بهترین-بدترین قطعی می‌باشد. استفاده از اعداد فازی به علت وجود ابهامات کلامی پاسخ دهندگان باعث دقت بیشتر و نتیجه بهتر در محاسبات می‌شود. گام‌های این روش در زیر آورده شده است:

فرض کنید که n معیار وجود داشته باشد مقایسات زوجی این n معیار از طریق عبارات کلامی موجود در جدول ۱ با یکدیگر مقایسه می‌شوند یعنی عبارات کلامی پاسخ دهندگان بر اساس جدول ۱ به اعداد فازی متناظر تبدیل می‌شود.

جدول ۱۵: عبارات کلامی و اعداد فازی متناظر جو و ژائو (۲۰۱۷)

عبارات کلامی	عدد فازی
اهمیت برابر	(۱,۱,۱)
اهمیت کم	(۰.۶۷,۱,۱.۵)
نسبتاً مهم	(۱.۵,۲,۲.۵)
خیلی مهم	(۲.۵,۳,۳.۵)
کاملا مهم	(۳.۵,۴,۴.۵)

گام اول – ایجاد سیستم تصمیم معیارها

در این گام معیارهای پژوهش که قصد مقایسه آن‌ها را داریم استخراج می‌کنیم که شامل n معیار جهت ارزیابی می‌باشند.

گام دوم – تعیین بهترین (با اهمیت‌ترین) معیار و بدترین (کم اهمیت‌ترین) معیار

در این گام باید با اهمیت ترین معیار و کم اهمیت ترین معیار به عنوان بهترین و بدترین معیار تعیین شوند که می‌توان از نظرات خبرگان، تشکیل جلسات گروهی و یا روشهایی نظیر دلفی حاصل شود. بهترین معیار را با CB و بدترین معیار را با CW می‌دهیم.

گام سوم – مقایسه زوجی بهترین معیار با دیگر معیارها

در این گام با استفاده از جدول ۱ مقایسه aij باید تعیین شود i بهترین معیار است یعنی CB و j دیگر معیارها است. مقایسه بهترین معیار با بدترین معیار باید همیشه بیشترین عدد نسبت به بقیه باشد. همچنین مقایسه زوجی aBB برابر (۱،۱،۱) است. در حالت کلی مقایسه به صورت زیر است:

رابطه ۱ :

$$\tilde{A}_B = (\tilde{a}_{B1}, \tilde{a}_{B2}, \dots, \tilde{a}_{B3})$$

گام چهارم – مقایسه زوجی دیگر معیارها با معیار بدترین

در این گام نیز همانند گام سوم دیگر معیارها بر اساس جدول ۱ با معیار بدترین مقایسه می‌شوند. مقایسه زوجی که در این گام بررسی می‌شوند به صورت a1B است. . همچنین مقایسه زوجی aww برابر (۱،۱،۱) است. در حالت کلی مقایسه به صورت زیر است:

رابطه ۲:

$$\tilde{A}_w = (\tilde{a}_{1w}, \tilde{a}_{2w}, \dots, \tilde{a}_{3w})$$

گام پنجم – تعیین وزن‌های بهینه $(\widetilde{W_1}^*, \widetilde{W_2}^*, \dots, \widetilde{W_n}^*)$

وزن بهینه برای معیار ها ، وزنی که در آن ، برای هر زوج $\frac{\tilde{w}_b}{\tilde{w}_j}$ و $\frac{\tilde{w}_j}{\tilde{w}_w}$، رابطه ذیل برقرار باشد.

رابطه ۳ :

$$\frac{\tilde{w}_b}{\tilde{w}_j} = \tilde{a}_{Bj} \quad \text{و} \quad \frac{\tilde{w}_j}{\tilde{w}_w} = \tilde{a}_{jw}$$

برای برقرار این شرایط برای تمامی j ها ، باید راه حلی را بیابیم که در آن حداکثر تفاوت های مطلق یعنی $\left|\frac{\widetilde{w}_b}{\widetilde{w}_j}-\right|$ و $|\tilde{a}_{Bj}|$ و $|\frac{\widetilde{w}_j}{\widetilde{w}_w}-\tilde{a}_{jw}|$ برای تمامی j ها حداقل باشد.

با در نظر گرفتن منفی نبودن مقایر و شرایط جمع اوزان ، مسئله ذیل حاصل می گردد.

$$\min \max J \{|\frac{\widetilde{w}_b}{\widetilde{w}_j}-\tilde{a}_{Bj}|,|\frac{\widetilde{w}_j}{\widetilde{w}_w}-\tilde{a}_{jw}|\}$$

s.t.

رابطه ۴ :

$$= 1 \sum_j R(\widetilde{w}_j)$$

$$l_j^w \le m_j^w \le u_j^w \quad , \quad l_j^w \ge 0$$ ها j برای تمام

که در این رابطه $R(\tilde{a}_i)=\frac{l_i+4m_i+u_i}{6}$ است.

مسئله مدل رابطه را می تواند به مسئله ذیل تبدیل گردد.

$$\min \tilde{\xi}$$

s.t.

$|\frac{\widetilde{w}_b}{\widetilde{w}_j}-\tilde{a}_{Bj}| \le \tilde{a}$ برای تمامی jها

رابطه ۵: $|\frac{w_j}{w_w}-\tilde{a}_{jw}| \le \tilde{a}$ ها j برای تمامی

$$= 1 \sum_j R(\widetilde{w}_j)$$

$$l_j^w \le m_j^w \le u_j^w \quad , \quad l_j^w \ge 0$$

Wj ≥ 0, for all j

ها j برای تمامی

با حل مسئله فوق ، اوزان بهینه $(\widetilde{W_1}^*, \widetilde{W_2}^*, \dots, \widetilde{W_n}^*)$ و $\tilde{\xi}^*$ به دست می آیند.

در ادامه با استفاده از $\tilde{\xi}^*$، نسبت سازگاری را معرفی می نمائیم. هرچه که مقدار $\tilde{\xi}^*$ بزرگتر باشد، مقدار نسبت سازگاری بالاتر رفته و مقایسات از قابلیت اطمینان کمتری برخوردارهستند.

گام ششم – نرخ ناسازگاری

مقایسه زمانی به صورت کامل سازگار است که رابطه ذیل برای تمامی j ها برقرار باشد.

aBW = aBj ×ajw که در آن aBj، ajw و aBw به ترتیب اولویت های بهترین معیار نسبت به معیار j ، اولویت معیار j نسبت به بدترین معیار، و اولویت بهترین معیار نسبت به بدترین معیار خواهند بود. از آنجاییکه aBW = aBj ×ajw و $a_{BW} \in \{1,2,3,\dots,9\}$ است، می توان حداکثر مقدار $\tilde{\xi}$ را به دست آورد. با استفاده از شاخص سازگاری جدول زیر و رابطه آن مقدار نرخ سازگاری را محاسبه کرد. این نرخ سازگاری در بازه [1 0] قرار می‌گیرد و هر چه به صفر نزدیکتر باشد مقایسات از سازگاری و ثبات بیشتری برخوردارند و هر چه به یک نزدیکتر باشد مقایسات از سازگاری و ثبات کمتری برخوردارند.

جدول۲: شاخص سازگاری روش BWM فازی

aBw	اهمیت برابر	اهمیت کم	نسبتاً مهم	خیلی مهم	کاملا مهم
	(۱,۱,۱)	(۰.۶۷,۱,۱.۵)	(۱.۵,۲,۲.۵)	(۲.۵,۳,۳.۵)	(۳.۵,۴,۴.۵)
شاخص سازگاری	۳	۳.۸	۵.۲۹	۶.۶۹	۸.۰۴

نرخ سازگاری= $\frac{\xi^*}{\text{شاخص سازگاری}}$

روش بهترین بدترین فازی

در این بخش از روش بهترین بدترین فازی جهت وزن‌دهی و اولویت‌بندی به عوامل پژوهش استفاده می‌شود.

جدول ۳: معرفی عوامل پژوهش

ردیف	معرفی عوامل پژوهش
۱	مصرف آب(C1)
۲	مالیات و هزینه(C2)
۳	حفاظت از خاک(C3)
۴	حفاظت از جنگل(C4)
۵	کاهش آلودگی(C5)
۶	توسعه پایدار(C6)
۷	مدیریت زباله(C7)
۸	ارزیابی اثرات محیطی(C8)

منبع: یافته های پژوهش،۱۴۰۴

تعیین با اهمیت‌ترین و کم اهمیت‌ترین شاخص‌ها

در اولین گام روش بهترین بدترین باید با اهمیت‌ترین (بهترین) و کم‌اهمیت‌ترین (بدترین) شاخص مشخص شود در این پژوهش با استفاده از نظرات خبرگان پژوهش با اهمیت‌ترین (بهترین) و کم‌اهمیت‌ترین (بدترین) شاخص مشخص شدند که بهترین معیار C1 و بدترین معیار C2 انتخاب شدند.

تشکیل مقایسات زوجی

در این قسمت مقایسات زوجی بهترین معیار نسب به دیگر معیارها (BO) و دیگر معیارها نسبت به بدترین معیار (OW) انجام می‌شود که در این پژوهش ابتدا مقایسات زوجی تشکیل و در اختیار ۳ نفر از خبرگان قرار داده شد تا بر اساس طیف ۵ تایی فازی، میزان ارجحیت در مقایسات زوجی را مشخص کنند بعد از پاسخگویی، مقایسات زوجی با روش میانگین هندسی ادغام شدند که در جدول ۴ آورده شده است.

جدول۴: مقایسه زوجی معیارها

		C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
C1	بهترین معیار	(۱.۴۱۳,۱.۸۸۸,۲.۴۱۴)	(۱,۱.۳۲,۱.۶۹۷)	(۳.۰۵۹,۳.۵۶۵,۴.۰۷)	(۱.۳۳۱,۱.۷۸۳,۲.۳۳۲)	(۱.۰۲۲,۱.۴۳۱,۱.۹۶۸)	(۱,۱,۱)	(۱.۰۲۲,۱.۴۳۱,۱.۹۶۸)	(۱.۰۸۵,۱.۵۱۶,۲.۰۳۸)
C2	بدترین میعار	(۰.۹۴۲,۱.۲۴۶,۱.۶۳۹)	(۱.۲۰۱,۱.۶۴۴,۲.۱۸)	(۱,۱,۱)	(۰.۷۸۴,۱,۱.۲۷۵)	(۰.۸۵۱,۱.۱۴۹,۱.۵۳۲)	(۳.۰۵۹,۳.۵۶۵,۴.۰۷)	(۱,۱.۳۲,۱.۶۹۷)	(۰.۷۲۳,۱,۱.۳۸۳)

منبع: یافته های پژوهش،۱۴۰۴

محاسبه وزن معیارها

در این گام با استفاده رابطه ۵ مدل بهینه سازی غیرخطی مساله را تشکیل خواهیم داد اما جو و ژائو (۲۰۱۷) بیان کردند که در مدل‌های دارای سه معیار یا بیشتر بهتر است مدل به خطی تبدیل شود. بنابراین مدل خطی روش BWM فازی تشکیل شد و توسط نرم افزار Lingo 17 حل گردید و اوزان معیارها حاصل شد که در جدول ۵ آورده شده است.

جدول۵: وزن و رتبه نهایی معیارهای اصلی

معیار	وزن فازی	وزن قطعی	رتبه
C1	(۰.۰۸۵۲,۰.۱۱۷۸,۰.۱۴۴۲)	۰.۱۱۶۸	۴
C2	(۰.۱۳۵۸,۰.۱۴۴۵,۰.۱۸۰۵)	۰.۱۴۹۱	۲
C3	(۰.۰۶۷۱,۰.۰۶۷۱,۰.۰۷۹۴)	۰.۰۶۹۲	۸
C4	(۰.۱۰۱۳,۰.۱۰۱۳,۰.۱۱۹۸)	۰.۱۰۴۴	۷
C5	(۰.۱۰۸,۰.۱۱۱۳,۰.۱۳۷)	۰.۱۱۵۰	۵
C6	(۰.۲۰۲۵,۰.۲۰۵۱,۰.۲۴۹۲)	۰.۲۱۲۰	۱
C7	(۰.۱۱۹۸,۰.۱۲۲۸,۰.۱۴۸۱)	۰.۱۲۶۵	۳
C8	(۰.۰۹۷۸,۰.۱۰۱۳,۰.۱۲۷)	۰.۱۰۵۰	۶

منبع: یافته های پژوهش،۱۴۰۴

در جدول۵ وزن فازی مستقیما از حل مدل در نرم افزار Lingo حاصل شده است سپس این اوزان فازی توسط رابطه $R(\tilde{a}_i)=\frac{l_i+4m_i+u_i}{6}$ تبدیل به وزن قطعی شده است. به عنوان مثال وزن فازی معیار C1 به صورت (۰.۰۸۵۲,۰.۱۱۷۸,۰.۱۴۴۲) است که وزن قطعی آن برابر با $\frac{0.0852+4*0.1178+0.1442}{6}=0.1168$ می‌شود.

محاسبه نرخ ناسازگاری

در این بخش به محاسبه نرخ ناسازگاری مقایسات زوجی پژوهش پرداخته می‌شود ابتدا با استفاده از رابطه با حل یک معادله درجه دو برای هر جدول مقایسه زوجی مقدار مجهول ξ را محاسبه می‌کنیم که همان شاخص سازگاری است سپس مقدار بهینه تابع هدف ($\tilde{\xi}$*) هر مدل خطی برای جداول مقایسه زوجی را بر این مقدار شاخص سازگاری تقسیم می‌کنیم تا نرخ ناسازگاری حاصل شود به بیان ریاضی نرخ ناسازگاری برابر است با: $\frac{\tilde{\xi}^*}{\xi}$. هر چه نرخ ناسازگاری به صفر نزدیکتر باشد نشان از سازگارتر بودن مقایسه زوجی است. این نرخ در جدول آورده شده است.

جدول۶: نرخ ناسازگاری مقایسات زوجی

Ξ	$\tilde{\xi}$*	نرخ ناسازگاری
۷.۴۶۷	۰.۵۱	۰.۰۶۸

منبع: یافته های پژوهش،۱۴۰۴

بحث و نتیجه گیری

ارزیابی نقش عملکردی بهره‌برداران در مدیریت منابع سرزمینی، امری پیچیده و چندوجهی است که نیازمند بررسی دقیق عوامل مختلف اجتماعی، اقتصادی و زیست‌محیطی است. نتایج این ارزیابی‌ها نشان می‌دهند که بهره‌برداران، نقش کلیدی در حفاظت و بهره‌برداری پایدار از منابع دارند. مشارکت فعال و آگاهانه‌ی آنان در برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری، کلید موفقیت در مدیریت پایدار منابع سرزمینی است. با این حال، این مشارکت باید مبتنی بر عدالت، شفافیت و دسترسی برابر به منابع باشد. عوامل اقتصادی مانند قیمت محصولات کشاورزی و دسترسی به بازار، به‌طور مستقیم بر شیوه‌های بهره‌برداری و میزان مشارکت بهره‌برداران تأثیر می‌گذارند. همچنین، سطح دانش و آگاهی بهره‌برداران در مورد روش‌های پایدار مدیریت منابع، نقش مهمی در موفقیت این فرآیند ایفا می‌کند. آموزش و ترویج روش‌های نوین و سازگار با محیط زیست، ضروری است. علاوه بر این، وجود زیرساخت‌ها و حمایت‌های دولتی، دسترسی به اعتبار و بیمه، نقش مهمی در تشویق بهره‌برداران به مشارکت فعال و پایدار دارند. عدم وجود این موارد می‌تواند منجر به تخریب منابع و بهره‌برداری غیرپایدار شود. در

نهایت، ارزیابی نقش عملکردی بهره‌برداران باید فرایندی مداوم و پویا باشد که به‌طور مستمر مورد بررسی و بازنگری قرار گیرد تا بتوان با توجه به تغییرات شرایط، استراتژی‌های مدیریتی را اصلاح و بهبود بخشید. حفظ تعادل بین نیازهای اقتصادی بهره‌برداران و حفاظت از منابع، چالش اصلی در این زمینه است. راهکارهای مناسب، شامل طراحی سیاست‌های حمایتی مناسب، ایجاد انگیزه‌های اقتصادی و اجتماعی برای بهره‌برداری پایدار، و تقویت نهادهای محلی و مشارکتی در مدیریت منابع سرزمینی هستند. ارتقای آگاهی عمومی و مشارکت جوامع محلی، امری اساسی برای دستیابی به مدیریت پایدار منابع سرزمینی است. بدون مشارکت فعال و آگاهانه‌ی بهره‌برداران، تلاش‌های حفاظتی و توسعه‌ای با چالش‌های جدی روبرو خواهند شد. نتیجه گیری کلی نشان می دهد که یک رویکرد مشارکتی و یکپارچه، با در نظر گرفتن نیازهای همه ذینفعان، برای تضمین مدیریت پایدار منابع سرزمینی ضروری است. این رویکرد مستلزم همکاری میان بهره برداران، دولت، سازمان های غیر دولتی و دیگر ذینفعان می باشد. در نهایت، موفقیت در مدیریت پایدار منابع سرزمینی به میزان مشارکت فعال و مسئولانه بهره‌برداران بستگی دارد. هدف پژوهش حاضر برر سی ارزیابی نقش عملکردی بهره وران در مدیریت منابع سرزمینی می باشد. این پژوهش ازنظر هدف، کاربردی - نظری و ازنظر روش، توصیفی– تحلیلی است. اطلاعات و داده های موردنیاز از طریق روش کتابخانه ای و میدانی جمع آوری شده است. در این پژوهش از روش روش بهترین-بدترین (Best-Worst method)نتایج پژوهش نشان می دهد که در این پژوهش ۸ معیار را به کار بردیم. در این قسمت مقایسات زوجی بهترین معیار نسب به دیگر معیارها (BO) و دیگر معیارها نسبت به بدترین معیار (OW) انجام می‌شود که در این پژوهش ابتدا مقایسات زوجی تشکیل و در اختیار ۳ نفر از خبرگان قرار داده شد تا بر اساس طیف ۵ تایی فازی، میزان ارجحیت در مقایسات زوجی را مشخص کنند بعد از پاسخگویی، مقایسات زوجی با روش میانگین هندسی ادغام شدند. در این گام با استفاده رابطه ۷ مدل بهینه سازی غیرخطی مساله را تشکیل خواهیم داد اما جو و ژائو (۲۰۱۷) بیان کردند که در مدل‌های دارای سه معیار یا بیشتر بهتر است مدل به خطی تبدیل شود. بنابراین مدل خطی روش BWM فازی تشکیل شد و توسط نرم افزار Lingo 17 حل گردید و اوزان معیارها حاصل شد. در این بخش به محاسبه نرخ ناسازگاری مقایسات زوجی پژوهش پرداخته می‌شود ابتدا با استفاده از رابطه ۸ با حل یک معادله درجه دو برای هر جدول مقایسه زوجی مقدار مجهول ξ را محاسبه می‌کنیم که همان شاخص سازگاری است سپس مقدار بهینه تابع هدف ($\tilde{\xi}^*$) هر مدل خطی برای جداول مقایسه زوجی را بر این مقدار شاخص سازگاری تقسیم می‌کنیم تا نرخ ناسازگاری حاصل شود به بیان ریاضی نرخ ناسازگاری برابر است با: $\frac{\tilde{\xi}^*}{\xi}$. هر چه نرخ ناسازگاری به صفر نزدیکتر باشد نشان از سازگارتر بودن مقایسه زوجی است.

منابع

اسدی، حسین؛ بشارتی، حسین؛ گرجی، منوچهر (۱۴۰۱). چالش‌ها و محدودیت‌های منابع خاک و اراضی در ایران، دو فصلنامه مدیریت اراضی، دوره ۱۰، شماره ۱، صص. ۱۳۴-۱۱۱.

بذرافشان، جواد؛ طولابی‌نژاد، مهرشاد؛ صادقی، خدیجه (۱۳۹۶). تحلیل رابطه مدیریت پایدار زمین و عملکرد محصولات کشاورزی و اثرات آن در امنیت غذایی خانوارهای روستایی، فصلنامه پژوهش‌های روستایی، دوره ۸، شماره ۲، صص. ۳۶۳-۳۴۶.

لالی، محمدرضا؛ ملاح، سینا؛ افتخاری، کامران؛ رضایی، حامد؛ بازرگان، کامبیز؛ نانجیا، وینای؛ مشیری، فرهاد، پناهی، مهدی؛ سپهوند، مراد؛ موموندی، عبدالله؛ قنبرپوری، مرادعلی؛ عبدی؛ صمد؛ متین‌کیا، معصومه؛ سپهوند، مهناز؛ عزیزاللهی، مراد (۱۴۰۳). مدیریت یکپارچه خاک و آب در مقیاس مزرعه در زیر حوضه هنام (قسمت دوم: بسته‌های مدیریتی واحدهای همگن خاک و آب). پژوهش های خاک, ۳۸(۱), ۲۵-۴۲ .doi: ۲۰۲۴.۳۶۵۳۶۸.۷۴۱/ijsr.۱۰.۲۲۰۹۲

زارع، سعید؛ تشکریان جهرمی، زهرا؛ شادکام، سارا (۱۴۰۲). مروری بر تاثیر حفاظت و بهره برداری پایدار از منابع آب و خاک در توسعه کشاورزی و کیفیت زندگی روستایی،سومین کنفرانس بین المللی و هفتمین کنفرانس ملی کشاورزی ارگانیک و مرسوم، اردبیل، https://civilica.com/doc/1775687

سامیان، مسعود و خلیلی، محمد (۱۳۹۱). نقش بهره برداران کشاورزی در مدیریت پایدار منابع طبیعی با تاکید بر محیط زیست (مطالعه موردی در شهرستان همدان)،دومین کنفرانس برنامه ریزی و مدیریت محیط زیست، تهران، https://civilica.com/doc/147668

کریمی، سعید (۱۳۸۶). ارزیابی نگرش بهره برداران کشور نسبت به حفاظت از منابع آب و خاک،دهمین کنگره علوم خاک ایران،کرج،https://civilica.com/doc/24640

گرجی، منوچهر(۱۴۰۰). نقش حفاظت و مدیریت پایدار خاک در افزایش بهره وری آب و حفظ کمیت و کیفیت آن،هفدهمین کنگره علوم خاک ایران و چهارمین همایش ملی مدیریت آب در مزرعه تجدید حیات حکیمانه خاک و حکمروائی حکیمانه آب،کرج،https://civilica.com/doc/1312209

صادق مزیدی، حسین، و وصالی، سیدعلی. (۱۳۸۷). کشاورزی پایدار با مدیریت منابع خاک. همایش منطقه ای کشاورزی، محور رشد و توسعه. https://sid.ir/paper/ SID. ۸۱۳۹۷۰fa/

محمدرضایی، مریم و راهدان، عباس (۱۴۰۰). مبانی مدیریت پایدار خاک و حفاظت آن در یک مفهوم جهانی در قرن ۲۱،پنجمین کنگره بین المللی توسعه کشاورزی، منابع طبیعی، محیط زیست و گردشگری ایران،تبریز،https://civilica.com/doc/1276314

محمدی، سیما (۱۳۹۹). اهمیت مدیریت پایدار خاک در دستیابی به سلامت خاک،هفتمین همایش علمی پژوهشی توسعه و ترویج علوم کشاورزی و منابع طبیعی ایران،تهران،https://civilica.com/doc/1159461

مرادی‌نژاد، امیر(۱۳۹۸). بررسی مشارکت بهره‌برداران در مدیریت بهینه مصرف آب (مطالعه موردی: شبکه‌های آبیاری دشت قزوین)، مجله آب و توسعه‌پایدار، سال ششم، شماره ۱، صص. ۹۴-۸۵.

موسسه تحقیقات خاک و آب کشور برگرفته شده از سایت: http://www.swri.ir/fa-IR/douranportal/5156/page

مؤسسه تحقیقات خاک و آب (۱۳۹۴). بهره‌برداری از منابع خاک و آب، انتشارات سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی، جهاد کشاورزی.

میرزایی، آرزو، موسوی، سهیلاسادات، و طاهریان، سپیده. (۱۳۸۷). مدیریت پایدار خاک در قرن ۲۱. همایش منطقه ای کشاورزی، محور رشد و توسعه. https://sid.ir/paper/۸۰۸۸۹۱SID. /fa

میرزایی، مراد؛ گرجی، منوچهر؛ مقیسه، ابراهیم؛ اسدی، حسین؛ رضوی‌طوسی، احسان (۱۴۰۰). مدیریت پایدار خاک و نقش آن در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، دو فصلنامه مدیریت اراضی، دوره ۹، شماره ۲، صص. ۲۰۴-۱۸۷.

نهاد مشارکت جهانی خاک، سازمان خوار و بار جهانی(FAO). (۲۰۱۷). دستورالعمل داوطلبانه برای مدیریت پایدار خاک، ترجمه: علیرضا زاره‌مبارک (دفتر أمور آب و خاک کشاورزی)، وزارت جهاد کشاورزی، معاونت آب و خاک.

Coyle, C., Creamer, R. E., Schulte, R. P., O'Sullivan, L., & Jordan, P. (2016). A functional land management conceptual framework under soil drainage and land use scenarios. Environmental Science & Policy, 56, 39-48.

Dal Ferro, N., Camarotto, C., Piccoli, I., Berti, A., Mills, J., & Morari, F. (2020). Stakeholder perspectives to prevent soil organic matter decline in Northeastern Italy. Sustainability, 12(1), 378.

Davis, S., R. McCormick, and L. Ford. 2015. Bureau of Land Management Soil Resource Program Strategy: Focus on the Challenge, 2015-2020. U.S. Department of the Interior, Bureau of Land Management, Washington Office, Washington, DC.

Futa, B., Gmitrowicz-Iwan, J., Skersienė, A., Šlepetienė, A., & Parašotas, I. (2024). Innovative Soil Management Strategies for Sustainable Agriculture. Sustainability, 16(21), 9481.

Guo, S. and Zhao, H., 2017. Fuzzy best-worst multi-criteria decision-making method and its applications. Knowledge-Based Systems, 121, pp.23-31.

Hreshchuk, H. (2023). Land management mechanism in the system of land resource management: role and functions. Bulletin of Lviv National Environmental University. Series" AIC Economics, 30, 21-27.

O'Sullivan, L., Leeuwis, C., de Vries, L., Wall, D. P., Heidkroß, T., Madena, K., & Schulte, R. P. (2022). Trust versus content in multi-functional land management: Assessing soil function messaging in agricultural networks. Environmental management, 69(6), 1167-1185.

O'Sullivan, L., Wall, D., Creamer, R., Bampa, F., & Schulte, R. P. (2018). Functional Land Management: Bridging the Think-Do-Gap using a multi-stakeholder science policy interface. Ambio, 47, 216-230.

Rathore, B. S., & Joshi, D. (2024). Sustainable Soil Management Practices (pp. 40–50). https://doi.org/10.58532/nbennurch314

Renshu, R., Juneja, P., & Meenakshi, M. (2024). Examining The Role of Soil in Promoting Sustainable Development and Achieving the UN Sustainable Development Goals (SDGs). Shodh Sari, 03(03), 265–285. https://doi.org/10.59231/sari7734.

Rezaei, J., 2015. Best-worst multi-criteria decision-making method. Omega, 53, pp.49-57.

Santana, M. L. T., Faria, V. L. D., Barbosa, S. M., Serafim, M. E., Uezu, A., Silva, B. M., & Avanzi, J. C. (2023). Impacts of Land Use Changes on Soil Functions and Water Security: Insights from a Three-Year-Long Study in the Cantareira System, Southeast of Brazil. Sustainability, 15(18), 13395.

Sharna, S. C., Maraseni, T., & Radanielson, A. M. (2023). A global systematic literature review on sustainable soil management practices (1994–2022). Soil Use and Management, 39(4), 1267-1288.

Strauss, V., Paul, C., Dönmez, C., Löbmann, M., & Helming, K. (2023). Sustainable soil management measures: a synthesis of stakeholder recommendations. Agronomy for Sustainable Development, 43(1), 17.

Strauss, V., Paul, C., Dönmez, C., Löbmann, M., & Helming, K. (2023). Sustainable soil management measures: a synthesis of stakeholder recommendations. Agronomy for Sustainable Development, 43(1), 17.

Valujeva, K., Nipers, A., Lupikis, A., & Schulte, R. P. (2020). Assessment of soil functions: an example of meeting competing national and international obligations by harnessing regional differences. Frontiers in Environmental Science, 8, 591695.

Vrebos, D., Bampa, F., Creamer, R. E., Gardi, C., Ghaley, B. B., Jones, A., ... & Meire, P. (2017). The impact of policy instruments on soil multifunctionality in the European Union. Sustainability, 9(3), 407.

Evaluating the functional role of users in land resource management

Sahand Azar*[1], Ali Akbar Taghi Lu

1- PhD Student, Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, Urmia University, Urmia, Iran

* Corresponding author: Email: S.azar@urmia.ac.ir

2- Full Professor, Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, Urmia University, Urmia, Iran

a.taghiloo@urmia.ac.ir

Abstract

Evaluating the role of land users in land resource management is a crucial process for the sustainability of these resources. This assessment examines the performance of land users in the use of resources such as water, soil, and forests. The goal is to identify the impacts of activities on the environment and the level of compliance with laws. Economic, social, and political factors affecting land users' performance are identified. This assessment provides a basis for providing solutions to improve performance and promote resource management. Solutions include amending laws, training, creating incentives, and strengthening land user participation. Ultimately, the goal is to achieve a sustainable and fair management of land

resources. Continuous monitoring and evaluation are also essential to ensure the effectiveness of measures. The purpose of the present study is to evaluate the functional role of land users in land resource management. This study is applied-theoretical in terms of purpose and descriptive-analytical in terms of method. The required information and data were collected through library and field methods. In this study, the Best-Worst method was used. The results of the study show that we used 8 criteria in this study. In this section, pairwise comparisons of the best criterion relative to other criteria (BO) and other criteria relative to the worst criterion (OW) are performed. In this study, pairwise comparisons were first formed and provided to 3 experts to determine the level of preference in pairwise comparisons based on a 5-point fuzzy spectrum. After answering, pairwise comparisons were merged with the geometric mean method. In this section, the inconsistency rate of the research pairwise comparisons is calculated. First, using equation 8, by solving a quadratic equation for each pairwise comparison table, we calculate the unknown value ξ, which is the compatibility index. Then, we divide the optimal value of the objective function ($\tilde{\xi}$*) of each linear model for pairwise comparison tables by this compatibility index value to obtain the inconsistency rate. In mathematical terms, the inconsistency rate is equal to: ($\tilde{\xi}$*)/ξ. The closer the inconsistency rate is to zero, the more compatible the pairwise comparison is.

Keywords: Natural resource management, sustainable land management, users, best-worst method

ارزیابی دقت داده‌های بارش TRMM و GPCC در ایستگاه‌های سینوپتیک حوضه دریاچه ارومیه

سیما کاظم‌پور چورسی[۱]، مهدی عرفانیان[۲]، هیراد عبقری[۲]، میرحسن میریعقوب‌زاده[۲]، خدیجه جوان[۳]

۱- دانش‌آموخته دکتری، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع‌طبیعی، دانشگاه ارومیه
۲- دانشیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع‌طبیعی، دانشگاه ارومیه
۳- دانشیار، گروه جغرافیا، دانشکدهٔ ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه ارومیه
آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول (Erfanian.ma@gmail.com)

چکیده

داده‌های دقیق بارش برای مدل‌سازی هیدرولوژیکی و مدیریت منابع آب در حوضه‌های آبریز، به‌ویژه در مناطقی با بحران‌های زیست‌محیطی مانند حوضه دریاچه ارومیه از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. این مطالعه دقت داده‌های بارش ماهانه TRMM 3B43 و GPCC V2022 را با استفاده از داده‌های ۱۰ ایستگاه سینوپتیک در حوضه دریاچه ارومیه طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۹ ارزیابی می‌کند. شاخص‌های آماری شامل ضریب تعیین (R^2)، درصد اریبی (PBias)، میانگین خطای مطلق (MAE)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و KGE برای سنجش دقت به‌کار گرفته شدند. نتایج نشان داد که GPCC با میانگین R^2=0.89، PBias=14.72 و KGE=0.89 نسبت به TRMM با R^2=0.77، PBias=33.57 و KGE=0.80 عملکرد بهتری دارد. تحلیل الگوهای بارش ماهانه GPCC حاکی از آن است که بیشترین بارندگی‌ها (بالای ۵۰ میلی‌متر) در ماه‌های سرد (ژانویه تا مارس، نوامبر و دسامبر) در نواحی جنوب و جنوب‌غربی حوضه رخ داده و کمترین بارندگی‌ها (کمتر از ۱۰ میلی‌متر) در ماه‌های گرم (ژوئن تا سپتامبر) ثبت شده است. با توجه به بحران هیدرولوژیکی دریاچه ارومیه و پیامدهای فاجعه‌بار آن بر منابع آبی، کشاورزی، اکوسیستم‌های محلی و جوامع انسانی، بهره‌گیری از داده‌های GPCC به دلیل دقت برتر آن، برای مدل‌سازی هیدرولوژیکی و برنامه‌ریزی پایدار منابع آب در این منطقه بحرانی پیشنهاد می‌شود.

کلید واژه‌ها: ارزیابی آماری، دریاچه ارومیه، GPCC، TRMM

مقدمه

داده‌های دقیق و قابل‌اعتماد بارش برای مدل‌سازی هیدرولوژیکی و مدیریت بهینه منابع آب در حوزه‌های آبریز، به‌ویژه در مناطقی با تغییرات اقلیمی شدید نقش حیاتی دارند. اندازه‌گیری دقیق بارش به‌دلیل تغییرات گسترده زمانی و مکانی و خطاهای ذاتی ابزارهای اندازه‌گیری همواره دشوار است. باران‌سنج‌های سنتی با ارائه اندازه‌گیری مستقیم بارش، معمولاً

به‌عنوان مرجع برای اعتبارسنجی داده‌های بارش مبتنی بر رادار و ماهواره استفاده می‌شوند (Tan et al., 2018; Wang et al., 2021). با این حال، این ابزارها تنها قادر به ثبت داده‌های نقطه‌ای در مکان‌های خاص هستند و شبکه‌های باران‌سنج اغلب پراکنده، نامنظم و ناکافی‌اند و نمی‌توانند تغییرات مکانی بارش را به‌طور دقیق نشان دهند (Kidd and Huffman, 2011). رادارهای هواشناسی زمینی با استفاده از داده‌های انعکاسی، بارش را در مناطق وسیع تخمین می‌زنند. بهره‌گیری از فناوری دوقطبی در رادارهای جدید دقت تخمین بارش را بهبود بخشیده است (Cifelli et al., 2011). با این وجود، شبکه‌های راداری عمدتاً در قاره‌ها مستقرند، تراکم کافی در بسیاری از مناطق خشکی ندارند و پوشش آن‌ها بر اقیانوس‌ها بسیار محدود است. همچنین، این رادارها با مشکلاتی مانند انحراف پرتو در مناطق کوهستانی مواجه‌اند (Wolff et al., 2005). در مقابل، حسگرهای ماهواره‌ای مشاهده زمین با ارائه پوشش گسترده و پیوسته، راه‌حلی برای ثبت دقیق بارش‌های منطقه‌ای و جهانی فراهم کرده‌اند (Kidd and Levizzani, 2011). ا طی چند دهه گذشته، مجموعه‌های مختلفی از داده‌های بارش از طریق ماهواره و ترکیب داده‌های ماهواره با ایستگاه‌های زمینی تهیه شده‌اند که دقت مکانی و زمانی آن‌ها متفاوت است. از زمان پرتاب مأموریت اندازه‌گیری بارش‌های گرمسیری (Tropical Rainfall Measuring Mission: TRMM) در نوامبر ۱۹۹۷، که توسط سازمان ملی هوانوردی و فضایی (ناسا) و آژانس اکتشاف هوافضای ژاپن (JAXA) انجام شد، محصولات و روش‌های بازیابی بارش مبتنی بر ماهواره در دو دهه گذشته به‌سرعت توسعه یافته‌اند (Shen et al., 2022). پایگاه داده بارش GPCC در سال ۱۹۸۹ و به درخواست سازمان جهانی هواشناسی (WMO) ایجاد شد و هم‌اکنون توسط سازمان هواشناسی ملی آلمان (Deutscher Wetterdienst: DWD) مدیریت می‌شود. این پایگاه با استفاده از داده‌های بیش از ۸۶۰۰۰ ایستگاه باران‌سنجی زمینی، مجموعه‌ای گسترده از اطلاعات بارش ماهانه فراهم کرده است که دوره زمانی ۱۹۰۱ تا ۲۰۲۰ را پوشش می‌دهد. داده‌های ماهانه در این پایگاه با وضوح مکانی ۰/۲۵ × ۰/۲۵، ۰/۵ × ۰/۵ و ۲/۵ × ۲/۵ درجه در دسترس کاربران قرار دارد (Schneider et al., 2022). پژوهش‌های متعددی در ایران به ارزیابی داده‌های بارش ماهواره‌ای مانند TRMM-3B43 و داده‌های شبکه‌ای مانند GPCC پرداخته‌اند که عمدتاً بر مقیاس کشوری یا حوضه‌های خاص مانند کارون و سفیدرود تمرکز داشته‌اند. این مطالعات نشان داده‌اند که TRMM در برآورد بارش‌های شدید دقت متوسطی دارد ($R^2 \approx 0.6$-0.7)، در حالی که GPCC به‌دلیل بهره‌گیری از داده‌های ایستگاهی، همبستگی بالاتری ($R^2 > 0.75$) دارد. میری و همکاران (۱۳۹۵) دقت داده‌های بارش ماهانه TRMM-3B43 (با وضوح مکانی ۰/۲۵ × ۰/۲۵درجه) و GPCC (با وضوح مکانی ۰/۵ × ۰/۵ درجه) در تخمین بارش واقعی ۴۶ ایستگاه سینوپتیک ایران برای بازه زمانی مشترک ۱۹۹۸-۲۰۱۰ ارزیابی کردند. نتایج آن‌ها حاکی از عملکرد مطلوب TRMM در بیشتر ایستگاه‌ها با وجود بیش‌تخمینی یا کم‌تخمینی در نواحی خاص مانند سواحل خزر، شمال غرب و تهران بود. GPCC نیز دقت قابل‌قبولی از خود نشان داد و بیشترین ضریب همبستگی را در مناطق شمال شرق، غرب مرکزی و شمال غرب ثبت کرد. همچنین، عرفانیان و همکاران (۱۳۹۲) دقت

TRMMرا در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران متوسط ارزیابی کردند، در حالی که حسینی موغاری و همکاران (۱۳۹۶) GPCC را برای حوضه ارومیه با RMSE کمتر از ۲۰ میلی‌متر مناسب یافتند. با این حال، بررسی‌های جامع و متمرکز بر حوضه آبریز دریاچه ارومیه، که دارای شرایط اقلیمی و توپوگرافی منحصربه‌فردی است، به‌ویژه با استفاده از معیارهای آماری چندگانه و ارائه نقشه‌های میانگین بارش ماهانه برای دوره طولانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۹ محدود است. اکثر پژوهش‌ها تنها یکی از این مجموعه داده‌ها را بررسی کرده یا مقایسه مستقیمی در مقیاس این حوضه انجام نداده‌اند، که این شکاف تحقیقاتی، به‌ویژه در زمینه انتخاب بهترین مجموعه داده برای کاربردهای هیدرولوژیکی و مدیریت منابع آب در این منطقه بحرانی را برجسته می‌کند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز دریاچه ارومیه یکی از مهم‌ترین حوضه‌های بسته ایران است که در شمال‌غرب کشور واقع شده است (شکل ۱). این حوضه با مساحت تقریبی ۵۱۸۷۶ کیلومترمربع، حدود ۷ درصد از منابع آب سطحی کشور را در بر می‌گیرد و شامل استان‌های آذربایجان‌غربی، آذربایجان‌شرقی، کردستان، زنجان و اردبیل می‌شود (Hesami and Amini, 2016). این حوضه به دلیل شرایط حساس اقلیمی و زیست‌محیطی، وابستگی شدید به داده‌های بارش دارد و ارزیابی دقت پایگاه‌های ماهواره‌ای و جهانی می‌تواند به بهبود تصمیم‌گیری‌ها و سیاست‌های احیای دریاچه کمک کند.

داده‌های مورد استفاده

بارش ایستگاه‌های سینوپتیک

داده‌های ماهانه بارش ۱۰ ایستگاه سینوپتیک واقع در حوضه آبریز دریاچه ارومیه برای ارزیابی دقت دو مجموعه داده TRMM 3B43 و GPCC V2022 طی دوره آماری ۱۹ ساله (۲۰۰۱ تا ۲۰۱۹) مورد استفاده قرار گرفت. مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه

ردیف	ایستگاه	طول جغرافیایی (درجه اعشار)	عرض جغرافیایی (درجه اعشار)	ارتفاع (متر)
1	ارومیه	45/06	۶37/6	1328
2	بناب	۵46/0	۷37/3	1281
3	تبریز	46/24	۲38/1	1361

4	تکاب	47/1	۴۰36/	1817
5	سراب	47/53	۳37/9	1682
6	سقز	46/27	36/25	1482
7	سلماس	44/85	۲38/2	1339
8	سهند	۲46/1	۳37/9	1641
9	مراغه	۵46/1	37/35	1344
10	مهاباد	۲45/7	36/75	1352

بارش TRMM 3B43

مجموعه داده سری 3B43 ماهواره TRMM شامل بارش ماهانه بوده که در سال ۲۰۱۱ منتشر شده و یکی از مهم‌ترین محصولات تحقیقاتی تحلیل بارش چندماهواره‌ای (TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis: TMPA) به‌شمار می‌رود. این داده‌ها با استفاده از نرخ بارش ترکیبی مایکروویو–فروسرخ اصلاح‌شده توسط TRMM (میلی‌متر بر ساعت) و برآورد خطای بارش به صورت جذر میانگین مربعات (RMS) تولید شده‌اند. محصول نهایی بهترین تخمین شبکه‌ای از بارش را در نوار عرضی ۵۰ درجه جنوبی تا ۵۰ درجه شمالی ارائه می‌دهد و دارای وضوح مکانی ۰/۲۵ × ۰/۲۵ درجه است. داده‌ها از منابع جهانی مختلف، شامل داده‌های مایکروویو با کیفیت بالا، داده‌های فروسرخ و تحلیل‌های ایستگاه‌های باران‌سنجی گردآوری شده‌اند (Huffman and Bolvin, 2013). در این مطالعه، دادههای TRMM 3B43 V7 از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۹ از سایت ناسا دانلود و پیش‌پردازش‌های مورد نیاز در محیط نرم‌افزار ArcGIS انجام شد.

بارش GPCC

داده‌های GPCC V2022 تحلیل‌های شبکه‌ای بارش سطح خشکی را بر پایه حدود ۸۶۰۰۰ ایستگاه باران‌سنجی جهانی با رکوردهای حداقل ۱۰ ساله ارائه می‌دهد. این نسخه شامل محصولات متنوعی مانند Full Data Monthly (داده‌های کامل ماهانه از ۱۸۹۱ تا ۲۰۲۰)، Climatology (میانگین‌های اقلیمی ماهانه و سالانه برای دوره‌های استاندارد مانند ۱۹۹۱-۲۰۲۰)، و Monitoring (نزدیک به زمان واقعی) با قدرت تفکیک مکانی مختلف است (Schneider et al., 2022). در این مطالعه، داده‌های ماهانه نسخه ۲۰۲۲ بارش جهانی GPCC با فرمت NetCDF از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۹ با قدرت تفکیک مکانی ۰/۲۵ × ۰/۲۵ درجه استفاده شدند.

معیارهای ارزیابی

دقت داده‌های TRMM و GPCC با استفاده از داده‌های مشاهداتی و معیارهای آماری مختلف، از جمله ضریب تعیین (R^2)، درصد اریبی (PBias)، میانگین خطای مطلق (MAE)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و شاخص KGE طی دوره آماری ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۹ ارزیابی شد. در این میان، RMSE خطای کلی داده‌ها را نشان می‌دهد و هر چه مقدار آن کمتر باشد، همبستگی بین داده‌های مشاهداتی و داده‌های ماهواره‌ای بالاتر خواهد بود. MAE میانگین خطای مطلق را مشخص می‌کند و مقدار کمتر آن نیز نشان‌دهنده همبستگی بالاتر میان دو مجموعه داده است. PBias اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهداتی را نشان می‌دهد و مقدار بهینه آن صفر است. در این مطالعه، PBias منفی بیانگر برآورد کمتر از واقعیت بارندگی توسط مدل و مقدار مثبت نشان‌دهنده برآورد بیش از حد مدل است. شاخص KGE نابرابری میانگین و تغییرپذیری را در نظر می‌گیرد و ارزیابی جامع‌تری از عملکرد مدل ارائه می‌دهد؛ مقادیر KGE نزدیک به ۱ عملکرد بهتر داده‌های ماهواره‌ای نسبت به مشاهدات و مقادیر پایین‌تر نشان‌دهنده کاهش دقت هستند. معیارهای آماری RMSE، MAE، PBias و KGE با استفاده از معادلات زیر محاسبه شده‌اند:

$$PBias = \frac{\sum_{i=1}^{n}(P_{est} - P_{obs})}{\sum_{i=1}^{n} P_{obs}} \times 100 \quad (۱)$$

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}|P_{est} - P_{obs}| \quad (۲)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(P_{est} - P_{obs})^2} \quad (۳)$$

$$KGE = 1 - \sqrt{((r-1)^2 + (\sigma_{est}/\sigma_{obs} - 1)^2 + (\mu_{est}/\mu_{obs} - 1)^2} \quad (۴)$$

در این مطالعه، n بیانگر تعداد کل مشاهدات، Pobs بارش ثبت‌شده توسط باران‌سنج‌ها و Pest بارش تخمینی (TRMM و GPCC) است. ضریب همبستگی خطی بین داده‌های مشاهداتی و تخمینی با r نشان داده می‌شود. همچنین، Qest و Qobs به‌ترتیب انحراف معیار داده‌های تخمینی و مشاهداتی، و μest و μobs میانگین مقادیر آن‌ها را نشان می‌دهند.

نتایج و بحث

ارزیابی دقت داده‌های بارش TRMM و GPCC در ایستگاه‌های سینوپتیک حوضه دریاچه ارومیه در جدول ۲ ارائه شده است. شاخص‌های آماری مورد استفاده شامل R2، PBias، MAE، RMSE و KGE هستند که هر کدام جنبه‌ای از دقت و توانایی مدل‌ها در شبیه‌سازی بارش را ارزیابی می‌کنند. نتایج نشان می‌دهد که داده‌های GPCC به‌طور کلی عملکرد بهتری نسبت به TRMM دارند. ضریب تعیین R2 برای GPCC در تمامی ایستگاه‌ها بالاتر از TRMM است، به عنوان مثال در ایستگاه مراغه R2 برابر ۰/۹۶ برای GPCC و ۰/۸۹ برای TRMM است، که نشان‌دهنده توانایی بیشتر GPCC در ردیابی

نوسانات زمانی بارش می‌باشد (Hosseini Moghari et al., 2018). مقادیر خطای PBias، MAE و RMSE نیز برای GPCC به‌طور معمول کمتر بوده و بیانگر دقت بالاتر آن در شبیه‌سازی مقادیر واقعی بارش است. شاخص KGE نیز عملکرد کلی GPCCرا تأیید می‌کند. برای نمونه در ایستگاه ارومیه KGE برابر ۰/۸۲ برایGPCC و ۰/۶۵ برای TRMM است، که نشان‌دهنده توانایی بهتر GPCC در بازسازی همزمان همبستگی، میانگین و تغییرات آماری بارش می‌باشد (Kazempour Choursi et al., 2024). با توجه به میانگین کل ایستگاه‌ها، GPCC دارای R2 = 0.88، PBias = 14.49 و KGE = 0.90 است، در حالی که مقادیر مشابه برای TRMM به ترتیب ۰/۷۶، ۳۴/۴۰ و ۰/۸۱ می‌باشند. بنابراین، داده‌های GPCC برای استفاده در مدل‌های هیدرولوژیکی، تحلیل خشکسالی و پایش منابع آب حوضه ارومیه مناسب‌تر هستند. در مقابل، داده‌های TRMM با وجود پوشش سراسری و توانایی ارائه اطلاعات ماهواره‌ای، در مناطق کوهستانی و خشک حوضه دقت کمتری دارند و نیازمند تصحیح یا ترکیب با داده‌های زمینی می‌باشند. این یافته‌ها نشان می‌دهد که ترکیب داده‌های ماهواره‌ای TRMM با GPCC می‌تواند بهترین گزینه برای مدل‌سازی بارش در حوضه‌های با پوشش ایستگاه محدود باشد، و به تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و برنامه‌های احیای دریاچه ارومیه کمک کند. نمودار پراکنش بارش مشاهده‌ای در مقابل بارش ماهواره‌ای TRMM و داده‌های GPCC در ایستگاه‌های سینوپتیک حوضه دریاچه ارومیه در شکل ۲ نمایش داده شده است.

جدول ۲- ارزیابی داده‌های بارش TRMM و GPCC در ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه

ایستگاه	TRMM					GPCC				
	R2	PBias	MAE	RMSE	KGE	R2	PBias	MAE	RMSE	KGE
ارومیه	۰/۷۸	۳۱/۷۸	۱۴/۶۷	۲۰/۸۵	۰/۶۵	۰/۸۸	۱۹/۹۱	۷/۷۹	۱۱/۴۲	۰/۸۲
بناب	۰/۸۶	۱۶/۹۱	۷/۲۶	۱۰/۲۴	۰/۸۳	۰/۹۳	۹/۳۴	۴/۹۵	۷/۳۸	۰/۹۱
تبریز	۰/۸۴	۲۱/۳۸	۷/۳۰	۱۰/۱۱	۰/۷۱	۰/۹۲	-۲/۷۲	۴/۲۹	۶/۱۰	۰/۹۲
تکاب	۰/۷۱	۱۱/۶۵	۹/۵۸	۱۴/۳۰	۰/۸۵	۰/۸۴	۱۱/۶۶	۷/۳۶	۱۰/۹۲	۰/۸۷
سراب	۰/۷۰	۳۹/۱۳	۱۷/۰۸	۲۱/۰۸	۰/۵۸	۰/۸۵	۱۹/۵۸	۶/۵۲	۹/۳۶	۰/۸۳
سقز	۰/۸۶	۹/۶۵	۸/۵۰	۱۴/۱۰	۰/۸۲	۰/۸۹	۸/۵۶	۷/۸۲	۱۱/۵۶	۰/۸۶
سلماس	۰/۶۹	۴۱/۸۳	۱۴/۶۵	۱۹/۲۴	۰/۶۱	۰/۸۲	۱۲/۵۲	۶/۵۶	۹/۷۸	۰/۸۰
سهند	۰/۸۰	۲۶/۶۵	۹/۵۱	۱۲/۹۶	۰/۶۳	۰/۸۸	۱۶/۳۰	۵/۲۰	۷/۶۶	۰/۸۲
مراغه	۰/۸۹	۲۱/۴۶	۶/۶۰	۹/۶۲	۰/۷۹	۰/۹۶	۱۳/۶۱	۴/۳۱	۶/۵۵	۰/۸۵
مهاباد	۰/۸۱	۲۶/۲۰	۱۴/۳۲	۲۰/۳۰	۰/۶۸	۰/۹۳	۱۹/۵۸	۷/۵۳	۱۲/۰۹	۰/۸۰
کل	۰/۷۷	۳۳/۵۷	۱۰/۹۴	۱۶/۰۵	۰/۸۰	۰/۸۹	۱۴/۷۲	۶/۴۳	۱۰/۲۳	۰/۸۹

مشاهده می‌شود که بیشترین مقدار میانگین بارندگی ماهانه (بالای ۵۰ میلی‌متر) در ماه‌های ژانویه تا مارس، نوامبر و دسامبر، عمدتاً در نواحی جنوب و جنوب‌غربی حوضه رخ داده است. در ماه آوریل، بخش عمده‌ای از سطح حوضه میانگین بارندگی بالای ۵۰ میلی‌متر را تجربه کرده است. در ماه‌های ژوئن تا سپتامبر، تقریباً در کل سطح حوضه بارندگی کمتر از ۱۰ میلی‌متر ثبت شده است. از ماه اکتبر، میانگین بارندگی ماهانه روند افزایشی پیدا کرده و حداکثر آن در نواحی جنوب و جنوب‌غربی مشاهده می‌شود.

نتیجه‌گیری

به‌طور کلی، ارزیابی دقت داده‌های بارش TRMM و GPCC در ایستگاه‌های سینوپتیک حوضه آبریز دریاچه ارومیه نشان داد که داده‌های GPCC عملکرد بهتری نسبت به TRMM دارند. ضریب تعیین (R2) بالاتر، مقادیر خطای کمتر (PBias، MAE و RMSE) و شاخص KGE بالاتر در داده‌های GPCC، بیانگر توانایی بیشتر این مجموعه داده در بازسازی دقیق‌تر بارش‌های ماهانه و تطابق بهتر با داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک است. به‌طور خاص، GPCC با میانگین R2=0.89، PBias=14.72 و KGE=0.89 در مقایسه با TRMM با R2=0.77، PBias=33.57 و KGE=0.80، دقت بالاتری را در تخمین بارش در حوضه آبریز دریاچه ارومیه نشان داد. این برتری به‌ویژه در مناطق کوهستانی و خشک حوضه، که TRMM به دلیل محدودیت‌های ذاتی داده‌های ماهواره‌ای دقت کمتری دارد، مشهود است. تحلیل الگوهای بارش ماهانه بر اساس داده‌های GPCC نیز نشان داد که بیشترین بارندگی‌ها (بالای ۵۰ میلی‌متر) در ماه‌های سرد سال (ژانویه تا مارس، نوامبر و دسامبر) و عمدتاً در نواحی جنوب و جنوب‌غربی حوضه رخ داده و کمترین بارندگی‌ها (کمتر از ۱۰ میلی‌متر) در ماه‌های گرم (ژوئن تا سپتامبر) مشاهده شده است. این الگوهای فصلی بر اهمیت استفاده از داده‌های دقیق برای مدل‌سازی هیدرولوژیکی و پایش خشکسالی در این حوضه حساس تأکید دارند. با توجه به بحران هیدرولوژیکی دریاچه ارومیه و تأثیرات آن بر منابع آب، کشاورزی و اکوسیستم، استفاده از داده‌های GPCC به دلیل دقت بالاتر برای مدل‌سازی هیدرولوژیکی و برنامه‌ریزی منابع آب توصیه می‌شود. همچنین، ترکیب داده‌های TRMM با GPCC می‌تواند به‌عنوان راهکاری برای بهبود تخمین بارش در مناطق با پوشش ایستگاهی محدود مورد استفاده قرار گیرد. این یافته‌ها بر لزوم بهره‌گیری از داده‌های دقیق و قابل‌اعتماد برای پشتیبانی از استراتژی‌های مدیریت تطبیقی در مناطق مستعد خشکسالی، به‌ویژه در راستای احیای دریاچه ارومیه، تأکید دارند.

منابع

حسینی موغاری، س.م.، عراقی نژاد، ش.، و ابراهیمی، ک. (۱۳۹۶). بررسی دقت اطلاعات بارش شبکه‌بندی شده جهانی در حوضه دریاچه ارومیه. تحقیقات آب و خاک ایران، ۴۸(۳)، ۵۸۷-۵۹۸.

عرفانیان، م.، کاظم پور چورسی، س.، و حیدری، ح. (۱۳۹۲)، ارزیابی و کالیبراسیون داده های باران ماهواره‌ای TRMM در مناطق خشک و نیمه خشک ایران. فصلنامه جغرافیا-برنامه‌ریزی منطقه‌ای، (۳)۳، ۹۵-۸۳.

میری، م.، رضیئی، ط.، و رحیمی، م. (۱۳۹۵). ارزیابی و مقایسه آماری داده‌های بارش TRMM و GPCC با داده‌های مشاهده‌ای در ایران. فیزیک زمین و فضا، (۳)۴۲، ۶۷۲-۶۵۷.

Cifelli, R., Chandrasekar, V., Lim, S., Kennedy, P. C., Wang, Y., & Rutledge, S. A. (2011). A new dual-polarization radar rainfall algorithm: Application in Colorado precipitation events. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 28(3), 352-364.

Hesami, A., & Amini, A. (2016). Changes in irrigated land and agricultural water use in the Lake Urmia basin. Lake and Reservoir Management, 32(3), 288-296.

Hosseini-Moghari, S. M., Araghinejad, S., & Ebrahimi, K. (2018). Spatio-temporal evaluation of global gridded precipitation datasets across Iran. Hydrological Sciences Journal, 63(11), 1669-1688.

Huffman, G. J., & Bolvin, D. T. (2013). TRMM and other data precipitation data set documentation. NASA, Greenbelt, USA, 28(2.3), 1.

Kazempour Choursi, S., Erfanian, M., Abghari, H., Miryaghoubzadeh, M., & Javan, K. (2024). Enhancing drought monitoring through spatial downscaling: A geographically weighted regression approach using TRMM 3B43 precipitation in the Urmia Lake Basin. Earth Science Informatics, 17(4), 2995-3020.

Kidd, C., & Huffman, G. (2011). Global precipitation measurement. Meteorological Applications, 18(3), 334-353.

Kidd, C., & Levizzani, V. (2011). Status of satellite precipitation retrievals. Hydrology and Earth System Sciences, 15(4), 1109-1116.

Shen, Z., Yong, B., Yi, L., Wu, H., & Xu, H. (2022). From TRMM to GPM, how do improvements of post/near-real-time satellite precipitation estimates manifest?. Atmospheric Research, 268, 106029.

Schneider, U., Hänsel, S., Finger, P., Rustemeier, E., & Ziese, M. (2022). GPCC Full Data Monthly Product Version 2022 at 1.0°: monthly land-surface precipitation from rain-gauges built on GTS-based and historical data. Global Precipitation Climatology Centre at Deutscher Wetterdienst (DWD), 10.

Tan, J., Petersen, W. A., Kirchengast, G., Goodrich, D. C., & Wolff, D. B. (2018). Evaluation of global precipitation measurement rainfall estimates against three dense gauge networks. Journal of Hydrometeorology, 19(3), 517-532.

Wang, J., Petersen, W. A., & Wolff, D. B. (2021). Validation of satellite-based precipitation products from TRMM to GPM. Remote Sensing, 13(9), 1745.

Wolff, D. B., Marks, D. A., Amitai, E., Silberstein, D. S., Fisher, B. L., Tokay, A., ... & Pippitt, J. L. (2005). Ground validation for the tropical rainfall measuring mission (TRMM). Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 22(4), 365-380.

Evaluation of the accuracy of TRMM and GPCC precipitation data in synoptic stations of the Urmia Lake Basin

Sima Kazempour Choursi[1], Mahdi Erfanian[2]*, Hirad Abghari[2], Mirhassan Miryaghoubzadeh[2], Khadijeh Javan[3]

Ph.D, Department of Range and Watershed Management, Urmia University, Urmia, Iran
Associate Professor, Department of Range and Watershed Management, Urmia University, Urmia, Iran.
Associate Professor, Department of Geography, Urmia University, Urmia, Iran.
* Corresponding author: Erfanian.ma@gmail.com

Abstract

Accurate precipitation data are of particular importance for hydrological modeling and water resources management in river basins, especially in areas with environmental crises such as the Urmia Lake Basin. This study evaluates the accuracy of monthly precipitation data from TRMM 3B43 and GPCC V2022 using data from 10 synoptic stations in the Urmia Lake Basin, for the period from 2001 to 2019. Statistical indices, including the coefficient of determination (R^2), Percent Bias (PBias), Mean Absolute Error (MAE), Root Mean Square Error (RMSE), and KGE, were employed to assess accuracy. The results indicate that GPCC, with an average R^2=0.89, PBias=14.72, and KGE=0.89, performs better than TRMM, which has R^2=0.77, PBias=33.57, and KGE=0.80. The analysis of monthly precipitation patterns from GPCC reveals that the highest rainfall amounts (above 50 mm) occur in the cold months (January to March, November, and December) in the southern and southwestern parts of the basin, while the lowest rainfall (less than 10 mm) is recorded in the warm months (June to September). Given the hydrological crisis of Lake Urmia and its disastrous consequences for water resources, agriculture, local ecosystems, and human communities, the use of GPCC data is recommended due to its superior accuracy for hydrological modeling and sustainable water resources planning in this critical region.

Keywords: GPCC, TRMM, Statistical Assessment, Lake Urmia.

مروری بر مطالعات مرتبط با تأثیر تغییرات اقلیمی بر صنعت گردشگری در ایران

امیرمحمد حسن زادگان[۱]

۱- دانشجوی کارشناسی مهندسی طبیعت،دانشگاه ارومیه
Amirmohammadhassanzadegan@gmail.com

چکیده

صنعت گردشگری به عنوان یکی از مهم‌ترین بخش‌های اقتصادی در ایران با توجه به تنوع اقلیمی و جاذبه‌های طبیعی و فرهنگی، نقش چشمگیری در توسعه اقتصادی و اجتماعی کشور ایفا می‌کند. با این حال، تغییرات اقلیمی به عنوان یکی از چالش‌های جدی جهانی، تأثیرات قابل توجهی بر این صنعت دارد که می‌تواند منجر به کاهش جذب گردشگر و تغییر الگوی سفر شود. این مقاله با مرور مطالعات مختلف انجام شده در ایران، به بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر صنعت گردشگری پرداخته است. نتایج نشان می‌دهد افزایش دما و تغییر در میزان بارش به طور معناداری بر تقاضای گردشگری اثرگذار بوده و مناطق مختلف کشور بسته به شرایط اقلیمی، واکنش‌های متفاوتی از خود نشان می‌دهند. همچنین به دلیل آسیب‌پذیری بالای ایران در برابر تغییرات اقلیمی این مطالعه می‌تواند زمینه‌ساز توسعه سیاست‌های مدیریتی موثر و پایدار برای حفظ و تقویت صنعت گردشگری در مواجهه با تغییرات اقلیمی باشد.

کلید واژه‌ها : تغییرات اقلیمی،گردشگری،توسعه پایدار،تقاضای گردشگری

مقدمه

گردشگری به عنوان یکی از فعالیت‌های مهم اقتصادی و اجتماعی، نقش بسزایی در توسعه پایدار ایفا می‌کند. این صنعت علاوه بر ایجاد فرصت‌های شغلی، موجب توزیع عادلانه‌تر درآمد و ارتقای سطح اشتغال در جوامع می‌شود (محمدی و همکاران، ۱۳۹۰). گردشگری بخش قابل توجهی از اقتصاد جهانی را تشکیل داده است (عباسی و خسروی، ۱۳۹۳) و در شمار صنایع در حال گسترش دنیا قرار دارد (عابدی و همکاران، ۱۴۰۰). به گونه‌ای که امروزه از هر نه شغل در جهان، یکی به صنعت گردشگری اختصاص دارد (عابدی و همکاران، ۱۴۰۰). این صنعت به ویژه در کشورهای در حال توسعه، از اصلی‌ترین عوامل پیشبرد توسعه اقتصادی به شمار می‌رود (دادرس مقدم و همکاران، ۱۴۰۰). همچنین درآمد حاصل از گردشگری به عنوان یکی از بزرگ‌ترین منابع درآمدی کشورها مطرح است و درسطح جهانی به «صادرات نامرئی» شهرت یافته است (محمدی و همکاران، ۱۳۹۰).

ایران به واسطهٔ دارا بودن فرصت‌های متنوع و متعدد گردشگری همچون بناهای تاریخی، صنایع دستی، مناظر طبیعی چشم‌نواز، حیات وحش و گستره وسیع اقلیمی، در زمره کشورهای دارای ظرفیت‌های ممتاز گردشگری در جهان قرار دارد (دادرس مقدم و همکاران، ۱۴۰۰). براساس تقسیم‌بندی‌های سازمان جهانی گردشگری، ایران در منطقهٔ گردشگری جنوب آسیا جای می‌گیرد و با وجود تنوع چشمگیر جاذبه‌های تاریخی، فرهنگی و طبیعی - از جمله ۲۶ اثر ثبت‌شده در فهرست میراث جهانی یونسکو و ۱۳ ذخیره‌گاه زیست‌کره - از نظر ظرفیت‌های گردشگری جایگاه بسیار ارزشمندی دارد. با این حال، سهم ایران از جذب گردشگران بین‌المللی و درآمدزایی این صنعت هنوز در سطح مطلوبی قرار نگرفته است. به گونه‌ای که طبق گزارش‌های آماری سالانهٔ سازمان جهانی گردشگری در سال ۲۰۲۲، ورود گردشگران بین‌المللی به ایران در سال ۲۰۱۹ حدود ۹ میلیون و ۱۰۷ هزار نفر بوده است (نیک‌بین، ۱۴۰۲). همچنین بر اساس داده‌های منتشر شده از سوی وزارت میراث فرهنگی، گردشگری و صنایع دستی، سهم صنعت گردشگری از تولید ناخالص داخلی ایران حدود ۲/۴ درصد برآورد می‌شود که معادل ۱۱۹ میلیون دلار است (دادرس مقدم و همکاران، ۱۴۰۰).

یکی ازعوامل مهمی که در مطالعات گردشگری باید مورد توجه قرار گیرد، شرایط اقلیمی است (عباسی و خسروی، ۱۳۹۳). وضعیت آب‌وهوای هر منطقه از مهم‌ترین مؤلفه‌های مؤثربرجذب یا کاهش حضور گردشگران به شمار می‌رود (یزدان‌پناه و همکاران، ۱۳۹۰). در واقع، اقلیم نقشی کلیدی درموفقیت وتوسعهٔ بلندمدت صنعت گردشگری ایفا می‌کند (عابدی و همکاران، ۱۴۰۰). یک شرایط اقلیمی مطلوب می‌تواند موجب رضایت گردشگران شده و آنان را در برنامه‌ریزی سفرهای خود به مقصد مورد نظر ترغیب کند (رنجبر و همکاران، ۱۳۸۹). به بیان دیگر، میان گردشگری و اقلیم وابستگی تنگاتنگی وجود دارد؛ به گونه‌ای که داشتن شرایط مناسب آب‌وهوایی یکی از مزیت‌های رقابتی و ظرفیت‌های بالقوه در توسعه

گردشگری محسوب می‌شود. اغلب گردشگران در انتخاب مقصد و زمان سفر خود، دقت ویژه‌ای به شرایط اقلیمی دارند (شیخ‌زاده و همکاران، ۱۴۰۴). از سوی دیگر، تغییرات دما و بارش به عنوان دو مؤلفه اصلی تغییر اقلیم شناخته می‌شوند و هر گونه دگرگونی در این شاخص‌ها می‌تواند تغییرات اقلیمی قابل توجهی را در پی داشته باشد (عساکره و فرجزاده، ۱۴۰۲).

تغییرات اقلیمی به عنوان یکی از چالش‌های اساسی جهان معاصر، بیش از هر چیز بر اقلیم و در پی آن بر صنعت گردشگری تأثیر می‌گذارد (مظلوم و همکاران، ۱۴۰۰). پدیده‌هایی همچون افزایش دما، خشکسالی‌های طولانی‌مدت، امواج گرمایی، سیلاب‌ها و آتش‌سوزی‌های گسترده از پیامدهای مستقیم تغییر اقلیم هستند که می‌توانند آثار منفی قابل توجهی بر جاذبه‌های گردشگری، تقویم سفر و اقتصاد این صنعت برجای بگذارند (رحیمی و همکاران، ۱۴۰۲). تغییر اقلیم نه تنها شرایط زیست‌اقلیمی را محدود می‌کند، بلکه در بسیاری موارد به تخریب جاذبه‌های طبیعی، جابه‌جایی تقویم گردشگری و حتی انتقال قلمروهای گردشگری به مناطق جدید منجر می‌شود. این تغییرات می‌تواند مناطق گردشگری فعلی را با تهدید جدی مواجه ساخته و در عین حال طبقه‌بندی جغرافیایی گردشگری را نیز دستخوش دگرگونی کند (رحیمی و همکاران، ۱۴۰۲).

تأثیر تغییرات اقلیمی بر همه کشورها یکسان نیست، با این حال انتظار می‌رود کشورهای در حال توسعه آسیب‌های بیشتری از این پدیده متحمل شوند (عساکره و جعفرزاده، ۱۴۰۲). از آنجا که شرایط اقلیمی نقش مهمی در انتخاب مقصد گردشگران دارد، مطالعات متعددی در ایران و دیگر نقاط جهان پیرامون ارتباط اقلیم و گردشگری انجام شده است (رنجبر و همکاران، ۱۳۹۰). یافته‌های پژوهش‌های زیست‌محیطی نشان می‌دهد که میزان آسیب‌پذیری ایران در برابر تغییرات اقلیمی بیش از متوسط جهانی است (شیخ‌زاده و همکاران، ۱۴۰۴). تغییرات اقلیمی در ایران با بروز ناهنجاری‌های جوی نظیر بارش‌های ناگهانی و سیلابی، کاهش بارش در مناطق مرطوب کوهستانی، بارش سنگین برف در مناطق خشک و گرم، افزایش میانگین دما در بسیاری از شهرها و گسترش خشکسالی همراه بوده است (شیخ‌زاده و همکاران، ۱۴۰۴). کاهش بارش همراه با افزایش دما بیانگر آن است که ایران طی چند دههٔ گذشته به صورت تصاعدی خشک‌تر شده است؛ این در حالی است که برخلاف روند جهانی، بارش در ایران کاهش یافته است (عساکره و فرجزاده، ۱۴۰۲). به همین دلیل ایران یکی از کشورهایی است که بیشترین آسیب‌پذیری را از تغییرات اقلیمی تجربه خواهد کرد. این کشور به طور طبیعی جزو مناطق کم‌باران جهان محسوب می‌شود؛ به طوری که میزان بارندگی سالانهٔ آن حدود ۲۷۰ میلی‌متر است، یعنی تقریباً یک‌سوم متوسط جهانی، و همین امر ایران را با بحران جدی کم‌آبی مواجه ساخته است (عساکره و فرجزاده، ۱۴۰۲). شواهد نشان می‌دهد که تغییر اقلیم و گرمایش جهانی موجب دگرگونی شاخص‌های زیست‌اقلیمی خواهد شد و در نتیجه، تقویم گردشگری نیز تغییرات محسوسی پیدا می‌کند. برای نمونه، در مناطق جنوبی ایران فصول مناسب برای گردشگری کوتاه‌تر شده است، در حالی که در نواحی کوهستانی، این بازه زمانی طولانی‌تر خواهد شد. به عنوان مثال، در استان چهارمحال و

بختیاری پیش‌بینی می‌شود تابستان‌ها طولانی‌تر و زمستان‌ها معتدل‌تر گردد. همچنین در مناطق شمال‌غربی ایران مانند جنگل‌های ارسباران، زمان مناسب گردشگری که پیش‌تر به دو ماه تیر و مرداد محدود بود، به چهار ماه شامل خرداد تا شهریور افزایش خواهد یافت (رحیمی و همکاران، ۱۴۰۲).

نتیجه‌گیری

طبق پژوهشی که سمانه عابدی و ملیحه صداقت انجام دادند، هدف بررسی اثرات متغیرهای اقلیمی بر تقاضای گردشگری بین‌المللی در شهرهای ایران بود. این مطالعه با استفاده از روش اقتصاد سنجی الگوی خود توضیح با وقفه‌های گسترده (ARDL)و داده‌های سال‌های ۱۳۶۰ تا ۱۳۹۷ انجام شد. نتایج نشان داد که تغییرات اقلیمی شامل افزایش دما، تغییر میزان بارندگی و افزایش انتشار دی اکسید کربن تأثیر منفی و معناداری بر تعداد گردشگران خارجی ورودی به شهرهای ایران دارد؛ به طور مشخص، هر یک درصد افزایش در دما، میزان بارندگی و انتشار دی اکسید کربن به ترتیب موجب کاهش ۰.۲۳، ۱.۱ و ۰.۴۵ درصدی در تقاضای گردشگری می‌شود. این یافته‌ها نشان می‌دهد که تغییرات اقلیمی می‌تواند به طور ملموسی تقاضای گردشگری را کاهش دهد و بدین ترتیب مدیریت پایدار گردشگری و سیاست‌گذاری‌های مقابله با تغییرات اقلیمی برای حفظ و توسعه صنعت گردشگری در ایران ضروری است (عابدی و صداقت، ۱۴۰۰).

در تحقیقی دیگر که توسط امیر دادرس مقدم،سید مهدی حسینی،محسن حمیدیان پور و مهسا سیاحی انجام شده و در سال ۱۴۰۰منتشر گردیده،تاثیر عوامل اقلیمی بر صنعت گردشگری در مناطق مختلف ایران مورد بررسی قرار گرفته است.برای این منظور از روش های مدل پانل GLS، GMM وDOLS بهره گرفته شده است.نتایج نشان داد که در مناطق با اقلیم کوهپایه های غربی،متغیر اقلیمی بارندگی تاثیر منفی بر تعداد گردشگران دارد که به این معناست که در این منطقه افزایش بارندگی منجر به کاهش تعداد گردشگران می شود. همچنین در مناطق با اقلیم کوهپایه های شرقی،میزان بارندگی و میانگین دما اثر معناداری بر گردشگری دارد به گونه ای که با افزایش بارندگی، تعداد گردشگران کاهش یافته و با افزایش میانگین دما،تعداد گردشگران افزایش می یابدو بطور کلی در این منطقه زمانی که به سمت فصول گرم تر با بارندگی کمتر پیش می رویم تعداد گردشگر بیشتری جذب خواهد شد(دادرس مقدم و همکاران ۱۴۰۰).

طبق پژوهشی که توحید احمدزاده و همکاران در بهار ۱۴۰۴ با هدف بررسی شرایط اقلیم گردشگری استان اردبیل تحت سناریوهای تغییر اقلیم با استفاده از شاخص دمای معادل فیزیولوژیک (PET) انجام دادند، داده‌های اقلیمی ۸ ایستگاه همدید به مدت ۳۰ سال (۱۹۹۱ تا ۲۰۲۰) جمع‌آوری و تحلیل شد و شرایط اقلیمی استان در دوره مرجع و همچنین تحت

سناریوهایRCP2.6 ، RCP4.5 و RCP8.5 برای دوره ۲۰۲۰ تا ۲۰۵۰ بررسی گردید. منطقه مورد مطالعه استان اردبیل در شمال غرب ایران است. نتایج نشان داد که تغییر اقلیم باعث تغییرات قابل توجهی در شرایط اقلیم گردشگری استان می‌شود؛ افزایش دما و تغییرات فصلی مطلوبیت اقلیمی برخی مناطق را تحت تأثیر قرار داده است؛ در فصل سرد، مناطق خیلی سرد تغییر کرده و بر جذابیت گردشگری زمستانی اثرگذار است و در فصل تابستان نیز دمای بالاتر ممکن است باعث کاهش یا افزایش جذابیت گردشگری در نقاط مختلف شود. به طور کلی، تغییر اقلیم منجر به تغییرات مکانی و زمانی شرایط اقلیمی گردشگری شده و نیازمند برنامه‌ریزی و مدیریت بهینه برای توسعه گردشگری پایدار است(احمدزاده و همکاران ۱۴۰۴).

تحقیقی دیگرتوسط صادق مختاری چلچه و همکاران در سال ۱۴۰۲ با هدف بررسی میزان تاب‌آوری معیشت روستاییان در برابر تغییرات اقلیمی در مناطق گردشگرپذیر انجام شده است. این پژوهش به روش توصیفی-تحلیلی و با استفاده از پرسشنامه‌های ساخت یافته میان ۳۵۴ خانوار در ۱۱ روستای گردشگری شهرستان سامان انجام شده است. تحلیل داده‌ها با استفاده از آزمون‌های آماری (مانند آزمون t وANOVA) در نرم‌افزار SPSS صورت گرفت. نتایج نشان داد که تغییرات اقلیمی اثرات منفی جدی بر بخش گردشگری منطقه داشته است؛ از جمله کاهش منابع آب، آسیب به پوشش گیاهی، کاهش جذابیت‌های طبیعی، و کاهش فصل‌های مناسب برای سفر. این وضعیت منجر به کاهش درآمدهای فصلی گردشگری، افزایش آسیب‌پذیری معیشتی خانوارها و تضعیف اقتصاد محلی شده است. از نظر شاخص‌های تاب‌آوری، ظرفیت تحمل با میانگین بالاتر از ۳ (مثبت) تنها شاخص نسبتاً مناسب بود و این بیشتر به دلیل سرمایه اجتماعی در جوامع محلی بود. در مقابل، شاخص‌های خودسازماندهی، ظرفیت یادگیری، و سرمایه‌های اقتصادی، نهادی و فیزیکی در وضعیت ضعیف قرار داشتند. این نتایج نشان‌دهنده ناپایداری ساختار معیشتی روستاهای گردشگری در برابر تغییرات اقلیمی است و بر ضرورت مداخله نهادی، برنامه‌ریزی سازگار با اقلیم و تقویت آموزش و منابع درآمدی متنوع برای روستاها تأکید دارد.(مختاری‌چلچه و همکاران، ۱۴۰۲).

منابع

۱- محمدی، ح.، نگهبان، س.، سلیم‌منش، ج.، و محمودی، ا. (۱۳۹۰). بررسی و ارزیابی تاثیرات تغییر اقلیم بر توریسم شهر یزد با استفاده از مدل‌های برآورد آسایش اقلیمی. جغرافیا (دانشگاه آزاد اسلامی)، ۱۷(۴)، ۶۶-۸۳.

۲-دادرس مقدم، ا.، حسینی، س. م.، حمیدیان پور، م.، و سیاحی، م. (۱۴۰۰). تأثیر عوامل اقلیمی و اقتصادی بر صنعت گردشگری در مناطق مختلف ایران (با روش حداقل مربعات معمولی پویا و گستاور تعمیم یافته در دوره زمانی ۱۳۸۵- ۱۳۹۷). محیط زیست طبیعی، منابع طبیعی ایران، دوره ۷۴، شماره ۱، صفحات ۵۴-۴۱.

۳-عباسی، ع.، و خسروی، م. (۱۳۹۳). ارزیابی شرایط اقلیمی تالاب گندمان از منظر گردشگری بر اساس شاخص اقلیم-گردشگری .TCI اولین همایش بین‌المللی علمی-راهبردی توسعه گردشگری جمهوری اسلامی ایران؛ چالش‌ها و چشم‌اندازها، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف‌آباد.

۴-نیک بین، م. (۱۴۰۳). شناسایی موانع تحقق سیاست های توسعهٔ پایدار گردشگری در ایران. گردشگری و اوقات فراغت، ۹(۱۷)، ۱-۱۹.

۵-پردازیده، ح.، عبدالله‌زاده، م.، &پورعبدی، ل. (۱۳۹۲). مطالعه شرایط اقلیمی برای توسعه توریسم با استفاده از شاخص TCI(نمونه موردی استان آذربایجان شرقی). جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۲۴(۴۹)، ۱۰۸-۸۹.

۶-رنجبر، ف.، مقبل، م.، و ارسلانی، م. (۱۳۸۹). بررسی ارتباط شرایط اقلیمی با روند گردشگری سالانه در شهرستان مرودشت. فصل نامه جغرافیای طبیعی، ۷(۳)، ۷۹.

۷-عساکره، ف. و فرح‌زاده، ز. (۱۴۰۲). سنجش آسیب‌پذیری استان‌های ایران از تغییرات اقلیمی. فصلنامه علمی-پژوهشی اقتصاد کشاورزی، ویژه‌نامه بهار، ۶۰(۱)، ۸۹-۶۰.

۸-شیخ‌زاده، ک.، گندمکار، ا. و عباسی، ع. (۱۴۰۴). شناخت روند تغییرات کوتاه مدت و بلند مدت اقلیم آسایش گردشگری ایران. فصلنامه جغرافیا و آینده پژوهی منطقه‌ای، ۳(۲)، ۱-۲۰

۹-مختاری چلچه، ص.، نراهانی، ح.، عینعالی، ج. و چراغی، م. (۱۴۰۳). ارزیابی اثرات تنوع فعالیت‌های اقتصادی بر تاب‌آوری جوامع روستایی در برابر تغییرات اقلیمی (منطقه مورد مطالعه: روستاهای هدف گردشگری شهرستان سامان). مجله جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای، ۲۲(۲)، ۵۶-۳۷.

۱۰-رحیمی، د.، بشیریان، ف.، محمدی، ر. و پردنچانی، م. ر. (۱۴۰۳). ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر گردشگری استان خوزستان. مجله علمی پژوهشی مهندسی اکوسیستم پایداری، ۱۲(۲)، ۷۳-۸۶.

۱۱-عبیدی، ط.، کاظمی راد، ل. و عبیدی، ر. (۱۴۰۱). تعیین تقویم گردشگری با استفاده از شاخص اقلیمی گردشگری (TCI)و شاخص اقلیمی-تعطیلات (HCI) (مطالعه موردی: آستارا، استان گیلان). دو فصلنامه مطالعات اجتماعی گردشگری، ۱۰(۱۹)، ۱۷۶-۱۴۵.

۱۲-شاهسون قره‌غونی، م.، دوستان، ر.، و بابائیان، ا. (۲۰۲۳). دگرگونی نواحی اقلیمی ایران طی بیش از نیم‌قرن اخیر (1961–2022).پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۵۶.

۱۳- عابدی, سمانه, صداقت & ,ملیحه. (۲۰۲۱). ارزیابی اثرات تغییرات اقلیم بر تقاضای گردشگری در شهرهای ایران. اقتصاد و مدیریت شهری, ۳۷(۹), ۱-۱۸.

۱۴-مظلوم، ک.، ذوالفقاری، ح.، اوجی، ر.، و ماتزراکسیس، آ. (۱۴۰۲). تأثیر گرمایش جهانی بر اقلیم گردشگری ایران . فصلنامه علمی فضای جغرافیایی ,۲۳)۸۳ ,(۸۵-۱۰۸.

۱۵-احمدزاده, توحید, رضائی & ,زین‌العابدین. (۲۰۲۵). اقلیم گردشگری استان اردبیل تحت سناریوی تغییر اقلیم. جغرافیا و مطالعات محیطی, ۵۳(۱۴), ۵۷-۷۵.

۱۶-مختاری‌چلچه, فراهانی, عینالی, جمشید & ,چراغی. (۲۰۲۳). ارزیابی چارچوب تاب‌آوری معیشتی در برابر تغییرات اقلیمی (موردپژوهی: روستاهای منطقه گردشگری سامان). کاوش های جغرافیایی مناطق بیابانی, ۱۸(۱۱), ۱-۱۸.

A Literature Review on the Impact of Climate Change on Iran's Tourism Industry

Amirmohammad Hassanzadegan [1]

B.Sc. Student, Rangeland and Watershed Management Group, Faculty of Natural Resources, University of Urmia, Iran

Amirmohammadhassanzadegan@gmail.com

Abstract

the tourism industry, as one of the most important economic sectors in Iran, plays a significant role in the country's economic and social development due to its climatic diversity and natural and cultural attractions. However, climate change, as a major global challenge, has considerable impacts on this industry, potentially leading to reduced tourist arrivals and altered travel patterns. This paper reviews various studies conducted in Iran to examine the effects of climate change on the tourism industry. The results indicate that rising temperatures and changes in precipitation significantly affect tourism demand, and different regions of the country respond differently depending on their climatic conditions. Given Iran's high vulnerability to climate change, this study can also provide a foundation for developing effective and sustainable management policies to preserve and strengthen the tourism industry in the face of climatic changes.

Keywords: Climate Change, Tourism, Sustainable Development, Tourism Demand

ارزیابی تغییرپذیری اقلیمی گذشته و آینده ایران با استفاده از داده‌های تاریخی و سناریوهای SSP

فاطمه کرمی*[۱]، طیبه اکبری ازیرانی[۲]

۱- دانشجوی دکتری آب‌وهواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.(fat_karami@sbu.ac.ir)

۲-استادیار آب‌وهواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

چکیده

پدیده گرمایش جهانی و تغییرات اقلیمی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی قرن حاضر به شمار می‌روند و آثار عمیقی بر جوامع انسانی، اقتصادی و طبیعی بر جای گذاشته‌اند. ایران با اقلیم خشک و نیمه‌خشک و به‌ویژه سواحل جنوبی آن، از مناطق بسیار آسیب‌پذیر محسوب می‌شود. این پژوهش با بهره‌گیری از داده‌های پروژه جهانی CMIP6 و پورتال اقلیم بانک جهانی، داده‌های تاریخی، روندهای آینده دمای هوا و تغییرات سطح آب دریا در ایران را تا سال ۲۱۰۰ تحت سناریوهای اقلیمی مختلف (SSP1-2.6، SSP2-4.5، SSP3-7.0 و SSP5-8.5)و بررسی می‌کند. تحلیل‌ها در سه دوره آینده‌نگر (۲۰۲۱–۲۰۴۰، ۲۰۴۱–۲۰۶۰ و ۲۰۸۱–۲۱۰۰) نسبت به دوره پایه (۱۹۹۱–۲۰۲۰) صورت گرفته است. نتایج نشان می‌دهد حتی در سناریوی خوش‌بینانه، افزایش دما ادامه‌دار خواهد بود و تا پایان قرن بیش از ۲ درجه سلسیوس افزایش می‌یابد. در سناریوی پرانتشار، افزایش دما تا حدود ۷.۵ درجه سلسیوس در تابستان‌های آینده محتمل است که پیامدهایی چون شدت‌گیری موج‌های گرما، کاهش منابع آب و تهدید جدی برای سلامت و کشاورزی خواهد داشت. همچنین، سطح آب خلیج‌فارس و دریای عمان تحت تأثیر گرمایش جهانی می‌تواند روندی افزایشی داشته باشد. این یافته‌ها می‌تواند پایه‌ای برای سیاست‌گذاری‌های اقلیمی، مدیریت مناطق ساحلی و برنامه‌ریزی ملی باشد.

واژگان کلیدی: ایران، گرمایش جهانی، روندهای دمایی، سناریوهایSSP ، تغییرات اقلیمی

مقدمه

دگرگونی‌های اقلیمی و پدیده گرمایش جهانی از جمله مهم‌ترین چالش‌ها و تهدیدهای زیست‌محیطی قرن حاضر محسوب می‌شوند و پیامدهای گسترده‌ای بر نظام‌های طبیعی، انسانی و اقتصادی برجای می‌گذارند .(Change, 2018) این تغییرات اقلیمی نمادی از تعارض بنیادین میان منافع اقتصادی و الزامات حفاظت محیط‌زیست هستند؛ تعارضی که مدیریت و کاهش آثار آن نیازمند رویکردهای پیچیده، پرهزینه و غالباً چالش‌برانگیز است. از منظر علمی، هرگونه ناهنجاری اقلیمی که منجر به اختلالات جدی در زندگی انسان‌ها، معیشت، امنیت غذایی یا زیرساخت‌ها شود، در دسته بلایای طبیعی یا اقلیمی قرار می‌گیرد. شواهد علمی نشان می‌دهند که گرمایش جهانی واقعیتی غیرقابل انکار است که طی دهه‌های اخیر توجه گسترده دولت‌ها، جوامع علمی و افکار عمومی را به خود جلب کرده است.(Gou et al., 2021) .

شواهد علمی و میدانی نشان می‌دهند که تغییرات اقلیمی و روند فزاینده گرمایش جهانی نه‌تنها تهدیدی جدی برای پایداری اکوسیستم‌ها محسوب می‌شوند، بلکه منجر به بروز مشکلات گسترده‌ای در سطح جهانی شده‌اند. از جمله این مشکلات می‌توان به افزایش فراوانی و شدت رخدادهایی مانند موج‌های گرما، خشکسالی‌های شدید، بارش‌های ناگهانی و سیلاب‌های مخرب اشاره کرد؛ پدیده‌هایی که به‌طور مستقیم و عمیق کیفیت زندگی انسان‌ها را تحت تأثیر قرار داده و زیرساخت‌های حیاتی نظیر حمل‌ونقل، انرژی، منابع آب و سیستم‌های بهداشتی را با آسیب‌های جدی مواجه ساخته‌اند (زرین و داداشعلی‌رودباری، ۱۴۰۱؛ احمدی و کمانگر، ۱۴۰۲). افزایش مداوم غلظت گازهای گلخانه‌ای در جو زمین، که عمدتاً ناشی از فعالیت‌های صنعتی، کشاورزی و مصرف سوخت‌های فسیلی است، موجب تغییرات قابل توجه در متغیرهای اقلیمی کلان شده است. پیش‌بینی‌های حاصل از مدل‌های اقلیمی نشان می‌دهند که در صورت عدم اتخاذ اقدامات مؤثر و فوری، این روند ادامه خواهد یافت و پیامدهای جدید و پیچیده‌ای از مخاطرات اقلیمی را به جوامع انسانی تحمیل خواهد کرد (احمدی و کرمی، ۱۴۰۱).

با توجه به تشدید آثار تغییر اقلیم و روند افزایشی دما در دهه‌های اخیر، انجام پژوهش‌هایی با رویکرد ترکیبی آینده‌نگر و مبتنی بر سناریوهای اقلیمی، همراه با تحلیل داده‌های تاریخی، ضرورتی غیرقابل انکار در سطح ملی و منطقه‌ای محسوب می‌شود (Grose et al., 2020) . مطالعه حاضر با هدف ارزیابی تغییرپذیری اقلیمی گذشته و آینده در سراسر ایران طراحی شده است و تلاش می‌کند تا با بهره‌گیری از داده‌های تاریخی از سال ۱۹۵۰ و سناریوهای مختلف مسیرهای اجتماعی-اقتصادی مشترک (SSP) تا افق سال ۲۱۰۰، تصویری جامع، کمی و داده‌محور از پیامدهای احتمالی تغییر اقلیم ارائه دهد. سناریوهای SSP به‌عنوان چارچوبی نوین، بر پایه ترکیبی از روندهای جمعیتی، اقتصادی، فناوری و سیاست‌گذاری‌های زیست‌محیطی شکل گرفته‌اند و امکان شبیه‌سازی مسیرهای متفاوت انتشار گازهای گلخانه‌ای و ارزیابی آثار اقلیمی مرتبط

با آن‌ها را فراهم می‌کنند. این پژوهش با تمرکز ویژه بر تحلیل هم‌زمان گرمایش اقلیم در مقیاس ملی و نوسانات متغیرهای اقلیمی، از جمله دما و تغییرات سطح آب دریا، تلاش دارد تا از منظر علمی و آینده‌نگر شناختی روشن از ریسک‌های اقلیمی و پیامدهای آن برای مناطق مختلف ایران ارائه کند. نتایج این مطالعه می‌تواند مبنای قابل اتکایی برای برنامه‌ریزی‌های ملی، مدیریت منابع طبیعی و ساحلی، پیشگیری از بلایای اقلیمی و تدوین سیاست‌های سازگار با تغییرات اقلیمی آینده باشد.

پیش‌بینی تغییرات اقلیمی با استفاده از سناریوهای اقلیمی، در سال‌های اخیر به یکی از رویکردهای اصلی در مطالعات اقلیم‌شناسی بدل شده است. با توجه به آسیب‌پذیری بالای ایران در برابر تغییرات دما و بارش، بررسی پژوهش‌های پیشین در این زمینه، در شناخت روندها، خلأها و ضرورت انجام مطالعات دقیق‌تر و بومی شده نقشی کلیدی دارد. پالازی و همکاران (۲۰۱۳) در پژوهشی با بهره‌گیری از مدل‌های اقلیمی، به شبیه‌سازی تغییرات بارش در نواحی کوهستانی هندوکش، قره‌قوم و هیمالیا تحت دو سناریوی انتشار RCP4.5 و RCP8.5 پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که در دو منطقه هندوکش و قره‌قوم، علی‌رغم نوسانات میان‌سالی، روند تغییرات بارش فاقد معناداری آماری در بازه بلندمدت است. در مقابل، منطقه هیمالیا با روندی افزایشی در مقادیر بارندگی مواجه بوده که این افزایش تحت سناریوی RCP8.5 چشمگیرتر گزارش شده است. یافته‌های مذکور بیانگر تفاوت‌های مکانی محسوس در پاسخ رژیم‌های بارشی نواحی مرتفع آسیا به سناریوهای مختلف تغییر اقلیم است. جنسن و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از مدل‌سازی اقلیمی و به‌کارگیری سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5، به بررسی و شبیه‌سازی روند تغییرات بارش‌های فرین در ایالات متحده پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که در هر دو سناریوی مذکور، بارش‌های شدید و حدی در بسیاری از نواحی ایالات متحده روندی افزایشی خواهند داشت. این افزایش به‌ویژه تحت سناریوی RCP8.5، که معرف شرایط بدون مداخله در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای است، شدت بیشتری پیدا می‌کند. محمود و بابل (۲۰۱۴) با هدف بررسی تغییرات فرین‌های دمایی در حوضه آبریز رودخانه ژِلیوم، از مدل آماری SDSM برای ریزمقیاس‌سازی داده‌های اقلیمی بهره گرفتند. در این مطالعه، داده‌های حداقل دمای روزانه از ۱۴ ایستگاه هواشناسی منطقه جمع‌آوری شده و با استفاده از سناریوهای انتشار A2 و B2 مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که در دوره‌های آتی، تعداد روزها و شب‌های گرم با روندی افزایشی همراه بوده، در حالی که روزها و شب‌های سرد کاهش قابل توجهی را تجربه خواهند کرد. کاظمی و همکاران (۲۰۱۴) در مطالعه‌ای تطبیقی، به مقایسه عملکرد دو مدل اقلیمی ECHAM5 و SDSM در شبیه‌سازی داده‌های دمای روزانه کشور پاکستان پرداختند. در این پژوهش، داده‌های مشاهداتی دما با خروجی‌های حاصل از هر دو مدل مورد ارزیابی قرار گرفت تا میزان دقت و قابلیت اعتماد آن‌ها در بازتولید الگوهای اقلیمی بررسی شود. نتایج تحقیق نشان داد که هر دو مدل توانسته‌اند تطابق قابل قبولی با داده‌های واقعی برقرار کنند، اما مدل آماری SDSM عملکرد دقیق‌تر و نتایج بهتری را نسبت به مدل جهانی ECHAM5 ارائه داده است. صیاد و همکاران (۲۰۱۶) در پژوهشی به بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر روند دمای کمینه و بیشینه در شهر بندر اسکندریه واقع در

شمال مصر پرداختند. در این مطالعه از مدل ریزمقیاس‌نمایی SDSM و سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای RCP برای پیش‌بینی تغییرات دمایی در افق بلندمدت استفاده شد. یافته‌های تحقیق نشان داد که هر دو مؤلفه دمای کمینه و بیشینه در منطقه مورد مطالعه، تا پایان قرن بیست‌ویکم روندی افزایشی خواهند داشت. ننگر و همکاران (۲۰۱۸) در مطالعه‌ای با هدف ارزیابی عملکرد مدل‌های منطقه‌ای CORDEX در شبیه‌سازی دمای متوسط فصلی در منطقه کوهستانی هیمالیا، به بررسی میزان دقت این مدل‌ها در بازتولید اقلیم کنونی پرداختند. نتایج تحقیق نشان داد که در تمامی مدل‌های مورد استفاده، یک اریب سرد سیستماتیک بین ۶- تا ۸- درجه سلسیوس مشاهده شده است که بیانگر گرایش مدل‌ها به کم‌برآورد دمای واقعی منطقه است. با این حال، علی‌رغم این سوگیری دمایی، مدل‌های RCM با تفکیک فضایی بالا توانسته‌اند ساختارهای مکانی و ویژگی‌های اقلیمی منطقه را به‌خوبی بازنمایی کنند. عباسی و همکاران (۱۳۹۱) در پژوهشی با هدف بررسی چشم‌انداز اقلیمی ایران، اقدام به ریزمقیاس‌نمایی داده‌های دما و بارش کشور با بهره‌گیری از دو مدل گردش عمومی جو، یعنی HadCM2 و ECHAM4 نمودند. نتایج حاصل از این مطالعه حاکی از آن است که هر دو مدل، روند افزایشی دما را تا سال ۲۱۰۰ برای کشور ایران پیش‌بینی می‌کنند، که بیانگر تشدید گرمایش جهانی در سطح ملی است. با این حال، در خصوص بارش، پیش‌بینی‌ها متفاوت بود: مدل HadCM2 کاهش بارش و در مقابل، مدل ECHAM4 افزایش بارش را برای افق آینده نشان داد. باروتی و همکاران (۱۳۹۷) در مطالعه‌ای به شبیه‌سازی تغییرات بارش در حوضه آبریز رود شور با استفاده از سناریوهای اقلیمیA1B ، A2و B1 پرداختند. این پژوهش با هدف تحلیل روندهای آتی بارش در بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۹۰ انجام شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که بارش در این حوضه در اغلب ماه‌ها و فصول، به‌ویژه در فصل تابستان، با کاهش قابل توجهی مواجه خواهد بود. عطایی و همکاران (۱۴۰۰) در پژوهشی با هدف پیش‌نگری تغییرات اقلیمی در حوضه آبریز کشف‌رود، از خروجی مدل‌های اقلیمی سری CMIP برای دوره زمانی ۲۰۲۱ تا ۲۰۵۰ استفاده نمودند. در این مطالعه، روندهای آینده دما و بارش در مقیاس فصلی مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج حاصل از بررسی‌ها نشان داد که میانگین دما در تمامی فصول با روندی افزایشی همراه خواهد بود، که نشانه‌ای از تشدید گرمایش منطقه‌ای در دهه‌های آتی است. همچنین، یافته‌ها بیانگر آن بود که تغییرات بارش دارای نوسانات شدید و پراکندگی زمانی قابل توجهی خواهد بود، به‌گونه‌ای که پیش‌بینی یک روند قطعی و منسجم برای بارش در این حوضه دشوار است.

نوآوری این پژوهش در آن است که با تلفیق داده‌های تاریخی بلندمدت (از سال ۱۹۵۰) و سناریوهای نوین مسیرهای اجتماعی–اقتصادی مشترک (SSP) تا افق ۲۱۰۰، تصویری آینده‌نگر و مبتنی بر شواهد از تغییرات اقلیمی در ایران ترسیم می‌کند. برخلاف بسیاری از مطالعات پیشین که تنها به تحلیل روندهای گذشته یا پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت بسنده کرده‌اند، این پژوهش رویکردی جامع و ترکیبی اتخاذ نموده و با تحلیل هم‌زمان متغیرهای کلیدی اقلیمی نظیر دما و تغییرات سطح آب دریا، چارچوبی داده‌محور برای شناخت ریسک‌های آتی فراهم می‌سازد.

منطقه مورد مطالعه

ایران با وسعتی حدود ۱.۶۴۸.۰۰۰ کیلومتر مربع در موقعیتی راهبردی در جنوب‌غرب آسیا و در قلب خاورمیانه قرار دارد. این کشور بین عرض‌های جغرافیایی ۲۵ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۳۹ درجه و ۴۷ دقیقه شمالی و طول‌های ۴۴ درجه و ۵ دقیقه تا ۶۳ درجه و ۱۸ دقیقه شرقی گسترده شده است (شکل ۱). از منظر اقلیمی، موقعیت جغرافیایی ایران در محدوده‌ای انتقالی میان سامانه‌های آب‌وهوایی حاره‌ای و بین‌حاره‌ای واقع شده است؛ به‌گونه‌ای که اغلب ویژگی‌های اقلیمی کشور تحت تأثیر تعامل پیچیده و گذرا میان این دو رژیم عمده قرار دارد (سلیقه، ۱۳۹۶). بر اساس تازه‌ترین آمارها، جمعیت ایران در سال ۱۴۰۰ بالغ بر ۸۴ میلیون و ۵۵ هزار نفر برآورد شده است که از این تعداد، حدود ۶۳ میلیون و ۸۷۶ هزار نفر در مناطق شهری و نزدیک به ۲۰ میلیون و ۱۷۹ هزار نفر در نواحی روستایی ساکن هستند (مرکز آمار ایران، ۱۴۰۰). ویژگی‌های توپوگرافی ایران نیز بسیار متنوع است؛ از سطح دریاهای آزاد در جنوب تا بلندترین قله‌های رشته‌کوه‌های البرز و زاگرس در شمال و غرب کشور. ارتفاعات ایران از صفر متر در مناطق ساحلی تا ۵۵۹۵ متر در قله دماوند متغیر است، که این اختلاف ارتفاع گسترده باعث ایجاد تنوع زیست‌محیطی و اقلیمی قابل توجه در سراسر کشور شده است. این ناهمواری‌ها، همراه با موقعیت جغرافیایی و شرایط آب‌وهوایی، نقش مهمی در شکل‌گیری الگوهای اقلیمی، پراکنش جمعیت و بهره‌برداری از منابع طبیعی ایفا می‌کنند. خلیج فارس و دریای عمان به‌عنوان دو حوضه آبی مهم در جنوب ایران، نقش راهبردی و اقلیمی ویژه‌ای در منطقه ایفا می‌کنند. خلیج فارس با گستره‌ای نیمه‌بسته و کم‌عمق، نه تنها یکی از غنی‌ترین منابع انرژی جهان را در خود جای داده، بلکه بر شرایط رطوبتی و دمایی نواحی جنوبی کشور اثرگذار است. در سوی دیگر، دریای عمان با ارتباط مستقیم به اقیانوس هند، مسیری حیاتی برای تبادل جریان‌های آبی، تجاری و اقلیمی فراهم می‌آورد. ترکیب این دو پهنه آبی، علاوه بر اهمیت ژئوپلیتیکی و اقتصادی، در شکل‌گیری الگوهای اقلیمی جنوب ایران، از جمله رژیم بارشی، رطوبتی و دمایی، نقشی اساسی دارد (محمودی و همکاران، ۱۴۰۴).

داده و روش‌ها

این پژوهش با هدف پیش‌بینی تغییرات اقلیمی آینده در ایران تا سال ۲۱۰۰، بر اساس سناریوهای مسیرهای اجتماعی-اقتصادی مشترک (Shared Socioeconomic Pathways - SSP) طراحی شده است. برای انجام این تحلیل، علاوه بر داده‌های تاریخی دمای سالانه هوا برای بازه زمانی ۱۹۵۰ تا ۲۰۲۰، از داده‌های ارائه‌شده در بخش "پیش‌بینی‌های اقلیمی"

پورتال دانش اقلیم بانک جهانی[111] بهره گرفته شد. داده‌های تاریخی دما از شبکه‌های پایش ملی جمع‌آوری و استانداردسازی شده و به‌عنوان دوره پایه طولانی‌مدت برای ارزیابی روندهای تغییرات اقلیمی مورد استفاده قرار گرفت.

پایگاه داده بانک جهانی خروجی مدل‌های اقلیمی نسل ششم (CMIP6) را در قالب مجموعه مدل‌های میانگین‌گیری‌شده (Ensemble)ارائه می‌دهد که امکان تحلیل تغییرات اقلیمی در مقیاس ملی و منطقه‌ای را فراهم می‌سازد. در این تحقیق، تمرکز بر دو متغیر اقلیمی اصلی شامل دمای میانگین سالانه سطح زمین(بر حسب درجه سلسیوس) و تغییرات سطح آب دریای عمان و سواحل خلیج فارس (بر حسب متر) بوده است. داده‌ها برای کل کشور ایران و برای بازه زمانی بلندمدت دهه ۲۰۲۰ تا ۲۱۰۰ تحت چهار سناریوی اصلی SSP شامل SSP1-2.6 ، SSP2-4.5، SSP3-7.0و SSP5-8.5 استخراج شده‌اند. این سناریوها به‌ترتیب نمایانگر آینده‌ای با توسعه پایدار، روند متوسط توسعه، چالش‌های زیاد در مسیر پایداری، و رشد ناپایدار با انتشار شدید گازهای گلخانه‌ای هستند .به‌منظور تحلیل دقیق‌تر، تغییرات اقلیمی طی سه دوره زمانی آینده یعنی آینده نزدیک (۲۰۲۱–۲۰۴۰)، میانه قرن (۲۰۴۱–۲۰۶۰) و آینده دور (۲۰۸۱–۲۱۰۰) نسبت به دوره پایه تاریخی طولانی‌مدت (۱۹۵۰–۲۰۲۰) و دوره کوتاه‌مدت (۱۹۹۱–۲۰۲۰) بررسی شده است. نمودارهای خطی ارائه‌شده روند تغییرات میانگین دما و تغییرات سطح آب دریای سواحل جنوبی را در سطح ملی و به تفکیک هر سناریو نمایش می‌دهند.

از آنجا که این نمودارها و نقشه‌ها پیش‌تر توسط تیم‌های تخصصی اقلیم‌شناسی و مدل‌سازی آب‌وهوا در چارچوب پروژه CMIP6تولید و تأیید شده‌اند، از آن‌ها بدون انجام پردازش مجدد یا تحلیل آماری ثانویه استفاده شده است. در فرایند تحلیل، بر خوانش علمی، تفسیر مقایسه‌ای و نتیجه‌گیری بر پایه الگوهای بصری ارائه‌شده تمرکز شده است؛ به‌گونه‌ای که روندهای گرمایش، تغییر در الگوهای سطح آب و تفاوت بین سناریوهای مختلف با رویکرد اقلیم‌شناسی تفسیری مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. این روش علاوه بر بهره‌گیری از گراف‌ها و نقشه‌های استاندارد، امکان تحلیل سریع، دقیق و مستند تغییرات اقلیمی را با تأکید بر چشم‌اندازهای گذشته و آینده برای ایران فراهم می‌سازد. داده‌های استفاده‌شده در این پژوهش از مجموعه داده‌های بازتحلیل ERA5 و مدل‌های اقلیمی نسل ششم (CMIP6) استخراج شده‌اند. این داده‌ها در مقیاس شبکه‌ای جهانی با وضوح مکانی تقریبی ۰.۲۵ درجه (معادل حدود ۳۱ کیلومتر) ارائه می‌شوند که در پورتال بانک جهانی به‌صورت میانگین‌گیری‌شده (Ensemble Mean) و در قالب نمودارها و نقشه‌های استاندارد منتشر شده‌اند. این وضوح مکانی امکان تحلیل تغییرات اقلیمی در مقیاس ملی و منطقه‌ای ایران را فراهم می‌کند. همچنین با توجه به اینکه داده‌های CMIP6ماهیتی کلان‌مقیاس دارند، در این مطالعه از روش ریزمقیاس‌نمایی آماری (Statistical Downscaling) مبتنی بر داده‌های ارائه‌شده در پورتال بانک جهانی استفاده شده است. این پورتال با بهره‌گیری از روش‌های استاندارد ریزمقیاس‌نمایی

111. https://climateknowledgeportal.worldbank.org

آماری، خروجی مدل‌های جهانی را به مقیاس ملی و منطقه‌ای تبدیل کرده و نتایج آن به‌صورت آماده در اختیار پژوهشگران قرار می‌گیرد. بنابراین، داده‌های استخراجی پیش‌تر تحت فرآیند ریزمقیاس‌نمایی قرار گرفته و قابلیت استفاده مستقیم در سطح ملی را دارند.

نتایج

روندهای دمایی تاریخی ایران

تحلیل روندهای سالانه میانگین دمای سطح زمین در کل پهنه ایران طی بازه زمانی ۱۹۵۰ تا ۲۰۲۲ نشان‌دهنده یک گرمایش بلندمدت و پایدار در این کشور است. داده‌های سالانه در شکل ۱ ، نوسانات طبیعی سالانه دما را به وضوح نمایش می‌دهند و نشان می‌دهند که با وجود تغییرات کوتاه‌مدت، روند کلی دما در طول بیش از هفت دهه افزایشی بوده است. خطوط روند محاسبه‌شده برای دوره‌های مختلف، تصویر دقیق‌تری از تغییرات دمایی ارائه می‌کنند و تحولات اقلیمی ایران را روشن می‌سازند. خط زرد که بازه ۱۹۵۱–۲۰۲۰ را نشان می‌دهد، بیانگر افزایش پیوسته میانگین دما از حدود ۱۶.۵ درجه سلسیوس در اوایل دهه ۱۹۵۰ به نزدیک ۱۹ درجه سلسیوس در سال‌های اخیر است و گویای گرمایش ملموس و بلندمدت در مقیاس ملی است. تمرکز بر بازه کوتاه‌مدت‌تر ۱۹۷۱–۲۰۲۰ با خط قرمز روشن نشان می‌دهد که شیب افزایش دما نسبت به دوره بلندمدت تندتر شده است؛ این نکته می‌تواند نشانه تشدید روند گرمایش در چند دهه اخیر باشد. بیشترین شتاب افزایش دما در سه دهه اخیر (۱۹۹۱–۲۰۲۰) با خط قرمز تیره قابل مشاهده است و با افزایش رخدادهای گرم‌تر و شدت گرمایش همخوانی دارد، که نشان می‌دهد روند تغییر اقلیم در ایران در دهه‌های اخیر به شکل قابل توجهی تشدید شده است. این الگوها حکایت از آن دارند که تغییرات دمایی ایران تنها نتیجه نوسانات طبیعی نیست، بلکه ترکیبی از عوامل انسانی مانند افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای، تغییرات کاربری زمین و فعالیت‌های صنعتی نیز در تشدید گرمایش نقش دارند. اهمیت این تحلیل در این است که نشان می‌دهد افزایش دما در طول دهه‌ها به صورت مستمر و معنادار بوده و پیش‌بینی روندهای آینده و برنامه‌ریزی سازگار با تغییر اقلیم بدون درک دقیق این روندها دشوار خواهد بود.

شکل ۲ روندهای ماهانه میانگین دمای سطح زمین در ایران را طی بازه‌های دهه‌ای از ۱۹۵۰ تا ۲۰۲۰ نمایش می‌دهد و با استفاده از نقشه حرارتی، تغییرات دما در طول سال‌ها و ماه‌ها به صورت تصویری و قابل تفسیر ارائه شده است. محور عمودی ماه‌های سال و محور افقی دوره‌های دهه‌ای را نشان می‌دهد و طیف رنگی از آبی تا قرمز بیانگر تغییرات دمایی نسبت به دوره مرجع است؛ رنگ‌های آبی بیانگر کاهش دما و رنگ‌های زرد تا قرمز بیانگر افزایش دما هستند. تحلیل نقشه نشان می‌دهد که در بازه‌های اولیه بررسی (۱۹۵۰–۱۹۷۰)، بخش اعظم ماه‌ها رنگ‌های آبی تا روشن را نشان می‌دهند، که بیانگر

شرایط نسبتاً خنک‌تر در مقایسه با میانگین بلندمدت است. با گذر زمان، به ویژه از دهه ۱۹۷۰ به بعد، الگوی گرمایش واضح‌تر می‌شود؛ افزایش دما در ماه‌های زمستان و بهار، به‌ویژه در ماه‌های ژانویه، فوریه و مارس، قابل توجه است و با رنگ‌های زرد و قرمز مشخص شده است. این تغییرات نشانه‌ای از تشدید گرمایش زمستانه و آغاز فصل بهار در طول دهه‌های اخیر است که با روند تغییرات اقلیمی جهانی همخوانی دارد. در دهه‌های اخیر (۲۰۱۰–۲۰۲۰) افزایش دما در ماه‌های سرد سال به‌ویژه ژانویه با شدت بیشتری مشاهده می‌شود و رنگ قرمز روشن در نقشه حرارتی بیانگر افزایش بیش از ۲ درجه سلسیوس در برخی ماه‌ها نسبت به دوره مرجع است. این روند نه تنها نشان‌دهنده گرمایش عمومی کشور است، بلکه افزایش شتاب تغییرات دمایی در دهه‌های اخیر را نیز تأیید می‌کند. علاوه بر آن، ماه‌های تابستان مانند ژوئن تا اوت نسبت به گذشته تغییرات دمایی کمتر و با رنگ‌های آبی کمرنگ تا سفید مشخص شده‌اند، که می‌تواند به دلیل نوسانات طبیعی اقلیمی و اثرات عوامل منطقه‌ای مانند پوشش گیاهی و کاربری زمین باشد. به طور کلی، این تحلیل نقشه حرارتی نشان می‌دهد که ایران طی هفت دهه اخیر با یک گرمایش تدریجی و پایدار مواجه بوده است، که بیشترین تغییرات در ماه‌های سرد سال رخ داده است .

تغییرات دمایی ایران تحت سناریوهای SSP

شکل ۲ نمایانگر روند تغییرات میانگین دمای سطح زمین در ایران، بر اساس سناریوی خوش‌بینانه اقلیمی SSP1-2.6، طی شکل ۲ تغییرات پیش‌بینی‌شده میانگین دمای سطح زمین در ایران را تحت سناریوی اقلیمی خوش‌بینانه SSP1-2.6 نمایش می‌دهد. این سناریو نمایانگر آینده‌ای با رویکرد توسعه پایدار، کاهش محسوس انتشار گازهای گلخانه‌ای و مهار گرمایش جهانی در سطح زمین کمتر از ۲ درجه سلسیوس نسبت به دوره پیشاصنعتی است. داده‌های ارائه‌شده در نمودار نشان می‌دهند که دمای ایران در طول قرن بیست‌ویکم روندی صعودی اما تدریجی خواهد داشت. در بازه نخست (۲۰۲۰–۲۰۳۹) افزایش میانگین دما در حدود یک درجه سلسیوس نسبت به دوره پایه (۱۹۹۱–۲۰۲۰) برآورد شده است. این روند در بازه‌های بعدی با آهنگی ملایم‌تر ادامه می‌یابد و در انتهای قرن (۲۰۸۰–۲۰۹۹) میزان افزایش به حدود ۱.۸ تا ۲ درجه سلسیوس می‌رسد. گرچه این مقدار در مقایسه با سناریوهای انتشار بالا مانند SSP5-8.5 بسیار معتدل‌تر است، اما همچنان از تداوم گرمایش در آینده حکایت دارد. از نظر توزیع فصلی، بیشترین افزایش دما به ماه‌های گرم سال (ژوئن تا سپتامبر) مربوط می‌شود؛ به‌طوری‌که در بازه پایانی، افزایش بیش از ۲.۵ درجه سلسیوس در این ماه‌ها محتمل است. این مسئله بیانگر تشدید گرمایش تابستانه و افزایش احتمال رخداد امواج گرمایی در اواخر قرن است. در مقابل، تغییرات دما در زمستان (دسامبر تا فوریه) شدت کمتری داشته و در بازه اولیه کمتر از یک درجه سلسیوس باقی می‌ماند، هرچند در دوره‌های بعدی

روند افزایشی ادامه دارد. همچنین نواحی رنگی اطراف منحنی‌های هر بازه نشان‌دهنده دامنه عدم‌قطعیت مدل‌های اقلیمی هستند که با گذر زمان گسترده‌تر می‌شوند؛ بدین معنا که در سناریوهای بلندمدت، برآوردها با پراکندگی بیشتری همراه‌اند. به طور کلی، هرچند SSP1-2.6 تصویری خوش‌بینانه از آینده اقلیم ارائه می‌دهد، اما حتی در این حالت نیز تغییرات دمایی چشمگیری برای ایران محتمل است که پیامدهای متنوعی در حوزه‌های منابع آب، کشاورزی، سلامت جامعه و پایداری زیست‌محیطی به دنبال خواهد داشت.

شکل ۳ تغییرات پیش‌بینی‌شده میانگین دمای سطح زمین در ایران را بر اساس سناریوی بدبینانه و پرانتشار SSP5-8.5 طی چهار بازه زمانی آینده (۲۰۲۰–۲۰۳۹، ۲۰۴۰–۲۰۵۹، ۲۰۶۰–۲۰۷۹ و ۲۰۸۰–۲۰۹۹) نمایش می‌دهد. این سناریو معرف آینده‌ای است که در آن رشد سریع اقتصادی، تکیه گسترده بر سوخت‌های فسیلی و فقدان سیاست‌های جدی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، زمینه‌ساز یکی از شدیدترین الگوهای گرمایش جهانی می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که روند دما در این حالت کاملاً صعودی و پرشتاب است. در بازه ابتدایی (۲۰۲۰–۲۰۳۹)، میانگین دما نسبت به دوره مبنا (۱۹۹۱–۲۰۲۰) حدود ۱ تا ۱.۵ درجه سلسیوس افزایش می‌یابد؛ اما در انتهای قرن (۲۰۸۰–۲۰۹۹)، افزایش دما در برخی ماه‌ها از مرز ۶ درجه سلسیوس نیز فراتر می‌رود. چنین رشدی تهدیدی جدی برای پایداری اقلیمی ایران و بسیاری از بخش‌های وابسته به آن به شمار می‌آید. از نظر تغییرات فصلی، بیشترین شدت گرمایش به ماه‌های تابستان (ژوئن تا سپتامبر) اختصاص دارد. در اوج گرما، به‌ویژه در جولای و آگوست، افزایش دما تا حدود ۷.۵ درجه سلسیوس برآورد شده است. این وضعیت می‌تواند پیامدهایی چون افزایش تعداد روزهای با دمای بالاتر از آستانه تحمل انسانی، تشدید تبخیر و تعریق، کاهش جدی منابع آبی و فشار مضاعف بر سیستم‌های کشاورزی و اکوسیستمی کشور به همراه داشته باشد. نواحی سایه‌دار اطراف خطوط روند که بازه عدم‌قطعیت مدل‌ها را نشان می‌دهند، در گذر زمان گسترده‌تر می‌شوند؛ به‌ویژه در پایان قرن که بیانگر تفاوت در نتایج مدل‌ها در ارزیابی اثرات تجمعی گازهای گلخانه‌ای در غیاب مداخلات کاهشی است. این دامنه گسترده نوسان به‌خوبی ماهیت پرخطر و پرریسک این سناریو را آشکار می‌کند و بر ضرورت اتخاذ سیاست‌های اقلیمی فوری و مؤثر تأکید دارد. در مجموع، بررسی این نمودار روشن می‌سازد که در صورت تداوم روند فعلی و عدم اجرای سیاست‌های کارآمد کاهش انتشار، ایران در دهه‌های پایانی قرن بیست‌ویکم با گرمایی بسیار شدید و مخرب مواجه خواهد شد. این وضعیت نه‌تنها از نظر شدت دما، بلکه از نظر گستره پیامدهای زیست‌محیطی، اقتصادی و انسانی، به‌مراتب بحرانی‌تر از سناریوی خوش‌بینانه SSP1-2.6 است.

شکل ۴، روند تغییرات میانگین دمای سطح زمین ایران را طی بازه زمانی ۱۹۵۰ تا ۲۱۰۰، در قالب چهار سناریوی مختلف انتشار گازهای گلخانه‌ای(SSP1-2.6، SSP2-4.5، SSP3-7.0و SSP5-8.5) و یک دوره تاریخی مرجع (۱۹۵۰–۲۱۰۰) به تصویر می‌کشد. محور افقی سال‌های میلادی و محور عمودی میانگین دمای سطح زمین در کشور (بر حسب درجه سلسیوس) را نشان می‌دهد. خطوط رنگی هر سناریو با نوارهای پیرامونی بیانگر میزان عدم قطعیت مدل‌های اقلیمی در پیش‌بینی‌هاست. در طول دوره مرجع (تا حدود ۲۰۱۴)، میانگین دمای کشور در حدود ۱۷ تا ۱۸ درجه سلسیوس نوسان داشته و روند افزایش دما از دهه‌های پایانی قرن بیستم آغاز شده است. پس از این دوره، بسته به مسیرهای مختلف انتشار، روندها به‌شدت واگرا می‌شوند. سناریوی SSP1-2.6 که خوش‌بینانه‌ترین مسیر کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای است، کمترین میزان افزایش دما را تا سال ۲۱۰۰ نشان می‌دهد. در این سناریو، میانگین دمای کشور نهایتاً به حدود ۱۹ درجه می‌رسد و روند افزایش از اواسط قرن بیست‌ویکم تقریباً تثبیت می‌شود. این حالت نشان می‌دهد که در صورت اتخاذ سیاست‌های اقلیمی پایدار و جهانی، می‌توان روند گرمایش را مهار کرد. در مقابل، سناریوی SSP5-8.5 که بازتاب‌دهنده رشد بالای مصرف انرژی فسیلی و نبود اقدامات بازدارنده اقلیمی است، بیشترین افزایش دما را نشان می‌دهد. طبق این سناریو، میانگین دمای ایران تا پایان قرن می‌تواند به بیش از ۲۶ درجه سلسیوس برسد. چنین افزایشی نه‌تنها بی‌سابقه، بلکه از نظر تأثیرات زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی، بحرانی و نگران‌کننده خواهد بود. سناریوهای میانه SSP2-4.5 و SSP3-7.0 نیز به‌ترتیب افزایش‌های معتدل‌تری از حدود ۲۲ تا ۲۴ درجه را پیش‌بینی می‌کنند که البته همچنان بالاتر از میانگین اقلیم کنونی کشور است و پیامدهای قابل توجهی بر منابع آب، کشاورزی، سلامت عمومی و شهرنشینی خواهد داشت. نکته قابل تأمل آن‌که فاصله بین سناریوها، به‌ویژه از اواسط قرن بیست‌ویکم به بعد، به‌وضوح گسترش می‌یابد که نشان می‌دهد اثر اقدامات و سیاست‌های اقلیمی جهانی در آینده‌ای نه‌چندان دور تعیین‌کننده خواهد بود. همچنین، پهنای نوارهای عدم قطعیت در سناریوهای شدیدتر به‌ویژه SSP5-8.5 بیشتر است که بیانگر حساسیت بالای مدل‌ها نسبت به شرایط انتشاری و بازخوردهای اقلیمی پیچیده در این مسیرهاست. در مجموع، این شکل تصویری گویا و هشداردهنده از آینده اقلیم ایران در صورت اتخاذ یا عدم اتخاذ اقدامات اقلیمی لازم ارائه می‌دهد و نقش حیاتی سناریونویسی اقلیمی در برنامه‌ریزی محیط‌زیستی، زیرساختی و توسعه پایدار کشور را برجسته می‌سازد.

نوسانات سطح آب دریا در سواحل جنوبی کشور تحت سناریوهای SSP

شکل ۵ روند افزایش تراز سطح دریا در سواحل جنوبی ایران را طی دوره‌ی زمانی ۲۰۲۰ تا ۲۱۵۰ تحت سناریوهای مختلف مسیرهای اجتماعی-اقتصادی مشترک (SSP) به تصویر می‌کشد. نتایج مدل‌سازی نشان می‌دهد که میزان افزایش سطح دریا به‌طور مستقیم با شدت سناریوی انتشار گازهای گلخانه‌ای همبستگی دارد. بر این اساس، در خوش‌بینانه‌ترین سناریو

(SSP1-1.9)، افزایش تراز سطح دریا تا سال ۲۱۵۰ حدود ۰.۵ متر برآورد شده است، در حالی که در سناریوهای شدیدتر مانند SSP5-8.5، این مقدار ممکن است از ۱.۵ متر نیز فراتر رود. در سناریوهای میانی (نظیر SSP2-4.5 و SSP3-7.0)، روند صعودی افزایش سطح دریا به‌صورت تدریجی اما مداوم ادامه دارد و تا پایان قرن جاری، تراز سطح دریا در این سناریوها بین ۰.۶ تا ۱.۲ متر افزایش می‌یابد. نوارهای سایه‌دار پیرامون منحنی‌ها نیز بازه عدم قطعیت را در خروجی مدل‌ها نشان می‌دهند که در سناریوهای شدیدتر، گستره‌ی بیشتری دارند و بر دامنه‌ی خطر احتمالی تأکید دارند. این یافته‌ها نشان‌دهنده‌ی تهدیدات فزاینده برای مناطق ساحلی جنوبی ایران، از جمله استان‌های بوشهر، هرمزگان، خوزستان و سواحل چابهار است که در برابر پدیده‌هایی نظیر پیش‌روی آب دریا، فرسایش ساحلی و شور شدن منابع آب زیرزمینی آسیب‌پذیر هستند. از این رو، اتخاذ سیاست‌های سازگار با اقلیم و مدیریت ریسک در این مناطق، ضرورتی اجتناب‌ناپذیر محسوب می‌شود.

شکل ۵. پیش‌بینی تغییرات تراز سطح دریا در سواحل جنوبی ایران تحت سناریوهای اقلیمیSSP (۲۰۲۰ الی ۲۱۵۰)

شکل ۶، پیش‌بینی زمانی رسیدن به آستانه ۰٫۵ متری افزایش تراز سطح دریا را نسبت به میانگین سال‌های ۲۰۰۵ (۱۹۹۵–۲۰۱۵) در محدوده منطقه اقتصادی انحصاری (EEZ) ایران، تحت سناریوهای مختلف اقلیمی SSP به تصویر می‌کشد. این آستانه به‌عنوان یکی از نقاط عطف کلیدی در ارزیابی آثار تغییر اقلیم بر نواحی ساحلی تلقی می‌شود. در این نمودار، میله‌های ضخیم بیانگر بازه عدم قطعیت در حدود صدک‌های ۱۷ تا ۸۳ درصد بوده و میله‌های نازک‌تر (تنها برای سناریوهای دارای اطمینان پایین) بازه‌ی وسیع‌تری از صدک‌های ۵ تا ۹۵ درصد را نشان می‌دهند. بر اساس نتایج، در شدیدترین سناریو یعنی SSP5-8.5، عبور از آستانه ۰٫۵ متر در بازه‌ای بین حدود ۲۰۷۰ تا ۲۱۲۰ محتمل است، در حالی که در سناریوهای با شدت متوسط نظیر SSP2-4.5، این رخداد عمدتاً در حوالی سال‌های ۲۱۰۰ تا ۲۱۵۰ پیش‌بینی می‌شود. از سوی دیگر، در خوش‌بینانه‌ترین سناریوها مانند SSP1-1.9، رسیدن به این سطح از افزایش، به تأخیر قابل توجهی افتاده و تا اواخر قرن ۲۲ یا اوایل قرن ۲۳ ادامه می‌یابد. توجه به سناریوهای «اطمینان پایین» مانند SSP5-8.5 Low Confidence نشان می‌دهد که احتمال رخداد زودتر از موعد نیز وجود دارد و در بدبینانه‌ترین برآوردها، عبور از آستانه ۰٫۵ متر ممکن است حتی پیش از سال ۲۰۶۰ نیز رخ دهد. این امر بیانگر سطح بالای عدم قطعیت در مدل‌سازی‌ها و همچنین حساسیت زیاد نتایج به فروض اولیه و نرخ‌های انتشار گازهای گلخانه‌ای است. از منظر برنامه‌ریزی اقلیمی، این نتایج هشداری جدی برای سیاست‌گذاران و مدیران منابع ساحلی محسوب می‌شود؛ چرا که دستیابی به آستانه‌های بحرانی مانند ۰٫۵ متر می‌تواند آثار شدیدی بر روی زیرساخت‌های ساحلی، اراضی کشاورزی، منابع آب زیرزمینی و سکونتگاه‌های انسانی در جنوب ایران

داشته باشد. اتخاذ راهبردهای سازگاری فعال، نظیر طراحی سامانه‌های هشدار و ساختارهای دفاع ساحلی، به‌ویژه در سناریوهای با ریسک بالا، ضرورتی انکارناپذیر به شمار می‌آید.

نتیجه گیری

یافته‌های این پژوهش تصویری روشن، علمی و هشداردهنده از آینده اقلیم ایران و پویایی سطح آب دریا در سواحل جنوبی کشور تحت سناریوهای مختلف انتشار گازهای گلخانه‌ای ارائه می‌دهد. تحلیل سناریوهای SSP نشان می‌دهد که حتی در خوش‌بینانه‌ترین حالت(SSP1-2.6) ، افزایش دمای سطح زمین در ایران تا پایان قرن ۲۱ اجتناب‌ناپذیر بوده و به‌ویژه در فصل تابستان با رشد قابل‌توجهی همراه خواهد بود؛ به‌طوری‌که فرکانس و شدت موج‌های گرما به‌طور معناداری افزایش می‌یابد. این وضعیت، تبعات گسترده‌ای برای امنیت آب، سلامت عمومی، بهره‌وری کشاورزی و پایداری زیست‌محیطی کشور در پی خواهد داشت. در سناریوهای میانه (SSP2-4.5) و (SSP3-7.0 گرچه آهنگ گرمایش ملایم‌تر است، اما همچنان از سطح اقلیم کنونی فراتر رفته و نیازمند اقدامات سازگارانه هدفمند در سطح ملی است. بحرانی‌ترین چشم‌انداز در قالب سناریوی SSP5-8.5 ترسیم می‌شود که در آن میانگین دمای کشور ممکن است تا بیش از ۸ درجه سلسیوس افزایش یابد؛ افزایشی که پیامدهای آن تنها به حیطه اقلیم محدود نمانده و به حوزه‌های اقتصادی، بهداشتی، زیرساختی و امنیت انسانی نیز تسری خواهد یافت. در کنار افزایش دمای سطح زمین، نوسانات سطح آب دریا در سواحل جنوبی کشور نیز در پی گرمایش جهانی و ذوب یخ‌های قطبی، روندی صعودی و نگران‌کننده خواهند داشت. هرچند این تغییرات در آغاز ملایم و تدریجی به‌نظر می‌رسند، اما در بلندمدت می‌توانند منجر به فرسایش شدید خط ساحلی، تهدید زیرساخت‌های بندری، نفوذ آب شور به منابع آب شیرین و تغییر در زیست‌بوم‌های ساحلی شوند. ترکیب این دو عامل—افزایش دما و نوسانات سطح دریا—خطرات مرکب و پیچیده‌ای برای مناطق جنوبی ایران ایجاد می‌کند که باید در سیاست‌گذاری‌های توسعه‌ای، محیط‌زیستی و اقلیمی مورد توجه ویژه قرار گیرد. تحلیل روندهای سالانه میانگین دمای سطح زمین هوا در ایران طی بازه زمانی ۱۹۵۰ تا ۲۰۲۲ نشان‌دهنده یک گرمایش بلندمدت و پایدار است. داده‌های سالانه، نوسانات طبیعی دما را به وضوح نمایش می‌دهند، اما روند کلی بیش از هفت دهه، افزایشی بوده است. خطوط روند محاسبه‌شده برای دوره‌های مختلف، تصویر دقیق‌تری از تغییرات دمایی ارائه می‌کنند و تحولات اقلیمی ایران را روشن می‌سازند. بازه ۱۹۵۱–۲۰۲۰ نشانگر افزایش میانگین دما از حدود ۱۶.۵ درجه سلسیوس در اوایل دهه ۱۹۵۰ به نزدیک ۱۹ درجه سلسیوس در سال‌های اخیر است و گرمایش ملموس و بلندمدت کشور را تأیید می‌کند. تمرکز بر دوره کوتاه‌مدت‌تر ۱۹۷۱–۲۰۲۰ و به‌ویژه سه دهه اخیر (۱۹۹۱–۲۰۲۰) نشان می‌دهد که شیب افزایش دما تندتر شده و با افزایش رخدادهای گرم‌تر همخوانی دارد؛ این امر

حکایت از تشدید روند گرمایش در دهه‌های اخیر دارد و نقش عوامل انسانی مانند افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای، تغییرات کاربری زمین و فعالیت‌های صنعتی در تشدید گرمایش را نشان می‌دهد. تحلیل روندهای ماهانه میانگین دمای سطح زمین هوا با استفاده از نقشه‌های حرارتی طی بازه‌های دهه‌ای ۱۹۵۰–۲۰۲۰، تغییرات دما در طول سال‌ها و ماه‌ها را به صورت تصویری و قابل تفسیر ارائه می‌دهد. این نقشه‌ها نشان می‌دهند که در دهه‌های اولیه (۱۹۵۰–۱۹۷۰)، ماه‌ها عمدتاً با رنگ‌های آبی تا روشن نمایان شده‌اند که بیانگر شرایط نسبتاً خنک‌تر نسبت به میانگین بلندمدت است. از دهه ۱۹۷۰ به بعد، الگوی گرمایش روشن‌تر شده و افزایش دما در ماه‌های زمستان و بهار، به‌ویژه ژانویه، فوریه و مارس، به رنگ‌های زرد و قرمز قابل مشاهده است. در دهه‌های اخیر (۲۰۱۰–۲۰۲۰)، افزایش دما در ماه‌های سرد سال با شدت بیشتری رخ داده و رنگ قرمز روشن در نقشه حرارتی بیانگر افزایش بیش از ۲ درجه سلسیوس نسبت به دوره مرجع است. این تحلیل نشان می‌دهد که گرمایش ایران طی هفت دهه اخیر پایدار بوده و بیشترین تغییرات در ماه‌های سرد سال رخ داده‌اند، در حالی که ماه‌های تابستان تغییرات کمتر و با رنگ‌های آبی کمرنگ تا سفید مشخص شده‌اند، که می‌تواند به دلیل نوسانات طبیعی و عوامل منطقه‌ای مانند پوشش گیاهی و کاربری زمین باشد.

در مجموع، یافته‌های تاریخی و سناریوهای آینده نشان می‌دهند که ایران با یک گرمایش بلندمدت مواجه است که روند آن تشدید یافته و پیامدهای گسترده‌ای برای محیط‌زیست، اقتصاد و جامعه خواهد داشت. این نتایج بر اهمیت حیاتی اتخاذ رویکردهای پیش‌نگر، سیاست‌گذاری‌های اقلیم‌محور و اجرای فوری و مؤثر برنامه‌های کاهش انتشار و سازگاری تأکید دارند. بهره‌گیری از چارچوب سناریونویسیSSP ، همراه با تحلیل داده‌های تاریخی دما، امکان شناسایی مسیرهای مختلف آینده، برجسته‌سازی نقاط حساس و طراحی راهکارهای متناسب با واقعیت‌های اقلیمی، اقتصادی و اجتماعی کشور را فراهم می‌آورد. چشم‌انداز اقلیم ایران تا پایان قرن بیست‌ویکم به‌شدت وابسته به تصمیمات امروز ماست؛ تصمیماتی که نه‌تنها آینده منابع طبیعی، بلکه پایداری زیست‌محیطی نسل‌های آتی را رقم خواهند زد.

منابع

احمدی، محمود؛ کرمی، جمال .(۱۴۰۱). ارزیابی مدل‌هایCMIP ۵ در ناهنجاری فصلی فشار (تراز سطح دریا) ایران مبتنی بر روش ریزگردانی دینامیکی CORDEX تحت سناریوهای واداشت تابشی RCPs ، تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۹ (۴) :۱۴۲-۱۲۵. http://jsaeh.khu.ac.ir/article-1-3284-fa.html

احمدی, محمود و کمانگر, محمد . (۱۴۰۲). پیش‌نگری دماهای حدی فصل سرد ایران با استفاده از یک سامانه همادی چند مدلی با سناریوهای اجتماعی_اقتصادی مدل‌های CMIP6. نیوار, ۴۷(۱۲۰-۱۲۱), ۷۱-۸۸. doi: 10.30467/nivar.2023.389079.1240

باروتی, حنانه , اسماعیلی, کاظم و قهرمان, بیژن . (۱۳۹۷). شبیه سازی زمانی و مکانی بارش در حوضه رود شور تحت تأثیر تغییر اقلیم. نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران, ۹(۲), ۱۳۵-۱۴۷. doi: 10.22125/iwe.2019.87389

زرین, آذر و داداشی رودباری, عباسعلی . (۱۴۰۱). بررسی مدل‌های CMIP6 در برآورد دمای ایران با تأکید بر حساسیت اقلیم ترازمند (ECS)) و پاسخ اقلیم گذرا (TCR). مجله ژئوفیزیک ایران, ۱۷(۱), ۳۹-۵۶. doi: 10.30499/ijg.2022.344862.1430

سلیقه، محمد.(۱۳۹۶). آب‌وهواشناسی سینوپتیک ایران،چاپ دوم، سازمان مطالعه و تدوین کتب علوم انسانی دانشگاها(سمت).

محمودی, پیمان , فتاحی, ابراهیم , حیدری, محسن , ریگی, اله بخش , انصاری, عاطفه , قائمی, علیرضا و رضائی, جبار . (۱۴۰۴). تحلیل روند نمایه های فرین بارشی در حوضه آبریز خلیج فارس و دریای عمان در جنوب ایران. مخاطرات محیط طبیعی, ۱۴(۴۴), ۶۳-۸۸. doi: 10.22111/jneh.2025.48651.2043

مرکز آمار ایران (۱۴۰۲). داده ها و اطلاعات آماری، برگرفته از :amar.org.ir

عباسی، فاطمه، بابائیان، ایمان، ملبوسی، شراره، اثمری، مرتضی، و مختاری، لیلی گلی. (۱۳۹۱). ارزیابی تغییر اقلیم ایران در دهه های آینده (۲۰۲۵ تا ۲۱۰۰ میلادی) با استفاده از ریز مقیاس نمایی داده های مدل گردش عمومی جو. تحقیقات جغرافیایی، ۲۷(۱ (پیاپی ۱۰۴))، ۲۰۵-۲۳۰. SID. https://sid.ir/paper/29788/fa

عطایی, هوشمند , کوهی, منصوره , مدیریان, راهله و بذرافشان, بهاره . (۱۴۰۰). تغییرات پیش‌نگری شده در دما و بارش حوضه کشف‌رود بر مبنای روش‌های مقیاس-کاهی دینامیکی و آماری. مخاطرات محیط طبیعی, ۱۰(۳۰), ۱۸۳-۲۰۲. doi: 10.22111/jneh.2021.37827.1777

Change, P. C. (2018). Global warming of 1.5 C. World Meteorological Organization: Geneva, Switzerland.

Grose, M. R., Narsey, S., Delage, F. P., Dowdy, A. J., Bador, M., Boschat, G., ... & Power, S. (2020). Insights from CMIP6 for Australia's future climate. Earth's Future, 8(5), e2019EF001469. https://doi.org/10.1029/2019EF001469

Gou, J., Miao, C., Samaniego, L., Xiao, M., Wu, J., & Guo, X. (2021). CNRD v1. 0: a high-quality natural runoff dataset for hydrological and climate studies in China. Bulletin of the American Meteorological Society, 102(5), E929-E947. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-20-0094.1

Janssen, E., Wuebbles, D. J., Kunkel, K. E., Olsen, S. C., & Goodman, A. (2014). Observational-and model-based trends and projections of extreme precipitation over the contiguous United States. Earth's Future, 2(2), 99-113. https://doi.org/10.1002/2013EF000185

Mahmood, R., & Babel, M. S. (2014). Future changes in extreme temperature events using the statistical downscaling model (SDSM) in the trans-boundary region of the Jhelum river basin. Weather and Climate Extremes, 5, 56-66. https://doi.org/10.1016/j.wace.2014.09.001

Nengker, T., Choudhary, A., & Dimri, A. P. (2018). Assessment of the performance of CORDEX-SA experiments in simulating seasonal mean temperature over the Himalayan region for the present climate: part I. Climate dynamics, 50, 2411-2441. https://doi.org/10.1007/s00382-017-3597-x

Palazzi, E., Von Hardenberg, J., & Provenzale, A. (2013). Precipitation in the Hindu-Kush Karakoram Himalaya: observations and future scenarios. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 118(1), 85-100. https://doi.org/10.1029/2012JD018697

Sayad, T. A., Ali, A. M., & Kamel, A. M. (2016). Study the impact of climate change on maximum and minimum temperature over Alexandria, Egypt using statistical downscaling model (SDSM). Glob J Adv Res, 3(8), 694-712.

World Bank Group. (n.d.). Iran - Climate data & projections. Climate Change Knowledge Portal. Retrieved April 25, 2025, from https://climateknowledgeportal.worldbank.org/country/iran-islamic-rep/climate-data-projections

Assessment of Past and Future Climate Variability in Iran Using Historical Data and SSP Scenarios

Fatemeh Karami*[1], Tayebeh Akbari Azirani[2]

PhD Candidate in Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, University of shahid beheshti,Tehran, Iran.(fat_karami@sbu.ac.ir)
Assistant Professor of Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, University of shahid beheshti,Tehran, Iran.

ABSTRACT

Global warming and climate change are among the most critical environmental challenges of the present century, leaving profound impacts on human societies, economies, and natural systems. Iran, with its predominantly arid and semi-arid climate—particularly its southern coasts—is considered highly vulnerable. This study employs data from the CMIP6 global climate projection project and the World Bank Climate Portal to examine historical records, future air temperature trends, and sea level changes in Iran through the year 2100 under different climate scenarios (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, and SSP5-8.5). Analyses were conducted for three future time slices (2021–2040, 2041–2060, and 2081–2100) relative to the baseline period (1991–2020). The results indicate that even under the optimistic scenario, temperature rise will persist and is projected to exceed 2 °C by the end of the century. Under the high-emission scenario, summer temperatures may increase by up to 7.5 °C, leading to intensified heatwaves, declining water resources, and serious threats to public health and agriculture. Moreover, the sea level of the Persian Gulf and the Gulf of Oman is projected to rise in response to global warming. These findings provide a scientific basis for climate policymaking, coastal zone management, and national adaptation planning.

Keywords: Climate change, Global warming, Iran, SSP scenarios, Temperature trend

ارزیابی ریسک تغییر اقلیم بر جاذبه های طبیعی گردشگری شهری (مطالعه موردی: کلانشهر ارومیه)

سهند آذر *[۱]

۱- دانشجوی دکتری، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول: s.azar@urmia.ac.ir

ایوب منوچهری[۲]

۲- استادیار، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

آدرس پست الکترونیک: a. manouchehri@urmia.ac.ir

چکیده

تغییر اقلیم با دگرگون کردن الگوهای آب و هوایی، تهدیدی جدی برای جاذبه‌های طبیعی گردشگری شهری به شمار می‌رود. این پدیده می‌تواند منجر به تخریب محیط زیست، از بین رفتن تنوع زیستی و کاهش کیفیت فضاهای سبز شهری شود. در نتیجه، این تغییرات بر جذابیت این مناطق برای گردشگران تأثیر منفی گذاشته و به اقتصاد محلی آسیب می‌رساند. هدف پژوهش حاضر، ارزیابی ریسک تغییر اقلیم بر جاذبه های طبیعی گردشگری شهری (مطالعه موردی: کلانشهر ارومیه) می باشد. در این پژوهش از مدل ANP Fuzzy استفاده شده است. این پژوهش ازنظر هدف، کاربردی - نظری و ازنظر روش، توصیفی– تحلیلی است. اطلاعات و داده های موردنیاز از طریق روش کتابخانه ای جمع آوری شده است. برای این منظور، از رویکرد تحلیلی چندمعیارهمدل فرآیند تحلیل شبکه فازی (ANP Fuzzy) استفاده گردیده تا ابعاد پیچیده و روابط متقابل بین عوامل مختلف ریسک را به دقت مورد سنجش قرار دهد. نتایج حاصل از این تحلیل، ضمن شناسایی و اولویت‌بندی مهم‌ترین ریسک‌ها، تصویری شفاف از نقاط آسیب‌پذیر و پتانسیل‌های موجود برای تاب‌آوری را ارائه می‌دهد. این یافته‌ها می‌توانند مبنایی علمی و کاربردی برای سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان شهری و گردشگری در ارومیه فراهم آورند تا با اتخاذ راهبردهای مؤثر و تصمیم‌گیری‌های آگاهانه، پایداری و توسعه این جاذبه‌های ارزشمند را در برابر چالش‌های اقلیمی تضمین کنند.

کلید واژه ها: ریسک تغییر اقلیم، جاذبه های طبیعی گردشگری شهری، کلانشهر ارومیه، مدل ANP Fuzzy

مقدمه

گردشگری، یکی از بزرگ ترین صنایع اقتصاد جهانی است. اکوتوریسم نیز یکی دیگر از شاخه های گردشگری است که مبتنی بر جاذبه های طبیعی است. جاذبه های طبیعی و آب و هوایی متفاوت، دستمایه مهمی در حوزه اقتصاد برای انسان به ارمغان آورده است که مسلما بهره برداری از آن مستلزم فراهم کردن شرایط مختلفی است و در کل بستگی به ثبات در بخش گردشگری دارند (معتمدی،۱۴۰۰: ۶). اطلاع از شرایط اقلیمی،در برنامه ریزی صنعت پررونق گردشگری بسیار ضروری وسودمنداست.اقلیم به عنوان یک جاذبه طبیعی درانتخاب مقصد گردشگری مطرح است که شامل عواملی مانند دما،بارش،رطوبت ،باد وشرایط هواشناسی دیگراست که می تواند تجربه گردشگران را به شدت تحت تاثیرقراردهد(زارعی و زارعی،۱۴۰۳: ۵). آب و هوا، وضعیت آسایش انسان، تقویم گردشگری و توان های طبیعت گردی را تعیین می کند. طبیعت گردی در زیر مجموعه گردشگری گسترده قرار دارد و به همین دلیل در مقایسه با گردشگری متمرکز به شدت تحت تاثیر شرایط اقلیمی و شاخص های آسایش آن قرار دارد. منظور از شرایط اقلیم آسایش انسان، مجموعه شرایطی است که از نظر حرارتی و رطوبتی، حداقل ۸۰٪ از افرادی که به طور تصادفی انتخاب و در آن شرایط قرار داده می شوند، قضاوت ذهنی حالت آسایش را داشته باشند (رحیمی و همکاران،۱۴۰۳: ۷۴). گردشگری به عنوان صنعتی پاک پس از صنعت نفت و خودروسازی سومین پدیده اقتصادی پویا در جهان است و یکی از مهم ترین بخش های اقتصاد جهان است که میلیاردها دلار درآمد ایجاد خواهد کرد. از آنجا که جاذبه های طبیعی، منبع اصلی جذب گردشگر محسوب می شوند و بیشتر گردشگران علاقمندند تعطیلات خود را در مکان های بکر و طبیعی سپری کنند. بنابراین شرایط اقلیمی در موفقیت و توسعه صنعت گردشگری نقش مهمی ایفا می کند (Mieczkowski,2020:220). چشم اندازهای طبیعی به عنوان یکی از منابع اصلی در توسعه گردشگری و جذب گردشگر است و اقلیم شرایط را در طول سال برای استفاده از این منابع کنترل می کند. از این رو بررسی اقلیم در برآورد و بررسی قابلیت های گردشگری یک منطقه به خصوص در زمینه طبیعت گردی در اولویت قرار دارد (Scott,etal2019:51). شاخص های آسایش اقلیم گردشگری بیانگر طول مدت و کیفیت فصول گردشگری است و نقش مهمی در برنامه ریزی سفر و ظرفیت های محیطی گردشگری گسترده مناطق جغرافیایی دارد (Liana,etal2022:19). هدف پژوهش حاضر، ارزیابی ریسک تغییر اقلیم بر جاذبه های طبیعی گردشگری شهری (مطالعه موردی: کلانشهر ارومیه) می باشد. در عصر حاضر، تغییرات اقلیمی به عنوان یکی از بزرگترین چالش‌های جهانی، تأثیرات گسترده‌ای بر اکوسیستم‌های طبیعی و فعالیت‌های انسانی، از جمله گردشگری، گذاشته است. جاذبه‌های طبیعی شهری، به دلیل حساسیت بالا به نوسانات آب و هوایی و وابستگی شدید به شرایط اقلیمی پایدار، در کانون این آسیب‌پذیری قرار دارند. این پژوهش با تمرکز بر کلانشهر ارومیه، به دنبال ارزیابی دقیق ریسک‌های ناشی از تغییر اقلیم بر جاذبه‌های طبیعی گردشگری آن است تا بتواند ابعاد این تهدیدها را شناسایی و راهکارهای مدیریتی مؤثری را برای حفظ و پایداری این

سرمایه‌های طبیعی ارائه دهد. هدف اصلی این است که با درک عمیق‌تر از تأثیرات احتمالی، برنامه‌ریزی‌های شهری و گردشگری در ارومیه به سمت تاب‌آوری و سازگاری بیشتر با شرایط اقلیمی در حال تغییر هدایت شود.

پیشینه پژوهش

عابدی و صداقت، (۱۴۰۰) پژوهشی با عنوان؛ ارزیابی اثرات تغییرات اقلیم بر تقاضای گردشگری در شهرهای ایران به این نتیجه رسیدند که اهمیت گردشگری در ابعاد اقتصادی و اشتغال‌زایی به حدی است که می‌تواند به‌عنوان نیروی محرکه اقتصادی هر کشوری محسوب شود. در این زمینه یکی از ارکان توسعه جهانگردی، بررسی عوامل موثر بر تقاضای آن است؛ به طوری که پدیده تغییر اقلیم، یکی از موارد اصلی موردتوجه گردشگران می‌باشد.

اربابی سبزواری، (۱۴۰۱) پژوهشی با عنوان؛ تحلیل و تدوین شرایط اقلیمی در جهت توسعه پایدار گردشگری شهری (مطالعه موردی: شهر بندر چابهار، ایران) به این نتیجه رسیده است که نتایج پژوهش نشان دهنده این مسئله بود که بر اساس شاخصCIT ، کلیه ماه ها و مقاطع زمانی در یک شبانه روز بندرچابهار، برای گردشگران، مطلوب یا قابل قبول است که این مسئله کمی با واقعیت موجود فاصله داشت.در ارزیابی شرایط اقلیمی، این پژوهش، با اعمال تغییراتی جزئی در شاخص CITو ترکیب نتایج شاخص PMV با میزان رضایتمندی گردشگران از شرایط احساس حرارتی مختلف، به نتایج متفاوتی دست یافت که نشان از تاثیرگذاری بیشتر داده های میدانی در نظرات کارشناسانه بود.

هوشیار و حسینی، (۱۴۰۲) پژوهشی با عنوان؛ ارزیابی زمانی گردشگری با استفاده از شاخص های اقلیمی تعطیلات (HCI) و اقلیم گردشگری (TCI) به این نتیجه رسیدند که گردشگری پدیده ای است که با سازوکاری در هم تنیده و پنهان در زمان ها و مکان های مختلف اشکال گوناگونی به خود می گیرد و به همین خاطر تأثیرات کاملا متفاوتی را بر جوامع انسانی بر جای می نهد. یکی از مهم ترین راه کارهای گسترش صنعت گردشگری در یک منطقه شناخت و بررسی وضعیت اقلیمی آن در ماه های مختلف سال است و شرایط اقلیمی مقصد یکی از مهم ترین اطلاعات مورد نیاز گردشگران برای سفر می باشد.

رستمی فرد، (۱۴۰۳) پژوهشی با عنوان؛ ضرورت توجه به بنیان های اقلیمی در برنامه ریزی توسعه آمایش گردشگری در پارک ناژوان اصفهان به این نتیجه رسیده است که نتایج این مقاله نشان می دهد که با برنامه ریزی، مدیریت و سازماندهی این منطقه و ایجاد یک همپیوندی بین آن ها است می توان قدرت و توان منطقه را در جذب گردشگران و ارائه خدمات کارآمد، اثربخش و مطلوب بالا برد. همچنین در این مقاله با توجه به طبقه بندی اقلیمی منطقه و با استفاده از طبقه بندی دومارتن و آمبرژه محدوده پارک ناژوان دارای اقلیم خشک سرد می باشد و پتانسیل جذب گردشگر در تمام فصول را ندارد.

شیخ زاده و همکاران، (۱۴۰۴) پژوهشی با عنوان؛ شناخت روند تغییرات کوتاه مدت و بلند مدت اقلیم آسایش گردشگری ایران به این نتیجه رسیدند که رابطه تغییر اقلیم و پدیده های طبیعی، اجتماعی و اقتصادی برای مدت نسبتا طولانی در

ابعاد متفاوت مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. در طول ۱۵ سال گذشته، مطالعات متمرکزتری شروع به ظهور کرده اند و به ویژه اخیرا موضوع گردشگری به عنوان یک پدیده اجتماعی بین المللی در مطالعات تغییرات آب و هوایی مورد توجه بسیار قرار گرفته است.

تورز و همکاران، (۲۰۲۱) به بررسی اثرات تغییرات آب و هوایی بر گردشگری جزایر بالئاری و ارائه راهبردهای سیاستی در مناطق مدیترانه پرداختند. در این مطالعه با توجه به اینکه جزایر بالئاری از مقاصد اصلی تعطیلات جهانی است؛ لذا در این پژوهش تغییرات دهه های آینده اقلیمی و اثرات آن ها بر متغیرهای محیطی، اقتصادی و اجتماعی گردشگری تحلیل شد. نتایج مطالعه حاکی از افزایش دما و سطح آب دریا بوده است. همچنین مطابق یافته های مطالعه، کاهش میانگین بارندگی و افزایش تبخیر و تعرق، خشکسالی ها و افزایش اسیدی شدن اقیانوس ها و اکسیژن زدایی، از تهدیدات اصلی بالئاری شناسایی شده که به دلیل آسیب پذیری زیاد گردشگری در برابر تغییرات اقلیمی، اقتصاد آنها را در معرض خطر قرار خواهد داد.

آیگون اوگور و بایکان، (۲۰۲۲) در مطالعه ای برای اولین بار به ارزیابی تأثیر کمی تغییر اقلیم بر تقاضای گردشگری در ترکیه از طریق پیش بینی تعداد گردشگران بین المللی برای ۳۰ مقصد گردشگری با ویژگی های مختلف و شرایط آب و هوایی متفاوت پرداختند. نتایج بیانگر آن است که تغییرات آب و هوایی با تعداد گردشگران بین المللی در کوتاه مدت، بلند مدت و میان مدت مرتبط است. همچنین نتایج، کاهش شدید تقاضای گردشگری ناشی از تغییرات فصلی و ظهور مقاصد جایگزین جدید گردشگری را نشان می دهد.

مبانی نظری

تغییرات اقلیمی یکی از چالش های بزرگ در حوزه توسعه گردشگری به شمار می آید. تغییرات اقلیمی از طریق تغییر در الگوهای هواشناسی، مانند افزایش فراوانی رو یدادهای شدید هواشناسی نظیر توفان ها، سیل ها و موج های گرما، به طور مستقیم بر صنعت گردشگری تاثیر می گذارد. این تغییرات میتوانند ایمنی و سلامت گردشگران را به خطر بیندازند، به زیرساخت ها آسیب بزنند و رفتار گردشگران و جذابیت مقاصد گردشگری را تحت تاث یر قرار دهند (عباسی،۱۴۰۳: ۴). از جمله پیامدهای تغییر اقلیم خشکسالی ، طوفان های دریایی سهمگین مانند سونامی ، بالا آمدن سطح آب دریاها، کاهش منابع آب شیرین ، گرم شدن هوا، آتش سوزی جنگل ها، بیابان زایی ، افزایش بیماریهای متعلق به مناطق گرم نظیر مالاریا ، اسیدی شدن آب اقیانوس ها و مهاجرت هستند. با افزایش اسیدیته آب دریا، برخی موجودات دریایی (مانند مرجان ها و برخی صدف ها) برای تشکیل یا حفظ پوسته های خود دچار تغییرات می شوند (سلیقه،۱۴۰۲: ۴). عوامل زیادی بر گردشگری تاثیرگذار است که یکی از مهم ترین آن ها آب و هوا است در واقع آب و هوا به عنوان یک ثروت عظیم طبیعی به شمار می رود که می تواند به عنوان یک ثروت اقتصادی برای گردشگری نیز مطرح باشد (Borna,2021:265). تغییر

اقلیم و گرمایش جهانی علاوه بر محدود کردن شرایط زیست اقلیم، تخریب جاذبه های طبیعی گردشگری و جابه جایی تقویم گردشگری منجر به جابه جایی قلمروهای گردشگری با درجات مختلف نیز خواهد شد (Xiu&xia,2023:3). رابطه بین هوا، اقلیم و توریسم به اشکال گوناگونی وجود دارد. از یک سو با شرایط آب و هوایی سرو کار داریم که از مکانی به مکان دیگر و در مقاطع زمانی، بسیار متغیر است و از سویی دیگر توریسم نیز پدیده ای چند جانبه است. اثرهای متقابل این دو بسیار پیچیده است. علت اصلی فصلی بودن توریسم آب و هواست (خالدی و همکاران،۱۳۹۸: ۷۴). گردشگری بخش مهمی از اقتصاد جهانی و بزرگ ترین و سریع ترین صنعت در حال رشد جهان است که طی دهه های گذشته، به یکی از بخش های کلیدی جامعه جهانی تبدیل شده است و آب و هوا بخشی از محیط زیست ماست که تاثیر به سزایی بر بخش گردشگری و اوقات فراغت دارد و شرایط اقلیمی مطلوب، منبعی اساسی برای توسعه گردشگری به حساب می آید (Grillakis,etal2022:2). هوا و اقلیم به عنوان مولفه های اصلی گردشگری، عوامل مهمی در هزینه های گردشگری و رضایتمندی از تعطیلات هستند. از آنجا که صنعت گردشگری بسیار وابسته به اقلیم است، در دهه های اخیر اندیشمندان به بررسی گردشگری و آب و هوا علاقه مند شدند (ذو الفقاری و همکاران،۱۴۰۲: ۸۶). تغییر اقلیم و گرمایش جهانی به عنوان چالشی جدی برای ورزش های زمستانی و صنعت توریسم در مناطق کوهستانی به شمار می رود. چرا که، تغییر اقلیم به جهت برف کمتر، یخچال های کمتر و رویدادهای وخیم تر (همانند رانش زمین) تهدیدی برای توریسم و فعالیت های ورزشی در مناطق کوهستانی می باشد (بهمن پور و همکاران، ۱۳۹۹: ۳).

قلمرو پژوهش

شهر ارومیه، مرکز شهرستان ارومیه و مرکز استان آذربایجان غربی است که در فاصله ۱۸ کیلومتری دریاچه ارومیه، در مختصات جغرافیایی ۴۵ درجه و ۴ دقیقه طول شرقی از نصف النهار گرینویچ و ۳۷ درجه و ۳۲ دقیقه عرض شمالی از مبدأ خط استوا در داخل جلگه ای به طول ۷۰ کیلومتر و عرض ۳۰ کیلومتر قرار گرفته است. جمعیت شهر در سال ۱۳۹۵ بالغ ۷۳۶۲۲۴ نفر جمعیت داشته است. شهر ارومیه با مساحتی حدود ۶۰ کیلومتر مربع دارای موقعیت استقراری مناسب بوده و تقریبا در میانه استان واقع شده است (موسوی و همکاران،۱۴۰۱: ۱۵۰).

روش شناسی

تحقیق حاضر به لحاظ هدف، کاربردی و ازلحاظ ماهیت و روش، توصیفی – تحلیلی پیمایشی می‌باشد. اطلاعات و داده‌های موردنیاز از طریق روش کتابخانه‌ای و میدانی جمع‌آوری‌شده است. در شیوه کتابخانه‌ای ابتدا به‌منظور بررسی سوابق و

پیشینه موضوع و تبیین چارچوب نظری – مفهومی پژوهش، کتب مقالات و پایان‌نامه‌های موجود موردمطالعه قرارگرفته است. در تنظیم اطلاعات و محاسبات در این پژوهش از مدل Anp فازی استفاده شده است.

یافته های پژوهش

معرفی عوامل پژوهش

در این بخش بر اساس مرور ادبیات و پیشینه پژوهش عوامل ارزیابی ریسک تغییر اقلیم بر جاذبه های طبیعی گردشگری شهری (مطالعه موردی: کلانشهر ارومیه) استخراج شد که شامل ۱۶ معیار در ۳ دسته اصلی می‌باشد که در جدول ۱ آورده شده است.

جدول۱: ارزیابی ریسک تغییر اقلیم بر جاذبه های طبیعی گردشگری شهری (مطالعه موردی: کلانشهر ارومیه)

معیار	کد معیار	زیرمعیار	کد زیرمعیار
آسیب پذیری اقلیمی	A	حساسیت به نوسانات دما	A1
		خطر سیلاب های ناگهانی	A2
		تکرار پدیده های حدی	A3
		آستانه تحمل طبیعی	A4
		تغییر در طول فصول	A5
		تاثیر خشکسالی های مکرر	A6
زیر ساخت های گردشگری	B	کیفیت دسترسی	B1
		ظرفیت اقامتی	B2
		سیستم های هشدار	B3
		امکانات اضطراری	B4
		تامین امنیت و ایمنی	B5
پتانسیل اقتصاد گردشگری	C	روندهای بازار گردشگری	C1
		جریان های مالی و اعتباری	C2
		رقابت پذیری منطقه ای	C3
		برنامه های بازاریابی	C4
		پشتیبانی از کسب و کارهای کوچک	C5

نتایج روش DANP

با استفاده از روش دنپ ابتدا تاثیرگذاری و تاثیرپذیری عوامل پژوهش مورد بررسی قرار می‌گیرد و سپس اهمیت و وزن عوامل مشخص می‌شود.

محاسبه ماتریس ارتباطات مستقیم

در این گام جهت ارزیابی روابط میان معیارها (تاثیر یک معیار بر معیار دیگر) با استفاده از نظر خبرگان بر اساس طیف جدول استفاده شده است برای بررسی معیارها از نظر ۳۰ خبره استفاده شده که برای در نظر گرفتن نظر همه خبرگان میانگین حسابی می‌گیریم. نتایج در جدول ۲ آورده شده است.

جدول۲: ماتریس ارتباطات مستقیم

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3	B4	B5	C1	C2	C3	C4	C5
A1	۰.۰۰۰	۱.۸۳۳	۱.۷۶۷	۲.۱۰۰	۲.۱۰۰	۱.۷۰۰	۱.۷۰۰	۱.۵۶۷	۲.۲۳۳	۲.۰۰۰	۱.۵۰۰	۲.۳۳۳	۱.۹۰۰	۲.۰۳۳	۱.۸۶۷	۱.۷۰۰
A2	۱.۸۰۰	۰.۰۰۰	۱.۹۶۷	۲.۴۶۷	۲.۰۳۳	۱.۶۶۷	۲.۰۶۷	۱.۷۳۳	۲.۱۰۰	۲.۰۰۰	۱.۷۳۳	۲.۱۳۳	۱.۵۰۰	۲.۳۰۰	۲.۱۰۰	۱.۷۳۳
A3	۱.۷۰۰	۲.۲۰۰	۰.۰۰۰	۱.۷۳۳	۲.۰۰۰	۱.۹۳۳	۱.۹۶۷	۲.۱۰۰	۲.۱۰۰	۱.۷۳۳	۱.۷۳۳	۱.۹۶۷	۱.۹۰۰	۱.۷۶۷	۲.۵۳۳	۱.۴۰۰
A4	۱.۹۰۰	۲.۰۰۰	۲.۱۶۷	۰.۰۰۰	۱.۸۳۳	۲.۰۶۷	۲.۰۳۳	۱.۷۳۳	۱.۹۶۷	۱.۸۶۷	۲.۱۳۳	۲.۲۰۰	۱.۸۰۰	۲.۱۳۳	۲.۲۳۳	۲.۲۳۳
A5	۲.۱۶۷	۱.۷۶۷	۲.۰۳۳	۱.۹۳۳	۰.۰۰۰	۱.۸۶۷	۲.۰۰۰	۲.۲۳۳	۲.۰۶۷	۲.۱۰۰	۲.۱۳۳	۲.۱۰۰	۱.۶۰۰	۱.۸۶۷	۱.۹۶۷	۲.۰۶۷
A6	۲.۴۰۰	۱.۹۶۷	۲.۰۰۰	۲.۰۳۳	۱.۹۰۰	۰.۰۰۰	۱.۹۶۷	۱.۹۳۳	۲.۳۶۷	۱.۶۰۰	۲.۵۳۳	۱.۹۰۰	۲.۰۶۷	۱.۴۰۰	۲.۳۳۳	۲.۲۳۳
B1	۲.۰۶۷	۱.۸۰۰	۱.۸۰۰	۱.۸۰۰	۲.۰۶۷	۲.۰۳۳	۰.۰۰۰	۲.۰۶۷	۱.۶۳۳	۱.۹۳۳	۲.۰۳۳	۲.۳۰۰	۲.۳۰۰	۱.۹۰۰	۱.۸۶۷	۱.۷۶۷
B2	۲.۱۶۷	۲.۱۳۳	۱.۹۳۳	۱.۳۶۷	۲.۰۰۰	۲.۲۳۳	۲.۳۳۳	۰.۰۰۰	۱.۹۶۷	۲.۰۰۰	۱.۹۰۰	۲.۱۳۳	۲.۱۶۷	۱.۷۰۰	۲.۰۶۷	۲.۳۰۰
B3	۱.۹۰۰	۲.۲۰۰	۱.۷۶۷	۲.۰۶۷	۱.۵۰۰	۲.۱۳۳	۱.۵۳۳	۱.۶۰۰	۰.۰۰۰	۱.۸۶۷	۲.۳۰۰	۱.۷۰۰	۲.۱۰۰	۱.۸۶۷	۱.۹۰۰	۱.۷۶۷
B4	۲.۳۳۳	۱.۸۳۳	۱.۹۶۷	۲.۰۳۳	۲.۱۰۰	۲.۵۰۰	۱.۴۳۳	۱.۹۶۷	۲.۰۰۰	۰.۰۰۰	۱.۷۶۷	۲.۰۳۳	۲.۱۳۳	۱.۹۳۳	۲.۰۳۳	۲.۱۳۳
B5	۱.۸۶۷	۲.۳۰۰	۲.۴۳۳	۲.۱۶۷	۲.۲۶۷	۲.۲۳۳	۲.۳۳۳	۱.۸۶۷	۲.۲۳۳	۱.۶۳۳	۰.۰۰۰	۱.۷۶۷	۱.۸۰۰	۱.۸۶۷	۱.۸۳۳	۲.۸۶۷

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3	B4	B5	C1	C2	C3	C4	C5
C1	۲.۲۲۳	۲.۳۰۰	۲.۱۰۰	۱.۸۶۷	۱.۷۳۳	۲.۱۶۷	۲.۱۰۰	۱.۵۳۳	۱.۵۶۷	۲.۱۰۰	۲.۵۰۰	۰.۰۰۰	۲.۲۳۳	۱.۷۶۷	۲.۶۰۰	۱.۵۶۷
C2	۲.۰۰۰	۱.۸۳۳	۲.۵۶۷	۱.۷۶۷	۲.۰۳۳	۱.۸۶۷	۲.۲۰۰	۱.۴۶۷	۱.۶۳۳	۲.۱۶۷	۲.۱۰۰	۲.۱۳۳	۰.۰۰۰	۲.۱۳۳	۱.۹۶۷	۱.۹۶۷
C3	۲.۱۳۳	۲.۱۶۷	۲.۰۶۷	۲.۳۶۷	۲.۰۶۷	۲.۳۶۷	۱.۹۰۰	۱.۵۳۳	۱.۸۳۳	۲.۲۶۷	۲.۱۳۳	۲.۱۳۳	۲.۴۰۰	۰.۰۰۰	۲.۳۶۷	۲.۰۶۷
C4	۲.۱۳۳	۲.۰۶۷	۲.۰۶۷	۱.۸۶۷	۱.۸۰۰	۱.۴۶۷	۱.۸۶۷	۲.۲۳۳	۱.۷۶۷	۱.۶۰۰	۲.۷۶۷	۱.۸۰۰	۲.۱۶۷	۲.۷۶۷	۰.۰۰۰	۲.۲۶۷
C5	۱.۷۶۷	۱.۶۰۰	۱.۷۰۰	۲.۲۳۳	۱.۸۳۳	۲.۶۳۳	۱.۹۳۳	۲.۰۰۰	۱.۶۰۰	۲.۰۶۷	۱.۷۰۰	۱.۵۶۷	۱.۹۳۳	۱.۹۳۳	۲.۰۶۷	۰.۰۰۰

نرمال کردن ماتریس تصمیم

در این گام با استفاده از ماتریس ارتباطات مستقیم را نرمال می‌کنیم نتایج در جدول ۳ آورده شده است. جهت نرمال‌سازی ابتدا مجموع درایه‌های سطر و ستون ماتریس ارتباطات مستقیم را بدست می‌آوریم سپس از بین اعداد مجموع، بزرگترین عدد را انتخاب می‌کنیم و تک تک درایه‌های ماتریس ارتباطات مستقیم (جدول۲) را بر این عدد تقسیم می‌کنیم. در این پژوهش بزرگترین عدد مجموع سطر و ستون برابر با ۳۱.۸ است. سپس تمام درایه‌های جدول ۲ را بر این عدد تقسیم می‌کنیم تا ماتریس نرمال‌شده حاصل شود.

جدول۳: ماتریس نرمال ارتباطات مستقیم

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3	B4	B5	C1	C2	C3	C4	C5
A1	۰.۰۰۰	۰.۰۵۸	۰.۰۵۶	۰.۰۶۶	۰.۰۶۶	۰.۰۵۳	۰.۰۵۳	۰.۰۴۹	۰.۰۷۰	۰.۰۶۳	۰.۰۴۷	۰.۰۷۳	۰.۰۶۰	۰.۰۶۴	۰.۰۵۹	۰.۰۵۳
A2	۰.۰۵۷	۰.۰۰۰	۰.۰۶۲	۰.۰۷۸	۰.۰۶۴	۰.۰۵۲	۰.۰۶۵	۰.۰۵۵	۰.۰۶۶	۰.۰۶۳	۰.۰۵۵	۰.۰۶۷	۰.۰۴۷	۰.۰۷۲	۰.۰۶۶	۰.۰۵۵
A3	۰.۰۵۳	۰.۰۶۹	۰.۰۰۰	۰.۰۵۵	۰.۰۶۳	۰.۰۶۱	۰.۰۶۲	۰.۰۶۶	۰.۰۶۶	۰.۰۵۵	۰.۰۵۵	۰.۰۶۲	۰.۰۶۰	۰.۰۵۶	۰.۰۸۰	۰.۰۴۴
A4	۰.۰۶۰	۰.۰۶۳	۰.۰۶۸	۰.۰۰۰	۰.۰۵۸	۰.۰۶۵	۰.۰۶۴	۰.۰۵۵	۰.۰۶۲	۰.۰۵۹	۰.۰۶۷	۰.۰۶۹	۰.۰۵۷	۰.۰۶۷	۰.۰۷۰	۰.۰۷۰
A5	۰.۰۶۸	۰.۰۵۶	۰.۰۶۴	۰.۰۶۱	۰.۰۰۰	۰.۰۵۹	۰.۰۶۳	۰.۰۷۰	۰.۰۶۵	۰.۰۶۶	۰.۰۶۷	۰.۰۶۶	۰.۰۵۰	۰.۰۵۹	۰.۰۶۲	۰.۰۶۵

A6	۰.۰۷۵	۰.۰۶۲	۰.۰۶۳	۰.۰۶۴	۰.۰۶۰	۰.۰۰۰	۰.۰۶۲	۰.۰۶۱	۰.۰۷۴	۰.۰۵۰	۰.۰۸۰	۰.۰۶۰	۰.۰۶۵	۰.۰۴۴	۰.۰۷۳	۰.۰۷۰
B1	۰.۰۶۵	۰.۰۵۷	۰.۰۵۷	۰.۰۵۷	۰.۰۶۵	۰.۰۶۴	۰.۰۰۰	۰.۰۶۵	۰.۰۵۱	۰.۰۶۱	۰.۰۶۴	۰.۰۷۲	۰.۰۷۲	۰.۰۶۰	۰.۰۵۹	۰.۰۵۶
B2	۰.۰۶۸	۰.۰۶۷	۰.۰۶۱	۰.۰۴۳	۰.۰۶۳	۰.۰۷۰	۰.۰۷۳	۰.۰۰۰	۰.۰۶۲	۰.۰۶۳	۰.۰۶۰	۰.۰۶۷	۰.۰۶۸	۰.۰۵۳	۰.۰۶۵	۰.۰۷۲
B3	۰.۰۶۰	۰.۰۶۹	۰.۰۵۶	۰.۰۶۵	۰.۰۴۷	۰.۰۶۷	۰.۰۴۸	۰.۰۵۰	۰.۰۰۰	۰.۰۵۹	۰.۰۷۲	۰.۰۵۳	۰.۰۶۶	۰.۰۵۹	۰.۰۶۰	۰.۰۵۶
B4	۰.۰۷۳	۰.۰۵۸	۰.۰۶۲	۰.۰۶۴	۰.۰۶۶	۰.۰۷۹	۰.۰۴۵	۰.۰۶۲	۰.۰۶۳	۰.۰۰۰	۰.۰۵۶	۰.۰۶۴	۰.۰۶۷	۰.۰۶۱	۰.۰۶۴	۰.۰۶۷
B5	۰.۰۵۹	۰.۰۷۲	۰.۰۷۷	۰.۰۶۸	۰.۰۷۱	۰.۰۷۰	۰.۰۷۳	۰.۰۵۹	۰.۰۷۰	۰.۰۵۱	۰.۰۰۰	۰.۰۵۶	۰.۰۵۷	۰.۰۵۹	۰.۰۵۸	۰.۰۹۰
C1	۰.۰۷۰	۰.۰۷۲	۰.۰۶۶	۰.۰۵۹	۰.۰۵۵	۰.۰۶۸	۰.۰۶۶	۰.۰۴۸	۰.۰۴۹	۰.۰۶۶	۰.۰۷۹	۰.۰۰۰	۰.۰۷۰	۰.۰۵۶	۰.۰۸۲	۰.۰۴۹
C2	۰.۰۶۳	۰.۰۵۸	۰.۰۸۱	۰.۰۵۶	۰.۰۶۴	۰.۰۵۹	۰.۰۶۹	۰.۰۴۶	۰.۰۵۱	۰.۰۶۸	۰.۰۶۶	۰.۰۶۷	۰.۰۰۰	۰.۰۶۷	۰.۰۶۲	۰.۰۶۲
C3	۰.۰۶۷	۰.۰۶۸	۰.۰۶۵	۰.۰۷۴	۰.۰۶۵	۰.۰۷۴	۰.۰۶۰	۰.۰۴۸	۰.۰۵۸	۰.۰۷۱	۰.۰۶۷	۰.۰۶۷	۰.۰۷۵	۰.۰۰۰	۰.۰۷۴	۰.۰۶۵
C4	۰.۰۶۷	۰.۰۶۵	۰.۰۶۵	۰.۰۵۹	۰.۰۵۷	۰.۰۴۶	۰.۰۵۹	۰.۰۷۰	۰.۰۵۶	۰.۰۵۰	۰.۰۸۷	۰.۰۵۷	۰.۰۶۸	۰.۰۸۷	۰.۰۰۰	۰.۰۷۱
C5	۰.۰۵۶	۰.۰۵۰	۰.۰۵۳	۰.۰۷۰	۰.۰۵۸	۰.۰۸۳	۰.۰۶۱	۰.۰۶۳	۰.۰۵۰	۰.۰۶۵	۰.۰۵۳	۰.۰۴۹	۰.۰۶۱	۰.۰۶۱	۰.۰۶۵	۰.۰۰۰

محاسبه ماتریس ارتباطات کامل (Tc)

برای محاسبه ماتریس ارتباط کامل ، ابتدا ماتریس همانی (I_{16*116}) تشکیل می‌شود. سپس ماتریس همانی را منهای ماتریس نرمال (جدول۳) کرده و ماتریس حاصل را معکوس می‌کنیم. در نهایت ماتریس نرمال را در ماتریس معکوس ضرب می‌کنیم. ماتریس روابط کل در جدول ۴ آورده شده است.

جدول۴: ماتریس ارتباطات کامل (Tc)

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3	B4	B5	C1	C2	C3	C4	C5

A1	۰.۸۹۳	۰.۹۳۲	۰.۹۴۰	۰.۹۳۵	۰.۹۱۹	۰.۹۵۰	۰.۹۱۰	۰.۸۵۷	۰.۹۱۷	۰.۹۰۶	۰.۹۵۱	۰.۹۵۱	۰.۹۳۳	۰.۹۲۱	۰.۹۸۱	۰.۹۳۰
A2	۰.۹۷۷	۰.۹۰۸	۰.۹۷۶	۰.۹۷۵	۰.۹۴۶	۰.۹۸۰	۰.۹۵۰	۰.۸۹۰	۰.۹۴۳	۰.۹۳۵	۰.۹۸۸	۰.۹۷۵	۰.۹۵۲	۰.۹۵۸	۱.۰۱۹	۰.۹۶۱
A3	۰.۹۵۷	۰.۹۵۶	۰.۹۰۱	۰.۹۳۸	۰.۹۲۹	۰.۹۷۰	۰.۹۳۱	۰.۸۸۵	۰.۹۲۷	۰.۹۱۱	۰.۹۷۱	۰.۹۵۴	۰.۹۴۶	۰.۹۲۷	۱.۰۱۳	۰.۹۳۵
A4	۱.۰۰۸	۰.۹۹۵	۱.۰۰۹	۰.۹۳۱	۰.۹۶۸	۱.۰۲۰	۰.۹۷۷	۰.۹۱۶	۰.۹۶۶	۰.۹۵۸	۱.۰۲۸	۱.۰۰۵	۰.۹۸۸	۰.۹۸۱	۱.۰۵۲	۱.۰۰۳
A5	۱.۰۰۳	۰.۹۷۶	۰.۹۹۳	۰.۹۷۵	۰.۹۰۲	۱.۰۰۲	۰.۹۶۴	۰.۹۱۸	۰.۹۵۷	۰.۹۵۲	۱.۰۱۵	۰.۹۹۰	۰.۹۷۰	۰.۹۶۱	۱.۰۳۱	۰.۹۸۶
A6	۱.۰۲۹	۱.۰۰۱	۱.۰۱۳	۰.۹۹۸	۰.۹۷۸	۰.۹۶۶	۰.۹۸۳	۰.۹۲۹	۰.۹۸۵	۰.۹۵۸	۱.۰۴۷	۱.۰۰۴	۱.۰۰۳	۰.۹۶۸	۱.۰۶۲	۱.۰۱۱
B1	۰.۹۸۶	۰.۹۶۲	۰.۹۷۳	۰.۹۵۷	۰.۹۴۹	۰.۹۹۱	۰.۸۹۱	۰.۹۰۰	۰.۹۳۱	۰.۹۳۴	۰.۹۹۸	۰.۹۸۱	۰.۹۷۶	۰.۹۴۸	۱.۰۱۴	۰.۹۶۴
B2	۱.۰۱۷	۰.۹۹۹	۱.۰۰۴	۰.۹۷۳	۰.۹۷۴	۱.۰۲۶	۰.۹۸۶	۰.۸۶۵	۰.۹۶۸	۰.۹۶۳	۱.۰۲۳	۱.۰۰۴	۱.۰۰۰	۰.۹۷۰	۱.۰۴۸	۱.۰۰۶
B3	۰.۹۴۶	۰.۹۴۰	۰.۹۳۷	۰.۹۳۱	۰.۹۰۰	۰.۹۵۹	۰.۹۰۳	۰.۸۵۵	۰.۸۴۹	۰.۸۹۹	۰.۹۷۰	۰.۹۳۰	۰.۹۳۶	۰.۹۱۴	۰.۹۷۸	۰.۹۳۰
B4	۱.۰۱۶	۰.۹۸۶	۱.۰۰۰	۰.۹۸۷	۰.۹۷۲	۱.۰۲۸	۰.۹۵۶	۰.۹۱۹	۰.۹۶۴	۰.۸۹۹	۱.۰۱۴	۰.۹۹۷	۰.۹۹۴	۰.۹۷۲	۱.۰۴۳	۰.۹۹۷
B5	۱.۰۳۸	۱.۰۳۴	۱.۰۴۸	۱.۰۲۶	۱.۰۱۱	۱.۰۵۷	۱.۰۱۶	۰.۹۴۹	۱.۰۰۴	۰.۹۸۲	۰.۹۹۷	۱.۰۲۴	۱.۰۱۹	۱.۰۰۴	۱.۰۷۴	۱.۰۵۲
C1	۱.۰۲۰	۱.۰۰۶	۱.۰۱۱	۰.۹۸۹	۰.۹۶۸	۱.۰۲۵	۰.۹۸۱	۰.۹۱۳	۰.۹۵۸	۰.۹۶۷	۱.۰۴۱	۰.۹۴۳	۱.۰۰۳	۰.۹۷۴	۱.۰۶۵	۰.۹۸۷
C2	۰.۹۹۶	۰.۹۷۶	۱.۰۰۷	۰.۹۶۹	۰.۹۶۰	۱.۰۰۰	۰.۹۶۸	۰.۸۹۶	۰.۹۴۴	۰.۹۵۳	۱.۰۱۲	۰.۹۸۹	۰.۹۲۱	۰.۹۶۷	۱.۰۳۰	۰.۹۸۱
C3	۱.۰۵۹	۱.۰۴۳	۱.۰۵۱	۱.۰۴۴	۱.۰۱۸	۱.۰۷۳	۱.۰۱۶	۰.۹۵۱	۱.۰۰۵	۱.۰۱۱	۱.۰۷۳	۱.۰۴۷	۱.۰۴۹	۰.۹۶۱	۱.۱۰۲	۱.۰۴۳
C4	۱.۰۲۵	۱.۰۰۸	۱.۰۱۸	۰.۹۹۷	۰.۹۷۸	۱.۰۱۵	۰.۹۸۳	۰.۹۳۹	۰.۹۷۱	۰.۹۶۱	۱.۰۵۶	۱.۰۰۵	۱.۰۰۹	۱.۰۰۹	۰.۹۹۸	۱.۰۱۶

C5	۰.۹۵۴	۰.۹۳۴	۰.۹۴۷	۰.۹۴۷	۰.۹۲۰	۰.۹۸۵	۰.۹۲۵	۰.۸۷۸	۰.۹۰۸	۰.۹۱۶	۰.۹۶۵	۰.۹۳۸	۰.۹۴۳	۰.۹۲۷	۰.۹۹۵	۰.۸۸۸

تاثیرگذاری و تاثیرپذیری زیرمعیارها

در این گام تاثیرگذاری و تاثیرپذیری زیرمعیارها مشخص می‌شود زیرمعیارهای تاثیرگذار از نوع معیارهای علی هستند و زیرمعیارهای تاثیرپذیر از نوع معلول هستند. نتایج در جدول ۵ آورده شده است. همچنین نمودار علی و معلولی شاخص ها در شکل ۱ تا ۳ رسم شده است. در بین زیرمعیارهای آسیب پذیری اقلیمی ، سه معیارآستانه تحمل طبیعی،تغییر در طول فصول، تاثیر خشکسالی های مکرر ماهیت علت دارند یعنی از تاثیرگذاری بیشتری برخوردارند. در بین زیرمعیارهای اجتماعی، دو معیار ظرفیت اقامتی و امکانات اضطراری علت هستند. در بین زیرمعیارهای عملکردی، دو معیار روندهای بازار گردشگری و رقابت پذیری منطقه ای ماهیت علت داشته که تاثیرگذارترین می‌باشد.

جدول۵ : تاثیرگذاری و تاثیرپذیری زیرمعیارها

	نام معیار	کد	D	R	D+R	D-R	نوع معیار
آسیب پذیری اقلیمی	حساسیت به نوسانات دما	A1	۵.۵۶۸	۵.۸۶۶	۱۱.۴۳۴	-۰.۲۹۷	معلول
	خطر سیلاب های ناگهانی	A2	۵.۷۶۲	۵.۷۶۸	۱۱.۵۲۹	-۰.۰۰۶	معلول
	تکرار پدیده های حدی	A3	۵.۶۵۰	۵.۸۳۲	۱۱.۴۸۱	-۰.۱۸۲	معلول
	آستانه تحمل طبیعی	A4	۵.۹۳۰	۵.۷۵۲	۱۱.۶۸۲	۰.۱۷۸	علت
	تغییر در طول فصول	A5	۵.۸۵۱	۵.۶۴۲	۱۱.۴۹۲	۰.۲۰۹	علت
	تاثیر خشکسالی های مکرر	A6	۵.۹۸۶	۵.۸۸۸	۱۱.۸۷۴	۰.۰۹۸	علت
زیرساخت های گردشگری	کیفیت دسترسی	B1	۴.۶۵۴	۴.۷۵۳	۹.۴۰۷	-۰.۰۹۹	معلول
	ظرفیت اقامتی	B2	۴.۸۰۵	۴.۴۸۸	۹.۲۹۳	۰.۳۱۶	علت
	سیستم های هشدار	B3	۴.۴۷۷	۴.۷۱۷	۹.۱۹۴	-۰.۲۳۹	معلول
	امکانات اضطراری	B4	۴.۷۵۲	۴.۶۷۷	۹.۴۲۹	۰.۰۷۶	علت
	تامین امنیت و ایمنی	B5	۴.۹۴۸	۵.۰۰۱	۹.۹۴۸	-۰.۰۵۳	معلول
پتانسیل اقتصاد گردشگری	روندهای بازار گردشگری	C1	۴.۹۷۲	۴.۹۲۲	۹.۸۹۳	۰.۰۵۰	علت
	جریان های مالی و اعتباری	C2	۴.۸۸۹	۴.۹۲۴	۹.۸۱۳	-۰.۰۳۵	معلول
	رقابت پذیری منطقه ای	C3	۵.۲۰۱	۴.۸۳۸	۱۰.۰۴۰	۰.۳۶۳	علت
	برنامه های بازاریابی	C4	۵.۰۳۷	۵.۱۹۰	۱۰.۲۲۷	-۰.۱۵۳	معلول
	پشتیبانی از کسب و کارهای کوچک	C5	۴.۶۹۰	۴.۹۱۶	۹.۶۰۶	-۰.۲۲۵	معلول

با توجه به جدول ۵، شاخصی که دارای D-R مثبت است نشان از علت بودن آن دارد یعنی از تاثیرگذاری بالایی برخوردار است که در جدول ۵ مشخص شده است.

با توجه به شکل ۱تا ۳، معیارهایی که دارای D+R بزرگتری هستند دارای ارتباط بیشتری با سیستم هستند بنابراین در بین زیرمعیارهای فردی؛ تاثیر خشکسالی های مکرر در بین زیرمعیارهای اجتماعی؛ تامین امنیت و ایمنی در بین زیرمعیارهای عملکردی؛ برنامه های بازاریابی دارای بیشترین مقدار D+R هستند که نشان از بیشترین ارتباط با دیگر عوامل می‌باشد.

تشکیل ماتریس ارتباط کامل ابعاد (T_D^{∞}) و نرمال سازی آن

در این گام ماتریس ارتباطات کامل ابعاد را ایجاد می‌کنیم نتیجه در جدول ۶ آورده شده است همچنین از روی این نمودار نیز تاثیرگذاری و تاثیرپذیری معیارهای اصلی تعیین می‌شود که در شکل ۴ آورده شده است. سپس توسط این ماتریس را نرمال می‌کنیم نتایج در جدول ۷ آورده شده است.

جدول۶: ماتریس ارتباط کامل ابعاد (T_D^{∞})

	A	B	C
A	۰.۹۶۵	۰.۹۴۸	۰.۹۷۹
B	۰.۹۸۸	۰.۹۴۵	۰.۹۹۱
C	۰.۹۹۸	۰.۹۶۸	۰.۹۹۲

با استفاده از جدول ۶ تاثیرگذاری و تاثیرپذیری معیارهای اصلی تعیین می‌شود به طریق مشابه مقادیر D و R را محاسبه می‌کنیم. با توجه به جدول ۷، معیار آسیب پذیری اقلیمی و پتانسیل اقتصاد گردشگری هر دو دارای D-R منفی هستند یعنی جنبه معلول دارند و از تاثیرپذیری بالایی برخوردارند.

جدول۷: تاثیرگذاری و تاثیرپذیری معیارهای اصلی

نام معیار	کد	D	R	D+R	D-R	نوع معیار
آسیب پذیری اقلیمی	A	۲.۸۹۲	۲.۹۵۱	۵.۸۴۳	-۰.۰۵۹	معلول
زیرساخت های گردشگری	B	۲.۹۲۴	۲.۸۶۱	۵.۷۸۵	۰.۰۶۳	علت
پتانسیل اقتصاد گردشگری	C	۲.۹۵۷	۲.۹۶۲	۵.۹۱۹	-۰.۰۰۴	معلول

محور مختصات را با مقادیر D+R و D-R تشکیل می‌دهیم نتایج در شکل ۴ آورده شده است.

نتیجه گیری

تغییر اقلیم، به عنوان یک چالش جهانی و چندوجهی، دارای ابعاد پیچیده‌ای است که می‌تواند تأثیرات عمیقی بر بخش‌های مختلف، از جمله گردشگری، داشته باشد. این پدیده نه تنها الگوهای آب و هوایی را دگرگون می‌کند، بلکه با افزایش دما، تغییر در رژیم‌های بارش، وقوع پدیده‌های حدی مانند سیل، خشکسالی، طوفان‌های شدید و موج‌های گرما، به طور مستقیم و غیرمستقیم بر جاذبه‌های طبیعی گردشگری شهری اثر می‌گذارد. از دیدگاه نظری، این تغییرات می‌توانند از طریق کاهش کیفیت محیطی، آسیب به زیرساخت‌ها، تغییر در جذابیت‌های بصری و اکولوژیکی، و در نهایت کاهش پایداری و تاب‌آوری مقاصد گردشگری، ریسک‌های جدی را متوجه این صنعت حیاتی کنند. به طور خاص، آسیب‌پذیری اکوسیستم‌های شهری مانند پارک‌ها، رودخانه‌ها، تالاب‌ها و گونه‌های گیاهی و جانوری بومی، می‌تواند منجر به کاهش تنوع زیستی و از دست رفتن خدمات اکوسیستمی شود که پایه و اساس جذابیت‌های طبیعی گردشگری را تشکیل می‌دهند. علاوه بر این، تغییر اقلیم می‌تواند بر الگوهای سفر گردشگران و حتی بر تصمیم‌گیری آن‌ها برای انتخاب مقاصد سفر نیز تأثیر بگذارد، که این خود نیازمند بازنگری در استراتژی‌های مدیریت و توسعه گردشگری شهری است. این مبانی نشان می‌دهد که فهم عمیق ارتباط بین تغییر اقلیم و گردشگری طبیعی شهری، برای اتخاذ رویکردهای موثر در راستای سازگاری و کاهش آسیب‌پذیری ضروری است. هدف پژوهش حاضر، ارزیابی ریسک تغییر اقلیم بر جاذبه های طبیعی گردشگری شهری (مطالعه موردی: کلانشهر ارومیه) می باشد. هدف پژوهش حاضر، ارزیابی ریسک تغییر اقلیم بر جاذبه های طبیعی گردشگری شهری (مطالعه موردی: کلانشهر ارومیه) می باشد. در این پژوهش از مدل ANP Fuzzy استفاده شده است. این پژوهش ازنظر هدف، کاربردی - نظری و ازنظر روش، توصیفی– تحلیلی است. اطلاعات و داده های موردنیاز از طریق روش کتابخانه ای جمع آوری شده است. با استناد به یافته‌های حاصل از به‌کارگیری مدل ANP فازی در ارزیابی ریسک تغییر اقلیم بر جاذبه‌های طبیعی گردشگری شهری کلانشهر ارومیه، می‌توان نتیجه گرفت که این پدیده، تهدیدی جدی و چندوجهی برای بخش گردشگری شهر محسوب می‌شود. تحلیل‌ها نشان دادند که آسیب‌پذیری اقلیمی جاذبه‌ها، به ویژه حساسیت به نوسانات دما و تغییر الگوهای بارش، به همراه وضعیت اکولوژیکی جاذبه‌ها، از قبیل سلامت پوشش گیاهی و تنوع زیستی، در صدر عوامل ریسک قرار دارند. مدل ANP فازی به خوبی توانست روابط پیچیده و تأثیرات متقابل بین معیارها و زیرمعیارها را آشکار سازد، که این امر اهمیت نگاه سیستمی به موضوع را برجسته می‌کند. نتایج همچنین بر نقش حیاتی مدیریت و برنامه‌ریزی شهری، شامل وجود طرح‌های تطبیقی و ظرفیت نهادی، و همچنین آگاهی و مشارکت ذینفعان، به ویژه جامعه محلی و بخش خصوصی، در کاهش سطح ریسک و افزایش تاب‌آوری تأکید دارد. علاوه بر این، کاستی‌ها درزیرساخت‌های گردشگری و پتانسیل‌های اقتصادی و تصویری شهر در مواجهه با تغییرات اقلیمی، نیازمند توجه ویژه مسئولان است. در نهایت، سازگاری

و انطباق‌پذیری با اتکا به نوآوری و فناوری‌های پایدار، به عنوان راهکار کلیدی برای حفظ و ارتقاء جذابیت‌های طبیعی گردشگری ارومیه در بلندمدت شناخته شد. لذا، اتخاذ رویکردهای استراتژیک و یکپارچه مبتنی بر این یافته‌ها، برای تضمین آینده پایدار گردشگری در ارومیه امری ضروری است.

منابع

اربابی سبزواری، آزاد، (۱۴۰۱)، تحلیل و تدوین شرایط اقلیمی در جهت توسعه پایدار گردشگری شهری (مطالعه موردی: شهر بندر چابهار، ایران)، فصلنامه علمی مطالعات برنامه ریزی سکونتگاه های انسانی، دوره ۱۷، شماره ۱.

بهمن پور، هومن، منوچهری، مهر افزا، طاهری حسین آبادی، محمد، توفیق، علی، (۱۳۹۹)، جستاری پیرامون پیامدهای تغییر اقلیم و گرمایش جهانی بر ورزش (از تئوری تا رخداد)، ششمین همایش ملی علوم ورزشی و تربیت بدنی ایران.

خالدی، شهریار، کریمی، یاشار، ابدالی، حسین، محمدی، غلام حسن، (۱۳۹۸)، تحلیل شاخص های اقلیم آسایش و ارتباط آن با گردشگری در شهر تبریز، دو فصلنامه توسعه پایدار محیط جغرافیایی، سال اول، شماره اول.

ذوالفقاری،حسن، مظلوم، کتایون، اوجی، روح اله، ماتزار اکیس، آندریاس، (۱۴۰۲)، تاثیر گرمایش جهانی بر اقلیم گردشگری ایران، فصلنامه ی علمی فضای جغرافیایی، سال بیست و سوم، شماره ی ۸۴.

رحیمی، داریوش، بشیریان، فاطمه، محمدی، رستگار، رحیمی،مهدی، (۱۴۰۳)، ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر گردشگری استان خوزستان، مجله مهندسی اکوسیستم بیابان، دوره ۱۲، شماره ۴۰.

رستمی فرد، صفورا، (۱۴۰۳)، ضرورت توجه به بنیان های اقلیمی در برنامه ریزی توسعه آمایش گردشگری در پارک ناژوان اصفهان، هشتمین کنگره سالانه بین المللی توسعه کشاورزی، منابع طبیعی، محیط زیست و گردشگری ایران.

زارعی، عفت، زارعی، زینب، (۱۴۰۳)، تاثیر اقلیم در توسعه گردشگری شهری (مطالعه موردی: شهر رادکان)، اولین همایش بین المللی صنعت گردشگری.

سلیقه، محمد، (۱۴۰۲)، اثر گرمایش جهانی بر تغییرات اقلیمی در شهرهای ایران و ضرورت های زیست محیطی، دومین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس بین المللی روز آینده، شهر آینده: با محوریت شهرهای هوشمند پایدار.

شیخ زاده، کامران، گندمکار، امیر، عباسی، علیرضا، (۱۴۰۴)، شناخت روند تغییرات کوتاه مدت و بلند مدت اقلیم آسایش گردشگری ایران، مجله جغرافیا و آینده پژوهی منطقه ای، دوره ۳، شماره ۲.

عباسی، منصوره، (۱۴۰۳)، بررسی تاثیر تغییرات اقلیم بر توسعه گردشگری، ششمین کنفرانس ملی مهندسی و مدیریت محیط زیست.

عابدی، سمانه، صداقت، ملیحه، (۱۴۰۰)، ارزیابی اثرات تغییرات اقلیم بر تقاضای گردشگری در شهرهای ایران، فصلنامه علمی اقتصاد و مدیریت شهری، دوره ۱۰، شماره ۳۷.

معتمدی، مهران، (۱۴۰۰)، ارزیابی توان آب و هوایی در توسعه گردشگری طبیعی شهر سنقر کرمانشاه، دومین همایش ملی ایران شناسی استان ها تاریخ، فرهنگ و هنر کرمانشاه.

هوشیار، محمود، حسینی، سید اسعد، (۱۴۰۲)، ارزیابی زمانی گردشگری با استفاده از شاخص های اقلیمی تعطیلات (HCI) و اقلیم گردشگری (TCI)، فصلنامه مطالعات جغرافیایی مناطق کوهستانی، سال چهارم، شماره سوم.

موسوی و همکاران، (۱۴۰۱)، تأثیر مشارکت اجتماعی در فرایند بازآفرینی بافت قدیم شهری (مورد مطالعه: منطقه ۴ شهر ارومیه)، فصلنامه جغرافیا، دوره ۲۰، شماره ۷۴.

Aygün Oğur, A., & Baycan, T. (2022). Assessing climate change impacts on tourism demand in Turkey. Environment, Development and Sustainability , 1 -31.

Borna, R. (2021). Determining the time calendar of tourism climate in line with the development and planning of tourism (case study: Markazi Province). New perspectives in human geography, 11 (1): 263.

Grillakis, M.G., Koutroulis, A.G., & Tsanis, I.K. (2022). he 2 °C global warming effect on summer European tourism through different indices, Int J Biometeorol, 1-11.

Liana, K., Tsitsino, D., & Lashari, K. (2022). the role of climate in the development of georgia's tourism sector. Computational geophysics, 3(01(77)), 16-20.

Mieczkowski, Z.2020. The tourism climatic index: a method of evaluating world climates for tourism. The Canadian Geographer/Le Géographe canadien, 29(3): 220-233.

Scott, D., Hall, C. M., Gössling, S. (2019). Global tourism vulnerability to climate change. Annals of Tourism Research, 77: 49-61.

Torres, C., Jordà, G., de Vílchez, P. , Vaquer - Sunyer, R., Rita, J., Canals, V., & Miranda, M. Á. (2021). Climate change and its impacts in the Balearic Islands: a guide for policy design in Mediterranean regions. Regional Environmental Change , 21(4), 1 -19.

Xiu-xia, L., Qingsheng, W., Yucheng, H., Linhai, J., & Wenyan, Ge. (2023). Spatio-temporal changes in tourism climate index on the Tibetan Plateau over the last 42 years. Current Issues in Tourism, 1-5.

Climate Change Risk Assessment on Natural Attractions of Urban Tourism (Case Study: Urmia Metropolis)

sahand azar1

1- PhD Student, Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, Urmia University, Urmia, Iran

* Corresponding author: Email: s.azar@urmia.ac.ir

Ayoub Manouchehri2

2- Assistant Professor, Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, Urmia University, Urmia, Iran
Email: a. manouchehri@urmia.ac.ir

Abstract

Climate change, by altering weather patterns, is a serious threat to natural attractions of urban tourism. This phenomenon can lead to environmental degradation, loss of biodiversity, and reduction in the quality of urban green spaces. As a result, these changes negatively affect the attractiveness of these areas for tourists and harm the local economy. The aim of the present study is to assess the risk of climate change on natural attractions of urban tourism (case study: Urmia metropolis). In this study, the Fuzzy ANP model has been used. This study is applied-theoretical in terms of purpose and descriptive-analytical in terms of method. The required information and data have been collected through the library method. For this purpose, the empathetic multi-criteria analytical approach of the Fuzzy Network Analysis Process (Fuzzy ANP) has been used to accurately assess the complex dimensions and interrelationships between different risk factors. The results of this analysis, while identifying and prioritizing the most important risks, provide a clear picture of vulnerabilities and existing potential for resilience. These findings can provide a scientific and practical basis for policymakers and urban and tourism planners in Urmia to ensure the sustainability and development of these valuable attractions in the face of climate challenges by adopting effective strategies and making informed decisions.

Keywords: Climate change risk, natural attractions of urban tourism, Urmia metropolis, Fuzzy ANP model

آشکارسازی تغییرات و روند اقلیمی آخرین یخبندان بهاره جهت برنامه ریزی کشاورزی در شهرستان کرمانشاه

زهره مریانجی[۱]، کبری ایمانی فر[۲]، رضا خسروبیگی[۳]

۱- دانشیارگروه جغرافیا - آب و هواشناسی دانشگاه سید جمال الدین اسدآبادی، اسدآباد، ایران
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه سید جمال الدین اسدآبادی
۳- دانشیارگروه جغرافیا دانشگاه سید جمال الدین اسدآبادی، اسدآباد، ایران
آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول maryanaji@sjau.ac.ir

چکیده

تغییر اقلیم در قرن اخیر به یک معضل بزرگ زیست محیطی تبدیل شده است، اثرات آن به‌ویژه در زندگی انسان، قابل ملاحظه می‌باشد. یکی از آن‌ها خسارات کشاورزی در برابر بحران‌های اقلیمی نظیر یخبندان و سرمازدگی است. این مطالعه به بررسی روند زمانی آخرین یخبندان بهاره در شهرستان کرمانشاه با استفاده از روش‌های آماری در طول دوره۲۰ ساله (۲۰۰۵ – ۲۰۲۴) می‌پردازد. نتایج نشان می‌دهد حداقل دمای کلی در حال افزایش است و زمان وقوع یخبندان نامنظم‌تر شده است. کشاورزان منطقه با افزایش خطر از بین رفتن محصول به دلیل یخبندان‌های نابهنگام مواجه هستند که می‌تواند پیامدهای جدی برای معیشت آن‌ها و امنیت غذایی منطقه‌ای داشته باشد. بر اساس نتایج تعداد روزهای یخبندان بهاری کاهش یافته است، اما زمان وقوع آن نامنظم‌تر شده و تا اواسط اردیبهشت ماه ادامه دارد. این تغییر، عملکرد محصولات کشاورزی را پایین آورده است، زیرا آغاز بهار گرم می‌تواند منجر به رشد زود هنگام محصولات شود و آن‌ها را در برابر یخبندان‌های دیررس(اواسط بهار) آسیب‌پذیر کند. این مقاله با تجزیه و تحلیل داده‌های ایستگاه هواشناسی سینوپتیک کرمانشاه، شکاف مهمی را در تحقیقات الگوهای یخبندان بهاره در منطقه پر می‌کند و بینش‌هایی را برای استراتژی‌های کاهش اثرات آن ارائه می‌دهد.

کلید واژه‌ها: تغییرات اقلیمی، کشاورزی، سرمازدگی، بهار، محصولات باغی.

مقدمه

تغییرات اقلیمی در دهه‌های اخیر به یکی از چالش‌های اصلی در سطح جهانی تبدیل شده و پیامدهای آن به ویژه در بخش کشاورزی به طور فزاینده‌ای مشهود است. کشاورزی از مهمترین فعالیت های انسان در سطح کره زمین است که با روی آوردن انسان به این فعالیت فصل جدیدی از زندگی در تاریخ بشر آغاز شد. کشاورزی هم اکنون مهمترین فعالیت اقتصادی در جهان است و یک سوم کل خشکی های روی زمین را در بر می گیرد و بیشترین سهم از درآمد ملی را تشکیل می دهد و همچنین به عنوان یکی از ارکان اصلی تامین امنیت غذایی و اقتصاد کشورها تحت تاثیر عوامل اقلیمی قرار دارد (سمیره صی محمدی و همکاران، ۱۴۰۰). دما از فاکتورهای اقلیمی مهم و مؤثر بر رشد گیاهان و تولیدات کشاورزی محسوب می‌شود. کاهش دما به پایین‌تر از حد آستانه تحمل گیاه، باعث بروز سرمازدگی می‌شود و در صورتی که ایـن کاهش موجب رسیدن دمای هوا به پایین‌تر از صفر درجه سانتی‌گراد شود، باعث بـروز پدیـده یخبندان و یخزدگی گیاه می‌شود. خسارت آخرین یخبندان بهاره در کشاورزی، هزینه بسیاری برای کشاورزان و امنیت غذایی جهانی دارد. استان کرمانشاه به دلیل موقعیت جغرافیایی و شرایط آب و هوایی، به شدت از نوسانات و تغییرات اقلیمی، به ویژه پدیده‌ی یخبندان، تأثیر می‌پذیرد. این پدیده خسارات گسترده‌ای به محصولات کشاورزی و باغی وارد کرده و امنیت غذایی و معیشت کشاورزان منطقه را تهدید می‌کند. علیرغم اهمیت این موضوع، مطالعات جامعی برای شناسایی دقیق روند و شدت آخرین یخبندان بهاره در شهرستان کرمانشاه انجام نشده است. عدم آگاهی از الگوهای مکانی و زمانی آخرین یخبندان بهاره، برنامه‌ریزی‌های لازم برای کاهش آسیب‌ها و اتخاذ راهکارهای مدیریتی مناسب را دشوار می‌سازد. بنابراین، نیاز به یک تحلیل دقیق و علمی برای آشکارسازی و پیش‌بینی این پدیده بیش از پیش احساس می‌شود. این پژوهش با استفاده از داده‌های آماری و مدل‌سازی‌های اقلیمی، شکاف علمی موجود در زمینه تحلیل آخرین یخبندان بهاره در شهرستان کرمانشاه را پر می‌کند و می‌تواند به عنوان مبنایی برای تحقیقات آتی در سایر مناطق کشور استفاده شود. تحقیق حاضر به بررسی و تحلیل روند تغییرات زمانی و مکانی پدیده آخرین یخبندان بهاره کشاورزی در شهرستان کرمانشاه و ارزیابی تأثیر یخبندان و سرمازدگی بر محصولات کشاورزی اصلی منطقه مانند (باغات سیب) می‌پردازد.

مطالعات قبلی نشان داده‌اند که پدیده نوسان جنوبی ال نینو (ENSO) بر وقوع یخبندان در ایران تأثیر می‌گذارد و فازهای مختلف ENSO منجر به تغییراتی در زمان و احتمال وقوع یخبندان می‌شود. این تغییرپذیری اقلیمی، همراه با توپوگرافی محلی و نزدیکی به منابع رطوبت، پیش‌بینی وقوع یخبندان در مناطقی مانند کرمانشاه را پیچیده می‌کند(Helali et al., 2021). تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که فراوانی یخبندان‌های دیررس بهاره (LSF) در ایران به طور قابل توجهی کاهش

یافته است، با نرخ ۱/۴ روز در هر دهه، به ویژه از دهه ۱۹۸۰ (Rahimi et al., 2017)، که با الگوهای گرمایش جهانی سازگار است (Hosseini et al., 2021).

بوم‌شناسان گیاهی نگران یک رابطه به ظاهر متناقض بین رشد گیاهان و تغییرات آب و هوا هستند، که نشان می‌دهد گرم شدن آب و هوا ممکن است در واقع خطر آسیب سرمازدگی گیاهان را افزایش دهد (Hanson & et al,2008)، زیرا نوسانات دمای بهار یک تهدید واقعی برای ساختار و عملکرد اکوسیستم‌های زمینی در آب و هوای گرم است. افزایش دما، به ویژه حداقل دما، به عنوان عامل اصلی تغییرات در الگوهای یخبندان شناخته شده است. در ایران، میانگین حداقل دمای سالانه در حال افزایش بوده و منجر به کاهش تعداد روزهای یخبندان شده است (فوزی و همکاران، ۱۴۰۳). با این حال، این روند گرمایش لزوماً خطر یخبندان را از بین نمی‌برد، زیرا نوسانات دما و رویدادهای شدید هنوز هم می‌توانند رخ دهند، به خصوص در اوایل بهار که محصولات کشاورزی بیشترین آسیب‌پذیری را دارند (حکم‌آبادی و زاکینتینوس، ۲۰۱۰).

همچنین (وانگ و همکاران، ۲۰۲۵)، (گو و همکاران،۲۰۲۴)، (جادویگا و همکاران،۲۰۲۴)، (چن و همکاران،۲۰۲۳)، (تادیس و همکاران،۲۰۲۳)، (دریپر و همکاران ،۲۰۲۲)، (نوح و همکاران،۲۰۲۱)، (کروسووا و همکاران،۲۰۲۰)، (ما و همکاران، ۲۰۱۹)، (تونی کلم و همکاران، ۲۰۱۷)، (یو و همکاران، ۲۰۱۶)، (یان، ۲۰۱۳)، (درگاهیان و همکاران، ۱۴۰۳)، (میان‌آبادی و سلاچقه، ۱۴۰۳)، (زیارتی، ۱۴۰۲)، (ابن‌حجازی و همکاران، ۱۴۰۱)، (احمدی و همکاران، ۱۳۹۹)، (پرویز و همکاران، ۱۴۰۰)، (مریانجی و وجدانی نوذر، ۱۳۹۹)، (بی آزار و فردوسی، ۱۳۹۹)، (فزونی اردکانی و شاه ولی، ۱۳۹۱)، (نصر اصفهانی و یزدان پناه، ۱۳۹۸)، (مریانجی و براتیان،۱۳۹۵)، (سلمان پور، ۱۳۸۶)، (نوحی، ۱۳۸۷) و (حجازی زاده، ۱۳۸۶)، در رابطه با پیش‌بینی اقلیمی یخبندان و سرمازدگی کشاورزی مطالعه و تحقیقات متعددی نمودند.

منطقه مورد مطالعه و داده‌ها

در این مطالعه از آمار روزانه حداقل دمای ایستگاه سینوپتیک هواشناسی شهرستان کرمانشاه استفاده شده است. در اولین مرحله لازم است که طول دوره آماری انتخاب شود. طول دوره آماری در مطالعات حاضر ۲۰ ساله می‌باشد (۲۰۲۴-۲۰۰۵) که انتخاب این دوره با توجه به این نکته صورت پذیرفت که ایستگاه منتخب در این دوره دارای آمار بوده و نیازی به بازسازی داده‌ها نبوده است. مشخصات ایستگاه هواشناسی در جدول (۱) به تفصیل آمده است.

جدول ۱- مشخصات ایستگاه هواشناسی منطقه مورد مطالعه

نام	نوع ایستگاه	ارتفاع(متر)	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
کرمانشاه	سینوپتیک	۱۳۱۸	۴۷/۱۵	۳۴/۳۵

شرح منطقه مورد مطالعه

شهرستان کرمانشاه با مساحتی حدود ۵۶۴۷/۱ کیلومتر مربع در غرب ایران واقع شده است. این شهرستان بین عرض جغرافیایی ۴۰ ۳۳ تا ۱۸ ۳۵ شمالی و طول جغرافیایی ۲۴ ۴۵ تا ۷ ۴۸ شرقی قرار دارد. به دلیل ارتفاع زیاد از سطح دریا، یکی از سردترین مناطق کشور محسوب می‌شود.

جمع‌آوری داده‌ها

برای اطمینان از اعتبار داده‌ها، آزمون همگنی انجام شد. روش آزمون توالی برای تأیید همگنی داده‌های حداقل دما اعمال شد. نتایج همگن بودن داده‌های حداقل دما در ایستگاه را در سطح اطمینان ۵٪ تأیید می‌کند.

پس از صحت‌سنجی داده‌ها، به‌منظور تحلیل دقیق‌تر، مؤلفه روند و تغییرپذیری آن از داده‌ها استخراج گردید. تغییرات زمانی دمای صفر و زیر صفر در هر بازه زمانی محتمل است. بنابراین تحلیل این تغییرات و ازجمله تحلیل روند در بازه‌های زمانی مختلف قادر است، تصویری دقیق‌تر از رویدادها (یخبندان و سرمازدگی) ارائه نماید.

به منظور بررسی روند خطی در داده‌های دمای حداقل، از تحلیل رگرسیون خطی استفاده گردید.

(۱)

$$b=\frac{n\sum X_iY_i-\sum X_i\sum Y_i}{n\sum X_i^2-(\sum X_i)^2}$$

(۲)

$$a=\overline{Y}-n\overline{X}$$

(۳)

برای بررسی وجود روند یکنواخت (افزایشی یا کاهشی) در سری زمانی داده‌های دمای حداقل، از آزمون غیرپارامتری من کندال استفاده شد که برای شناسایی روند در سری‌های زمانی مناسب است. در صورت وجود روند داده‌ها غیر تصادفی بوده و برای تعیین تصادفی بودن داده‌ها از تست زیر استفاده شده است.

(۴)

$$T=\left[\frac{4P}{n(n-1)}\right]-1$$

که T آماره کندال، n تعداد کل سال‌های آماری و P مجموع تعداد رتبه‌های بزرگتراز ردیف ni است که بعد از آن قرار می‌گیرد.

(۵)

$$P = \sum_{i=1}^{n} n_i$$

n نیز تعداد کل سال‌های آماری مورد استفاده است. به منظور سنجش معنی‌دار بودن آماره T از رابطه (۶) محاسبه می‌شود:

$$(T)_t = \pm tg\sqrt{\frac{4n+10}{9n(n-1)}}$$

(۶)

که tg مقدار بحرانی نرمال یا استاندارد (z) با سطح احتمال آزمون است .

تحلیل آماری و نتایج

تحلیل داده‌ها چندین روند مهم را آشکار می‌کند. شکل (۲) تاریخ آخرین یخبندان بهاری (به روز ژولیوسی) و حداقل مطلق دما را از سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۴ نشان می‌دهد. اگرچه تغییرات سالانه قابل توجهی وجود دارد، اما خط روند نشان‌دهنده افزایش جزئی در تاریخ آخرین یخبندان بهاری در طول زمان است که نشان می‌دهد یخبندان‌ها در اواخر فصل رخ می‌دهند.

جدول ۴- تعداد روزهای یخبندان

نوع ایستگاه	شهرستان	یخبندان سالانه	بهار	پاییز	زمستان
سینوپتیک تکمیلی	کرمانشاه	۷۱	۳	۱۸	۵۰

تحلیل فصلی روزهای یخبندان نشان می‌دهد که زمستان بالاترین درصد روزهای یخبندان (۷۰٪) را دارد و پس از آن پاییز (۲۵٪) و بهار (۵٪) قرار دارند. اگرچه بهار کمترین درصد را دارد، اما یخبندان در این فصل بیشترین آسیب را به کشاورزی وارد می‌کند، زیرا با مراحل حیاتی رشد محصول مانند گلدهی همزمان است.

شکل۳- (الف) میزان روند حداقل دمای مطلق – (ب) خاتمه یخبندان بهاره

نمودار خطی "حداقل دمای مطلق" شکل ۳(الف) به همراه خط روند، یک روند افزایشی ملایم در حداقل دما را طی دوره آماری (۲۰۰۵-۲۰۲۴) نشان می‌دهد. شیب مثبت خط روند (۰/۰۸۰۶) نشان می‌دهد که به طور میانگین، حداقل دما در طول این دوره افزایش یافته است که با پدیده گرمایش جهانی و نتایج مطالعات دیگر که به افزایش حداقل دمای سالانه در ایران اشاره دارند، همخوانی دارد. مقدار R2 برابر با (۰/۱۸۰۷) است که نشان می‌دهد حدود ۱۸٪ از تغییرات حداقل دما

توسط این روند خطی توضیح داده می‌شود. این مقدار پایین به این معناست که نوسانات سالانه بسیار زیادی وجود دارد و روند خطی به تنهایی توصیف‌کننده کاملی برای تغییرات دما نیست. برای مثال، یک افت شدید دما در سال ۲۰۱۴ مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده وقوع یک سرمای شدید در آن سال است.

شکل ۳ (ب) نشان‌دهنده تأخیر در زمان وقوع آخرین یخبندان بهاره است. شیب مثبت خط روند (۰/۳۲۲۱) بیانگر این است که تاریخ آخرین یخبندان بهاره در طول دوره مورد بررسی به سمت اواسط بهار کشیده شده است. یعنی زمان وقوع آن افزایشی شده و به اواسط اردیبهشت کشیده شده است و مقدار بسیار پایین$R2$ (حدود ۴٪) نشان می‌دهد که این روند بسیار ضعیف است و نوسانات سالانه بسیار شدید است. برای مثال، سال ۲۰۱۹ با روز ژولیوسی ۱۱۵ و سال ۲۰۰۹ با روز ۱۱۰، سال‌هایی بوده‌اند که یخبندان بهاره بسیار دیرتر از میانگین رخ داده است. همانطور که اشاره شد، این بی‌نظمی در زمان وقوع یخبندان، خطرناک‌ترین جنبه برای کشاورزی است؛ زیرا گیاهان با گرم شدن هوا شکوفه می‌دهند و وقوع یک یخبندان دیرهنگام می‌تواند خسارت جبران‌ناپذیری به بار آورد.

بر اساس نمودارها (شکل ۴)، در هر دو متغیر (حداقل دما و خاتمه یخبندان)، خطوط ui یک روند صعودی کلی را نشان می‌دهند که با تحلیل رگرسیون خطی مطابقت دارد.

نتایج آزمون من‌کندال نشان می‌دهد که اگرچه تعداد روزهای یخبندان بهاری کاهش یافته است، اما زمان وقوع آن‌ها نامنظم‌تر شده و تا اواسط ماه مه ادامه دارد. این تغییر، خطر محصول را افزایش می‌دهد، زیرا شروع گرم‌تر بهار می‌تواند منجر به رشد زودتر گیاهان شود و آن‌ها را در برابر یخبندان‌های دیررس آسیب‌پذیرتر کند.

نتیجه‌گیری

این مطالعه روند نگران‌کننده‌ای را در الگوی یخبندان در شهرستان کرمانشاه نشان می‌دهد. اگرچه حداقل دمای کلی در حال افزایش است، که با روند گرمایش جهانی سازگار است، اما زمان وقوع یخبندان نامنظم‌تر شده است. وقوع یخبندان‌های دیررس بهاره، حتی اگر به طور کلی کمتر باشد، تهدیدی قابل توجه برای بهره‌وری کشاورزی در منطقه محسوب می‌شود. تغییر وقوع یخبندان به اواخر بهار، آسیب‌پذیری محصولات مهمی مانند سیب، بادام و گردو را که ممکن است وارد مراحل حساس رشد شده باشند، افزایش می‌دهد. بنابراین، کشاورزان منطقه با افزایش خطر از بین رفتن محصول به دلیل یخبندان‌های نابهنگام مواجه هستند که می‌تواند پیامدهای جدی برای معیشت آن‌ها و امنیت غذایی منطقه‌ای داشته باشد.

پیشنهادات

بر اساس یافته‌های این مطالعه، توصیه‌های زیر ارائه می‌شود:

توسعه سیستم‌های هشدار اولیه: ایجاد سیستم‌های هشدار اولیه دقیق‌تر و محلی‌تر برای یخبندان بسیار مهم است. استفاده از مدل‌سازی پیشرفته آب و هوا و داده‌های هواشناسی در زمان واقعی می‌تواند هشدارهای به موقع را در اختیار کشاورزان قرار دهد و به آن‌ها امکان دهد اقدامات حفاظتی را انجام دهند.

پذیرش محصولات مقاوم در برابر سرما: تشویق به تحقیق و پرورش گونه‌های گیاهی که در برابر سرما مقاوم‌تر هستند یا دوره گلدهی دیرتری دارند، می‌تواند خطر خسارت را کاهش دهد.

اجرای تکنیک‌های محافظت در برابر سرما: کشاورزان باید در اجرای روش‌های مؤثر محافظت در برابر سرما، مانند استفاده از آب‌پاش‌ها، ماشین‌های بادی یا پوشش‌های محافظ برای محصولات با ارزش بالا، آموزش دیده و حمایت شوند.

بهبود شیوه‌های مدیریت آب: مدیریت صحیح آبیاری می‌تواند بر ریزاقلیم اطراف گیاهان تأثیر بگذارد. آبیاری خاک قبل از یخبندان پیش‌بینی‌شده می‌تواند به خاک کمک کند تا گرما را حفظ کرده و آن را در طول شب تابش دهد و تا حدودی از آن محافظت کند.

تنوع‌بخشی به محصولات کشاورزی: تشویق به تنوع‌بخشی به محصولات می‌تواند به توزیع ریسک اقتصادی برای کشاورزان کمک کند. کاشت انواع محصولات با حساسیت‌های مختلف به یخبندان می‌تواند تضمین کند که یک یخبندان منجر به از بین رفتن کل محصول نمی‌شود.

سیاست‌های حمایتی و بیمه‌ای: دولت‌ها و سازمان‌های کشاورزی باید حمایت مالی، یارانه برای تجهیزات حفاظت از سرمازدگی و توسعه محصولات جامع بیمه کشاورزی که خسارات ناشی از سرمازدگی را پوشش می‌دهند، فراهم کنند.

تحقیقات مداوم: تحقیقات مداوم برای نظارت بر روندهای در حال تحول آب و هوا و تأثیر آن‌ها بر کشاورزی در کرمانشاه و سایر مناطق آسیب‌پذیر مورد نیاز است. مطالعات آینده باید بر ارزیابی اثربخشی استراتژی‌های مختلف سازگاری متمرکز شوند.

منابع

احمدی, منوچهری و سوران. (۱۳۹۹). سنجش وضعیت و تحلیل عوامل مؤثر بر مطلوبیت مدیریت بحران مخاطرات طبیعی در شهرستان قائنات. برنامه ریزی فضایی, ۱۰(۲), ۲۳-۵۶.

ابن حجازی، سیده محبوبه ، یزدان پناه، حجت اله، موحدی، سعید، نصراصفهانی، محمدعلی و مرادی زاده، مینا. (۱۴۰۱). پیش‌آگاهی سرمازدگی بهاره باغات سیب با استفاده از مدل WRF. آب و خاک، ۳۶(۱) ، ۱۲۷-۱۴۴. doi: 10.22067/jsw.2022.73254.1107

حجازی زاده، زهرا ، ناصرزاده، محمدحسین. (۱۳۸۶). تجزیه و تحلیل یخبندان در استان لرستان. نشریه علوم جغرافیایی. ج ۶، ش ۸ و ۹، صص۴۲-۳۲.

سلمانی پور، مرضیه. (۱۳۸۶). مطالعات نوسانات یخبندان و کاربرد نتایج آن در بازدهی محصولات باغی اهر. دانشگاه آزاد اسلامی اهر. پایان نامه کارشناسی ارشد گروه جغرافیا. ص۱۸-۱۲

صی محمدی، سمیره، توکلی، محسن، زرافشانی، کیومرث، مهدی زاده، حسین، امیری، فرزاد. پیش‌بینی اثرات تغییرات اقلیمی بر دما و بارش با استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو، راهکاری برای کشاورزی پایدار (مطالعه‌ی موردی: شهرستان کرمانشاه). علوم و تکنولوژی محیط زیست. دوره ۲۳، شماره ۶ - شماره پیاپی ۱۰۹، شهریور ۱۴۰۰، صفحه ۳۱-۱۵.

عبدالهی فوزی، مبینا، بختیاری، بهرام و قادری، کورش. (۱۴۰۳) . ارزیابی دقت روش شبکه عصبی در برآورد سرمای دیررس بهاره در مناطق پسته کاری شهر کرمان. .https://civilica.com/doc/2043682

مریانجی، زهره ، براتیان، علی. (۱۳۹۵). تغییر پذیری فصل یخبندان در همدان. آب وهواشناسی کاربردی .

مریانجی، زهره، وجدانی نوذر علی. اثرات مخاطرات اقلیمی بر فعالیت های زراعی(کشت لوبیا) روستاییان در شهرستان ازنا. اقتصاد فضا و توسعه روستایی. ۱۳۹۹; ۹ (۳۴) :۲۳۹-۲۵۷، URL: http://serd.khu.ac.ir/article-1-3630-fa.html

میان آبادی, آمنه و سلاجقه, مریم. (۱۴۰۳). پیش‌نگری تغییر در تاریخ آخرین سرمازدگی بهاره و تعداد روزهای سرمازدگی در ایستگاه‌های پسته‌خیز استان کرمان با استفاده از برونداد مدل‌های اقلیمی CMIP۶. پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی, ۵(۱۸), ۶۷-۹۲. doi: 10.30488/ccr.2024.435000.1194

نوحی، کیوان ، صحرائیان، فاطمه ، پدرام، مژده و صداقت کردار، عبدااله . (۱۳۸۷). تعیین طول دوره بدون یخبندان با استفاده از تاریخ های آغاز و خاتمه یخبندان فرارفتی و تابشی در نواحی زنجان، قزوین و تهران،مجله علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی سال دوازدهم ،شماره چهل و ششم،۴۴۹-۴۶۰

Biazar, S. M., & Ferdosi, F. B. (2020). An investigation on spatial and temporal trends in frost indices in Northern Iran. Theoretical and Applied Climatology, 141(3), 907–920. https://doi.org/10.1007/S00704-020-03248-7

Chen, D., Liu, B., Lei, T., Yang, X., Liu, Y., Bai, W., & Chang, N. (2023). Monitoring and mapping winter wheat spring frost damage with MODIS data and statistical data. Plants, 12(23), 3954.

Dargahian, F. , Ghasemi Aryan, Y. and Heydarnejad, S. (2024). Revealing the change of the frost indices as a consequence of climate change, a case study of Northern Zagros forests (Azerbaijan). Iranian Journal of Forest and Range Protection Research, 22(1), 30-46. doi: 10.22092/ijfrpr.2024.363591.1601

Drepper, B., Bamps, B., Gobin, A., & Van Orshoven, J. (2022). Strategies for managing spring frost risks in orchards: effectiveness and conditionality a systematic review. Environmental Evidence, 11(1), 29.

Fazouni, Ardakani. Z., & Shah Vali, M. (2012). Promoting a basic model of preparation for practical cold stress control and prevention (Homayjan Sepidan Fars Section). Agricultural Economics and Development (Agricultural Sciences and Industries), 26(1), 59-70

Guo, W., Dai, H., Qian, J., Tan, J., Xu, Z., & Guo, Y. (2024). An assessment of the relationship between spring frost indicators and global crop yield losses. Science of The Total Environment, 954, 176560.

Hanson, P. J., Gu, L., Mac, P. W., Kaiser, D. P., Yang, B., Nemani, R., Pallardy, S. G., Meyers, T. (2008). The 2007 eastern US spring freezes: Increased cold damage in a warming world? Bioscience, 58, 253–262.

Helali, J., Momenzadeh, H., Asadi, O. E., Lotfi, M. H., & Hosseini, S. A. (2021). Trend and ENSO-based analysis of last spring frost and chilling in Iran. Meteorology and Atmospheric Physics, 133(4), 1203–1221. https://doi.org/10.1007/S00703-021-00804-2

Hokmabadi, H., & Zakynthinos, G. (2010). Pistachio frost damage in Iran and new methods of frost protection. 94, 71–78. https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20113081676

Hosseini, S. M., Karbalaee, A., & Hosseini, S. A. (2021). Spatiotemporal changes of early fall and late spring frost and its trend based an daily minimum temperature in Iran. Arabian Journal of Geosciences, 14(4), 1–11. https://doi.org/10.1007/S12517-021-06608-3

Jadwiga, N.L., Agnieszka, M., Czesław, K., & M. Bożena. Potential Risk of Frost in the Growing Season in Poland; Agriculture; Basel Vol. 14, Iss. 3, (2024) 501. DOI:10.3390/agriculture14030501

Jafarbegloo, N., Khorshiddoost, A. M., Rezaei Banafsheh, M., & Rostamzadeh, D. (2018). Study of changes in the onset and termination of frosts and effective cold in agriculture under climate change conditions in northwest Iran, Journal of Spatial Analysis of Environmental Hazards, Year 5, Issue 4, pages 49 to 64

Krasova, N. G., Ozherelieva, Z., Galasheva, A., Panfilova, O., & Tsoy, M. (2020). Gene pool assessment in terms of apple tree generative organs resistance of different ploidy to spring frost. 176, 03017. https://doi.org/10.1051/E3SCONF/202017603017

Ma, Q., Huang, J. G., Hänninen, H., & Berninger, F. (2019). Divergent trends in the risk of spring frost damage to trees in Europe with recent warming. Global change biology, 25(1), 351-360, https://doi.org/10.1111/gcb.14479.

Noh, I., Doh, H.-W., Kim, S.-O., Kim, S.-H., Shin, S., & Lee, S.-J. (2021). Machine Learning-Based Hourly Frost-Prediction System Optimized for Orchards Using Automatic Weather Station and Digital Camera Image Data. Atmosphere, 12(7), 846. https://doi.org/10.3390/ATMOS12070846

Nasr-e-Sfahani, M., & Yazdan-Panah, H. (2019). Forecasting the occurrence of frost damage in almond orchards in Najafabad region. Natural Geography Research (Geographical Research), 51(3), 497-512. SID.

Parviz, J., Borna, R., & Asadian, F. (2021). Investigating the Temperature Hazards in Kermanshah Province with Emphasis on Frost and Cold Waves. Physical Geography Research, 53(2), 269-286.

Rahimi, J., Khalili, A., & Bazrafshan, J. (2017). Analysis of late spring frost dates over Iran under current climate and future scenarios. Modeling Earth Systems and Environment, 3(4), 1601–1610. https://doi.org/10.1007/S40808-017-0393-X

Tadić, V., Gligorević, K., Mileusnić, Z., Miodragović, R., Hajmiler, M., & Radočaj, D. (2023). Agricultural Engineering Technologies in the Control of Frost Damage in Permanent Plantations. AgriEngineering, 5(4), 2079-2111. https://doi.org/10.3390/agriengineering5040128

Toni Klemm , & Renee A. McPherson , The development of seasonal climate forecasting for agricultural producers, Agricultural and Forest Meteorology, Volume 232, 15 January 2017, Pages 384-399

Wang, T., Zhong, S., & Andresen, J. (2025). Impacts of spring freeze events on a perennial tree fruit crop across the central and eastern USA, Int J Biometeorol 69,1237-1252. https://doi.org/10.1007/s00484-025-02887-7

Yuan, L. (2013). Responses of Climatic Change on the Frost Days in Main Agricultural Area of Tibet from 1961 to 2010. Chinese Journal of Agrometeorology. https://en.cnki.com.cn/Article_en/CJFDTOTAL-ZGNY201303003.htm

Yue, Y., Zhou, Y., Wang, J., & Ye, X. (2016). Assessing Wheat Frost Risk with the Support of GIS: An Approach Coupling a Growing Season Meteorological Index and a Hybrid Fuzzy Neural Network Model. Sustainability, 8(12), 1308. https://doi.org/10.3390/su8121308

Ziarati, K. (2023). Frost Prediction Using Machine Learning Methods in Fars Province. International Computer Society of Iran Computer Conference, 1–6. https://doi.org/10.1109/CSICC58665.2023.10105391

Revealing the changes and climatic trends of the last spring frost for agricultural planning in Kermanshah city

Zohreh Maryanaji[1], kobra Imanifar[2], Reza KHosrobeygi[3]

Zohreh Maryanaji, Associate Professor, Department of Geography, Sayyed Jamaleddin Asadabadi University, Asadabad, Iran.

Kobra Imanifar, Master's student in Case Studies of Department of Geography, Sayyed Jamaleddin Asadabadi University, Asadabad, Iran.

Reza KHosrobeygi, Associate Professor, Department of Geography, Sayyed Jamaleddin Asadabadi University, Asadabad, Iran

* Corresponding author: maryanaji@sjau.ac.ir

Abstract

Climate change has become a major environmental problem in the last century, and its effects are particularly significant in human life. One of them is agricultural losses from climate crises such as frost and frostbite. This study examines the time trend of the last spring frost in Kermanshah city using statistical methods over a 20-year period (2005-2024). The results show that overall minimum temperatures are increasing and the timing of frosts has become more erratic. Farmers in the region face an increased risk of crop loss due to untimely frosts, which could have serious consequences for their livelihoods and regional food security. The results show that the number of spring frost days has decreased, but their timing has become more erratic, continuing into mid-May. This change has reduced crop yields, as the onset of a warm spring can lead to early crop growth, making them vulnerable to late (mid-spring) frosts. By analyzing data from the Kermanshah Synoptic Meteorological Station, this paper fills an important gap in research on spring frost patterns in the region and provides insights for strategies to mitigate its effects..

Keywords: Climate change, Agriculture, Frost, Spring, Garden products.

خشکسالی و ارزیابی شاخص‌های پوشش گیاهی با استفاده از S&R (مطالعه موردی: شهرستان ارومیه)

علی‌رضا جمشیدی[۱]

[۱]- استادیار گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

نویسنده مسئول al.jamshidi@urmia.ac.ir

چکیده

خشکسالی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های محیط‌زیستی، تأثیر قابل توجهی بر پوشش گیاهی مناطق خشک و نیمه‌خشک دارد. این مطالعه به بررسی تغییرات پوشش گیاهی شهرستان ارومیه طی دو دوره زمانی ۲۰۱۰ و ۲۰۲۴ می‌پردازد. شاخص‌های پوشش گیاهی شامل شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال‌شده(NDVI) ، شاخص پوشش گیاهی بهبودیافته (EVI) و شاخص شرایط پوشش گیاهی (VCI) در این دو دوره در محیط کدنویسی google earth engine مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که در سال ۲۰۱۰، شاخص‌های پوشش گیاهی دچار نوساناتی بوده‌اند که بیانگر تأثیر خشکسالی در آن زمان بوده ولی خیلی قابل چشمگیر نبوده است. در مقابل، در سال ۲۰۲۴ این شاخص‌ها ثبات کمتری داشته‌اند و نوسانات بیشتری را تجربه کرده‌اند. این نوسانات می‌تواند ناشی از عدم اقدامات مدیریتی و حفاظتی موثرتر در طول سال‌های گذشته باشد. با این حال، همچنان چالش‌هایی در برخی مناطق وجود دارد که نیازمند توجه و برنامه‌ریزی بیشتر است. نتایج این مطالعه می‌تواند به درک بهتر چگونگی سازگاری پوشش گیاهی با خشکسالی در مناطق نیمه‌خشک کمک کند.

کلید واژه‌ها: خشکسالی، شاخص‌های پوشش گیاهی، سنجش از دور، شهرستان ارومیه

مقدمه

خشکسالی یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان است که تأثیرات گسترده‌ای بر منابع طبیعی، کشاورزی و اکوسیستم‌ها دارد. این پدیده به‌ویژه در مناطقی مانند شهرستان ارومیه، که به دلیل موقعیت جغرافیایی و وابستگی به منابع آبی حساسیت بالایی دارند، پیامدهای جدی‌تری به همراه داشته است. در دهه‌های اخیر، تغییرات اقلیمی و کاهش بارندگی‌ها منجر به افزایش شدت و فراوانی خشکسالی‌ها شده است که این امر تأثیرات قابل‌توجهی

بر پوشش گیاهی و زیست‌بوم‌های منطقه‌ای داشته است (Helali, 2022; Feizizadeh, 2023). دریاچه ارومیه، به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین دریاچه‌های شور جهان، نمونه‌ای بارز از تأثیرات خشکسالی بر محیط‌زیست است. کاهش سطح آب این دریاچه و خشک شدن بخش‌های وسیعی از بستر آن، نه تنها بر اکوسیستم‌های آبی بلکه بر پوشش گیاهی اطراف آن نیز تأثیر گذاشته است. مطالعات نشان داده‌اند که خشکسالی‌های مکرر و کاهش منابع آبی منجر به کاهش شاخص‌های پوشش گیاهی مانند شاخص نرمال‌شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI) و شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI) شده است (Azizi, 2024).

پوشش گیاهی به‌عنوان یکی از اجزای کلیدی اکوسیستم، نقش مهمی در حفظ تعادل زیست‌محیطی و جلوگیری از فرسایش خاک دارد. با این حال، خشکسالی‌های طولانی‌مدت می‌توانند باعث کاهش تنوع زیستی، کاهش تولید زیست‌توده و تغییر در ترکیب گونه‌های گیاهی شوند. این تغییرات نه تنها بر اکوسیستم‌های طبیعی بلکه بر فعالیت‌های کشاورزی و معیشت جوامع محلی نیز تأثیرگذار است (Feizizadeh, 2023; Alizadeh-Choobari, 2016). در شهرستان ارومیه، کاهش بارندگی و افزایش دما به‌عنوان عوامل اصلی خشکسالی شناخته شده‌اند. این عوامل منجر به کاهش منابع آبی و افزایش تبخیر شده‌اند که تأثیرات مستقیمی بر پوشش گیاهی منطقه داشته است. به‌طور خاص، کاهش سطح آب دریاچه ارومیه و خشک شدن بخش‌های وسیعی از بستر آن، منجر به افزایش طوفان‌های گرد و غبار و کاهش کیفیت خاک شده است. از طرفی دیگر، مطالعات نشان داده‌اند که خشکسالی‌های اخیر در منطقه ارومیه نه تنها به دلیل کاهش بارندگی بلکه به دلیل مدیریت ناپایدار منابع آبی و افزایش تقاضا برای آب در بخش کشاورزی تشدید شده‌اند. این عوامل منجر به کاهش سطح آب دریاچه ارومیه و تغییرات گسترده در پوشش گیاهی اطراف آن شده‌اند (Helali, 2022; Azizi, 2024). از سوی دیگر، خشکسالی‌های مکرر و کاهش منابع آبی باعث افزایش شوری خاک در مناطق اطراف دریاچه ارومیه شده است. این امر تأثیرات منفی بر کشاورزی و تولید مواد غذایی در این منطقه داشته و خطر تخریب خاک را افزایش داده است. بر اساس مطالعات، سطح زمین‌های تحت تأثیر شوری خاک از ۲.۸۶ درصد در سال ۱۹۹۰ به ۱۶.۶۸ درصد در سال ۲۰۲۰ افزایش یافته است (Feizizadeh, 2023). خشکسالی همچنین تأثیرات قابل‌توجهی بر تنوع زیستی منطقه داشته است. کاهش منابع آبی و تغییرات در ترکیب گونه‌های گیاهی منجر به کاهش زیستگاه‌های طبیعی و تهدید گونه‌های بومی شده است. این تغییرات نه تنها بر اکوسیستم‌های طبیعی بلکه بر فعالیت‌های کشاورزی و معیشت جوامع محلی نیز تأثیرگذار بوده است (Helali, 2022; Azizi, 2024).

در این مقاله، تأثیر خشکسالی بر پوشش گیاهی شهرستان ارومیه با استفاده از داده‌های سنجش از دور و شاخص‌های مرتبط با خشکسالی مورد بررسی قرار می‌گیرد. هدف اصلی این مطالعه، تحلیل تغییرات پوشش گیاهی در پاسخ به خشکسالی و ارائه راهکارهایی برای مدیریت پایدار منابع طبیعی در این منطقه است.

پیشینه تحقیق

خشکسالی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین پدیده‌های اقلیمی، تأثیرات قابل‌توجهی بر پوشش گیاهی و اکوسیستم‌های طبیعی دارد. در سال‌های اخیر، مطالعات متعددی به بررسی این تأثیرات در مناطق مختلف جهان پرداخته‌اند. در این بخش، به مرور تحقیقات مرتبط با تأثیر خشکسالی بر پوشش گیاهی، به‌ویژه در منطقه ارومیه و مناطق مشابه، پرداخته می‌شود.

مطالعات انجام‌شده در حوزه دریاچه ارومیه نشان داده‌اند که خشکسالی‌های مکرر و کاهش منابع آبی منجر به کاهش شاخص‌های پوشش گیاهی مانند NDVI و VCI شده است. به‌عنوان مثال، مطالعه حلالی (۲۰۲۲) که با استفاده از داده‌های سنجش از دور در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه انجام شد، نشان داد که خشکسالی‌های سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ تأثیرات منفی قابل‌توجهی بر پوشش گیاهی و سطح آب این دریاچه داشته است. همچنین، در سطح جهانی، تأثیر خشکسالی بر مقاومت اکوسیستم‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعه‌ای خیاو[112] (۲۰۲۳) نشان داد که مناطق با پوشش جنگلی بیشتر، مقاومت بیشتری در برابر خشکسالی دارند. این تحقیق همچنین تأثیر مدیریت جنگل و آبیاری بر افزایش مقاومت اکوسیستم‌ها را برجسته کرد. در تحقیق دیگری، یانگ[113] (۲۰۲۳) تأثیر خشکسالی بر تغییرات سبزینگی و تولید زیست‌توده گیاهی در مقیاس جهانی مورد بررسی قرار گرفت. این مطالعه نشان داد که خشکسالی‌های طولانی‌مدت تأثیرات تجمعی بیشتری نسبت به تأثیرات تأخیری بر پوشش گیاهی دارند.

در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند آفریقا، مطالعات نشان داده‌اند که خشکسالی تأثیرات شدیدی بر مراتع و زمین‌های کشاورزی دارد. به‌ویژه، شاخص‌های NDVI و SM به‌عنوان ابزارهای مؤثر برای پایش خشکسالی در این مناطق معرفی شده‌اند (Henchiri, 2020).

تحقیقات دیگری نیز به بررسی تغییرات پوشش گیاهی در اثر خشکسالی در مناطق مختلف جهان پرداخته‌اند. به‌عنوان مثال، مطالعه‌ای در منطقه مغولستان داخلی چین نشان داد که شاخص‌های خشکسالی مانند SPI و scPDSI تأثیرات متفاوتی بر پوشش گیاهی در مقیاس‌های زمانی مختلف دارند (Wang, 2020). در منطقه ارومیه، عزیزی (۲۰۲۴) در مطالعه‌ای با استفاده از یادگیری ماشین و GIS نشان داد که خشکسالی‌های اخیر تأثیرات شدیدی بر سلامت پوشش گیاهی و شاخص‌های مرتبط با خشکسالی داشته است. این مطالعه همچنین به بررسی تغییرات کاربری زمین و تأثیر آن بر پوشش گیاهی پرداخت.

112 Xiao

113 Yang

مطالعات جهانی نیز نشان داده‌اند که آستانه‌های خشکسالی که منجر به کاهش عملکرد پوشش گیاهی می‌شوند، بسته به نوع اکوسیستم و شرایط اقلیمی متفاوت هستند. این آستانه‌ها در مناطق مرطوب پایین‌تر و در مناطق خشک بالاتر هستند (Li, 2023). در نهایت، تحقیقاتی که به بررسی تأثیر خشکسالی بر پوشش گیاهی در مناطق رودخانه‌ای بزرگ مانند حوضه رودخانه یانگ‌تسه پرداخته‌اند، نشان داده‌اند که زمان‌بندی خشکسالی و مراحل فنولوژیکی گیاهان نقش مهمی در تعیین شدت تأثیر خشکسالی دارند (Xiao, 2025).

مواد و روشها

معرفی منطقه

شهرستان ارومیه در استان آذربایجان غربی واقع شده و در موقعیت جغرافیایی ۳۲°۳۷' تا ۲۹°۳۸' عرض شمالی و ۱۴°۴۴' تا ۱۶°۴۵' طول شرقی قرار دارد. این شهرستان یکی از مناطق مهم کشاورزی و دامپروری در ایران محسوب می‌شود. شهرستان ارومیه دارای آب و هوای نیمه‌خشک با میانگین بارندگی سالانه حدود ۳۰۰ میلی‌متر است. پوشش گیاهی غالب در این منطقه شامل مراتع و اراضی کشاورزی است که به‌طور گسترده‌ای تحت تأثیر نوسانات بارندگی و خشکسالی‌ها قرار می‌گیرد. جمعیت شهرستان ارومیه بر اساس آخرین سرشماری در حدود ۷۶۵,۰۰۰ نفر است. با توجه به اهمیت اقتصادی و زیست‌محیطی این منطقه، بررسی تأثیرات خشکسالی بر پوشش گیاهی در شهرستان ارومیه می‌تواند درک بهتری از چگونگی سازگاری اکوسیستم‌ها با این پدیده فراهم آورد.

روش تحقیق

در این تحقیق، تأثیر خشکسالی بر پوشش گیاهی شهرستان ارومیه با استفاده از داده‌های سنجش از دور بررسی می‌شود. این مطالعه از شاخص‌های(NDVI (Normalized Difference Vegetation Index ، EVI (Enhanced Vegetation Index)و VCI (Vegetation Condition Index) برای تحلیل وضعیت پوشش گیاهی در بازه زمانی ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۴ استفاده می‌کند.

– داده‌ها و ابزارها

داده‌های سنجش از دور :تصاویر ماهواره‌ای از Sentinel برای دوره زمانی مورد نظر یعنی سالهای ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۴جمع‌آوری شدند.

ابزارهای نرم‌افزاری:

گوگل ارث انجین: برای پردازش و تحلیل داده‌های سنجش از دور.

زبان برنامه‌نویسی JavaScript :برای نوشتن کدهای مورد نیاز در گوگل ارث انجین.

- روش‌های تحلیل

محاسبه شاخص‌ها:

شاخص NDVI برای ارزیابی وضعیت پوشش گیاهی با استفاده از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

NDVI=NIR−REDNIR+REDNDVI=NIR+REDNIR−RED

لازم به توضیح بوده: مقدار NDVI معمولاً بین -۱ تا +۱ است. مقادیر مثبت بالاتر از ۰.۶ نشان‌دهنده پوشش گیاهی سالم و متراکم است، مقادیر بین ۰.۲ و ۰.۶ به پوشش گیاهی کم‌تراکم یا متوسط مرتبط بوده، مقادیر کمتر از ۰.۲ یا نزدیک به صفر نشان‌دهنده خاک برهنه یا پوشش گیاهی کم و مقادیر منفی نشان‌دهنده مناطق غیر گیاهی مانند آب، یخ یا سازه‌های انسانی است.

شاخص EVI برای بهبود دقت در شرایط مختلف پوشش گیاهی:

EVI=G·NIR−REDNIR+C1·RED−C2·BLUE+LEVI=G·NIR+C1·RED−C2·BLUE+LNIR−RED

که در آن GG، C1C1، C2C2و LL پارامترهای ثابت هستند.

لازم به توضیح بوده که مقدار EVI معمولاً بین -۱ تا ۱ است: مقادیر بالای ۰/۶ نشان‌دهنده پوشش گیاهی سالم، متراکم و با کیفیت بالا است، مقادیر بین ۰.۲ تا ۰.۶ به پوشش گیاهی متوسط یا کم‌تراکم بوده، مقادیر نزدیک به ۰ نشان‌دهنده پوشش گیاهی ضعیف یا بیابانی و مقادیر منفی نشان‌دهنده مناطق غیر گیاهی مانند آب، یخ، یا سازه‌های انسانی است.

شاخص VCI برای ارزیابی وضعیت پوشش گیاهی نسبت به حالت‌های نرمال:

VCI=NDVI−NDVIminNDVImax−NDVImin×100VCI=NDVImax−NDVIminNDVI−NDVImin×100

تحلیل داده‌ها:

داده‌های به‌دست‌آمده از شاخص‌ها در طول زمان تحلیل می‌شود تا تأثیر خشکسالی بر پوشش گیاهی مشخص شود. لازم به توضیح بوده که در این مطالعه از نرم‌افزار ArcGIS و Excel استفاده شده است.

استفاده از تکنیک‌های آماری برای بررسی ارتباط بین خشکسالی و تغییرات پوشش گیاهی.

نتایج

در ادامه با استفاده از نتایج استخراجی بدست آمده با استفاده از محیط کدنویسی Google earth engine به بررسی سه شاخص مورد استفاده برای دوره زمانی سال ۲۰۱۰ و ۲۰۲۴ پرداخته شده است.

- تحلیل تغییرات شاخص‌های پوشش گیاهی در شهرستان ارومیه طی سال ۲۰۱۰

:NDVI

NDVI یک شاخص استاندارد برای ارزیابی وضعیت پوشش گیاهی است که بر اساس تفاوت در بازتاب طیفی گیاهان محاسبه می‌شود. در نمودار ۱، مقدار این شاخص در ابتدای سال حدود ۰/۲ بوده که نشان‌دهنده پوشش گیاهی نسبتاً ضعیف است. سپس NDVI به تدریج افزایش یافته و در اواسط سال به حدود ۰/۷ رسیده که نشان‌دهنده وضعیت مطلوب پوشش گیاهی در این دوره است. همچنین، همان‌طور که ملاحظه می شود، در نیمه دوم سال، NDVI کاهش یافته و در پایان سال به حدود ۰/۳ رسیده است. به صورت کلی متوسط شاخص نرمال‌شده تفاوت پوشش گیاهی برای شهرستان ارومیه در سال ۲۰۱۰ برابر با ۰/۲۵۲ بوده، که این عدد نشان دهنده اوضاع نامناسب این شاخص در این سال در شهرستان ارومیه را دارد.

:EVI

EVI یا شاخص بهبود یافته پوشش گیاهی نیز یک شاخص سنجش پوشش گیاهی است که حساسیت بیشتری به تغییرات پوشش گیاهی دارد. روند تغییرات EVI مشابه با NDVI بوده و نشان‌دهنده نوسانات فصلی پوشش گیاهی در طول سال است. همانطور که در نمودار ۱ قابل مشاهده است، در شهرستان ارومیه در سال ۲۰۱۰، مقدار EVI در ابتدای سال حدود ۰/۳ بوده که در اواسط سال به بیش از ۰/۸ رسیده و سپس در نیمه دوم سال کاهش یافته است. به صورت کلی متوسط شاخص بهبود یافته پوشش گیاهی برای شهرستان ارومیه در سال ۲۰۱۰ برابر با ۰/۱۶۵ بوده، که این عدد نشان دهنده اوضاع نامناسب این شاخص در این سال در شهرستان ارومیه را دارد.

:VCI

VCI

فرض VCI برای نظارت بر خشکسالی این است که پوشش گیاهی بوسیله تغییرات آب و هوایی تحت تاثیر قرار می گیرد. شاخص VCI تنش خشکی روی گیاه نسبت به NDVI بهتر نمایش می‌دهد. به عبارتی این شاخص، شاخصی است که وضعیت کلی پوشش گیاهی را نشان می‌دهد و با مقایسه با شرایط بلندمدت تفسیر می‌شود. همان‌طور که در نمودار ۱ قابل مشاهده است، مقدار VCI در ابتدای سال حدود ۰/۵- بوده که نشان‌دهنده وضعیت نامطلوب پوشش گیاهی است.

VCI سپس افزایش یافته و در اواسط سال به بیش از ۲/۵ رسیده که نشان‌دهنده وضعیت مطلوب پوشش گیاهی در این دوره است. در نیمه دوم سال، VCI کاهش یافته و در پایان سال به حدود ۰/۸- رسیده است.

:NDVI

همان‌طور که در نمودار ۲ قابل مشاهده است، شاخص NDVI در ابتدای سال حدود ۰/۵ بوده که نشان‌دهنده پوشش گیاهی متوسط است. این شاخص به تدریج افزایش یافته و در ماه‌های میانی سال به بیش از ۱ رسیده است که حاکی از وضعیت مطلوب پوشش گیاهی در این دوره است. همچنین، در نیمه دوم سال، شاخص NDVI کاهش یافته و در پایان سال به حدود ۰ رسیده است که نشان‌دهنده وضعیت نامطلوب پوشش گیاهی در این زمان است. به صورت کلی متوسط شاخص نرمال‌شده تفاوت پوشش گیاهی برای شهرستان ارومیه در سال ۲۰۲۴ برابر با ۰/۲۳۸ بوده، که این عدد نشان دهنده اوضاع نامناسب این شاخص در این سال در شهرستان ارومیه را دارد.

:EVI

EVI یا شاخص بهبود یافته پوشش گیاهی نیز یک شاخص سنجش پوشش گیاهی است که حساسیت بیشتری به تغییرات پوشش گیاهی دارد. روند تغییرات EVI مشابه با NDVI بوده و نشان‌دهنده نوسانات فصلی پوشش گیاهی در طول سال است. همانطور که در نمودار ۲ قابل مشاهده است، در شهرستان ارومیه در سال ۲۰۲۴، مقدار EVI در ابتدای سال حدود ۰/۴ بوده که در اواسط سال به بیش از ۰/۸ رسیده و سپس در نیمه دوم سال کاهش یافته است. به صورت کلی متوسط شاخص بهبود یافته پوشش گیاهی برای شهرستان ارومیه در سال ۲۰۲۴ برابر با ۰/۱۵۶ بوده، که این عدد نشان دهنده اوضاع نامناسب این شاخص در این سال در شهرستان ارومیه را دارد.

:VCI

همن‌طور که گفته شد، شاخص VCI تنش خشکی روی گیاه نسبت به NDVI بهتر نمایش می‌دهد. به عبارتی این شاخص، شاخصی است که وضعیت کلی پوشش گیاهی را نشان می‌دهد و با مقایسه با شرایط بلندمدت تفسیر می‌شود. همان‌طور که در نمودار ۲ قابل مشاهده است، مقدار VCI در ابتدای سال حدود ۰/۲- بوده که نشان‌دهنده وضعیت نامطلوب پوشش گیاهی است. سپس شاخص VCI افزایش یافته و در اواسط سال به بیش از ۱/۵ رسیده که نشان‌دهنده وضعیت مطلوب پوشش گیاهی در این دوره است. در نیمه دوم سال، VCI کاهش یافته و در پایان سال به حدود ۰/۸- رسیده است.

بحث و نتیجه گیری

خشکسالی یکی از چالش‌های جدی زیست‌محیطی است که تأثیرات عمیقی بر اکوسیستم‌ها و پوشش گیاهی دارد. هدف اصلی این مطالعه، بررسی تأثیرات خشکسالی بر روی پوشش گیاهی در مناطق مختلف است. با توجه به تغییرات اقلیمی و افزایش فراوانی وقوع خشکسالی‌ها، درک چگونگی واکنش گیاهان به این پدیده ضروری به نظر می‌رسد. این تحقیق به تحلیل داده‌های مربوط به تغییرات در پوشش گیاهی، از جمله تنوع گونه‌ها و الگوهای رشد، در دوره‌های مختلف خشکسالی می‌پردازد. همچنین، نتایج این مطالعه می‌تواند به مدیریت منابع طبیعی و برنامه‌ریزی برای مقابله با اثرات منفی خشکسالی

کمک کند. بدین ترتیب، این پژوهش نه تنها به درک بهتر از واکنش‌های اکوسیستمی کمک می‌کند، بلکه می‌تواند به توسعه راهکارهای مؤثر برای حفظ و بهبود پوشش گیاهی در شرایط خشکسالی منجر شود. در این بخش، به بررسی و تحلیل نتایج به‌دست‌آمده از تحقیقات سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۲۴ پرداخته می‌شود. هدف از این تحلیل، درک بهتر تغییرات و تحولات صورت‌گرفته در حوزه مورد مطالعه و تأثیرات آن بر روی جامعه علمی و عملی است.

نتایج سال ۲۰۱۰ نشان می‌دهد که در اوایل این دوره، شاخص‌های پوشش گیاهی شاملVCI ، EVIو NDVI دچار نوسانات کمتری بوده‌اند. این نشان‌دهنده تأثیر کمتر خشکسالی بر روی پوشش گیاهی در آن زمان است. در مقابل، نتایج سال ۲۰۲۴ نشان می‌دهد که شاخص‌های پوشش گیاهی در طول سال ثبات کمتری داشته‌اند و نوسانات بیشتری را تجربه کرده‌اند. این کاهش می‌تواند ناشی از ضعف در اقدامات مدیریتی و حفاظتی موثرتر در طول سال‌های گذشته باشد.

بررسی روند تغییرات شاخص‌های پوشش گیاهی در دو دوره نشان می‌دهد که در سال ۲۰۲۴ نسبت به ۲۰۱۰، پوشش گیاهی مقاومت کمتری در برابر خشکسالی داشته است. این ضعف یا کاهش می‌تواند ناشی از عواملی مانند:

- عدم اجرای برنامه‌های مدیریت منابع آب و خاک برای افزایش تاب‌آوری اکوسیستم‌ها،
- عدم توسعه و کاربرد ارقام و گونه‌های گیاهی مقاوم به خشکی،
- عدم بهبود شیوه‌های کشاورزی و مدیریت اراضی برای حفظ رطوبت خاک،

کمبود این عوامل در مجموع منجر به کاهش ظرفیت سازگاری پوشش گیاهی با شرایط خشکسالی شده‌اند.

منابع

Alizadeh-Choobari, O., Ahmadi-Givi, F., Mirzaei, N., & Owlad, E. (2016). Climate change and anthropogenic impacts on the rapid shrinkage of Lake Urmia. International Journal of Climatology, 36(13), 4276-4286.

Azizi, S. (2024). Drought and Environmental Transformations of Lake Urmia: An Integrated Analysis Using Machine Learning and GIS. Eur. J. Appl. Sci, 12.

Feizizadeh, B., Lakes, T., Omarzadeh, D., & Pourmoradian, S. (2023). Health effects of shrinking hyper-saline lakes: spatiotemporal modeling of the Lake Urmia drought on the local population, case study of the Shabestar County. Scientific Reports, 13(1), 1622.

Helali, J., Asaadi, S., Jafarie, T., Habibi, M., Salimi, S., Momenpour, S. E., ... & Saeidi, V. (2022). Drought monitoring and its effects on vegetation and water extent changes using remote sensing data in Urmia Lake watershed, Iran. Journal of Water and Climate Change, 13(5), 2107-2128.

Henchiri, M., Liu, Q., Essifi, B., Javed, T., Zhang, S., Bai, Y., & Zhang, J. (2020). Spatio-temporal patterns of drought and impact on vegetation in North and West Africa based on multi-satellite data. Remote Sensing, 12(23), 3869.

Li, X., Piao, S., Huntingford, C., Peñuelas, J., Yang, H., Xu, H., ... & Mahecha, M. D. (2023). Global variations in critical drought thresholds that impact vegetation. National Science Review, 10(5), nwad049.
Wang, Y., Zhang, C., Meng, F. R., Bourque, C. P. A., & Zhang, C. (2020). Evaluation of the suitability of six drought indices in naturally growing, transitional vegetation zones in Inner Mongolia (China). PLoS One, 15(5), e0233525.
Xiao, C., Zaehle, S., Yang, H., Wigneron, J. P., Schmullius, C., & Bastos, A. (2023). Land cover and management effects on ecosystem resistance to drought stress. Earth System Dynamics, 14(6), 1211-1237.
Xiao, J., Terrer, C., Gentine, P., Tateno, R., Fan, L., Ma, M., ... & Shi, W. (2025). Temporal and phenological modulation of the impact of increasing drought conditions on vegetation growth in a humid big river basin: Insights from global comparisons. Earth's Future, 13(3), e2024EF005720.
Yang, M., Zou, J., Ding, J., Zou, W., & Yahefujiang, H. (2023). Stronger cumulative than lagged effects of drought on vegetation in Central Asia. Forests, 14(11), 2142.

Drought and Vegetation Index Evaluation Using R&S (Case Study: Urmia County)

⁎Ali Reza Jamshidi

Assistant Professor, Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, Urmia University, Urmia, Iran
* Corresponding author: al.jamshidi@urmia.ac.ir

Abstract

Drought, one of the most significant environmental challenges, has a profound impact on vegetation in arid and semi-arid regions. This study examines the changes in vegetation in Urmia County during two time periods, 2010 and 2024. Vegetation indices, including the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Enhanced Vegetation Index (EVI), and Vegetation Condition Index (VCI), were analyzed in the Google Earth Engine coding environment during these two periods. The results show that in 2010, vegetation indices fluctuated, indicating the impact of drought at that time, but it was not very significant. In contrast, in 2024, these indices have been less stable and have experienced more fluctuations. These fluctuations could be due to the lack of more effective management and conservation measures over the past years. However, there are still challenges in some areas that require more attention and planning. The results of this study can help to better understand how vegetation adapts to drought in semi-arid regions.

Keywords: Drought, Vegetation indices, Remote sensing, Urmia County

بررسی نقش مشارکت مردمی در احیای دریاچه ارومیه و کاهش اثرات اقلیمی

سهند آذر *[۱]،میر نجف موسوی[۲]

۱- دانشجوی دکتری برنامه ریزی آمایش سرزمین، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۲- استاد تمام گروه جغرافیا دانشگاه ارومیه- ارومیه- ایران

آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول: s.azar@urmia.ac.ir

چکیده

بررسی نقش مشارکت مردمی در احیای دریاچه ارومیه و کاهش اثرات اقلیمی، به دنبال تبیین این موضوع حیاتی است که چگونه همراهی و فعالیت‌های آگاهانه مردم محلی و ذی‌نفعان، می‌تواند به عنوان یک نیروی محرکه قدرتمند در موفقیت پروژه‌های احیای زیست‌محیطی عمل کند. این پژوهش نه تنها بر ابعاد اجتماعی و فرهنگی دخالت مردم تأکید دارد، بلکه چگونگی تبدیل این مشارکت به راهکارهای عملی برای مدیریت پایدار منابع آبی و کاهش آسیب‌پذیری منطقه در برابر تغییرات اقلیمی را نیز مورد کاوش قرار می‌دهد. در نهایت، هدف شناسایی الگوها و مکانیسم‌هایی است که تعامل سازنده بین جامعه، دولت و متخصصان را برای دستیابی به اهداف محیط‌زیستی تسهیل می‌کند. هدف پژوهش حاضر، بررسی نقش مشارکت مردمی در احیای دریاچه ارومیه و کاهش اثرات اقلیمی می باشد. این پژوهش ازنظر هدف، کاربردی - نظری و ازنظر روش، توصیفی– تحلیلی است. اطلاعات و داده های موردنیاز از طریق روش کتابخانه ای جمع آوری شده است. در این پژوهش از آزمون (T-Test) و فرایند تحلیل سلسله مراتبی (FAHP) می باشد. این پژوهش به بررسی نقش حیاتی مشارکت مردمی در احیای دریاچه ارومیه و کاهش اثرات اقلیمی ناشی از بحران آن می‌پردازد. با استفاده از آزمون T، تفاوت‌های معنادار در متغیرهای مرتبط با مشارکت مردمی (مانند سطح آگاهی، تمایل به همکاری) بین گروه‌های مختلف ذی‌نفعان شناسایی می‌شود. در ادامه، فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP) به منظور وزن‌دهی و اولویت‌بندی عوامل و معیارهای مختلف تأثیرگذار بر مشارکت مردمی و اثربخشی آن در برنامه‌های احیا و سازگاری با اقلیم، با در نظر گرفتن ابهامات و قضاوت‌های کیفی، به کار گرفته خواهد شد. هدف نهایی، ارائه یک چارچوب جامع برای به حداکثر رساندن پتانسیل مشارکت جامعه در حل یکی از بزرگترین چالش‌های زیست‌محیطی کشور است.

کلید واژه ها: مشارکت مردمی، احیای دریاچه ارومیه، اثرات اقلیمی، آزمون (T-Test) و فرایند تحلیل سلسله مراتبی (FAHP)

مقدمه

امروزه، کره زمین به طور جدی با معضل تخریب محیط زیست مواجه شده است به نحوی که هر روز مراکز تحقیقاتی نسبت به بروز رویدادها و مسائل زیست محیطی پرشماری در مناطق مختلف دنیا هشدار می دهند. در واقع، تخریب محیط زیست یک تهدید در سطح بین المللی محسوب می شود که شناسایی ریشه ها و نتایج آن و در عین حال راهکارهای ضروری برای مقابله با آن بسیار دشوار است. از طرفی، این چالش در سطح جهان به طور فزاینده ای گسترده تر می شود؛ زیرا مردم در سرتا سر جهان به مناطق صنعتی که از نظر زیست محیطی آسیب پذیر هستند، بیش از ظرفیت مجاز آن ها فشار وارد آورده و در نتیجه مشکلات زیست محیطی را چندین برابر می کنند (فنک و همکاران،۱۴۰۰: ۳۰). به عبارتی، بخش قابل توجهی از مسائل و مشکلات زیست محیطی که تهدید اساسی برای حیات خود انسان نیز به شمار می روند، ریشه در فعالیت ها و رفتارهای غیر مسئولانه جوامع بشری دارند (Kendra,etal2019:7). در چنین شرایطی، رفع مشکلات زیست محیطی به طور قطع نیازمند بازبینی در رابطه بین انسان و طبیعت و اصلاح شیوه ها و رویه های مدیریت منابع زیست محیطی است (Sun,etal2020:744). آب مایه حیات و منبع اولیه ای است که زندگی انسان به آن متکی بوده و بیشترین و مهمترین چالش های بشر از دهه های اول تمدن مربوط به آن است؛ زیرا برخلاف سایر منابع، این چالش ها از آنجا وجود می آید که هیچ جایگزینی برای آب وجود ندارد (محمد خانی و همکاران،۱۶۹). دریاچه ارومیه به عنوان یکی از پیکره های آبی قدیمی و بسیار مهم ایران و نیز به عنوان یکی از پرآب ترین و بزرگ ترین آبریزهای مسدود غرب میانی ایران به یک بحران عظیم دچار شده است. به عبارتی خشک سالی ها، دلایل طبیعی و ضعف در مدیریت منابع آب ناشی از عوامل انسانی منجر به خشک شدن دریاچه ارومیه و بحران های زیست محیطی ناشی از آن شده است (احمدی و همکاران،۱۳۹۶: ۲). دریاچه ارومیه یکی از بزرگترین دریاچه های فوق اشباع نمک دنیاست که متأسفانه در سال های اخیر در حال خشک شدن می باشد. برای بیان راهکار نجات دریاجه ارومیه ابتدا باید شرایط موجود آن شناسایی و عوامل مؤثر بر خشکی آن مشخص شود. آنچه مشخص است مجموعه ای از عوامل مختلف در خشک شدن دریاچه ارومیه دخیل هستند که هر کدام ممکن است در ا ین زمینه به نسبتی نقش داشته باشند (رسولی مجد و خلیلی،۱۳۹۳: ۳). هدف پژوهش حاضر، بررسی نقش مشارکت مردمی در احیای دریاچه ارومیه و کاهش اثرات اقلیمی می باشد. در دنیای امروز، چالش‌های زیست‌محیطی از جمله تغییرات اقلیمی و بحران منابع آبی، به مسائلی حیاتی تبدیل شده‌اند که نه تنها حیات طبیعی، بلکه زندگی اجتماعی و اقتصادی بشر را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهند. در این میان، دریاچه ارومیه به عنوان یکی از اکوسیستم‌های آبی مهم ایران و جهان، طی دهه‌های اخیر با بحران خشکی بی‌سابقه‌ای مواجه شده که نه تنها پیامدهای زیست‌محیطی گسترده‌ای داشته،

بلکه ابعاد اجتماعی و اقتصادی وخیمی را نیز به دنبال آورده است. این پژوهش بر آن است تا نقش کلیدی مشارکت مردمی را در فرآیند احیای این گنجینه طبیعی و همچنین در کاهش اثرات مخرب تغییرات اقلیمی بر آن مورد بررسی قرار دهد. از آنجا که موفقیت طرح‌های احیای زیست‌محیطی به همراهی و هم‌افزایی تمامی ذی‌نفعان، به ویژه جوامع محلی، وابسته است، شناخت مکانیزم‌ها و ابعاد این مشارکت می‌تواند راهگشای برنامه‌ریزی‌های آتی و دستیابی به پایداری زیست‌محیطی باشد.

پیشینه پژوهش

سلطانی و همکاران، (۱۳۹۵) پژوهشی با عنوان؛ ارزیابی پیامدهای احتمالی انتقال آب حوضه زاب به دریاچه ارومیه به این نتیجه رسیدند که این پژوهش با هدف بررسی پیامدهای آمایشی (مثبت و منفی) طرح انتقال آب رودخانه زاب به دریاچه ارومیه، از دیدگاه ۱۰۰ کارشناس و مسئول، به تحلیل می‌پردازد. چالش تامین آب مطمئن و راه‌حل‌های بین‌حوضه‌ای، اهمیت این طرح را در احیای دریاچه ارومیه برجسته می‌سازد. با استفاده از رگرسیون خطی چندمتغیره، این تحقیق قصد دارد تا اثرات این انتقال را در هر دو حوضه مبدأ و مقصد پیش‌بینی کند.

جوان، (۱۳۹۹) پژوهشی با عنوان؛ بررسی روند خشکسالی هیدرولوژیک در سطح حوضه ی آبریز دریاچه ی ارومیه به این نتیجه رسیده است که در سال های اخیر، خشک شدن دریاچه ارومیه مورد توجه محققین قرار گرفته است. این دریاچه از سال ۱۹۹۵ با حدود ۸ متر کاهش سطح آب مواجه بوده است. خشکسالی ها به عنوان رویدادهای حدی مخرب، بر محیط طبیعی منطقه تاثیر می گذارند. شناسایی روند خشکسالی برای مدیریت و استفاده بهینه از منابع آب، ضروری است.

عرفانیان و همکاران، (۱۴۰۲) پژوهشی با عنوان؛ تحلیل روند بارندگی ماهانه با استفاده از روش نوآورانه گرافیکی و کلاسیک در ایستگاه های سینوپتیک حوضه دریاچه ارومیه به این نتیجه رسیدند که در میان متغیرهای آب و هواشناسی، بارندگی یکی از مهم ترین آن هاست. تحلیل روند یکی از موثرترین روش های مشاهده اثرات تغییرات آب و هوایی بر بارندگی است. اخیرا روش های گرافیکی جدیدی به عنوان جایگزینی برای روش های تحلیل روند کلاسیک پیشنهادشده است . تحلیل روند نوآورانه چندضلعی که ازتحلیل روند نوآورانه تکامل یافته است، در حال حاضر یکی از روش های پیشنهادی است و هیچ پیش فرضی در آن وجود ندارد.

حصاری و همکاران، (۱۴۰۲) پژوهشی با عنوان؛ مروری بر حکمرانی کلان در احیا دریاچه ارومیه در مقایسه با پروژه های احیا در سطح جهانی به این نتیجه رسیدند که نتایج حاصل از بررسی شاخص های تحقیق نشان می دهد که ساختار مدیریتی و حکمرانی قوی در کنار عوامل اقلیمی مهمترین عوامل اثرگذار بر وضعیت دریاچه ها و منابع آب آن می باشند

به طوری که دریاچه ارومیه به علت عدم وجود حکمرانی قوی، منابع مالی مناسب احیا و تغییر اقلیم (کمبود بارش و افزایش دما) شاهد افت شدید سطح آب در بازه زمانی کوتاه تری نسبت به سایر دریاچه ها بوده است.

چودن و همکاران، (۲۰۲۰) پژوهشی با عنوان؛ روشی برای ارزیابی ظرفیت سازگار با تغییرات آب و هوایی در جوامع وابسته به منابع در حوزه نیکاچو بوتان به این نتیجه رسیدند که خانوارهایی که در ارتفاعات بالاتر هستند، به دلیل تفاوت در سرمایه های جسمی، مالی، طبیعی و انسانی از ظرفیت سازگاری کمتری برخوردار بوده و آسیب پذیری بیشتری در برابر تغییرات آب و هوایی دارند. آنها از تنوع کمتری در منابع درآمد، وابستگی بیشتر به منابع طبیعی، تحصیلات و آموزش کمتر، دسترسی کمتر به زیرساخت ها (مانند جاده ها) و دسترسی به بازارها نسبت به خانوارهای دارای ارتفاعات کمتر برخوردار بودند.

گاسپر و همکاران، (۲۰۲۱) پژوهشی با عنوان؛ بررسی اثرات اجتماعی واقتصادی تغییر اقلیم بر محیط های شهری پرداخته و به این نتیجه رسیدند که عموماً تغییر اقلیم در سرتا سر جهان، همه شهرها را در زمینه اقتصادی و اجتماعی با چالش های اساسی رو به رو ساخته است. وجه تمایز تحقیق حاضر با دیگر تحقیقات در این است که اهداف تحقیق حاضر در هیچ یک از تحقیقات گذشته بررسی نشده است.

اونینانکیا و همکاران، (۲۰۲۱) موانع بهره وری مصرف آب در مناطق روستایی و حومه شهری آفریقای جنوبی را بررسی کردند. نتایج این پژوهش حاکی از آن بود که خانوارهای روستایی و حومه شهری، هزینه را به عنوان مانع اصلی برای نصب وسایل کم مصرف آب در نظر گرفته بودند. همچنین، نبود آموزش کافی و عدم آگاهی از مزایای استفاده از دستگاه های کم مصرف از دیگر موانع حفاظت از آب بودند.

مبانی نظری

تغییرات اقلیمی از سخت ترین و با اهمیت ترین حساسیت های قرن حاضر و آینده است. میلیون ها نفر از مردم به ویژه کسانی که در کشورهای در حال توسعه زندگی می کنند. با کمبود آب و غذا و به خطر افتادن سلامت شان مواجه هستند (تقیلو و همکاران،۱۳۹۹: ۱۱۸). تغییر اقلیم و به ویژه گرمایش جهانی، به دلیل افزایش میزان گازهای گلخانه ای در اتمسفر، سبب جلب توجه به این موضوع شده است. این پدیده فرآیند منحصر به عصر ما نبوده و بر اساس شواهد موجود، کره زمین در دوران های مختلف زمین شناسی همواره با چنین تغییراتی مواجه بوده است ولی آنچه تغییرات اقلیمی قرن حاضر و به ویژه در نیمه دوم قرن بیستم را از گذشته متمایز ساخته است، ماهیت و سرعت آن می باشد (Fu,etal2021:252). در واقع آب، اصلی ترین بخش یک اکوسیستم است که کاهش کمیت و کیفیت آن هر دو اثرات منفی زیادی روی اکوسیستم بر جای گذاشته و خسارات جبران ناپذیری را بر منابع غذایی طبیعی و موجودات زنده وارد می کند (Yuan,etal2021:786

). تخریب و آلودگی محیط زیست خطیرترین بحران جهان کنونی می باشد به طوری که گفته می شود جهان در لبه پرتگاه بحران محیط زیستی قرار دارد از این رو مشکل های محیط زیستی توجه بسیاری از محافل جهانی، بین المللی، ملی، منطقه ای و حتی اشخاص را به خود اختصاص داده است. محیط زیست از سوی انسان تهدید می شود زیرا فناوری به وی چنان قدرتی داده که می تواند در مقیاس گسترده یک قاره و حتی در سطح سیاره زمین محیط زیست را تخریب کند (حجازی و همکاران،۱۳۹۹: ۲۴۰). از جمله مهم ترین منابع زیست محیطی که در سال های اخیر در ایران مورد تخریب قرار گرفته اند، منابع آبی و دریاچه ها می باشند که به طور روزافزونی در معرض نابودی و خشک شدن قرار گرفته اند. ناگفته پیداست که خشک شدن منابع آبی و تالاب ها نه تنها بر حیات گیاهی و جانوری پیرامون خود تاثیر می گذارند بلکه بر روی تغییرات جمعیتی و بروز مشکلات و بحران های اجتماعی منطقه اطراف اعم از مراکز روستایی و شهری موثر می باشند (فنی و معروفی،۱۳۹۶: ۲). دریاچه ارومیه با مساحت ۵۰۰۰ کیلومتر مربع دریاچه ای وسیع با شوری زیاد است که در شمال غرب ایران و بین استان های آذربایجان غربی و شرقی واقع شده است. در سال های اخیر به دلیل کاهش شدید تراز آب دریاچه که ناشی از عوامل مختلفی از قبیل برداشت بیش از حد از منابع آبی آن، خشکسالی و تغییرات اقلیمی، رشد جمعیت، احداث سدها می باشد، قسمت عمده ای از آن به شوره زار تبدل شده است(عقلمند و عباسی،۱۳۹۶: ۳). دریاچه ارومیه به عنوان پهناورترین دریاچه داخلی کشور دارای نقش بسیار مهم در تعدیل اقلیم منطقه است. در این ناحیه در دهه های اخیرفعالیت های کشاورزی و صنعتی و هم چنین پروژه های زیر بنایی و توسعه منابع آب گسترش یافته است. این اقدامات اثرات قابل ملاحظه واساسی بر شرایط اکولوژیکی و تراز آب دریاچه ارومیه داشته است (مقیمی و همکاران،۱۳۹۱: ۴). با توجه به اهمیت دریاچه ارومیه، وضعیت افت تراز آب دریاچه و فرایند تدریجی خشک شدن آن در سال های اخیر سبب ایجاد برخی مشکلات مهم محیط زیستی، اجتماعی و اقتصادی به ویژه برای جوامع محلی پیرامون دریاچه شده است (فنک و همکاران،۱۴۰۲: ۵۲).

قلمرو پژوهش

دریاچه ارومیه در شمال غرب ایران یکی از بزرگ ترین دریاچه های شور جهان و از نظر وسعت بیستمین دریاچه جهان است که دارای ویژگی های شیمیایی، ریخت شناسی، رسوب شناسی و زیست محیطی خاصی می باشد. از دیدگاه ژئومورفولوژی، دریاچه ارومیه یک ناحیه فرونشسته زمین ساختی است که در اثر عملکرد گسل تبریز در شرق و گسل ارومیه در غرب به وجود آمده است. کلیه سیستم زهکشی و جریان های آب سطحی و زیرزمینی واحد دریاچه مذکور می شود، و از این منظر دریاچه ارومیه عامل اصلی ایجاد شبکه هیدروگرافی و ریخت شناسی حوضه آبریز محسوب می شود. مختصات جغرافیایی دریاچه بین "۱۵ ′۶ °۳۷ و "۱۵ ′۱۵ °۳۸ عرض شمالی و "۱۳ ′۰۰ °۴۵ و "۲۰ ′۵۵ °۴۵ طول

شرقی است. این دریاچه ناحیه ای به مساحت حدود ۵۰۰۰ کیلومتر مربع را می پوشاند و بیشترین درازا و پهنای آن به ترتیب ۱۴۰ و ۵۰ کیلومتر است. مساحت آن در زمان های کم آبی و پرآبی متفاوت می باشد و از ۴۷۵۰ تا ۶۱۰۰ کیلومتر مربع متغیر است. عمق متوسط آن ۶ تا ۱۲ متر است. به طوری که در قسمت های شمالی حدود ۶ متر و در قسمت های جنوبی از ۱۲ تا ۱۶ متر متغیر است. حوضه آبریز دریاچه یک حوضه داخلی بسته، با مساحت ۵۱۷۸۶ کیلومتر مربع، مناطقی از سه استان آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی و کردستان را تحت پوشش خود دارد که تمام رواناب های ناشی از بارندگی به سمت دریاچه جاری می شوند. حوضه آبریز دریاچه ارومیه در تقسیم بندی ساختارهای تکتونیکی رسوبی ایران، عمدتاً در زون البرز – آذربایجان قرار گرفته است. مرز شمالی زون مذکور با زون شمالی توسط گسل البرز و مرز جنوبی آن با گسل سمنان مشخص می گردد (رستمی و ملکی،۱۴۰۰: ۱۰۵۶).

روش شناسی پژوهش

یکی از مهم‌ترین و حساس‌ترین مراحل پژوهش، گرداوری اطلاعات است. روش گرداوری اطلاعات متاثر از ماهیت موضوع و متغیرهای مورد مطالعه است. مطالعه کتابخانه‌ای یکی از روش‌های معمول برای دستیابی به یافته‌ها و یکی از اساسی‌ترین مراحل در جمع‌آوری اطلاعات برای پژوهش است . در پژوهش حاضر از مطالعه کتابخانه‌ای برای گردآوری اطلاعات استفاده شده است. روش تجزیه و تحلیل در این پژوهش از آزمون (T-Test) و فرایند تحلیل سلسله مراتبی (FAHP) استفاده شده است.

یافته های تحقیق

بخش اول: شناسایی و نهایی سازی شاخص های تحقیق بااستفاده از آزمون(t-test)

در این پژوهش، ابتدا با بررسی بررسی نقش مشارکت مردمی در احیای دریاچه ارومیه و کاهش اثرات اقلیمی ادبیات مرتبط در خصوص پرسشنامه ای تدوین گردید و بین خبرگان و کارشناسان مورد مطالعه، توزیع گردیدو با به‌کارگیری آزمون پارمتری(t-test) توسط نرم افزار SPSS 21 معیارهای مورد نظر که دارای سطح معناداری بزرگتر از ۰/۰۵ می باشند به عنوان معیارهای با اهمیت شناسایی و انتخاب گردیده شدند.فرض صفر و فرض مقابل این آزمون به صورت زیر تعریف می شود:

H0=متوسط میانگین شاخص ها برابر۳ می باشد.

H1=متوسط میانگین شاخص ها برابر۳ نمی باشد.

نتایج این آزمون در جدول ۱ نشان داده شده است.(جهت بررسی دقیق تر نتایج آزمون(t-test)به قسمت پیوست ها مراجعه شود).

جدول ۱: نتایج آزمون(t-test)

معیارها	سطح معناری (sig)	مقدار (T-Value)	وضعیت
سطح آگاهی عمومی	.313	1.046	مردود
تمایل به شرکت	.003	3.556	پذیرش
اعتماد به دولت	.007	3.154	پذیرش
همکاری با سازمان ها	.027	2.467	پذیرش
مشارکت مالی	.000	4.583	پذیرش
آموزش های زیست محیطی	.000	5.916	پذیرش
انگیزه مشارکت	.000	4.525	پذیرش
سطح آب دریاچه	.001	4.000	پذیرش
میزان نمک دریاچه	.001	4.183	پذیرش
پوشش گیاهی منطقه	.068	1.974	مردود
تنوع زیستی	.207	1.323	مردود
کیفیت آب رودخانه ها	.045	2.201	پذیرش
بهره وری آبیاری	.027	2.477	پذیرش
مدیریت منابع آب	.001	4.000	پذیرش
انتشار گازهای گلخانه ای	.014	2.806	پذیرش
دمای منطقه	.003	3.595	پذیرش
میزان بارش	.000	5.123	پذیرش
شدت خشکسالی	.004	3.500	پذیرش

گرد و غبار	.000	5.172	پذیرش
سلامت اکوسیستم	.000	5.264	پذیرش
انرژی های تجدیدپذیر	.000	4.583	پذیرش
سازگاری اقلیمی	.000	4.938	پذیرش
تاب آوری اقلیمی	.000	6.141	پذیرش

منبع: یافته های پژوهش،۱۴۰۴

با توجه به جدول ۱ از مجموع ۲۳ معیار، ۳ معیار دارای سطح معنی داری(sig) بزرگتر از ۰/۰۵ می باشند، لذا فرض صفر مورد تائید قرار گرفته و از اهمیت خاصی برخوردار نمی باشند.لذا بر اساس آزمون(t-test) شاخص های، سطح آگاهی عمومی، پوشش گیاهی منطقه، تنوع زیستی از لیست شاخص های موثر حذف و مابقی شاخص ها به عنوان شاخص های مهم شناسایی شده اند.

بخش دوم: تعیین اوزان و درجه اهمیت شاخص های انتخاب شده توسط فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی(FAHP)

به همین منظور، با استفاده از تکینک فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی، وزن‌دهی به معیارها صورت گرفت.

توزیع پرسشنامه

برای نیل به هدف ذکرشده جهت پاسخ‌گویی به سؤال دوم پژوهشی، پرسشنامه‌ای تدوین گشت که در آن معیارها باهم مقایسه‌ی زوجی می‌شدند. برای امتیازدهی به مقایسات زوجی، طیفی از ۱ تا ۹ به پاسخ‌دهندگان ارائه شد که در آن امتیاز ۱ نشان دهنده‌ی اهمیت برابر و امتیاز ۹ نشان‌دهنده‌ی اهمیت نسبتاً شدید معیار اول نسبت به معیار دوم است. طیف امتیازدهی در جدول۲ زیر نشان دهده شده‌است.

جدول ۲: طیف ۹ گزینه‌ای ساعتی مورد استفاده در روشFAHP

تعریف	درجه اهمیت	تعریف	درجه اهمیت
اهمیت برابر	۱	اهمیت قوی تا بسیار قوی	۶
اهمیت برابر تا متوسط	۲	اهمیت بسیار قوی	۷
اهمیت متوسط	۳	اهمیت بسیار قوی تا شدیداً قوی	۸
اهمیت متوسط تا قوی	۴	اهمیت شدیداً قوی	۹
اهمیت قوی	۵		

منبع: قدسی‌پور، ۱۳۸۴

معیارهای درج‌شده در این پرسشنامه، همان معیارهایی که طبق آزمون(t-test) در مرحله قبل مورد توافق قرارگرفتند و با توجه به حدی که پژوهش‌گر ارائه کرد، انتخاب شده بودند (اشاره به جدول ۱).

همچنین نمادها و شاخص های نهایی شده و مورد استفاده در روش تحلیل سلسله مراتبی فازی(FAHP) مطابق جدول۳ می باشد.

جدول۳: شاخص ها و نمادهای مورد استفاده

شاخص های تحقیق	نمادها
سطح آگاهی عمومی	C1
تمایل به شرکت	C2
اعتماد به دولت	C3
همکاری با سازمان ها	C4
مشارکت مالی	C5
آموزش های زیست محیطی	C6
انگیزه مشارکت	C7
سطح آب دریاچه	C8
میزان نمک دریاچه	C9
پوشش گیاهی منطقه	C10
تنوع زیستی	C11
کیفیت آب رودخانه ها	C12
بهره وری آبیاری	C13
مدیریت منابع آب	C14
انتشار گازهای گلخانه ای	C15
دمای منطقه	C16
میزان بارش	C17
شدت خشکسالی	C18
گرد و غبار	C19
سلامت اکوسیستم	C20

منبع: یافته های پژوهش،۱۴۰۴

جمع آوری پرسشنامه ها

پرسشنامه‌ها برای جمع‌آوری داده‌ها به همان خبرگانی توزیع شد که در مرحله قبل از آن‌ها درباره اتفاق نظر درمورد معیارها، نظرخواهی شده بود. پس از پیگیری‌های متعدد و همچنین توجیه خبرگان جهت پاسخ‌گویی به این پرسشنامه، آن‌ها جمع‌آوری شدند و با ورود داده‌ها به نرم‌افزار اکسل ۲۰۱۰، مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفتند.

برای دستیابی به ارزش و وزن هر معیار، مستقیماً وزن هر معیار محاسبه شد و توسط جمع آن‌ها، وزن بعد استخراج شد و رتبه‌بندی نهایی صورت گرفت. در زیر، مراحل انجام‌شده‌ی تکنیک فرایند تحلیل سلسله‌مراتبی فازی تحت نرم‌افزار با بیان جزئیات شرح داده می‌شود.

تحلیل داده ها

در این تحقیق، با توجه به ۲۰ شاخص شناسایی شده مقایسات زوجی براساس طیف مندرج در جدول ۲ و مطابق نظر ۱۰ خبره انجام شده است، نحوه ورود اطلاعات به نرم افزار و ماتریس تصمیم گیری مقایسات زوجی از ترکیب نظر خبرگان به در نهایت نتایج بدست آمده از نرم افزارFuzzy AHP Solver 2015، جهت رتبه بندی شاخص های تحقیق به شرح جدول ۴ می باشد.

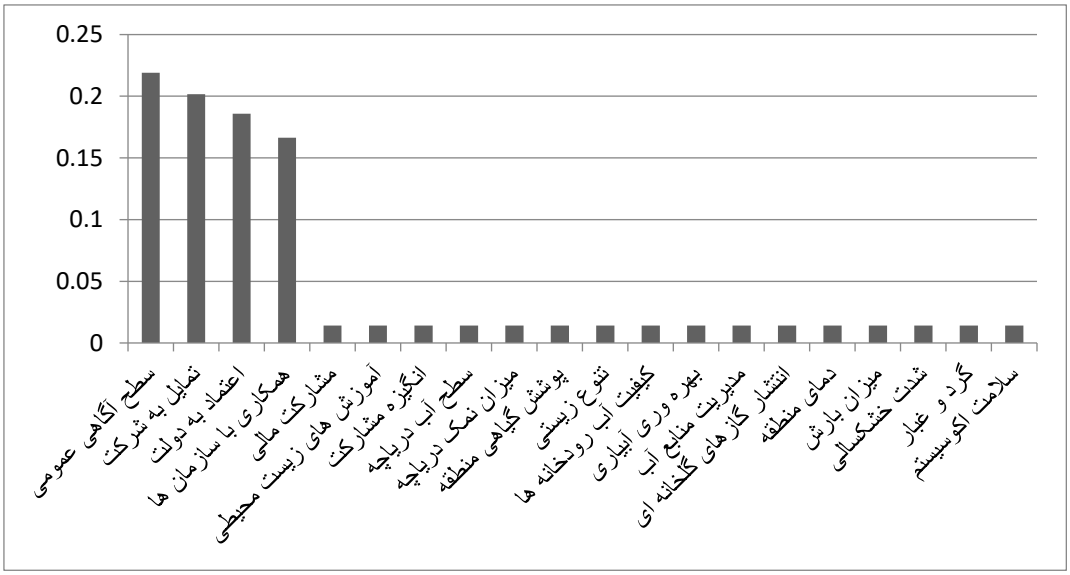
جدول۴:نتایج رتبه بندی شاخص ها

شاخص ها	اوزان شاخص ها	اولویت
سطح آگاهی عمومی	0.219	۱
تمایل به شرکت	0.2017	۲
اعتماد به دولت	0.1859	۳
همکاری با سازمان ها	0.1665	۴
مشارکت مالی	0.0141	۵
آموزش های زیست محیطی	0.0141	۵
انگیزه مشارکت	0.0141	۵
سطح آب دریاچه	0.0141	۵
میزان نمک دریاچه	0.0141	۵
پوشش گیاهی منطقه	0.0141	۵
تنوع زیستی	0.0141	۵
کیفیت آب رودخانه ها	0.0141	۵
بهره وری آبیاری	0.0141	۵
مدیریت منابع آب	0.0141	۵
انتشار گازهای گلخانه ای	0.0141	۵

دمای منطقه	0.0141	۵
میزان بارش	0.0141	۵
شدت خشکسالی	0.0141	۵
گرد و غبار	0.0141	۵
سلامت اکوسیستم	0.0141	۵

منبع: یافته های پژوهش،۱۴۰۴

نتایج تصویری بدست آمده ازنرم Fuzzy AHP Solver 2015 جهت نشان دادن رتبه های هر کدام از شاخص های تحقیق به صورت شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: رتبه بندی شاخص های ارزیابی عملکرد ارتباط با مشتری

با توجه به نتایج بدست آمده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی(FAHP) شاخص های سطح آگاهی عمومی، تمایل به شرکت و اعتماد به دولت به ترتیب دارای اولویت اول الی سوم می باشند.

نتیجه گیری

بررسی نقش مشارکت مردمی در احیای دریاچه ارومیه و کاهش اثرات اقلیمی، ریشه در چندین حوزه علمی از جمله مدیریت منابع طبیعی، جامعه‌شناسی محیط زیست، علوم سیاسی و اقتصاد محیط زیست دارد. نظریه‌های مشارکت، از جمله نظریه ذی‌نفعان، بر این باورند که در پروژه‌های پیچیده زیست‌محیطی، درگیر کردن تمامی گروه‌های متأثر و تأثیرگذار، از جمله جوامع محلی، برای دستیابی به اهداف پایدار ضروری است. این رویکرد، ضمن افزایش حس مالکیت و مسئولیت‌پذیری

در میان مردم، به بهره‌گیری از دانش بومی و تجربیات محلی نیز کمک می‌کند که در بسیاری از موارد، راهکارهای مؤثرتری نسبت به مداخلات صرفاً دولتی ارائه می‌دهد. همچنین، چارچوب‌های نظری مربوط به مدیریت تطبیقی و تاب‌آوری اکولوژیکی، بر اهمیت یادگیری مداوم و توانایی سیستم‌ها (هم انسانی و هم طبیعی) برای سازگاری با تغییرات تأکید دارند. مشارکت مردمی در این بستر، به عنوان یک عامل تسهیل‌کننده برای انعطاف‌پذیری و ظرفیت سازگاری جامعه و اکوسیستم در برابر شوک‌های اقلیمی و بحران‌های زیست‌محیطی عمل می‌کند. از سوی دیگر، نظریه کالاهای عمومی و معضلات کنش جمعی، نشان می‌دهد که چگونه منافع مشترک در حفظ محیط زیست می‌تواند منجر به رفتارهای جمعی برای دستیابی به اهداف بزرگتر شود، به شرطی که مکانیزم‌های مناسب برای هماهنگی و حل اختلافات وجود داشته باشد. در نهایت، مفهوم عدالت زیست‌محیطی نیز مطرح می‌شود که بر توزیع عادلانه هزینه‌ها و منافع ناشی از بحران‌های زیست‌محیطی و راهکارهای مدیریتی آن تأکید دارد و مشارکت مردمی را ابزاری برای تضمین این عدالت می‌بینند. هدف پژوهش حاضر، بررسی نقش مشارکت مردمی در احیای دریاچه ارومیه و کاهش اثرات اقلیمی می باشد. این پژوهش ازنظر هدف، کاربردی - نظری و ازنظر روش، توصیفی– تحلیلی است. اطلاعات و داده های موردنیاز از طریق روش کتابخانه ای جمع آوری شده است. در این پژوهش از آزمون (T-Test) و فرایند تحلیل سلسله مراتبی (FAHP) می باشد. با توجه به یافته‌های حاصل از تحلیل داده‌ها با استفاده از آزمون T و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی(FAHP) ، می‌توان به نتایج زیر دست یافت:

آزمون T نشان داد که سطح آگاهی عمومی و تمایل به مشارکت مردمی در ابعاد مختلف، تفاوت‌های آماری معناداری را بین گروه‌های مختلف اجتماعی و اقتصادی در حوضه دریاچه ارومیه نشان می‌دهد. این یافته بر اهمیت طراحی برنامه‌های مشارکتی متناسب با ویژگی‌های هر گروه تأکید دارد. فرآیند تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP) نیز اولویت‌بندی مؤثری از عوامل کلیدی در موفقیت مشارکت مردمی ارائه داد. نتایج حاکی از آن است که عواملی چون "اعتماد به دولت و نهادهای اجرایی"، "تأثیرگذاری محسوس مشارکت" و "آموزش‌های مستمر زیست‌محیطی" دارای بالاترین وزن در جلب و حفظ مشارکت پایدار هستند. همچنین، FAHPبه روشنی نشان داد که چگونه این عوامل کلیدی، با وزن‌دهی متفاوت، بر موفقیت پروژه‌های احیای دریاچه ارومیه و همچنین توانمندی منطقه برای کاهش اثرات اقلیمی (مانند گرد و غبار و مدیریت خشکسالی) تأثیر می‌گذارند. در نهایت، نتایج تحلیل گویای آن است که تلفیق رویکردهای کمی (مانند T-Test) و کیفی-کمی (مانند FAHP) در پژوهش‌های زیست‌محیطی، ابزاری قدرتمند برای درک عمیق‌تر پدیده‌ها و ارائه راهکارهای سیاستی مبتنی بر شواهد فراهم می‌آورد. این رویکرد ترکیبی، به ویژه در مسائل پیچیده‌ای چون احیای دریاچه ارومیه که ابعاد اجتماعی، اقتصادی و محیط‌زیستی در هم تنیده‌اند، از اهمیت بالایی برخوردار است. یافته‌ها بر ضرورت ایجاد سازوکارهای شفاف، پاسخگو و توانمندساز برای مشارکت مردمی در تمامی مراحل تصمیم‌گیری و اجرای برنامه‌های زیست‌محیطی تأکید

دارند. این امر نه تنها به پیشبرد اهداف احیای دریاچه کمک می‌کند، بلکه تاب‌آوری جامعه محلی را در برابر چالش‌های اقلیمی نیز افزایش خواهد داد.

منابع

احمدی، امیر، نادری، لادن، بادسار، محمد، (۱۳۹۶)، بررسی عوامل موثر بر میزان تمایل به مشارکت ذینفعان در حفظ و احیای دریاچه ارومیه، چهارمین کنفرانس بین المللی برنامه ریزی و مدیریت محیط زیست.

تقیلو، علی اکبر، بهرامی جاف، ساجد، علیزاده، فریده، شهبازی، محبوبه، (۱۳۹۹)، بررسی میزان سازگاری کشاورزان حوزه دریاچه ارومیه با خشکسالی (مورد: دهستان بکشلوچای شهر ارومیه)، فصلنامه علمی برنامه ریزی منطقه ای، سال ۱۰، شماره ۴۰.

جوان، خدیجه، (۱۳۹۹)، بررسی روند خشکسالی هیدرولوژیک در سطح حوضه ی آبریز دریاچه ی ارومیه،فصلنامه هیدروژئومورفولوژی، سال هفتم، شماره ۲۵.

حصاری، بهزاد، فرهمند، قاسم، زینالزاده، کامران، بشارت، سینا، (۱۴۰۲)، مروری بر حکمرانی کلان در احیا دریاچه ارومیه در مقایسه با پروژه های احیا در سطح جهانی، اولین همایش ملی علوم و مهندسی محیط زیست در افق توسعه.

حجازی، یوسف، اسحاقی، سیدرضا، حسینی، سید محمود، رضایی، عبدالمطلب، (۱۳۹۹)، تحلیل شبکه اجتماعی سازمان های فعال در احیای دریاچه ارومیه، فصلنامه علوم محیطی، دوره هجدهم، شماره ۴.

رسولی مجد، نگار، خلیلی، کیوان، (۱۳۹۳)، بررسی نقش تغییر اقلیم و عوامل انسانی در خشک شدن دریاچه ارومیه، اولین همایش ملی ارزیابی مدیریت و آمایش محیط زیستی در ایران.

رستمی، هما، ملکی، سحر، (۱۴۰۰)، بررسی پارامترهای موثر بر خشک شدن دریاچه ارومیه با استفاده از فرآیند تحلیل شبکه ای فازی، فصلنامه کواترنری ایران، دوره ۷، شماره ۴ و ۳.

سلطانی، ناصر، موسوی، میر نجف، احمد اقبال، گلاویژ، (۱۳۹۵)، ارزیابی پیامدهای احتمالی انتقال آب حوضه زاب به دریاچه ارومیه، فصلنامه جغرافیا و پایداری، شماره ۱۹.

عقلمند، رضا، عباسی، علی، (۱۳۹۶)، دریاچه ارومیه: چالش های زیست محیطی و راهکارهای کاهش اثرات آن، چهارمین کنفرانس بین المللی برنامه ریزی و مدیریت محیط زیست.

عرفانیان، مهدی، میرزائی حسنلو، ایوب، جوان، خدیجه، (۱۴۰۲)، تحلیل روند بارندگی ماهانه با استفاده از روش نوآورانه گرافیکی و کلاسیک در ایستگاه های سینوپتیک حوضه دریاچه ارومیه، نشریه علمی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، سال هفدهم، شماره ۶۲.

فنک، داود امین، رضائی، روح اله، زینال زاده، کامران، (۱۴۰۰)، تحلیل وضعیت بحران حوضه آبریز دریاچه ارومیه و ارائه راهکارهایی برای مدیریت پایدار آن: کاربرد مدل DPSIR، فصلنامه علوم ترویج و آموزش کشاورزی ایران، جلد ۱۷، شماره۲.

فنک، داود امین، رضایی، روح اله، کهریزی، زینب، (۱۴۰۲)، شناسایی و تحلیل موانع مشارکت کشاورزان در احیا دریاچه ارومیه در حوضه آبریز مهاباد، فصلنامه آب و توسعه پایدار، سال دهم، شماره ۳.

فنی، زهره، معروفی، ایوب، (۱۳۹۶)، بررسی اثرات خشکی دریاچه ارومیه بر آسیب پذیری محیط زیست طبیعی و انسانی ناحیه پیرامون، فصلنامه علمی ترویجی محیط زیست، شماره ۵۸.

مقیمی، پریسا، عباسپور، مجید، جاوید، امیر حسین، احمدی گیوی، فرهنگ، (۱۳۹۱)، بررسی اثرات تغییرات اقلیمی بر اکوسیستم دریاچه ارومیه، نهمین همایش بین المللی مهندسی سواحل، بنادر و سازه های دریایی.

محمد خانی، عماد، کاویانی راد، مراد، ذکی، یاشار، افضلی، رسول، (۱۳۹۹)، مطالعه تطبیقی تغییر اقلیم و چالش های امنیتی بحران آب در شهرهای دو حوضه آبریز مکزی و دریاچه ارومیه، دو فصلنامه جغرافیای اجتماعی شهری، دوره ۷، شماره ۱.

Choden, K., Keenan, R. J., & Nitschke, C. R. 2020. An approach for assessing adaptive capacity to climate change in resource dependent communities in the Nikachu watershed, Bhutan. Ecological Indicators, 114, 106293.

Fu, L.; Zhao, Y.; Xu, Zh. and Wu, B. (2021). Spatial and temporal dynamics of forest aboveground carbon stocks in response to climate and environmental changes, Soils Sediments, 15(2): 249-259.

Gasper, R., Blohm, A. and Ruth, M.(2021) Social and economic impacts of climate change on the urban environment. Journal of Current Opinion in Environmental Sustainability, 3(3), 150-157.

Kendra, J., Knowles, S. G., and Wachtendorf, T. (2019). Introduction: the new environmental crisis. In: Disaster Research and the Second Environmental Crisis, (pp. 1-18). Springer, Cham.

Onyenankeya, K., Onyenankeya, O. M., & Osunkunle, O. (2021). Barriers to water use efficiency in rural and peri-urban areas of South Africa. Water and Environment Journal, 35(4), 1164-1173.

Sun, Y., Liu, S., Shi, F., An, Y., Li, M., and Liu, Y. (2020). Spatio-temporal variations and coupling of human activity intensity and ecosystem services based on the four-quadrant model on the Qinghai-Tibet Plateau. Science of the Total Environment, 743, 140721.

Yuan, Z., Wu, D., Niu, L., Ma, X., Li, Y., Hillman, A. L., Abbott, M. B., and Zhou, A. (2021). Contrasting ecosystem responses to climatic events and human activity revealed by a sedimentary record from Lake Yilong, southwestern China. Science of the Total Environment, 783, 146922.

Investigating the role of public participation in the restoration of Lake Urmia and reducing climate impacts

❋[1]Sahand Azar

Mir Najaf Mousavi[2]

1- PhD Student, Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, Urmia University, Urmia, Iran
* Corresponding author: Email: S.azar@urmia.ac.ir
2- Prof. Mir Najaf Mousavi, Department of Geography, Urmia University, Urmia, Iran, m.mousavi@urmia.ac.ir

Abstract
Investigating the role of public participation in the restoration of Lake Urmia and the reduction of climate impacts is crucial in order to explain how the conscious participation and activities of local people and stakeholders can act as a powerful driving force in the success of environmental restoration projects. This research not only emphasizes the social and cultural dimensions of public involvement, but also explores how this participation can be transformed into practical solutions for the sustainable management of water resources and reducing the vulnerability of the region to climate change. Finally, the aim is to identify patterns and mechanisms that facilitate constructive interaction between society, government, and experts to achieve environmental goals. The aim of the present research is to investigate the role of public participation in the restoration of Lake Urmia and the reduction of climate impacts. This research is applied-theoretical in terms of purpose and descriptive-analytical in terms of method. The required information and data were collected through library methods. This study uses the T-Test and the Analytic Hierarchy Process (FAHP). This study examines the vital role of public participation in the restoration of Lake Urmia and the mitigation of the climate impacts resulting from its crisis. Using the T-test, significant differences in variables related to public participation (such as level of awareness, willingness to cooperate) between different stakeholder groups are identified. Next, the Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP) will be used to weight and prioritize various factors and criteria affecting public participation and its effectiveness in restoration and climate adaptation programs, taking into account ambiguities and qualitative judgments. The ultimate goal is to provide a comprehensive framework to maximize the potential of community participation in solving one of the country's greatest environmental challenges.
Keywords: Public participation, Lake Urmia restoration, climate impacts, T-Test, and Analytical Hierarchy Process (FAHP)

سومین کنفرانس ملی آب و هواشناسی ایران (با محوریت تغییر اقلیم)
The 3rd National Conference on Climatology of Iran (Focusing on Climate Change)
ارومیه ۱۶ مهر ۱۴۰۴

پایش متغیرهای اقلیمی با پوشش گیاهی در استان آذربایجان شرقی

فرحناز خرم آبادی*[۱]، علیرضا کربلایی درئی[۲] ، ناهید بافنده[۳]

۱-نویسنده مسئول، دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، دانشکدهٔ علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه اصفهان، farahnaz.khoramabadi@yahoo.com اصفهان، ایران، ایمیل:

۲-استادیار آب و هواشناسی،دانشکده جغرافیا و برنامه ریزی ، دانشگاه خوارزمی تهران.
ایمیل : karbalaee@khu.ac.ir

۳- دانش آموخته کارشناسی ارشد ژئومورفولوژ ریزی برنامه در ی محیطی، دانشگاه زنجان، زنجان،
nahidbafandeh1994@gmail.com ایمیل:

چکیده :

نوسانات اقلیمی نقش تعیین‌کننده‌ای در دینامیک پوشش گیاهی مناطق مختلف، به‌ویژه در مقیاس‌های منطقه‌ای مانند استان آذربایجان شرقی دارند. این پژوهش با هدف بررسی روابط بین متغیرهای اقلیمی (بارش، دما، رطوبت خاک) و پوشش گیاهی (با استفاده از شاخص NDVI) در استان آذربایجان شرقی طی دوره آماری ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ انجام شده است. داده‌های ماهواره‌ای سنجنده MODIS و شاخص NDVI به‌عنوان معیار اصلی سلامت و تراکم پوشش گیاهی مورد استفاده قرار گرفتند. تحلیل‌های آماری شامل محاسبه ضرایب همبستگی پیرسون و آزمون‌های مقایسه میانگین نشان داد که بارش‌های کوتاه‌مدت (rrr24) با ضریب همبستگی ۰.۴۵، قوی‌ترین عامل مؤثر بر پوشش گیاهی هستند. رطوبت خاک (umm) نیز با همبستگی ۰.۲۸ نقش مکمل دارد. دما تأثیر ثانویه و محدودی دارد، به‌طوری که دمای متوسط ماهانه (tm_m) رابطه مثبت ضعیف (۰.۱۳) و حداقل دمای حداقل (tmin_min) رابطه منفی ضعیف (۰/۱۳-) با NDVI دارد. همچنین، مقایسه میانگین NDVI در دو دوره زمانی (۲۰۰۰–۲۰۰۹ و ۲۰۰۹–۲۰۲۲) نشان‌دهنده افزایش معنادار پوشش گیاهی در دهه اخیر است (از ۰/۱۶۶ به ۰/۱۹۲). این یافته‌ها حاکی از آن است که پوشش گیاهی در آذربایجان شرقی تحت تأثیر ترکیبی از عوامل اقلیمی، به‌ویژه بارش و رطوبت خاک قرار دارد و روند مثبت آن در سال‌های اخیر می‌تواند نشانه‌ای از بهبود شرایط اقلیمی یا مدیریت بهتر منابع طبیعی باشد.

کلیدواژه:آذربایجان شرقی، پوشش گیاهی، تغییر اقلیم ، شاخص NVDI

مقدمه

نوسان‌های اقلیمی اهمیت زیادی برای دینامیک پوشش گیاهی در مقیاس جهانی و منطقه‌ای دارند. تخمین ویژگی‌های پوشش گیاهی نظیر یک قدم مهم در تعیین اقلیم یک منطقه است. آب و هوا از مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار بر شرایط پوشش گیاهی می‌باشند. بر پراکنش مکانی پوشش گیاهی ارتباط زیادی با شرایط اقلیمی دارد (فرجزاده و همکاران، ۱۳۹۰).

بررسی پایداری روند تغییرات پوشش گیاهی یکی از مهم‌ترین موضوعات مدیریت و کنترل پوشش گیاهی در راستای توسعه پایدار است. انواع درختان، بوته‌ها، علوفه و چمن و سبزی که در سطح زمین استقرار می‌یابد پوشش گیاهی گفته می‌شود. فقدان پوشش گیاهی در سطح زمین از عوامل عمده تخریب سطح خاک توسط باران و غیره می‌باشد (Peng et al., 2012). شاخص‌های پوشش گیاهی به طور گسترده به عنوان معیارهایی برای تجزیه و تحلیل تغییرات پوشش گیاهی اراضی از جمله پوشش گیاهی و فاکتورهای دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرند(pettorlli et al,2005).

شناخت چگونگی وقوع این تغییرات مهم‌ترین ابزاری برای اتخاذ تدابیر مدیریتی در بهره‌برداری اصولی از مراتع بوده که دستیابی به راهکارهای علمی و عملی بهینه برای مدیریت صحیح‌تر در آن را ممکن می‌سازد(تمرتاش و همکاران، ۱۳۹۲). در دهه‌های اخیر، استفاده از فن دورسنجی به منظور پایش تغییرات موردتوجه قرار گرفته و تحقیقات متعددی در این زمینه در ایران و جهان انجام شده است(جان۱۱۴ و همکاران،۲۰۱۷:۴۴).

امروزه پوشش مکانی و در دسترس بودن داده‌های سری زمانی، سامانه‌های سنجش از دور را به ابزاری ایدئال برای در نظر گرفتن پویایی‌های گیاهی با مقیاس گسترده تبدیل کرده است(Harris et al.; 2014).

و همچنین باتوجه به محدودیت‌های حاصل از تغییرپذیری مکانی و زمانی و هزینه‌بر بودن مطالعات میدانی، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به دلیل پوشش وسیع و چند زمانه بودن نتایج قابل قبولی را در بررسی تغییرات پوشش گیاهی ارائه می‌نماید (ناطقی و همکاران، ۱۳۹۶).

تصاویر سری زمانی سنجنده مودیس، سری زمانی جهان کامل VI6 ماهواره‌های ترا و آکوا با دارا بودن اطلاعات طیفی ارزشمند، قدرت تفکیک مکانی متفاوت (۲۵۰ متری، یک کیلومتری و ۰/۰۵ درجه) و قدرت تفکیک زمانی(۱۶ روزه و ماهانه) برای پاسخگویی به نیازهای جوامع پروهشی و کاربردی در دسترس هستند. شاخص ماهواره‌ای NDVI می‌تواند

114 Jin et al

تغییرات سطح پوشش گیاهی را به دلیل همبستگی قوی بین پوشش گیاهی و شاخص مذکور اندازه‌گیری کند (ژانگ[115] و همکاران، ۲۰۱۷).

روش تحقیق

تحقیق حاضر از نوع کاربری و به روش توصیفی تحلیلی می‌باشد. در این تحقیق از نرم افزارهای ArcGis، Minitab، excel استفاده شده است. در این پژوهش ارزیابی تغییرات و طبقه بندی تراکم پوشش گیاهی در آذربایجان شرقی با استفاده از مدل‌های آماری تحلیل مؤلفه‌های اصلی مورد بررسی قرارگرفته است. این پژوهش از نوع کاربردی و روش آن کمی- تحلیلی است. در این تحقیق از نرم افزارهای ArcGIS، Minitab، SPSS و EXCEL استفاده شده است. و همچنین با استفاده از محصولات ماهواره ای سنجنده مودیس شاخص پوشش گیاهی ۲۰ ساله از سال ۲۰۰ الی ۲۰۱۹ مورد محاسبه قرار گرفت.

شاخص NDVI

این شاخص از معروف‌ترین، ساده‌ترین و کاربردی‌ترین شاخص‌های است که در زمینه‌ی مطالعات پوشش گیاهی شناخته است کاسا، ۱۹۹۰ (Kassa,1990) فرآیند محاسباتی ساده دارد و در مقایسه با دیگر شاخص‌ها دارای بهترین توان دینـامیک می‌باشد. این شاخص بیش‌ترین حساسیت را به تغییرات پوشش گیاهی داشته و در مقابل اثرات جوی و زمینه خاک، به جز در مواردی که پوشش گیاهی کم باشد، حساسیت کم‌تری دارد. شاخص NDVI رابطه زیر محاسبه می‌شود کوگان، ۱۹۹۳ (Kogan,1993).

$$\mathrm{NDVI} = \frac{\mathrm{NIR} - \mathrm{RED}}{\mathrm{NIR} + \mathrm{RED}}$$

که در آن NDIR، بازتاب در باند فرو سرخ نزدیک و RED، انعکاس در باند سرخ است. اگرچه از دیدگاه نظری مقدار این شاخص در محدوده ۱- و ۱+ می‌باشد ولی در عمل کم‌تر از ۱ و بیش‌تر از ۱- است. مقادیر این شاخص برای پوشش گیاهی متراکم به سوی عدد یک میل می‌کند ولی ابرها، برف و آب با مقادیر منفی مشخص می‌شوند. سنگ‌ها و خاک‌های بایر که واکنش طیفی مشابه در دو باند مورد استفاده دارند با مقادیر نزدیک به صفر دیده می‌شوند. در این شاخص خاک معمولی، معادل یک منظور می‌شود. هر قدر فاصله شاخص یک پیکسل بالاتر از اندازه خاک باشد نشان دهنده تراکم پوشش گیاهی است آلیسون، ۱۹۸۹ (Allison,1989).

115 Zhang et al

استفاده از شاخص NDVI در مراحل مختلف رشد گیاه نتایج خاصی را ارائه می‌دهد، نتایج این شاخص در مرحله گل دادن، میوه دادن و رویش بهتر از مراحل از مراحل رشد است. با اعمال رابطه ۱ در تصاویر پیش پردازش شده، شاخص NDVI محاسبه شد. برای ماه‌های دارای چند تصویر، متوسط ماهانه تهیه شد. مقادیر متوسط ماهانه NDVI در طول دوره‌ی آماری با توجه به مختصات مناطق معرف از تصاویر استخراج شدند

بررسی وضعیت روند پوشش گیاهی در آذربایجان شرقی

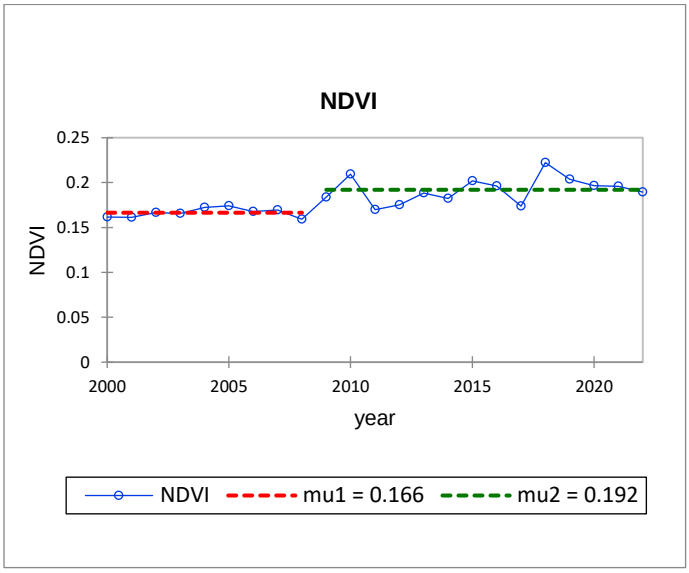
شاخص پوشش گیاهی یکی از کاربردی‌ترین شاخص پوشش گیاهی است که کارایی مفید آن در بسیاری مطالعات توسط محققان مختلف گزارش شده است. ارزش عددی این شاخص بین ۱+ و ۱- در نوسان است و ثابت شده که هر چه مقدار عددی این شاخص به سمت عدد ۱+ نزدیک شود. بر میزان و کیفیت پوشش گیاهی افزوده می‌شود، با توجه به داده‌های به دست آمده از آنالیز تصاویر ماهواره‌ای از وضعیت پوشش گیاهی در چند سال اخیر(شکل)، مقدار شاخص NDVI در استان آذربایجان شرقی بین۰/۰۰۵- تا ۰/۲۳۳ متناوب است، بخش‌های شمال شرق استان بیشترین تراکم پوشش گیاهی و بخش‌های مرکزی و ارتفاعات پایین فاقد پوشش گیاهی است.

شاخص پوشش گیاهی NDVI در منطقه مورد مطالعه

این پژوهش با هدف بررسی روابط میان شاخص‌های اقلیمی و پوشش گیاهی (بر اساس شاخص NDVI) در استان آذربایجان شرقی انجام شد. ماتریس همبستگی محاسبه‌شده نشان می‌دهد که روابط بین متغیرها از شدت و جهت متفاوتی برخوردار هستند. براساس شکل (۲)، شاخص NDVI که بیانگر میزان سبزی و سلامت پوشش گیاهی است، در این مطالعه به‌عنوان متغیر اصلی مورد توجه قرار گرفت. نتایج همبستگی بین NDVI و متغیرهای اقلیمی به شرح زیر است: بارش ۲۴ ساعته (rrr24): با ضریب همبستگی ۰/۴۵ ، قوی‌ترین ارتباط مثبت با NDVI را نشان می‌دهد. این امر اهمیت بارش‌های کوتاه‌مدت و شدید را در بهبود وضعیت پوشش گیاهی مناطق نیمه‌خشک و کوهستانی استان تأیید می‌کند. رطوبت خاک ماهانه (umm, umax_m, umin_m): ارتباطی در حد متوسط با NDVI دارند (به‌ترتیب ۰.۲۸، ۰.۱۸ و ۰.۲۸). این نتایج بیانگر وابستگی نسبی پوشش گیاهی به رطوبت خاک است، هرچند نوسانات بارش و ویژگی‌های خاک باعث محدود شدن این اثر می‌شود. بارش ماهانه (p0m_m, nm_m): با ضرایب همبستگی حدود ۰.۲۸، تأثیری مثبت اما کمتر از بارش‌های کوتاه‌مدت دارند. میانگین دمای ماهانه (tm_m): با ضریب ۰.۱۳، تأثیر مثبت و نسبتاً ضعیفی بر NDVI دارد؛ در حالی که حداقل دمای حداقل (tmin_min) با ضریب -۰.۱۳ ارتباط منفی ضعیفی نشان می‌دهد. این نتایج بیانگر آن است که سرمای شدید می‌تواند پوشش گیاهی را محدود کند، اما اثر آن چندان چشمگیر نیست. علاوه بر ارتباط NDVI با متغیرهای اقلیمی، برخی روابط درونی میان متغیرها نیز حائز اهمیت‌اند: میانگین و حداقل رطوبت هوا (umm و umin_m) با ضریب ۰.۸۸

ارتباط بسیار قوی دارند، که نشان‌دهنده تغییرات یکپارچه رطوبت خاک در طول ماه است. حداکثر رطوبت هوا (umax_m) نیز با میانگین آن همبستگی بالایی (۰.۸۴) دارد. میانگین دمای ماهانه با حداقل دما (tm_m و tmin_min) ارتباط نسبتاً قوی (۰.۷۱) نشان می‌دهد. بارش ۲۴ ساعته و رطوبت خاک ماهانه نیز با همبستگی ۰/۶۱، رابطه معناداری دارند که بیانگر اثر مستقیم بارش بر رطوبت خاک است. جمع‌بندی نتایج نشان می‌دهد: بارش، به‌ویژه بارش‌های کوتاه‌مدت (rrr24)، مهم‌ترین عامل مؤثر بر وضعیت پوشش گیاهی استان است. رطوبت خاک نقش مکمل دارد و اثر آن در کنار بارش آشکارتر می‌شود. دما در مقایسه با بارش و رطوبت خاک اثر کمتری بر NDVI دارد، هرچند در شرایط سرمای شدید یا گرمای بیش از حد می‌تواند به‌عنوان عامل محدودکننده عمل کند. هیچ‌یک از متغیرها همبستگی بسیار قوی (بالاتر از ۰.۷) با NDVI ندارند؛ بنابراین، پوشش گیاهی استان تحت تأثیر ترکیبی از چندین عامل اقلیمی است

در نمودار (۱)، تغییرات میانگین پوشش گیاهی از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ مورد بررسی قرار گرفته است.
تغییرات میانگین NDVI در دو دوره زمانی مختلف محاسبه شده است:
تغییرات میانگین NDVI در دوره زمانی اول mul از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۹ با میزان ۰/۱۶۶ درصد میباشد ولی در دوره اهنگ تغییرات میانگین NDVIدر دوره زمانی دوم از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۲ با میزان ۰/۱۹۲ درصد است بنابراین از روی مقایسه دو میانگین، به نظر می‌رسد که میانگین NDVI در دوره زمانی دوم (mu2) نسبت به دوره زمانی اول (mu1) افزایش یافته است .این نشان می‌دهد که به طور کلی پوشش گیاهی در منطقه آذربایجان شرقی از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۲ روند افزایشی داشته است.



نمودار (۱)، روند تغییرات میانگین پوشش گیاهی ، براساس آزمون پتی

نتیجه گیری

بر اساس یافته‌های این پژوهش، چند نکته کلیدی در خصوص عوامل مؤثر بر پوشش گیاهی استان آذربایجان شرقی (با تأکید بر شاخص NDVI) قابل استخراج است.

شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال‌شده (NDVI) به‌عنوان یکی از پرکاربردترین شاخص‌های پایش اکوسیستم‌های گیاهی، مقادیر متغیری بین ۱- تا ۱+ دارد و هرچه مقدار آن به عدد ۱+ نزدیک‌تر باشد، میزان و کیفیت پوشش گیاهی بیشتر است. نتایج حاصل از تحلیل تصاویر ماهواره‌ای نشان داد که مقدار NDVI در استان طی سال‌های اخیر بین ۰.۰۰۵- تا ۰.۲۳۳ متناوب بوده است؛ به‌طوری که بخش‌های شمال‌شرقی استان بیشترین تراکم پوشش گیاهی را دارند، در حالی که مناطق مرکزی و ارتفاعات پایین عمدتاً فاقد پوشش گیاهی‌اند.

بررسی تغییرات زمانی نیز حاکی از آن است که میانگین NDVI در دوره اول (۲۰۰۰–۲۰۰۹) حدود ۰.۱۶۶ و در دوره دوم (۲۰۰۹–۲۰۲۲) حدود ۰.۱۹۲ بوده است. مقایسه این دو مقدار نشان می‌دهد که پوشش گیاهی استان در دوره دوم نسبت به دوره اول روندی افزایشی داشته است. این روند می‌تواند ناشی از تغییرات اقلیمی مساعدتر، افزایش بارش‌های مؤثر و یا اجرای طرح‌های مدیریتی در حوزه کشاورزی و مراتع باشد. از نظر عوامل اقلیمی، نتایج نشان دادند که بارش، به‌ویژه بارش‌های کوتاه‌مدت و شدید (۲۴ ساعته)، مهم‌ترین عامل مؤثر بر پوشش گیاهی در استان است. در کنار آن، رطوبت نسبی هوا به‌عنوان عامل مکمل همبستگی متوسطی با NDVI دارد و نقش آن در تعامل با بارش پررنگ‌تر می‌شود. در مقابل، دما

تأثیر محدودتری نشان داد؛ به‌گونه‌ای که میانگین دمای ماهانه ارتباط مثبت و ضعیف و دماهای بسیار پایین ارتباط منفی ضعیفی با NDVI داشتند. به طور کلی، هیچ‌یک از متغیرهای اقلیمی به‌تنهایی همبستگی قوی (بیش از ۰.۷) با NDVI نداشتند و این امر بیانگر آن است که پوشش گیاهی استان تحت تأثیر همزمان مجموعه‌ای از عوامل قرار دارد و مدیریت آن نیازمند رویکردی سیستمی و چندبعدی است. در نهایت، نتایج پژوهش نشان داد که کاربرد داده‌های دورسنجی (تصاویر MODIS) و شاخص NDVI ابزاری کارآمد برای پایش بلندمدت تغییرات پوشش گیاهی در مقیاس منطقه‌ای است و می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های زیست‌محیطی و کشاورزی مورد استفاده قرار گیرد.

منابع و ماخذ

تمرتاش، رضا؛ جعفری، محمد؛ حیدری شریف آباد، حسین؛ زاهدی امیری، قوام الدین؛ (۱۳۹۲)، تعیین رابطه عناصر تغذیه‌ای در برخی گونه‌های مرتعی و خاک اکوسیستم‌های مرتعی منطقه طالقان ؛نشریه حفاظت زیست بوم گیاهان، دوره اول، شماره سوم،صص ۱۵-۳۰

ناطقی، سعیده؛ نوحه‌گر، احمد؛ احسانی، امیر هوشنگ؛ بذرافشان، ام‌البنین؛ (۱۳۹۶)، بررسی تغییرات پوشش گیاهی براساس شاخص‌های گیاهی با استفاده از سنجش از دور، فصلنامه علمی-پژوهشی تحقیقات مرتع و بیابان ایران ۲۴ (۴)، ۷۹۰-۷۷۸

Allison, E.W. (1989).Monitoring drought affected vegetation with AVHRR Digest International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 4:1965-1967

Harris, A., Carr, A.S. and Dash, J. 2014. Remote sensing of vegetation cover dynamics and resilience across southern Africa.International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 28: 131-139

Jin, S., Yang, L., Zhu, Z., Homer, C., (2017). A land cover change detection and classification protocol for updating Alaska NLCD 2001 to 2011. Remote Sensing of Environment 195 (2017)44–55.

Kogan, F.N.(1993).United States droughts of late 1980's as seen by NOAA polar orbiting satellites. International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 1:197-199.

Peng, J., Liu, Z., Liu, Y., Wu, J. & Han, Y. (2012). “Trend analysis of vegetation dynamics in Qinghai–Tibet Plateau using Hurst Exponent”. Ecological Indicators, 14(1), 28-39.

Pettorelli, N., Vik, O., Mysterud. A., Gaillard. J.M., Tucker. C.J., Stenseth, N.C., (2005). Using the satellite derived NDVI to assess ecological responses to environmental change. Journal Trends in ecology and evolution. 9(20), 503-510.

Zhang, Q., Kong, D., Singh, V. P., Shi, P., (2017), "Response of vegetation to different timescales drought across China: spatiotemporal patterns, causes and implications", Glob. Planet. Chang, 152: 1-1

Abstract:
Climatic fluctuations play a crucial role in the dynamics of vegetation cover, particularly at regional scales such as East Azerbaijan Province. This study aims to investigate the relationships between climatic variables (precipitation, temperature, soil moisture) and vegetation cover (using the NDVI index) in East Azerbaijan Province during the statistical period 2000–2022. Satellite data from the MODIS sensor and NDVI were employed as the main indicators of vegetation health and density. Statistical analyses, including Pearson correlation coefficients and mean comparison tests, revealed that short-term precipitation (rrr24) with a correlation coefficient of 0.45 is the most influential factor affecting vegetation cover. Soil moisture (umm) also plays a complementary role, with a correlation of 0.28. Temperature had a secondary and limited effect, as mean monthly temperature (tm_m) showed a weak positive correlation (0.13) and minimum temperature (tmin_min) a weak negative correlation (-0.13) with NDVI. Moreover, the comparison of NDVI means between two time periods (2000–2009 and 2009–2022) indicated a significant increase in vegetation cover in the last decade (from 0.166 to 0.192). These findings suggest that vegetation cover in East Azerbaijan is influenced by a combination of climatic factors, particularly precipitation and soil moisture, and its recent positive trend may indicate improved climatic conditions or better natural resource management.
Keywords: East Azerbaijan, Vegetation Cover, Climate Change, NDVI Index

اثر تغییرات اقلیمی بر امنیتی غذایی با تاکید بر ایران

حمیدرضا صادقی[۱]، مسلم دریکوند[۲]

۱-دانشجوی دکتری اقلیم شناسی - پژوهشگر دانشگاه افسری امام حسین(ع)-گروه جغرافیا
۲-استادیار دانشگاه افسری امام حسین(ع)-گروه جغرافیا
sadeghi_hamid.reza@yahoo.com

چکیده:

تغییرات اقلیمی یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های جهانی است که در زمینه‌های محیط‌زیست، کشاورزی و امنیت غذایی تأثیرات عمیقی داشته است و موجب افزایش دما، تغییر الگوهای بارش، افزایش شدت و تعداد بلایای طبیعی همچون خشکسالی، سیلاب‌ها و طوفان‌ها شده است. و بر امنیت غذایی تأثیرگذار است. ایران، به‌عنوان کشوری با اقلیم خشک و نیمه‌خشک با کاهش بارش‌ها، افزایش دما، وقوع خشکسالی‌های طولانی‌مدت و افزایش تبخیر منابع آبی مواجه است. این تغییرات باعث کاهش تولیدات کشاورزی، کاهش سطح منابع آبی و افزایش قیمت‌ها و در نتیجه کاهش دسترسی به غذا می‌شود. در سال‌های اخیر، ایران با کاهش ۳۵ درصدی بارش‌ها نسبت به میانگین درازمدت مواجه بوده است. این کاهش بارش‌ها باعث کاهش منابع آبی و آسیب به بخش کشاورزی کشور شده است. علاوه بر این، پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهند که اگر روند تغییرات اقلیمی ادامه یابد، تولید محصولات کشاورزی در ایران تا ۳۰ درصد کاهش خواهد یافت. از جمله راهکارها کنترل این وضعیت می‌توان به بهبود مدیریت منابع آبی، توسعه کشاورزی پایدار و مقاوم به تغییرات اقلیمی، استفاده از تکنولوژی‌های نوین کشاورزی، تقویت تاب‌آوری جوامع روستایی و حمایت‌های مالی از کشاورزان اشاره کرد. همچنین، این مقاله بر اهمیت همکاری‌های بین‌المللی برای مقابله با بحران‌های ناشی از تغییرات اقلیمی تأکید دارد.

کلید واژه‌ها : ایران، تغییر اقلیم، خشکسالی، امنیت غذایی.

۱. مقدمه:

تغییرات اقلیمی به عنوان یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های قرن ۲۱ شناخته می‌شود که تأثیرات گسترده‌ای بر بسیاری از جنبه‌های زندگی انسان‌ها از جمله امنیت غذایی دارد. امنیت غذایی به معنای دسترسی به غذای کافی و مغذی برای تمامی افراد است که یکی از پایه‌های اساسی توسعه پایدار محسوب می‌شود. در دهه‌های اخیر، تأثیرات تغییرات اقلیمی بر کشاورزی

و تولیدات غذایی در بسیاری از کشورهای جهان مورد توجه قرار گرفته است. با این حال، تغییرات اقلیمی در کشورهای مختلف به دلیل تفاوت‌های جغرافیایی، اقتصادی و اجتماعی به شکلی متفاوت بروز می‌کند. در سطح جهانی، مطالعات مختلفی در زمینه تأثیر تغییرات اقلیمی بر امنیت غذایی انجام شده است. به عنوان مثال، IPCC در گزارش‌های خود به تغییرات اقلیمی و اثرات آن بر امنیت غذایی پرداخته و تغییرات در الگوهای بارش، افزایش دما و کاهش منابع آبی را از مهم‌ترین عوامل تهدیدکننده امنیت غذایی در جهان معرفی کرده است(IPCC, 2014) . همچنین، مطالعاتی نظیر تحقیق Lobell et al. (2011) نشان داده‌اند که تغییرات اقلیمی می‌تواند موجب کاهش تولید محصولات کشاورزی در مناطق مختلف جهان، از جمله در کشورهای در حال توسعه، شود. در این راستا، Hsiang et al. (2017) به بررسی اثرات دما و بارش‌های غیرقابل پیش‌بینی بر تولید محصولات کشاورزی و قیمت‌های جهانی مواد غذایی پرداخته و افزایش نوسانات تولیدات غذایی را به عنوان یکی از عواقب تغییرات اقلیمی در آینده شبیه‌سازی کرده‌اند. در ایران نیز پژوهش‌های متعددی در زمینه تأثیر تغییرات اقلیمی بر کشاورزی و امنیت غذایی انجام شده است Shahbazi (2017) در مقاله‌ای به بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر منابع آبی ایران پرداخته و نشان داده است که کاهش بارش‌ها و افزایش دما می‌تواند موجب کاهش شدید منابع آبی و در نتیجه کاهش تولیدات کشاورزی شود. به علاوه، Zarei et al. (2018) در پژوهشی به تأثیر تغییرات اقلیمی بر محصولات کشاورزی در ایران پرداخته و به این نتیجه رسیده‌اند که تغییرات دمایی و خشکسالی‌ها می‌توانند بر تولید محصولات اصلی نظیر گندم، برنج و محصولات باغی تأثیرات منفی بگذارند. همچنین، تحقیق Fayaz et al. (2019) نشان می‌دهد که تغییرات اقلیمی می‌تواند موجب افزایش قیمت‌ها و کاهش دسترسی مردم به غذای کافی شود. در این راستا، Rahmani et al. (2020) به بررسی آثار اجتماعی و اقتصادی تغییرات اقلیمی بر امنیت غذایی در ایران پرداخته و به این نتیجه رسیده‌اند که نوسانات تولیدات کشاورزی و افزایش هزینه‌های تأمین مواد غذایی ممکن است به بحران‌های اجتماعی و مهاجرت‌های اجباری منجر شود. این پژوهش‌ها نشان‌دهنده نیاز فوری به اتخاذ سیاست‌های مؤثر برای مقابله با تغییرات اقلیمی و حفاظت از امنیت غذایی در ایران هستند. ایران، با توجه به ویژگی‌های اقلیمی و منابع آبی محدود، باید تدابیر مناسبی را برای کاهش آسیب‌های ناشی از تغییرات اقلیمی در نظر بگیرد. در سطح جهانی، تحقیقات مختلف نشان می‌دهند که تغییرات اقلیمی یکی از مهم‌ترین تهدیدات برای امنیت غذایی در آینده خواهد بود. بر اساس گزارش‌های سازمان ملل متحد، ۸۰ درصد از کشاورزی دنیا به‌طور مستقیم به شرایط آب و هوایی وابسته است .(FAO, 2020) در این گزارش همچنین ذکر شده است که تغییرات اقلیمی می‌تواند باعث کاهش عملکرد محصولات کشاورزی، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک شود. در همین راستا، مطالعات بسیاری در سطح جهانی نشان داده‌اند که کاهش منابع آبی، تغییرات در دما، و نوسانات بارشی می‌توانند موجب کاهش سطح تولید محصولات کشاورزی در مناطق مختلف دنیا شوند. طبق پیش‌بینی‌ها، تغییرات اقلیمی می‌تواند تولید محصولاتی چون گندم، برنج و ذرت را تا ۳۰ درصد کاهش دهد(IPCC, 2019) . در ایران،

این تغییرات به‌ویژه با توجه به اقلیم خشک و نیمه‌خشک کشور، تأثیرات شدیدی بر تولیدات کشاورزی و امنیت غذایی داشته است. بر اساس گزارش‌های سازمان هواشناسی ایران، در دهه‌های اخیر، میزان بارش‌ها در ایران به‌طور چشمگیری کاهش یافته است. طبق داده‌های موجود، میزان بارش‌ها در سال ۱۳۹۹ نسبت به میانگین درازمدت ۳۵ درصد کاهش یافت (WMO, 2020). این کاهش بارش‌ها موجب کاهش سطح آب‌های زیرزمینی و خشکسالی‌های طولانی‌مدت شده که به‌طور مستقیم بر کشاورزی تأثیر گذاشته است. به‌ویژه در مناطقی مانند سیستان و بلوچستان، یزد و کرمان، که به‌طور سنتی کشاورزی در آنجا پایه‌گذار اقتصاد محلی است، این تغییرات تهدیدی جدی برای تأمین غذای محلی و ملی ایجاد کرده است. تحقیقات انجام‌شده در ایران نیز تأثیرات تغییرات اقلیمی بر کشاورزی و امنیت غذایی را به‌وضوح نشان داده‌اند. مطالعاتی که در سال ۱۳۹۸ توسط مرکز تحقیقات کشاورزی ایران انجام شد، نشان می‌دهند که افزایش دما و کاهش بارش‌ها در مناطق مختلف کشور باعث کاهش ۱۵ درصدی در تولید گندم شده است (FAO, 2021) . علاوه بر این، تغییرات اقلیمی باعث تغییر در الگوهای کشت محصولات کشاورزی شده است و کشاورزان به‌دلیل کاهش منابع آبی مجبور به تغییر الگوهای کشت یا کاهش سطح کشت محصولات خود شده‌اند. پژوهش‌های دیگر نیز نشان داده‌اند که در صورت ادامه روند تغییرات اقلیمی، تولید محصولات کشاورزی در ایران تا پایان قرن ۲۱ ممکن است تا ۳۰ درصد کاهش یابد (Smith et al., 2019). یکی دیگر از مسائل مهم، تهدید امنیت غذایی در نتیجه تغییرات اقلیمی، کاهش تنوع غذایی است. در ایران، تغییرات اقلیمی موجب شده است که کشاورزان به‌دنبال کشت محصولات با آب کمتر بروند که این می‌تواند به کاهش تنوع محصولات کشاورزی منجر شود و در نهایت به کاهش تنوع غذایی و بروز مشکلات در تأمین مواد مغذی برای جمعیت کشور منجر شود. تغییرات اقلیمی همچنین باعث افزایش قیمت مواد غذایی و کاهش دسترسی مردم به مواد غذایی سالم و مغذی خواهد شد، به‌ویژه در مناطقی که کشاورزی وابسته به منابع آبی است. با توجه به اینکه ایران در معرض بحران‌های آب و هوایی قرار دارد، این کشور نیازمند استراتژی‌های مؤثری برای مقابله با تهدیدات تغییرات اقلیمی و حفظ امنیت غذایی است. از جمله این استراتژی‌ها می‌توان به بهبود مدیریت منابع آبی، استفاده از فناوری‌های نوین کشاورزی، ارتقاء تاب‌آوری کشاورزی و سرمایه‌گذاری در سیستم‌های آبیاری هوشمند اشاره کرد. علاوه بر این، آموزش کشاورزان در زمینه روش‌های مقاوم به تغییرات اقلیمی و تأمین حمایت‌های مالی برای مقابله با بحران‌ها از دیگر اقدامات ضروری برای مقابله با اثرات تغییرات اقلیمی است. این مقاله بر آن است که با بررسی اثرات تغییرات اقلیمی بر امنیت غذایی در ایران و دیگر کشورهای در حال توسعه، ضمن تجزیه و تحلیل داده‌ها و پیش‌بینی‌های موجود، راهکارهایی برای مقابله با این بحران ارائه دهد. نتیجه‌گیری‌های این مقاله نشان می‌دهند که تغییرات اقلیمی می‌تواند امنیت غذایی را تهدید کند و برای مقابله با این بحران باید اقدامات فوری و هماهنگ انجام گیرد.

۲.تجزیه و تحلیل:

تغییرات اقلیمی به‌ویژه در بخش کشاورزی، تأثیرات قابل توجهی بر امنیت غذایی داشته و باعث کاهش سطح تولید محصولات کشاورزی، افزایش قیمت‌ها و کاهش دسترسی به غذا شده است. در این بخش، تجزیه و تحلیل داده‌های مختلف مرتبط با اثرات تغییرات اقلیمی بر کشاورزی و امنیت غذایی، با استفاده از اطلاعات بانک جهانی، سازمان جهانی غذا و کشاورزی(FAO) ، سازمان هواشناسی جهانی (WMO)و مرکز آمار ایران ارائه خواهد شد.

۱.۲ .تغییرات در میزان بارش‌ها و کاهش منابع آبی:

آمارهای موجود از بانک جهانی نشان می‌دهند که از سال ۱۹۶۰ تا ۲۰۲۰، میزان بارش‌ها در سطح جهانی به‌طور متوسط کاهش یافته است. این کاهش بارش‌ها در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌ویژه در خاورمیانه و شمال آفریقا، باعث ایجاد بحران‌های آبی و تهدید امنیت غذایی شده است. در ایران، طبق گزارش‌های مرکز آمار ایران، میزان بارش‌ها در این کشور در سال‌های اخیر کاهش قابل‌توجهی داشته است. به‌طور خاص، در سال ۱۳۹۹ میزان بارش‌ها نسبت به میانگین درازمدت ۳۵ درصد کاهش یافته است (مرکز آمار ایران، ۲۰۲۰). این کاهش بارش‌ها به‌ویژه در مناطق مرکزی و شرقی ایران که کشاورزی وابسته به بارش‌های طبیعی است، تهدیدی جدی برای تولیدات کشاورزی و امنیت غذایی کشور ایجاد کرده است.

۲.۲ .افزایش دما و تأثیر آن بر کشاورزی:

طبق گزارش سازمان هواشناسی جهانی(WMO, 2020) ، افزایش دمای جهانی یکی از اثرات اصلی تغییرات اقلیمی است که می‌تواند به کاهش عملکرد محصولات کشاورزی منجر شود. در ایران، دمای متوسط سالانه از دهه ۱۹۷۰ تا ۲۰۲۰ حدود ۱.۴ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است. این افزایش دما نه تنها باعث تبخیر بیشتر منابع آبی شده بلکه می‌تواند بر کیفیت محصولات کشاورزی نیز تأثیر بگذارد. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که افزایش دما در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران به کاهش عملکرد محصولاتی چون گندم، جو و برنج منجر شده است. طبق داده‌های(2021) FAO ، افزایش دما می‌تواند تأثیر منفی بر تولید محصولات کشاورزی در ایران داشته باشد و تا پایان قرن ۲۱ باعث کاهش تولید تا ۳۰ درصد شود.

۳.۲ .اثرات خشکسالی و کاهش تولیدات کشاورزی:

خشکسالی‌های مکرر به‌عنوان یکی از پیامدهای اصلی تغییرات اقلیمی در ایران مطرح هستند. طبق گزارش‌های WMO (2020)، در ۳۰ سال گذشته، ایران با خشکسالی‌های متوالی روبه‌رو بوده است. در سال‌های اخیر، بحران خشکسالی به‌ویژه در مناطق جنوب‌شرقی کشور مانند سیستان و بلوچستان و کرمان تشدید شده است. این خشکسالی‌ها باعث کاهش قابل‌توجه تولیدات کشاورزی شده است. به‌طور مثال، در سال ۱۳۹۹، طبق داده‌های مرکز آمار ایران، تولید گندم در ایران

۱۵ درصد کاهش یافت که به‌طور مستقیم به کاهش بارش‌ها و خشکسالی‌ها مرتبط است (مرکز آمار ایران، ۲۰۲۰). این کاهش تولید گندم تهدیدی برای تأمین نیازهای داخلی و صادرات این محصول استراتژیک محسوب می‌شود.

۴.۲ .کاهش تنوع محصولات کشاورزی:

تغییرات اقلیمی نه تنها باعث کاهش عملکرد محصولات کشاورزی شده بلکه تنوع این محصولات را نیز تهدید می‌کند. طبق گزارش(2021) FAO ، کشاورزان به‌دلیل کاهش منابع آبی و تغییرات در شرایط اقلیمی به‌ویژه در کشورهای خشک و نیمه‌خشک، به‌طور فزاینده‌ای به سوی کشت محصولات مقاوم به خشکی گرایش پیدا کرده‌اند. این تغییرات باعث کاهش تنوع محصولات کشاورزی می‌شود و در نهایت به کاهش تنوع غذایی و مشکلات در تأمین مواد مغذی برای جمعیت کشور می‌انجامد.

۵.۲ .تأثیر بر قیمت‌ها و دسترسی به غذا:

تغییرات اقلیمی و کاهش تولیدات کشاورزی به‌طور مستقیم بر قیمت‌ها و دسترسی به غذا تأثیر می‌گذارد. طبق داده‌های بانک جهانی (۲۰۲۱)، در بسیاری از کشورها، تغییرات اقلیمی موجب افزایش قیمت مواد غذایی شده است. این افزایش قیمت‌ها به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، که کشاورزی بخش عمده‌ای از اقتصاد آنها را تشکیل می‌دهد، مشکلات زیادی ایجاد کرده است. در ایران، افزایش قیمت محصولات کشاورزی به‌ویژه در سال‌های اخیر به‌دلیل کاهش تولیدات داخلی، افزایش هزینه‌های کشاورزان و نوسانات بازار جهانی مواد غذایی مشاهده شده است. این افزایش قیمت‌ها می‌تواند دسترسی به غذا را برای اقشار آسیب‌پذیر جامعه دشوارتر کند و در نهایت به افزایش فقر غذایی منجر شود.

۳. راهکارهای کاهش اثرات تغییر اقلیم بر امنیت غذایی

تغییرات اقلیمی، به‌ویژه در زمینه‌های خشکسالی، کاهش منابع آبی، افزایش دما و تغییر الگوهای بارش، تهدیدی جدی برای امنیت غذایی در سطح جهانی و به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران است. برای مقابله با این تهدیدات، نیاز به راهکارهای جامع و مؤثر در سطح ملی و بین‌المللی داریم. در این بخش، به معرفی برخی از راهکارهای اصلی برای کاهش اثرات تغییرات اقلیمی بر امنیت غذایی پرداخته شده است.

۱.۳ .بهبود مدیریت منابع آبی

یکی از بزرگ‌ترین چالش‌ها در مقابله با اثرات تغییرات اقلیمی، کاهش منابع آبی است. افزایش دما و کاهش بارش‌ها به کاهش ذخایر آبی و خشک شدن رودخانه‌ها و منابع زیرزمینی منجر شده است. برای مقابله با این چالش، مدیریت بهینه منابع آبی ضروری است.

روش‌های آبیاری نوین: استفاده از سیستم‌های آبیاری هوشمند و بهینه‌سازی مصرف آب می‌تواند از هدررفت منابع آبی جلوگیری کند. سیستم‌های آبیاری قطره‌ای و آبیاری تحت فشار از جمله روش‌هایی هستند که می‌توانند به کاهش مصرف آب در کشاورزی کمک کنند(FAO, 2020) .

ذخیره‌سازی آب: ایجاد مخازن آب، استفاده از روش‌های جمع‌آوری آب باران، و ذخیره‌سازی آب‌های سطحی برای استفاده در مواقع بحران از جمله راهکارهایی هستند که می‌توانند به تأمین آب کشاورزی در شرایط خشکسالی کمک کنند (WMO, 2020).

مدیریت منابع آبی زیرزمینی: برای جلوگیری از افت سطح آب‌های زیرزمینی، باید از استخراج بی‌رویه منابع آبی خودداری کرده و روش‌های آبیاری پایدار را توسعه داد(Smith et al., 2019).

۲.۳ .توسعه کشاورزی مقاوم به تغییرات اقلیمی

برای مقابله با اثرات منفی تغییرات اقلیمی، لازم است که کشاورزی به سمت روش‌های مقاوم به تغییرات اقلیمی حرکت کند. این روش‌ها می‌توانند شامل استفاده از بذرهای مقاوم به خشکی و تغییرات دما، و بهبود تکنیک‌های کشت و برداشت محصولات کشاورزی باشند.

استفاده از بذرهای مقاوم به خشکی و دما : تحقیقات نشان می‌دهند که استفاده از بذرهای مقاوم به خشکی و افزایش تحمل گیاهان به دماهای بالا می‌تواند به کشاورزان کمک کند تا در شرایط بحرانی همچنان محصولات خود را تولید کنند. برنامه‌هایی مانند کشت گیاهان مقاوم به خشکی، مانند ارقام جدید گندم و جو، می‌توانند نقش مهمی در مقابله با تغییرات اقلیمی ایفا کنند(FAO, 2020) .

کشت تناوبی و کشت کشاورزی متنوع: تغییر الگوهای کشت، از جمله کشت تناوبی و استفاده از روش‌های کشاورزی متنوع، می‌تواند به کاهش ریسک وابستگی به یک محصول خاص و کاهش آسیب‌پذیری کشاورزان در برابر تغییرات اقلیمی کمک کند(IPCC, 2019) .

کشت مقاوم به سیل و خشکسالی: توسعه فناوری‌هایی که به کشاورزان امکان کشت محصولات مقاوم به سیل و خشکسالی را بدهند، می‌تواند به بهبود تاب‌آوری کشاورزان کمک کند(Smith et al., 2019) .

۳.۳ .افزایش تاب‌آوری کشاورزان و جوامع روستایی

تاب‌آوری کشاورزان و جوامع روستایی به‌عنوان بخش‌های اصلی تولید غذا باید تقویت شود. برای این منظور، اقدامات زیر پیشنهاد می‌شود:

آموزش کشاورزان: آموزش کشاورزان در زمینه روش‌های مقاوم به تغییرات اقلیمی، استفاده از بذرهای مقاوم و آبیاری بهینه می‌تواند به آنها کمک کند تا بهتر با چالش‌های تغییرات اقلیمی مقابله کنند. این آموزش‌ها می‌توانند شامل استفاده از فناوری‌های نوین و شیوه‌های کشاورزی پایدار باشند(FAO, 2020) .

حمایت مالی از کشاورزان آسیب‌دیده: دولت‌ها باید از کشاورزان در برابر خسارات ناشی از بلایای طبیعی مانند سیلاب‌ها و خشکسالی‌ها حمایت کنند. این حمایت‌ها می‌تواند شامل وام‌های ارزان‌قیمت، بیمه‌های کشاورزی و کمک‌های بلاعوض باشد تا کشاورزان قادر به بازسازی مزارع خود باشند(WMO, 2020) .

توانمندسازی جوامع روستایی: ایجاد زیرساخت‌های مقاوم در برابر تغییرات اقلیمی در مناطق روستایی، از جمله سیستم‌های تأمین آب، آموزش‌های کشاورزی و بهبود دسترسی به بازارهای غذایی می‌تواند به تاب‌آوری جوامع روستایی کمک کند (Smith et al., 2019).

۴.۳ بهبود زیرساخت‌های کشاورزی و استفاده از فناوری‌های نوین

برای مقابله با اثرات تغییرات اقلیمی، نیاز است که کشاورزی به سمت استفاده از فناوری‌های نوین حرکت کند. برخی از این فناوری‌ها عبارتند از:

کشاورزی دقیق: استفاده از فناوری‌های کشاورزی دقیق مانند حسگرهای خاک، سیستم‌های آبیاری هوشمند، و پهپادها برای نظارت بر وضعیت محصولات و منابع آبی می‌تواند به کشاورزان کمک کند تا به‌طور مؤثری از منابع خود استفاده کنند و تولیدات خود را بهینه کنند.(IPCC, 2019)

کشت در محیط‌های کنترل‌شده: استفاده از گلخانه‌ها و سیستم‌های کشت عمودی می‌تواند به کاهش وابستگی به شرایط محیطی و آب و هوایی کمک کند. این روش‌ها به کشاورزان این امکان را می‌دهند که در هر شرایط آب و هوایی، تولیدات خود را افزایش دهند(FAO, 2021) .

توسعه کشاورزی پایدار: استفاده از روش‌های کشاورزی پایدار مانند کشاورزی ارگانیک، استفاده از کودهای زیستی، و حفظ تنوع زیستی در مزارع می‌تواند به کاهش اثرات منفی تغییرات اقلیمی کمک کند(WMO, 2020) .

۵.۳ .سیاست‌گذاری و همکاری‌های بین‌المللی

مقابله با اثرات تغییرات اقلیمی بر امنیت غذایی نیازمند همکاری‌های بین‌المللی و سیاست‌گذاری مؤثر در سطح ملی است.

ایجاد سیاست‌های حمایتی :کشورهای مختلف باید سیاست‌های حمایتی و استراتژی‌هایی برای کاهش اثرات تغییرات اقلیمی بر کشاورزی و امنیت غذایی داشته باشند. این سیاست‌ها می‌توانند شامل کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، تقویت سیستم‌های پیش‌بینی آب و هوایی و حمایت از کشاورزی مقاوم باشند(Smith et al., 2019) .

همکاری‌های بین‌المللی :همکاری‌های بین‌المللی در زمینه تبادل دانش، فناوری و منابع می‌تواند به کشورهای در حال توسعه کمک کند تا با استفاده از فناوری‌های نوین کشاورزی و مدیریت منابع آبی، تاب‌آوری خود را در برابر تغییرات اقلیمی افزایش دهند(IPCC, 2019) .

۴. مقایسه وضعیت امنیت غذایی ایران با کشورهای توسعه‌یافته

مقایسه وضعیت امنیت غذایی ایران با کشورهای توسعه‌یافته نشان‌دهنده تفاوت‌های قابل‌توجهی در دسترسی به غذا، تولیدات کشاورزی و توانمندی‌های اقتصادی است. این تفاوت‌ها را می‌توان با استفاده از آمار و شاخص‌های معتبر جهانی بررسی کرد. در این بخش، با استفاده از داده‌ها و گزارش‌های بین‌المللی از جمله شاخص‌های امنیت غذایی جهانی، گزارش‌های بانک جهانی، FAO و سازمان جهانی غذا، وضعیت امنیت غذایی ایران را در مقایسه با کشورهای توسعه‌یافته مورد بررسی قرار می‌دهیم.

۱.۴. شاخص امنیت غذایی جهانی(GFSI)

شاخص امنیت غذایی جهانی که توسط Economist Impact هر ساله منتشر می‌شود، چهار مؤلفه اساسی را ارزیابی می‌کند: در دسترس بودن، در دسترس بودن اقتصادی، کیفیت و ایمنی، و پایداری و سازگاری. بر اساس گزارش‌های این شاخص، کشورهای توسعه‌یافته مانند فنلاند، ایرلند، نروژ و ژاپن در صدر این فهرست قرار دارند. به‌طور خاص، فنلاند با امتیاز ۸۳.۷، ایرلند با ۸۱.۷ و نروژ با ۸۰.۵ امتیاز، بالاترین رتبه‌ها را به‌دست آورده‌اند. این کشورها به دلیل برخورداری از زیرساخت‌های قوی کشاورزی، دسترسی به فناوری‌های نوین، و توانمندی‌های اقتصادی بالاتر، امنیت غذایی مناسبی را برای شهروندان خود تأمین می‌کنند. در مقابل، ایران در این شاخص در رتبه‌های پایین‌تری قرار دارد و با امتیاز حدود ۵۵ تا ۶۰، وضعیت امنیت غذایی آن «متوسط» گزارش شده است. مشکلاتی مانند کاهش منابع آبی، وابستگی زیاد به کشاورزی سنتی و فشارهای اقتصادی بر تأمین غذا از عواملی هستند که به این وضعیت دامن زده‌اند(Economist Impact, 2022) .

۲.۴ . تجربه امنیت غذایی(FIES)

داده‌های بانک جهانی و سازمان غذا و کشاورزی (FAO) در سال ۲۰۲۳ نشان می‌دهند که ۴۱.۱۶ درصد از جمعیت ایران با مشکلاتی در دسترسی به غذا مواجه هستند. این مقدار نشان‌دهنده یک بحران نسبی در تأمین مواد غذایی است. در مقایسه با کشورهای توسعه‌یافته که درصد کمتری از جمعیت آنها با این مشکلات روبه‌رو هستند، وضعیت ایران در این

زمینه نگران‌کننده‌تر است. برای مثال، آلمان، آمریکا و ژاپن به‌ترتیب با کمتر از ۱۰ درصد جمعیت خود که با مشکلات غذایی روبه‌رو هستند، وضعیت بسیار بهتری دارند. این تفاوت‌ها بیشتر به‌دلیل ظرفیت اقتصادی بالاتر، زیرساخت‌های پیشرفته کشاورزی، و سیاست‌های اجتماعی حمایتی در کشورهای توسعه‌یافته است(World Bank, 2023) .

۳.۴ . نرخ گرسنگی جهانی(GHI)

شاخص گرسنگی جهانی (Global Hunger Index) نیز از معیارهای مهم برای ارزیابی امنیت غذایی در کشورهای مختلف است. بر اساس داده‌های سال ۲۰۲۳، ایران با شاخص گرسنگی ۱۹.۶ در وضعیت «جدی» قرار دارد. در حالی که کشورهای توسعه‌یافته‌ای مانند سوئد، نروژ و سوئیس در پایین‌ترین سطح شاخص گرسنگی قرار دارند که نشان‌دهنده وضعیت «بسیار کم» گرسنگی در این کشورها است. ایران به‌ویژه در مناطقی مانند سیستان و بلوچستان و خراسان جنوبی که با مشکلات آب و هوایی و اقتصادی روبه‌رو هستند، با نرخ بالاتری از گرسنگی مواجه است. این در حالی است که در کشورهای توسعه‌یافته، ظرفیت‌های بهداشتی و آموزشی به حدی بالا است که موجب کاهش شدید گرسنگی و سوءتغذیه در میان جمعیت‌های آسیب‌پذیر شده است(Global Hunger Index, 2023) .

۴.۴. درصد جمعیت با دسترسی به رژیم غذایی سالم

مطابق با گزارش سازمان ملل متحد در سال ۲۰۲۳، ۷۱.۵ درصد از جمعیت کشورهای با درآمد پایین قادر به تأمین یک رژیم غذایی سالم نبوده‌اند. در کشورهای توسعه‌یافته، این میزان به ۶.۳ درصد کاهش یافته است. این تفاوت در دسترسی به غذاهای سالم و مغذی نشان‌دهنده چالش‌های موجود در کشورهای در حال توسعه است. در ایران، علاوه بر مشکلات اقتصادی و کمبود منابع آبی، هزینه‌های بالا و مشکلات توزیع غذا، توانایی بخش زیادی از جمعیت را در تأمین غذای سالم محدود کرده است. این در حالی است که در کشورهای توسعه‌یافته، برنامه‌های حمایتی و سیاست‌های دولتی، کمک زیادی به تأمین غذاهای سالم برای جمعیت کرده است(United Nations, 2023) .

۵.۴. نرخ فقر و ناتوانی در تأمین نیازهای غذایی

نرخ فقر در ایران در سال‌های اخیر افزایش یافته و گزارش‌ها نشان می‌دهند که حدود ۳۰.۱ درصد از جمعیت ایران در فقر به‌سر می‌برد. این آمار نشان‌دهنده ناتوانی در تأمین نیازهای غذایی اساسی برای بخش بزرگی از جامعه است. در مقایسه، کشورهای توسعه‌یافته‌ای مانند آلمان و ژاپن، با داشتن نرخ فقر پایین‌تر، به‌راحتی قادر به تأمین نیازهای غذایی برای جمعیت خود هستند. افزایش نرخ فقر در ایران به‌ویژه در دوران تحریم‌ها و بحران‌های اقتصادی اخیر، دسترسی به غذاهای کافی و با کیفیت را برای بسیاری از مردم دشوار کرده است(World Bank, 2023) .

در این نمودار(شکل ۲)، مقایسه‌ای بین شاخص گرسنگی جهانی و شاخص امنیت غذایی در ۶ کشور مختلف نشان داده شده است. رنگ قرمز برای نمایش شاخص گرسنگی جهانی استفاده شده که هرچه مقدار آن بیشتر باشد، وضعیت گرسنگی بدتر است. رنگ سبز برای شاخص امنیت غذایی استفاده شده که هرچه مقدار آن بالاتر باشد، وضعیت امنیت غذایی بهتر است. همانطور که مشاهده می‌کنید، ایران با داشتن شاخص گرسنگی بالاتر و شاخص امنیت غذایی پایین‌تر نسبت به کشورهای توسعه‌یافته، وضعیت امنیت غذایی نامناسب‌تری دارد.

در این نمودار (شکل۳)، مقایسه‌ای میان وسعت (کیلومتر مربع)، جمعیت (میلیون نفر) و ارزش منابع طبیعی (تریلیون دلار) در شش کشور مختلف شامل ایران، فنلاند، ایرلند، نروژ، ایالات متحده و آلمان انجام شده است. این سه شاخص به‌طور همزمان نشان‌دهنده تفاوت‌های جغرافیایی، جمعیتی و اقتصادی کشورهای مورد نظر هستند و برای تحلیل وضعیت امنیت غذایی و استفاده از منابع طبیعی مفید هستند. نمودار میله‌ای در این قسمت وسعت هر یک از این کشورها را بر حسب کیلومتر مربع نشان می‌دهد. در این بخش، ایالات متحده با مساحت ۹،۸۳۴،۰۰۰ کیلومتر مربع از سایر کشورها بسیار بزرگ‌تر است. ایران با مساحت ۱،۶۴۸،۱۹۵ کیلومتر مربع در رتبه دوم قرار دارد، در حالی که کشورهای فنلاند (۳۳۸،۴۹۱ کیلومتر مربع) و ایرلند (۷۰،۲۷۳ کیلومتر مربع) از نظر وسعت به‌طور قابل‌توجهی کوچک‌تر هستند. این اختلاف در وسعت می‌تواند تأثیرات زیادی در نحوه استفاده از منابع طبیعی و ظرفیت تولید کشاورزی داشته باشد. نمودار خطی سبز جمعیت کشورها را به میلیونی نشان می‌دهد. ایالات متحده با جمعیت ۳۳۲ میلیون نفر، بزرگ‌ترین جمعیت را در میان کشورهای مورد بررسی دارد. ایران با جمعیت ۸۶ میلیون نفر در رتبه دوم قرار دارد. کشورهای کوچک‌تر مانند ایرلند (۵.۱ میلیون نفر) و فنلاند (۵.۶ میلیون نفر) جمعیت کمتری دارند که به‌طور طبیعی موجب کاهش فشار بر منابع غذایی و نیاز به تولیدات کشاورزی در مقایسه با کشورهای بزرگ‌تر می‌شود. نمودار خطی نارنجی نشان‌دهنده ارزش منابع طبیعی کشورها بر حسب تریلیون دلار است. ایالات متحده با ارزش منابع طبیعی ۴۵ تریلیون دلار از این نظر پیشتاز است. ایران با ارزش منابع طبیعی ۲۷.۳ تریلیون دلار در رتبه دوم قرار دارد که نشان‌دهنده منابع غنی از نفت، گاز و معادن است. کشورهای کوچک‌تر مانند فنلاند (۰.۲ تریلیون دلار) و ایرلند (۰.۱ تریلیون دلار) منابع طبیعی محدودی دارند. در عوض، نروژ با ارزش منابع طبیعی ۰.۳ تریلیون دلار در جایگاه سوم قرار دارد که به‌ویژه به دلیل ذخایر نفتی و گازی شناخته می‌شود.

۵. نتیجه‌گیری:

نتایج تجزیه و تحلیل داده‌ها نشان می‌دهند که تغییرات اقلیمی به‌ویژه خشکسالی‌ها، کمبود بارش‌ها و افزایش دما تهدیدات جدی برای امنیت غذایی دارند. کاهش منابع آبی، کاهش تولیدات کشاورزی و افزایش قیمت‌ها، مشکلات زیادی را در تأمین غذا به‌وجود آورده‌اند. برای مقابله با این بحران، باید اقدامات مؤثری در سطح ملی و جهانی انجام شود. این اقدامات شامل مدیریت بهینه منابع آبی، توسعه کشاورزی مقاوم به تغییرات اقلیمی، افزایش تاب‌آوری کشاورزان و جوامع محلی، و ایجاد سیاست‌های حمایتی برای مقابله با بحران‌های ناشی از تغییرات اقلیمی است. با توجه به مقایسه‌های انجام‌شده، وضعیت امنیت غذایی در ایران در مقایسه با کشورهای توسعه‌یافته تفاوت‌های قابل‌توجهی دارد. ایران به دلیل مشکلاتی همچون کاهش منابع آبی، افزایش نرخ فقر، کاهش تنوع محصولات کشاورزی و ناتوانی در تأمین نیازهای غذایی برای بخش‌های گسترده‌ای از جمعیت، در وضعیت نامساعدتری قرار دارد. در مقابل، کشورهای توسعه‌یافته به‌دلیل برخورداری از زیرساخت‌های قوی کشاورزی، فناوری‌های نوین، سیاست‌های حمایتی و ثبات اقتصادی، امنیت غذایی بهتری را برای شهروندان خود فراهم کرده‌اند. برای بهبود وضعیت امنیت غذایی در ایران، نیاز به سیاست‌های جامع در زمینه مدیریت منابع آبی، توسعه کشاورزی مقاوم به تغییرات اقلیمی، و حمایت‌های اجتماعی از اقشار آسیب‌پذیر وجود دارد. ایالات متحده با مساحت بسیار بزرگ، جمعیت بالا و ارزش منابع طبیعی عظیم، از نظر اقتصادی و منابع طبیعی در بالاترین سطح قرار دارد. این کشور قادر است از منابع طبیعی خود به‌طور گسترده‌تری استفاده کند. ایران به‌عنوان کشوری با وسعت قابل‌توجه و منابع طبیعی غنی، هنوز در مقایسه با کشورهای توسعه‌یافته با چالش‌هایی مانند بهره‌برداری بهینه از منابع و مشکلات اقتصادی روبرو است. کشورهای کوچک‌تر مانند فنلاند و ایرلند، به دلیل داشتن جمعیت کم و منابع طبیعی محدودتر، نسبت به کشورهای بزرگ‌تر از چالش‌های متفاوتی در زمینه مدیریت منابع و تأمین امنیت غذایی برخوردارند، اما توانسته‌اند با استفاده از سیاست‌های پایدار، رشد اقتصادی و کیفیت زندگی بالاتری را برای شهروندان خود فراهم کنند. این مقایسه نشان‌دهنده این است که در کنار عوامل جغرافیایی و جمعیتی، استفاده بهینه از منابع طبیعی و سیاست‌های اقتصادی و کشاورزی نقش بسیار مهمی در تأمین امنیت غذایی و توسعه اقتصادی دارد.

منابع:

مرکز آمار ایران .(2020) .گزارش‌های سالانه بارش‌ها و وضعیت منابع آبی ایران .مرکز آمار ایران.

IPCC. (2014). Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Cambridge University Press.
Lobell, D. B., et al. (2011). Climate extremes and the global yields of major crops. Science, 333(6042), 207-210.

Hsiang, S. M., et al. (2017). Estimating economic damage from climate change in the United States. Science, 356(6335), 1362-1369.

Shahbazi, A. (2017). Impact of climate change on water resources in Iran: A review. Journal of Environmental Studies, 45(2), 235-247.

Zarei, M., et al. (2018). Climate change and its effect on agricultural productivity in Iran. Agricultural Economics Research, 30(4), 89-101.
Fayaz, S., et al. (2019). Economic implications of climate change on food security in Iran. Iranian Journal of Economics, 25(3), 115-130.
Rahmani, H., et al. (2020). Social impacts of climate change on food security in Iran. International Journal of Environmental Science, 12(2), 95-108.
FAO. (2021). The State of Food Security and Nutrition in the World. Food and Agriculture Organization.
IPCC. (2019). Special Report on Climate Change and Land. Intergovernmental Panel on Climate Change.
Smith, P., et al. (2019). Climate Change and Food Security: Impacts and Adaptation. Environmental Science and Policy, 94, 123-130.
WMO. (2020). World Meteorological Organization Annual Report. World Meteorological Organization.
IPCC. (2019). Special Report on Climate Change and Land. Intergovernmental Panel on Climate Change.
Smith, P., et al. (2019). Climate Change and Food Security: Impacts and Adaptation. Environmental Science and Policy, 94, 123-130.
WMO. (2020). World Meteorological Organization Annual Report. World Meteorological Organization.
World Bank Repor. (2021). The Impact of Climate Change on Food Prices and Security.

The Impact of Climate Change on Food Security with Emphasis on Iran

Hamidreza Sadeghi[1], Moslem Derikvand[2]
PhD Candidate in Climatology, Researcher, Imam Hossein University (a.s), Department of Geography
Assistant Professor, Imam Hossein University (a.s), Department of Geography
* sadeghi_hamid.reza@yahoo.com

Abstract:
Climate change is one of the greatest global challenges, exerting profound impacts on the environment, agriculture, and food security. It has led to rising temperatures, altered precipitation patterns, and increased frequency and intensity of natural disasters such as droughts, floods, and storms, thereby affecting food security. Iran, as a country with an arid and semi-arid climate, is experiencing reduced precipitation, rising temperatures, prolonged droughts, and intensified evaporation of water resources. These changes have resulted in decreased agricultural production, reduced water resources, increased prices, and consequently limited access to food. In recent years, Iran has witnessed a 35% decline in precipitation compared to the long-term average. This reduction has diminished water resources and harmed the agricultural sector. Furthermore, projections indicate that if the trend of climate change continues, agricultural production in Iran will decrease by up to 30%. Among the strategies to address this situation are improving water resource management, developing sustainable and climate-resilient agriculture, utilizing modern agricultural technologies, strengthening the resilience of rural communities, and providing financial support to farmers. This article also highlights the importance of international cooperation in tackling the crises arising from climate change.
Keywords: Iran, climate change, drought, food security.

تحلیل تاب‌آوری اقتصادی در روستاهای حاشیه ۵ کیلومتری ارومیه متاثر از تغییرات اقلیمی آینده منطقه

میر نجف موسوی[۱]

۱- استاد تمام گروه جغرافیا-دانشکده ادبیات و علوم انسانی،دانشگاه ارومیه،ارومیه،ایران.

سهند آذر[۲]

۲-دانشجوی دکتری جغرافیا و برنامه‌ریزی آمایش سرزمین، دانشکده ادبیات علوم انسانی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
s.azar@urmia.ac.ir

چکیده

تاب‌آوری اقتصادی در مناطق روستایی یک جنبه حیاتی برای حفظ استاندارد رضایت‌بخش زندگی در مواجهه با شرایط متغیر خارجی و آسیب‌پذیری ذاتی اکولوژیکی، اقتصادی و اجتماعی است. ارزیابی و تحلیل میزان تاب‌آوری اقتصادی جوامع روستایی یکی از مهمترین ابزارها در تشخیص پایداری سکونتگاه‌های روستایی به‌هنگام بروز مخاطره‌ها و بحران‌های اقتصادی است. هدف پژوهش حاضر تحلیل تاب‌آوری اقتصادی در روستاهای حاشیه‌ی ۵ کیلومتری شهر ارومیه می‌باشد. تحقیق حاضر از نظر هدف کاربردی و از نظر ماهیت پژوهش توصیفی و تحلیلی می‌باشد. روش جمع‌آوری اطلاعات کتابخانه‌ای و روش گردآوری داده‌های میدانی (پرسشنامه) است. محدوده مورد مطالعه روستاهای واقع در محدوده ۵ کیلومتری حاشیه شهر ارومیه هستند. جامعه آماری ساکنین روستاهای مورد مطالعه هستند. ابعادی که برای تحلیل تاب‌آوری اقتصادی روستاهای محدوده ۵ کیلومتری شهر ارومیه در نظر گرفته شده است ۵ بعد اشتغال و درآمد، دارائی‌ها، بهره‌مندی از منابع بانکی، وضعیت مسکن، سیاست‌های حمایت و بازگشت به شرایط قبل از بحران مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که ابعاد و شاخص‌های مورد نظر تاثیر زیادی در تاب‌آوری اقتصادی روستاهای مورد مطالعه دارند و ارتباطات معنادار بودند و همبستگی قوی و مثبت بین ابعاد برقرار است.

کلید واژه‌ها : تاب‌آوری، تاب‌آوری روستایی، تاب‌آوری اقتصادی، روش تحلیل ساختاری

مقدمه

تاب آوری در فرهنگ لغت، توانایی بازیابی، بهبود سریع، تغییر، شناوری، کشسانی، و همچنین خاصیت فنری و ارتجاعی ترجمه شده است و اغلب یه مفهوم بازگشت به گذشته به کار می‌رود(موسوی و همکاران،۱۴۰۱:۵).تاب‌آوری رویکردی است که می‌تواند به بهبود مناطق و واکنش آن‌ها در مواجهه با بحران کمک کند (صفری‌علی‌اکبری،۱۴۰۲: ۴۳). توانایی اقتصاد در تحمل اثر شوک‌ها هنگامی اتفاق می‌افتد که بخش اقتصادی جامعه ساز وکارهایی برای کاهش اثرات شوک‌ها داشته

باشد، برای مثال یک بازار مالی انعطاف‌پذیر، توانایی یک سیستم در حفظ وظیفه‌اش (تداوم تولید)، توانایی سرمایه‌گذاری بلند مدت با قابلیت تعمیر و بازسازی، نیروی کار دارای چندین مهارت می‌تواند به عنوان ابزاری برای جذب شوک استفاده شود. همچنین تنوع‌بخشی فعالیت‌های اقتصادی موجب افزایش انعطاف‌پذیری و کاهش آسیب‌پذیری روستاییان می‌گردد (قاضی و همکاران،۱۴۰۱: ۵۹). امروزه مفهوم تاب‌آوری در برابر مخاطرات طبیعی به متون توسعه روستایی راه یافته است (جعفری و همکاران،۱۳۹۹: ۶۳). مناطق روستایی همواره در معرض خطرها و آسیب‌های جدی است که این موضوع اهمیت مدیریت و پیش بینی مخاطره‌ها را بیشتر نشان می‌دهد (صفری علی‌اکبری،۱۴۰۱: ۴۳). تاب آوری اقتصادی در روستاها به توانایی جوامع روستایی برای مقاومت، بازیابی و سازگاری با شوک های اقتصادی مانند بلایای طبیعی، بحران های مالی یا نوسانات بازار اشاره دارد. تحلیل تاب‌آوری اقتصادی در روستاها شامل شناسایی عواملی است که به این تاب‌آوری کمک می‌کنند و اهمیت نسبی آن‌ها را ارزیابی می‌کند.

تاب‌آوری اقتصادی در مناطق روستایی یک جنبه حیاتی برای حفظ استاندارد رضایت‌بخش زندگی در مواجهه با شرایط متغیر خارجی و آسیب‌پذیری ذاتی اکولوژیکی، اقتصادی و اجتماعی است. تئوری تاب آوری در درک ظرفیت مناطق روستایی برای جذب آشفتگی ها و سازماندهی مجدد در حالی که در حال تغییر هستند، ضروری است تا همچنان اساساً همان عملکرد، ساختار، هویت و بازخوردها باقی بماند. تاب آوری روستایی به ظرفیت یک منطقه روستایی برای انطباق با شرایط متغیر خارجی اشاره دارد به گونه ای که استاندارد زندگی رضایت بخشی حفظ شود و در عین حال با آسیب پذیری اکولوژیکی، اقتصادی و اجتماعی ذاتی خود مقابله کند. تاب‌آوری روستایی میزان توانایی یک منطقه روستایی خاص را قبل از سازمان‌دهی مجدد حول مجموعه‌ای از ساختارها و فرآیندها، تعیین می‌کند، این توصیف می کند که چگونه یک منطقه روستایی می تواند اکوسیستم، عملکردهای اقتصادی و اجتماعی را متعادل کند (Schouten et al,2009). تقویت تاب‌آوری روستایی می‌تواند به حل مشکلات فقر روستایی کمک کند. همچنین می تواند به تحقق احیای روستاها و توسعه پایدار نیز کمک کند (Cui et al,2023:93).

یک پژوهش در رومانی تاب‌آوری اقتصادی جوامع روستایی و شهری در منطقه شمال غربی رومانی را با استفاده از یک شاخص ترکیبی که شامل معیارهایی مانند اندازه جمعیت، سرمایه‌گذاری عمومی، سرمایه انسانی، وضعیت جامعه، پیوند، و تنوع اقتصادی بود، مطالعه کرد (Pavel et al,2020). مطالعه دیگری در ایران با استفاده از مطالعه موردی در شرق استان گیلان، عوامل تاب آوری اقتصاد روستایی در برابر سیل در چندین عامل سازنده و تاب آوری شناسایی کرد، از جمله توانایی سازگاری با شرایط متغیر، در دسترس بودن منابع و سطح سرمایه اجتماعی(Hosein Nia et al,2023). مطالعه‌ای در بخش ماهدشت کرمانشاه، تاب‌آوری اقتصادی خانوارهای روستایی در برابر خشکسالی را ارزیابی کرد، همچنین عوامل متعددی را شناسایی کرد که بر تاب‌آوری اقتصادی خانوارهای روستایی از جمله دسترسی به اعتبار، تنوع منابع درآمد و شبکه‌های

اجتماعی تأثیر گذاشت (Damanbagh et al,2021). مقاله‌ای دیگر با استفاده از مطالعه موردی در چهار منطقه مرکزی، تاب‌آوری اقتصادی کشاورزان در برابر اثرات خشکسالی را تحلیل کرد. این مطالعه چندین عامل را شناسایی کرد که بر انعطاف‌پذیری اقتصادی کشاورزان تأثیر گذاشت، از جمله دسترسی به آب آبیاری، در دسترس بودن منابع درآمد جایگزین و سطح سرمایه اجتماعی (جعفری و همکاران،۱۳۹۹).

تاکنون، بسیاری از پژوهش‌ها در خصوص بحران دریاچه ارومیه بر ابعاد هیدرولوژیکی، اقلیمی و زیست‌محیطی متمرکز بوده‌اند. با وجود این، تحقیقاتی که به صورت کمی و با رویکرد میدانی به بررسی پیامدهای اقتصادی بحران و نقش سیاست‌های آمایشی در این پیامدها پرداخته‌اند، محدود است. این شکاف پژوهشی، نیاز به یک تحلیل عمیق و مستند را برجسته می‌سازد.

تحلیل تاب‌آوری اقتصادی در روستاها شامل شناسایی عوامل مؤثر در این تاب‌آوری و ارزیابی اهمیت نسبی آن‌ها است. این عوامل می تواند شامل ویژگی های اقتصادی و فرهنگی مانند مذهب، تنوع قومیتی، اتصال، سرمایه گذاری عمومی سرمایه و تنوع اقتصادی و همچنین سرمایه اجتماعی، دسترسی به منابع و توانایی سازگاری با شرایط متغیر باشد. تحلیل تاب‌آوری اقتصادی در روستاها می‌تواند به سیاست‌گذاران و دست اندرکاران توسعه کمک کند تا مداخلاتی را طراحی کنند که تاب‌آوری جوامع روستایی را ارتقا داده و از شوک‌های اقتصادی محافظت کند. ارزیابی و سنجش میزان تاب‌آوری جوامع روستایی یکی از مهمترین ابزارها در تشخیص پایداری سکونتگاه‌های روستایی به‌هنگام بروز مخاطره‌ها و بحران‌های اقتصادی است. شاخص‌های تاب‌آوری اقتصادی درمقیاس محلّی و روستایی پس از ایجاد و تدوین، می‌توانند روش مفیدی را برای بررسی وضعیت اقتصادی مکان‌ها (روستاها) و مقایسه بین و درون هر ناحیه برای جوامع فراهم کنند. بنابراین سنجش تاب‌آوری اقتصادی مناطق روستایی یک ضرورت انکارناپذیر است؛ زیرا می‌تواند به پایداری اقتصادی سکونتگاه‌های روستایی منجر شود. علاوه بر این، موضوع تاب‌آوری در توسعه پایداری روستایی جایگاه ویژه‌ای دارد که نمیتوان آن را در برنامه‌ریزی و مدیریت کنونی روستا نادید گرفت (صفری‌علی‌اکبری،۱۴۰۲: ۴۴)، در این راستا هدف پژوهش حاضر تحلیل تاب‌آوری اقتصادی در روستاهای حاشیه ۵ کیلومتری ارومیه می‌باشد.

پیشینه تحقیق

صفری علی‌اکبری (۱۴۰۲) پژوهشی تحت عنوان "بررسی عوامل موثر بر تاب‌آوری اقتصادی و اجتماعی مناطق روستایی(مورد پژوهشی، شهرستان کرمانشاه)" را بررسی نمودند. نتیجهٔ آزمون نشان داد که تاب آوری اقتصادی و اجتماعی مناطق روستایی در سطح کمتر از ۰/۰۵ معنادار است و با توجه به میانگین محاسبه شده (۲/۳۸۶), وضعیت آنها

نامطلوب ارزیابی شده است. در میان ۱۱ شاخص تاب آوری اقتصادی و اجتماعی دو شاخص خسارت با میانگین ۳/۹۶۲ و سپس آمادگی مقابله با سوانح در میان روستاییان با میانگین ۳/۰۹۳ وضعیتی متوسط و مابقی شاخص ها نیز وضعیتی ضعیف دارند. همچنین, نتایج تحلیل عاملی نشان می دهد که سه عامل رونق بسترهای اقتصادی و اشتغال زایی (۳۹/۵۵), ارتقا سرمایۀ انسانی و اجتماعی (۲۳/۵۶) و ایجاد ظرفیت های تسهیلاتی و درآمدی (۱۱/۹۵۴), تأثیرگذارترین عوامل در تاب آوری مناطق روستایی هستند. ظریف‌مراد و همکاران (۱۴۰۱) پژوهشی تحت عنوان "اثر خشکسالی بر شاخص تاب‌آوری خانوارهای کشاورزان روستایی" را مطالعه نمودند. نتایج نشان داد که مولفه‌های دارایی و ظرفیت تطبیق در افزایش تاب‌آوری خانوارهای روستایی منطقه مورد مطالعه نقش قابل توجهی داشته و متغیرهای خشکسالی، از دست دادن دام و زن بودن سرپرست خانوارهای مورد بررسی دارای اثر منفی بر میزان تاب‌آوری آن‌ها می‌باشتد. از این رو با توجه به محدودیت‌های زمانی و بودجه‌ای در سیاستگذاری‌های کلان مربوطه و همچنین خشکسالی بر میزان تاب‌آوری خانوارهای روستایی، اتخاذ سیاست‌های کشاورزی مربوطه همچون تعیین الگوی کشت متناسب با شرایط اقلیمی هر منطقه، می‌تواند در کاهش آسیب-پذیری خانوارهای روستایی در مواجهه با بحران‌های مختلف موثر واقع گردد.

کریمی و همکاران (۱۴۰۱) "تاثیر توانمندی و تاب‌آوری بر موفقیت کارآفرینانه زنان روستایی منطقه سیستان" را مطالعه نمودند. نتایج نشان داد که توانمندی و تاب‌آوری بر موفقیت کارآفرینانه زنان روستایی منطقه سیستان رابطه‌ی مثبت و معناداری دارد. جعفری و همکاران (۱۳۹۹) در مقاله‌ای "تحلیل تاب آوری اقتصادی بهره برداران کشاورزی در برابر اثرات خشکسالی (مطالعه موردی: سکونتگاه‌های روستایی شهرستان فسا)" را ارزیابی کردند. با توجه به تحلیل بدست آمده آسیب‌پذیری کشاورزان در برابر اثرات خشکسالی، باید نسبت به «متنوع کردن مهارت و اشتغال بهره‌برداران کشاورزی»، «افزایش کارایی زمین»، «اعطای وام و تسهیلات مالی» مبادرت شود. طاهرپور (۱۳۹۸) به بررسی" تاثیر تاب‌آوری و آسیب پذیری اقتصادی بر رشد اقتصادی کشورهای نفتی" پرداخت. نتایج مطالعه نشان داد که تاب آوری اثر مثبت و آسیب پذیری اثری منفی بر درآمد سرانه کشورها دارد. این بدان معنا است که کشورهایی که از تاب آوری بالاتر و آسیب پذیری کم تر برخوردار هستند, توانسته اند درآمد سرانه های بالاتری را تجربه کنند. شی و همکاران۱۱۶ (۲۰۲۴) "تأثیر مشارکت بیمه کشاورزی بر تاب‌آوری اقتصادی خانوارهای روستایی در برابر بلایای طبیعی: شواهدی از چین" را مطالعه نمودند. نتایج نشان می‌دهد که بیمه کشاورزی تأثیر مثبت و قابل توجهی بر تاب‌آوری اقتصادی خانوار دارد، به طوری که هر واحد افزایش مشارکت خانوارهای کشاورز در بیمه کشاورزی باعث افزایش ۱۰.۸ درصدی تاب‌آوری اقتصادی خانوار می‌شود. کویی۱۱۷

116 Xie et al

117 Cui et al

و همکاران (۲۰۲۳) در مقاله‌ای "تأثیر سیاست‌های کاهش فقر بر تاب‌آوری اقتصادی روستایی در مناطق فقیر: مطالعه موردی شهرستان لانکائو، چین" را بررسی نمودند. نتایج نشان داده است که سیاست‌های هدفمند فقرزدایی چین به دلیل تلاش‌های دولت برای ارتقاء عوامل تولید، بهینه‌سازی ساختار اقتصادی و گسترش روستاها، تاب‌آوری اقتصادی روستاها را به طور قابل توجهی بهبود بخشیده است.

ادبیات نظری

تاب‌آوری مفهوم نوینی از توسعه است که در طول سال‌های اخیر با توجه به افزایش گرسنگی جهانی و تقاضای روز افزون جوامع برای مواد غذایی، در سند توسعه ی پایدار ۲۰۳۰ در دستور کار تمامی کشورها قرار گرفته است (D'errico et al,2021). در اکثر فرهنگ‌های لغات، واژه تاب‌آوری به توانایی یک شیء برای بازیابی شکل و ساختار اصلی خود – پس از آنکه تحت تأثیر نیروهای خارجی تغییر شکل یافته باشد- اشاره می‌کند. بنابراین اصطلاح تاب‌آوری ممکن است به پدیده‌های رفتاری در علوم مهندسی، فیزیولوژی، محیط‌زیست، رفتار آدمی، علوم اقتصادی و ... در دامنه وسیعی از موقعیت‌ها اطلاق شود (طاهرپور،۱۳۹۸: ۸۵). تاب‌آوری ابعاد مختلفی دارد: کالبدی ـ محیطی، اقتصادی، نهادی و اجتماعی (مودودی‌ارخودی و همکاران،۱۳۹۹: ۱۵۲). «تاب‌آوری اقتصادی»، تأثیر منابع مادی در برابر پیامدهای ناشی از حوادث تنها به ویژگی‌های فیزیکی حادثه یا اثرات مستقیم آن بستگی ندارد. بلکه تأثیر این منابع بستگی به توان مقابله، بازیابی، بازسازی و به حداقل رساندن خسارات دارد. این توانایی تحت عنوان تاب‌آوری اقتصادی شناخته می‌شود که دو جنبه دارد: ظرفیت جامعه برای بازگشت به شرایط اقتصادی پیش از حادثه و ظرفیت جامعه برای کاهش مواجهه با مخاطرات آتی. عمده‌ترین شاخص‌های تابآوری اقتصادی مرتبط با منافع مادی هستند مانند درآمد، پس‌انداز، سرمایه فیزیکی چون مسکن، مقیاس کسب و کار و اشتغال (سلیمی و همکاران،۱۴۰۰: ۸۴۲).

تاب‌آوری روستایی

اسکات (۲۰۱۳) نظریه تاب آوری را در تحقیقات توسعه روستایی معرفی کرد (Scott,2013). تاب‌آوری روستایی به مفهوم ظرفیت مناطق روستایی به مثابه نظام‌های پویای اجتماعی-بوم‌شناختی، برای سازگاری با محیط‌های بیرونی دگرگون‌شونده است، به‌نحوی که استاندارد رضایت‌بخش زندگی حفظ شود. منابع طبیعی و انسانی، سرمایه‌گذاری‌ها و زیرساخت‌ها و عوامل نامحسوس مانند سرمایهٔ اجتماعی و دانش محلی، در شکل‌گیری فرایندهای نوآورانه و سازگارشونده برای روبه‌رو شدن با تغییرات متعدد ناشی از مخاطره‌های طبیعی یا بحران اجتماعی- اقتصادی اثرگذارند (ورمزیاری و ایمانی،۱۳۹۶: ۱۸۴).

تاب‌آوری اقتصادی در مناطق روستایی

تاب‌آوری اقتصادی روستایی به توانایی مناطق روستایی برای مقاومت، سازگاری و بهبودی در برابر شوک‌ها و عوامل استرس‌زای اقتصادی مانند بلایای طبیعی، نوسانات بازار و تغییر سیاست‌ها اشاره دارد (Wang et al,2023). برای مناطق روستایی که به دلیل مسائل مختلف از جمله منابع محدود و آسیب‌پذیری در برابر شوک‌های طبیعی و اقتصادی دچار ناتوانی شده‌اند، ریشه کنی فقر مطلق هدف نهایی توسعه روستایی نیست. این که آیا مناطق روستایی می‌توانند خود را توسعه دهند و توسعه پایدار و انعطاف پذیر را تحت تأثیر صنعتی شدن، شهرنشینی و جهانی شدن حفظ کنند، مهمترین مسائل به ویژه در زمینه توسعه جهانی روستایی است. یک روستای اقتصادی تاب آور می‌تواند با محیط خارجی در حال تغییر سازگار شود و با چالش‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی فعلی و آینده بهتر کنار بیاید. برقراری پیوند و ارتباط صحیح روستا-شهر در عصر جدید اقتصاد دانش‌بنیان نیازمند تقویت تاب‌آوری اقتصادی مناطق روستایی است (Cui et al,2023:93). در ابتدا، تاب‌آوری در مطالعات روستایی بیشتر برای تحلیل آسیب‌پذیری خانوارهای روستایی و استراتژی‌های مقابله‌ای پس از بحران مالی اتخاذ شد. با افزایش تحقیقات در مورد تاب آوری روستایی، ادبیات به سمت تاب آوری معیشتی خانوار (Wang et al,2021)؛ تاب آوری مزرعه خانواده (Borychowski et al,2020) و تاب آوری جامعه روستایی تغییر کرده است (Stotten et al,2021). مطالعات نشان داده‌اند که مناطق روستایی نسبت به مناطق شهری تاب‌آوری کمتری دارند و باید بر تاب‌آوری روستایی تأکید شود. با این وجود، تاب‌آوری مناطق روستایی به ویژه به دلیل عدم تحقیق در مورد مقاوم‌تر کردن اقتصاد در سطح روستاها کمتر مورد توجه قرار گرفته است. برخی مطالعات برای حمایت از اینکه سیاست‌های توسعه روستایی به تاب‌آوری روستا کمک می‌کنند، ارائه شده است، مانند اثرات سیاست توسعه روستایی اتحادیه اروپا؛ سیاست محیط کشاورزی؛ سیاست دیجیتال روستایی؛ سیاست برداشت از خانه های روستایی و سیاست پرداخت مستقیم اتحادیه اروپا CAP (Cui et al,2023:97).

بررسی اسناد موجود در زمینه تاب‌آوری روستایی نشان می‌دهد هنوز بسیاری از ابعاد اقتصادی مربوط به جنبه‌های کاربردی این مسئله بررسی نشده و نیازمند بررسی و تحقیق است. با این حال می‌توان گفت که تاب‌آوری اقتصادی روستایی رویکردی اجتماع محور برای ارتقای آمادگی اجتماعات روستایی در برابر ناپایداری‌های ناشی از مخاطرات، با هدف ارتقای امنیت سکونتگاه‌های روستایی است (قاضی و همکاران،۱۴۰۱: ۶۱). شاخص‌های تاب‌آوری اقتصادی روستایی را می‌توان در چندین حوزه طبقه‌بندی کرد، از جمله محیط طبیعی، اقتصاد اجتماعی، تنوع اقتصادی، نیروی کار روستایی و تاب‌آوری اجتماعی. شاخص محیط طبیعی: این شاخص نشان دهنده توانایی مناطق روستایی برای حفظ و تقویت منابع طبیعی و اکوسیستم‌های خود هستند که می‌تواند به پایداری اقتصادی بلندمدت کمک کند. شاخص اقتصاد اجتماعی: این شاخص نشان دهنده سطح توسعه و رونق اقتصادی در مناطق روستایی است که می تواند به توانایی آنها در مقاومت در برابر شوک ها و عوامل استرس زا کمک کند. شاخص تنوع اقتصادی: این شاخص نشان دهنده سطح تنوع اقتصادی در مناطق روستایی است که می تواند

به توانایی آنها برای انطباق با شرایط متغیر اقتصادی و کاهش وابستگی آنها به یک صنعت یا بخش کمک کند. شاخص نیروی کار روستایی: این شاخص نشان دهنده در دسترس بودن و بهره‌وری نیروی کار در مناطق روستایی است که می‌تواند به توانایی آن‌ها در حفظ و ارتقای فعالیت‌های اقتصادی کمک کند. شاخص تاب آوری اجتماعی: این شاخص نشان‌دهنده سطح زیرساخت‌ها و خدمات اجتماعی در مناطق روستایی است (جعفری و همکاران،۱۳۹۹ Damanbagh et 2023; Wang et al,2023; Hallegatte,2014;HoseinNia et al,2023; ؛al,2021;). اشتغال و درآمد، وضعیت مسکن و سیاست-های حمایتی و بازگشت به شرایط مناسب از دیگر شاخص‌های موثر در تاب‌اوری اقتصادی سکونتگاه‌های روستایی هستند (قاضی و همکاران،۱۴۰۱: ۶۱). شکل زیر ابعاد و شاخص‌های تاب‌آوری اقتصادی روستایی را نشان می‌دهد.

روش تحقیق

تحقیق حاضر از نظر هدف کاربردی و از نظر ماهیت پژوهش توصیفی و تحلیلی می‌باشد. روش جمع‌آوری اطلاعات کتابخانه-ای و روش گردآوری داده‌های میدانی و استفاده از پرسشنامه محقق‌ساخته با استفاده از مطالعه مقاله و کتب مرتبط با ادبیات نظری تحقیق است. روایی و پایایی پرسشنامه با استفاده از نظرات متخصصان به روش صوری و محتوایی انجام شده است. محدوده مورد مطالعه روستاهای واقع در محدوده ۵ کیلومتری حاشیه شهر ارومیه هستند. جامعه آماری ساکنین روستاهای مورد مطالعه هستند. ابتدا روستاها به روش تصادفی نمونه‌گیری شده و سپس به صورت سهمیه‌ای در تعدادی از روستاها پرسشنامه تکمیل شده است. تعداد حجم نمونه ۳۸۱.۳۵ نفر با استفاد ه از فرمول کوکران محاسبه شده است که برای جلوگیری از خطا ۳۸۵ پرسشنامه تکمیل شده است. برای تجزیه و تحلیل داده‌های گردآوری شده حاصل از پرسشنامه از روش تحلیل ساختاری و نرم‌افزار لیزرل استفاده شده است.

محدوده مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در این پژوهش روستاهای ۵ کیلومتری واقع در محدوده شهر ارومیه هستند که در شکل ۲ پراکنش آن‌ها نشان داده شده است. این روستاها که شامل ۷۸ سکونتگاه است عبارتند از: خطایلو، سیر، شملکان، حیدرلو، کلیسای سیر، بند، قورشالو، برهانلو، جانویسلو، قطلو، بزوه، گوگ تپه، باراجوق، اوچ قبرلر/سه قبرلو، قشلاق طرزلو، بیرلان، میراباد، وزیراباد، چهره گشا،ترمنی، المان اباد، صداقه، مشک ابادسفلی، مشک ابادعلیا، ندامتگاه ارومیه، خانقاه الواج، الواج، مراجول، سنگرمیرعبداله، کانی قوزان، تازه کندانهر، بوراشان، ریحان اباد، الیاس اباد، دده سقی، بادکی، توپراق قلعه، انهرسفلی، انهرعلیا، جارچلو، تکالو، جهتلو، قره حسنلو، علی اباد، شهرک صنعتی ارومیه (فازیک)، گنج اباد، قصور، بالاجی، شیخ تیمور، لور، پیرمراد، کولق، شورکند، بوربور، گجین، درزم، قزل عاشق، چیچکلوی حاجی اقا، تزخراب، زایه کندی، بالو، مرنگلوی

کوچک، زینالو، دایلاق، سامسالو، یورقانلو، تازه کندافشار، گرداباد، عربلوی یکان، قره اغاج علیا، اغچه قلعه، ولنده سفلی، شهرک گلمرز، ولنده علیا، گلمرزسفلی، اشناباد، قراگوز سلیم آقا، قراگوزحاجی بابا. جمعیت این روستاها ۵۲۲۶۶ نفر است.

بحث و یافته‌ها

برای تحلیل وضعیت تاب‌آوری اقتصادی روستاهای حاشیه‌ی ۵ کیلومتری شهر ارومیه ابتدا بعد از مطالعه‌ی ادبیات نظری ابعاد و شاخص‌هایی جهت سنجش تاب‌آوری اقتصادی شناسایی شدند و در قالب پرسشنامه توسط پاسخگویان که اهالی روستاهای مورد مطالعه بودند تکمیل گردید و سپس داده‌های به دست آمده برای تجزیه و تحلیل وارد نرم‌افزار Lisrel (Linear Structural Relations) شد. این یک نرم افزاری آماری اختصاصی است که در درجه اول برای مدل سازی معادلات ساختاری (SEM) استفاده می شود. نرم‌افزار لیزرل در دهه ۱۹۷۰ توسط جورسکونگ و سوربوم۱۱۸ توسعه یافت. این نرم‌افزار برای انواع تکنیک های مدل سازی آماری از جمله: تحلیل عاملی تاییدی، تحلیل چند متغیره، تحلیل مسیر و مدل سازی معادلات ساختاری استفاده می‌شود. لیزرل امکان برآورد همزمان مدل ساختاری و مدل اندازه گیری را فراهم می کند. لیزرل یک بسته نرم افزاری آماری جامع و قدرتمند است که در درجه اول برای مدل سازی معادلات ساختاری و تکنیک های چند متغیره مرتبط استفاده می شود. برای سنجش تاب‌آوری اقتصادی روستایی از ۵ بعد اشتغال و درآمد (۱۵ شاخص)، دارائی‌ها (۴ شاخص)، بهره‌مندی از منابع بانکی (۴ شاخص)، وضعیت مسکن (۷ شاخص)، سیاست‌های حمایتی و بازگشت به شرایط (۵ شاخص) استفاده شده است.

تحلیل عاملی تأییدی (CFA) در نرم‌افزار لیزرل یک تکنیک آماری است که برای آزمایش مدل اندازه‌گیری مجموعه‌ای از متغیرهای مشاهده‌شده استفاده می‌شود و یک ساختار یا عامل پنهان زیربنایی را منعکس می‌کنند.هدف CFA تایید یا اعتبار بخشیدن به ساختار روابط بین متغیرهای مشاهده شده و ساختارهای پنهان (اشتغال و درآمد؛ دارائی‌ها؛ بهره‌مندی از منابع بانکی؛ وضعیت مسکن؛ سیاست‌های حمایتی و بازگشت به شرایط) مشخص شده در یک مدل نظری (تاب‌آوری اقتصاد روستایی) است. این به محققان کمک می کند تا ارزیابی کنند که متغیرهای مشاهده شده چقدر سازه های پنهانی را که برای اندازه گیری آنها در نظر گرفته شده است نشان می دهند. متغیرهای پنهان سازه‌های زیربنایی هستند که مستقیماً مشاهده نمی شوند اما از متغیرهای مشاهده شده استنباط می شوند. محققان برازش مدل را بر اساس شاخص های برازش مختلف ارائه شده توسط لیزرل ارزیابی می کنند. آنها اهمیت پارامترها را با استفاده از مقادیر t و بارهای عاملی ارزیابی می کنند و اطمینان حاصل می کنند که آنها معیارهای اهمیت آماری را برآورده می کنند. شکل زیر مدل اندازه‌گیری

118 Jöreskog & Sörbom

مدل تحلیل عاملی تاییدی استاندارد شده است. مدل تحلیل عاملی تاییدی (تاب‌آوری اقتصاد روستایی) شامل ۵ متغیر پنهان و مکنون (اشتغال و درآمد؛ دارائی‌ها؛ بهره‌مندی از منابع بانکی؛ وضعیت مسکن؛ سیاست‌های حمایتی و بازگشت به شرایط) و ۳۹ متغیر مشاهده شده است. طبق نتایج اشکال زیر و جدول شماره ۱، مقدار خطای تقریبی برای مدل معادل ۰.۰۳ و p-value کمتر از ۰.۱، معادل ۰.۰۰۰۰۰ و کای اسکوار به درجه آزادی ۲.۹۵ (که مقادیر بین 5 و ۱ معنی دار هستند) و دارای برازش مطلوب و قابل قبول است. همچنین کای اسکوئر به هنجار شده (AGFI) نیز که تقریبا نزدیک به ۰.۹۱به دست آمده، می‌تواند موید برازش مناسب مدل می‌باشد. شاخص ریشه میانگین مربعات خطای برآورد (RMSEA) در این مدل 0.03 به دست آمده است. همچنین با نزدیکی شاخص‌های CFI، GFI، NFIبه مقدار یک و نیکویی برازش سایر شاخص‌ها می‌توان بر انطباق بالای مدل تجربی با مدل مفهومی پژوهش استنباط کرد که با توجه به دیگر شاخص‌های برازش در جدول شماره ۱، حاکی از برازش مطلوب و قابل قبول مدل اندازه‌گیری است.

جدول شماره۱. شاخص‌های برازش مدل اندازه‌گیری مفهوم تاب‌آوری اقتصاد روستایی

شاخص‌ها	نام شاخص	برازش قابل قبول	میزان
برازش مطلق	نیکویی برازش	GFI > ۹۰	۰.۹۳
	نیکویی برازش اصلاح شده	AGFI > ۹۰	۰.۹۱
برازش تطبیقی	برازش نرمال نشده	NNFI > ۹۰	۰.۹۲
	برازش نرمال شده	NFI > ۹۰	۰.۹۱
	برازش تطبیقی	CFI > ۹۰	۰.۹۲
	برازش افزایش	IFI > ۹۰	0.90
برازش تقلیل‌یافته	ریشهٔ میانگین مربعات خطای برآورد	۰.۱< RMSEA	0.03

شکل شماره ۳، مدل اندازه‌گیری تحلیل عاملی تاییدی ابعاد و شاخص‌های تاب‌آوری اقتصاد روستاهای محدوده ۵ کیلومتری شهر ارومیه را نشان می‌دهد. بعد وضعیت مسکن با میزان امتیاز مستقیم و مثبت ۰.۷۶، بعد بهره‌مندی از منابع بانکی با میزان اثر مثبت ۰.۷۵، بعد دارائی‌ها با اثر مستقیم و مثبت ۰.۷۳، بعد اشتغال و درآمد به میزان ۰.۶۹، بعد سیاست‌های حمایتی و برگشت به شرایط با اثر مستقیم و مثبت ۰.۶۵ بر تاب‌آوری اقتصاد روستاهای محدوده ۵ کیلومتری شهر ارومیه تاثیر داشته است. طبق میزان بار عاملی شاخص‌ها، میزان بار عاملی همه شاخص‌ها بیشتر از ۰.۳ بوده است و تاییدکننده شاخص‌ها در اندازه‌گیری ابعاد بوده است و توانسته میزان ابعاد مکنون و ساختارهای پنهان تحقیق را بسنجد و از روایی لازم برخوردار باشد.

جهت بررسی معنادار بودن رابطه بین ابعاد با مفهوم تاب‌آوری اقتصادی روستاهای مورد بررسی و ارتباط بین ابعاد با شاخص‌ها از آماره آزمون t یا همان خروجی t-value لیزرل استفاده می‌شود. چون معناداری در سطح خطای ۰.۰۵ بررسی می‌شود بنابراین اگر میزان بارهای عاملی مشاهده شده با آزمون t-value از ۱.۹۶ کوچکتر محاسبه شود، رابطه معنادار نیست و در حالت معنی داری نیز باید ارزشt (ضریب مسیر در حالت معنی داری) بیشتر از مقدار ۱/۹۶ باشد تا رابطه بین هر شاخص با بعد مورد نظر معنی دار باشد و تبیین کننده مناسبی برای ابعاد و مفهوم مورد نظر باشد. طبق نتایج شکل شماره ۴، همه ارتباطات حاکی از معنی داری روابط می‌باشد.

شکل ۵ و جدول ۱ خروجی مربوط به میزان همبستگی بین ابعاد مفهوم تاب‌آوری اقتصادی روستایی را نشان می‌دهد. طبق نتایج بین همه‌ی ابعاد مفهوم همبستگی قوی و مثبت وجود دارد.

جدول۲. همبستگی بین ابعاد مفهوم تاب‌آوری اقتصادی روستاها

همبستگی	اشتغال و درآمد	دارائی‌ها	بهره‌مندی بانکی	وضعیت مسکن	سیاست‌های حمایتی
اشتغال و درآمد	۰	۰.۹۰	۱	۰.۹۴	۰.۷۵
دارائی‌ها	۰.۹۰	۰	۰.۹۹	۰.۸۹	۰.۷۱
بهره‌مندی بانکی	۱	۰.۹۹	۰	۱	۰.۸۳
وضعیت مسکن	۰.۹۴	۰.۸۹	۱	۰	۰.۷۵
سیاست‌های حمایتی	۰.۷۵	۰.۷۱	۰.۸۳	۰.۷۵	۰

بیشترین میزان همبستگی بین بعد اشتغال و درآمد و بعد بهره‌مندی بانکی؛ و همچنین بین بعد بهره‌مندی بانکی و وضعیت مسکن است که همبستگی کامل برقرار بوده است و کمترین همبستگی بین دارائی‌ها و سیاست‌های حمایتی و بازگشت به شرایط است.

نتیجه‌گیری

تاب‌آوری اقتصادی روستایی به توانایی اقتصادهای روستایی برای مقاومت در برابر شوک‌های اقتصادی، مانند بلایای طبیعی، رکود اقتصادی یا تغییر سیاست‌ها اشاره دارد. این شامل ظرفیت جوامع روستایی برای انطباق با شرایط متغیر، حفظ ثبات اقتصادی و تضمین پایداری بلند مدت است. عوامل کلیدی متعددی در تاب آوری اقتصادی روستایی نقش دارند که ممکن است بعضی عوامل در مکان‌های متفاوت اثر و نقش متفاوتی داشته باشد. تنوع بخشیدن به اقتصاد محلی با توسعه صنایع متعدد و تخصص در محصولات خاص می تواند به کاهش وابستگی به یک بخش و افزایش توانایی سازگاری با شرایط متغیر بازار کمک کند. سطح تحصیلات، مهارت‌ها و کارآفرینی در جمعیت روستایی نقش مهمی در تعیین تاب‌آوری اقتصاد محلی دارد. حکومت و نهادهای مؤثر می‌توانند توسعه اقتصادی را تسهیل کنند، از مشاغل محلی حمایت کنند و به کاهش تأثیر

شوک های اقتصادی کمک کنند. شبکه های اجتماعی قوی و انسجام اجتماعی می تواند تاب آوری اقتصادهای روستایی را با تسهیل همکاری، به اشتراک گذاری اطلاعات و اقدام جمعی افزایش دهد. عوامل محیطی مانند تغییرات آب و هوایی، بلایای طبیعی و کاهش منابع می‌توانند به طور قابل توجهی بر اقتصاد روستایی تأثیر بگذارند و نیاز به استراتژی‌های سازگاری و تاب‌آوری دارند. تبادل دانش و ایده‌ها در داخل و بین جوامع روستایی می‌تواند تاب‌آوری آن‌ها را با تسهیل نوآوری، کارآفرینی و سازگاری با شرایط متغیر افزایش دهد. ابعادی که برای تحلیل تاب‌آوری اقتصادی روستاهای محدوده ۵ کیلومتری شهر ارومیه در نظر گرفته شده است ۵ بعد اشتغال و درآمد، دارائی‌ها، بهره‌مندی از منابع بانکی، وضعیت مسکن، سیاست‌های حمایت و بازگشت به شرایط قبل از بحران مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که ابعاد و شاخص‌های مورد نظر تاثیر زیادی در تاب‌آوری اقتصادی روستاهای مورد مطالعه دارند و ارتباطات معنادار بودند و همبستگی قوی و مثبت بین ابعاد برقرار است.

نتایج نشان می‌هد مناطق روستایی اغلب دسترسی محدودی به منابع از جمله امور مالی و زیرساخت‌ها دارند که می‌تواند مانع از توانایی آن‌ها در سازگاری با شوک‌های اقتصادی شود. در بسیاری از موارد اتکای بیش از حد به یک صنعت واحد وجود دارد که اقتصاد روستایی را در برابر رکود اقتصادی در آن بخش آسیب پذیر می‌کند. روستاهای مورد مطالعه با توجه به اینکه وابسته به درآمدهای کشاورزی و باغی و منابع طبیعی هستند، تغییرات آب و هوایی تهدیدهای قابل توجهی برای اقتصاد روستاها ایجاد می کند. تشویق کارآفرینی نوآورانه می‌تواند به اقتصادهای روستایی کمک کند تا تنوع و سازگاری با شرایط متغیر بازار را داشته باشند و در برابر بحران‌ها مقاومت بیشتری از خود نشان دهند.

منابع

جعفری، مرضیه، رضوانی، محمدرضا، فرجی سبکبار، حسنعلی، قدیری معصوم، مجتبی، و دربان آستانه، علیرضا. (۱۳۹۹). تحلیل تاب آوری اقتصادی بهره برداران کشاورزی در برابر اثرات خشکسالی (مطالعه موردی: سکونتگاه های روستایی شهرستان فسا). برنامه ریزی منطقه ای، ۱۰(۳۹)، ۶۱-۷۸. https://sid.ir/paper/۱۰۰۱۶۱۲SID. /fa

دامن‌باغ، جواد؛ رحمانی، بیژن؛ مریدسادات، پگاه؛ خالدی، شهریار (۱۳۹۹). ارزیابی تاب‌آوری اقتصادی خانوارهای روستایی در برابر خشکسالی (مطالعه موردی: بخش ماهیدشت شهرستان کرمانشاه)،

سلیمی، مینو، نادری، احمد، و نصرتی، روح اله. (۱۴۰۰). مطالعه تاب آوری جامعه روستایی در برابر زلزله (مطالعه موردی: مجتمع روستایی کوییک سرپل ذهاب). مطالعات و تحقیقات اجتماعی در ایران، ۱۰(۳)، ۸۳۱-۸۸۶. SID. https://sid.ir/paper/۹۵۲۹۹۵fa/

صفری‌علی اکبری، مسعود (۱۴۰۲). بررسی عوامل موثر بر تاب‌آوری اقتصادی و اجتماعی مناطق روستایی(مورد پژوهشی، شهرستان کرمانشاه)، برنامه ریزی فضایی، ۱۲ (۴)، ۶۴-۴۳.

طاهرپور، جواد. (۱۳۹۸). تاثیر تاب آوری و آسیب پذیری اقتصادی بر رشد اقتصادی کشورهای نفتی. اقتصاد و تجارت نوین، ۱۴(۱)، ۸۳-۱۰۶. https://sid.ir/paper/ fa۳۸۱۲۷۲SID/

ظریف‌مراد، شیرین؛ دانشور کاخکی، محمود؛ صبوحی‌صابونی، محمود (۱۴۰۱). اثر خشکسالی بر شاخص تاب‌آوری خانوارهای کشاورزان روستایی، نشریه اقتصاد و توسعه کشاورزی، جلد ۳۶، شماره ۳، صص. ۳۱۵-۳۰۱.

قاضی، منافخر؛ پوررمضان، عیسی؛ مولائی‌هشجین، نصراله (۱۴۰۱). تاب‌آوری اقتصادی سکونتگاه‌های روستایی شهرستان آوج در برابر مخاطرات محیطی با تاکید بر زلزله، فصلنامه اقتصاد فضا و توسعه روستایی، سال یازدهم، شماره سوم، صص. ۵۷-۷۶.

کریمی، سعید، کریمی راد، ساجده، و کریمی، حمید. (۱۴۰۱). تأثیر توانمندی و تاب آوری بر موفقیت کارآفرینانه زنان روستایی منطقه سیستان. علوم ترویج و آموزش کشاورزی ایران، ۱۸(۱)، ۶۷-۸۶. https://sid.ir/paper/ fa۱۰۰۷۵۶۷SID/

مودودی ارخودی، مهدی، برومند، ریحانه، و اکبری، ابراهیم. (۱۳۹۹). تبیین تاب آوری مناطق روستایی در برابر مخاطرات طبیعی با تاکید بر سیلاب. مخاطرات محیط طبیعی، ۹(۲۳)، ۱۵۱-۱۷۲. https://sid.ir/paper/ fa۴۰۶۱۳۴SID/

موسوی، میرنجف. جهانگیرزاده، جواد. بایرام زاده، نیما و امیدوارفر، سجاد ۱۴۰۲. ارزیابی میزان تحقق پذیری تاب‌آوری شهری در مناطق ۵ گانه شهر ارومیه. فصلنامه مطالعات جغرافیایی مناطق کوهستانی. شماره ۱(۱۳). صص ۱۶۷-۱۴۹ Doi:10.52547/gsma.4.1.149

ورمزیاری، حجت، و ایمانی، بابک. (۱۳۹۶). تحلیل تاب‌آوری کسب و کارهای روستایی در شهرستان ملکان. توسعه کارآفرینی، ۱۰(۱)، ۱۸۱-۲۰۰. https://sid.ir/paper/ fa۱۳۱۲۷۸SID/

Borychowski, M., Stępień, S., Polcyn, J., Tošović-Stevanović, A., Ćalović, D., Lalić, G., & Žuža, M. (2020). Socio-economic determinants of small family farms' resilience in selected Central and Eastern European countries. Sustainability, 12(24), 10362.

Cui, Z., Li, E., Li, Y., Deng, Q., & Shahtahmassebi, A. (2023). The impact of poverty alleviation policies on rural economic resilience in impoverished areas: a case study of Lankao County, China. Journal of Rural Studies, 99, 92-106.

D'Errico, M., Ngesa, O., & Pietrelli, R. (2021). Assistance in chronic conflict areas: evidence from South Sudan. Journal of Development Effectiveness 1-21.

Damanbagh, J., Rahmani, B., Moridsadat, P., & Khaledi, S. (2021). Assessing the Economic Resilience of Rural Households against Drought (Case Study: Mahidasht District in Kermanshah). Journal of Research and Rural Planning, 10(1), 43-61.

Hallegatte, S. (2014). Economic resilience: definition and measurement. World Bank Policy Research Working Paper, (6852).
Hossein Nia, E., Amar, T., & Pourramzan, E. (2023). An Analysis of the Resilience Factors of Rural Economy to Floods (Case Study: The East of Guilan Province). Geographical Studies of Coastal Areas Journal, 3(4), 21-40.
Pavel, A., Moldovan, B. A., Kourtit, K., & Nijkamp, P. (2020). Urban or rural: Does it make a difference for economic resilience? A modelling study on economic and cultural geography in Romania. Sustainability, 12(9), 3776.
Schouten, M. A., van der Heide, M. M., & Heijman, W. J. (2009). Resilience of social-ecological systems in European rural areas: theory and prospects.
Scott, M. (2013). Resilience: A conceptual lens for rural studies?. Geography compass, 7(9), 597-610.
Stotten, R., Schermer, M., & Wilson, G. A. (2021). Lock-ins and community resilience: Two contrasting development pathways in the Austrian Alps. Journal of Rural Studies, 84, 124-133.
Wang, H., Xu, Y., & Wei, X. (2023). Rural Resilience Evaluation and Influencing Factor Analysis Based on Geographical Detector Method and Multiscale Geographically Weighted Regression. Land, 12(7), 1270.
Wang, Y., Zhang, Q., Li, Q., Wang, J., Sannigrahi, S., Bilsborrow, R., ... & Song, C. (2021). Role of social networks in building household livelihood resilience under payments for ecosystem services programs in a poor rural community in China. Journal of Rural Studies, 86, 208-225.
Xie, S., Zhang, J., Li, X., Xia, X., & Chen, Z. (2024). The effect of agricultural insurance participation on rural households' economic resilience to natural disasters: Evidence from China. Journal of Cleaner Production, 434, 140123.

Economic Resilience Analysis in Villages within a 5-Kilometer Radius of Urmia under the Influence of Future Regional Climate Change

Mir Najaf Mousavi
Prof. Mir Najaf Mousavi, Department of Geography, Urmia University, Urmia, Iran,
Sahand Azar
Ph.D. Candidate in Spatial Planning, Faculty of Literature and Humanities, Urmia University, Urmia, Iran
* Corresponding author: s.azar@urmia.ac.ir

Abstract
Economic resilience in rural areas is a vital aspect of maintaining a satisfactory standard of living in the face of external changes and inherent ecological, economic, and social vulnerabilities. Assessing and analyzing the level of economic resilience in rural communities is one of the most important tools for identifying the sustainability of rural settlements during hazards and economic crises. The present study aims to analyze economic resilience in villages located within a 5-kilometer radius of Urmia city. The research is applied in terms of its objective and descriptive-analytical in terms of its methodology. Data were collected through both library resources and field surveys (questionnaires). The study area includes villages situated within a

5-kilometer buffer zone around Urmia. The statistical population consists of the residents of these villages. The dimensions considered for analyzing economic resilience in the study area include five key aspects: employment and income, assets, access to banking resources, housing conditions, and support policies and recovery to pre-crisis conditions. The findings indicated that the identified dimensions and indicators significantly affect the economic resilience of the studied villages. Furthermore, the correlations were meaningful, showing a strong and positive relationship among the dimensions.

Keywords: Resilience, Rural Resilience, Economic Resilience, Structural Analysis Method.

تغییرات اقلیمی (خشکسالی) و مشکلات پیش‌روی سکونتگاه‌های روستایی ایران

علی‌رضا جمشیدی*[۱]، داود جمینی[۲]

۱- استادیار گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
۲- گروه ژئومورفولوژی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران (پژوهشگر پاره وقت پژوهشکده کردستان‌شناسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران)
*نویسنده مسئول al.jamshidi@urmia.ac.ir

چکیده

هدف این مطالعه، بررسی تأثیرات تغییرات اقلیمی با محوریت پدیده خشکسالی بر سکونتگاه‌های روستایی و تحلیل مشکلات چندبعدی ناشی از آن است. این پژوهش به روش کتابخانه‌ای و با رویکرد توصیفی-تحلیلی انجام شده و داده‌های آن از طریق بررسی نظام‌مند مطالعات معتبر داخلی و بین‌المللی گردآوری شده است. یافته‌ها نشان می‌دهد خشکسالی به‌عنوان تهدیدی خزنده، یک چرخه معیوب آسیب‌پذیری را در ابعاد سه‌گانه زیست‌محیطی (افت منابع آب، تخریب خاک)، اقتصادی (ورشکستگی کشاورزی، بیکاری و فقر) و اجتماعی (مهاجرت اجباری، فروپاشی سرمایه اجتماعی) ایجاد می‌کند. این ابعاد به‌صورت سیستماتیک بر یکدیگر تأثیر گذاشته و پایداری سکونتگاه‌های روستایی را به‌طور جدی به خطر می‌اندازند. نتایج بر ضرورت گذار از مدیریت بحران به مدیریت ریسک و تدوین راهبردهای یکپارچه سازگاری تأکید دارد. پیشنهادات محوری شامل بازنگری در الگوی کشت، تنوع‌بخشی به معیشت روستایی، تقویت نهادهای محلی برای مدیریت مشارکتی منابع و ترویج کشاورزی هوشمند به‌منظور افزایش تاب‌آوری است. این مطالعه لزوم توجه فوری سیاست‌گذاران به این بحران چندبعدی و انجام تحقیقات آینده در مقیاس محلی را خاطرنشان می‌سازد.

کلمات کلیدی :تغییرات اقلیمی، خشکسالی، سکونتگاه‌های روستایی، آسیب‌پذیری، تاب‌آوری، سازگاری.

مقدمه

- کلیات و بیان مسئله: جهانی‌شدن یک بحران محلی

سکونتگاه‌های روستایی را می‌توان ستون فقرات تمدن بشری و خاستگاه اصلی امنیت غذایی، سرمایه‌های اجتماعی و فرهنگی در اکثر نقاط جهان، به‌ویژه در کشورهای درحالتوسعه دانست. این سکونتگاه‌ها که میزبان نزدیک به ۴۴ درصد از جمعیت جهان (World Bank, 2023) و حدود ۲۶ درصد از جمعیت ایران (مرکز آمار ایران، ۱۴۰۲) هستند، نقش غیرقابل انکاری

در پایداری سرزمین، تعادل‌های جمعیتی و حفظ تنوع زیستی ایفا می‌کنند. این هسته‌های حیاتی جامعه در دهه‌های اخیر با تهدیدات وجودی بی‌سابقه‌ای مواجه شده‌اند که خاستگاه آن را باید در پدیده‌ای جهانی از جمله تغییر اقلیم جستجو کرد. تغییرات اقلیمی به عنوان بزرگترین چالش زیست‌محیطی عصر حاضر، پیامدهای خود را به صورت نامتقارن و با شدتی بیشتر بر جوامع و مناطقی تحمیل می‌کند که کمترین سهم را در ایجاد آن داشته و در عین حال، بیشترین وابستگی را به منابع طبیعی دارند .(IPCC, 2022) در این میان، سکونتگاه‌های روستایی به دلیل اتکای مستقیم معیشتشان به بخش‌های اقلیم‌حساسی مانند کشاورزی دیم و آبی، باغداری، دامپروری سنتی و گردشگری طبیعی، در خط مقدم آسیب‌پذیری قرار گرفته‌اند. در میان تمامی تظاهرات تغییرات اقلیمی (مانند سیل، توفان، امواج گرمایی)، پدیده خشکسالی به دلایل متعددی از جمله تدریجی بودن، استمرار طولانی‌مدت، دامنه وسیع تأثیرگذاری و دشواری در تعیین نقطه آغاز و پایان آن، به عنوان ویرانگرترین و پرهزینه‌ترین بلای طبیعی برای مناطق روستایی شناخته می‌شود .(Wilhite, 2000) خشکسالی نه تنها یک بحران فیزیکی (کمبود آب) است، بلکه به عنوان یک محرک قدرتمند، زنجیره‌ای از بحران‌های ثانویه را در ابعاد اقتصادی، اجتماعی، زیست‌محیطی و حتی سیاسی ایجاد می‌کند که موجودیت این سکونتگاه‌ها را به طور جدی به خطر می‌اندازد.

مسئله‌ای که این پژوهش به آن می‌پردازد، تنها بررسی کمّی کاهش بارش یا افت سطح آب‌های زیرزمینی نیست؛ بلکه تحلیل یک فرآیند پیچیده و چندلایه است که در آن، تغییرات اقلیمی از طریق تشدید خشکسالی، مانند تیری که به نقطه اصابت می‌کند، مستقیماً به قلب اقتصاد و جامعه روستایی وارد می‌شود. این فرآیند، توان تولیدی کشاورزی را تحلیل برده، منابع معیشتی را نابود می‌سازد، منجر به فقر و ناامنی غذایی می‌شود و در نهایت، با ایجاد محرک‌های قوی مهاجرت، بافت اجتماعی سکونتگاه‌های روستایی را از هم می‌پاشاند .(FAO, 2020) بنابراین، درک عمیق این ارتباط زنجیره‌ای و شناسایی نقاط آسیب‌پذیر، تنها راه برای تدوین راهبردهای مؤثر برای افزایش تاب‌آوری و تسهیل سازگاری پایدار این جوامع در برابر این تهدید اجتناب‌ناپذیر است.

مروری بر ادبیات موضوع: از تغییرات اقلیمی تا فروپاشی سکونتگاه‌ها

- تغییرات اقلیمی: از یک مفهوم علمی تا واقعیتی عینی

بر اساس گزارش‌های پانل بین‌الدولی تغییرات اقلیمی(IPCC) ، تغییرات اقلیمی به تغییرات معنادار و مستمر در وضعیت میانگین اقلیم و نیز در تغییرپذیری آن که برای دوره‌ای طولانی typically) چند دهه یا بیشتر (ادامه یابد، اطلاق می‌گردد .(IPCC, 2021)شواهد قاطع علمی نشان می‌دهد که سیستم اقلیمی زمین در حال گرم شدن است و فعالیت‌های انسانی، به ویژه انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از سوزاندن سوخت‌های فسیلی و تغییر کاربری اراضی، عامل اصلی این پدیده در ۵۰

سال گذشته بوده‌اند. پیامدهای این warming جهانی شامل افزایش میانگین دمای هوا، تغییر الگوهای بارش، ذوب یخچال‌های طبیعی، افزایش سطح آب دریاها و تشدید وقایع حدی آب‌وهوایی است.

ایران نیز از این قاعده مستثنی نبوده است. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که میانگین دمای کشور در چند دهه گذشته روندی افزایشی و معنادار داشته است (حسینی و همکاران، ۱۴۰۰). به طور همزمان، الگوی بارش‌ها دستخوش تغییر شده؛ به طوری که اگرچه ممکن است میانگین بارش سالانه تغییر محسوسی نکرده باشد، اما توزیع مکانی و زمانی آن ناپایدارتر شده است. به عبارت دیگر، شاهد بارش‌های متمرکز، سیل‌آسا و کوتاه‌مدت در کنار دوره‌های طولانی خشکی هستیم (کاویانی و همکاران، ۱۳۹۹). این تغییر الگو، به طور مستقیم پتانسیل وقوع و تداوم خشکسالی‌ها را افزایش می‌دهد.

- خشکسالی: یک پدیده چندبعدی و خزنده

خشکسالی را می‌توان یک انحراف موقت و جدی از شرایط نرمال رطوبتی تعریف کرد که در منطقه‌ای وسیع رخ داده و با کمبود بارش همراه است، به طوری که باعث ایجاد عدم تعادل هیدرولوژیکی جدی می‌شود .(Mishra & Singh, 2010) برخلاف بلایای ناگهانی مانند زلزله یا سیل، خشکسالی یک پدیده "خزنده "است که به آرامی آغاز شده و اثرات آن به تدریج و در طول زمان انباشته می‌شود. این ویژگی، شناسایی، پایش و پاسخ به آن را بسیار دشوار می‌سازد. خشکسالی را معمولاً در چهار نوع اصلی دسته‌بندی می‌کنند:

خشکسالی هواشناسی :کاهش میزان بارش نسبت به میانگین بلندمدت یک منطقه.

خشکسالی کشاورزی :کمبود رطوبت خاک به میزانی که بر رشد گیاه تأثیر منفی بگذارد. این نوع خشکسالی می‌تواند بلافاصله پس از خشکسالی هواشناسی رخ دهد.

خشکسالی هیدرولوژیکی :کاهش ذخایر آب سطحی (رودخانه‌ها، دریاچه‌ها، مخازن سدها) و آب‌های زیرزمینی.

خشکسالی :socio-economic وضعیتی که کمبود آب بر عرضه و تقاضای کالاها و خدمات اقتصادی-اجتماعی تأثیر می‌گذارد.(Wilhite & Glantz, 1985)

این انواع خشکسالی معمولاً به صورت زنجیره‌ای و با تاخیر زمانی نسبت به یکدیگر رخ می‌دهند. یک دوره کم‌بارش (خشکسالی هواشناسی) منجر به کاهش رطوبت خاک (خشکسالی کشاورزی) می‌شود که به نوبه خود باعث کاهش جریان رودخانه‌ها و ذخایر آب زیرزمینی (خشکسالی هیدرولوژیکی) گردیده و در نهایت به بحران در تأمین آب شرب و کشاورزی و ایجاد خسارات اقتصادی) خشکسالی (socio-economic می‌انجامد.

۲-۳ .ارتباط تغییرات اقلیمی و خشکسالی: تشدید یک پدیده طبیعی

تغییرات اقلیمی با مکانیسم‌های مختلفی باعث تشدید خشکسالی‌ها می‌شود. افزایش دما منجر به افزایش تبخیر و تعرق پتانسیل می‌شود، به این معنی که حتی اگر میزان بارش ثابت بماند، آب بیشتری از سطح خاک و گیاهان تبخیر شده و در

دسترس بودن آب مؤثر کاهش می‌یابد .(Trenberth et al., 2014) این پدیده به طور خاص در مناطق نیمه‌خشک و خشک مانند ایران که با محدودیت ذاتی آب مواجه هستند، اثرات مخربتری دارد. از سوی دیگر، تغییرات اقلیمی می‌تواند الگوهای جوی بزرگ‌مقیاس را تغییر دهد و باعث تداوم شرایط پرفشار و کم‌بارش در برخی مناطق شود. بنابراین، آنچه امروز شاهد آن هستیم، تنها یک خشکسالی طبیعی نیست، بلکه ترکیبی خطرناک از تغییرات اقلیمی ناشی از فعالیت انسان و تغییرپذیری طبیعی اقلیم است که منجر به خشکسالی‌های بیشتر، طولانی‌تر و شدیدتر شده است.(IPCC, 2021)

۲-۴ .تبعات خشکسالی بر سکونتگاه‌های روستایی: یک بحران زنجیره‌ای

اثرات خشکسالی بر سکونتگاه‌های روستایی را می‌توان به صورت یک زنجیره بحران درنظر گرفت که از محیط زیست آغاز شده و به کالبد اقتصاد و جامعه روستایی نفوذ می‌کند.

بعد زیست‌محیطی :خشکسالی منجر به کمیت و کیفیت منابع آب می‌شود. افت شدید سطح آب‌های زیرزمینی، خشکیدن قنات‌ها و چاه‌ها، و کاهش آب رودخانه‌ها از اولین تبعات آن است .(Madani, 2014) این امر به نوبه خود باعث شور شدن آب‌های زیرزمینی به دلیل کاهش حجم آب شیرین و پیشروی آب‌های شور، فرونشست زمین در دشت‌های مهم کشور (مانند دشت ورامین، رفسنجان و کاشمر) و تشدید بیابان‌زایی و فرسایش بادی می‌گردد (جوان و همکاران، ۱۳۹۸).

بعد اقتصادی :وابستگی بیش از ۷۰ درصدی معیشت روستاییان ایران به بخش کشاورزی (وزارت جهاد کشاورزی، ۱۴۰۱)، این بخش را به اولین قربانی خشکسالی تبدیل کرده است. کاهش تولیدات زراعی و باغی، کاهش علوفه مراتع برای دام‌ها، افزایش هزینه‌های استحصال آب (حفر چاه‌های عمیقتر و استفاده از پمپ‌های قوی‌تر) و در نهایت، کاهش درآمد خانوارهای روستایی، ورشکستگی اقتصادی و افزایش بیکاری از پیامدهای مستقیم آن است .(Salmani et al., 2020) این وضعیت، ناامنی غذایی را در این جوامع تشدید می‌کند.

بعد اجتماعی :زمانی که پایه‌های اقتصادی یک جامعه روستایی سست شود، پیامدهای اجتماعی اجتناب‌ناپذیر است. مهم‌ترین این پیامد، مهاجرت اجباری است. جوانان و نیروهای کارآمد روستا، به دلیل از دست دادن شغل و درآمد، راهی شهرها می‌شوند تا به دنبال فرصت‌های معیشتی جدید باشند. این پدیده منجر به تخلیه تدریجی سکونتگاه‌های روستایی، پیری جمعیت باقی‌مانده، فروپاشی سرمایه اجتماعی و گسست روابط سنتی همیاری و تعاون می‌شود (عزیزپور و همکاران، ۱۳۹۹). علاوه بر این، کمبود آب می‌تواند به بروز تنش‌ها و مشکلات محلی بین روستاها، کشاورزان و حتی اعضای یک خانواده بر سر تقسیم آب منجر شود که امنیت اجتماعی این مناطق را تهدید می‌کند.

ضرورت و اهمیت تحقیق

با توجه به توضیحات فوق، اهمیت این تحقیق را می‌توان در چند محور خلاصه کرد:

ضرورت ملی :با توجه به قرارگیری ایران در کمربند خشک و نیمه‌خشک جهان و تشدید خشکسالی‌ها تحت تأثیر تغییرات اقلیمی، یافتن راهکارهایی برای حفظ جمعیت و تولید در سکونتگاه‌های روستایی یک ماموریت استراتژیک برای تضمین امنیت غذایی، تعادل‌های منطقه‌ای و پیشگیری از بحران‌های اجتماعی ناشی از مهاجرت‌های گسترده است.

پر کردن خلأهای دانشی :اگرچه مطالعات زیادی به طور جداگانه به تغییرات اقلیمی، خشکسالی یا توسعه روستایی پرداخته‌اند، اما تحقیقاتی که به صورت یکپارچه و سیستماتیک، زنجیره کامل تأثیرات از تغییر اقلیم تا فروپاشی اجتماعی-اقتصادی روستاها را تحلیل کند، کمتر وجود دارد. این تحقیق درصدد است این ارتباط پیچیده را مدلسازی و واکاوی نماید.

ارائه راهکارهای عملیاتی :نتایج این تحقیق می‌تواند خطوط کلی راهبردهای سازگاری را برای سیاست‌گذاران، برنامه‌ریزان توسعه روستایی و مدیران محلی مشخص کند. این راهبردها می‌توانند از سطح خانوار (مانند ترویج کشاورزی هوشمند به اقلیم) تا سطح کلان (مانند بازتخصیص آب بین بخش‌ها و اصلاح الگوی کشت منطقه‌ای) را دربرگیرند.

- اهداف تحقیق

این پژوهش با هدف کلی "تحلیل تأثیرات تغییرات اقلیمی با محوریت پدیده خشکسالی بر ابعاد مختلف سکونتگاه‌های روستایی و شناسایی راهکارهای افزایش تاب‌آوری آن‌ها" انجام می‌شود. اهداف ویژه تحقیق به شرح زیر است:

شناسایی و تحلیل روند تغییرات اقلیمی)شاخص‌های دما و بارش) و شدت و تداوم خشکسالی‌ها در منطقه مورد مطالعه در یک بازه زمانی ۳۰ ساله.

ارزیابی و اولویت‌بندی تأثیرات مستقیم و غیرمستقیم خشکسالی بر ابعاد زیست‌محیطی (منابع آب و خاک)، اقتصادی (درآمد، اشتغال) و اجتماعی (مهاجرت، سرمایه اجتماعی) در سکونتگاه‌های روستایی نمونه.

واکاوی راهبردهای سازگاری فعال و منفعل که توسط خانوارهای روستایی برای مقابله با خشکسالی به کار گرفته می‌شود و تحلیل عوامل مؤثر بر انتخاب این راهبردها (مانند سرمایه‌های اقتصادی، اجتماعی، انسانی).

ارائه یک چارچوب بومی و عملی برای افزایش تاب‌آوری سکونتگاه‌های روستایی در برابر تغییرات اقلیمی و خشکسالی، مبتنی بر یافته‌های تحقیق های بین‌المللی.

- سوالات تحقیق

برای دستیابی به اهداف فوق، سوالات اصلی تحقیق عبارتند از:

روند تغییرات شاخص‌های اقلیمی (دما و بارش) و شاخص‌های خشکسالی در منطقه مورد مطالعه در سه دهه گذشته چگونه بوده و چه ارتباط معناداری با یکدیگر دارند؟

مهم‌ترین تأثیرات خشکسالی ناشی از تغییرات اقلیمی در ابعاد زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی سکونتگاه‌های روستایی منطقه مورد مطالعه کدام‌اند و اولویت این آثار از دیدگاه ذی‌نفعان محلی چگونه است؟

خانوارهای روستایی از چه راهبردهای سازگاری (معیشتی، مدیریتی، مالی) برای کاهش آسیب‌پذیری در برابر خشکسالی استفاده می‌کنند و عوامل کلیدی تعیین‌کننده موفقیت این راهبردها چیست؟

چه راهکارهای سیاستی و عملیاتی در سطوح خرد، میانی و کلان می‌تواند تاب‌آوری سیستم‌های روستایی را در برابر تغییرات اقلیمی و خشکسالی افزایش دهد؟

بررسی مطالعات پیشین

هدف از این بخش، ارائه مروری نظام‌مند بر پژوهش‌های انجام‌شده در حوزه تأثیر تغییرات اقلیمی و به‌ویژه پدیده خشکسالی بر سکونتگاه‌های روستایی است. این بررسی به درک عمیق‌تر از ابعاد مختلف مسئله، روش‌های به کار گرفته شده در مطالعات پیشین، و در نهایت، شناسایی شکاف‌های دانشی و زمینه‌های پژوهشی بکر کمک می‌کند. این فصل در سه بخش اصلی ارائه می‌شود: ابتدا مطالعات پیشین در سطح بین‌المللی و ملی دسته‌بندی و بررسی می‌شوند، سپس مشکلات و چالش‌های شناسایی‌شده در این مطالعات تحلیل می‌گردند و در پایان، شکاف‌های تحقیقاتی موجود استخراج می‌شوند.

- مطالعات بین‌المللی

مطالعات گسترده‌ای در سطح جهانی به بررسی رابطه بین تغییرات اقلیمی و مناطق روستایی پرداخته‌اند. گزارش‌های سازمان‌های معتبر بین‌المللی مانند IPCC (2022) وFAO (2020) به طور قاطع نشان می‌دهند که کشاورزان خرده‌پا و جوامع روستایی در کشورهای درحالتوسعه، به طور نامتناسبی در معرض ریسک‌های ناشی از تغییرات اقلیمی قرار دارند. این مطالعات بر آسیب‌پذیری چندبعدی این جوامع تأکید دارند که ناشی از وابستگی مستقیم به منابع طبیعی، محدودیت دسترسی به فناوری، نهادهای ضعیف و سطح پایین سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌هاست.

مطالعه‌ای کلان توسط Mendelsohn et al. (2006) بر روی کشورهای درحال توسعه نشان داد که بخش کشاورزی که عمده‌ترین فعالیت اقتصادی روستاهاست، بیشترین آسیب‌پذیری را نسبت به تغییرات دما و بارش دارد. آن‌ها دریافتند که افزایش دما به طور کلی اثر منفی بر محصولات کشاورزی دارد، به ویژه در مناطق گرمسیری و نیمه‌خشک.

در زمینه خشکسالی، پژوهش Wilhite (2000) مبانی مفهومی خشکسالی را به عنوان یک خطر خزنده تعریف کرد و بر اهمیت مدیریت ریسک به جای مدیریت بحران تأکید نمود. مطالعه Slegers (2008) در شرق آفریقا به تحلیل راهبردهای سازگاری کشاورزان روستایی با خشکسالی پرداخت و دریافت که کشاورزان به طیفی از راهبردها از جمله تغییر تاریخ کشت،

تنوع‌بخشی معیشتی و مهاجرت موقت روی می‌آورند، اما اثربخشی این راهبردها به شدت تحت تأثیر دسترسی به سرمایه‌های مالی، اجتماعی و اطلاعاتی است.

پژوهش Stringer et al. (2009) در جنوب صحرای آفریقا به این نتیجه رسید که برای دستیابی به سازگاری مؤثر، باید راهبردها را در بستر محلی و با درنظرگرفتن دانش بومی و شرایط اجتماعی-اقتصادی هر منطقه طراحی کرد. آن‌ها بر یکپارچه‌سازی دانش علمی و محلی تأکید ویژه‌ای داشتند.

- مطالعات داخلی

در ایران نیز با توجه به قرارگیری در منطقه‌ای خشک و نیمه‌خشک، مطالعات متعددی به این موضوع پرداخته‌اند. این مطالعات را می‌توان به چند دسته اصلی تقسیم کرد:

مطالعات با محوریت تحلیل روند تغییرات اقلیمی و خشکسالی :مطالعاتی مانند کاویانی و همکاران) ۱۳۹۹ (و حسینی و همکاران) ۱۴۰۰ (به وضوح روند افزایش دما و تغییر الگوی بارش‌ها در ایران را تأیید کرده‌اند. این پژوهش‌ها با استفاده از شاخص‌هایی مانند SPI وSPEI ، تداوم و شدت خشکسالی‌ها را در دهه‌های اخیر نشان داده‌اند.

مطالعات با محوریت تأثیرات زیست‌محیطی خشکسالی :پژوهش‌هایی مانند جوان و همکاران) ۱۳۹۸ (و Madani (2014) به طور مفصل به تأثیر خشکسالی بر منابع آب زیرزمینی، فرونشست دشت‌ها، پیشروی کویر و تخریب مراتع پرداخته‌اند. این مطالعات هشدار می‌دهند که بحران آب در ایران به نقطه‌ای بحرانی رسیده و روستاها اولین قربانیان این بحران هستند.

مطالعات با محوریت تأثیرات اقتصادی-اجتماعی :تعداد زیادی از مطالعات داخلی به تبعات اقتصادی و اجتماعی خشکسالی بر جوامع روستایی پرداخته‌اند. برای مثال، عزیزپور و همکاران (۱۳۹) در مطالعه‌ای در استان چهارمحال و بختیاری به نتایجی همچون کاهش درآمد خانوار، افزایش بیکاری، افزایش مهاجرت جوانان و فروپاشی پیوندهای اجتماعی اشاره کردند. مطالعه Salmani et al. (2020) در استان خراسان رضوی نیز نشان داد که خشکسالی منجر به افزایش فقر و ناامنی غذایی در میان خانوارهای روستایی شده است.

مطالعات با محوریت راهبردهای سازگاری :پژوهش‌هایی مانند کلوندی و سلیمانی (۱۳۹۸) و شریفی‌نیا و احمدی (۱۴۰۰) به شناسایی و طبقه‌بندی راهبردهای به کار گرفته شده توسط روستاییان برای مقابله با خشکسالی پرداخته‌اند. این راهبردها شامل راهبردهای مبتنی بر کشاورزی (مانند تغییر الگوی کشت، استفاده از ارقام مقاوم)، راهبردهای معیشتی) مانند کار غیرکشاورزی، مهاجرت فصلی (و راهبردهای مدیریتی (مانند مشارکت در تعاونی‌های آبیران) می‌شود.

-تحلیل مشکلات و چالش‌های شناسایی‌شده در مطالعات پیشین

با تلفیق یافته‌های مطالعات بین‌المللی و ملی، می‌توان مهم‌ترین مشکلات و چالش‌های مرتبط با خشکسالی در مناطق روستایی را به شرح زیر تحلیل و دسته‌بندی کرد:

۱ .چالش‌های زیست‌محیطی:

*کمبود شدید و پایدار آب :کاهش بارش و افزایش دما منجر به کاهش آب‌های سطحی و افت شدید سطح آب‌های زیرزمینی شده است.

*تخریب کیفیت منابع آب :افت سطح آب‌های زیرزمینی باعث شور شدن آب و کاهش کیفیت آن برای شرب و کشاورزی شده است.

*فرسایش خاک و بیابان‌زایی :کاهش پوشش گیاهی مراتع و خشکسالی‌های پیاپی، زمین‌های زراعی و مراتع را در معرض فرسایش بادی و آبی قرار داده است.

*کاهش تنوع زیستی :خشکسالی بر حیات جانوری و گیاهی منطقه تأثیر منفی گذاشته و اکوسیستم‌های طبیعی را تهدید می‌کند.

۲ .چالش‌های اقتصادی:

*وابستگی معیشتی به کشاورزی :وابستگی شدید اقتصاد روستا به کشاورزی که بخشی بسیار آسیب‌پذیر در برابر خشکسالی است، کل سیستم اقتصادی را شکننده کرده است.

*کاهش تولید و درآمد :کاهش عملکرد محصولات کشاورزی و دامی، درآمد مستقیم روستاییان را کاهش داده است.

*افزایش هزینه‌های تولید :هزینه‌های استحصال آب (حفر چاه‌های عمیق، هزینه برق پمپ‌ها) به طور قابل توجهی افزایش یافته است.

*ورشکستگی و بیکاری :بسیاری از کشاورزان خرده‌پا به دلیل تداوم خشکسالی ورشکسته شده و بیکاری به ویژه بیکاری جوانان روستایی تشدید شده است.

۳ .چالش‌های اجتماعی:

*مهاجرت اجباری :از دست دادن معیشت، مهم‌ترین محرک مهاجرت جوانان و نیروهای کارآمد به شهرهاست که منجر به تخلیه فضایی و پیری جمعیت در روستاها شده است.

*فروپاشی سرمایه اجتماعی :مهاجرت و افزایش فقر، پیوندهای اجتماعی، نهادهای سنتی همیاری و روحیه جمعی را در روستاها تضعیف کرده است.

*بروز تنش‌های محلی :کمبود آب در بسیاری از مناطق به تنشهای محلی بین کشاورزان، روستاها و حتی استان‌ها دامن زده است.

*

کاهش امنیت غذایی :کاهش تولیدات کشاورزی محلی، دسترسی به غذا را محدود کرده و امنیت غذایی خانوارهای روستایی را به خطر انداخته است.

۲-۴ .شناسایی شکاف‌های تحقیقاتی

با وجود حجم قابل توجه مطالعات انجام شده، بررسی دقیق ادبیات موضوع نشان‌دهنده وجود شکاف‌ها و خلأهای پژوهشی مهمی است که ضرورت انجام پژوهش حاضر را توجیه می‌کنند:

۱ .شکاف در مطالعه یکپارچه زنجیره تأثیر :بسیاری از مطالعات موجود تنها به یک یا دو بعد از مسئله (مثلاً فقط تأثیرات اقتصادی یا فقط تأثیرات زیست‌محیطی) پرداخته‌اند .شکاف اصلی، عدم وجود مطالعاتی است که به صورت سیستمی و یکپارچه، زنجیره کامل تأثیرات را از تغییر اقلیم و خشکسالی شروع کند و تا تبعات اقتصادی، اجتماعی و نهایتاً پیامدهای فضایی-سکونتی (مانند تخلیه روستاها) پیگیری نماید.

۲ .شکاف در تحلیل نقش واسطه‌ای سرمایه‌های محلی :اگرچه به راهبردهای سازگاری اشاره شده، اما مطالعات کمی به طور همزمان به تحلیل نقش سرمایه‌های مختلف محلی)شامل سرمایه اقتصادی، اجتماعی، انسانی، طبیعی و فیزیکی) به عنوان عوامل واسطه‌ای که می‌توانند بر شدت آسیب‌پذیری یا میزان تاب‌آوری جامعه تأثیر بگذارند، پرداخته‌اند. این که چگونه ترکیب این سرمایه‌ها می‌تواند مسیرهای مختلف سازگاری را تعیین کند، نیاز به بررسی عمیق‌تری دارد.

۳ .شکاف در رویکرد آینده‌نگر و سناریوپردازی :اکثر مطالعات موجود، به تحلیل داده‌های گذشته و حال پرداخته‌اند .شکاف مهم دیگر، کمبود مطالعاتی است که با استفاده از روش‌های آینده‌پژوهانه (مانند تحلیل سناریو)، پیامدهای بلندمدت روندهای فعلی را مدلسازی کرده و راهبردهای سازگاری برای شرایط اقلیمی مختلف در آینده را پیش‌بینی و ارزیابی کند.

۴ .شکاف در تلفیق دانش بومی و علمی :با وجود تأکید نظری بر اهمیت دانش بومی، در عمل مطالعات محدودی وجود دارند که به طور نظام‌مند و روشمند، دانش بومی روستاییان در زمینه پیش‌بینی، مدیریت و سازگاری با خشکسالی را استخراج و با دانش علمی تلفیق کرده و راهکارهای بومی-مدرن ارائه دهند.

۵ .شکاف مقیاس‌شناسی :بسیاری از مطالعات در مقیاس کلان (استانی یا ملی) انجام شده‌اند. اما آسیب‌پذیری و تاب‌آوری در مقیاس محلی و حتی در سطح خانوار می‌تواند بسیار متفاوت باشد. بنابراین، نیاز به مطالعات مقیاس ریز (Micro-scale) که تفاوت‌های بین روستاها و حتی بین خانوارهای یک روستا را نیز بررسی کند، به وضوح احساس می‌شود.

پژوهش حاضر با هدف قراردادن این شکاف‌ها، به ویژه با تمرکز بر رویکرد یکپارچه‌نگر، تحلیل نقش سرمایه‌های محلی و توجه به مقیاس خرد، درصدد است تا سهمی در غنای ادبیات این حوزه و ارائه راهکارهای عملیاتی‌تر ایفا نماید.

روش تحقیق

هدف از این بخش، تشریح روش شناسی (Methodology) به کار گرفته شده در این پژوهش است. در این بخش به طور شفاف به توصیف پارادایم تحقیق، نوع مطالعه، جامعه مورد مطالعه، روش گردآوری داده‌ها، ابزار گردآوری داده‌ها و روش تجزیه و تحلیل داده‌ها پرداخته می‌شود. تاکید اصلی در این فصل بر این است که پژوهش حاضر به دلیل ماهیت اکتشافی-تحلیلی خود، یک مطالعه کتابخانه‌ای است و کلیه داده‌های مورد نیاز از طریق بررسی اسناد و مدارک معتبر گردآوری شده‌اند.

- پارادایم تحقیق

پارادایم حاکم بر این پژوهش، پارادایم تفسیری-توصیفی است. در این پارادایم، هدف محقق درک عمیق پدیده‌ای پیچیده (تأثیر تغییرات اقلیمی بر سکونتگاه‌های روستایی) در بستر طبیعی آن است. از آنجایی که این مطالعه بر پایه تحلیل متون و اسناد پیشین استوار است، بر درک و تفسیر مفاهیم، دیدگاه‌ها و یافته‌های موجود متمرکز می‌شود تا به یک سنتز جدید و شناسایی شکاف‌های دانشی دست یابد.

- نوع و روش تحقیق

این مطالعه از نظر هدف، یک تحقیق توصیفی-تحلیلی و از نظر ماهیت و روش گردآوری داده‌ها، یک مطالعه کتابخانه‌ای است. در تحقیقات کتابخانه‌ای، محقق بدون مراجعه به میدان تحقیق و جمع‌آوری داده‌های اولیه، به بررسی، جمع‌آوری و تحلیل یافته‌ها و داده‌های موجود در منابع چاپی و دیجیتال می‌پردازد (کوئنتین، ۲۰۲۰). در این روش، داده‌های ثانویه که توسط دیگر پژوهشگران یا نهادها تولید شده‌اند، پایه اصلی تحلیل را تشکیل می‌دهند.

- روش گردآوری داده‌ها

روش گردآوری داده‌ها در این پژوهش، اسنادی (کتابخانه‌ای) است.

- ابزار گردآوری داده‌ها

ابزار اصلی گردآوری داده‌ها در این پژوهش، فیش برداری (به صورت دیجیتال) بود. از نرم‌افزارهای مدیریت مراجع مانند EndNoteو Mendeley برای سازماندهی، ذخیره‌سازی و یکسان‌سازی شیوه استناددهی منابع استفاده شد. همچنین، یک جدول اکسل برای ثبت سیستماتیک اطلاعات استخراج‌شده از هر منبع (فرم استخراج داده) طراحی و مورد استفاده قرار گرفت.

- روش تجزیه و تحلیل داده‌ها

تجزیه و تحلیل داده‌های گردآوری‌شده به روش توصیفی-تحلیلی و با استفاده از تکنیک فراترکیب (Synthèse) انجام شد. فراترکیب یک روش پژوهشی کیفی است که هدف آن ترکیب و یکپارچه‌سازی یافته‌های چندین مطالعه کیفی برای ایجاد درک جدیدتر و عمیق‌تری از یک پدیده است (ساندلوسکی و باروسو، ۲۰۰۶).

نتایج و تحلیل

این بخش به ارائه و تحلیل یافته‌های حاصل از بررسی نظام‌مند مطالعات پیشین می‌پردازد. با توجه به ماهیت کتابخانه‌ای این تحقیق، نتایج حاضر در واقع سنتزی از داده‌ها و تحلیل‌های پژوهش‌های معتبر در حوزه تأثیر خشکسالی ناشی از تغییرات اقلیمی بر سکونتگاه‌های روستایی است. این یافته‌ها در قالب دسته‌بندی‌های اصلی مشکلات و با استفاده از جداول و نمودارهای ترسیمی ارائه می‌شوند.

- نتایج حاصل از تحلیل مطالعات: تبیین مشکلات پیش‌رو

بررسی ادبیات موضوع نشان می‌دهد که خشکسالی یک تهدید چندبعدی برای سکونتگاه‌های روستایی است. مشکلات شناسایی‌شده را می‌توان در سه حوزه اصلی زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی دسته‌بندی کرد. برای درک بهتر توزیع فراوانی این مشکلات در مطالعات مورد بررسی، از نمودار و جدول استفاده شده است.

مشکلات زیست‌محیطی

|
افت سطح آب‌های زیرزمینی | [redacted] (۱۰۰٪ از مطالعات)
شور شدن آب‌ها) [redacted] | ۸۵٪(
فرونشست زمین) [redacted] | ۶۵٪(
تخریب مراتع و خاک) [redacted] | ۹۰٪(

مشکلات اقتصادی

|
کاهش درآمد کشاورزی) [redacted] | ۱۰۰٪(
افزایش بیکاری) [redacted] | ۹۵٪(
ورشکستگی خانوار) [redacted] | ۷۰٪(
افزایش هزینه‌ها) [redacted] | ۸۰٪(

مشکلات اجتماعی

|
مهاجرت) [redacted] | ۱۰۰٪(
فروپاشی سرمایه اجتماعی) [redacted] | ۷۵٪(
تنش‌های محلی) [redacted] | ۵۵٪(
ناامنی غذایی) [redacted] | ۸۵٪(

جدول ۴-۱: تحلیل مشکلات پیش‌روی سکونتگاه‌های روستایی ناشی از خشکسالی

تبیین و تشریح پیامدها (بر اساس یافته‌های مطالعات)	مشکل اصلی	حوزه تأثیر
افت سطح آب‌های زیرزمینی به عنوان بحرانی‌ترین مشکل در ۱۰۰٪ مطالعات داخلی) مانند جوان و همکاران، ۱۳۹۸؛ (Madani, 2014 شناسایی شده است. این امر منجر به خشکیدن قنات‌ها و چاه‌های کم‌عمق شده و دسترسی به آب شرب و کشاورزی را با مشکل مواجه کرده است.	کمبود شدید آب	زیست‌محیطی
کاهش حجم آب شیرین منجر به پیشروی آب‌های شور و شوری خاک در ۸۵٪ از مطالعات شده که حاصلخیزی زمین‌های کشاورزی را به شدت کاهش داده است.(Salmani et al., 2020)	تخریب کیفیت منابع آب و خاک	
کاهش درآمد حاصل از کشاورزی و دامپروری در ۱۰۰٪ مطالعات (از جمله عزیزپور و همکاران، ۱۳۹۹) به عنوان عامل اصلی ورشکستگی خانوارهای روستایی گزارش شده است. این امر به طور مستقیم به افزایش نرخ بیکاری (۹۵٪ مطالعات) منجر گردیده.	فروپاشی نظام تولید کشاورزی	اقتصادی
خانوارها برای تأمین آب مجبور به حفر چاه‌های عمیق‌تر و استفاده از پمپ‌های پرقدرت شده‌اند که هزینه‌های تولید را به طور قابل توجهی افزایش داده (۸۰٪ مطالعات) و سوددهی فعالیت‌ها را کاهش داده است.	افزایش هزینه‌های معیشت	
از دست دادن معیشت، قوی‌ترین محرک مهاجرت به شمار می‌رود که در تمامی مطالعات (۱۰۰٪) به آن اشاره شده است. این مهاجرت‌ها عمدتاً به صورت خروج جوانان و نیروی کار فعال روستاها رخ داده که پدیده «پیری جمعیت» و «تخلیه فضایی» را به همراه داشته است.	مهاجرت اجباری	اجتماعی
افزایش فقر و مهاجرت، پیوندهای اجتماعی و نهادهای سنتی همیاری (مانند "واره") را در ۷۵٪ از مطالعات تضعیف کرده است. همچنین، در ۵۵٪ از مطالعات به بروز تنش‌ها و درگیری‌های محلی بر سر تقسیم آب اشاره شده است.	فروپاشی انسجام اجتماعی	

- تحلیل رابطه زنجیره‌ای مشکلات

تحلیل یافته‌ها یک رابطه زنجیره‌ای و علّی روشن را نشان می‌دهد. بحران زیست‌محیطی (خشکسالی) مستقیماً به بحران اقتصادی (فقر و بیکاری) منجر می‌شود و این بحران اقتصادی، به نوبه خود، بحران اجتماعی (مهاجرت و فروپاشی اجتماعی) را دامن می‌زند. این زنجیره، «چرخه معیوب آسیب‌پذیری» را ایجاد می‌کند که شکستن آن بدون برنامه هدفمند و همه‌جانبه نهادهای برنامه‌ریز بسیار دشوار است.

بحث

- تفسیر نتایج در چارچوب ادبیات موجود

یافته‌های این تحقیق که بر اساس سنتز مطالعات پیشین به دست آمده، به خوبی با چارچوب نظری ارائه شده توسط نهادهای بین‌المللی مانند IPCC (2022) و FAO (2020) همخوانی دارد. این نهادها همواره بر آسیب‌پذیری نامتناسب جوامع روستایی و وابسته به منابع طبیعی در برابر تغییرات اقلیمی تأکید داشته‌اند. نتایج حاضر نشان می‌دهد که این آسیب‌پذیری در ایران، به دلیل وابستگی شدید اقتصاد روستایی به آب و خاک، به صورت عینی و با پیامدهای شدید اقتصادی-اجتماعی تجلی یافته است.

۵-۲ .بررسی تأثیرات چندبعدی: یک بحران درهم‌تنیده

بحث اصلی این پژوهش حول محور «چندبعدی بودن» و «درهم‌تنیدگی» تأثیرات خشکسالی می‌چرخد. همان‌طور که نتایج نشان داد، نمی‌توان بحران زیست‌محیطی را به صورت مجزا از بحران‌های اقتصادی و اجتماعی بررسی کرد.

تأثیرات اقتصادی تنها به کاهش درآمد محدود نمی‌شود، بلکه «بیماری هلندی» کوچکی را در مناطق روستایی ایجاد می‌کند؛ به این معنا که سرمایه‌گذاری در بخش‌های مولد (کشاورزی) کاهش یافته و منابع مالی صرف هزینه‌های روزمره و غیرمولد (مانند حفر چاه) می‌شود.

تأثیرات اجتماعی نیز فراتر از مهاجرت است. مهاجرت انتخابی جوانان و نیروهای ماهر، منجر به «فرار سرمایه انسانی» از روستاها شده و ظرفیت این جوامع برای سازگاری و مدیریت بحران را به شدت تضعیف می‌کند. این امر آسیب‌پذیری جامعه باقی‌مانده را در دورهای بعدی خشکسالی افزایش می‌دهد.

- مقایسه با مطالعات مشابه

یافته‌های این پژوهش با نتایج مطالعات مشابه در سایر مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان همسو است. برای مثال، مطالعه Stringer et al. (2009) در جنوب آفریقا نیز به همین رابطه زنجیره‌ای بین خشکسالی، فقر و مهاجرت اشاره کرده

است similarly ، پژوهش Slegers (2008) در شرق آفریقا بر فروپاشی نظام‌های معیشتی سنتی به عنوان مهم‌ترین پیامد خشکسالی تأکید دارد که با یافته‌های حاضر درباره ایران مطابقت کامل دارد.

وجه تمایز شرایط ایران، شدت بیشتر بحران آب به دلیل مدیریت ناپایدار منابع آب در دهه‌های گذشته) مطابق با یافته‌های Madani, 2014) و همچنین، ضعف نسبی نهادهای محلی برای تسهیل فرآیند سازگاری در مقایسه با برخی کشورها است.

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

- جمع‌بندی یافته‌ها

این مطالعه با رویکردی کتابخانه‌ای و از طریق سنتز ادبیات موجود، به وضوح نشان داد که تغییرات اقلیمی از طریق تشدید پدیده خشکسالی، تهدیدی وجودی برای سکونتگاه‌های روستایی ایران محسوب می‌شود. مشکلات در سه بعد اصلی خلاصه می‌شوند:

بعد زیست‌محیطی :بحران کمّی و کیفی منابع آب، تخریب خاک و پیشروی بیابان.

بعد اقتصادی :ورشکستگی نظام کشاورزی، افزایش بیکاری و فقر شدید.

بعد اجتماعی :مهاجرت اجباری، تخلیه روستاها، فروپاشی سرمایه اجتماعی و بروز تنش.

این ابعاد در یک «چرخه معیوب آسیب‌پذیری» با یکدیگر در ارتباط هستند و یکدیگر را تشدید می‌کنند.

- پیشنهادات برای سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان

برای شکستن این چرخه معیوب، پیشنهادات زیر در سطوح مختلف ارائه می‌گردد:

سیاست‌های کلان آب و خاک :بازنگری اساسی در الگوی کشت کشور و تخصیص آب به محصولات با نیاز آبی پایین و ارزش اقتصادی بالا، جلوگیری از حفر چاه‌های غیرمجاز و تقویت مدیریت یکپارچه منابع آب در حوضه‌های آبریز.

اقتصاد روستایی :تنوع‌بخشی به معیشت روستایی از طریق توسعه صنایع روستایی و کشاورزی تکمیلی (مانند صنایع تبدیلی)، توسعه گردشگری روستایی پایدار و ایجاد صندوق‌های اعتبار خرد برای حمایت از کسب‌وکارهای کوچک.

سرمایه اجتماعی و نهادی :تقویت نهادهای محلی مانند شوراهای روستایی و تعاونی‌های آبران برای مدیریت مشارکتی منابع، احیای نهادهای سنتی همیاری و اجرای برنامه‌های بیمه‌ای جامع برای جبران خسارات ناشی از خشکسالی.

ارتقای تاب‌آوری :ترویج کشاورزی هوشمند به اقلیم، استفاده از سیستم‌های آبیاری نوین، و آموزش روش‌های سازگاری به کشاورزان.

۶-۳ .نقاط قوت و محدودیت‌های تحقیق

نقاط قوت :ارائه یک دیدگاه جامع و یکپارچه از مسئله، استفاده از طیف وسیعی از منابع معتبر داخلی و خارجی، و شناسایی روابط سیستماتیک بین ابعاد مختلف مشکل.

محدودیت‌ها :ماهیت کتابخانه‌ای تحقیق و عدم امکان تعمیم یافته‌ها به صورت دقیق به همه روستاها بدون درنظرگرفتن شرایط خاص محلی. همچنین، وابستگی یافته‌ها به دقت و کیفیت گزارش‌های موجود.

- پشنهاداتی برای تحقیقات آینده

مطالعات میدانی عمیق :انجام پژوهش‌های کیفی و میدانی در مقیاس محلی برای واکاوی دقیق‌تر راهبردهای سازگاری خانوارهای روستایی و نقش سرمایه‌های محلی.

تحلیل سناریوهای آینده :استفاده از روش‌های آینده‌پژوهی برای مدلسازی پیامدهای بلندمدت تغییرات اقلیمی و ارزیابی اثربخشی سیاست‌های مختلف سازگاری.

سنجش تاب‌آوری :طراحی و بومی‌سازی شاخص‌های کمی برای سنجش سطح تاب‌آوری سکونتگاه‌های روستایی در برابر خشکسالی.

تلفیق دانش بومی و علمی :انجام مطالعاتی با هدف مستندسازی و تلفیق نظام‌مند دانش بومی روستاییان در زمینه مدیریت **خشکسالی با دانش نوین.**

منابع

جوان، ف.، زنگنه، م.، و فلاح، م. (۱۳۹۸). تحلیل اثرات خشکسالی بر تخریب سرزمین در مناطق روستایی (مطالعه موردی: شهرستان سبزوار) .مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، ۹)۳۴(، ۱-۲۰.

حسینی، س. ع.، ذوالفقاری، ح.، و محمدی، ب. (۱۴۰۰). تحلیل روند تغییرات دمایی ایران در نیم قرن گذشته .تحقیقات جغرافیایی، ۳۶)۱(، ۱-۱۵.

شریفی‌نیا، م.، و احمدی، ع. (۱۴۰۰). تحلیل راهبردهای معیشتی پایدار در مواجهه با خشکسالی در نواحی روستایی استان فارس .تحقیقات اقتصاد و توسعه کشاورزی ایران، ۵۲)۲(، ۳۱۹-۳۳۸.

عزیزپور، ف.، قدیری معصوم، م.، و طاهرخانی، م. (۱۳۹۹). تبیین پیامدهای اجتماعی-اقتصادی خشکسالی بر سکونتگاه‌های روستایی (مورد مطالعه: دهستان میانکوه شرقی، شهرستان اردل) .مطالعات برنامه ریزی سکونتگاه های انسانی، ۱۵)۱(، ۲۱۹-۲۳۶.

کاویانی، م. ر.، علیجانی، ب.، و ضیائیان، پ. (۱۳۹۹). تغییرپذیری الگوهای بارش ایران تحت تأثیر تغییرات اقلیمی .تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۱)۳(، ۶۵۱-۶۶۴.

کلوندی، ر.، و سلیمانی، م. (۱۳۹۸). راهبردهای سازگاری کشاورزان در برابر خشکسالی در مناطق روستایی شهرستان اندیمشک .مطالعات برنامه ریزی سکونتگاه های انسانی، ۱۴)۴(، ۱۰۱۷-۱۰۳۴.

کوئنتین، وی .(2020) .روش‌های تحقیق در علوم اجتماعی)ترجمه فارسی). نشر دانژه.

مرکز آمار ایران) .۱۴۰۲ .(نتایج سرشماری عمومی نفوس و مسکن ۱۴۰۰.

وزارت جهاد کشاورزی) .۱۴۰۱ .(سالنامه آماری کشاورزی سال زراعی ۱۴۰۰-۱۳۹۹.

FAO. (2020). The State of Food and Agriculture 2020: Overcoming water challenges in agriculture. Rome.

IPCC. (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

IPCC. (2022). Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.

Madani, K. (2014). Water management in Iran: what is causing the looming crisis? Journal of Environmental Studies and Sciences, 4(4), 315-328.

Mendelsohn, R., Dinar, A., & Williams, L. (2006). The distributional impact of climate change on rich and poor countries. Environment and Development Economics, 11(2), 159-178.

Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. Journal of Hydrology, 391(1-2), 202-216.

Sandelowski, M., & Barroso, J. (2006). Handbook for synthesizing qualitative research. Springer Publishing Company.

Slegers, M. F. W. (2008). "If only it would rain": Farmers' perceptions of rainfall and drought in semi-arid central Tanzania. Journal of Arid Environments, 72(11), 2106-2123.

Stringer, L. C., Dyer, J. C., Reed, M. S., Dougill, A. J., Twyman, C., & Mkwambisi, D. (2009). Adaptations to climate change, drought and desertification: local insights to enhance policy in southern Africa. Environmental Science & Policy, 12(7), 748-765.

Trenberth, K. E., Dai, A., van der Schrier, G., Jones, P. D., Barichivich, J., Briffa, K. R., & Sheffield, J. (2014). Global warming and changes in drought. Nature Climate Change, 4(1), 17-22.

Wilhite, D. A. (2000). Drought as a natural hazard: concepts and definitions. In Drought: A global assessment (pp. 3-18). Routledge.

Wilhite, D. A., & Glantz, M. H. (1985). Understanding the drought phenomenon: the role of definitions. Water International, 10(3), 111-120.

World Bank. (2023). Rural population (% of total population). World Development Indicators.

AliReza Jamshidi[1]*, Davood Jamini[2]

1- Assistant Professor, Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, Urmia University, Urmia, Iran

2- Department of Geomorphology, Faculty of Natural Resources, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran (part-time researcher at Kurdistan Studies Institute, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran)

* Corresponding author: al.jamshidi@urmia.ac.ir

Abstract

This study aims to investigate the impacts of climate change, focusing on the phenomenon of drought, on rural settlements and to analyze the resulting multidimensional challenges. Conducted through a library research method with a descriptive-analytical approach, the study systematically gathered data from reputable domestic and international studies. The findings reveal that drought, as a creeping threat, creates a vicious cycle of vulnerability across three key dimensions: environmental (depletion of water resources, soil degradation), economic (collapse of agriculture, unemployment, and poverty), and social (forced migration, erosion of social capital). These dimensions systematically reinforce each other, seriously jeopardizing the sustainability of rural settlements. The results underscore the necessity of shifting from crisis management to risk management and developing integrated adaptation strategies. Core recommendations include revising cropping patterns, diversifying rural livelihoods, strengthening local institutions for participatory resource management, and promoting climate-smart agriculture to enhance resilience. This study highlights the urgent need for policymakers to address this multidimensional crisis and for future research to focus on local-scale investigations.

Keywords: Climate Change, Drought, Rural Settlements, Vulnerability, Resilience, Adaptation.

سومین کنفرانس ملی آب و هواشناسی ایران (با محوریت تغییر اقلیم)
The 3rd National Conference on Climatology of Iran (Focusing on Climate Change)
ارومیه ۱۶ مهر ۱۴۰۴

بررسی روند تغییرات تبخیر روزانه در استان لرستان

وحید پورقاسم[۱]، کیوان خلیلی[۲*]، حسین رضایی[۳]، محمد ناظری تهرودی[۴]

۱ - دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
۲- دانشیار، دانشگاه ارومیه، پژوهشکده مطالعات دریاچه ارومیه.
۳- استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
۴- استادیار، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران.
(* نویسنده مسئول: Email: k.khalili@urmia.ac.ir)

چکیده

این مطالعه به بررسی روند تغییرات ماهانه و سالانه تبخیر از تشت در هشت ایستگاه استان لرستان با استفاده از آزمون ناپارامتریک من-کندال پرداخت. نتایج نشان داد روند تبخیر از الگوی فصلی و منطقه‌ای مشخصی تبعیت می‌کند. به‌طور کلی، در ماه‌های سرد سال (اکتبر تا فوریه) روند کاهشی معنادار و در ماه‌های گرم (مارس تا سپتامبر) روند افزایشی غالب بود. در مقیاس سالانه، ایستگاه‌های خرم‌آباد، کوهدشت و نورآباد روند افزایشی غیرمعنادار و ایستگاه‌های بروجرد، دورود و پلدختر روند کاهشی معنادار نشان دادند. بیشترین کاهش سالانه در ایستگاه پلدختر (۵۳/۴ میلی‌متر در سال) و بیشترین افزایش در ایستگاه نورآباد (۱۱/۶ میلی‌متر در سال) مشاهده شد. این تغییرات عمدتاً تحت تأثیر عواملی چون دمای هوا، سرعت باد، رطوبت نسبی و پدیده وارونگی دمایی قرار داشت که همخوانی قابل توجهی با یافته‌های مطالعات پیشین در ایران و دیگر مناطق خشک جهان دارد.

کلید واژه‌ها: تبخیر از تشت، شیب سن، لرستان، من-کندال

مقدمه

تبخیر از تشت یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های چرخه هیدرولوژیکی است که نقش کلیدی در برآورد نیاز آبی، مدیریت منابع آب، طراحی سیستم‌های آبیاری و تحلیل تغییرات اقلیمی ایفا می‌کند. تبخیر از تشت (Ep) یک شاخص مهم برای تقاضای تبخیر جوی است که به طور گسترده در طراحی منابع آب منطقه‌ای و سیستم‌های آبیاری استفاده می‌شود (رودریک و فارکوهار[119]، ۲۰۰۲، آزورین-مولینا[120] و همکاران، ۲۰۱۵). این یک جزء مهم هیدرولوژیکی در درک تعادل چرخه‌های آب و انرژی در زمینه تغییرات آب و هوایی جهانی است (وانگ و همکاران، ۲۰۱۷، یانگ و یانگ، ۲۰۱۲، لی و همکاران، ۲۰۱۳). بسیاری از مطالعات، روندها و تغییرات تبخیر از تشت را در برخی از مناطق جهان تجزیه و تحلیل کرده‌اند (لیو[121] و همکاران، ۲۰۰۴، لیو و همکاران، ۲۰۱۱، ژانگ و همکاران، ۲۰۱۵)، با این حال، به طور گسترده تشخیص داده شده است که تبخیر هنوز یکی از مولفه‌های کمتر درک شده چرخه هیدرولوژیکی، به ویژه در مناطقی که منابع آب کمیاب است، می‌باشد (گویال[122] و همکاران، ۲۰۱۴، ولی پور و اسلامیان، ۲۰۱۴، مجیدی و همکاران، ۲۰۱۵). مشاهده، برآورد و پیش‌بینی دقیق تبخیر از تشت برای مدیریت یکپارچه منابع آب، کنترل آبیاری و تولید محصولات کشاورزی در هر دو مقیاس مزرعه و منطقه‌ای از اهمیت بالایی برخوردار است (رحیمی‌خوب و همکاران، ۲۰۱۳، شیری و همکاران، ۲۰۱۴).

مطالعات اخیر، تعامل پیچیده‌ای را بین تبخیر-تعرق و تبخیر از تشت نشان می‌دهند که مفاهیم مهمی برای درک اتلاف آب در زمینه‌های مختلف دارد. برای مثال، پژوهش ژانگ و همکاران (۲۰۱۶) افزایش قابل توجهی در تبخیر-تعرق جهانی خشکی‌ها از سال ۱۹۸۱ تا ۲۰۱۲ را نشان می‌دهد که عمدتاً توسط افزایش تعرق و تبخیر از پوشش گیاهی هدایت شده است. این مطالعه نشان می‌دهد که تغییرات در پوشش گیاهی و تغییرپذیری اقلیمی به طور معناداری بر نرخ‌های تبخیر تأثیر می‌گذارند و در نتیجه بر روندهای تبخیر از تشت اثر می‌گذارند. مکمل این یافته‌ها، هو و همکاران (۲۰۱۹) تأکید می‌کنند که رابطه بین فراوانی نماتدهای خاک و ترکیب گروه‌های عملکردی در مقیاس جهانی می‌تواند بینش‌هایی درباره سلامت خاک ارائه دهد که به طور غیرمستقیم بر فرآیندهای تبخیر تأثیر می‌گذارد. از آنجایی که سلامت خاک بر بهره‌وری پوشش گیاهی تأثیر می‌گذارد، درک این روابط می‌تواند مدل‌های پیش‌بینی روندهای تبخیر از تشت را بهبود بخشد.

119 - Roderick & Farquhar

120 - Azorin-Molina

121 - Liu

122 - Goyal

پیشرفت‌ها در تکنیک‌های اندازه‌گیری برای برآورد دقیق روندهای تبخیر از تشت حیاتی هستند. طبری و معروفی (۲۰۱۱) یک تحلیل مقایسه‌ای از روش‌های مختلف برای برآورد تبخیر از تشت انجام دادند و از تکنیک‌های یادگیری ماشین برای افزایش دقت پیش‌بینی استفاده کردند. یافته‌های آن‌ها نشان می‌دهد که پارامترهای هواشناسی کلیدی - از جمله دما، رطوبت نسبی، سرعت باد و مدت زمان تابش خورشید - برای برآوردهای دقیق ضروری هستند. این چارچوب روش‌شناختی، مسیر امیدوارکننده‌ای برای تحقیقات آتی با هدف اصلاح پیش‌بینی‌های تبخیر از تشت ارائه می‌دهد.

علاوه بر این، شعبانی و همکاران (۲۰۲۰) از رویکردهای یادگیری ماشین مانند رگرسیون فرآیند گاوسی و مدل‌های جنگل تصادفی برای مدل‌سازی تبخیر از تشت استفاده کردند. تحلیل مقایسه‌ای آن‌ها نشان می‌دهد که ادغام تکنیک‌های محاسباتی پیشرفته می‌تواند به طور معناداری دقت برآوردهای تبخیر را بهبود بخشد و بنابراین به درک بهتر روندهای بلندمدت کمک کند.

برنامه‌ریزی دقیق و مدیریت قابل اعتماد منابع آب بدون پیش‌بینی دقیق پارامترهای هواشناسی و هیدرولوژیک امکان‌پذیر نیست. با وجود ماهیت تصادفی فرآیندهای هواشناسی و هیدرولوژیک، توسعه مدل‌های قادر به توصیف چنین پدیده‌های پیچیده‌ای روزبه‌روز در حال پیشرفت است. از سوی دیگر، در سال‌های اخیر به دلیل تغییر الگوی بارش و تغییرات آب‌وهوایی، مقادیر حدی رویدادهای هواشناسی نیز افزایش یافته است (زمانی و همکاران، ۲۰۱۸؛ تهرودی و همکاران، ۲۰۱۹؛ رمضانی و همکاران، ۲۰۱۹؛ احمدی و همکاران، ۲۰۲۲) که این امر نیاز به بررسی روند تغییرات مقادیر تبخیر را برجسته می‌کند. بر این اساس در این مطالعه به بررسی روند تغییرات تبخیر در ایستگاه‌های استان لرستان با استفاده از آزمون من-کندال اصلاح شده با حذف اثرات خودهمبستگی داخلی پرداخته شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، ایستگاه‌های تبخیرسنجی در استان لرستان می‌باشد. در این مطالعه از مقادیر تبخیر از تشت ایستگاه‌های موجود در استان لرستان (مجموع ۸ ایستگاه با پراکندگی مناسب) در مقیاس روزانه استفاده شده است. موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه به صورت شکل ۱ ارائه شده است.

در این مطالعه جهت بررسی روند تغییرات مقادیر مورد مطالعه از آزمون من-کندال اصلاح شده استفاده شد که جهت اطلاع از آماره‌های آن می‌توان به (من، ۱۹۴۵؛ کندال، ۱۹۶۳؛ حامد و رائو، ۱۹۹۸؛ کومار و همکاران، ۲۰۰۹؛ خلیلی و همکاران، ۲۰۱۶؛ خزیمه‌نژاد و تهرودی، ۲۰۱۹؛ احمدی و همکاران، ۲۰۱۸؛ تهرودی و همکاران، ۲۰۱۹) مراجعه کرد.

نتایج و بحث

روند تغییرات تبخیر از تشت در مقیاس ماهانه و سالانه با استفاده از آزمون من-کندال اصلاح شده مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج بررسی روند تغییرات (آماره آزمون من-کندال اصلاح شده و شیب خط روند) مقادیر تبخیر از تشت در دو مقیاس ماهانه و سالانه به صورت شکل ۲ و جدول ۱ ارائه شد.

جدول ۱- آماره شیب خط روند مقادیر تبخیر از تشت در ایستگاه‌های مورد مطالعه

مقیاس	پلدختر	نورآباد	کوهدشت	خرم آباد	دورود	بروجرد	الیگودرز	الشتر
October	-۹/۳۳	-۶/۲۴	-۳/۸۳	-۴/۳۵	-۴/۵۸	-۵/۹۴	-۴/۸۳	-۴/۰۷
November	-۵/۹۵	-۴/۹۲	-۲/۹۴	-۲/۸۳	-۵/۱۶	-۲/۸۴	-۲/۴۳	-۴/۱۲
December	-۱/۰۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
January	-۲/۱۹	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
February	-2.26	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
March	-۶/۸۶	۰/۰۰	۰/۰۰	۱/۴۵	۰/۰۰	۱/۴۳	۱/۲۱	۰/۰۰
April	۱/۰۳	۹/۹۵	۵/۴۰	۶/۹۰	۲/۵۸	-۰/۲۷	۴/۰۲	۵/۲۹
May	-۲/۲۴	۱۳/۳۴	۳/۶۱	۲/۴۴	-۱/۴۶	-۱/۳۸	-۱/۰۶	-۰/۸۲
June	-۴/۴۰	۳/۰۲	۴/۷۵	۳/۱۰	۱/۷۹	-۱/۵۵	۰/۲۹	۰/۳۶
July	-۵/۳۵	۱/۰۳	۱/۴۲	۲/۱۲	-۰/۱۶	-۲/۴۰	-۲/۷۰	-۰/۱۶
August	-۵/۹۹	-۰/۵۶	-۱/۱۵	۱/۶۹	-۳/۰۷	-۴/۷۱	-۲/۷۱	-۳/۰۰
September	-۶/۶۶	-۴/۶۶	-۱/۵۴	-۰/۹۱	-۳/۶۱	-۵/۸۸	-۴/۴۱	-۴/۳۶
Annual	-۵۳/۴۱	۱۱/۶۳	۹/۱۳	۱۰/۱۴	-۱۷/۱۵	-۲۷/۱۴	-۱۴/۵۸	-۱۱/۴۸

آزمون من-کندال کندال اصلاح شده یکی از روش‌های ناپارامتریک برای شناسایی روند در داده‌های سری زمانی است. مقادیر مثبت Z نشان‌دهنده روند افزایشی و مقادیر منفی بیانگر روند کاهشی هستند. اگر مقدار Z بین -۱.۹۶ تا +۱.۹۶ باشد، روند از نظر آماری معنادار نیست (در سطح اطمینان ۹۵٪). با توجه به شکل ۲ میتوان مشاهده کرد که در مقیاس ماهانه و در ماه‌های سرد سال (اکتبر تا فوریه) در بیشتر ایستگاه‌ها (به‌ویژه الشتر، الیگودرز، بروجرد، دورود و پلدختر) روند کاهشی معنادار ($Z < -1.96$) در تبخیر از تشت مشاهده می‌شود. در ایستگاه خرم‌آباد و کوهدشت در دسامبر و ژانویه روند کاهشی معنادار نیست (Z نزدیک به صفر)، که احتمالاً ناشی از تأثیر عوامل محلی مانند وارونگی دمایی یا تغییرات رطوبتی است. در اکتبر روند تغییرات کاهشی در ایستگاه خرم آباد غیرمعنی دار در سطح ۵ درصد و در سایر ایستگاه‌ها معنی‌دار گزارش شد. در November نیز ر.وند تغییرات کاهشی در مقادیر تبخیر از تشت ماهانه در همه ایستگاه‌ها به غیر از ایستگاه الشتر و الیگودرز معنیدار در سطح ۵ درصد می‌باشد.

در December ، January و February تغییرات معنی‌داری در هیچ یک از ایستگاه‌های مورد مطالعه در مقادیر تبخیر از تشت ماهانه مشاهده نشد. در March، تمام ایستگاه‌ها (به‌جز پلدختر و نوآباد) روند افزایشی معنادار در تبخیر از تشت ماهانه را نشان می‌دهند که احتمالاً به‌دلیل افزایش دما و کاهش بارندگی در فصل است که مطابق با یافته‌های طبری و معروفی (۲۰۱۱) و همچنین سروش و همکاران (۲۰۲۰) در بررسی روند تبخیر در ایران می‌باشد. در ماه April در همه

ایستگاه‌های مورد مطالعه به غیر از بروجرد روند تغییرات تبخیر افزایشی می‌باشد که تغییرات افزایشی در ایستگاه‌های الشتر و نورآباد در سطح ۵ درصد معنی‌دار می‌باشد. عمده تغییرات تبخیر از تشت در ماه May در ایستگاه‌های مورد مطالعه کاهشی بوده ولی تغییرات سه ایستگاه خرم آباد، کوهدشت و نورآباد افزایشی است که تنها ایستگاه نورآباد در سطح ۵ درصد معنی‌دار گزارش شد. در June روند تغییرات تبخیر از تشت در ۶ ایستگاه از ۸ ایستگاه افزایشی و غیر معنی‌دار و در دو ایستگاه دیگر کاهشی می باشد. در July تغییرات تبخیر از تشت در ۵ ایستگاه از ۸ ایستگاه کاهشی گزارش شده است و تغییرات معنی‌دار در سطح ۵ درصد تنها در ایستگاه الیگودرز مشاهده شد. در ایستگاه خرم آاد در August بر خلاف سایر ایستگاه‌های مورد مطالعه تغییرات افزایشی در مقادیر تبخیر از تشت مشاهده شده است. در این ماه روند تغییرات تبخیر از تشت در سایر ایستگاه‌ها کاهشی می‌باشد (الشتر و بروجرد در سطح ۵ درصد معنی‌دار). در September نیز تغییرات تبخیر از تشت در همه ایستگاه‌ها کاهشی می‌باشد که احتمالاً به دلیل کاهش دما و افزایش رطوبت در آغاز پاییز است. در این بین تغییرات کاهشی در همه ایستگاه‌ها به غیر از خرم آباد و کوهدشت در سطح ۵ درصد معنی‌دار می‌باشد.

از عوامل موثر در تبخیر می‌توان دمای هوا، سرعت باد و رطوبت نسبی را در نظر گرفت. افزایش دما معمولاً تبخیر را افزایش می‌دهد، اما در برخی مناطق کاهش سرعت باد یا رطوبت ممکن است اثر معکوس داشته باشد. در ایستگاه‌هایی مانند پلدختر، کاهش سرعت باد می‌تواند دلیل روند کاهشی تبخیر باشد. از طرفی افزایش رطوبت (به‌ویژه در ماه‌های سرد سال) می‌تواند تبخیر را کاهش دهد (رودریک و فرکوهار، ۲۰۰۲ و شهیدی و همکاران، ۲۰۲۰).

در مقیاس سالانه روند تغییرات تبخیر از تشت در ایستگاه‌های خرم آباد، کوهدشت و نورآباد افزایشی و در سایر ایستگاه‌های مورد مطالعه کاهشی می‌باشد. تغییرات روند افزایشی در مقادیر تبخیر از تشت در ایستگاه‌های یاد شده در سطح ۵ درصد معنی‌دار نمی‌باشد. در مقیاس سالانه روند کاهشی معنادار در ایستگاه‌های بروجرد، دورود و پلدختر رخ داده است ($Z < -1.96$) که می‌تواند ناشی از کاهش سرعت باد، افزایش ابرناکی یا کاهش دمای میانگین سالانه باشد (دین‌پژوه و همکاران، ۱۲۰۱۱).

مطالعات طبری و حسین‌زاده طلایی (۲۰۱۴) نیز در شمال غرب ایران کاهش تبخیر از تشت را گزارش کرده‌اند که با نتایج ایستگاه‌های دارای روند کاهشی همخوانی دارد. لیو و همکاران (۲۰۰۴) نیز در چین نشان دادند که افزایش تبخیر در مناطق خشک‌تر (مانند خرم‌آباد در این مطالعه) می‌تواند به دلیل کاهش بارندگی و افزایش دما باشد. به طور کلی نتایج بررسی روند تغییرات تبخیر از تشت نشان داد که ایستگاه‌های کوهستانی (مانند بروجرد و نورآباد) روندهای متفاوتی نسبت به ایستگاه‌های کم‌ارتفاع (مانند خرم‌آباد و پلدختر) نشان می‌دهند. با توجه به جدول ۱ نیز می‌توان مشاهده کرد که شیب خط روند در ماه‌های مختلف مقادیر متفاوتی را ارائه می‌کند، در مقیاس سالانه بیشترین تغییرات کاهشی برای ایستگاه پلدختر

با کاهش ۵۳/۴۱ میلی‌متر به ازای هر سال می‌باشد و بیشترین افزایش ۹/۱۳، ۱۰/۱۴ و ۱۱/۶۳ میلی‌متر به ازای هر سال به ترتیب در ایستگاه‌های کوهدشت، خرم آباد و نورآباد رخ داده است.

نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که روند تغییرات تبخیر از تشت در ایستگاه‌های مورد بررسی از الگوی فصلی و منطقه‌ای مشخصی پیروی می‌کند. در مقیاس ماهانه، بیشترین کاهش معنادار (با مقادیر Z منفی و کمتر از ۱.۹۶-) در ماه‌های سرد (اکتبر تا فوریه) رخ داده است. در ایستگاه‌های الشتر، الیگودرز، بروجرد، دورود، خرم آباد، کوهدشت، نورآباد و پلدختر شیب روند کاهشی به ترتیب ۱۱.۵-، ۱۴.۵-، ۲۷.۱-، ۱۷.۱-، ۱۰.۱+، ۹.۲+، ۱۱.۶+ و ۵۳.۴- میلی‌متر در سال بوده است. این تغییرات احتمالاً تحت تأثیر افزایش دما و کاهش بارندگی در فصل گرم است، که با یافته‌های مطالعات پیشین در ایران (طبری و معروفی، ۲۰۱۱) و دیگر مناطق خشک (لیو و همکاران، ۲۰۰۴) همخوانی دارد. مطالعه حاضر به وضوح نشان می‌دهد که پدیده تبخیر از تشت در منطقه مورد بررسی تحت تأثیر تغییرات اقلیمی قرار گرفته و الگوهای آن دیگر ثابت نیست. نتیجه بنیادی این تحقیق وجود یک تغییراقلیمی منطقه‌ای با ویژگی‌های متمایز است که خود را به صورت یک "واگرایی فصلی" نشان می‌دهد. در فصل سرد (اکتبر تا فوریه): کاهش معنادار تبخیر رخ داده است. این امر می‌تواند ناشی از کاهش رطوبت هوا، افزایش پدیده وارونگی دمایی که تابش خورشید و در نتیجه انرژی لازم برای تبخیر را کاهش می‌دهد، و یا تضعیف سامانه‌های باران‌زا باشد. در فصل گرم: وجود ایستگاه‌هایی با شیب مثبت (مانند خرم‌آباد، نورآباد و کوهدشت) حاکی از افزایش بالقوه تبخیر در این فصل است. یافته‌های این مطالعه پیامدهای مهم و فوری برای مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی کشاورزی در استان لرستان و مناطق مشابه دارد که می‌تواند بازنگری در برنامه‌های آبیاری و کشاورزی، مدیریت کارایی مخازن سدها و ذخایر آب و هشدار زودهنگام برای تنش آبیرا شامل شود.

منابع

Ahmadi, F., Nazeri Tahroudi, M., Mirabbasi, R., & Kumar, R. (2022). Spatiotemporal analysis of precipitation and temperature concentration using PCI and TCI: a case study of Khuzestan Province, Iran. Theoretical and Applied Climatology, 1-18.

Ahmadi, F., Nazeri Tahroudi, M., Mirabbasi, R., Khalili, K., & Jhajharia, D. (2018). Spatiotemporal trend and abrupt change analysis of temperature in Iran. Meteorological Applications, 25(2), 314-321.

Azorin-Molina, C., Vicente-Serrano, S. M., Sanchez-Lorenzo, A., McVicar, T. R., Morán-Tejeda, E., Revuelto, J., ... & Tomas-Burguera, M. (2015). Atmospheric evaporative demand observations, estimates and driving factors in Spain (1961–2011). Journal of Hydrology, 523, 262-277.

Dinpashoh, Y., Jhajharia, D., Fakheri-Fard, A., Singh, V. P., & Kahya, E. (2011). Trends in reference crop evapotranspiration over Iran. Journal of Hydrology, 399(3-4), 422-433.

Goyal, M.., Bharti, Birendra., Quilty, John M.., Adamowski, J.., & Pandey, A.. (2014). Modeling of daily pan evaporation in sub tropical climates using ANN, LS-SVR, Fuzzy Logic, and ANFIS. Expert Syst. Appl. , 41 , 5267-5276 . http://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.02.047

Hou, J., Cui, F., Ding, Y., Dou, X., Duan, Z., Han, G., ... & Zhuang, H. (2019). Management algorithm for interrupting mother-to-child transmission of hepatitis B virus. Clinical Gastroenterology and Hepatology, 17(10), 1929-1936.

Kendall, M. G. (1963). The advanced theory of statistics: in 3 volumes. C. Griffin.

Khalili, K., Tahoudi, M. N., Mirabbasi, R., & Ahmadi, F. (2016). Investigation of spatial and temporal variability of precipitation in Iran over the last half century. Stochastic environmental research and risk assessment, 30, 1205-1221.

Khozeymehnezhad, H., & Tahroudi, M. N. (2019). Annual and seasonal distribution pattern of rainfall in Iran and neighboring regions. Arabian Journal of Geosciences, 12(8), 271.

Kumar, S., Merwade, V., Kam, J., & Thurner, K. (2009). Streamflow trends in Indiana: effects of long term persistence, precipitation and subsurface drains. Journal of Hydrology, 374(1-2), 171-183.

Li, F., Huang, J., Zeng, G., Yuan, X., Li, X., Liang, J., ... & Bai, B. (2013). Spatial risk assessment and sources identification of heavy metals in surface sediments from the Dongting Lake, Middle China. Journal of Geochemical Exploration, 132, 75-83.

Liu, B., Xu, M., Henderson, M., & Gong, W. (2004). A spatial analysis of pan evaporation trends in China, 1955–2000. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 109(D15).

Liu, X., Luo, Y., Zhang, D., Zhang, M., & Liu, C. (2011). Recent changes in pan-evaporation dynamics in China. Geophysical Research Letters, 38(13).

Majidi, M., Alizadeh, A., Farid, A., & Vazifedoust, M. (2015). Estimating evaporation from lakes and reservoirs under limited data condition in a semi-arid region. Water resources management, 29, 3711-3733.

Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. Econometrica: Journal of the econometric society, 245-259.

Rahimikhoob, A., Asadi, M., & Mashal, M. (2013). A comparison between conventional and M5 model tree methods for converting pan evaporation to reference evapotranspiration for semi-arid region. Water resources management, 27, 4815-4826.

Raji, M., Tahroudi, M. N., Ye, F., & Dutta, J. (2022). Prediction of heterogeneous Fenton process in treatment of melanoidin-containing wastewater using data-based models. Journal of Environmental Management, 307, 114518.

Ramezani, Y., Tahroudi, M. N., & Ahmadi, F. (2019). Analyzing the droughts in Iran and its eastern neighboring countries using copula functions. Idojaras, 123(4), 435-453.

Roderick, M. L., & Farquhar, G. D. (2002). The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years. science, 298(5597), 1410-1411.

Shabani, S., Samadianfard, S., Sattari, M. T., Mosavi, A., Shamshirband, S., Kmet, T., & Várkonyi-Kóczy, A. R. (2020). Modeling pan evaporation using Gaussian process regression K-nearest neighbors random forest and support vector machines; comparative analysis. Atmosphere, 11(1), 66.

Shahidi, A., Ramezani, Y., Nazeri-Tahroudi, M., & Mohammadi, S. (2020). Application of vector autoregressive models to estimate pan evaporation values at the Salt Lake Basin, Iran. Idöjárás, 124(4).

Shiri, J., Marti, P., & Singh, V. P. (2014). Evaluation of gene expression programming approaches for estimating daily evaporation through spatial and temporal data scanning. Hydrological Processes, 28(3), 1215-1225.

Soroush, F., Fathian, F., Khabisi, F. S. H., & Kahya, E. (2020). Trends in pan evaporation and climate variables in Iran. Theoretical and Applied Climatology, 142, 407-432.

Tabari, H., & Marofi, S. (2011). Changes of pan evaporation in the west of Iran. Water Resources Management, 25, 97-111.

Tahroudi, M. N., Khalili, K., Ahmadi, F., Mirabbasi, R., & Jhajharia, D. (2019). Development and application of a new index for analyzing temperature concentration for Iran's climate. International Journal of Environmental Science and Technology, 16(6), 2693-2706.

Valipour, M., & Eslamian, S. (2014). Analysis of potential evapotranspiration using 11 modified temperature-based models. International Journal of Hydrology Science and Technology, 4(3), 192-207.

Wang, L., Kisi, O., Zounemat-Kermani, M., & Li, H. (2017). Pan evaporation modeling using six different heuristic computing methods in different climates of China. Journal of Hydrology, 544, 407-427.

Yang, H., & Yang, D. (2012). Climatic factors influencing changing pan evaporation across China from 1961 to 2001. Journal of Hydrology, 414, 184-193.

Zamani, R., Mirabbasi, R., Nazeri, M., Meshram, S. G., & Ahmadi, F. (2018). Spatio-temporal analysis of daily, seasonal and annual precipitation concentration in Jharkhand state, India. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 32(4), 1085-1097.

Zhang, Q., Qi, T., Li, J., Singh, V. P., & Wang, Z. (2015). Spatiotemporal variations of pan evaporation in China during 1960–2005: changing patterns and causes. International Journal of Climatology, 35(6), 903-912.

Zhang, Y., Peña-Arancibia, J. L., McVicar, T. R., Chiew, F. H., Vaze, J., Liu, C., ... & Pan, M. (2016). Multi-decadal trends in global terrestrial evapotranspiration and its components. Scientific reports, 6(1), 19124.

Investigation the trend of daily evaporation changes in Lorestan Province

Vahid Pourghasem[1], Keivan Khalili[2]*, Hossein Rezaie[3], Mohammad Nazeri Tahroudi[4]

M.Sc. Student, Department of Water Engineering, Urmia University, Urmia, Iran.
Associate Professor, Urmia Lake Research Institute, Urmia University, Urmia, Iran. Email: k.khalili@urmia.ac.ir
Professor, Department of Water Engineering, Urmia University, Urmia, Iran. Email: h.rezaie@urmia.ac.ir

Assistant Professor, Department of Water Engineering, Lorestan University, Khorramabad, Iran. Email: nazeri.mh@lu.ac.ir
* Corresponding Email Address: k.khalili@urmia.ac.ir

Abstract

This study investigated the monthly and annual trends of pan evaporation in eight stations in Lorestan Province using the non-parametric Mann-Kendall test. The results indicated that the evaporation trend follows a distinct seasonal and regional pattern. Overall, a significant decreasing trend was observed during the cold months (October to February), while an increasing trend was dominant in the warm months (March to September). On an annual scale, Khorramabad, Koohdasht, and Noorabad stations showed a non-significant increasing trend, whereas Borujerd, Dorud, and Poldokhtar stations exhibited a significant decreasing trend. The highest annual decrease was observed at Poldokhtar station (53.4 mm per year), and the highest increase was recorded at Noorabad station (11.6 mm per year). These changes were primarily influenced by factors such as air temperature, wind speed, relative humidity, and temperature inversion phenomena, which show considerable consistency with previous studies conducted in Iran and other arid regions of the world.

Keywords: Lorestan, Mann-Kendall, Pan evaporation, Sen’s slope.

واکاوی تغییرات متغیرهای اقلیمی در شهر تبریز

فرحناز خرم آبادی[۱]

۱- نویسنده مسئول : دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، دانشکده جغرافیا و برنامه ریزی،دانشگاه اصفهان

ایمیل : Farahnaz.khoramabadi@yahoo.com

سهیلا سلمانی[۲]

۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد دانشکده جغرافیا و برنامه ریزی دانشگاه تبریز

ایمیل :Soheilaslmni@gmail.com

چکیده:

این پژوهش به بررسی روند تغییرات متغیرهای اقلیمی در شهر تبریز به‌عنوان یکی از کلان‌شهرهای مهم ایران می‌پردازد. با توجه به نقش فعالیت‌های انسانی و پدیده جزیره گرمایی شهری، تحلیل تغییرات اقلیمی در مقیاس محلی ضروری است. داده‌های اقلیمی شامل دما، رطوبت، بارش، فشار هوا و تبخیر بوده و با آزمون ناپارامتری پتی برای شناسایی نقاط شکست تحلیل شدند. نتایج نشان داد متغیرهای دمای حداقل، دمای حداکثر، دمای متوسط و رطوبت نسبی دارای تغییرات معنی‌دار ($p<0.05$)هستند. روند کلی حاکی از افزایش دما و کاهش رطوبت نسبی است. در مقابل، بارش، فشار هوا، ابرناکی، تبخیر و نقطه شبنم تغییر معنی‌داری نشان ندادند. به طور کلی، تبریز در حال تجربه گرمایش اقلیمی همراه با کاهش رطوبت نسبی است که می‌تواند بر آسایش حرارتی، مصرف انرژی و منابع آبی تأثیرگذار باشد.

کلید واژه: تغییرات اقلیمی،تبریز،آزمون پتی، رطوبت نسبی

مقدمه:

شهر و اقلیم که دو سیستم انسان‌ساخت و طبیعی هستند، تأثیرگذاری تنگاتنگی بر یکدیگر دارند. شهرها عناصر شهری و سبک معماری و عملکرد آن‌ها همواره از عناصر و عوامل آب و هوایی متأثر بوده و هستند. این تأثیرپذیری تا قبل از پیدایش شهرهای بزرگ و مادر شهرها تقریباً از یک‌سویه بوده و از آن به بعد شهرها نیز در اوضاع اقلیمی فضای پیرامونی خود تأثیر گذاشته و تغییرات اقلیمی میکرو را پدید آورده‌اند(زمردیان،۱۳۸۶ : ۱۴۹). بنابراین شهرها همواره تحت تأثیر نیروها و عوامل گوناگونی شکل‌گرفته و گسترش می‌یابند و ازلحاظ کالبد بزرگ‌تر و ازلحاظ ساخت پیچیده‌تر می‌شوند. این تغییرات اثرات متفاوتی بر آب‌وهوا در مقیاس محلی و جهانی ایجاد کرده و موجبات تغییر اقلیم در شهرها را فراهم آورده است (Mi et al,2018:583)

امروزه موضوع تغییر اقلیم به دلیل پیامدهای زیست‌محیطی، اقتصادی، اجتماعی و حتی سیاسی به یکی از مباحث مهم برای آشکارسازی نمودهای مختلف این پدیده تبدیل‌شده است(Moghimi et al,2017:10)

بخشی از دلایل تغییر اقلیم ناشی از افزایش گازهای گلخانه‌ای در اثر فعالیت‌های انسان و صنعتی شدن کشورهاست که منجر به افزایش دمای کره زمین و افزایش بلایای طبیعی می‌شود . فعالیت‌های بشر، وضعیت جوی کره زمین را تغییر می‌دهد و باعث بروز تحولات مخربی بر روی خشک‌سالی، رشد و نمو گیاهان، تنوع زیستی، خصوصیات خاک، جنگل‌ها و آب‌های زیرزمینی و درنتیجه تغییر اقلیم می‌شود (Sol Hart and Feldman, 2018:3)

یکی از چالش‌های اصلی شهرها در این زمینه افزایش منابع حرارتی است که به پدیده جزیره گرمایی مشهور است. جزایر حرارتی شهر نتیجه تأثیرات پیچیده فرایندهای شهری و جز ریز اقلیم آن بوده است و این پدیده موجب شده شهرها را هوای گرم در برگیرد.

شرایط گرمایی جدید در شهرها بر مصرف انرژی و آسایش حرارتی در مقیاس کلان اثرگذار است و خسارات سنگینی را به بار می‌آورد (Swain et al, 2014:3).

معمولاً پیشرفت و توسعه شهرها مؤثرترین عامل درشدت جزیره گرمایی شناخته می‌شود و از عوامل مهمی که سبب افزایش شدت اثر جزیره گرمایی و درنتیجه تغییر اقلیم شهری شده، رشد جمعیت است (Mazayedi and narengi,2016:134).

روش تحقیق

منطقه مورد مطالعه

موقعیت استان آذربایجان شرقی

استان آذربایجان شرقی در موقعیت جغرافیایی ۳۶ درجه و ۴۷ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۴۲ دقیقه عرض شمالی و ۴۵ درجه و ۳ دقیقه تا ۴۷ درجه و۴۳ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ قرار دارد. این استان از شمال به رودخانه ارس و جمهوری آذربایجان و نخجوان، از شرق به استان اردبیل ، از جنوب استان زنجان و آذربایجان غربی و از غرب به دریاچه ارومیه و استان آذربایجان غربی محدود است وسعت استان آذربایجان شرقی ۴۶۹۳۴۵ کیلومترمربع است که ۲/۷٪ وسعت کل کشور را شامل می‌شود. ازلحاظ تقسیمات کشوری این استان به ۱۸ شهرستان ، ۳۹ بخش، ۱۳۵ دهستان تقسیم می‌شود و مرکز آن شهر تبریز می‌باشد (سایت استانداری آذربایجان شرقی، ۱۳۹۱).

مطالعه موردی : شهر تبریز

شهر تبریز یکی از کلان‌شهرهای کشور می‌باشد که در غرب استان آذربایجان شرقی شمالی (درجه-دقیقه)۳۸/۰۸۰ و طول شرقی (درجه-دقیقه)۴۶/۲۹۲ و در منتهی‌الیه مشرق و جنوب شرق جلگه تبریز قرارگرفته است. این شهر از سمت شمال

به کوه‌های پکه چین و عون بن علی، از سمت شمال شرق به کوه‌های باباباغی و گوزنی، از سمت شرق به گردنه پایان و از سمت جنوب به دامنه‌های کوه سهند محدود شده است. تبریز از سمت شمال، جنوب و شرق به کوهستان و از سمت غرب به زمین‌های هموار دشت تبریز و شوره‌زارهای تلخه‌رود (آجی‌چای) محدودشده به شکل یک چاله نسبتاً بزرگ یا یک جلگه بین کوهی درآمده است. ارتفاع این شهر از سطح دریا از ۱۳۴۸ متر در سه‌راهی مرند تا ۱۵۶۱ متر در محله زعفرانیه متغیر بوده و شیب عمومی زمین‌های تبریز در زمستان‌ها

بسیار سرد و تابستان‌های خشک و گرم است. میانگین سالانه دمای تبریز ۱۴ درجه سانتی‌گراد است.(

میانگین بارندگی سالیانه تبریز مانند بیش از شهرهای ایران بسیار اندک بوده و درحالی‌که میزان بارندگی متوسط سالانه حدود ۳۳۰ میلی‌متر گزارش می‌شد اخیراً به ۲۹۰ میلی‌متر در سال کاهش‌یافته است. معمولاً در طول فصل تابستان، میزان بارندگی بسیار ناچیز بوده و به‌ندرت بارش رخ می‌دهد. میانگین بارش در تبریز در زمستان ۱۱۳/۳ میلی‌متر، در بهار ۱۲۱/۸ میلی‌متر، در تابستان ۲۰/۷ میلی‌متر و در پاییز ۷۴/۳ میلی‌متر است. تعداد روزهای یخبندان در طول سال به‌طور متوسط ۱۰۸/۲ روز است که عموماً از اواخر پاییز تا اواخر زمستان را در برمی‌گیرد.

توسان بارندگی سالانه از ۵۱۳/۳ میلی‌متر در سال‌های پربارش تا حداقل ۱۹۲/۴ میلی‌متر در سال‌های کم بارش گزارش‌شده است. شهر تبریز به‌عنوان یکی از کلان‌شهرهای کشور جمعیتی بالغبر ۱/۸ میلیون نفر را در خود جای‌داده است. به‌طوری‌که ۹۷/۲۸ درصد جمعیت شهری شهرستان تبریز و ۹۰/۴۶ درصد از کل جمعیت آن را به خود اختصاص داده است. همین‌طور ۳۷/۶۹ درصد از کل جمعیت استان در این شهر متمرکزشده است(گزارش‌های اقلیمی ایستگاه هواشناسی تبریز. ، ۱۴۰۳: ۱۹)

مواد و روش تحقیق

آزمون همگنی پتی

این آزمون توسط pettit (۱۹۷۹) ارائه شد که یک آزمون نا پارامتری است و نیازمند فرض نرمال بودن سری زمانی نمی‌باشد. این آزمون نیز دارای فرض صفر به‌صورت استقلال مقادیر مختلف سری زمانی از یکدیگر و همگنی آن‌ها است. در مقابل در صورتی شکستگی و ناپیوستگی در مقدار میانگین سری زمانی وجود داشته باشد، مطابق فرض یک این آزمون، سری زمانی ناهمگن است. این روش آزمون همگنی نیز همچون آزمون بیشاند دریافتن ناهمگنی‌های نقاط میانی سری زمانی توانایی بیشتری داشته و ازجمله آزمون‌هایی است که زمان بروز ناهمگنی را گزارش می‌کند(کاستا و سوارس[123]، ۲۰۰۹: ۱۲۷) .

123 Costa and Soares

در این آزمون، ابتدا مقادیر Y_i در سری زمانی بر اساس مقدارشان مرتب می‌شوند و رتبه‌های r_i برای مقادیر متناظر Y_i مشخص می‌شوند. سپس با استفاده از روابط ۱۱ و ۱۲ مقدار آماره X_k محاسبه‌شده و با مقادیر بحرانی ارائه‌شده توسط پتی مقایسه می‌شوند. سپس، با استفاده از روابط ۱۱ و ۱۲ مقدار آماره X_k محاسبه‌شده و با مقادیر بحرانی ارائه‌شده توسط پتی مقایسه می‌شوند. در صورت عبور آماره از مقادیر بحرانی، زمان

معادله ۱۱

$$Q = \max |S_d^*/n| 0 \le d \le n$$

رابطه ۱۲

$$X_y = 2\sum_{i=1} r_i - y(n+1)$$

مربوط به داده بیشینه X_k معادل زمان بروز ناهمگنی است. ویژگی هر یک $y = 1,2,\dots,n$ آماره‌های آزمون برای بررسی صحت فرضیات در جدول ۲ آورده شده است.

نتایج و بحث

نتایج آزمون پتی (Pettitt's test) را برای مقایسه میانگین های متغیرهای اقلیمی مورد مطالعه نشان میدهد. این آزمون برای شناسایی تغییرات ناگهانی یا نقاط شکست در داده های سری زمانی استفاده می شود. در ادامه تفسیر ستونهای جدول آمده است: ستون «ردیف» شماره ردیف داده ها را نشان می دهد، ستون «توضیحات» نام متغیرهای اقلیمی مورد مطالعه را مشخص می‌کند، ستون های «Mu1» و «Mu2» میانگین متغیر قبل و بعد از نقطه تغییر شناسایی شده را ارائه می دهند، و ستون «p-value» مقدار احتمال آزمون را نشان می دهد. اگر این مقدار کمتر از سطح معنی داری مشخص شده (۰.۰۵) باشد، فرض صفر مبنی بر عدم وجود نقطه شکست رد می شود و نتیجه گرفته می شود که تغییر معنی داری در میانگین وجود دارد.

بررسی متغیرهای اقلیمی نشان می‌دهد که برخی از آن‌ها مانند دمای حداقل، دمای حداکثر ، دمای متوسط ماهانه، رطوبت نسبی ماهانه و حداقل رطوبت نسبی ، دارای مقادیر p-value کمتر از ۰.۰۵ هستند؛ بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که این متغیرها دارای تغییرات ناگهانی و معنی‌دار در میانگین هستند. به‌عنوان نمونه، در متغیر دمای حداقل ، میانگین دما از ۰/۸۷۲ قبل از نقطه تغییر، به ۱/۹۷۲ پس از آن افزایش یافته است و در متغیر دمای حداکثر نیز الگوی مشابهی از افزایش مشاهده می‌شود.

از سوی دیگر، متغیرهایی مانند بارش ۲۴ ساعته، ابرناکی ماهانه، تبخیر ماهانه ونقطه شبنم ماهانه دارای p-value بزرگ‌تر از ۰/۰۵ هستند؛ در نتیجه، در این متغیرها تغییرات معنی‌داری در میانگین وجود ندارد .برای مثال، مقدار p-value برای متغیر بارش ۲۴ ساعته برابر با ۰/۶۶۷ است که نشان‌دهنده ثبات در الگوی بارش است. همچنین، در متغیر میانگین ابرناکی در حدود۰/۷۴۹ بدون تغییر باقی مانده است.

اولاً، افزایش دما در متغیرهای حداقل دما و حداکثر می‌تواند با تقویت پرفشارهای گرم‌تر در منطقه مرتبط باشد؛ زیرا به‌طور کلی پرفشارها موجب افزایش دما و کاهش بارش می‌شوند، در حالی که کم‌فشارها باعث خنک شدن و افزایش بارندگی هستند. بنابراین، مشاهده افزایش دما می‌تواند نشانه‌ای از تأثیر پرفشارها یا تغییرات در الگوهای جوی بزرگ‌مقیاس مانند نوسانات اطلس شمالی باشد.

ثانیاً، کاهش معنی‌دار رطوبت نسبی در متغیرهای میانگین رطوبت نسبی و حداقل رطوبت نسبی نیز می‌تواند ناشی از غلبه شرایط پرفشار و هوای خشک در منطقه باشد؛ این کاهش رطوبت ممکن است نشان‌دهنده خشکسالی‌های محلی یا کاهش بارش و تبخیرپذیری بیشتر در اثر افزایش دما باشد.

در مقابل، عدم تغییرات معنی‌دار در بارش و ابرناکی نیز قابل توجه است. برای مثال، ثبات در میانگین بارش و ابرناکی حاکی از آن است که الگوهای کم‌فشار و پرفشار مؤثر بر بارش و پوشش ابری، در طول دوره مورد مطالعه نسبتاً پایدار باقی مانده‌اند.

در مجموع، می‌توان گفت که افزایش دما و کاهش رطوبت نسبی احتمالاً ناشی از تغییرات اقلیمی و تحول در ساختارهای فشار سینوپتیکی در منطقه بوده، در حالی که ثبات در بارش و ابرناکی نشان‌دهنده پایداری نسبی برخی از اجزای اقلیمی در همین بازه زمانی است.

نتایج آزمون (Pettitt's test) برای مقایسه میانگین‌های متغیرهای اقلیمی موردمطالعه

ردیف	توضیحات	Mu1	Mu2	p-value	Apha
1	tmin_min	0.872	1.972	0.021	0.05
2	tmax_max	24.039	25.619	0.000	
3	rrr24	252.452	----	0.667	
4	tm_m	11.976	13.365	0.000	
5	p0m_m	864.271	----	0.708	
6	Umm	54.332	50.285	0.001	
7	nm_m	3.150	----	0.749	
8	ewm_m	7.456	----	0.923	
9	tdm_m	1.443	----	0.551	
10	tmax_m	17.800	19.552	0.000	
11	tmin_m	6.748	7.899	0.000	
12	umax_m	71.622	68.080	0.000	

13	umin_m	37.068	32.647	0.000	

نتیجه گیری

بر اساس یافته‌های حاصل از آزمون همگنی ناپارامتری پتی (Pettitt's test) بر روی سری‌های زمانی متغیرهای اقلیمی شهر تبریز، می‌توان به نتایج کلیدی زیر دست یافت:

گرمایش اقلیمی مشهود: شهر تبریز در حال تجربه یک روند گرمایشی معنی‌دار است. این افزایش دما در تمامی شاخص‌های دمایی شامل دمای حداقل(tmin_min) ، دمای حداکثر(tmax_max) ، دمای متوسط ماهانه(tm_m) ، دمای حداکثر ماهانه (tmax_m)و دمای حداقل ماهانه (tmin_m) تأیید شده است. این یافته با گزارش کاهش میانگین بارندگی سالانه از ۳۳۰ به ۲۹۰ میلی‌متر همخوانی دارد و نشان‌دهنده تغییرات بنیادین در ساختار اقلیمی منطقه است.

کاهش رطوبت نسبی: هم‌زمان با افزایش دما، کاهش معنی‌داری در میانگین رطوبت نسبی ماهانه(Umm) ، حداکثر رطوبت نسبی ماهانه (umax_m) و حداقل رطوبت نسبی ماهانه (umin_m) مشاهده شده است. این امر نشان‌دهنده خشک‌تر شدن هوا در تبریز است که می‌تواند پیامدهای منفی برای آسایش حرارتی ساکنان، سلامت عمومی و منابع آبی داشته باشد.

ثبات نسبی در بارش و ابرناکی: برخلاف دما و رطوبت، متغیرهای بارش ۲۴ ساعته (rrr24) و ابرناکی ماهانه (nm_m) فاقد تغییرات معنی‌دار در میانگین بوده‌اند. این نتیجه حاکی از آن است که الگوهای بارشی و پوشش ابری در دوره مورد مطالعه تحت تأثیر تغییرات اقلیمی قرار نگرفته‌اند و نسبتاً پایدار مانده‌اند. ثبات در فشار هوا(p0m_m) ، تبخیر (ewm_m) و نقطه شبنم (tdm_m) نیز از این الگوی پایداری پشتیبانی می‌کند.

علل احتمالی تغییرات: افزایش دما و کاهش رطوبت نسبی احتمالاً ناشی از تغییر در الگوهای جوی بزرگ‌مقیاس، به ویژه تقویت سامانه‌های پرفشار در منطقه است. این سامانه‌ها معمولاً با هوای گرم و خشک همراه بوده و می‌توانند موجب کاهش بارش و افزایش دما شوند. همچنین، نقش فعالیت‌های انسانی و پدیده جزیره گرمایی شهری ناشی از رشد سریع جمعیت و گسترش کالبدی شهر، به عنوان عوامل تشدیدکننده این تغییرات محلی، غیرقابل انکار است.

در مجموع، نتایج این پژوهش هشداردهنده است و نشان می‌دهد که شهر تبریز در معرض تغییرات اقلیمی منفی، به ویژه گرمایش و خشک‌شدن هوا، قرار دارد. این تغییرات می‌تواند چالش‌های جدی را در حوزه‌های مدیریت منابع آب، مصرف انرژی، سلامت عمومی و برنامه‌ریزی شهری ایجاد کند. بنابراین، ضرورت دارد تا سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان شهری با در نظر گرفتن این یافته‌ها، راهبردهای سازگاری و کاهش اثرات تغییر اقلیم را در اولویت برنامه‌های توسعه شهری قرار دهند.

منابع و ماخذ

زمردیان، ج،۱۳۸۶کاربرد جغرافیای طبیعی در برنامهریزی شهری و روستایی، دانشگاه پیام نور، تهران،ص ۱۴۹

Costa, A. C.; and A. Soares. 2009. Homogenization of climate data: review and new perspectives using geostatistics. Mathematical Geosciences, 41: 291-305

Mozayedi, A., Narengi, M. (2016). Urban expansion and land use changes effect on climate elements, Journal of Geographic Science Applied Research, 40(16), 132-153.

Swain, S., Therivel, R., (2014). Environmental impacts of civil emergency plans and their exemption from SEA, Journal of Environmental Assessment Policy and Management, 16(3), 1-16.

Moghimi, E., mohamadi, H., Najafian, M. (2016). Heat change process, Heat island and plant covering warm day of Tehran city, Journal of Natural Geography, 38(10), 1-18.

Sol Hart, P., Feldman, L. (2018). Would it be better to not talk about climate change? The impact of climate change and air pollution frames on support for regulating power plant emissions, Journal of Environmental Psychology, 60, 1-8.

بررسی تاثیر تغییرات اقلیمی بر الگوهای گسترش شهری چالش ها و راهکارها مطالعه موردی : کلانشهر ارومیه

حسن حیدری[۱]

۱-استادیار گروه جغرافیا،دانشکده ادبیات و علوم انسانی،دانشگاه ارومیه،ارومیه،ایران

سهند آذر *[۲]

۲- دانشجوی دکتری آمایش سرمین، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول: S.azar@urmia.ac.ir

چکیده

تغییرات اقلیمی با پدیده‌هایی چون افزایش دما، خشکسالی، و سیلاب، الگوهای سنتی گسترش شهری را به چالش می‌کشد. این تغییرات می‌توانند منجر به مهاجرت‌های اجباری، فشار بر منابع آب و انرژی، و افزایش آسیب‌پذیری زیرساخت‌های شهری شوند و در نتیجه، توسعه شهرها را به سمت مناطق کم‌خطرتر یا با دسترسی بهتر به منابع سوق دهند. در نتیجه، برنامه‌ریزی شهری نیازمند توجه ویژه به سازگاری و تاب‌آوری در برابر این دگرگونی‌ها برای تضمین پایداری آینده است. هدف پژوهش حاضر، بررسی تاثیر تغییرات اقلیمی بر الگوهای گسترش شهری چالش ها و راهکارها مطالعه موردی: کلانشهر ارومیه می باشد. این پژوهش ازنظر هدف، کاربردی - نظری و ازنظر روش، توصیفی– تحلیلی است. اطلاعات و داده های موردنیاز از طریق روش کتابخانه ای جمع آوری شده است. در این پژوش از مدل AHP راف استفاده شده است. این مطالعه به بررسی ابعاد گوناگون تأثیر تغییرات اقلیمی بر الگوهای گسترش شهری در کلانشهر ارومیه می‌پردازد. با هدف شناسایی چالش‌های ناشی از این تغییرات و ارائه راهکارهای مؤثر برای مدیریت آنها، از رویکرد تحلیلی سلسله‌مراتبی فازی (Fuzzy AHP)استفاده شده است. نتایج حاصل از این پژوهش، ضمن اولویت‌بندی چالش‌ها و راهکارهای پیش‌رو، بینش‌های ارزشمندی را برای برنامه‌ریزان و مدیران شهری فراهم می‌آورد تا در راستای توسعه پایدار و تاب‌آور شهری در مواجهه با تغییرات اقلیمی گام بردارند و از گسترش ناپایدار شهری جلوگیری کنند.

کلید واژه ها: تغییرات اقلیمی، گسترش شهری، چالش ها و راهکارها، کلانشهر ارومیه، مدل AHP راف

مقدمه

تغییرات اقلیمی به عنوان یکی از مهمترین چالش های قرن حاضر، ساختارهای شهری را در ابعاد کالبدی، زیستمحیطی، اجتماعی و اقتصادی دستخوش تحولات عمیق کرده است. افزایش دما، تغییر الگوهای بارشی، تشدید رخدادهای حدی مانند سیلاب ها و امواج گرمایی، و افزایش سطح آب دریاها، برنامه ریزی شهری را با چالش های پیچیده ای مواجه ساخته است (احمد آباد پور،۱۴۰۳: ۳). تغییرات آب و هوایی به عنوان یکی از مهم ترین بحران های قرن بیست و یک تلقی می شود که تمام جنبه های زندگی بشر را تحت تاثیر خود قرار داده؛ و یک پدیده زیست محیطی جهانی است که بسیاری از کشورها در سراسر جهان را درگیر خود کرده است (king,etal2018:4). تغییرات آب و هوایی تقریباً همه جوامع و اقتصاد آن ها را تحت تاثیر قرار داده و مسائل و مشکلات زیست محیطی را در سراسر جهان ایجاد کرده است، اگر چه تاثیرات آن در مقیاس جهانی است، اما شواهد نشان می دهد که کشورهای فقیر متحمل فشار سنگینی می شوند (Zhang,etal2020:5). تغییرات آب و هوا یکی از مهم ترین مسائل قرن ۲۱ است. مشاهدات طبیعی تغییرات آب و هوایی از قرن بیستم (۱۹۴۵-۱۹۵۰) به شدت ظاهر شد، که این تغییرات بیش از دهه ها تا هزاران سال پیش بی سابقه بود (بصیری و همکاران،۱۴۰۳: ۹۶). اقلیم نقش گسترده ای در تعیین شاکله معماری و شهرسازی شهرها دارد. در واقع می توان گفت یکی از مهم ترین عوامل موثر در طراحی شهرها، اقلیم می باشد به طوری که تاثیر آن در تک تک بناها و عناصر معماری داخلی فضاها و علاوه بر آن، در تمام تاروپود بافت شهری و همچنین شیوه زندگی انسان، دیده می شود. همین امر سبب گردیده است که برنامه ریزان و طراحان شهری از دوران باستان تا به حال به ارتباط موثری بافت شهری در معرض چشمگیری قرار گرفته و الگوی تراکم راهیزی شده مناسب جهت بهره گیری از انرژی خورشیدی، توجه ویژه ای داشته باشند (برات پناه زو و همکاران،۱۴۰۴: ۳). اقلیم در معماری تاثیر بسیار زیادی دارد و اغلب طرح های معماری بدون در نظر گرفتن مسائل اقلیمی، ناقص، نامطلوب و هزینه برخواهد بود. از گذشته های دور که مصرف سوخت های فسیلی به راحتی برای همه امکان پذیر نبود و فناوری، انسان را با هنر ومعماری بیگانه نکرده بود، ذوق و استعداد بشر در جستجوی معماری، آثاری خلق کرد که امروزه به عنوان شاهکارهای معماری وپدیده های شگفت انگیز مورد تشویق و تحسین همگان به ویژه متخصصان قرار گرفته است (وفوری،۱۴۰۲: ۴). هدف پژوهش حاضر، بررسی تاثیر تغییرات اقلیمی بر الگوهای گسترش شهری چالش ها و راهکارها مطالعه موردی: کلانشهر ارومیه می باشد. جهان امروز با چالش بی‌سابقه‌ای به نام تغییرات اقلیمی روبروست که ابعاد گوناگون زندگی بشر، از جمله الگوهای سکونت و توسعه شهری، را تحت تأثیر قرار داده است. کلانشهرها، به عنوان کانون‌های اصلی جمعیت و فعالیت، بیش از پیش در معرض پیامدهای این تغییرات قرار دارند؛ از افزایش دما و خشکسالی گرفته تا سیلاب‌های ویرانگر و پدیده‌های غبار. در این میان، شهر ارومیه با ویژگی‌های اقلیمی خاص خود و قرارگیری در حوضه آبریز دریاچه ارومیه، به عنوان یک نمونه مطالعاتی حائز اهمیت است که تأثیرات متقابل تغییرات اقلیمی و گسترش فیزیکی آن، چالش‌ها و راهکارهای پیش‌رو را مورد مداقه قرار می‌دهد. این پژوهش، با بهره‌گیری از مدل تحلیلی سلسله‌مراتبی فازی (Fuzzy

AHP)، به دنبال شناسایی و اولویت‌بندی این چالش‌ها و ارائه راهبردهای پایدار برای هدایت گسترش شهری در بستر دگرگونی‌های اقلیمی است تا تاب‌آوری و پایداری این کلانشهر در آینده تضمین شود.

پیشینه پژوهش

قربانی سپهر و همکاران، (۱۳۹۹) پژوهشی با عنوان؛ بررسی اثر تغییر اقلیم بر آلودگی هوای کلانشهرها به این نتیجه رسیدند که بر پایه یافته‌های موجود می‌توان گفت تغییرات اقلیمی خود یکی از نتایج افزایش انتشار آلاینده‌های در مناطق کلانشهری است که در حال حاضر تمام جوانب زندگی بشر را تحت شعاع خود قرار داده است. در عین حال تغییرات اقلیمی می‌تواند از طریق؛ گرمایش جهانی، تشدید انتشار برخی از آلاینده‌های اصلی مثل ازن و ذرات معلق، آتش-سوزی جنگل‌ها، مهاجرت، افزایش جمعیت کلانشهرها، تهدیدات سلامتی انسان شهرنشین، وارونگی و ایجاد جزایر حرارتی بر کیفیت هوای کلانشهرها تأثیر بگذارد.

عابدینی و همکاران، (۱۴۰۲) پژوهشی با عنوان؛ آینده پژوهی پارامترهای اقلیمی در مواجهه با مناطق شهری (نمونه موردی: شهر اصفهان) به این نتیجه رسیدند که یافته‌های این پژوهش حاکی از آن است که شهر اصفهان به لحاظ آب و هوایی شرایط بسیار بحرانی را سپری می‌کند. اگر روند این تغییرات به‌گونه‌ای مهار نشود، در آینده‌ای نه‌چندان دور شاهد تغییرات عظیمی در شهر اصفهان خواهیم بود. با توجه به نتایج روش دمارتن، مشاهده می‌شود که اصفهان در محدوده خشک و بیابانی قرار داشته و تغییرات اقلیمی به‌شدت بر آن تأثیرگذار است.

عظیم نسب، (۱۴۰۳) پژوهشی با عنوان؛ تاثیر تغییرات اقلیمی بر الگوهای توسعه شهری به این نتیجه رسیده است که تغییرات اقلیمی به عنوان یکی از بزرگ ترین چالش های جهانی، تاثیرات عمیقی بر الگوهای توسعه شهری دارند. این مقاله به بررسی چگونگی تاثیر تغییرات اقلیمی بر جنبه های مختلف توسعه شهری، از جمله برنامه ریزی فضایی، زیرساخت ها، و کیفیت زندگی ساکنان می پردازد.

امین زاده و رضا راست، (۱۴۰۱) پژوهشی با عنوان؛ بررسی تاثیر اقلیم بر بافت مسکونی شهر یاسوج به این نتیجه رسیدند که پیشینه طراحی و ساخت وساز با توجه به معیارها ویژگی های طبیعی و اقلیمی در معماری سنتی ایران به صدها سال می رسد و از شاهکارهای معماری در جهان به شمار می آید. رشد تکنولوژی و دستیابی به انرژی های فسیلی موجب شد تا رعایت معیارهای اقلیمی در ساخت ساز مسکن به بوته فراموشی سپرده شود.

حنایی و برهانی پور، (۱۴۰۴) پژوهشی با عنوان؛ رویکرد فراروش: تغییرات اقلیمی و محیط های شهری به این نتیجه رسیدند که درواقع با مطالعه پژوهش‌های پیشین بر خلأ موضوعی مبنی بر عدم توجه به موضوعات اجتماعی و مدیریتی و همچنین خلأ در فلسفهٔ فکری و نوع راهبرد پژوهش‌ها اشاره می‌شود؛ زیرا مسائل اقتصادی، اجتماعی، عملکردی و حتی سیما و منظر

شهری از عوامل بسیار حیاتی در حوزه اقلیم شهری هستند که لازم است به همراه توسعه‌های نرم‌افزاری در حوزه تحلیل و ابزار گردآوری و همچنین استفاده متناسب از روش‌های کمی و کیفی در کنار یکدیگر به آن‌ها رسیدگی و پاسخ مناسب داده شود.

چنچن شی و همکاران، (۲۰۲۲) پژوهشی با عنوان؛ بررسی اینکه تغییرات آب و هوایی چگونه بر زندگی شهری در چین تاثیر می گذارد، پرداخته است. نتایج نشان دهنده ناهمگونی فضایی زیست محیطی شهری در چین در سراسر قلمرو جغرافیایی، سلسله مراتب توسعه اداری و اقتصادی می باشد. همچنین نامناسب بودن عملکردهای شهری در شهرهای چین وجود دارد که تولید و معیشت در تسلط زیست پذیری شهری است. این امر مستلزم برنامه ریزان شهری و مدیرانی است تا با تقویت عملکرد اکولوژیکی شهری از طریق نوآوری فنی و تحول صنعتی که متناسب با نیازهای سازگاری با آب و هوا است، توجه کنند.

سیشفر، (۲۰۲۲) پژوهشی با عنوان؛ تغییرات آب و هوا: امنیت انسانی بین درگیری و همکاری پرداختند، در این مطالعه تحقیقات شرایط و مکانیسم هایی را که بر وضعیت آب و هوا امنیت و امنیت تاثیر می گذارد، شناسایی کرده اند و غالباً پیوندهای قابل توجهی بین متغیرهای آب و هوا و درگیری پیدا می کند.

مبانی نظری

در سال های اخیر تغییرات اقلیمی به عنوان تهدیدی برای عملکرد ساختمان ها و سکونتگاه های انسانی مطرح شده است. گرمایش جهانی بزرگترین چالشی است که زمین با آن مواجه است و این در حالی است که وابستگی فزاینده به سوخت های فسیلی قدرت انطباق باگرمایش اقلیمی در آینده را کاهش خواهد داد . تغییرات اقلیمی یک تهدید جدی برای توسعه پایدار شهری است و بسیاری از شهرها رادر معرض خطر قرار می دهد (عامری سیاهویی و همکاران،۱۴۰۲: ۴). وایل و همکاران و روزنیک و همکاران و هانگ و همکاران معتقدند که شهرنشینی مسئله ای کلیدی در تغییرات جهانی طبیعت است که تحت تاثیر اقلیم شهری و تغییرات اقلیمی قرار دارد. با گذشت زمان تغییر فرم شهرها غالباً به گسترش فیزیکی آن ها منجر شده که شروع تغییرات گوناگون در جنبه های مختلف شهر را در بر می گیرد (طغیانی خوراسگانی و همکاران،۱۴۰۲: ۲). شهرنشینی و تغییر اقلیم منجر به افزایش نیاز به مطالعه مدیریت آب در مقیاس شهری می شود. در حالی که در دهه ۱۹۵۰ تنها ۳۰ درصد از ساکنان جهان در شهرها زندگی می کردند تا سال ۲۰۰۷ این درصد به بیش از ۵۰ درصد افزایش یافت؛ پیش بینی می شود تا سال ۲۰۵۰، دو سوم جمعیت جهان شهرنشین باشند (ملکی و مرادی،۱۴۰۴: ۹۶). موضوع تغییر اقلیم از لحاظ زمانی به سه دوره بحران تقسیم می شود. دوره اول فاقد دانش نسبت به تغییرات اقلیمی بود. دوره دوم مربوط به دوران مدرن (از دهه ۱۹۷۰) است، یعنی بروز بحران تحت تاثیر فعالیت های انسانی در زمین که منجر به افزایش محیط زیست گرایی شد (Bulkeley & Betsil,2021:139). تغییر اقلیم می تواند به صورت طبیعی رخ

دهد که ناشی از تغییر در انرژی خورشید یا چرخه اوربیتال کره زمین است. با این حال، بیشتر عوامل به فعالیت های انسانی مرتبط است. یکی از مهم ترین مصادیق فعالیت های انسانی منجر به تغییرات اقلیمی، انتشار گازهای گلخانه ای و افزایش آن و در نتیجه تشدید گرمایش است (Masih,2022:103). تغییرات اقلیمی را می توان به عنوان مهم ترین چالش در جهان معرفی کرد. افزایش دما که بر اثر افزایش گازهای گلخانه ای است، باعث شده تا الگوی بارش در کل کره زمین از نظر نوع، پراکندگی مکانی و زمانی نیز تغییر پیدا کند (امین نیری و همکاران،۱۴۰۴: ۳۰). تغییرات آب و هوا و توسعه شهری با یکدیگر همبستگی دارند، چرا که شهرها مهم ترین مراکز اقتصادی هستند، در نتیجه تقاضای آنها برای منابع زیاد است. با توجه به پدیده شهرنشینی، علاوه بر ظهور آثار جدید، افزایش سریع رشد شهرک ها نیز وجود دارد که این توسعه می تواند اثرات مخربی را بر توزیع الگوهای آب و هوایی بگذارد (Anand,2023:27). شهر و اقلیم، تاثیرگذاری تنگاتنگی بر یکدیگر دارند. در بررسی شهرسازی بومی ایران، به روشنی این نکته حاصل می شود که تمامی فضاهای شهری سنتی، کاملاً بر اساس اصول پایداری شهری در جهت استفاده حداکثر از انرژی های طبیعی و مقابله با گرما و سرمای آزار دهنده طراحی شده اند؛ تفاوت روشنی که میان پیوستگی بافت شهری در اقلیم گرم و خشک و گسستگی بافت شهری اقلیم گرم و مرطوب وجود دارد، گواه این مدعا است (گندمکار، امین، نظر صیدی، ۱۴۰۰: ۱۵۲).

قلمروپژوهش

شهر ارومیه، مرکز شهرستان ارومیه و مرکز استان آذربایجان غربی است که در فاصله ۱۸ کیلومتری دریاچه ارومیه، در مختصات جغرافیایی ۴۵ درجه و ۴ دقیقه طول شرقی از نصف النهار گرینویچ و ۳۷ درجه و ۳۲ دقیقه عرض شمالی از مبدأ خط استوا در داخل جلگه ای به طول ۷۰ کیلومتر و عرض ۳۰ کیلومتر قرار گرفته است. جمعیت شهر در سال ۱۳۹۵ بالغ ۷۳۶۲۲۴ نفر جمعیت داشته است. شهر ارومیه با مساحتی حدود ۶۰ کیلومتر مربع دارای موقعیت استقراری مناسب بوده و تقریبا در میانه استان واقع شده است (موسوی و همکاران،۱۴۰۱: ۱۵۰).

روش شناسی پژوهش

تحقیق حاضر به لحاظ هدف، کاربردی و ازلحاظ ماهیت و روش، توصیفی – تحلیلی پیمایشی می‌باشد. اطلاعات و داده‌های موردنیاز از طریق روش کتابخانه‌ای و میدانی جمع‌آوری‌شده است. در شیوه کتابخانه‌ای ابتدا به‌منظور بررسی سوابق و پیشینه موضوع و تبیین چارچوب نظری – مفهومی پژوهش، کتب مقالات و پایان‌نامه‌های موجود موردمطالعه قرارگرفته است. در تنظیم اطلاعات و محاسبات در این پژوهش از مدل AHP راف استفاده شده است.

تئوری مجموعۀ راف

مجموعه‌های راف که نخستین‌بار توسط پاولاک در سال ۱۹۸۲ معرفی شد، ابزار ریاضی با ارزشی در شرایط ابهام و عدم اطمینان است. راف رویکردی در حوزهٔ هوش مصنوعی است که شامل علوم‌شناختی، یادگیری ماشینی، کسب دانش، تجزیه و تحلیل تصمیم، کشف دانش، سیستم‌های پشتیبانی تصمیم، استدلال استنتاجی و تشخیص الگو می‌شود (پاولاک، ۱۹۸۲). پس از تئوری مجموعهٔ راف، ژای، خو و ژونگ (۲۰۰۸) اعداد راف را مطرح کردند. یک عدد راف معمولا شامل حد پائین و بالا و فاصله مرزی راف می‌شود که فقط به داده‌های اصلی وابسته است. بنابراین نیازی به اطلاعات کمکی نیست و می‌تواند مفاهیمی مد نظر خبرگان را بهتر دریافت کند و عینیت تصمیم‌گیری را بهبود بخشد (پاولاک، ۱۹۸۲). فرض کنید U یک مجموعه مرجع شامل تمام اعضا، Y یک عضو دلخواه از مجموعه U و R یک مجموعه از t کلاس است (R={G1, …, Gt}) که تمام اعضای U را پوشش می‌دهد. اگر این کلاس‌ها به صورت ترتیبی همانند G1< G2<…< Gt باشند، آنگاه $1 \le q \le t$، $\forall y \in U, G_q$.

تقریب پائین ($\underline{Apr}$ (Gq))، تقریب بالا($\overline{Apr}$ (Gq)) و ناحیه مرزی (Bnd (Gq)) از کلاس Gq به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\underline{Apr}\text{ (Gq)} = \cup\{(Y\epsilon U | R(Y) \le G_q)\}$$

$$\overline{Apr}\text{ (Gq)} = \cup\{(Y\epsilon U | R(Y) \ge G_q)\}$$

$$\text{Bnd (Gq)} = \cup\{(Y\epsilon U | R(Y) \ne G_q)\} = \{(Y\epsilon U | R(Y) > G_q)\} \cup \{(Y\epsilon U | R(Y) < G_q)\}$$

سپس G_q می‌تواند به وسیله یک عدد راف (G_q)(RN در حدهای پایین و بالای متناظر آن ارائه شود (رابطه‌های (۱-۴) .

$$\text{(Gq)} = \frac{1}{M_L} \sum R(y) | Y\epsilon \underline{Apr}\text{ (Gq)} \underline{Lim} \quad (۱)$$

$$\text{(Gq)} = \frac{1}{M_U} \sum R(y) | Y\epsilon \overline{Apr}\text{(Gq)} \overline{Lim} \quad (۲)$$

$$\text{RN (Gq)} = [\underline{Lim}\text{ (Gq)}, \overline{Lim}\text{ (Gq)}] \quad (۳)$$

که ML و MU ، به ترتیب مقادیر اعضا $\underline{Apr}$ (Gq) و $\overline{Apr}$ (Gq) می‌شوند. واضح است که حدهای پایین و بالا، به‌ترتیب مقدار میانگین عناصری را که در ارتباط با تقریب بالا و پایین است، مشخص می‌کند و تفاوت آنها فاصلهٔ مرزی راف تعریف می‌شود (پاولاک، ۱۹۸۷).

$$\text{IRBnd (Gq)} = \overline{Lim}\text{ (Gq)} - \underline{Lim}\text{ (Gq)} \quad (۴)$$

فاصلهٔ مرزی راف، ابهام Gq را بیان میکند، به‌صورتی که عدد بزرگتر آن به‌معنای ابهام بیشتر است، در حالیکه عدد کوچکتر دقت بیشتری دارد. بنابراین اطلاعات ذهنی می‌تواند با اعداد راف بیان شود. از آنجا که اعداد راف ایجادشده مشابه اعداد فاصله‌ای هستند، قوانین محاسباتی اعداد فاصله‌ای میتواند در اعداد راف نیز استفاده شود.

تئوری مجموعه راف با استفاده از فرآیند سلسله مراتبی

فرآیند تحلیل سلسله مراتبی، یکی از شناخته شده‌ترین و پرکاربردترین روشهای تصمیم‌گیری چند شاخصه است که توانایی اندازه‌گیری میزان سازگاری ترجیحات و در نظر گرفتن معیارهای ملموس و غیرملموس را دارا می‌باشد. در این پژوهش به‌علت ذهنی و مبهم‌بودن قضاوت‌های خبرگان از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی راف استفاده شده است. در ادامه مراحل فرآیند تحلیل سلسله مراتبی راف ارائه شده است (ژو و همکاران، ۲۰۱۵).

یافته های پژوهش

معرفی عوامل پژوهش

افزایش دما (C1)

کاهش بارش و خشکسالی (C2)

سیلاب و رواناب (C3)

گرد و غبار (C4)

تغییرات کاربری اراضی (C5)

روش AHP راف

در این بخش با استفاده از روش AHP به محاسبه وزن معیارها پرداخته می‌شود ابتدا از ۸ خبره پژوهش خواسته شد که معیارها را به صورت زوجی بر اساس طیف ۱ تا ۹ بر اساس اهمیت مقایسه کنند نتایج به صورت تفکیک شده در جدول ۱آورده شده است.

جدول ۱: مقایسه زوجی زیرچالش‌های مواد اولیه بر اساس نظرات ۸ خبره

خبره ۱	C1	C2	C3	C4	C5

خبره ۲	C1	C2	C3	C4	C5

C1	۱	۵	۳	۴	۵
C2	۰.۲	۱	۱	۱	۲
C3	۰.۳۳۳	۱	۱	۳	۴
C4	۰.۲۵	۱	۰.۳۳۳	۱	۲
C5	۰.۲	۰.۵	۰.۲۵	۰.۵	۱

C1	۱	۵	۴	۴	۵
C2	۰.۲	۱	۲	۲	۲
C3	۰.۲۵	۰.۵	۱	۳	۴
C4	۰.۲۵	۰.۵	۰.۳۳۳	۱	۱
C5	۰.۲	۰.۵	۰.۲۵	۱	۱

خبره ۴	C1	C2	C3	C4	C5
C1	۱	۵	۳	۳	۵
C2	۰.۲	۱	۲	۱	۳
C3	۰.۳۳۳	۰.۵	۱	۱	۳
C4	۰.۳۳۳	۱	۱	۱	۳
C5	۰.۲	۰.۳۳۳	۰.۳۳۳	۰.۳۳۳	۱

خبره ۳	C1	C2	C3	C4	C5
C1	۱	۳	۱	۴	۵
C2	۰.۳۳۳	۱	۱	۳	۵
C3	۱	۱	۱	۳	۵
C4	۰.۲۵	۰.۳۳۳	۰.۳۳۳	۱	۱
C5	۰.۲	۰.۲	۰.۲	۱	۱

خبره ۶	C1	C2	C3	C4	C5
C1	۱	۱	۲	۴	۵
C2	۱	۱	۴	۴	۵
C3	۰.۵	۰.۲۵	۱	۴	۵
C4	۰.۲۵	۰.۲۵	۰.۲۵	۱	۱
C5	۰.۲	۰.۲	۰.۲	۱	۱

خبره ۵	C1	C2	C3	C4	C5
C1	۱	۳	۱	۳	۵
C2	۰.۳۳۳	۱	۱	۳	۴
C3	۱	۱	۱	۴	۴
C4	۰.۳۳۳	۰.۳۳۳	۰.۲۵	۱	۱
C5	۰.۲	۰.۲۵	۰.۲۵	۱	۱

خبره ۸	C1	C2	C3	C4	C5
C1	۱	۴	۲	۵	۵
C2	۰.۲۵	۱	۲	۳	۵
C3	۰.۵	۰.۵	۱	۳	۵
C4	۰.۲	۰.۳۳۳	۰.۳۳۳	۱	۳

خبره ۷	C1	C2	C3	C4	C5
C1	۱	۱	۱	۵	۴
C2	۱	۱	۱	۳	۵
C3	۱	۱	۱	۳	۵
C4	۰.۲	۰.۳۳۳	۰.۳۳۳	۱	۴

C5	۰.۲۵	۰.۲	۰.۲	۰.۲۵	۱	C5	۰.۲	۰.۲	۰.۲	۰.۳۳۳	۱

منبع: یافته های پژوهش،۱۴۰۴

تشکیل ماتریس مقایسه زوجی راف

در این بخش باید ماتریس ۴ خبره که در جدول ۲ آورده شده است را بر اساس روابط ۱ الی ۴ به اعداد راف تبدیل کرد به عنوان مثال برای سلول a12 که تقاطع معیار C1 و C2 است محاسبات به صورت زیر انجام می‌شود. ابتدا داده های این جداول آورده می‌شود.

جدول ۲

عدد راف			عدد قطعی
۳.۳۷۵	۱		۱
۳.۳۷۵	۱		۱
۴.۱۶۷	۲		۳
۴.۱۶۷	۲		۳
۴.۷۵	۲.۴		۴
۵	۳.۳۷۵		۵
۵	۳.۳۷۵		۵
۵	۳.۳۷۵		۵
۴.۳۵۴	۲.۳۱۶	میانگین	

منبع: یافته های پژوهش،۱۴۰۴

به عنوان مثال عدد ۱ به این صورت تبدیل به راف می‌شود:

$$\text{حد پایین} = \frac{1+1}{2} = 1$$

$$\text{حد بالا} = \frac{1+1+3+3+4+5+5+5}{8} = 3.375$$

عدد ۳ به صورت زیر تبدیل به راف می‌شود:

$$\text{حد پایین} = \frac{3+3+1+1}{4} = 2$$

$$\text{حد بالا} = \frac{3+3+4+5+5+5}{6} = 4.167$$

عدد ۴ به صورت زیر تبدیل به راف می‌شود:

$$\text{حد پایین} = \frac{1+1+3+3+4}{5} = 2.4$$

$$\text{حد بالا} = \frac{4+5+5+5}{4} = 4.75$$

عدد ۵ به صورت زیر تبدیل به راف می‌شود:

$$\text{حد پایین} = \frac{1+1+3+3+4+5+5+5}{8} = 3.375$$

$$\text{حد بالا} = \frac{5+5+5}{3} = 5$$

سپس عدد راف نهایی از میانگین همه این اعداد حاصل می‌شود که برابر با [2.316,4.354] می‌شود. برای دیگر سلول‌ها نیز محاسبات به طور مشابه انجام می‌شود که نتایج نهایی در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳ ماتریس مقایسه زوجی راف زیرچالش‌های مواد اولیه

	C1	C2	C3	C4	C5
C1	[۱,۱]	[۲.۳۱۶,۴.۳۵۴]	[۱.۴۵۵,۲.۸۳]	[۳.۵۸۳,۴.۴۱۷]	[۴.۷۶۶,۴.۹۸۴]
C2	[۰.۲۳,۰.۴۳۲]	[۱,۱]	[۱.۲۵۴,۲.۳۱۳]	[۱.۸۷۲,۳.۱]	[۳.۰۷۳,۴.۶۳۱]
C3	[۰.۳۵۳,۰.۶۸۷]	[۰.۴۳۲,۰.۷۹۷]	[۱,۱]	[۲.۵۴۲,۳.۴۲۹]	[۳.۹۶۹,۴.۷۶۱]
C4	[۰.۲۲۶,۰.۲۷۹]	[۰.۳۲۳,۰.۵۳۴]	[۰.۲۹۲,۰.۳۹۳]	[۱,۱]	[۱.۳۲۹,۲.۷۰۸]
C5	[۰.۲۰۱,۰.۲۱]	[۰.۲۱۶,۰.۳۲۵]	[۰.۲۱,۰.۲۵۲]	[۰.۳۶۹,۰.۷۵۳]	[۱,۱]

منبع: یافته های پژوهش،۱۴۰۴

محاسبه وزن معیارها

در این بخش ابتدا بر اساس رابطه ۳ باید میانگین هندسی اعداد ماتریس مقایسه زوجی راف را به صورت سطری محاسبه کرد که به عنوان مثال برای سطر اول که مربوط به معیار C1 است محاسبات به صورت زیر می‌باشد:

$$\text{میانگین هندسی درایه اول سطر معیار } c1 = \sqrt[5]{1 \times 2.316 \times 1.455 \times 3.583 \times 4.766} = 2.249$$

$$\text{میانگین هندسی درایه دوم سطر معیار } c1 = \sqrt[5]{1 \times 4.354 \times 2.83 \times 4.417 \times 4.984} = 3.067$$

به طریق مشابه برای دیگر معیارها میانگین هندسی سطری محاسبه می‌شود که در جدول ۴ آورده شده است.

جدول ۴ : میانگین هندسی سطری ماتریس مقایسه زوجی

	میانگین هندسی
C1	[۲.۲۴۹,۳.۰۶۷]
C2	[۱.۱۰۶,۱.۷۰۳]
C3	[۱.۰۹,۱.۵۵]
C4	[۰.۴۹,۰.۶۹۲]
C5	[۰.۳۲,۰.۴۱۹]

منبع: یافته های پژوهش،۱۴۰۴

سپس برای محاسبه وزن راف هر کدام از معیارها بر اساس رابطه ، باید ماکزیمم درایه دوم میانگین هندسی که در جدول ۵ آورده شده محاسبه کرد که برابر با ۳.۰۶۷ می‌باشد سپس هر کدام از میانگین هندسی‌ها را بر عدد ۳.۰۶۷ تقسیم نمود تا وزن راف هر گزینه حاصل شود سپس وزن قطعی از میانگین وزن راف هر معیار حاصل می‌شود و سپس وزن نرمال از تقسیم هر وزن قطعی بر جمع کل اوزان قطعی حاصل می‌شود که نتایج در جدول ۵ آورده شده است. بر این اساس افزایش دما با وزن ۰.۴۱۹ رتبه اول را کسب کرده است. کاهش بارش و خشکسالی با وزن ۰.۲۲۱ رتبه دوم و سیلاب و رواناب با وزن ۰.۲۰۸ رتبه سوم را کسب کرده است.

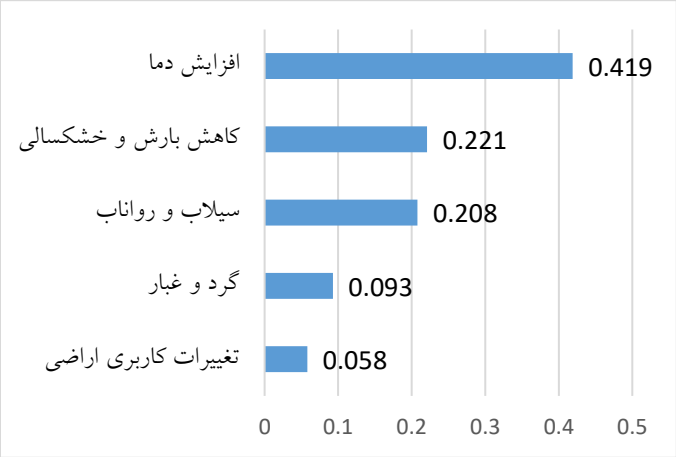
جدول ۵وزن زیرچالش‌های مواد اولیه

رتبه	وزن نرمال	وزن قطعی	وزن راف	

C11	[۰.۷۳۳,۱]	۰.۸۶۷	۰.۴۱۹	۱
C12	[۰.۳۶۱,۰.۵۵۵]	۰.۴۵۸	۰.۲۲۱	۲
C13	[۰.۳۵۶,۰.۵۰۵]	۰.۴۳۰	۰.۲۰۸	۳
C14	[۰.۱۶,۰.۲۲۶]	۰.۱۹۳	۰.۰۹۳	۴
C15	[۰.۱۰۴,۰.۱۳۷]	۰.۱۲۱	۰.۰۵۸	۵

منبع: یافته های پژوهش،۱۴۰۴

شکل۲: وزن و اولویت معیارها



منبع: یافته های پژوهش،۱۴۰۴

نتیجه گیری

تغییرات اقلیمی، پدیده‌ای چندوجهی، تأثیرات گسترده‌ای بر الگوهای توسعه شهری دارد. در مبانی نظری این موضوع، از دیدگاه بوم‌شناسی شهری، تغییرات اقلیمی به عنوان یک عامل مخرب در اکوسیستم‌های شهری مطرح می‌شود که می‌تواند باعث اختلال در تعادل طبیعی، کاهش تنوع زیستی و افزایش آسیب‌پذیری شهرها در برابر خطرات طبیعی شود. از منظر اقتصاد شهری، تغییرات اقلیمی می‌توانند باعث افزایش هزینه‌های زیرساختی، کاهش بهره‌وری اقتصادی و افزایش نابرابری‌های اجتماعی شوند. نظریه‌های مرتبط با برنامه‌ریزی شهری پایدار تأکید دارند که توسعه شهری باید با در نظر گرفتن محدودیت‌های زیست‌محیطی و اقلیمی صورت گیرد تا از تخریب منابع طبیعی و افزایش آسیب‌پذیری شهرها جلوگیری شود. همچنین، نظریه‌های مرتبط با تاب‌آوری شهری بر اهمیت افزایش ظرفیت شهرها برای مقابله با شوک‌ها و

استرس‌های ناشی از تغییرات اقلیمی، از طریق ایجاد سیستم‌های انعطاف‌پذیر، مشارکت مردمی و نوآوری‌های تکنولوژیک تأکید دارند. از دیدگاه جامعه‌شناسی شهری، تغییرات اقلیمی می‌توانند باعث تغییر در الگوهای مهاجرت، افزایش تنش‌های اجتماعی و تغییر در سبک زندگی شهروندان شوند. در نهایت، مبانی نظری مرتبط با تغییرات اقلیمی و الگوهای گسترش شهری بر اهمیت رویکردهای یکپارچه، چندرشته‌ای و مشارکتی برای حل مسائل پیچیده و دستیابی به توسعه شهری پایدار و تاب‌آور تأکید دارند. این رویکردها نیازمند همکاری بین دولت، بخش خصوصی، جامعه مدنی و شهروندان برای ایجاد شهرهایی هستند که قادر به سازگاری با تغییرات اقلیمی و کاهش اثرات منفی آن باشند. هدف پژوهش حاضر، بررسی تاثیر تغییرات اقلیمی بر الگوهای گسترش شهری چالش ها و راهکارها مطالعه موردی: کلانشهر ارومیه می باشد. این پژوهش ازنظر هدف، کاربردی - نظری و ازنظر روش، توصیفی– تحلیلی است. اطلاعات و داده های موردنیاز از طریق روش کتابخانه ای جمع آوری شده است. در این پژوش از مدل AHP راف استفاده شده است. در پایان این پژوهش، می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات اقلیمی به عنوان یک عامل تعیین‌کننده، نقش مهمی در شکل‌دهی الگوهای گسترش شهری کلانشهر ارومیه ایفا می‌کند. استفاده از مدل AHP فازی راف نشان داد که چالش‌های متعددی از جمله افزایش دما، کاهش بارش، وقوع سیلاب‌ها، گسترش گرد و غبار و تغییرات کاربری اراضی، به طور مستقیم و غیرمستقیم، توسعه شهری را تحت تأثیر قرار می‌دهند. این تغییرات اقلیمی نه تنها باعث افزایش مصرف انرژی و نیاز به سیستم‌های خنک‌کننده بیشتر می‌شوند، بلکه با تهدید منابع آب شهری و آسیب‌پذیری زیرساخت‌ها، کیفیت زندگی شهروندان را نیز تحت شعاع قرار می‌دهند. بر اساس نتایج این تحقیق، راهکارهایی چون توسعه فضای سبز، بهینه‌سازی مصرف انرژی، بهبود سیستم‌های مدیریت آب، استفاده از مصالح ساختمانی سازگار با اقلیم و تقویت زیرساخت‌های شهری تاب‌آور، از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. همچنین، مشارکت مردمی و افزایش آگاهی عمومی در خصوص تغییرات اقلیمی و راهکارهای سازگاری، نقش کلیدی در موفقیت برنامه‌های توسعه پایدار شهری ایفا می‌کند. با توجه به نتایج به دست آمده، پیشنهاد می‌شود که برنامه‌ریزان و مدیران شهری ارومیه، با اتخاذ رویکردی جامع و یکپارچه، این چالش‌ها و راهکارها را در سیاست‌گذاری‌های خود مدنظر قرار دهند تا بتوانند شهری پایدارتر، تاب‌آورتر و سازگارتر با تغییرات اقلیمی بسازند. در نهایت، این مطالعه نشان داد که توجه به مسائل اقلیمی و بهره‌گیری از ابزارهای تحلیلی مناسب، می‌تواند به بهبود تصمیم‌گیری‌ها و دستیابی به توسعه شهری پایدار در کلانشهر ارومیه کمک شایانی نماید.

منابع

احمد آباد پور، زهرا، (۱۴۰۳)، تاثیر تغییرات اقلیمی بر توسعه شهری و برنامه ریزی تاب آور در برابر مخاطرات زیست محیطی، یازدهمین کنفرانس بین المللی ایده های راهبردی در معماری، عمران و شهرسازی ایران.

امین نیری، بهناز، علیزاده واحد، نسیم، عباسی نادر پور، محمد رضا، ستارزاده، داریوش، (۱۴۰۴)، ارزیابی اثرات متقابل تغییرات اقلیمی و شکل گیری فضاهای شهری با مدل ENVI-MET، نشریه علمی توسعه پایدار شهری، دوره ۶، شماره ۱۹.

امین زاده، امیر، رضا راست، علی، (۱۴۰۱)، بررسی تاثیر اقلیم بر بافت مسکونی شهر یاسوج، مجله علوم زیست محیطی و دانش جغرافیا، دوره ۳، شماره ۳.

برات پناه زو، سمانه، عابد فیض آبادی، ملیحه، اکرامی جنت آبادی، عباس، همتی حسن پور، مونا، (۱۴۰۴)، تاثیر عوامل اقلیمی در ساخت و سازهای شهری، پنجمین کنفرانس بین المللی تحقیقات پیشرفته در مدیریت و علوم انسانی.

بصیری، مصطفی، علیزاده واحد، نسیم، عباسی نادر پور، محمد رضا، امین نیری، بهناز، (۱۴۰۳)، مولفه های اثرگذار و اثرپذیر توسعه شهری و تغییرات اقلیمی، یک رابطه دو سویه در جهت انطباق پذیری با سناریوهای جهانی، مجله شهر ایمن، سال ۷، مسلسل ۲۸.

حنایی، تکتم، برهانی پور، ماندانا، (۱۴۰۴)، رویکرد فراروش: تغییرات اقلیمی و محیط های شهری، فصلنامه علمی مطالعات ساختار و کارکرد شهری، دوره ۱۲، شماره ۲.

طغیانی خوراسگانی و همکاران،(۱۴۰۲)، مروری نظام مند بر مقالات منتشر شده در تحلیل اثر تغییرات اقلیمی و فرم شهرها، فصلنامه علمی نگرش های نو در جغرافیای انسانی، سال پانزدهم، شماره سوم.

عابدینی، اصغر، حبیب پور، نگین، خجسته مقال، فاطمه، (۱۴۰۲)، آینده پژوهی پارامترهای اقلیمی در مواجهه با مناطق شهری (نمونه موردی: شهر اصفهان)، فصلنامه جغرافیا و آینده پژوهی منطقه ای، دوره ۱، شماره ۲.

عظیم نسب، مهدی، (۱۴۰۳)، تاثیر تغییرات اقلیمی بر الگوهای توسعه شهری، اولین همایش بین المللی معلمان استعدادیاب و فرهنگ ساز در توسعه آموزش های فنی و حرفه ای و کار دانش در مسیر توسعه پایدار.

عامری سیاهویی، حمید رضا، مصطفی زاده، مسلم، عامل خوش نشین، شکوفه، (۱۴۰۲)، تاثیر تغییرات اقلیمی بر طراحی شهری و ساختمان ها، هفتمین کنفرانس بین المللی مطالعات جهانی در مهندسی عمران، معماری و شهرسازی.

قربانی سپهر،آرش، امرایی، مهتاب، قالوجه، مریم، دانشور، پروین، (۱۳۹۹)، بررسی اثر تغییر اقلیم بر آلودگی هوای کلانشهرها، مجله جغرافیا و روابط انسانی، دوره ۳، شماره ۲.

گندمکار، امیر، نظر صیدی، علی، (۱۴۰۰)، بررسی تغییرات اقلیم شهر اهواز در رابطه با توسعه منطقه ای و برنامه ریزی شهری، فصلنامه علمی پژوهشی نگرش های نو در جغرافیای انسانی، سال سیزدهم، شماره دوم.

ملکی، سعید، مرادی، هوشنگ، (۱۴۰۴)، پیامدهای اجتماعی – اقتصادی تغییر اقلیم در فضاهای شهری با استفاده از مدل دینامیک سیستم (مورد مطالعه: کلان شهر اهواز)، نشریه فضای شهری و حیات اجتماعی، سال ۴، شماره ۱۲.

ماجدی، حمید، ملکی، لادن، سادات سعیده زر آبادی، زهرا، (۱۴۰۰)، تحلیل نقش رویکردهای شهری در پاسخ به تغییرات اقلیم با تاکید بر شهرسازی بیوفیلیک، مورد پژوهی: شهر تنکابن، فصلنامه دانش شهرسازی، دوره ۵، شماره ۱.

موسوی و همکاران، (۱۴۰۱)، تأثیر مشارکت اجتماعی در فرایند بازآفرینی بافت قدیم شهری (مورد مطالعه: منطقه ۴ شهر ارومیه)، فصلنامه جغرافیا، دوره ۲۰، شماره ۷۴.

وفوری، محمد باقر، (۱۴۰۲)، اثرات اقلیم بر شهرسازی شهرهای ایران، دهمین همایش ملی مطالعات و تحقیقات نوین در حوزه علوم جغرافیا، معماری و شهرسازی ایران.

Anand, P., & Seetharam, K. (2011). Climate change and living cities: Global problems with local solutions. In Climate change and sustainable urban development in Africa and Asia (pp. 21-35).

Bulkeley, H., & Betsill, M. M. (2021). Revisiting the urban politics of climate change. Environmental Politics, 22(1), 136-154.

Chenchen, Shi. (2022). How climate change is going to affect urban livability in China. Climate Services 26 (2022) 100284.

King, A. D. and Harrington, L.J. (2018). The inequality of climate change from 1.5 to 2°C of global warming. Geophys. Res. Lett.

Masih, J. (2010). Causes and consequences of global climate change. Applied Science Research, 2(2), 100-108.

Seishfer, J. (2022). Climate Change: Human Security Between Conflict and Cooperation. In book: Lester R. Kurtz (Ed.), Encyclopedia of Violence, Peace, and Conflict (Vol. 1) (pp.807-819) Publisher: Elsevier, Academic Press.

Zhang, L.P., Zhou, P., Qiu, Y.Q., Su, Q and Tang, Y.L. (2020). Reassessing the climate change cooperation performance via a non-compensatory composite indicator approach, Journal of Cleaner Production (2020), Val 252.

Investigating the impact of climate change on urban expansion patterns: challenges and solutions, case study: Urmia metropolis

Hassan Heidari[1]

1-Assistant Professor, Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, Urmia University,Urmia,IraN

Sahand Azar[2]*

2- PhD Student, Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, Urmia University, Urmia, Iran

* Corresponding author: Email: S.azar@urmia.ac.ir

Abstract

Climate change challenges traditional urban expansion patterns with phenomena such as temperature increases, droughts, and floods. These changes can lead to forced migrations, pressure on water and energy resources, and increased vulnerability of urban infrastructure, and as a result, push urban development towards areas with less risk or better access to resources. As a result, urban planning requires special attention to adaptation and resilience to these changes to ensure future sustainability. The aim of the present study is to investigate the impact of climate change on urban expansion patterns. Challenges and solutions Case study: Urmia metropolis. This study is applied-theoretical in terms of purpose and descriptive-analytical in terms of method. The required information and data were collected through the library method. The AHP Rough model was used in this study. This study examines various dimensions of the impact of climate change on urban expansion patterns in Urmia metropolis. In order to identify the challenges arising from these changes and provide effective solutions for their management, the Fuzzy Analytical Hierarchy Process (Fuzzy AHP) approach has been used. The results of this research, while prioritizing the challenges and solutions ahead, provide valuable insights for urban planners and managers to take steps towards sustainable and resilient urban development in the face of climate change and prevent unsustainable urban expansion.

Keywords: Climate change, urban expansion, challenges and solutions, Urmia metropolis, Rough AHP model

سینوپتیکی بارش سنگین حوضه ی آبریز کیوی چای شهرستان خلخال روز ۲۳ اوت ۲۰۲۰

۱- سحر سیدطالبی ۲-عباس اللهیاری ۳- بتول زینالی

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد آب و هواشناسی سینوپتیک دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، ایران
Zeynali.b@uma.ac.ir

۲- کارشناس ارشد مهندسی عمران، شهرداری اردبیل

۳- استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، ایران.

چکیده:

هدف: یکی از بلایای طبیعی که باعث آسیب‌های بیشتر می‌شود، بارش‌های سنگین می‌باشد؛ که منجر به سیل و در پی آن بروز خسارات مالی و جانی می‌شود. بارش سنگین‌بارشی است که تمام بارش روزانه از ۱۵ میلی‌متر بیشتر ثبت‌شده باشد (حمیدیان پور و همکاران، ۱۳۸۹). در مکانی بارش زمانی اتفاق می‌افتد که هوای مرطوب و عامل صعود فراهم شود به‌وسیله این دو شرایط الگوهای گردش جو به وجود می‌آید. یکی از رخدادهای زیان‌بار در خیلی از مکان‌ها به‌خصوص نواحی‌ای که بارندگی کمی دارند بارش سنگین می‌باشد (علیجانی،۱۳۹۲). بنابراین شناسایی دقیق‌تر سیستم‌های سینوپتیکی و همدیدی که در ایجاد بارش‌های سنگین مؤثرند از اهمیت بالایی برخوردارند و برای جلوگیری از این آسیب‌ها باید این الگوها یک روز قبل‌تر شناسایی شوند تا از آسیب‌ها و خطرات احتمالی سیلاب جلوگیری به عمل آید. هدف این پژوهش تحلیل سینوپتیکی بارش سنگین روز ۲۳ اوت سال (۲۰۲۰) در حوضه آبریز کیوی چای شهرستان خلخال و استخراج سامانه‌های مؤثر در بارش‌های سنگین با بهره‌گیری از رویکرد محیطی به گردشی می‌باشد. روش‌شناسی پژوهش: در پژوهش حاضر داده‌های بارش روزانه حوضه آبریز کیوی چای از ایستگاه هواشناسی استان اردبیل و همچنین دبی روزانه کیوی چای از منابع آب استان اردبیل اخذ گردید که از سال‌های ۱۹۸۷ تا ۲۰۲۱ را شامل می‌شد و از طریق برنامه اکسل فیلتر و سپس سورت گردید و بالاترین بارش روزانه و همچنین بالاترین دبی روزانه استخراج گردید و از طریق سایت نو آ نقشه‌ی هوای سطح زمین و نقشه هوای سطوح بالای جو، تشخیص داده‌شده و استخراج گردید و روزهایی که بارش‌های مساوی یا بالاتر از ۳۰ میلی‌متر در شبانه‌روز بودند مشخص شدند برای تعیین الگوهای گردشی از نقشه‌ی هوای سطح زمین و همچنین از نقشه‌ی سطوح بالای جو در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و همچنین نقشه امگا و نقشه آب قابل بارش استفاده‌شده است. یافته‌ها: نتیجه‌ای که از این پژوهش حاصل گردید نشان‌دهنده آن است که از نقشه سطح زمین کم‌فشارها و در نقشه‌ی سطوح بالای جو قرارگیری منطقه موردمطالعه جلوی فرود و واگرایی بالایی اصلی‌ترین عامل وقوع بارش سنگین در منطقه موردمطالعه می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: سینوپتیک، بارش سنگین، کیوی چای

مقدمه:

بارندگی یک عنصر طبیعی خیلی مهمی است که بر تمام اشیاء پدیده‌ها و بخصوص زندگی انسان‌ها و محیط زندگی آن‌ها تأثیرات بسیار زیادی دارد. به همین دلیل این بخش از طبیعت در همه مواقع توجه انسان را به خود جلب کرده است و هرروز بر اهمیت شناخت آن افزوده می‌شود. امروزه به دلایل مختلفی مانند افزایش آلودگی، گرمایش جهانی، تغییر الگوهای بارش، رخدادهایی مانند سیل و خشک‌سالی و... هوا و آب‌وهوا بیشتر موردتوجه قرارگرفته است. یکی از مهم‌ترین این شاخه‌ها آب‌وهوا شناسی سینوپتیک است که در آن آب‌وهوای یک مکان را با تمام ویژگی‌های آن به‌صورت همه‌جانبه موردبررسی قرار می‌دهند و همه شاخص‌های آن را در ارتبط با یکدیگر موردمطالعه قرار می‌دهند (کمال امیدوار، ۱۳۸۹). بارش‌های سنگین به‌عنوان عامل به وجود آورنده‌ی خطرهایی مانند توفان و سیل مطرح می‌باشند. به همین دلیل مطالعه سینوپتیک سیستم‌های به وجود آورندگان می‌تواند نقش مهمی در کنترل سیلاب‌ها و آب‌گرفتگی‌های شهری و آبخیزداری داشته باشد. در این راستا، شناخت چگونگی تکوین، تقویت، مکانیسم فعالیت، قانونمندی حاکم بر حرکت الگوهای سینو پتیکی منجر به بارش‌های سنگین و سیل زا، زمینه لازم برای پیش‌بینی از این آسیب‌ها را فراهم می‌کند؛ و همچنین روش دیگر این است که این الگوها از یک روز قبل شناسایی شوند تا از خطرات احتمالی جلوگیری شود. در این پژوهش با توجه به شناسایی چگونگی پیدایش الگوهای فشار سطح زمین و سطوح بالای جو که در پدید آمدن بارش‌های سنگین در منطقه موردمطالعه مؤثرند، می‌تواند در پیش‌بینی و کاهش آثار زیان‌بار مؤثر واقع شود. مطالعاتی در این زمینه در داخل و خارج از کشور ایران انجام‌شده که ازجمله‌ی آن‌ها: قادر و علیجانی (۱۳۸۹)، بارندگی‌های شدید لارستان را در دوره‌های آماری ۲۰۰۷- ۱۹۶۰ از بارش‌های روزانه و نقشه‌های سطح زمین، سطح ۵۰۰ و ۷۰۰ میلی بار را موردمطالعه قراردادند، نتایج آن‌ها نشان داد که در سطح زمین ورود سیکلون غربی، کم‌فشار سودانی و در فصل گرم نفوذ کم‌فشار مونسون، عقب‌نشینی پرفشار جنب حاره استقرار کم‌فشار حرارتی و ایجاد ناپایداری شدید از الگوهای فشار مؤثر در بارش شدید می‌باشد. صلاحی و همکاران (۲۰۱۵)، با استفاده از آمار بارش روزانه‌ی ایستگاه هواشناسی شهرستان تبریز بارش سنگین را برای دوره‌ی آماری (۲۰۱۳- ۱۹۹۶) موردبررسی قراردادند و الگوهای سینوپتیکی آن‌ها را بر اساس تراز سطح زمین و تراز سطح ۵۰۰ میلی بار شناسایی کردند. نتایج تحقیقات آن‌ها نشان داد که الگوهای فشار مؤثر در فصل سرد سال که باعث ایجاد بارش شدید شده است متأثر از سیکلون غربی بوده و در فصل گرم، تحت تأثیر کم‌فشار حرارتی و عقب‌نشینی پرفشار جنب‌حاره‌ای بوده است و در تراز ۵۰۰ فرود عمیق به همراه ریزش هوای مرطوب عامل اصلی اغتشاشات بوده است. پری و همکاران (۱۳۹۴)، از داده‌های بارش روزانه و نقشه‌های سطح زمین تراز ۵۰۰ میلی بار استفاده کردند و رطوبت و میانگین فشار سطح دریا تأثیر سامانه‌های بلوکینگ در ایجاد بارش سنگین استان اردبیل را در (۲۹ می ۱۹۹۸) مورد بررسی قراردادند، نتایج آن‌ها نشان

داد که استقرار پدیده‌ی بلوکینگ، سامانه‌های کم‌فشار مدیترانه و تغذیه‌ی رطوبتی کافی در این روز بارش شدید را در این منطقه ایجاد کرده است. زینالی وهم کاران (۱۳۹۶)، برای مشخص نمودن ویژگی‌های همدیدی و هیدرو متئولو ژیکی به وجود آورنده‌ی سیل‌ها در هیرو چای از داده‌های بارش روزانه در ایستگاه‌های خلخال، آرپا چای و لمبر و داده‌های هیدرو متری رودخانه کیوی چای را شناسایی کردند و همچنین از داده‌های تراز سطح زمین و سطوح بالای جو استفاده کردن نتایج آن‌ها نشان داد که قرارگیری سیستم کم‌فشار در سطح زمین، ایجاد بلو کینگ و قرارگیری منطقه موردمطالعه در شرق ناوه و در سطوح بالای جو، منفی بودن پیچانه جوی و امگا در ترازهای مختلف همراه با تغذیه رطوبتی دریای سیاه و مدیترانه در ترازهای ۸۵۰ میلی بار و دریای خزر در تراز ۹۹۵ میلی بار و۱۰۰۰ میلی بار، زمینه لازم را جهت ناپایداری سطوح بالایی جو در منطقه مورد را فراهم کرده است. ریو سالیدا (۱۹۹۰، Riosalido) روی بارش‌های سنگین منطقه مدیترانه مطالعاتی انجام دادند که نتایج مطالعه ایشان نشان داد که بیشترین وقوع بارش‌های سنگین در منطقه مدیترانه به‌وسیله سیستم‌های همرفتی ایجاد می‌گردد. سیبرت و همکاران (۲۰۰۷، Sebert)، الگوهای سینو پتیکی ایجادکننده بارش‌های سنگین را که هفت الگو می‌باشد در استرالیا بر اساس ۴ ساعت مشاهداتی روزانه و منطقه وقوع پدیده را شناسایی کردند. هوسس و همکاران (۲۰۰۸. Hoossos ,Etal)، بارش سنگین را با روش سینوپتیکی در یونان را با استفاده از داده‌های بارش روزانه و روش آماری چند متغیره، تحلیل عاملی و خوشه‌ای و نقشه‌های میانگین فشار سطح دریا، مقدارهای نقطه‌ای شبکه ۲/۵ * ۲/۵ تراز ۵۰۰- ۱۰۰۰ در دوره‌ی آماری ۱۹۷۰- ۲۰۰۲ تحلیل و بررسی کردند نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که بین الگوهای بارش سنگین با فعالیت سیکلونی شدید بر بالا یا نزدیک ناحیه کریک در یونان رابطه‌ای وجود دارد. مـتئو و همکاران (Mateo،۲۰۰۹)، وقوع بارش سنگین و توفان که در ۱۳ سپتامبر ۲۰۰۶ در کاتالونیا رخ داد را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، راداری و داده‌های رادیوسنجی خودکار ایستگاه هواشناسی موردمطالعه قراردادند. نتایج آن‌ها نشان داد که خط توفانی که از ناحیه کاتالونیا (شمال شرق اسپانیا) عبور کرده عامل اصلی وقوع بارش سنگین می‌باشد. پاتانایک و راجیوان (۲۰۱۰، Pattanik and Rajeevan)، در یک دوره آماری ۵۰ ساله تغییرپذیری فضای بارش‌های بیشینه را در هندوستان موردبررسی قراردادند. مطالعه آن‌ها نشان داد که میانگین فراوانی وقوع بارش‌های بیشینه همراه با سهم بارش‌های بیشینه فصلی روند افزایشی ۹۸٪ را داشته است.

معرفی منطقه موردمطالعه:

حوضه‌ی آبریز رودخانه کیوی چای با مجموع مساحت ۸۲۷ کیلومترمربع یکی از حوضه‌های آبریز سفیدرود می‌باشد که در مختصات ۴۸ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۴۸ در جه و ۳۵ دقیقه طول شرقی و ۳۷ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۳۰ دقیقه عرض شمالی قرارگرفته است. گستردگی بلندی‌ها و توده هوایی که حوضه آبریز موردمطالعه را تحت تأثیر قرار می‌دهد و

این‌که چه نوع دمایی در منطقه حاکم است را مشخص می‌کند. حوضه موردمطالعه با چشم‌انداز کوهستانی‌ای که دارد بخشی از منطقه‌های سردسیر و ییلاقی استان اردبیل محسوب می‌شود که زمستان‌های سخت و تابستان‌های معتدل را دارا می‌باشد؛ و رژیم دمایی در این منطقه متغیر می‌باشد به‌طوری‌که دما بین متوسط حداقل ۴/۱ و متوسط حداکثر ۸/۱۳ و متوسط میانگین ۶/۷ درجه سانتی‌گراد می‌باشد (شیرین مهدویان ۱۴۰۱). بارندگی‌های حوضه موردمطالعه حدود ۳/۸۱ درصد می‌باشد که از اول آبان ماه تا آخر اردیبهشت‌ماه اتفاق می‌افتد و بیشترین بارش تفریبا ماه‌های اردیبهشت و فروردین‌ماه را به خود اختصاص می‌دهد. بر این اساس رژیم بارشی منطقه موردمطالعه مدیترانه‌ای می‌باشد

روش تحقیق:

جهت انجام تحلیل همدیدی بارش‌های سیل‌آسای حوضه آبریز کیوی چای شهرستان خلخال و تعیین الگوهای گردشی آن از داده‌های آماری سال ۱۹۸۷ تا ۲۰۲۱ که شامل داده‌های بارش روزانه شهرستان خلخال بود از ایستگاه هواشناسی موجود در استان اردبیل گرفته شد و همچنین داده‌های دبی روزانه حوضه آبریز کیوی چای از اداره منابع آب استان اردبیل گرفته شد و سپس در برنامه اکسل فیلتر گذاشته شد و سپس صورت گردید و از این طریق روزهایی را که بالاترین بارش را داشتند انتخاب گردیدن و همچنین بالاترین دبی روزانه حوضه آبریز هم مشخص و انتخاب شدند و سپس در سایت نو آ اطلاعات وارد گردیدن و نقشه‌های سطح زمین و نقشه‌های سطوح بالای جو در تراز ۵۰۰ میلی بار و نقشه‌های امگا و نقشه آب قابل بارش از این سایت استخراج و سپس تحلیل گردیدند و از طریق همین نقشه‌ها مشخص شد که در دوره‌های آماری ۱۹۸۷ تا ۲۰۲۱ تعداد یک بارش سنگین در فصل تابستان به وقوع پیوسته است. در جدول (۱) نام ایستگاه و موقعیت جغرافیایی آن آمده است و در جدول (۲) تاریخ وقوع (میلادی و شمسی) بارندگی سنگین و میزان آن (میلی‌متر) در ایستگاه سینوپتیک استان اردبیل به ترتیب تاریخ آمده است و در جدول (۳) تاریخ بالاترین دبی (میلی‌متر بر ثانیه) مشخص‌شده است.

یافته‌ها:

در شکل (۲) سطح زمین در روز ۲۳ اوت ۲۰۲۰ نشان می‌دهد که مقدار بارندگی در ایستگاه سینوپتیک خلخال ۳۱ میلی‌متر به ثبت رسیده است. یک کم‌فشار با فشار مرکزی ۹۹۹ میلی بار بر روی ترکمنستان و جنوب دریاچه آرال شکل‌گرفته است که زبانه‌های این کم‌فشار از جهت شمال شرقی از جنوب شرق دریای خزر و زبانه ۱۰۶ میلی بار از منطقه موردمطالعه رد شده است. حرکت پادساعت‌گرد هوا که به‌صورت درون‌پیچی است و صعود هوار را به همراه دارد و رطوبت دریای خزر را به منطقه موردمطالعه وارد کرده و بارندگی و ناپایداری را به ارمغان آورده است. در این روز در نقشه سطح بالا یک فرود مورب

از کشور آذربایجان تا شرق کشور سودان کشیده شده است. شکل (۱) نشان می‌دهد که منحنی ۵۷۷۵ از منطقه موردمطالعه عبور کرده است. همچنین کشور ایران در جلوی فرود بادهای غربی قرارگرفته که در این ناحیه چرخندگی هوا مثبت و واگرایی بالا سبب صعود هوا، ایجاد ناپایداری و جو بارو کلینیک، رشد ابر و رخداد بارندگی شده است. در روز ۲۳ اوت ۲۰۲۰ در منطقه موردمطالعه مقدار امگا ۰/۱۲۵- پاسکال در ثانیه است که نشان از ناپایداری هوا دارد بیانگر این است که در تراز ۵۰۰ میلی بار، در هر ثانیه ۰/۱۲۵ پاسکال از فشر هوا کاسته می‌شود. این شرایط سبب سبکی هوا و صعود آن و درنهایت ایجاد بارش شده است. در رو ۲۳ اوت ۲۰۲۰ آب قابل بارش در منطقه ۲۵ کیلوگرم در مترمربع است که توانایی بارش دران روز را نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری:

این پژوهش بر مبنای رویکرد محیطی به گردشی درصدد یافتن ارتباط تحلیل همدیدی بارش سنگین در حوضه آبریز کیوی چای شهرستان خلخال می‌باشد. نتایج تحلیلی ایستگاه‌های سینوپتیکی با استفاده از داده‌ها و استخراج نقشه‌ها از سایت نو آ که شامل نقشه‌ی سطح زمین، نقشه‌ی سطوح بالای جو، نقشه‌ی امگا و نقشه آب قابل بارش موردبررسی قرار گرفت. شهرستان خلخال یک بارش سنگین طی سال ۱۹۸۷ تا ۲۰۲۱ را در فصل تابستان و در شهریورماه به خود اختصاص داد ه است. بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که بارش سنگین در منطقه موردمطالعه بارش ۳۱ میلی‌متر ثبت‌شده است که بیشترین بارندگی در شهریورماه (۲۳ اوت) را به خود اختصاص داده است. در این فصل در نقشه‌ی سطح زمین نفوذ زبانه کم‌فشار شرق سو بوده و در سطوح بالای جو، قرارگیری منطقه در جلوی فرود در ایجاد بارش سنگین نقش مؤثری داشته است. در منطقه‌ی مذکور رطوبت قابل‌توجه در بارش تابستانه از دریاچه آرال و دریای خزر سرچشمه می‌گیرد. آب قابل بارش در شهرستان خلخال ۲۵ کیلوگرم در هر مترمربع بوده است. امگای موجود هم در بارش این فصل ۱۲۵/۰- پاسکال بر ثانیه بوده است.

منابع:

- امیدوار، کمال. ۱۳۸۹. آب‌وهوا شناس. انتشارات دانشگاه یزد، یزد.
- پری، ه، ب. صلاحی، ی. خاموشی و م. ا.محمدی، ۱۳۹۴، تأثیر سامانه بلوکینگ امگایی در بارش‌های استان اردبیل (مطالعه موردی بارش سنگین ۲۹ می ۱۹۹۸). دومین همایش ملی صیانت از منابع طبیعی و محیط‌زیست، ۱۳ تا ۱۴ اسفند، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

• حمیدیان پور، محسن، علیجانی، بهلول، صادقی، علیرضا (۱۳۸۹)، شناسایی الگو هایه همدیدی بارش‌های شدید شمال شرق ایران، مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، ۱: ۱-۱۶.

• زینالی، ب، عالی جهان، م. دشت بانی، ف. فاضلی، ر، ۲۰۱۷. آشکارسازی همدید و هیدرو متئولوژیک ریشه‌های جوی سیلاب هیرو چای، خلخال، نشریه جغرافیا و برنامه‌ریزی، دوره ۲۱، شماره ۶۱، ص ۲۲۱-۲۰۳.

• صلاحی، ب.ب. زینالی، ف. دشتبانی و ق. هژبر پور، ۲۰۱۵. تحلیل سینوپتیکی بارش‌های سنگین شهرستان تبریز. کنفرانس بین‌المللی توسعه پایدار و راهکارها و چالش‌ها با محوریت کشاورزی، منابع طبیعی، محیطزیست و گردشگری، ۲۶ تا ۲۴ فوریه، تبریز، ایران.

• علیجانی، ب،۱۳۹۲. اقلیم‌شناسی سنوپتیک، { چاپ هفتم}. تهران: انتشارات سمت.

• قادری، ح و ب. علیجانی، ۱۳۸۹ .تحلیل سینوپتیکی بارش‌های شدید لارستان. فصل‌نامه جغرافیای طبیعی، ۳(۸):۳۶-۱۷.

• hossos, E.,c.j. Lolis and A. Bartzokas, 2008. Atomospheric circulation patterns associated with extream precipitation amounts in Greece, adv.geosice, 17: 5-11.

• Pattanaik, d.r., & Rajeevan, M. (2010) Variability of extreme rainfall events over india during southwest monsoon season Meterological Applications, 17(1), PP.88--140

• Mateo, J., D. Ballart, C. brucet,M. aran and J. Bech, 2009. A study of a heavy rainfall event and a tornado ourbreak during the passage of a quall live over catalonia Atomospheric research, 93[1-3]: 131-146.

• Riosalido, R. (1990), "Characterization of Mesoscale Convective system by Satellite Pictures during PREVIMET MEDITERRANEO-89" Segundo Simposio Nacional de Prediccion, Instituto Nacional de Meteorologia Apartado 258, 2807, Madrid, pp 15-148.

• seibert, A. Frank Formayer, H. (2007) "synoptic and Regional Patterns of Heavy Precipitation in Austna " , Theor: Appl. Climatol,87, pp: 139-153

سومین کنفرانس ملی آب و هواشناسی ایران (با محوریت تغییر اقلیم)
The 3rd National Conference on Climatology of Iran (Focusing on Climate Change)
ارومیه ۱۶ مهر ۱۴۰۴

بررسی آمایش اقلیم گردشگری راهکاری برای توسعه پایدار شهری مطالعه موردی: کلانشهر ارومیه

ایوب منوچهری[1]*

۱- استادیار، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

a. manouchehri@urmia.ac.ir

رویا کامل نیا[2]

۲-دانشجوی دکتری برنامه ریزی آمایش سرزمین،دانشگاه ارومیه،ارومیه،ایران

سهند آذر[3]

۳-دانشجوی دکتری برنامه ریزی آمایش سرزمین،دانشگاه ارومیه،ارومیه،ایران

چکیده

آمایش اقلیم گردشگری با شناسایی و برنامه‌ریزی برای پتانسیل‌های اقلیمی یک منطقه، به توسعه پایدار شهری کمک می‌کند. این رویکرد تضمین می‌کند که فعالیت‌های گردشگری با محیط زیست شهری و منابع طبیعی آن سازگار باشد و همزمان به بهبود کیفیت زندگی شهروندان و رشد اقتصادی محلی نیز منجر شود. به عبارت دیگر، این یک راه هوشمندانه برای استفاده از جاذبه‌های طبیعی و آب و هوایی شهر برای رونق گردشگری است، بدون اینکه به بافت شهری و اکوسیستم آن آسیبی وارد شود. هدف پژوهش حاضر، بررسی آمایش اقلیم گردشگری راهکاری برای توسعه پایدار شهری مطالعه موردی: کلانشهر ارومیه می باشد. در این پژوهش از مدل ISM استفاده شده است. این پژوهش ازنظر هدف، کاربردی - نظری و ازنظر روش، توصیفی– تحلیلی است. اطلاعات و داده های موردنیاز از طریق روش کتابخانه ای جمع آوری شده است. این مطالعه به بررسی نقش آمایش اقلیم گردشگری به عنوان راهکاری برای توسعه پایدار شهری در کلانشهر ارومیه می‌پردازد. با استفاده از مدل‌سازی ساختاری تفسیری (ISM)، ارتباطات پیچیده و سلسله‌مراتبی بین عوامل اقلیمی و زیرساخت‌های شهری در جهت توسعه گردشگری پایدار در این کلانشهر تحلیل شده است. نتایج این بررسی، عوامل کلیدی و تأثیرگذار را شناسایی کرده و نشان می‌دهد که چگونه برنامه‌ریزی مبتنی بر اقلیم می‌تواند به ارتقاء تاب‌آوری شهری، بهبود کیفیت زندگی و جذب پایدار گردشگر کمک کند. این رویکرد به مسئولین شهری و برنامه‌ریزان اجازه می‌دهد تا با درک عمیق‌تر از روابط علت و معلولی، استراتژی‌های جامع و یکپارچه‌ای را برای دستیابی به توسعه پایدار شهری از طریق گردشگری پایدار تدوین کنند.

کلید واژه ها: آمایش اقلیم گردشگری، توسعه پایدار شهری، کلانشهر ارومیه، مدلISM

مقدمه

آمایش سرزمین علمی است که با توجه به ویژگی های اکولوژیک سرزمین و شرایط اقتصادی- اجتماعی آن، نوع استفاده بهینه ازسرزمین را مشخص می سازد. در این میان، گردشگری خاصه بوم گردشگری پایدار، یکی از ابعاد چندبعدی توسعه فضایی یک منطقه است. بسیاری از مقاصد مطرح گردشگری جهان نیز، موفقیت خود را مرهون برخورداری از اقلیمی مطلوب هستند (عطایی و همکاران،۱۳۹۳: ۴). ویژگی های آب و هوایی مطلوب و سازگار با آسایش انسان، یکی از شروط اصلی برای انتخاب مقصدگردشگری است ونقش بسیار مهمی در تهیه تقویم گردشگری دارد.تغییراقلیم نیز می تواند تاثیرات زیادی بر حوزه گردشگری داشته باشدو سازمان های گردشگری، باید در برنامه ریزی ها و طراحی های آینده خود پتانسیل تاثیرات تغییر اقلیم را در این ارتباط مدنظر قرار دهند (جوان و یوسفی،۱۳۹۶: ۳). تغییرات اقلیمی و گردشگری وایستگی بالایی نسبت به یکدیگر دارند؛ زیرا آب و هوا، منبع مهم گردشگری و همچنین تعیین کننده رضایت گردشگر است که بر تقاضای گردشگری تاثیر می گذارد. به عبارت دیگر تغییر اقلیم نه تنها بر جذابیت مقاصد گردشگری از طریق ایجاد تغییرات در منابع گردشگری تاثیر می گذارد، بلکه بر تجربه مکان های سفر نیز تاثیر گذاشته که در نهایت بر تصمیم برای بازدید مجدد و گردشگران بالقوه اثرگذار است (عابدی و صداقت،۱۴۰۰: ۲). یکی از عمده ترین مسائل قرن حاضر، تغییر اقلیم است. تغییر اقلیم منجر به پیامدهای مختلفی می شود؛ از جمله این پیامدها، گسترش سیل، خشکسالی، گرد و غبار، بیماری، مرگ دام کشاورزان و تخریب محیط به خصوص در مناطق آسیب پذیر و ناپایدار است (Porter,etal2020:512). شواهد قابل استنادی همچون افزایش میانگین دمای هوا، ذوب گسترده برف، یخچال ها و بالا آمدن سطح آب دریاها در سراسر جهان، گرم شدن کره زمین را در دهه های اخیر به وضوح نشان می دهد (Eriksen,etal2022:23). امروزه شهرهای جهان هم از نظر تعداد جمعیت و هم از نظر مساحت جغرافیایی رشد چشم گیری داشته اند. بر اساس گزارش اداره امور اقتصادی و اجتماعی سازمان ملل متحد، در سال ۲۰۱۰، جمعیت شهری جهان به ۳/۵ میلیارد نفر رسید که پیش بینی می شود این رقم تا سال ۲۰۵۰ دوبرابر شود (سلمان ماهینی و همکاران،۱۴۰۲: ۵۵). امروزه شهرها به عنوان مصرف کننده و توزیع کننده اصلی کالاها و خدمات، کانون توجه بحث پایداری شده اند. بنابراین به منظور دستیابی به یک وضعیت پایدار واقعی در شهرها، تدوین سیاست هایی جهت حصول به شهرهای پایدار ضروری می نماید. به همین منظور مقوله ای مهم تحت عنوان توسعه شهری پایدار در طول دهه ۱۹۹۰ و تا به امروز مورد توجه قرار گرفته است (فرهنگی،۱۴۰۳: ۷۳). از طرفی، مشکل افزایش جمعیت در این کشورها به دلیل فقدان زیر ساخت کافی و فقر و گرسنگی چندین برابر خواهد شد. به علاوه، مشکل حاشیه نشینی در اطراف مناطق شهری در این کشورها به سرعت در حال گسترش است. بنابراین، کشورهای در

حال توسعه پیش از کشورهای توسعه یافته نیاز به برنامه ریزی در جهت نیل به اهداف توسعه پایدار دارند (Estevez,2019:45). هدف پژوهش حاضر، بررسی آمایش اقلیم گردشگری راهکاری برای توسعه پایدار شهری مطالعه موردی: کلانشهر ارومیه می باشد. در دنیای امروز که شهرها با چالش‌های فزاینده‌ای نظیر تغییرات اقلیمی، رشد جمعیت و نیاز به توسعه پایدار روبرو هستند، برنامه‌ریزی‌های جامع و آینده‌نگرانه اهمیت دوچندانی پیدا کرده است. آمایش اقلیم گردشگری به عنوان رویکردی نوین، پتانسیل‌های اقلیمی و طبیعی یک منطقه را برای توسعه پایدار صنعت گردشگری مورد بررسی قرار می‌دهد. این مطالعه با تمرکز بر کلانشهر ارومیه، که دارای ظرفیت‌های اقلیمی و طبیعی ویژه‌ای است، به دنبال تحلیل و تبیین نقش این آمایش در دستیابی به توسعه پایدار شهری است. با بررسی دقیق مولفه‌ها و تعاملات میان آن‌ها، این تحقیق قصد دارد راهکارهایی عملی برای بهره‌برداری بهینه از مواهب اقلیمی ارومیه در راستای رشد اقتصادی، حفظ محیط زیست و ارتقاء کیفیت زندگی شهروندان ارائه دهد.

پیشینه پژوهش

جوان، (۱۴۰۰) پژوهشی با عنوان؛ بررسی خشکسالی هواشناسی در ایستگاه ارومیه با استفاده از شاخص SPI تحت سناریوهای تغییر اقلیم (RCP) به این نتیجه رسیده است که تغییرات در فراوانی و شدت خشکسالی همراه با تغییر اقلیم، تأثیر قابل توجهی بر منابع آب و محیط زیست دارد که به نوبه خود در کشاورزی، جامعه و اقتصاد منعکس می‌شود. هدف از این تحقیق، بررسی تاثیر تغییر اقلیم بر روی خشکسالی هواشناسی در ایستگاه ارومیه می باشد.

اکبری ازیرانی و همکاران، (۱۴۰۱) پژوهشی با عنوان؛ ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر آسایش دمایی سلامت انسان در شهر تهران به این نتیجه رسیدند که مواد و روش ها بدین منظور ابتدا داده های مورد نیاز شامل آمار روزانه دمای بیشینه و کمینه، رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی ۲۰۲۰-۱۹۷۶ ایستگاه سینوپتیک مهرآباد تهران، تهیه و داده های مفقوده بازسازی شد. سپس با روش معتبر فائو پنمن مانتیث ۵۶ مقادیر تبخیر و تعرق مرجع در شهر تهران برآورد شد. علاوه برآن داده های گذشته فاز ششم(CMIP6) که در این پژوهش مدل MPI-ESM1-2-HR انتخاب شد. پس از مقیاس کاهی داده های CMIP6 مدل مورد نظر مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

زارع جدی و بنی شاه آبادی، (۱۴۰۳) پژوهشی با عنوان؛ توسعه مدل ریاضی برای بهینه سازی توسعه پایدار شهری: مطالعه موردی شهر تهران به این نتیجه رسیدند که نتایج حاصل از اجرای مدل نشان می دهد که با استفاده از این رویکرد، می توان به کاهش چشمگیر هزینه های زیرساختی، بهبود دسترسی به خدمات شهری و افزایش رفاه اجتماعی دست یافت. به طور خاص، مدل پیشنهادی قادر است نیازهای مناطق مختلف شهر تهران را به صورت تفکیک شده تحلیل کند و راهکارهای سفارشی سازی شده برای هر منطقه ارائه دهد.

رستمی فرد، (۱۴۰۳) پژوهشی با عنوان؛ ضرورت توجه به بنیان های اقلیمی در برنامه ریزی توسعه آمایش گردشگری در پارک ناژوان اصفهان به این نتیجه رسیده است که نتایج این مقاله نشان می دهد که با برنامه ریزی، مدیریت و سازماندهی این منطقه و ایجاد یک هم پیوندی بین آن ها است می توان قدرت و توان منطقه را در جذب گردشگران و ارائه خدمات کارآمد، اثربخش و مطلوب بالا برد. همچنین در این مقاله با توجه به طبقه بندی اقلیمی منطقه و با استفاده از طبقه بندی دومارتن و آمبرژه محدوده پارک ناژوان دارای اقلیم خشک سرد می باشد و پتانسیل جذب گردشگر در تمام فصول را ندارد.
ذبیحی و همکاران، (۱۴۰۴) پژوهشی با عنوان؛ مدل سازی و سطح بندی درآمدهای پایدار شهرداری (مطالعه موردی: شهرداری زنجان) به این نتیجه رسیدند که نتایج تحقیق حاضر قابل تعمیم به اغلب شهرداری‌ها و نظام مدیریت شهری در ایران است و تأکید بر ضرورت توجه به منابع پایدار درآمدی و کاهش وابستگی به منابع ناپایدار دارد. این امر نه تنها به بهبود وضعیت مالی شهرداری‌ها کمک می‌کند بلکه می‌تواند اعتماد عمومی را نیز افزایش دهد و زمینه‌ساز توسعه پایدار شهری باشد.
لمپل، (۲۰۲۰) پژوهشی با عنوان؛ در مقاله ای بیان می کند که توسعه پایدار، اگر چه به طور گسترده به عنوان یک عبارت و ایده استفاده می شود، معانی مختلف و همچنین پاسخ های مختلفی را در بر می گیرد. به طور کلی مفهوم توسعه پایدار، تلاشی برای حل نگرانی روبه رو رشد درباره طیف وسیعی از مسائل محیط زیستی با مسائل اجتماعی و اقتصادی است. توسعه پایدار برای مقابله با چالش های اساسی بشریت در حال حاضر و آینده است.
پینگ لین و ماتزاراکیس، (۲۰۲۱) پژوهشی با عنوان؛ گردشگری اطلاعات آب و هوایی بر اساس ادراک حرارتی انسان در تایوان و شرق چین با استفاده از شاخص دمای معادل فیزیولوژیک و طبقه بندی های آسایش حرارتی (TPCs) به بررسی منطقه اقدام نمود. نتایج نشان داد که تایوان و شرق چین برای مردمی که در منطقه معتدل سکونت دارند، در فصول بهار و پاییز و برای مردمی که در منطقه جنوب حاره سکونت دارند، منطقه جنوب در بهار و شمال در تابستان دارای شرایط مطلوب می باشد.
پارک و همکاران، (۲۰۲۳) پژوهشی با عنوان؛ کاربرد شاخص اقلیمی حرارتی جهانی (UTCI) را برای تجزیه و تحلیل های ریز اقلیمی در محیط های حرارتی شهری مورد بررسی قرار دادند. نتایج مطالعه نشان داد که UTCI برای تعیین شاخص حرارت انسان یک شاخص قابل قبول و ساده است که می توان نتایج آن را به صورت نقشه زیست اقلیمی انسان نشان داد و باید ابزاری مفید برای تجزیه و تحلیل حرارت در فضای باز و اثرات آن روی برنامه ریزی و طراحی چشم انداز شهری باشد.
مبانی نظری
امروزه اقلیم به عنوان یک جاذبه طبیعی در انتخاب مقصد گردشگری مطرح است و تاثیرات کلیدی بر اقتصاد یک منطقه در ارتباط با کاهش و یا افزایش میزان تقاضای گردشگری دارد. معمولاً ارتباط بین اقلیم و گردشگری شهری توسط شاخص

های اقلیم آسایش بیان می گردد (جوان و همکاران،۱۴۰۳: ۲۲). آب و هوا تاثیر درخور توجهی در فرایند تصمیم گیری گردشگران دارد. برای گردشگران، هوا و اقلیم یکی از مولفه های اصلی گردشگری است و یک عامل کلیدی در برنامه ریزی سفر یا محرک اولیه در نظر گرفته می شود. همچنین آب و هوا می تواند عامل مهمی در هزینه های گردشگری و رضایت از تعطیلات باشد (جوان،۱۳۹۶: ۴۲۳). تغییرات آب و هوایی بسته به میزان و شدت آن می تواند منجر به اثرات ناگهانی و جبران ناپذیری شود. اثرات این تغییرات در ادامه جنبه های اجتماعی، اقتصادی و به طور کلی سطح زندگی مردم تشدید می یابد (Ahsan,etal2021:25). تغییرات آب و هوایی را مهم ترین چالش گردشگری در قرن بیست و یکم شناسایی کردند. حساسیت و آسیب پذیری مقاصد گردشگری به آب و هوا و تغییر اقلیم نشان می دهد، در نتیجه تغییرات آب و هوایی، صنعت گردشگری نیز در آینده با تحولات شدید رو به رو خواهد شد و باید با خطرات فزاینده سازگار شود (حمیدیان پور و شجاع،۱۴۰۲: ۲۳۸). هوا و اقلیم به عنوان مولفه های اصلی گردشگری، عوامل مهمی در هزینه های گردشگری و رضایتمندی از تعطیلات هستند. از آنجا که صنعت گردشگری بسیار وابسته به اقلیم است، در دهه های اخیر اندیشمندان به بررسی گردشگری و آب و هوا علاقه مند شدند (ذوالفقاری و همکاران،۱۴۰۲: ۸۶). عبارت «توسعه پایدار» اولین بار در گزارش کمیسیون برانتلند (۱۹۸۷)، که به «آینده مشترک ما» نیز معروف است، به طور رسمی مطرح شد. در این کمیسیون، توسعه پایدار نوعی از توسعه تعریف شد که نیازهای کنونی را بدون کاهش توانایی نسل های آتی در برآوردن نیازهایشان تامین کند (Hindle,etal2021:123). همچنین، سازمان ملل متحد (۱۹۸۷) اعلام کرد توسعه پایدار به مجموعه ای از روش های ایجاد و تحمل فرایند توسعه گفته می شود که به دنبال کاهش میزان فقر، ایجاد استانداردهای عادلانه زندگی، تامین نیازهای اولیه مردم، و اقدامات سیاسی پایدار است (Faivre,etal2023:67). شهر پایدار می توان شهری دانست که در آن تنوع برقرار باشد و تفکیک و جدایی کالبدی وجود نداشته باشد و تمام طبقه های اجتماعی، امکان بهره گیری از خدمات و تسهیلات رفاهی را داشته باشند. شهر پایدار در روند توسعه پایدار شهری می بایستی ملاحظاتی را در ساختار شهری برای گسترش رضایت اجتماعی و افزایش رفاه شهروندی فراهم کند که بی شک تحقق رفاه عمومی، بهبود سطح توسعه انسانی پایدار نیز به همراه خواهد داشت (میرزا زاده دوستان،۱۴۰۱: ۲۴). برای ادغام سریع تر و موثرتر این صلاحیت های راهبردی، تاکتیکی و عملیاتی، بسیاری از شهرها هم اکنون فرآیندهای طراحی راهبردی بلند مدت خود را با انتقال طرح های پیشنهادی پایدار شهری به خدمات شهری، راه حل ها و فناوری ها بهبود می بخشند (رئوفی و همکاران،۱۴۰۳: ۵۸۱).

قلمروشناسی

شهر ارومیه، مرکز شهرستان ارومیه و مرکز استان آذربایجان غربی است که در فاصله ۱۸ کیلومتری دریاچه ارومیه، در مختصات جغرافیایی ۴۵ درجه و ۴ دقیقه طول شرقی از نصف النهار گرینویچ و ۳۷ درجه و ۳۲ دقیقه عرض شمالی از مبدأ خط استوا در داخل جلگه ای به طول ۷۰ کیلومتر و عرض ۳۰ کیلومتر قرار گرفته است. جمعیت شهر در سال ۱۳۹۵ بالغ ۷۳۶۲۲۴ نفر جمعیت داشته است. شهر ارومیه با مساحتی حدود ۶۰ کیلومتر مربع دارای موقعیت استقراری مناسب بوده و تقریبا در میانه استان واقع شده است (موسوی و همکاران،۱۴۰۱: ۱۵۰).

روش شناسی

تحقیق حاضر به لحاظ هدف، کاربردی و ازلحاظ ماهیت و روش، توصیفی – تحلیلی پیمایشی می‌باشد. اطلاعات و داده‌های موردنیاز از طریق روش کتابخانه‌ای و میدانی جمع‌آوری‌شده است. در شیوه کتابخانه‌ای ابتدا به‌منظور بررسی سوابق و پیشینه موضوع و تبیین چارچوب نظری – مفهومی پژوهش، کتب مقالات و پایان‌نامه‌های موجود موردمطالعه قرارگرفته است. در تنظیم اطلاعات و محاسبات در این پژوهش از مدل ISM استفاده شده است.

مدل‌سازی ساختاری تفسیری[124]

سیج مدل سازی ساختاری تفسیری را در سال ۱۹۷۷ ارائه کرده است. این روش به طبقه بندی عوامل و شناسایی روابط بین معیارها می‌پردازد. رویکرد مدلسازی ساختاری تفسیری یک متدولوژی موثر و کارا برای موضوعاتی است که در آن متغیرهای کیفی در سطوح مختلف اهمیت بر یکدیگر آثار متقابل دارند. با استفاده از این تکنیک می‌توان ارتباطات و وابستگی‌های بین متغیرهای کیفی مساله را کشف کرد (چاران و همکاران، ۲۰۰۸). در ذیل تمامی مراحلی که برای توسعه مدل مورد نظر با استفاده از تکنیک ISM مورد نیاز است، معرفی می‌شود (گویندان و همکاران، ۲۰۱۲).

۱- تشکیل ماتریس خود تعاملی ساختاری (SSIM)

در این گام خبرگان معیارها را به صورت زوجی با یکدیگر در نظر می‌گیرند و بر اساس طیف زیر به مقایسات زوجی پاسخ می‌دهند.

V: عامل سطر i باعث محقق شدن عامل ستون j می‌شود.

A: عامل ستون j باعث محقق شدن عامل سطر i می‌شود.

X: هر دوعامل سطر و ستون باعث محقق شدن یکدیگر می‌شوند (عامل i و j رابطه دوطرفه دارند).

O: بین عامل سطر و ستون هیچ ارتباطی وجود ندارد.

۲- بدست آوردن ماتریس دستیابی اولیه

124 Interpretive Structural Modelling

با تبدیل نمادهای ماتریس SSIM به اعداد صفر و یک بر اساس زیر ماتریس دستیابی اولیه بدست می‌آید.

اگر نماد خانه ij حرف V باشد در آن خانه عدد ۱ و در خانه قرینه عدد صفر گذاشته می‌شود.

اگر نماد خانه ij حرف A باشد در آن خانه عدد صفر و در خانه قرینه عدد ۱ گذاشته می‌شود.

اگر نماد خانه ij حرف X باشد در آن خانه عدد ۱ و در خانه قرینه نیز عدد ۱ گذاشته می‌شود.

اگر نماد خانه ij حرف O باشد در آن خانه عدد صفر و در خانه قرینه نیز عدد صفر گذاشته می‌شود.

۳- سازگار کردن ماتریس دستیابی

ماتریس دستیابی اولیه باید این قانون بررسی شود که اگر $i,j=1$, $j,k=1$ ➔ $i,k=1$. یعنی اگر معیار A با معیار B رابطه داشته باشد و معیار B نیز با معیار C رابطه داشته باشد آن‌گاه معیار A نیز باید با C رابطه داشته باشد.

۴- تعیین سطح متغیرها

در این گام مجموعه معیارهای ورودی (پیش نیاز) و خروجی (دستیابی) برای هر معیار را محاسبه می‌کنیم و سپس عوامل مشترک را نیز مشخص می‌کنیم در این گام معیاری دارای بالاترین سطح است که مجموعه خروجی (دستیابی) با مجموعه مشترک برابر باشد. پس از شناسایی این متغیر یا متغیرها، سطر و ستون آن‌ها را از جدول حذف می‌کنیم و عملیات را دوباره بر روی دیگر معیارها تکرار می‌کنیم.

۵- ترسیم شبکه تعاملات

در این گام با توجه به سطوح معیارها و روابط بین آن‌ها ترسیم شبکه تعاملات ایجاد می‌شود.

تحلیل MICMAC

تجزیه و تحلیل MICMAC بر پایه قدرت نفوذ (تاثیرگذاری) و میزان وابستگی (تاثیرپذیری) هر متغیر شکل گرفته و امکان بررسی بیشتر محدوده هر یک از متغیرها را فراهم می‌سازد. در این تحلیل متغیرها به چهار گروه خودمختار، وابسته، پیوندی (رابط) و مستقل تقسیم می‌شوند (کانان و هاک، ۲۰۰۷).

خودمختار: میزان وابستگی و قدرت هدایت کمی دارند این معیارها عموما از سیستم جدا می‌شوند زیرا دارای اتصالات ضعیف با سیستم هستند. تغییری در این متغیرها باعث تغییر جدی در سیستم نمی‌شود.

وابسته: این متغیرها دارای وابستگی قوی و هدایت ضعیف هستند این متغیرها اصولا تاثیرپذیری بالا و تاثیرگذاری کمی روی سیستم دارند.

مستقل: این متغیرها دارای وابستگی کم و هدایت بالا می‌باشند به عبارتی دیگر تاثیرگذاری بالا و تاثیرپذیری کم از ویژگی-های این متغیرها است.

رابط: این متغیرها از وابستگی بالا و قدرت هدایت بالا برخوردارند به عبارتی تاثیرگذاری و تاثیرپذیری این معیارها بسیار بالاست و هر تغییر کوچکی بر روی این متغیرها باعث تغییرات اساسی در سیستم می‌شود.

نتایج روش ISM

در این بخش از روش بهترین بدترین فازی جهت وزن‌دهی و اولویت‌بندی به عوامل پژوهش استفاده می‌شود.

جدول۱: معرفی عوامل پژوهش

ردیف	معرفی عوامل پژوهش
۱	ظرفیت اقلیمی (C1)
۲	پایداری زیست محیطی (C2)
۳	جذابیت مقصدی (C3)
۴	زیر ساخت اقلیمی (C4)
۵	رضایت گردشگر (C5)
۶	اشتغال محلی (C6)
۷	توسعه اقتصادی (C7)
۸	تاب آوری اقتصادی(C8)

در گام اول ماتریس خودتعاملی ساختاری پژوهش را با استفاده از نظر پاسخ‌دهندگان تشکیل می‌دهیم که در جدول زیر آورده شده است.

جدول۲: ماتریس خودتعاملی ساختاری

	C8	C7	C6	C5	C4	C3	C2	C1
C1	A	O	V	V	V	A	V	
C2	A	O	A	A	X	A		
C3	V	V	A	X	X			
C4	V	A	V	V				
C5	O	V	X					
C6	O	A						
C7	V							

C8	

در گام دوم باید ماتریس دستیابی اولیه را با تبدیل ماتریس خودتعاملی ساختاری به اعداد صفر و یک تشکیل داد.

جدول۳: ماتریس دستیابی اولیه

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
C1	0	1	0	1	1	1	0	0
C2	0	0	0	1	0	0	0	0
C3	1	1	0	1	1	0	1	1
C4	0	1	1	0	1	1	0	1
C5	0	1	1	0	0	1	1	0
C6	0	1	1	0	1	0	0	0
C7	0	0	0	1	0	1	0	1
C8	1	1	0	0	0	0	0	0

در گام سوم باید ماتریس دستیابی اولیه را سازگار کرد این سازگاری با استفاده از روابط ثانویه که ممکن است وجود نداشته باشند به ماتریس دستیابی اولیه افزوده می‌شوند. در جدول۴ سلول‌های که با 1^* نشان داده شد روابطی هستند که در ماتریس سازگار شده ایجاد شده اند.

جدول۴: ماتریس دستیابی اولیه سازگار شده

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	قدرت نفوذ
C1	1	1	1*	1	1	1	1*	1*	8
C2	0	1	1*	1	1*	1*	0	1*	6
C3	1	1	1	1	1	1*	1	1	8
C4	1*	1	1	1	1	1	1*	1	8
C5	1*	1	1	1*	1	1	1	1*	8
C6	1*	1	1	1*	1	1	1*	1*	8
C7	1*	1*	1*	1	1*	1	1	1	8
C8	1	1	0	1*	1*	1*	0	1	6
میزان وابستگی	7	8	7	8	8	8	6	8	

در گام چهارم باید بر اساس ماتریس دستیابی سازگار شده سطوح هر متغیر را بدست آورد مجموع متغیرهای ورودی و خروجی و اشتراک را محاسبه میکنیم در هر تکرار اگر متغیر خروجی با متغیر اشتراک برابر بود آن تکرار سطح iام می‌باشد.

سپس در تکرار بعد سطر و ستون آن متغیر از ماتریس حذف می‌شود و دوباره محاسبات صورت می‌گیرد. نتایج در زیر آورده شده است.

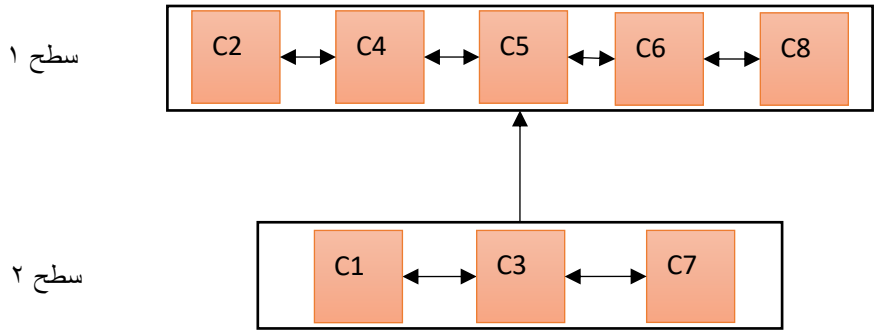
جدول۵: معیارهای سطح ۱

نام معیار	خروجی	ورودی	اشتراک	سطح
C1	C1C2C3C4C5C6C7C8	C1C3C4C5C6C7C8	C1C3C4C5C6C7C8	
C2	C2C3C4C5C6C8	C1C2C3C4C5C6C7C8	C2C3C4C5C6C8	1
C3	C1C2C3C4C5C6C7C8	C1C2C3C4C5C6C7	C1C2C3C4C5C6C7	
C4	C1C2C3C4C5C6C7C8	C1C2C3C4C5C6C7C8	C1C2C3C4C5C6C7C8	1
C5	C1C2C3C4C5C6C7C8	C1C2C3C4C5C6C7C8	C1C2C3C4C5C6C7C8	1
C6	C1C2C3C4C5C6C7C8	C1C2C3C4C5C6C7C8	C1C2C3C4C5C6C7C8	1
C7	C1C2C3C4C5C6C7C8	C1C3C4C5C6C7	C1C3C4C5C6C7	
C8	C1C2C4C5C6C8	C1C2C3C4C5C6C7C8	C1C2C4C5C6C8	1

جدول۶: معیارهای سطح ۲

نام معیار	خروجی	ورودی	اشتراک	سطح
C1	C1C3C7	C1C3C7	C1C3C7	2
C3	C1C3C7	C1C3C7	C1C3C7	2
C7	C1C3C7	C1C3C7	C1C3C7	2

در گام پنجم با استفاده از سطوح بدست آمده از معیارها، شبکه تعاملات ISM رسم می‌شود. اگر بین دو متغیر i و j رابطه باشد آن را به وسیله یک پیکان جهت دار نشان می‌دهیم. دیاگرام نهایی ایجاد شده که با حذف حالت‌های تعدی و نیز با استفاده از بخش‌بندی سطوح بدست آمده است در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل۳: مدل ISM پژوهش

همچنین مدل پژوهش را می‌توان از لحاظ قدرت نفوذ و وابستگی به صورت شکل ۴ نشان داد. بر این اساس تمامی معیارها متغیرهای رابط هستند این متغیرها از وابستگی بالا و قدرت هدایت بالا برخوردارند به عبارتی تاثیرگذاری و تاثیرپذیری این معیارها بسیار بالاست و هر تغییر کوچکی بر روی این متغیرها باعث تغییرات اساسی در سیستم می‌شود. البته قدرت رابط معیارهای C4 و C5 و C6 از دیگر معیارها بیشتر است.

نتیجه گیری

آمایش اقلیم گردشگری ریشه در مفاهیم برنامه‌ریزی سرزمینی و جغرافیا دارد و به معنای سازماندهی فضایی و زمانی فعالیت‌های گردشگری با توجه به ویژگی‌های اقلیمی یک منطقه است. این رویکرد به دنبال بهینه‌سازی بهره‌برداری از منابع اقلیمی برای توسعه گردشگری، با حفظ تعادل اکولوژیکی و پایداری اجتماعی است. از یک سو، نظریه‌های توسعه پایدار شهری بر اهمیت ابعاد اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی در برنامه‌ریزی شهری تأکید دارند و آمایش اقلیم گردشگری را ابزاری برای تحقق این ابعاد معرفی می‌کنند. از سوی دیگر، نظریه‌های برنامه‌ریزی استراتژیک و مدیریت منابع نشان می‌دهند که چگونه با شناسایی ظرفیت‌ها و محدودیت‌های اقلیمی، می‌توان مزیت رقابتی پایدار برای یک شهر ایجاد کرد. مدل‌های مفهومی مانند مدل ISM نیز در این حوزه به ما کمک می‌کنند تا روابط علی و معلولی بین مؤلفه‌های مختلف آمایش اقلیم و توسعه پایدار را درک کرده و ساختاری سلسله‌مراتبی از عوامل مؤثر را ترسیم کنیم. در نهایت، این مبانی نظری، چارچوبی برای تحلیل چگونگی تأثیرگذاری ویژگی‌های اقلیمی بر جذب گردشگر، توسعه زیرساخت‌ها و بهبود معیشت محلی فراهم می‌کنند، و تأکید دارند که این فرآیند باید همگام با اصول حفظ محیط زیست و مشارکت جامعه محلی باشد. هدف پژوهش حاضر، بررسی آمایش اقلیم گردشگری راهکاری برای توسعه پایدار شهری مطالعه موردی: کلانشهر ارومیه می باشد. در این پژوهش از مدل ISM استفاده شده است. این پژوهش ازنظر هدف، کاربردی - نظری و ازنظر روش، توصیفی– تحلیلی است. اطلاعات و داده های موردنیاز از طریق روش کتابخانه ای جمع آوری شده است. در جمع‌بندی این پژوهش، یافته‌ها نشان می‌دهند که آمایش اقلیم گردشگری به طور مؤثری می‌تواند به عنوان یک راهکار کلیدی برای دستیابی به توسعه پایدار در کلانشهر ارومیه عمل کند. استفاده از مدل ISM به درک عمیق‌تری از روابط پیچیده بین مؤلفه‌های مختلف آمایش اقلیم و ابعاد توسعه پایدار شهری منجر شد. مشخص گردید که مؤلفه‌هایی مانند «شناسایی و دسته‌بندی ظرفیت‌های اقلیمی گردشگری» و «توسعه زیرساخت‌های گردشگری سازگار با اقلیم» در سطح پایه‌ای قرار دارند و نقش زیربنایی ایفا می‌کنند. این مؤلفه‌ها با تأثیرگذاری بر «افزایش جذابیت مقاصد گردشگری» و «بهبود تجربه گردشگران»، زمینه را برای تحقق اهداف اقتصادی توسعه پایدار فراهم می‌آورند. همچنین، مؤلفه‌هایی چون «حفاظت از محیط زیست و تنوع زیستی» و «مشارکت جامعه محلی در فرآیندهای تصمیم‌گیری» به عنوان عوامل میانجی، ارتباط بین ظرفیت‌های اقلیمی و نتایج پایدار را تقویت

می‌کنند. در نهایت، این مطالعه تأیید می‌کند که بهره‌برداری هوشمندانه از اقلیم، نه تنها پتانسیل اقتصادی گردشگری ارومیه را شکوفا می‌سازد، بلکه به حفظ منابع طبیعی و ارتقاء کیفیت زندگی ساکنان نیز کمک شایانی خواهد کرد و انسجام اجتماعی را افزایش می‌دهد. بنابراین، اجرای راهکارهای مبتنی بر آمایش اقلیم گردشگری، گامی حیاتی در جهت تحقق شهری پایدار و تاب‌آور برای ارومیه محسوب می‌شود.

منابع

اکبری ازیرانی، طیبه، جوان، خدیجه، یحیوی دیزج، آمنه، (۱۴۰۲)، ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر آسایش دمایی سلامت انسان در شهر تهران، اولین کنگره ملی تغییر اقلیم و سلامت.

جوان، خدیجه، (۱۳۹۶)، مقایسه شاخص اقلیم گردشگری (TCI) و شاخص اقلیمی تعطیلات (HCI) (مطالعه موردی: ارومیه)، فصلنامه پژوهش های جغرافیای طبیعی، دوره ۴۹، شماره ۳.

جوان، خدیجه، یوسفی، سعدی، (۱۳۹۶)، بررسی تغییرات شاخص اقلیم گردشگری در حوضه دریاچه ارومیه طی دوره زمانی (۲۰۱۲- ۱۹۸۶)، اولین همایش اندیشه ها و فناوری های نوین در علوم جغرافیایی.

جوان، خدیجه، تقیلو، علی اکبر، همتی، سمیرا، (۱۴۰۳)، تعیین زمان مناسب برای گردشگری در استان آذربایجان غربی با استفاده از شاخص اقلیم تعطیلات (HCI)، مجله جغرافیا و روابط انسانی، دوره ۷، شماره ۳.

حمیدیان پور، محسن، شجاع، فائزه، (۱۴۰۲)، پیش نمایی پیامدهای تغییر اقلیم در توسعه گردشگری سواحل جنوب (جزیره کیش)، فصلنامه علمی پژوهشی گردشگری و توسعه، سال دوازدهم، شماره چهارم.

ذوالفقاری، حسن، مظلوم، کتایون، اوجی، روح اله، ماتزاراکیس، آندریاس، (۱۴۰۲)، تاثیر گرمایش جهانی بر اقلیم گردشگری ایران، فصلنامه علمی فضای جغرافیایی، سال بیست و سوم، شماره ی ۸۴.

ذبیحی، حسین، صدری، بهرام، احمدیان، رضا، (۱۴۰۴)، مدل سازی و سطح بندی درآمدهای پایدار شهرداری (مطالعه موردی: شهرداری زنجان)، فصلنامه توسعه پایدار محیط جغرافیایی، دوره ۷، شماره ۱۲.

رئوفی، ابوالفتح، نقدی، هادی، کیانیان، حمید رضا، (۱۴۰۳)، بررسی توسعه پایدار شهری : پایداری خدمات شهر هوشمند، فصلنامه رویکردهای پژوهشی نوین در مدیریت و حسابداری، سال هشتم، شماره ۹۵.

رستمی فرد، صفورا، (۱۴۰۳)، ضرورت توجه به بنیان های اقلیمی در برنامه ریزی توسعه آمایش گردشگری در پارک ناژوان اصفهان، هشتمین کنگره سالانه بین المللی توسعه کشاورزی، منابع طبیعی، محیط زیست و گردشگری ایران.

زارع جدی، محسن، بنی شاه آبادی، نگین، (۱۴۰۳)، توسعه مدل ریاضی برای بهینه سازی توسعه پایدار شهری: مطالعه موردی شهر تهران، دومین کنفرانس بین المللی مدیریت شهری و شهرسازی.

سلمان ماهینی، عبدالرسول، عموشاهی، سولماز، مرادی، حسین، میکائیلی تبریزی، علیرضا، گالان، کارمن، (۱۴۰۲)، تحلیل اهمیت شاخص های توسعه پایدار شهری در ایران و مقایسه آن با شاخص های جهانی، فصلنامه آمایش سرزمین، دوره ۱۵، شماره ۱.

فرهنگی،حسین، (۱۴۰۳)، شاخص ها و الزامات توسعه پایدار شهری، فصلنامه چشم انداز حسابداری و مدیریت، دوره ۷، شماره ۹۷.

موسوی و همکاران، (۱۴۰۱)، تأثیر مشارکت اجتماعی در فرایند بازآفرینی بافت قدیم شهری (مورد مطالعه: منطقه ۴ شهر ارومیه)، فصلنامه جغرافیا، دوره ۲۰، شماره ۷۴.

میرزا زاده دوستان، امیر، (۱۴۰۱)، بررسی مدیریت شهری و نقش آن در توسعه پایدار شهری، مجله جغرافیا و روابط انسانی، دوره۵، شماره ۲.

عابدی، سمانه، صداقت، ملیحه، (۱۴۰۰)، ارزیابی اثرات تغییرات اقلیم بر تقاضای گردشگری در شهرهای ایران، فصلنامه علمی اقتصاد و مدیریت شهری، شماره سی و هفتم.

عطایی، هوشمند، حیدری، ریحانه، زارعان، مرضیه، هاشمی نسب، سادات، (۱۳۹۳)، اقلیم گردشگری و آمایش سرزمین مطالعه موردی: ملایر، اولین همایش بین المللی علمی راهبردی توسعه گردشگری جمهوری اسلامی ایران، چالش ها و چشم اندازها.

Ahsan M.N., Ahmed M.F., Bappy M.H., Hasan M.N. and Nahar N., 2021. Climate change induced vulnerability on living standard-A study on southwestern coastal region of Bangladesh. Journal of Innovation and Development Strategy, 5(3): 24-28.

Eriksen, S. E. Klein, R. J. Ulsrud, K. Næss, L. O. & O'Brien, K., 2022. Climate change adaptation and poverty reduction: Key interactions and critical measures. GECHS report, 1, 1-44.

Estevez, E. (2016). Smart Sustainable Cities—Reconnaissance Study.

Faivre, N., Fritz, M., Freitas, T., de Boissezon, B., & Vandewoestijne, S. (2023). "Nature-Based Solutions in the EU: Innovating with nature to address social, economic and environmental challenges", Environmental Research, 159, pp. 509–518.

Govindan, K., Palaniappan, M., Zhu, Q. and Kannan, D., 2012. Analysis of third party reverse logistics provider using interpretive structural modeling. International Journal of Production Economics, 140(1), pp.204-211.

Hindle, P., White, P., & Minion, K. (2021). "Achieving real environmental improvements using value: Impact assessment", Long Range Planning, 26 (3), pp.

Kannan, G. and Haq, A.N., 2007. Analysis of interactions of criteria and sub-criteria for the selection of supplier in the built-in-order supply chain environment. International Journal of Production Research, 45(17), pp.3831-3852.
Lampel, Terry.(2020). Cultural Indicators of Development, UNESCO, UNRISD. Paris.
Porter, J.R., Xie, L., Challinor, A.J., Cochrane, K., Howden, S.M., Iqbal, M.M., Lobell, D.B. & Travasso, M.I. 2021. Food security and food production systems. Climate change impacts, adaptation, and vulnerability. Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK, and New York, USA, Cambridge University Press,485-533.
Park, S. Tuller, S.E. Jo, M. (2023), Application of Universal Thermal Climate Index (UTCI) for microclimatic analysis in urban thermal environments. Landscape and Urban Planning, 125: 146–155.
Ping Lin, T. Matzarakis, A. (2021), Tourism climate information based on human thermal perception in Taiman and Eastern China. Tourism Management, 32: 492-500.

Investigating tourism climate planning as a solution for sustainable urban development Case study: Urmia metropolis

❋[۱]Ayoub Manouchehri

۱ - Assistant Professor, Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, Urmia University, Urmia, Iran
Email: a. manouchehri@urmia.ac.ir
Roya kamelnia[2]
[۳]sahand azar

۳ - PhD Student, Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, Urmia University, Urmia, Iran

Abstract
Tourism climate planning contributes to sustainable urban development by identifying and planning for the climatic potential of an area. This approach ensures that tourism activities are compatible with the urban environment and its natural resources, while also improving the quality of life of citizens and leading to local economic growth. In other words, it is a smart way to use the city's natural and climatic attractions to promote tourism, without harming the urban fabric and its ecosystem. The aim of the present study is to examine tourism climate planning as a solution for sustainable urban development. Case study: Urmia metropolis. The ISM model was used in this study. This study is applied-theoretical in terms of purpose and descriptive-analytical in terms of method. The required information and data were collected through the library method. This study examines the role of tourism climate planning as a solution for sustainable urban development in Urmia metropolis. Using interpretive structural modeling (ISM), the complex and hierarchical relationships between climate factors and urban infrastructures for sustainable tourism

development in this metropolis have been analyzed. The results of this study identify key and influential factors and show how climate-based planning can help promote urban resilience, improve quality of life, and attract sustainable tourists. This approach allows city officials and planners to develop comprehensive and integrated strategies to achieve sustainable urban development through sustainable tourism by gaining a deeper understanding of the cause-and-effect relationships.

Keywords: Tourism climate planning, sustainable urban development, Urmia metropolis, ISM

سومین کنفرانس ملی آب و هواشناسی ایران (با محوریت تغییر اقلیم)
The 3rd National Conference on Climatology of Iran (Focusing on Climate Change)
ارومیه ۱۶ مهر ۱۴۰۴

ترکیب اثر تغییرات اقلیمی و جزایر حرارتی بر آب و هوای شهرهای ایران

محمد سلیقه[۱]، علیرضاکربلائی درئی[۲]

۱- استاد آب وهواشناسی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران، saligheh@khu.ac.ir

۲- استادیار آب و هواشناسی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران. karbalaee@khu.ac.ir

نویسنده مسئول saligheh@khu.ac.ir

چکیده

هدف از این مقاله بررسی نقش تغییر اقلیم و جزایر حرارتی بر عناصر آب و هوایی در شهرهای ایران است. تغییر اقلیم به عنوان بزرگترین تهدید روبروی بشریت مدرن تلقی می شود. عناصر اقلیمی ایران بویژه دما و تبخیر و تعرق در پنجاه سال گذشته دچار تغییرات شگرفی شده است. تغییر در این دوعنصر آب و هوایی نیاز آبی گیاهان را افزایش داده است. در عنصر بارش نیز نابسامانی ها افزایش یافته تغییراتی هر چند ناچیز بوقوع پیوسته است. روش کار با استفاده از مدل رگرسیون و ضریب خط بوده است. بطور متوسط طی ۴۱ سال اخیر دما روزانه در هرسال در ایران با آهنگ ۰/۰۲۴۵ درجه سانتیگراد و دمای شبانه با آهنگ ۰/۰۲۶۵ درجه سانتیگراد در سال افزایش یافته که دو برابر میانگین جهانی است. تبخیر و تعرق نیز به طور متوسط در سال با آهنگ ۵/۳۶ میلیمتر رو به افزایش است. نوسانات بارش رو به افزایش و مقدار آن با ۱/۱ میلیمتر در سال رو به کاهش است. شاخص خشکسالی نیز در ۱۹ سال اخیر منفی بوده است. تغییرات عناصر اقلیمی همگی حاکی از تشدید شرایط نامساعد اقلیمی برای جانداران ساکن در فلات ایران است. ترکیب اثر دوگانه گرمایش جهانی و گرم شدن ناشی از جزیره حرارتی باعث افزایش دمایی تا ۴ درجه سانتیگراد در برخی از شهرهای منتخب در این مقاله داشته است. اثر این دوبا هم باعث می شود تا سال ۲۱۰۰ برخی شهرهای جهان هشت درجه سانتیگراد گرم‌تر شوند. در مجموع پنج درجه سانتیگراد افزایش دما ناشی از اثر گرمایش جهانی خواهد بود و مابقی مربوط به تاثیر "جزایر گرمایی" است. ترکیب گرمایش جهانی و جزایر حرارتی در شهرهای ایران بر بحران های محیطی افزوده است

کلید واژه‌ها : تغییرات اقلیمی ، گرمایش جهانی، جزایر حرارتی، شاخص خشکسالی

مقدمه

تغییرات اقلیمی و آب وهوایی امروزه به یکی از برجسته¬ترین، مهم¬ترین و مورد توجه¬ترین موضوعات علمی جهان در زمینه علوم طبیعی و غیرطبیعی تبدیل گردیده¬است. سالانه شمار قابل توجهی از مقالات علمی پیرامون تغییرات اقلیمی، ویژگی¬های آن و اثرات و عواقب آن منتشر می¬گردد. در سال ۲۰۱۸ حدود ۹۰ هزار مقاله علمی پیرامون تغییرات اقلیمی منتشر شده¬است که این رقم از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸ حدوداً ده برابر شده است. (Klingelhöfer و همکاران, ۲۰۲۰) در جلسات شورای امنیت سازمان ملل، تغییر اقلیم به عنوان بزرگترین تهدید روبروی بشریت مدرن تلقی می شود (UN, 2021) و متخصصان سازمان ملل تغییر اقلیم را بزرگترین تهدیدی می¬دانند که جهان تا کنون به خود دیده¬است. (OHCHR, 2022) در نظرسنجی های انجام شده بر روی مردم در جوامع حدود ۱۹ کشور، سه چهارم افراد تغییر اقلیم را به عنوان تهدیدی مهم برای کشورشان تلقی کرده اند. (Pew Research Center, 2022) در ایران نیز توجه به موضوع تغییر اقلیم در سال های اخیر افزایش یافته است شکل شماره ۱ این تغییزات را در سال های اخیر نشان می دهد..

کنوانسیون تغییر اقلیم سازمان ملل (FCCC)، تشکیل‌شده در سال ۱۹۹۲، در ماده ۱ خود تغییر اقلیم را به عنوان "تغییری در آب‌وهوا که به شکل مستقیم یا غیرمستقیم به فعالیت انسانی نسبت داده شود و ترکیب جو را در سطح جهانی تغییر دهد و این علاوه بر تغییرات طبیعی آب‌وهوایی است که در بازه‌های زمانی قابل‌مقایسه مشاهده می‌شود" تعریف می‌کند. (UNFCCC, 1992) این تعریف از این جهت مبهم و قابل‌انتقاد است که بازه زمانی مشخصی برای شناسایی مفهوم تغییر اقلیم مشخص نگردیده‌است و مشخص نیست که کدام‌یک از تغییرات به درازای چند دهه، یک سده و یا چند سده را می‌توان به عنوان "تغییر" در اقلیم و شرایط آب‌وهوایی زمین پذیرفت. از سویی دیگر، این پرسش مطرح است که اگر فقط تغییراتی با منشأ فعالیت انسانی را "تغییر اقلیم" تعریف نماییم، پس تغییرات با منشأ طبیعی با چه عبارتی نامیده خواهند شد و چرا به جای عبارت "تغییر اقلیم" از عبارت "تغییر اقلیم انسانی" استفاده نگردیده‌است. تعریف انجام‌شده توسط کنوانسیون تغییر اقلیم سازمان ملل منجر به ایجاد بن‌بست و ناکارآمدی در مواجهه با تغییر اقلیم شده‌است و تعریف نادرست مفهوم تغییر اقلیم، می‌تواند منجر به تبعیض و جهت‌گیری در سیاست‌های سازگاری با تغییر اقلیم شده و مقدمات سیاسی‌سازی علم آب‌وهواشناسی را فراهم کند. (Pielke, 2005) بر خلاف انتظار، تعریف صورت‌گرفته از تغییر اقلیم توسط کنوانسیون تغییر اقلیم سازمان ملل با تعریف صورت‌گرفته توسط پنل بین‌دولتی تغییر اقلیم (IPCC) متفاوت است؛ به طوری که پنل بین‌دولتی تغییر اقلیم بر خلاف کنوانسیون سازمان ملل، "هر گونه تغییر در اقلیم در طول زمان چه به دلیل نوسان‌های

طبیعی و چه در نتیجه فعالیت انسانی" را به عنوان تغییر اقلیم تعریف می‌نماید؛ تفاوتی در تعریف که تبعات عملی بر سیاست‌های واکنشی داشته و منجر به مناقشات بی‌پایان سیاسی در این زمینه گردیده‌است. فارغ از این، به تعریف صورت-گرفته توسط پنل بین‌دولتی تغییر اقلیم نیز به مانند تعریف پیشین، انتقاداتی وارد می‌گردد و با این حال که هر دو نوع تغییرات طبیعی و انسانی را مدنظر قرار می‌دهد، به این موضوع اشاره نمی‌کند که چه بازه زمانی معین و مشخصی را می‌توان به عنوان یک تغییر در اقلیم و شرایط آب‌وهوایی پذیرفت (Pielke, 2004) .

وقایع اقلیمی حدی از جمله شاخص‌هایی است که در مباحث تغییر اقلیم مورد بررسی قرار می‌گیرد و این باور وجود دارد که با تشدید تغییرات اقلیمی، رخداد وقایع اقلیمی حدی نیز افزایش یافته‌است. (IPCC, 2021) وقایع اقلیمی حدی به رخدادهایی آب‌وهوایی گفته می‌شود که در یک بازه زمانی در مکانی مشخص، نادر محسوب شده و موارد رخداد آن‌ها بسیار کم است. (IPCC, 2022) مرور مصادیقی از وقایع اقلیمی حدی نشان می‌دهد که تعبیر افزایش این رخدادها همراه با تغییرات اقلیمی، شاید لزوماً صحیح نباشد. بررسی انجام‌گرفته در بازه زمانی دویست سال گذشته نشان می‌دهد که سطوح رخداد سیل‌های زمینی و همچنین بسامد رخداد چرخندهای حاره‌ای زمین‌شار روندی کاهشی داشته‌است. (Nott و همکاران, ۲۰۰۷) بررسی بازه آماری ۱۹۵۴-۲۰۱۳ نشان می‌دهد که علیرغم افزایش نوسان رخداد از سال ۱۹۷۰ به این سو، اما میزان رخداد تورنادوها یا توفان‌های پیچنده در ایالات متحده روندی نسبتاً ثابت داشته‌است. (Brooks و همکاران, ۲۰۱۴) برآوردی از بسامد رخداد توفان‌های تندری، توفان‌های تندری شدید و توفان‌های تندری پیچندی در ناحیه ایالات متحده و اروپا در بازه زمانی ۱۹۷۹-۲۰۱۹ نشان‌دهنده آن است که علیرغم روند افزایشی در نواحی شمال غربی، مرکزی و جنوبی اروپا، نواحی جنوب غربی و شرقی اروپا روندی ثابت یا کاهشی و عموم نواحی ایالات متحده روندی کاملاً کاهشی را تجربه کرده‌اند. (Taszarek و همکاران, ۲۰۲۱) برآوردهای صورت‌گرفته از هاریکن‌ها و توفندهای بزرگ رخداده در ایالات متحده و حوضه آبریز بزرگ اطلس شمالی از اواخر قرن نوزدهم میلادی نشان می‌دهد که علیرغم روند افزایشی موارد رخداد بر اساس داده‌های گزارش‌شده، پس از یکسان‌سازی و استانداردسازی داده‌ها این روند تغییر کرده و افزایش رخداده در بازه پس از ۱۹۷۰ میلادی نه یک افزایش در مقیاس سده، بلکه صرفاً به یک بازگشت از کمینه عمیقی تبدیل می‌شود که در بازه ۱۹۶۰-۱۹۸۰ وجود داشته‌است. (Vecchi و همکاران, ۲۰۲۱) برآورد دیگری از رخداد توفندهای زمین‌شار ایالات متحده از سال ۱۹۰۰ میلادی هیچ‌گونه روند افزایشی یا حتی روند معناداری را مشاهده نکرده‌است. (Klotzbach و همکاران, ۲۰۱۸) یک مطالعه بر بسامد چرخندهای حاره‌ای در مقیاس جهانی میان بازه ۱۹۴۰-۲۰۱۰ بیان می‌دارد که علیرغم ادعاهای انجام‌شده مبنی بر روند افزایشی رخداد این حوادث در سطح جهان و روند فزاینده خسارات ناشی از آن، هیچ‌گونه روند معناداری از رخداد چرخندهای حاره‌ای زمین‌شار بزرگ یا عادی در این بازه زمانی در سطح جهانی و در نواحی اطلس شمالی، آرام شرقی و غربی، اقیانوس هند شمالی و نیم‌کره جنوبی مشاهده نشد. (Weinkle و همکاران, ۲۰۱۲) بررسی

کوتاه‌مدت دیگری در بازه ۲۰۱۱-۱۹۷۰ اظهار می‌دارد که انرژی تجمیعی چرخندهای حاره‌ای به کمترین میزان چند دهه گذشته از اواخر دهه۱۹۷۰ میلادی رسیده‌است و بسامد موارد رخداد چرخندهای حاره‌ای نیز به کمترین میزان تاریخی خود رسیده‌است. (Maue, 2011) نویسندگان در مطالعه‌ای جهانی و خشکی‌پایه بر روی موارد خشکسالی در نیمه دوم قرن بیستم در بازه ۲۰۰۰-۱۹۵۰، با شناسایی ۲۹۶ مورد خشکسالی بزرگ‌مقیاس مشاهده کردند که دهه ۱۹۵۰ میلادی بیشترین فعالیت خشکسالی و بازه ۱۹۸۵-۱۹۷۵ کمترین میزان خشکسالی را ثبت کرده‌است. (Sheffield و همکاران, ۲۰۰۹)

تغییرات اقلیمی را می توان از دو منظر مورد توجه قرار داد. تغییرات اقلیمی اختیاری و تغییرات اقلیمی اجباری. در تغییرات اقلیمی اختیاری تغییراتی در عناصر آب و هوایی رخ می دهد که ناشی از طبیعت و سرشت اقلیم است و لذا برگشت پذیر می باشد. اما تغییراتی که از متأثر از شرایط بیرونی است و به جو تحمیل می شود را تغییرات اجباری می نامیم.

مسئله دما و گرمایش جهانی یکی دیگر از پایه‌های مهم در نظریه تغییر اقلیم انسانی و مباحث مطرح‌شده همراه با آن است. علیرغم این باور گسترده که زمین به شکلی بی‌سابقه در اثر فعالیت‌های انسانی دچار گرمایش و افزایش میانگین دما گردیده‌است (IPCC, 2023)، برخی مطالعات بلندمدت تاریخی اقلیمی، فارغ از عامل افزایش یا کاهش دما، اصل بی‌سابقه بودن دمای فعلی زمین را به چالش می‌کشند. یک مطالعه دیرینه‌اقلیم‌شناختی از دمای زمین در بازه ۸۰۰ هزار سال گذشته، چرخه‌های طبیعی از بیشینه‌ها و کمینه‌های چندصدهزار ساله را به نمایش می‌گذارد و طبعاً این مسئله را تأیید می‌نماید که دمای زمین همواره روند ثابتی را نداشته و حداقل در پیشینه حیات زیستی خود، سابقه موارد گرم‌تر از امروز را نیز ثبت کرده‌است. (Jouzel و همکاران, ۲۰۰۷) با بررسی مطالعه دیگری که به مرور و بازسازی پایگاه داده‌های مختلف از دمای زمین در بازه دو هزار سال گذشته پرداخته‌است، می‌توان مشاهده کرد که در اکثر شبیه‌سازی‌هایی که دو هزاره گذشته را شبیه‌سازی کرده‌اند، پیشینه ثبت دماهایی گرمتر از زمان کنونی نیز وجود داشته‌است. (Mann و همکاران, ۲۰۰۸) در دیگر مطالعه‌ای که به بازسازی دمایی دو هزار سال گذشته در نیم‌کره شمالی پرداخته‌است و برخی دیگر از مدل‌ها را نیز بررسی کرده‌است، مجدداً همین مسئله یعنی بازه‌های زمانی با دمایی بیشتر یا هم‌سطح با زمان کنونی در سده‌های پیشین مشهود است. (Moberg و همکاران, a۲۰۰۵) مروری جامع بر مطالعات انجام‌شده به روش بازسازی دمایی از طریق حلقه‌های تنه درختان، مجدداً این مسئله را تأیید می‌نماید. (Connolly و همکاران, ۲۰۲۱) در تمام بازسازی‌های اقلیمی دو هزاره گذشته، شواهدی از دو بازه زمانی یعنی بازه زمانی حدوداً ۱۲۰۰-۸۰۰ میلادی مشهور به بازه گرم قرون میانی (MWP) و بازه زمانی حدوداً ۱۸۰۰-۱۴۰۰ میلادی مشهور به عصر یخبندان کوچک (LIA) به چشم می‌خورد. (Mann و همکاران, ۲۰۰۹) بازه گرم قرون میانی از این جهت دارای اهمیت است که دماهایی هم‌سطح یا حتی بالاتر از دوره کنونی ثبت کرده‌است و بازه عصر یخبندان کوچک از این جهت دارای اهمیت است که سردترین دماهای نیم‌کره شمالی را ثبت کرده‌است و می‌توان

افزایش دمای فعلی از بازه ۱۸۰۰ میلادی به این سو را نه ضرورتاً در اثر فعالیت‌های انسانی، بلکه به صورت احتمالی و بالقوه ناشی از جبران روند دمایی قرون گذشته در قالب افزایش دمای دوباره دانست. .

اخیراً یکی از مباحث بسیار مهم در بحث مربوط به آب‌وهوای مناطق مختلف موضوع اقلیم و تغییر آن به عنوان یک وضعیت برگشت ناپذیر بوده و بسیاری از محققان به ابعاد مختلف این مهم پرداخته‌اند. یکی از مظاهر و پیامدهای این پدیده تغییر در عناصر اقلیمی بویژه دما و بارش مناطق مختلف است. به‌هم خوردن اندکی از تعادل اقلیم جهان موجب شده متوسط درجه حرارت کره زمین تمایل به روند افزایش را نشان دهد(۱۸۷۵-۲۰۰۱: IPCC). به طوری که، هیأت بین الدول تغییر اقلیم در سال ۲۰۰۱ گزارش داد که اقلیم در حال تغییر و گرمایش جهانی در حال وقوع است(دراکوپ و ویکنا، ۲۰۰۵، ۴۳۸). این پدیده به علت افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای در اتمسفر می‌باشد(دتینگروهمکاران ۲۰۰۴، ۳۱۲). روند دما و بارش در سراسر جهان یک سو نیست. تغییرات اقلیم الزاماً به معنی تغییر توأمان بارش و دما نمی‌باشد(کلارک، ۲۰۰۳، ۲۰۸). از طرفی، اثباط وجود روند معنی‌دار در یک سری زمانی بارندگی به تنهایی نمی‌تواند دلیل قاطعی بر وقوع تغییر اقلیم در یک منطقه باشد بلکه فرض رخداد آن را تقویت می‌نماید(سیرانو و همکاران، ۱۹۹۹، ۸۶).

در مطالعه‌ای مقایسه‌ای بین روندهای دما و باد در تهران و ورامین طی یک دوره چهل ساله انجام شد. این مقایسه نشان دهندۀ روند فزاینده دماهای کمینه تهران نسبت به ورامین می‌باشد. آهنگ افزایش میانگین سالانه دمای کمینه در تهران چهار برابر ورامین است. در تهران هر سال میزان افزایش دما ۰/۰۶۵ درجه سانتیگراد وورامین ۰/۰۱۶ درجه سانتیگراد است(رنجبر سعادت آبادی ۱۳۸۴، ۱۷۱). این مطالعه نشان می دهد که تأثیر تغییرات اقلیمی هنگامی که با اثر جزیره حرارتی ترکیب می شود اهمیت بحران را چندین برابر می کند.

هدف از این پژوهش بررسی تاثیر تغییرات اقلیمی اخیر در افزایش دما و تغییراتی در جزیره حرارتی شهرها و رخداد پدیده هایی نظیر اینورژن است. این تغییرات بویژه برای کلانشهری چون تهران که از نظر جغرافیایی کمتر پالایش پذیر است از اهمیت بیشتری برخوردار است. تهران شهری است که عوارض توپوگرافی آنرا از دسترس بادهای محلی و منطقه‌ای دور نگه داشته است و در بخش بزرگی از سال نیز با نفوذ پرفشارهای جنب حاره‌ای، با پایداری جوی همراه است. لذا از دیدگاه اقلیم شناسی، شرایط جوی وغیر جوی در آن، مناسب برای تهویه آلودگی‌های کلان مقیاسی که منتج از توسعه شهری است نمی‌باشد. تغییرات در مولفه‌های سینوپتیکی می‌تواند این مخاطرات را عمیق‌تر کند. هدف این پژوهش بررسی روند تغییرات مولفه‌های سینوپتیکی است که تحت تأثیر گرمایش جهانی و توسعه شهری دچار تغییراتی شده‌اند. بر اثر تغییرات آب وهوایی در دهه های اخیر، پایداری هوا و دوره تسلط آن بر نیوار شهر تهران افزایش یافته است. عوامل انسان ساخت باعث تشکیل جزیره حرارتی، افزایش ارتفاع LCL شده و تراز تراکم هوا را به ارتفاع بالاتری انتقال داده است. تغییر میدان باد

شهری، تشدید توربولانس های جوی، تشدید گرادیان های ترمودینامیک، فربه ای سیکلون های مهاجر ، از اثرات جزیره حرارتی شهرتهران هستند.

تغییرات اقلیمی در ایران

تغییر اقلیم یک تغییر طولانی مدت آب و هوایی در یک محل خاص ، منطقه و یا سیاره زمین است. چیزی که بیشتر مردم نمی دانند این است که تغییر در تنوع (تغییرپذیری swing) آب و هوایی را حتی اگر شرایط متوسط هوا هم یکسان باقی بماند، بعنوان تغییر اقلیم در نظر می گیرند. در حالی که تغییر زمانی اتفاق می افتد که اقلیم یک منطقه خاص و یا سیاره (زمین) بین دو دوره زمانی مختلف تغییر کند. این حالت معمولا زمانی حادث می شود که بعضی چیزها مثلا مقدار کل انرژی خورشید که توسط جو و یا سطح زمین جذب می شود تغییر کند. تغییرات اقلیمی می تواند هم به صورت تغییرات اختیاری و هم به صورت تغییرات اجباری اتفاق بیافتد. چنین تفاوت هایی می تواند هم تغییرات متوسط شرایط هوا و هم تغییراتی را که حول متوسط ها اتفاق می افتد شامل شود. تغییرات می تواند بوسیله فرایندهای طبیعی مانند فوران های آتشفشانی ، تغییرات در شدت تابش خورشید یا تغییرات بسیار آهسته در جریانهای اقیانوسی و سطح زمین که در طی دوره های زمانی طولانی در حد چندین دهه و یا قرن و یا بیشتر از آن رخ می دهد، ایجاد می شود که از آن به نام تغییرات اختیاری نام می بریم. از طرفی، انسان نیز با انتشار گازهای گلخانه ای و ذرات معلق (آئروسلها) در فضا باعث تغییر شرایط آب و هوایی می شود. بنا براین هر دو عامل طبیعی و انسانی موجب تغییر اقلیم می شوند. این گونه تغییرات اقلیمی را اجباری می نامند ، چرا که آنها با نیرو یا اجبار اقلیم را به سمت مقادیر جدید حرکت می دهند.

نوسانات یا تغییرپذیری اقلیمی به تغییرات یا نوسانات در آب و هوا به عنوان یک انحراف از متوسط بلند مدت (عناصر) هواشناسی در طی یک دوره معینی از زمان مثل ماه ، فصل و یا سال خاص اشاره می کند. نوسانات یک مؤلفه طبیعی اقلیم هستند که از تغییرات سیستم یا سیستمهایی که تحت نفوذ سیستم گردش عمومی هوا هستند ناشی می شوند. مثلا، یک سیستم (ها) ضعیف یا قوی می تواند بطور دوره ای منجر به حوادث شدید آب و هوایی شود. این نکته را باید یادآور شد که تعدادی از نوسانات اقلیمی می توانند بدون تاثیر در متوسط ها صورت گیرند. به عنوان مثال ، یک مکانی ممکن است مرطوبتر و یا خشک تر از سالهای نرمال شود در حالیکه متوسط ها تقریبا یکسان باقی بماند(شکل ۱).

از سال ۱۹۰۱ متوسط دمای دنیا ۰/۷۴ درجه افزایش یافته است. در طول ۶۵۰ هزار سال گذشته، مقدار دی اکسید کربن همواره زیر ۲۹۰ppm بوده است. در سال ۲۰۰۸ مقدار دی اکسی کربن به ۳۸۷ ppm رسیده که هر سال ۲ ppm به آن افزوده می‌شود.

هیات بین الدول تغییر اقلیم می گوید تا سال ۲۱۰۰ مقدار افزایش دمای کره زمین بین ۱ تا۳/۵ درجه سلسیوس خواهد بود . در سناریو ۹۷ درصدی‌ها، تقریبا ۹۷ درصد دانشمندان اقلیم شناسی نه تنها باور دارند که تغییرات اقلیمی در حال رخ دادن است بلکه آن‌ها باور دارند منشأ این تغییرات اقلیمی فعالیت‌های انسانی است. در مقابل ۳ درصد از دانشمندان اقلیم شناس تغییرات غیر طبیعی اقلیم را قبول ندارند.

آخرین باری که زمین دچار تغییرات آب‌وهوایی گسترده شد، مربوط به ۱۰ تا ۲۰ هزار سال قبل در عصر یخبندان بود. در آن دوره دمای کره زمین به صورت میانگین با ۶ درجه افزایش مواجه شد و با آب شدن حجم زیادی از یخ‌های زمین سطح آب دریاها تا ۱۲۰ متر بالا آمد و زلزله‌هایی به بزرگی ۸ ریشتر به وقوع پیوست.

ترکیب تغییر اقلیم و جزیره حرارتی شهر

اثر دوگانه گرمایش جهانی و گرم شدن محلی باعث می‌شود تا سال ۲۱۰۰ برخی شهرهای جهان هشت درجه سانتیگراد گرم‌تر شوند. در مجموع پنج درجه سانتیگراد افزایش دما ناشی از اثر گرمایش جهانی خواهد بود و مابقی مربوط به تاثیر "جزایر گرمایی" است . این تاثیر زمانی در شهرها رخ می‌دهد که پارک‌ها، سدها و دریاچه‌ها که اثر خنک‌کنندگی بر هوای شهر دارند جای خود را به سطوح سیمانی و آسفالته می‌دهند و این باعث می‌شود شهرها گرم‌تر از نواحی اطراف‌شان باشند. افزایش مصرف انرژی :افزایش دما در مناطق شهری منجر به افزایش مصرف انرژی برای خنک‌سازی ساختمان‌ها می‌شود که خود باعث افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود. تخمین زده می‌شود شهرهای متوسط تا سال ۲۱۰۰ حداقل ۹/۱۰ درصد ازکل تولید ناخالص خود را از دست بدهند. شهرها مسئول بیش از ۶۰ درصد انتشار دی‌اکسیدکربن ناشی از احتراق زغال‌سنگ، نفت و گاز هستند.

تئوری تضعیف گردش عمومی جو متاثر از تغییرات اقلیمی

موتور محرک گردش عمومی جو اختلاف دمای بین استوا و قطب زمین است. گردش عمومی جو عامل اصلی شکل گیری بادهای عمومی کره زمین ، شامل بادهای غربی و بادهای شرقی است. اگر تغییرات اقلیمی در سراسر کره زمین باعث افزایش دمای یکنواخت می شد اثر مخرب آن به مراتب کمتر بود اما چنانچه در شکل ۲ دیده می شود میزان افزایش دما در نواحی قطبی خیلی بیشتر از نواحی حاره ای است. در نواحی حاره ای افزایش دما حدود ۰/۵ درجه اما این میزان در نواحی قطبی به ۴ درجه سانتیگراد رسیده است. این امر باعث هرچه گرمتر شدن نواحی قطبی و به دنبال آن کاهش گرادیان حرارتی کره زمین و کاهش اختلاف دمای استوا و قطب خواهد شد. نهایتاً چنین وضعیتی باعث تضعیف گردش عمومی جو و نقصان انرژی بادهای سیاره ای زمین خواهد شد. بادهای سیاره ای باعث انتقال رطوبت از اقیانوس ها به قلب قاره های و خشکی

های کره زمین هستند. با تضعیف بادهای عمومی سیاره ای میزان رطوبت رسیده به خشکی ها کاهش یافته و خشکسالی همه گیر می شود.

تئوری تضعیف گردش دما شوری اقیانوس های زمین

افزایش نایکنواخت دمای آب اقیانوس ها باعث تضعیف گردش دما شوری (Termohaline Circolation) آب در اقیانوس ها خواهد شد. شکل ۳ تغییرات دمای سطح اقیانوس های کره زمین آنرا نشان می دهد. بیشترین افزایش دما در اقیانوس اطلس شمالی در محدوده جریان گلف استریم رخ داده است. این افزایش دما در بخش هایی از اقیانوس ها باعث تغییراتی در گردش آب اقیانوس ها تحت عنوان جریانات اقیانوسی خواهد شد.

آینده نگری و پیش بینی بارش در جهان

شکل ۵وضیت بارش در آینده نسبت به دوره گذشته(۱۸۵۰-۱۹۰۰) را نشان می دهد. بر اساس این پیش بینی در منطقه خاورمیانه کاهش بارش خواهد داشت و در منطقه جنوب آسیا رژیم موسمی با افزایش بارش روبرو خواهد شد. شکل ۴ تغییرات پیش‌بینی‌شده در میانگین بارش سالانه (٪) را نسبت به دوره ۱۹۰۰-۱۸۵۰ نشان می‌دهد، که در سه سناریوی مختلف گرمایش جهانی گرمایش ۱.۵ درجه سانتیگراد، ۲ درجه سانتیگراد و ۴ درجه سانتیگراد شبیه‌سازی شده است. پیش‌بینی می‌شود بارش در عرض‌های جغرافیایی بالا، اقیانوس آرام استوایی و بخش‌هایی از مناطق موسمی افزایش یابد، اما در بخش‌هایی از مناطق نیمه‌گرمسیری و بخش‌های محدودی از مناطق گرمسیری کاهش یابد.

هر یک از سه نقشه نشان می‌دهد که این تغییرات چگونه در سطح جهان توزیع شده‌اند در سناریوهای مختلف گرمایش:

(گرمایش ۱.۵ درجه سانتیگراد) :این نقشه تغییرات نسبتاً کوچک‌تری را در میزان بارش نشان می‌دهد. مناطق قهوه‌ای و زرد نشان‌دهنده مناطق خشک‌تر و مناطق سبز و آبی نشان‌دهنده مناطق مرطوب‌تر هستند. در زیر این نقشه نوشته شده است که تغییرات مطلق نسبتاً کوچک ممکن است برای مناطقی با شرایط پایه خشک مرتبط باشد.

(گرمایش ۲ درجه سانتیگراد) :در این سناریو، مناطق خشک‌تر و مرطوب‌تر کمی گسترده‌تر و شدیدتر به نظر می‌رسند نسبت به سناریوی ۱.۵ درجه سانتیگراد.

(گرمایش ۴ درجه سانتیگراد) :این نقشه شدیدترین تغییرات در بارش را نشان می‌دهد. مناطق بسیار خشک‌تر (قهوه‌ای تیره) و بسیار مرطوب‌تر (آبی تیره) در مقایسه با دو سناریوی دیگر قابل مشاهده هستند.

به طور خلاصه، این شکل نشان می‌دهد که با افزایش گرمایش جهانی، تغییرات در میانگین بارش سالانه در سراسر جهان بارزتر و شدیدتر می‌شوند. برخی مناطق با افزایش قابل توجه بارش مواجه خواهند شد، در حالی که مناطق دیگر با کاهش قابل توجه بارش و افزایش خشکسالی روبرو خواهند شد.

درجه افزایش دما

تأثیر تغییرات اقلیمی بر عناصر اقلیمی ایران

بررسی های انجام گرفته بر روی ۴۳ ایستگاه هواشناسی کشور طی دوره آماری ۴۲ ساله (۱۹۸۰-۲۰۲۱) حاکی از افزایش دما در میزان حداکثر دما (شکل ۵) و حد اقل دما (شکل ۶) در تمام ایستگاه ها در طی این دوره بوده است.

روند تغییرات دمای حداکثر براساس میانگین گیری از تمام ایستگاه های منتخب در شکل۷ نشان داده شده است. ضریب خط در آن برابر است با:

Y=0.0445x-64.804 به این معنا که در هر سال حداکثر دمای روزانه به مقدار ۰/۰۴۴۵ درجه افزایش می یابد. با این روند طی ۵۰ سال آینده ۲/۲۲۵ درجه سانتیگراد به دمای کشور افزوده خواهد شد.

روند تغییرات دمای حداقل براساس میانگین گیری از تمام ایستگاه های منتخب در شکل ۸ نشان داده شده است. ضریب خط در آن برابر است با:

Y=0.0465x-81.703 به این معنا که در هر سال حداقل دمای شبانروزی به مقدار 0/0465درجه افزایش می یابد. با این روند طی ۵۰ سال آینده ۲/۳۲۵ درجه سانتیگراد به دمای کشور افزوده خواهد شد.که حاکی از افزایش دمای شبانه نسبت به دمای روزانه خواهد بود.

بارش

روند تغییرات بارش در نموداری با عنوان" روند تغییرات بارش سال شمسی در ۵۰ سال اخیر در کل کشور "مشخص شده است (شکل ۹). این نمودار میزان بارش سالانه را بر حسب میلی‌متر برای کل کشور در طی یک دوره ۵۰ ساله شمسی، از سال ۱۳۵۰ تا ۱۴۰۱ نشان می‌دهد. محور عمودی میزان بارش سالانه بر حسب میلی‌متر را نشان می‌دهد که از ۱۰۰ تا ۴۰۰ میلی‌متر متغیر است . محور افقی سال‌های شمسی را از ۱۳۵۰ تا ۱۴۰۱ نشان می‌دهد . هر ستون عمودی نشان‌دهنده مجموع بارش سالانه برای یک سال شمسی خاص است و مقدار دقیق بارش برای هر سال در بالای ستون مربوطه با اعداد فارسی نوشته شده است در طی این دوره ۵۰ ساله، نوسانات قابل توجهی در بارش سالانه رخ داده است برخی از سال‌ها سطوح نسبتاً بالایی از بارش را تجربه کرده‌اند، در حالی که برخی دیگر مقادیر بسیار کمتری داشته‌اند. به عنوان مثال، به نظر می‌رسد که در اوایل تا اواسط دهه ۱۳۷۰ و دوباره در اواخر دهه ۱۳۸۰ تا اوایل دهه ۱۳۹۰، اوج‌هایی در میزان بارش

وجود داشته است . در مقابل، به نظر می‌رسد دوره‌هایی از بارش کمتر وجود داشته است، به ویژه در برخی از سال‌های اواخر دهه ۱۳۵۰ و سپس با وقوع بیشتر در سال‌های اخیر نشان داده شده است.

آینده پژوهی:

با توجه به داده‌های تاریخی ارائه شده در این نمودار، پیش‌بینی قطعی روند آتی بارش دشوار است. در حالی که در سال‌های اخیر نشان داده شده دوره‌های قابل توجهی از بارش کمتر وجود دارد، یک روند نزولی قوی و مداوم در کل دوره ۵۰ ساله مشاهده نمی‌شود. به نظر می‌رسد الگوهای بارش با تغییرپذیری و نوسانات دوره‌ای مشخص می‌شوند. بنابراین، پیش‌بینی آینده صرفاً بر اساس این داده‌های تاریخی ۵۰ ساله نشان می‌دهد که ممکن است همچنان شاهد نوسانات در بارش سالانه باشیم، با دوره‌هایی از بارندگی بیشتر و کمتر از حد متوسط. با این حال، توجه به این نکته مهم است که این تحلیل فقط بر اساس نمودار ارائه شده است که یک بازه زمانی محدود را پوشش می‌دهد و عوامل بالقوه تأثیرگذار دیگر مانند تغییرات آب و هوایی، الگوهای آب و هوایی منطقه‌ای و تغییرات زیست محیطی را در نظر نمی‌گیرد. چشم‌انداز جامع‌تر برای آینده نیازمند تجزیه و تحلیل مجموعه داده‌های تاریخی طولانی‌تر و گنجاندن مدل‌های مختلف آب و هوایی و سایر شاخص‌های زیست محیطی مرتبط است .

تبخیر و تعرق

شکل شماره ۱۰ نمودار " روند تغییرات تبخیر-تعرق بالقوه سال شمسی در ۵ سال اخیر در کل کشور"، میزان تبخیر-تعرق بالقوه سالانه در کل کشور را بر حسب میلی‌متر در طی یک دوره پنجاه ساله شمسی، از سال ۱۳۵۱ تا ۱۴۰۰ نشان می‌دهد. محور عمودی مجموع تبخیر-تعرق بالقوه را بر حسب میلی‌متر برای هر سال نشان می‌دهد . محور افقی سال‌های شمسی از ۱۳۵۱ تا ۱۴۰۰ را نشان می‌دهد هر ستون در نمودار مربوط به یکی از این سال‌های شمسی است

با مشاهده نمودار، متوجه می‌شویم که میزان تبخیر-تعرق بالقوه سالانه در طول دوره ۱۳۵۱ تا ۱۴۰۰ نوسان داشته است در برخی سال‌ها میزان تبخیر-تعرق بالقوه کمتر و در برخی سال‌ها بیشتر بوده است .با این حال، با وجود این تغییرات سالانه، به نظر می‌رسد که یک روند کلی افزایشی در تبخیر-تعرق بالقوه سالانه در طی این پنج دهه وجود دارد .این روند افزایشی به ویژه در سال‌های اخیر نشان داده شده در نمودار قابل توجه است . ین موضوع نشان می‌دهد که به طور متوسط، پتانسیل تبخیر آب از سطح زمین و تعرق از گیاهان در سراسر کشور در طول این دوره پنجاه ساله افزایش یافته است . در حاشیه نمودار ذکر شده است که مجموع تبخیر تعرق بالقوه سال شمسی در ۵ سال اخیر در کل کشور دارای میانگین ۱۲۳۴ میلیمتر در سال بوده است. این رون افزایشی به میزان ۵/۳۶ میلیمتر در سال بوده است.

روند آینده پژوهی:(Future Trend)

با توجه به روند مشاهده شده مبنی بر افزایش کلی در تبخیر-تعرق بالقوه سالانه بین سال‌های شمسی ۱۳۵۱ و ۱۴۰۰، می‌توان یک روند احتمالی برای آینده را استنباط کرد .اگر این روند صعودی ادامه یابد، احتمالاً تبخیر-تعرق بالقوه سالانه در کشور در سال‌های آینده نیز افزایش خواهد یافت . این افزایش بالقوه در تبخیر-تعرق می‌تواند پیامدهای قابل توجهی برای بخش‌های مختلف داشته باشد:

منابع آب :افزایش تبخیر-تعرق بالقوه می‌تواند منجر به افزایش تقاضا برای آب در بخش کشاورزی و سایر مصارف شده و به طور بالقوه منابع آب موجود را تحت فشار قرار دهد.

کشاورزی :تغییرات در میزان تبخیر-تعرق می‌تواند بر نیاز آبی محصولات کشاورزی و بهره‌وری کشاورزی تأثیر بگذارد.

آب و هوا :افزایش تبخیر-تعرق می‌تواند الگوهای آب و هوایی منطقه‌ای را تحت تأثیر قرار داده و به طور بالقوه منجر به شرایط خشک‌تر در برخی مناطق شود.

شاخص های خشکسالی

شکل شماره ۱۱ نمودار روند تغییرات شاخص خشکسالی SPEI (شاخص استاندارد شده بارش و تبخیر تعرق) را در کل کشور در دوره یک ساله منتهی به پایان اسفند ماه نشان می‌دهد . محور افقی نشان‌دهنده سال‌های هجری شمسی از ۱۳۷۳ تا ۱۴۰۲ است و محور عمودی مقادیر شاخص SPEI را نشان می‌دهد.1

این نمودار نشان می‌دهد که در دوره زمانی مورد بررسی، کشور دوره‌های مختلفی از خشکسالی و ترسالی را تجربه کرده است . با این حال، در سال‌های اخیر، به ویژه از اواسط دهه ۱۳۹۰ به بعد، وضعیت خشکسالی غالب بوده و شدت آن نیز افزایش یافته است .سال ۱۴۰۱ با خشکسالی بسیار شدید مشخص شده است و سال ۱۴۰۲ نیز وضعیت خشکسالی شدید را نشان می‌دهد.

آینده پژوهی:

با توجه به روند حاکم بر نمودار در سال‌های اخیر، به نظر می‌رسد که احتمال تداوم وضعیت خشکسالی در سال‌های آتی نیز وجود دارد .تکرار و تشدید دوره‌های خشکسالی شدید در سال‌های پایانی دوره مورد بررسی می‌تواند نشانه‌ای از تغییرات اقلیمی یا الگوهای آب و هوایی بلندمدت باشد که منجر به کاهش بارش و افزایش تبخیر و تعرق در سطح کشور شده است. با این حال، آینده‌پژوهی دقیق نیازمند تحلیل داده‌های بیشتری از جمله پیش‌بینی‌های مدل‌های اقلیمی، بررسی عوامل مؤثر بر بارش و تبخیر در مناطق مختلف کشور و در نظر گرفتن اقدامات مدیریتی و سازگاری با کم‌آبی است. صرفاً بر اساس

روند این نمودار می‌توان به طور محتاطانه پیش‌بینی کرد که در کوتاه‌مدت، احتمالاً شاهد تداوم چالش‌های مرتبط با خشکسالی در سطح کشور خواهیم بود .

تغییرات ارتفاع ژئوپتانسیل

با توجه به شکل شماره ۱۲ ، می‌توان مقایسه‌ای بین الگوی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در دو بازه زمانی متفاوت انجام داد. نمودار سمت چپ، سطح ژئوپتانسیل ۵۰۰ هکتوپاسکال را برای سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۴ نشان می‌دهد و نمودار سمت راست، همین متغیر را برای سال‌های ۱۹۴۸ تا ۱۹۵۲ نمایش می‌دهد . هر دو نمودار مربوط به ماه جولای تا دسامبر هر سال در بازه زمانی مورد نظر هستند و موقعیت تهران نیز بر روی آن‌ها مشخص شده است. در هر دو دوره زمانی، الگوی خطوط هم‌ارتفاع ژئوپتانسیل نشان می‌دهد که ایران و منطقه خاورمیانه تحت تأثیر سیستم‌های پرفشار درتابستان و کم‌فشار در زمستان در تراز میانی جو قرار دارند. به نظر می‌رسد که در دوره ۲۰۱۴-۲۰۱۰، گسترش زبانه پرفشار عرض‌های پایینی به سمت عرض‌های بالاتر و منطقه تهران بیشتر بوده است. به عنوان مثال، در جولای ۲۰۱۰ و ۲۰۱۱، خطوط هم‌ارتفاع با مقادیر بالاتر (مانند ۵۸۸۰ متر) به طور واضح‌تری در نزدیکی یا بر روی موقعیت تهران دیده می‌شوند . در مقابل، در دوره ۱۹۵۲-۱۹۴۸، به نظر می‌رسد که الگوی پرفشار در عرض‌های پایین تر متمرکز بوده و نفوذ آن به عرض‌های بالاتر و منطقه تهران کمتر است.

قوی‌تر و شمالی تر شدن پرفشار در دوره ۲۰۱۴-۲۰۱۰ :حضور خطوط هم‌ارتفاع بالاتر در نزدیکی تهران در دوره اخیر ممکن است نشان‌دهنده تقویت و گسترش سیستم‌های پرفشار جنب‌حاره‌ای به سمت شمال در این دوره باشد. این وضعیت می‌تواند منجر به شرایط آب و هوایی گرم‌تر و خشک‌تر در منطقه تهران و نواحی اطراف آن در ماه جولای در سال‌های ۲۰۱۴-۲۰۱۰ نسبت به سال‌های ۱۹۵۲-۱۹۴۸ شده باشد.

تغییر در الگوی گردش جو :تفاوت در موقعیت و قدرت سیستم‌های پرفشار در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال بین این دو دوره زمانی می‌تواند نشان‌دهنده تغییراتی در الگوی کلی گردش جو در سطح میانی در طول زمان باشد. این تغییرات می‌توانند تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله تغییرات اقلیمی رخ دهند.

شکل ۱۲: پیش روی سالیانه پرفشار جنب حاره ای و موقعیت تهران نسبت به آن در دو بازه: الف- در بازه ۵ ساله اول (۱۹۵۲-۱۹۴۸) و ب – در بازه ۵ ساله دوم (۲۰۱۴-۲۰۱۰). در بازه ۵ ساله دوم ارتفاع ژئوپتانسیلی و دوره استقرار آن افزایش یافته و به عرض‌های بالاتر نیز گسترش دارد.

بررسی ارتفاع ژئوپتانسیل در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در این دو دوره

الف- ارتفاع ژئوپتانسیلی در چهار سال از بازه ۵ ساله دوم (۲۰۱۰-۲۰۱۴)، به میزان ۱۰۰متر افزایش ارتفاع دارد. این افزایش ارتفاع باعث افزایش گرمایش بی درو و درو در نیوار تهران می شود.

ب- تعداد روزهای لانه‌گزینی پرارتفاع جنب حاره در نیوار تهران در بازه ۵ ساله دوم افزایش یافته است.

ج- پیشروی شمال سوی پرارتفاع جنب حاره به عرض‌های بالاتر در بازه ۵ ساله دوم بیشتر شده است.

شکل ۱۳: محدوده زمانی استقرار شرایط صعودی و موقعیت تهران نسبت به آن در دو بازه: الف- در بازه ۵ ساله اول (۱۹۴۸-۱۹۵۲) و ب – در بازه ۵ ساله دوم (۲۰۱۰-۲۰۱۴). در بازه ۵ ساله دوم محدوده زمانی شرایط صعودی نسبت به بازه اول افزایش یافته است.

شکل(۱۳) نشاندهنده محدوده زمانی استقرار شرایط صعودی و موقعیت تهران نسبت به آن در دو بازه: الف- در بازه ۵ ساله اول (۱۹۴۸-۱۹۵۲) و ب – در بازه ۵ ساله دوم (۲۰۱۰-۲۰۱۴) می‌باشد. در بازه ۵ ساله دوم محدوده زمانی شرایط صعودی نسبت به بازه اول افزایش یافته است. این افزایش بدلیل افزایش دما ناشی از گسترش محدوده جغرافیایی شهر تهران است. با گسترش شهر و افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی، افزایش دما رخ داده و شرایط صعود افزایش یافته است.

وضعیت حرکات عمودی جو در دوره بلند مدت (۱۹۴۵-۲۰۱۴) در شکل شماره ۱۴ نشان داده شده‌است. تنها از می تا اکتبر شرایط برای صعود هوا درتهران برقرار است. در بقیه ایام سال فرونشینی حاکم بوده که می‌تواند در تشدید آلودگی کمک کند. صعود هوا در تهران عمدتاً در ماه‌های مذکور تا تراز ۵۰۰ هکتوپاسکالی وجود دارد.

نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش حاکی از تشدید چشمگیر شرایط اقلیمی نامساعد در ایران در پی ترکیب اثرات دوگانه گرمایش جهانی و پدیده جزیره حرارتی شهری است. تحلیل داده‌های بلندمدت (۱۹۸۰-۲۰۲۱) نشان می‌دهد که افزایش دما در ایران با آهنگی حدود ۰.۰۴۵ درجه سانتیگراد در سال، تقریباً دو برابر میانگین جهانی است، به‌طوری که دمای حداقل شبانه با سرعتی بیشتر از دمای حداکثر روزانه در حال افزایش است. این گرمایش همراه با روند صعودی تبخیر-تعرق (با میزان افزایش ۵.۳۶ میلی‌متر در سال) و کاهش جزئی اما معنادار بارش (۱.۱ میلی‌متر در سال) بوده است که در مجموع منجر به تشدید خشکسالی، به‌ویژه در دو دهه اخیر، شده است. این تغییرات نه تنها ناشی از اجبارهای جهانی اقلیمی هستند، بلکه تحت تأثیر توسعه شهری و تشکیل جزایر حرارتی، به‌ویژه در کلانشهرهایی مانند تهران، تشدید شده‌اند. تغییرات سینوپتیکی مشاهده‌شده، از جمله تقویت و پیشروی شمال‌سوی پرفشار جنب‌حاره‌ای و افزایش دوره‌های استقرار شرایط پایدار جوی، بستر را برای تشدید آلودگی هوا و کاهش کیفیت محیط زیست شهری فراهم کرده‌اند. در مجموع، این مطالعه هشدار

می‌دهد که ادامه این روندها، به‌ویژه در تعامل با رشد شهرنشینی، می‌تواند بحران‌های محیط‌زیستی و منابع آب را در فلات ایران به سطحی بحرانی برساند و لزوم تدوین سیاست‌های فوری سازگاری و کاهش اثرات را آشکار می‌سازد.

منابع

رنجبر سعادت آبادی ،عباس(۱۳۸۴) بررسی تغییرات میدان‌های باد و دما در کلان شهر تهران ناشی از توسعه شهری، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی شماره ۷۶: ۱۷۱ -۱۸۸.

مهدی هادی، مریم هاشم خانی ، الناز ایروانی(۱۴۰۱)، تحلیل روند تحقیقات علمی در حوزه تغییر اقلیم در ایران، مجله سلامت و محیط زیست ، دوره ۱۵ شماره ۲ صص ۳۶۱-۳۷۸

Brooks, H. E., Carbin, G. W., & Marsh, P. T. (2014). Increased variability of tornado occurrence in the United States. Science, 346(6207), 349–352. https://doi.org/10.1126/science.1257460

Dettinger, M.D. Cayan, D.R. Meyer, M. & Jeton A.E., (2004), "Simulated hydrologic responses to climate variations and change in the Merced, Carson, and American River basins, Sierra Nevada, California, 1900-2099." Climate Change, 62: 283-317.

Dracup, J.A. & Vicuna, S., (2005), "An Overview of Hydrology and Water Resources Studies on Climate Change: the California Experience." Proc. EWRI 2005: Impacts of Global Climate Change.

IPCC: (2001b), "Climate change 2001: The Scientific Basis;, Contribution of Working Group Ito the Third Assessment Report of the Intergovernmental panel on Climate Change(IPCC)" Houghton, J.T. Dinggs. Y. Noguer, M.P.J. Linden, V.X. Maskell, D.K. & Johnson, C.A., Cambridge University Press, Cambridge, UK.881.

Klingelhöfer, D., Müller, R., Braun, M., Brüggmann, D., & Groneberg, D. A. (2020). Climate change: Does international research fulfill global demands and necessities? Environmental Sciences Europe, 32(1), 137. https://doi.org/10.1186/s12302-020-00419-1

Klotzbach, P. J., Bowen, S. G., Pielke, R., & Bell, M. (2018). Continental U.S. Hurricane Landfall Frequency and Associated Damage: Observations and Future Risks. Bulletin of the American Meteorological Society, 99(7), 1359–1376. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-17-0184.1

Jouzel, J., Masson-Delmotte, V., Cattani, O., Dreyfus, G., Falourd, S., Hoffmann, G., Minster, B., Nouet, J., Barnola, J. M., Chappellaz, J., Fischer, H., Gallet, J. C., Johnsen, S., Leuenberger, M., Loulergue, L., Luethi, D., Oerter, H., Parrenin, F., Raisbeck, G., … Wolff, E. W. (2007). Orbital and Millennial Antarctic Climate Variability over the Past 800,000 Years. Science, 317(5839), 793–796.

Marengo, J.A. & Camargo, C.C., (2008), "Surface air Temperature Trends in Southern Brazil for 1960-2002'' Int. Journal of Climatol, 28: 893- 904.

Mann, M. E., Zhang, Z., Rutherford, S., Bradley, R. S., Hughes, M. K., Shindell, D., Ammann, C., Faluvegi, G., & Ni, F. (2009). Global Signatures and Dynamical Origins of the Little Ice Age and Medieval Climate Anomaly. Science, 326(5957), 1256–1260. https://doi.org/10.1126/science.1177303

Mann, M. E., Zhang, Z., Hughes, M. K., Bradley, R. S., Miller, S. K., Rutherford, S., & Ni, F. (2008). Proxy-based reconstructions of hemispheric and global surface temperature variations over the past two millennia. Proceedings of the National Academy of Sciences, 105(36), 13252–13257.

Nott, J., Haig, J., Neil, H., & Gillieson, D. (2007). Greater frequency variability of landfalling tropical cyclones at centennial compared to seasonal and decadal scales. Earth and Planetary Science Letters, 255(3–4), 367–372. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2006.12.023

OHCHR. (2022). Climate change the greatest threat the world has ever faced, UN expert warns. https://www.ohchr.org/en/press-releases/2022/10/climate-change-greatest-threat-world-has-ever-faced-un-expert-warns

Pew Research Center. (2022). Climate Change Remains Top Global Threat Across 19-Country Survey. https://www.pewresearch.org/global/2022/08/31/climate-change-remains-top-global-threat-across-19

Pielke, R. A. (2004). What is Climate Change? Energy & Environment, 15(3), 515–520. https://doi.org/10.1260/0958305041494576

Serrano, A. Mateos, V.L. & Garcia, J.A., (1999), "Trend Analysis of Monthly Precipitation Over the Iberian Peninsula for the Period 1921-1995" phys. Chem. EARTH (B), 24: 85-90.

Sheffield, J., Andreadis, K. M., Wood, E. F., & Lettenmaier, D. P. (2009). Global and Continental Drought in the Second Half of the Twentieth Century: Severity–Area–Duration Analysis and Temporal Variability of Large-Scale Events. Journal of Climate, 22(8), 1962–1981.

Taszarek, M., Allen, J. T., Brooks, H. E., Pilguj, N., & Czernecki, B. (2021). Differing Trends in United States and European Severe Thunderstorm Environments in a Warming Climate. Bulletin of the American Meteorological Society, 102(2), E296–E322. https://doi.org/10.1175/BAMS-D-20-0004.1

Vecchi, G. A., Landsea, C., Zhang, W., Villarini, G., & Knutson, T. (2021). Changes in Atlantic major hurricane frequency since the late-19th century. Nature Communications, 12(1), 4054. https://doi.org/10.1038/s41467-021-24268-5

Weinkle, J., Maue, R., & Pielke, R. (2012). Historical Global Tropical Cyclone Landfalls*. Journal of Climate, 25(13), 4729–4735. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00719.1

K. Kürbis, M. Mudelsee, G. Tetzlaff, R. Brázdil, 2009, Trends in extremes of temperature, dew point, and precipitation from long instrumental series from centralEurope, Theor Appl Climatol, pp.187-195.

Ramasamy Suppiah, Kevin J. Hennessy,1998, Trends in total rainfall, heavy rain events and number of dry days in Australia,1910-1990, CSIRO Division of Atmospheric Research.

Xuebin Zhang, Lucie A. Vincent, W.D. Hogg and Ain Niitsoo,2000, Temperature and Precipitation Trends in Canada During the 20th Century, Climate Research Branch, Meteorological Service of Canada.

http://www.azarwater.ir

The combined effect of climate change and heat islands on the climate of Iranian cities

Mohammad Saligheh*[1], Ali Reza karbalaee[2]

Department of Climatology Faculty of Geographical Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran

Department of Climatology Faculty of Geographical Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran

* Corresponding author: saligheh@khu.ac.ir

Abstract:
This article aims to investigate the impact of climate change on climatic phenomena in Iran. Climate change is widely recognized as one of the most significant threats confronting contemporary humanity. Over the past 50 years, key climatic variables in Iran, particularly temperature and evapotranspiration, have experienced substantial alterations. These changes have resulted in an increased demand for water among plant life. Additionally, there have been notable disturbances in precipitation patterns, although these changes have been relatively modest. On average, the temperature in Iran has risen by 0.0436 degrees Celsius annually over this period, with the rate of temperature increase being approximately double the global average. Moreover, evaporation and transpiration have risen at an average rate of 5.36 mm per year. Precipitation variability has intensified, accompanied by an average decrease of 1.1 mm per year. The drought index has exhibited negative trends over the past 19 years. Collectively, these alterations in climatic variables indicate a worsening of adverse climatic conditions for organisms inhabiting the Iranian plateau. The synergistic effects of global warming and localized warming are projected to result in temperature increases of up to eight degrees Celsius in certain urban areas worldwide by the year 2100. Of this total increase, five degrees Celsius is attributed to global warming, while the remaining increase is associated with the phenomenon of "heat islands." The interaction of global warming and urban heat islands in Iranian cities has exacerbated the environmental crisis.
Key words: Climate change, global warming, heat islands, drought index

شبیه‌سازی شار تابشی طول‌موج کوتاه با کاربست مدل RRTMG بر بستر دریاچه ارومیه

محمد خدمتی[۱]، مهشید کاویانی[۲] ، فرهنگ احمدی‌گیوی[۳]، علیرضا محب‌الحجه[۴]

۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، mkhedmati@ut.ac.ir

۲دکتری، سازمان هواشناسی کشور، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، mahshid.kaviani@ut.ac.ir

۳ استاد، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ahmadig@ut.ac.ir

۴ استاد، گروه فیزیک فضا، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، amoheb@ut.ac.ir

نویسنده مسئول: mkhedmati@ut.ac.ir

چکیده

تابش خورشیدی به عنوان منبع انرژی کره زمین شناخته می‌شود و به دلیل تأثیر بر اقلیم و بودجه انرژی، مطالعه آن برای پژوهشگران از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این پژوهش مدل انتقال تابشی RRTMG در محدوده جغرافیایی دریاچه ارومیه اجراء شده و نتایج حاصل از آن برای شارهای تابشی مستقیم و خالص در محدوده طول‌موج کوتاه با داده‌های بازتحلیل مقایسه خواهد شد. ورودی‌های مدل شامل مقادیر رادیوگمانه، ایستگاه هواشناسی و سنجنده AIRS است. نتایج نشان می‌دهد شارهای تابشی مستقیم و خالص به ترتیب ۲۶/۲۸ و ۵/۴۳ W m-2 با داده‌های بازتحلیل اختلاف دارند که حاکی از عملکرد مطلوب مدل است.

کلید واژه‌ها: RRTMG، تابش، هواویز، شبیه‌سازی، بازتحلیل

مقدمه

تابش عبارت است از انتشار امواج الکترومغناطیسی با طول‌موج و انرژی معین که در صورت برهمکنش با محیط مادی، انرژی چشمه تابش به ماده منتقل می‌شود (لیو، ۲۰۰۲؛ پرایز و همکاران، ۲۰۱۴). انتقال تابش و برهمکنش آن با مؤلفه‌های جوّی از جمله مولکول‌های هوا و هواویزها (Aerosols) از مباحث بنیادی در هواشناسی و اقلیم‌شناسی به شمار می‌رود و بررسی آن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. نقش برهمکنش تابش و هواویزها در بودجه تابشی، اهمیت این موضوع را دوچندان می‌سازد. با تشدید تغییرات اقلیمی، میزان هواویزها و مولکول‌های جوّی در مناطق مختلف جهان دستخوش تغییرات قابل‌توجهی می‌شود و در نتیجه، برهمکنش تابش با این مؤلفه‌ها نیز به‌طور مستمر دگرگون می‌شود. مطالعه ویژگی هواویزها و مولکول‌های جوّی به دلیل نقش آنها در جذب و پراکنش تابش (اثر مستقیم هواویزها) و همچنین تأثیرگذاری بر خُردفیزیک ابرها (اثر غیرمستقیم هواویزها)، جایگاه ویژه‌ای در پژوهش‌های هواشناسی و اقلیم‌شناسی دارد (کونیال و

گولیریا، ۲۰۱۹؛ خدمتی و همکاران، ۱۴۰۳). در شبیه‌سازی فرایند انتقال تابش، ابتدا نحوه برهمکنش تابش با مولفه‌های جوّی مورد بررسی قرار می‌گیرد و سپس با توجه به نیازهای کاربردی، تقریب‌های مناسب بر اساس قوانین فیزیکی حاکم بر جوّ انتخاب و در توسعه مدل‌های انتقال تابش به کار گرفته می‌شوند. مباحث یادشده نشان می‌دهند که شبیه‌سازی انتقال تابش از اهمیت اساسی برخوردار است (کاویانی و همکاران، ۲۰۲۲).

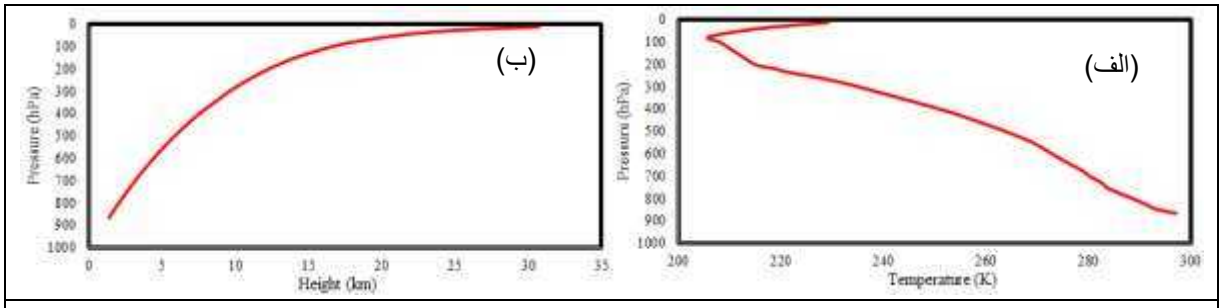
در این پژوهش از مدل انتقال تابشی RRTMG (Rapid Radiative Transfer Model- GCM applications) به‌صورت تک ستونی (single-column) استفاده شده است. مدل RRTMG یکی از معروف‌ترین مدل‌های انتقال تابشی است که امروزه در بسیاری از سازمان‌ها و پژوهشگاه‌ها در هر دو محدوده طول‌موج بلند و کوتاه استفاده می‌شود. پژوهشگران متعددی در زمینه برهمکنش تابش و هواویزها و همچنین مدل‌سازی آن مطالعاتی انجام داده‌اند که از جمله آنها می‌توان به پژوهش آیاکونو و همکاران (۲۰۰۰) اشاره داشت. یکی از اهداف آنها مقایسه مدل RRTMG با دیگر مدل‌ها بود. نتایج نشان داد، این مدل در وردسپهر و عرض‌های میانی و پایین برای محاسبه سرمایش تابشی طول‌موج بلند $-0/2$ ۰/۵K day^{-1} خطا دارد. همچنین معلوم شد که به علت بالا بودن مقادیر بخار آب در جوّ، RRTMG در طول‌موج بلند به این هواویز حسّاس است. این مطالعه اشاره می‌کند که مدل مورد استفاده نسبت به مدل‌های دیگر مانند CCM3 (مدل اقلیمی جامعه) سرعت و دقت بیشتری دارد. از دیگر پژوهش‌های موجود می‌توان پژوهش یانگ و همکاران (۲۰۲۰) را نام برد که با استفاده از مدل RRTMG برهمکنش تابش و هواویزها را بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که شار تابشی پایین‌سو در سطح و به دنبال آن بودجه تابشی بین ۳۵/۴ تا ۸۵/۳ درصد کاهش می‌یابند. همچنین برهمکنش تابش و هواویزها باعث ایجاد سرمایش در نزدیکی سطح زمین می‌شود.

نتایج مطالعات پیشین حاکی از آن است که بررسی دقیق اثر برهمکنش تابش با مؤلفه‌های جوّی می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در بهبود عملکرد مدل‌های اقلیمی و هواشناسی ایفا کند. در سال‌های اخیر، تغییرات اقلیمی در کنار سوءمدیریت منابع آبی منجر به کاهش چشمگیر تراز آب دریاچه ارومیه شده است. خشک‌شدن بخش‌های وسیعی از بستر این دریاچه و شکل‌گیری نمکزارها، یکی از مهم‌ترین منابع تولید هواویزها در منطقه به شمار می‌رود. برخواستن این ذرات از سطح و انتقال آنها توسط باد و توفان نه‌تنها موجب بروز مشکلات زیست‌محیطی می‌شود، بلکه پیامدهای اقلیمی قابل توجهی نیز به همراه دارد. از دیدگاه اقلیم‌شناسی، شبیه‌سازی این پدیده‌ها و تحلیل تغییرات ناشی از آنها در بودجه تابشی منطقه اهمیتی اساسی دارد. با این حال، تاکنون پژوهش‌های جامع و هدفمند در این زمینه به‌ویژه در ارتباط با دریاچه ارومیه صورت نگرفته است. از سوی دیگر، مدل‌سازی‌های تابشی این امکان را فراهم می‌آورد که روزهایی با بیشترین شدت تابش پیش‌بینی شوند. چنین پیش‌بینی‌هایی می‌تواند ابزار ارزشمندی برای مدیریت بهینه منابع آبی مانند برنامه‌ریزی

مناسب در رهاسازی آب سدها به‌منظور کاهش میزان تبخیر باشد. بر پایه این ملاحظات، ضرورت انجام مطالعه‌ای هدفمند در این محدوده جغرافیایی آشکار می‌شود. در پژوهش حاضر تلاش شده است تا کارایی مدل انتقال تابش RRTMG در شرایط جوّ بدون هواویز مورد بررسی قرار گیرد و زمینه‌ای برای توسعه مطالعات آتی در خصوص اثر حضور هواویزها بر اقلیم منطقه فراهم شود.

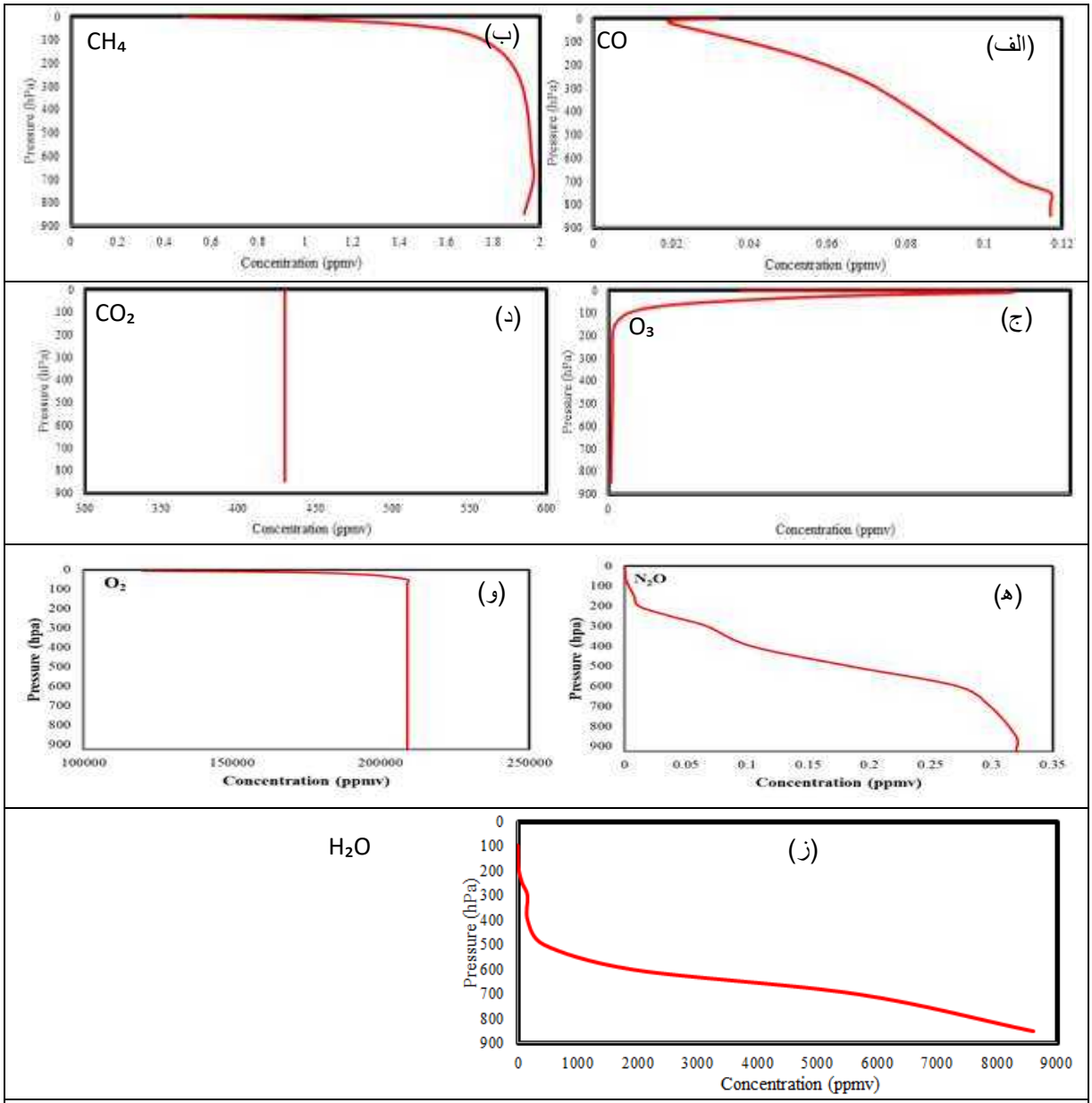
روش تحقیق

به منظور نیل به اهداف یاد شده در این پژوهش، لازم است به شبیه‌سازی فرایند انتقال تابش پرداخته شود. اجرای مدل RRTMG به‌صورت تک ستونی و در محدوده طول‌موج کوتاه پیکره اصلی پژوهش حاضر می‌باشد. این مطالعه برای یک روز پاک با مقدار P.M10= 8 µg m-3 و در تاریخ ۱۴۰۴/۰۲/۲۷ برای ساعت ۱۲ UTC صورت گرفته است. در قدم اول، داده‌های رادیوگمانه (Radio sonde) برای ستون جوّ از نزدیک‌ترین ایستگاه استخراج می‌شوند که این مقادیر در شکل ۱ برای ارتفاع و نیم‌رخ قائم دما رسم شده است. پایین‌ترین تراز فشاری hPa ۸۶۸ است.



شکل ۱ - مقادیر الف) نیم‌رخ قائم دما (برحسب K) و ب) ارتفاع (برحسب km).

در ادامه، داده‌های بارگیری‌شده از وبگاه Giovanni که مربوط به سنجنده AIRS می‌باشد، مورد استفاده قرار گرفتند. این داده‌ها مربوط به نیم‌رخ قائم توزیع غلظت مولکول‌های H_2O، CO_2، O_3، N_2O، CO، CH_4 و O_2 هستند. مقادیر مذکور برحسب ppmv به‌عنوان مؤلفه‌های جاذب تابش جوّی در فایل INPUT_RRTM تعریف شده و در شکل ۲ ارائه شده‌اند. شایان ذکر است که برای مولکول‌های N_2O و O_2 از مقادیر نمونه (sample) فایل ورودی استفاده شده است.



شکل ۲ - نیم‌رخ قائم غلظت الف) CO، ب) CH ، ج) O_3، د) CO_2، ه) N2O، و) O2 و ز) H_2O (برحسب ppmv).

در گام نهایی، مقادیر مربوط به ستون جوّ در ورودی مدل تنظیم شد. شایان ذکر است در روز مورد مطالعه زاویه سرسوی خورشیدی ۲۰/۷ درجه بود که در شبیه‌سازی مورد توجه قرار گرفت. شبیه‌سازی‌ها در شرایط آسمان صاف اجراء شد و سپس به‌منظور ارزیابی دقت و کارایی مدل، خروجی‌های حاصل از شبیه‌سازی با داده‌های بازتحلیل ERA5 مربوط

به تاریخ ۱۴۰۴/۰۲/۲۷ در سطح دریاچه ارومیه مقایسه شدند. این مقایسه امکان سنجش میزان تطابق نتایج مدل با واقعیت‌های اقلیمی منطقه را فراهم ساخته و مبنایی برای بررسی قابلیت مدل در بازنمایی شرایط تابشی در مقیاس محلی به شمار می‌رود.

نتایج

در میان برون‌داد حاصل از شبیه‌سازی، دو مؤلفهٔ اصلی تابش طول‌موج کوتاه یعنی شار تابشی مستقیم و شار تابشی خالص بیشترین ارتباط را با اهداف پژوهش حاضر دارند. اهمیت این دو مؤلفه از آن جهت است که در سطح دریاچه ارومیه نقش بسزایی در تعیین بودجه تابشی و بررسی تغییرات اقلیمی مرتبط با تابش ایفا می‌کنند و با در دسترس بودن این دومولفه سایر مولفه‌ها قابل محاسبه است. برای ارزیابی مدل، نتایج شبیه‌سازی در سطح دریاچه استخراج و با مقادیر متناظر در مجموعه داده‌های بازتحلیل ERA5 مقایسه شد. مقادیر حاصل از این مقایسه در جدول ۱ ارائه شده‌اند تا امکان تحلیل و بررسی میزان همخوانی مدل با داده‌های بازتحلیل فراهم شود.

جدول ۱- مقادیر شارهای تابشی برحسب W m-2.

شار تابشی خالص	شار تابشی مستقیم	
۶۴۱/۱۹	۶۳۲/۲۹	RRTMG
۶۳۵/۷۶	۶۵۸/۵۷	بازتحلیل
۰/۸۵	۳/۹۹	خطا (درصد)

مقادیر شار تابشی مستقیم و شار تابشی خالص نسبت به داده‌های بازتحلیل به‌ترتیب ۲۶/۲۸ و ۵/۴۳ W m-2 اختلاف دارند که حاکی از عملکرد مناسب مدل در این منطقه است. این مقادیر به‌عنوان آریبی (Bias) مدل نسبت به داده‌های ERA5در نظر گرفته می‌شوند و نشان‌دهنده عملکرد مطلوب مدل در شرایط جوّی مورد بررسی هستند. خطای نسبتاً بالا در شار تابشی مستقیم ناشی از برهمکنش تابش با مولفه‌های جوّی موجود در مسیر انتشار پرتو است؛ به‌ویژه فرایندهای جذب و پراکنش که سبب تضعیف شار تابشی مستقیم می‌شوند. برای کاهش عدم قطعیت و جلوگیری از افزایش اُریبی، روز مورد مطالعه به‌گونه‌ای انتخاب شد که شرایط آسمان صاف و بدون ابرناکی باشد. همچنین، پایین بودن غلظت P.M10 در آن روز، حضور هواویزها را در حداقل ممکن نگه داشت. ترکیب این دو ویژگی موجب شد که سهم خطای ناشی از پراکنش و جذب کاهش یافته و انطباق بهتری میان نتایج شبیه‌سازی و داده‌های بازتحلیل حاصل شود. در بین مولکول‌های جوّی، بخار آب به علت غلظت بالا، در تغییر توازن تابشی و افزایش خطا نسبت به سایر مولفه‌ها بیشترین نقش را ایفا کرد.

اگرچه زمان انجام مطالعه در میانه فصل بهار انتخاب شد، اما مقادیر به‌دست‌آمده برای هر دو مؤلفه تابشی نشان‌دهنده شدت قابل توجه تابش در منطقه بودند. چنین مقادیری بیانگر نقش چشم‌گیر تبخیر سطحی آب دریاچه در توازن تابشی و در نتیجه در تغییرات اقلیمی محلی است. این یافته‌ها نشان می‌دهند که عدم اتخاذ سیاست‌گذاری‌های صحیح و همچنین انتخاب بازه‌های زمانی نامناسب برای رهاسازی آب سدها می‌تواند کارایی اقدامات مرتبط با احیای دریاچه ارومیه را کاهش دهد. بنابراین، مدیریت زمان‌بندی رهاسازی آب بر اساس تحلیل دقیق شرایط تابشی از اهمیت بالایی برخوردار است و می‌تواند به‌عنوان ابزاری مؤثر در راهبردهای احیای دریاچه مورد توجه قرار گیرد.

نتایج مطالعات قبلی مانند آیاکونو وهمکاران (۲۰۰۴، ۲۰۰۸) و یانگ و همکاران (۲۰۲۰) حاکی از آن بود که مدل در طول‌موج کوتاه نسبت به طول‌موج بلند خطای بیشتری دارد. در این پژوهش خطای شبیه‌سازی نسبت به داده‌های بازتحلیل مقدار پایینی داشت. از این‌رو با تعمیم دادن این نتایج به نتایج مطالعات قبلی می‌توان نتیجه گرفت که مدل در طول‌موج بلند در منطقه عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد. علت بالا بودن خطا در طول‌موج کوتاه، ساختار طیفی و معادلات پیچیده آن نسبت به طول‌موج بلند است. همچنین در طول‌موج کوتاه ضرایب متنوعی وجود دارد که تخمین آنها باعث افزایش خطا می‌شود.

بحث و نتیجه‌گیری

خطای بالاتر در مؤلفه شار تابشی مستقیم عمدتاً ناشی از جذب و پراکنش تابش است، هرچند انتخاب روزی با آسمان صاف و غلظت پایین P.M10 از افزایش خطا جلوگیری کرد. با وجود آنکه تاکنون هیچ مطالعه مشابهی با کاربست مدل RRTMG و با این اهداف به‌طور اختصاصی برای محدوده جغرافیایی دریاچه ارومیه انجام نشده است، این پژوهش توانست توجه به موضوع تبخیر و شارهای تابشی را جلب کند. نتایج شبیه‌سازی در مقایسه با داده‌های بازتحلیل دارای خطای قابل قبول هستند که نشان‌دهنده عملکرد مناسب مدل است. شایان ذکر است که مقایسه این نتایج با داده‌های تابش‌سنج زمینی می‌تواند رویکرد معتبرتری برای ارزیابی عملکرد مدل فراهم کند. در دسترس نبودن تابش‌سنج زمینی و ایستگاه سنجش کیفیت هوا از محدودیت‌های این مطالعه بود.

منابع

۱- خدمتی، م.، احمدی گیوی، ف.، محب‌الحجه، ع.ر.، و کاویانی، م.، ۱۴۰۳. شبیه‌سازی اثرات تابشی هواویزها بر آهنگ سرمایش به کمک RRTMG . بیست و یکمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، تهران، ۲۱-۲۰ آذرماه ۱۴۰۳.

1- Liou, K. N., (2002). An Introduction to Atmospheric Radiation. Vol. 84, Elsevier.

2- Price, E., Mielikainen, J., Huang, M., Huang, B., Huang, H. L. A., & Lee, T. (2014). GPU-accelerated longwave radiation scheme.

3- Kuniyal, J. C., & Guleria, R. P. (2019). The current state of aerosol-radiation interactions: A mini review. Journal of Aerosol Science, 130, 45–54
4- Iacono, M. J., Delamere, J. S., Mlawer, E. J., Clough, S. A., Morcrette, J. J., & Hou, Y. T. (2004). Development and evaluation of RRTMG_SW, a shortwave radiative transfer model for general circulation model applications. In Proceedings of the 14th atmos radiation measurement (ARM) science team meeting, Albuquerque, New Mexico, March, pp. 22-26.
5- Iacono, M. J., Delamere, J. S., Mlawer, E. J., Shephard, M. W., Clough, S. A., & Collins, W. D. (2008). Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 113(D13).
6- Iacono, M. J., Mlawer, E. J., Clough, S. A., & Morcrette, J. J. (2000). Impact of an improved longwave radiation model, RRTM, on the energy budget and thermodynamic properties of the NCAR community climate model, CCM3. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 105(D11), 14873-14890.
7- Yang, Y., Chen, M., Zhao, X., Chen, D., Fan, S., Guo, J., & Ali, S. (2020). Impacts of aerosol–radiation interaction on meteorological forecasts over northern China by offline coupling of the WRF-Chem-simulated aerosol optical depth into WRF: a case study during a heavy pollution event. Atmospheric Chemistry and Physics, 20(21), 12527-12547.

Simulation of Shortwave Radiative Fluxes Using the RRTMG Model over Lake Urmia

Mohammad Khedmati[1] , Mahshid Kaviani [2], Farhang Ahmadi-Givi[3], Ali R. Mohebalhojeh[4]
1 M.Sc. Student, Space Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, mkhedmati@ut.ac.ir
2 Ph.D., Iran Meteorological Organization, Tehran, mahshid.kaviani@ut.ac.ir
3 Professor, Space Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, ahmadig@ut.ac.ir
4 Professor, Space Physics Department, Institute of Geophysics, University of Tehran, amoheb@ut.ac.ir
Corresponding author: mkhedmati@ut.ac.ir

Abstract
Solar radiation is recognized as the primary source of energy for the Earth, and due to its impact on climate and the energy budget, its study is of particular importance for various purposes. In this study, the RRTMG radiative transfer model was implemented over the geographical domain of Lake Urmia, and the results were compared with the ERA5 reanalysis data. The model inputs included the radiosonde observations, the meteorological station data, and the AIRS satellite measurements. Finally, the simulated direct and net shortwave radiative fluxes were compared with the corresponding reanalysis values. The results indicate that the direct and net shortwave fluxes differ from those of the reanalysis data by 28.26 and 5.43 W m^{-2}, respectively, which demonstrates the satisfactory performance of the RRTMG model.
Keywords: RRTMG, radiation, aerosols, simulation, reanalysis

تأثیر دو دهه خشکسالی بر پوشش گیاهی ایران(موردی:آذربایجان شرقی)

مریم بیاتی خطیبی [۱]، شقایق علیپور [۲]

[۱]- عضوهیت علمی دانشگاه تبریز

[۲]- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه تبریز

آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول alipoorshagayeg@gmail.com

چکیده

خشکسالی پدیده‌ای طبیعی است که طی دوره‌هایی تکرار می‌شود و گریبان‌گیر مناطق وسیعی در سرتاسر دنیا است.این پدیده به کندی شروع شده و دارای ماهیتی پنهان اســـت، به همین علت به عنوان یک پدیدهٔ خزنده شـــناخته شـــده اســـت.از جمله اثرات ان اختلال دراکوسیستم می‌شودمی‌شودو بر زندگی ما انسانها نیز تاثیر دارد. کشورعزیزمان ما ایران نیز با این مشکل مواجه است. پایش پدیده خشکسالی و شدت و ضعف آن امری ضروری است. با پایش مستمر میتوان روند وسرعت خشکسالی را مدیریت کرد وتا حدی جلوی سرعت ان را گرفت. امروزه با پیشرفت فناوری استفاده از فناوری سنجش از دور برای پایش خشکسالی رواج یافته است. درپژوهش حاضر به بررسی خشکسالی هواشناسی طی بیست سال اخیردر استان آذربایجان شرقی و با استفاده از تصاویر ماهوارهای وداده های ایستگاه های هواشناسی استان درمحیط نرم افزار گوگل ارث انجام گرفته است. نقشه های بارش استان بااستفاده از تصاویر سنجنده گریپس ترسیم شده وشاخص های spi، lst، tci،ndvi برای تصاویر سنجنده مودیس استان اعمال شده و نتایج نشان می‌دهد سال ۲۰۱۳ در اثر کاهش بارندگی خشکسالی بیشتر از سال‌های ۲۰۰۳و۲۰۲۳بوده است .یکی از علل کاهش بارندگی در این منطقه کاهش اب دریاچه ارومیه در غرب استان میباشد که نیازمن بررسی ومدیریت است.

کلید واژه‌ها : خشکسالی، سنجنده مودیس،سنجنده گریپس، گوگل ارث.

مقدمه

در یک تعریف کلی خشکسالی عبارت است از کمبود غیر عادی بارش در دورهای بلند مدت به نحوی که باعث کمبود رطوبت در خاک و همچنین کاهش آبهای جاری میشود و در نهایت بر روی فعالیتهای انسانی و حیات طبیعی گیاهی و

جانوری تأثیرگذار است(کیخسروی، ۹۴). تمایز این پدیده با سایر مخاطرات طبیعی در این است که برخلاف سایر مخاطرات طبیعی این پدیده به تدریج و در یک دوره زمانی نسبتا طولانی عمل کرده و اثرات آن ممکن است پس از چند سال و با تاخیر بیشتری نسبت به سایر حوادث طبیعی ظاهر گردد، بنابراین چون تعیین دقیق زمان شروع آن کار مشکلی می باشد تا حدودی آن را یک پدیده خزنده می دانند (طالبی و موسوی، ۱۳۸۹). در مطالعه دیگر جداگانه نشان داده شد، دوره های خشک و تر و خشکسالی بر اثر تغییردر فراوانی و تاثیر گذاری الگوهای گردش جوی در یک منطقه ایجاد می شوند. پژوهش های انجام شده در زمینه شناسایی ارتباط میان الگوه ها موجب ایجاد سیلاب های شدید و برخی دیگر با ایجاد دوره های خشک و کم آب در ارتباط می باشند. با استفاده از مقدار احتمال بارش زایی و یا خشکی زایی الگوهای گردش جوی در مدلهای ریاضی- آماری می توان احتمال وقوع خشکسالی و یا ترسالی در هر منطقه را شناسایی و مدیریت ها را بهبود بخشید(فتاحی وحجازی زاده۱۳۸۶،) و (رضیی، ۱۳۸۶). خشکسالی عمده ترین مشکل مناطق خشک ونیمه خشک(مثلا ایران)است. برای تعیین و تشخیص خشکسالی شاخص های مختلفی ارائه شده است که فاکتور های مورداستفاده در هر کدام و مقیاس زمانی که شاخص محاسبه می نماید نیز متفاوت می (Kogn, 1998. در دهه های اخیر مدلهای زیادی دررابطه با پایش خشکسالی ارائه شده است که عموماً بر پایه شاخصهای گیاهی دمای سطح زمین محتوای آب گیاه و وضعیت گیاه است. این مطالعه تلاش دارد با تحلیل شاخص های تفاوت پوشش نرمال ndviدمای سطحی زمین lstوtciو spi، روند تغییرات زیستمحیطی در نواحی مختلف استان را طی دو دهه اخیر نشان دهد.

مواد وروش

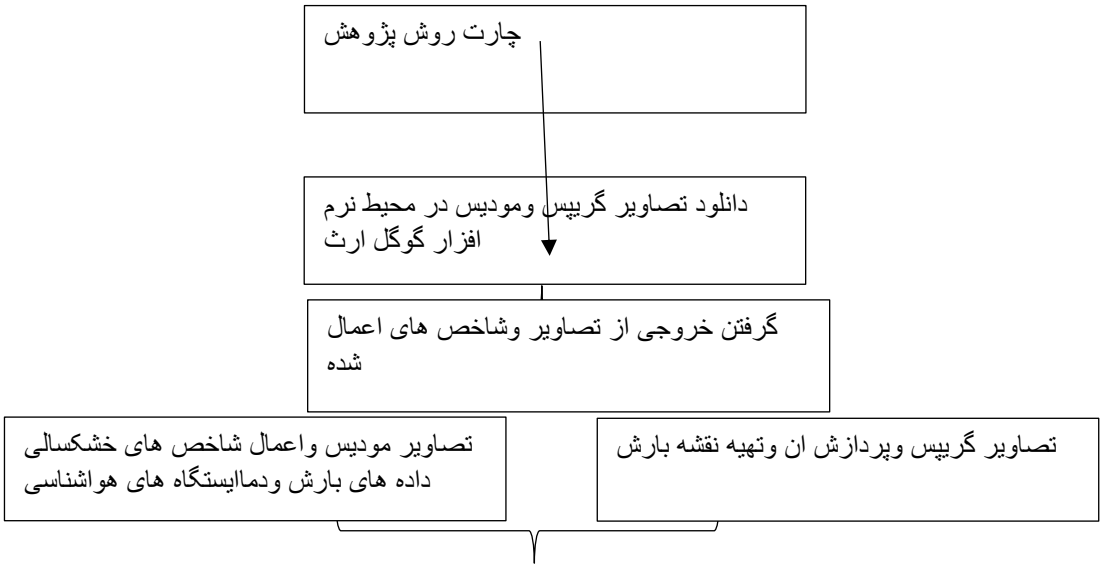
محدوده مورد مطالعه

محدوده مطالعه برای پایش خشکسالی در این پژوهش استاد آذربایجان شرقی در شمال غرب ایران است این استان در محدوده جغرافیایی بین مدارهای ۳۶ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۳۹ درجه با ۲۶ دقیقه شمالی و ۴۵ درجه و ۵ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۲۲ دقیقه شرقی واقع است متوسط ارتفاع آن ۴۸۱۱ متر و مساحت آن ۴۵۴۹۱ کیلومتر مربع است

شکل۱:محدوده مورد مطالعه

داده ها وروش

در این پژوهش پایش خشکسالی در استان آذربایجان شرقی طی سال‌های۱۳۸۳ ۱۳۹۳، ۱۴۰۳و در تابستان وبا استفاده ازداده های ایستگاه های هواشناسی استان، وتصاویر ماهواره ای مودیس در محیط نرم‌افزار گوگل ارث پرداخته ایم. شاخص‌هایی که اعمال شده شاخص‌های spi،lst،tci،ndvi است و از تصاویر ماهواره گریپس برای تهیه مدل بارش استفاده شده است.



جدول۱:شاخص های به کار رفته در پژوهش

۱	Ndvi	Ndvi = nir-r/nir+r
۲	Lst	به دست آمده از داده های سطحی
۳	Tci	Tci=lstijk-lstimin/lstmax-lstmin
۴	Spi	Spi=[n month -m/s

نتایج وبحث

نقشه های بارش استان آذربایجان شرقی استفاده از تصاویر سنجنده گریپس به دست آمده است. پیکسل‌های به رنگ آبی تیره بارش بیشتری نسبت به سایر پیکسل ها دریافت کرده اند. قسمت‌های شمال شرقی استان وجنوب شرقی استان در سال ۲۰۱۳ نسبت به سال‌های ۲۰۰۳ و۲۰۲۳ بارش کمتری دریافت کرده است.

شاخصNDVI

نتایج شاخص ndvi شکل(۳) ر سال ۲۰۰۳ پوشش گیاهی نواحی غربی و شمالی استان نسبتا بهتر بود ولی در سال ۲۰۱۳ :NDVIکاهش معنیداری مشاهده شد که ناشی از خشکسالی و استرس حرارتی بود. سال ۲۰۲۳ با بازگشت نسبی رطوبت و اصالح فعالیتهای کشاورزی، افزایش پوشش گیاهی قابل توجهی گزارش شد. در اینجا رنگ قرمز نشان دهنده مناطق با پوشش گیاهی بسیار کم قرمز رنگ زرد هم نشان دهنده پوشش گیاهی متوسط و رنگ سبز هم نشان دهنده پوشش گیاهی بالا می‌باشد

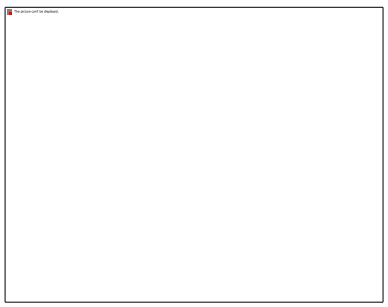
شاخص LST

شکل(۴) نشان می‌دهد که پیکسلهای قرمز دمای گرم تر دارد به عبارت دیگر بیشترین انرژی ثبت شده توسط سنجنده برای پیکسل های مرتبط را نشان میدهد. پیکسل‌های آبی کم رنگ نمایان گر مناطق با دمای کم پیکسل‌های آبی تیره دمای خیلی کم کمتر. پیکسل‌های سبز دمای متوسط و پیکسل های زرد نشان دهنده دمای گرم هستند. دمادر سال ۲۰۱۳ گرمتراز سال‌های ۲۰۰۳ و۲۰۲۳ بوده است. می‌توان نتیجه گرفت که درسال ۲۰۱۳ خشکسالی نسبت به سال‌های دیگر شدت بیشتری داشتهاست.

شکل۴:شاخصlst

شاخص TCI

یکی از پارامترهای موثر در مطالعه خشک سالی با استفاده از خشکی گیاهان در زمین های زراعی است.افزایش شاخص TCI در طول زمان نشان دهنده افزایش خشکی و کاهش رطوبت در محصولات است افزایش خشکی گیاهان در طول زمان یکی از نشانه های وقوع خشک سالی است. افزایش دمای سطح زمین در سال ۲۰۱۳ به باالترین مقدار خود رسید که به



کاهش TCI واسترس دمایی منجر شد. سال ۲۰۰۳ و ۲۰۲۳ دما پایینتربود ودلالت بر TCIبالاتر نسبتا مساعدتر برای پوشش گیاهی داشت

شکل۴:شاخص tci

شاخصSPI

سال ۲۰۱۳ دوره خشکسالی شدیدی بود که همراه با کاهش ndviو افزایش دمای سطحی زمین بود. سال ۲۰۰۳ و ۲۰۲۳ بارشها به وضعیت نرمال نزدیکتر بود و کاهش استرس خشکسالی مشاهده گردید. برای محاسبه شاخص SPI می توان بارندگی ماهانه و در هر محدوده زمانی دلخواه را با استفاده از یک توزیع مناسب توزیع گاما و یا پیرسون تیپ سه برازش داد.توزیع آماری گاما برازش خوبی با سری زمانی اقلیمی بارندگی دارد

(۱)

$$a=1/4A[1+\sqrt{1+4A/3}]$$

(۲)

$$B=x/a$$

(۳)

$$A=In(x) - \{In(x) /n$$

با استفاده از پارامتر های بالا تابع توزیع تجمعی در مقیاس دلخواه برای هر ایستگاه را میتوان محاسبه کرد.

(۴)

$$G(x) =1/r(a)\ \ ta-1e-tdt$$

(۵)

$$t=x/B$$

تابع گاما برای داده های بارش صفر قابل تعریف نیست براهمین تابع توزیع تجمعی از فورمول زیر محاسبه میشود(qاحتمال بارش صفر)

(۶)

$$H(x) =q+(1-q)G(x)$$

سپس با استفاده از داده حاصله توزیع نرمال (spi) را به دست می‌آوریم. توزیع نرمال استاندارد برای داده های صفر بااستفاده از فومول های زیر به دست میاید

(۷)

$$Z=spi=-[t-c0+c1t+c2t2/1+d1t+d2t2+d3t3]$$

(۸)

Z=spi=+[t-c0+c1t+c2t2/1+d1t+d2t2+d3t3]

(۹)

T= √In[1/(1-H(x))2] 0.5<H(x)<1

(۱۰)

T= √In[1/(H(x))2] 0<H(x)<0.5

C0=2.515517 C1=0.010328 C2=0. 8028530

d1=1.432788 d2=0.001308 d3=0.189269

جدول۳مقادیر محاسبه شده spiبرای سایتهای هواشناسی استان آذربایجان شرقی

سایت	۲۰۰۳	۲۰۱۳	۲۰۲۳
جلفا	-۱.۸	۱.۲	۰.۸
اهر	۶	۱.۳	۳
فرودگاه تبریز	۸.۲	۴	۳
سهند	۳.۳	۰.۳	۳
سراب	۸.۶	۲.۲	۸
کلیبر	۲.۸	۲.۶	۱۲
مراغه	۰.۶	۰.۶	۰.۰۸
میانه	۱.۶	۱	۱۳
مرند	۲.۵	۰.۴	۱.۱
ورزقان	*	۲	۱.۹
شبستر	*	۰.۷	۰.۷
هریس	*	۶.۶	۴
شرق تبریز	*	*	۰.۷
عجب شیر	*	۰.۳	۰.۲
بناب	*	۱.۹	۲
خسروشهر	*	*	۱.۷
بستان اباد	*	۰.۳	۱.۲

چاراویماق	*	*	۱۳
ملکان	*	۰.۷	۱

داده ای شاخص بارش استاندارد شده نشان می دهد بارش دراستان آذربایجان شرقی در محدوده نرمال و در برخی شهرها که شاخص بیشتراز هست دچار ترسالی میباشد وفقط شهر جلفادر سآل ۲۰۰۳ به دلیل دریافت بارش کمتر چار خشکسالی هواشناسی شده است. در نگاه کلی به داده های spiسال ۲۰۱۳نسبت به دوسال ۲۰۰۳.۲۰۲۳ استان آذربایجان شرقی در دوره زمانی تابستان با بارش کمتردچار خشکسالی نسبی بوده است.

جدول۳ طبقه بندی شاخصspi

ترسالی بسیارشدید	۲وبیشتر
ترسالی شدید	۱/۵تا۱/۹۹
ترسالی متوسط	۱تا۱/۴۹
نرمال	۰/۹۹- تا ۰/۹۹
خشکسالی متوسط	تا۱/۴۹-
خشکسالی شدید	۱/۵- تا۱/۹۹-
خشکسالی بسیار شدید	۲وکمتر

نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی خشکسالی در آذربایجان شرقی با استفاده از فناوری‌های سنجش از دور طی سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۱۳ و ۲۰۲۳ پرداخته‌ایم نتایج این پژوهش نشان میدهد که ترکیب شاخصهای و NDVI، LST،TCI، SPIقادر است تغییرات پوشش گیاهی وخشکسالی را در استان آذربایجان شرقی به خوبی بازتاب دهد. دورههای خشکسالی با افزایش دمای سطح زمین همراه بودهاند که تأثیر قابل توجهی بر اکوسیستمهای منطقه گذاشته است. این تحلیل میتواند NDVI و کاهش به برنامهریزی مدیریت منابع طبیعی و کشاورزی استان کمک کند

تشکر و قدردانی

بدین‌وسیله از استاد محترم، جناب آقای/خانم دکتر مریم بیاتی خطیبی ، به خاطر راهنمایی‌ها و حمایت‌های بی‌دریغشان در طول این تحقیق صمیمانه سپاسگزاری می‌کنیم. بدون دانش و تجربه‌ی ارزشمند ایشان، دستیابی به نتایج این پژوهش ممکن نبود. همچنین و ۲۰۲۳ از تمامی اعضای گروه تحقیقاتی و دوستانی که در این مسیر ما را یاری کردند، کمال تشکر را داریم.

منابع ومأخذ

آرخی، ص و همکاران(۱۴۰۲). بررسی همبستگی شاخص‌های پوشش گیاهی در تحلیل خشکسالی با استفاده از تصاویر مودیس(مطالعه موردی :استان‌های قم، اصفهان، مرکزی و چهارمحال بختیاری). مجله علمی پژوهشی مهندسی اکوسیستم بیابان، (۴) ۱۲ صفحات ۱ تا ۲۰

باقری، س و همکاران(۱۴۰۱). بررسی اثر خشکسالی بر پوشش گیاهی با استفاده از داده‌های سنجش از دور ماهواره‌ای و هواشناسی (مطالعه موردی: دشت قزوین). مرتع و آبخیزداری مجله منابع طبیعی ایران، (۱) ۷۵ صفحات ۱ تا ۱۸.

دستی گردی،مرتضی وهمکاران. تحلیل روند پوشش گیاهی با استفاده از سری زمانی NDVI ماهواره مودیس doi:10.22069/jwsc.2022.20208.3554

رضایی بنفشه، م و همکاران(۱۳۹۴). تحلیل خشکسالی کشاورزی استان آذربایجان شرقی با تاکیدبر سنجش از دور و شاخص وضعیت پوشش گیاهی. نشریه دانش آب و خاک،(۱)۲۵، صفحات ۱۱۳ تا ۱۲۳ سال ۱۳۹۴

زارع خورمیزی، ه و همکاران(۱۳۹۶). پایش خشکسالی و تاثیر آن بر پوشش گیاهی با استفاده از فناوری‌های سنجش از دور(بررسی موردی :استان یزد سال‌های ۱۹۹۴ تا ۲۰۱۴). نشریه مدیریت بیابان،(۱۰) ۱۳۹۶ صفحات ۶۸ تا ۸۶

عفیفی ،م. ا(۱۴۰۰). بررسی اثر خشکسالی بر روی پوشش گیاهی با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور (مطالعه موردی: حوضه آبریز درودزن) . (۷۰) ۱۴۰۰ صفحات ۱۵۳ تا ۱۷۲.

کریمی، م و همکاران(۱۳۹۸). بررسی کارایی شاخص‌های پوشش گیاهی در تحلیل خشکسالی کشاورزی با استفاده از تکنیک سنجش از دور در حوضه آبخیز کرخه. سنجش از دور و Gis ایران(۴) ۱۱ صفحات ۲۹ تا ۴۶

کیخسروی، ق و همکاران(۱۳۹۴). بررسی تطبیقی شاخص‌های خشکسالی هواشناسی و ماهواره‌ای در روند بیابان زایی طبقات پوشش گیاهی فصل بهار استان سمنان . کاوش‌های جغرافیایی مناطق بیابانی(۲) ۳ صفحات ۱۸۹ تا ۲۱۳

میرموسوی ،س.ح و کریمی ح(۱۳۹۲). مطالعه اثر خشکسالی بر روی پوشش گیاهی با استفاده از تصاویر سنجنده modis (مورد :کردستان). جغرافیا و توسعه. ۳۱ صفحات ۵۷ تا ۷۶ صفحات ۵۷ تا ۷۶

ناطقی، س وهمکاران(۱۳۹۶). بررسی تغییرات پوشش گیاهی بر اساس شاخص‌های گیاهی فصلنامه علمی پژوهشی تحقیقات مرتب و بیابان زایی ایران(۴) ۲۴ صفحات ۷۷۸ تا ۷۹۰

نحوه اجرای اصل پنجاه قانون اساسی در ارتباط با دریاچه ارومیه

مجتبی همتی

استادیار گروه حقوق عمومی دانشگاه علوم قضایی و خدمات اداری
email:mhemmati1358@unsas.ir

چکیده

بر اساس اصل چهل و پنجم قانون اساسی، دریاها، دریاچه‌ها، رودخانه‌ها و سایر آب‌های عمومی جزو انفال و ثروت‌های عمومی و در اختیار حکومت اسلامی است تا بر طبق مصالح عامه نسبت به آنها عمل نماید. ماده ۸ قانون مدیریت خدمات کشوری هم در بندهای الف، ب، ج، ط و ک اموری را تعیین کرده است که جزو امور حاکمیتی بوده و مصادیق وظایف دولت در احیای دریاچه ارومیه است و اصل پنجاهم قانون اساسی هم حفاظت از محیط زیست را وظیفه عمومی تلقی کرده و فعالیت‌های اقتصادی و غیر آن که با آلودگی محیط زیست یا تخریب غیرقابل جبران آن ملازمه پیدا کند، را ممنوع کرده است. از طرف دیگر، دریاچه ارومیه با اینکه محل حیات اجتماعی نسل حاضر و اینده است خشک شده و حیات اجتماعی آنها را به خطر انداخته است. این مقاله در تلاش است تا با روش توصیفی_ تحلیلی و با جمع آوری اطلاعات از طریق کتابخانه‌ای به این سوال پاسخ دهد که نحوه اجرای اصل ۵۰ قانون اساسی در ارتباط با دریاچه ارومیه به عنوان انفال و ثروت عمومی در اختیار حکومت اسلامی چگونه است؟

کلید واژه‌ها: اصل ۵۰ قانون اساسی، اصل ۴۵ قانون اساسی، احیای دریاچه ارومیه، محیط زیست، خط مشی گذاری.

مقدمه

محیط زیست (Environment) ، جهان طبیعی (Natural World) است که انسانها، حیوانات، حیوانات و گیاهان در آن زیست می کنند (Hornby, A.S., 2001) . لذا، نابودی یا تخریب محیط زیست، زندگی همه موجودات اعم از انسانها، حیوانات و گیاهان را نابود یا تحت تاثیر قرار می دهد. از اینروست که اصل ۵۰ قانون اساسی مقرر می‌دارد: «در جمهوری اسلامی، حفاظت محیط زیست که نسل امروز و نسل‌های بعد باید در آن حیات اجتماعی رو به رشدی داشته باشند، وظیفه

عمومی تلقی می‌گردد. از این رو فعالیت‌های اقتصادی و غیر آن که با آلودگی محیط زیست یا تخریب غیرقابل جبران آن ملازمه پیدا کند، ممنوع است.»

بنابر اصل ۵۰ قانون اساسی، محیط زیست از آن جهت که زندگی و حیات اجتماعی را شامل می شود در ردیف یکی از حقوق مسلم تلقی می گردد (هاشمی، ۱۳۸۳) و به عنوان محل حیات اجتماعی رو به رشد نسل‌های امروز و نسل‌های بعدی واقعیتی مسلم فرض شده و حفظ و حمایت از آن، وظیفه همگانی دانسته شده است. از این رو فعالیت‌های اقتصادی و هر فعالیت دیگری از طرف هر کس که با آلودگی محیط زیست یا تخریب غیر قابل جبران آن ملازمه پیدا کند، ممنوع است. این مقاله در تلاش است با روش توصیفی ـ تحلیلی و با جمع آوری اطلاعات از طریق اسنادی و کتابخانه‌ای به این سوال پاسخ دهد که نحوه اجرای اصل پنجاهم قانون اساسی در ارتباط با دریاچه ارومیه در وضعیت کنونی تغییر اقلیم و خشکسالی چگونه است؟

وضعیت دریاچه ارومیه و علل وضعیت کنونی آن

در این مبحث به بررسی وضعیت دریاچه ارومیه از سابق تاکنون و نیز علل وضعیت کنونی آن می پردازیم.

وضعیت دریاچه ارومیه قبل و بعد از خشک شدن

دریاچه ارومیه یکی از زیست‌بوم‌های ارزشمند ایران و منطقه به لحاظ تنوع گونه گیاهی و جانوری است. مساحت این دریاچه در سال ۱۳۷۷ در حدود شش هزار کیلومتر مربع بود که در ردیف بیست و پنجمین دریاچه بزرگ دنیا از نظر مساحت قرار می‌گرفت. دریاچه ارومیه در سال ۱۳۷۴ بیشترین حجم آب به میزان ۳۲ میلیارد متر مکعب آب داشته است. دریاچه‌ی ارومیه به عنوان بزرگ‌ترین دریاچه‌ی داخلی ایران، بزرگ‌ترین دریاچه‌ی آب شور در خاورمیانه، و ششمین دریاچه‌ی بزرگ آب شور دنیا شناخته می‌شد (آقایان زاده و همکاران، ۱۳۹۲). طی بیش از دو دهه گذشته، هرسال به‌طور متوسط ۴۰ سانتی‌متر از ارتفاع دریاچه ارومیه کاسته شده و اکنون ۹۵ درصد این دریاچه خشک شده است. در پی کاهش بارندگی، دریاچه ارومیه در تابستان ۱۴۰۴ با کمترین سطح آب در دهه‌های اخیر مواجه شده و در آستانه‌ی خشک شدن کامل قرار دارد. این وضعیت بحرانی، نتیجه‌ی مجموعه‌ای از عوامل انسانی و طبیعی است که ذیلاً اشاره می گردد:

دلائل خشک شدن دریاچه ارومیه

مهم‌ترین دلایل خشک شدن دریاچه ارومیه، شامل تغییرات اقلیمی و خشکسالی، تغییر الگوی کشت، ساخت و بهره‌برداری بی‌رویه از بیش از ۹۰ سد در حوضه‌ی آبریز این دریاچه (احمدی و اکبرزاده، ۱۳۹۷)، برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی، توسعه کشاورزی و به هم خوردن تعادل میان حقابه دریاچه و نیاز کشاورزی (احمدی و اکبرزاده، ۱۳۹۷)، احداث پل میان

گذر (حسن رزی و همکاران، ۱۳۹۵) و انتقال منابع آب بدون ارزیابی زیست‌محیطی، همراه با کاهش بارش و افزایش تبخیر در اثر تغییرات اقلیمی است. مجموعه‌ی این عوامل در سایه‌ی بی‌توجهی و سهل‌انگاری نهادهای مسئول در مدیریت منابع آب و حفاظت محیط زیست شدت یافته‌اند.

۲. جایگاه حقوق محیط زیست در نظام بین‌الملل

حمایت و حفظ محیط زیست و یا حرکت در مسیر توسعه پایدار، اهدافی هستند که تحقق آنها نیازمند همکاری تمام بخش‌های جامعه است (گوندر، ۱۳۸۹). حقوق زیست محیطی که در اصل به منشور آفریقایی حقوق بشر و مردمان محدود می‌شدند هم اکنون مورد شناسایی عام بین‌المللی قرار گرفته‌اند. با روشن شدن هرچه بیشتر تاثیرات جامعه مدرن بر محیط زیست، درخواست‌ها برای حقوق زیست محیطی اعتبار بیشتری پیدا می‌کنند (اسمیت، ۱۳۸۸). امروزه حقوق بین‌الملل به روشنی و به طور فزاینده‌ای مدیریت منابع طبیعی در داخل دولت‌ها و فعالیت‌های نگهداری از این منابع را در بر می‌گیرد. همزمان با این تحول، حقوق بشر تا جایی توسعه یافته است که کمکی اساسی در شناسایی اهداف حقوق بین‌الملل محیط زیست را فراهم نموده است (گوندر، ۱۳۸۹). هرچند از نظر برخی صاحب نظران حقوق زیست محیطی، حقوق جمعی است و ماهیت محیط زیست، جمعی بودن حقوق زیست محیطی را گریز ناپذیر می‌کند (اسمیت، ۱۳۸۸) اما با توجه به تغییرات اقلیم و به خطر افتادن زندگی فردی و جمعی افراد، حقوق محیط زیست را می‌توان امروزه جزو حقوق دو بعدی (فردی ـ جمعی) تلقی کرد؛ به این معنا که تخریب یا نابودی محیط زیست هم زندگی و حیات و سلامتی تک تک افراد به عنوان موجود ذیحق را سلب یا تهدید می‌کند و هم حیات اجتماعی ملت‌ها و حتی سرنوشت کره زمین را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

۳. وظیفه دولت:خط مشی گذاری و تنظیم گری

۳-۱. خط مشی گذاری

خط مشی عمومی یک مسیر اقدام یا فعالیت نسبتا پایدار و هدفمند است که توسط یک بازیگر یا مجموعه ای از بازیگران در برخورد با یک مشکل یا مسئله مورد توجه دنبال می‌شود (Anderson, 2003).

مردم در زندگی روزمره خود مستقیم و غیر مستقیم، به صورت روشن یا نامحسوس بواسطه طیف وسیعی از خط مشی‌های عمومی تحت تاثیر قرار می‌گیرند. در واقع، خط مشی‌های عمومی در جوامع مدرن و پیچیده، در همه عرصه‌ها حضور دارند. خط مشی‌های عمومی کارکرد دوگانه اعطای امتیازات و به وجود آورنده مشکلات، موجد لذت و آزردگی و درد شده و به صورت جمعی، پیامدهای مهمی برای رفاه و شادی ما دارد. آنها بخش مهمی از محیط زیست ما را ایجاد می‌کنند (Anderson, 2003).

بر اساس اصل ۴۵ قانون اساسی، انفال و ثروت‌های عمومی از قبیل ... دریاها، دریاچه‌ها، رودخانه‌ها و سایر آب‌های عمومی، کوه‌ها، دره‌ها، جنگل‌ها، نیزارها، بیشه‌های طبیعی، ... در اختیار حکومت اسلامی است تا بر طبق مصالح عامه نسبت به آنها عمل نماید. از طرف دیگر، ماده هشت قانون مدیریت خدمات کشوری مصوب ۱۳۸۶ ضمن تعریف امر حاکمیتی، مصادیق آن را به صورت غیر حصری بر می شمارد: بر اساس ماده مذکور، امور حاکمیتی آن دسته از اموری است که تحقق آن موجب اقتدار و حاکمیت کشور است و منافع آن بدون محدودیت شامل همه اقشار جامعه گردیده و بهره مندی از این نوع خدمات موجب محدودیت برای استفاده دیگران نمی شود از قبیل:

الف ـ سیاستگذاری، برنامه ریزی و نظارت در بخشهای اقتصادی، اجتماعی، فرهنگی و سیاسی125.

ب ـ برقراری عدالت و تأمین اجتماعی و باز توزیع درآمد126.

ج ـ ... جلوگیری از انحصار و تضییع حقوق مردم127...

ط ـ حفظ محیط زیست و حفاظت از منابع طبیعی و میراث فرهنگی...128

ک ـ ارتقاء بهداشت و آموزش عمومی، کنترل و پیشگیری از بیماریها و آفت های واگیر، مقابله و کاهش اثرات حوادث طبیعی و بحرانهای عمومی129.

از هر زاویه ای به وضعیت دریاچه ارومیه و رودهای حوزه آبریز آن دریاچه بنگریم مسئولیت و پاسخگوئی دولت در این خصوص بسیار برجسته و آشکار است. از این منظر، دولت در ارتباط با دریاچه ارومیه تکالیف اساسی زیر را دارد:

- تنظیم گری رفتار اقتصادی و غیر اقتصادی مغایر با طرح احیای دریاچه ارومیه

_ حمایت مالی و جبران ضررهای اشخاص متضرر

_حمایت اساسی از حریم کانال‌های انتقال آب و مجازات‌های بازدارنده

_ اصلاح پل میانگذر

---

125. سیاستگذاري، برنامه ريزي و نظارت در بخشهاي اقتصادي، اجتماعي، فرهنگي و سياسي به عنوان امر حاکميتی در وضعيت تغيير اقليم نيازمند مداخله دولت است.

126. برقرای عدالت در مناطق ساحل غربی و شرقی در وضعیت تغییر اقلیم نیازمند مداخله دولت است.

127. جلوگيري از انحصار و تضييع حقوق مردم در حوزه آبريز درياچه ارومیه در وضعيت تغيير اقليم نيازمند مداخله دولت است.

128. حفظ محيط زيست و حفاظت از منابع طبيعي و ميراث فرهنگي در وضعيت تغيير اقليم نيازمند مداخله دولت است.

129. ارتقاء بهداشت و آموزش عمومي، کنترل و پيشگيري از بيماريها و آفت هاي واگير، مقابله و کاهش اثرات حوادث طبيعي و در وضعيت تغيير اقليم و وزش طوفان های نمکی نيازمند مداخله دولت است. بحرانهاي عمومي

_ تضمین حق‌آبه دریاچه ارومیه

_ باز چرخانی و تصفیه آب

۳-۲.تنظیم گری رفتار اقتصادی و غیر اقتصادی مغایر با طرح احیای دریاچه ارومیه

یکی از مفاهیم تنظیم‌گری (Regulation) این است که دولت به دنبال هدایت یا تشویق رفتاری است که بدون مداخله نمی‌تواند اتفاق بیفتد. هدف اصلاح کاستی‌های محسوس در نظام بازار در تامین اهداف جمعی یا منافع عمومی است. تنظیم‌گری در بردارند ایده کنترل مقام ناظر است که کارکرد هدایتگرانه دارد. برای حصول اهداف مورد نظر، اشخاص در صورت عدم رعایت امری به وسیله مقام ناظر دولت وادار به رفتاری خاص به واسطه تهدید به مجازات می‌شوند (Ogus, Anthony, 1996).

تغییر اقلیم، مستلزم تغییر رفتار اجتماعی و تغییر فعالیت‌های اقتصادی و غیر اقتصادی منتهی به حفظ محیط زیست است. در غیر این صورت اقدام ضد توسعه‌ای، ضد انسانی و ضد اخلاقی و دینی در حال رخ دادن است. چرا که حیات اجتماعی رو به رشد نسل حاضر و نسل‌های آینده به خطر خواهد افتاد. فعالیت‌های اقتصادی مناطق حوزه آبریز دریاچه ارومیه عمدتاً کشاورزی، دامداری، صنعت و بخش خدمات است.

در حوزه کشاورزی، با تغییر اقلیم، تغییر الگوی کشت اجتناب ناپذیر است. به عبارتی، محصولات پر آب بر، چه محصولات یک ساله و چه درختان چندین ساله، بایستی جای خود را به محصولات کم آب بر (با مصرف آب کمتر) بدهد. با توجه به اینکه کشاورزان آن مناطق در کاشت محصولات پر آب بر تجربه دارند و ذهنیت آنها و رفتار اجتماعی و اقتصادی آنها در طول زمان طولانی با محصولات پر آب بر قبل از تغییر اقلیم و حتی حیات آنها گره خورده است و از طرف دیگر آنها پژوهشگران و متخصصان در این حوزه نیستند لذا وزارت جهاد کشاورزی استان‌های همجوار (آذربایجان غربی شرقی و کردستان) و حتی وزارت جهاد کشاورزی در سطح ملی و حتی با استفاده از تجربیات کارشناسان بین المللی محصولات کم آب بر را در استان‌های مزبور به صورت آزمایشی کشت نموده و محصولات کم آب بر پربازده و با ارزش افزوده بالا که آزمون خود را پس داده‌اند به مردم آن منطقه معرفی نموده و حمایت همه جانبه (آموزش کاشت، داشت و برداشت) از آن به عمل آورند. صرف توصیه شهروندان و کشاورزان به کشت محصولات کم آب بر بدون تعیین مصادیق موفق آنها یا الزام به عدم کاشت بدون ارائه راه حل جایگزین، مصداق بی مسئولیتی و خیانت دولت به کشور و نسل حاضر و نسل‌های بعدی است.

بعد از ارائه راه حل جایگزین الگوی کشت موافق با تغییر اقلیم و ترویج و حمایت همه جانبه از آن، مبارزه بی‌امان و بدون تبعیض و اغماض با ناقضین ساز و کار ارائه شده، قانونی، مشروع، معتبر و ناگزیر خواهد بود. بعد از این اقدام، کاشت

محصولات پر آب بر یک ساله مطلقاً ممنوع و به جای آن محصولات یک ساله کم آب بر با ارزش افزوده بالا بایستی جایگزین شود و کسانی که بعد از اعلام عدم کاشت نهال درختان پرآب بر اقدام به کاشت آن کنند به احترام نسل حاضر و نسل‌های آینده بایستی توسط قوه قضاییه و نیروی انتظامی قلع و قمع شوند و به هیچ وجه به صنایع مرتبط با محصولات پر آب بر مجوز فعالیت یا ادامه فعالیت در حوزه آبریز دریاچه ارومیه ندهند. همچنین دولت و نهادهای حاکمیتی برای باغات و مزارع با محصولات پر آب بر، دو بازه زمانی میبایست تعیین نماید: یکی، تعیین زمان متعارف برای تغییر الگوی آبیاری سنتی به آبیاری هوشمند. دوم، تعیین بازه زمانی متعارف برای تغییر الگوی کشت. در صورتی که شخصی به هر دو تعهد قانونی عمل ننماید حمایت از محیط زیست و حیات اجتماعی نسل حاضر و نسل‌های آینده مخصوصا حیات فردی و اجتماعی جمعیت ساکن در گستره وسیعی از کشور که در معرض طوفان نمکی قرار می گیرند(از استان آذربایجان شرقی، اردبیل و زنجان تا قزوین و سایر مناطق) ایجاب می‌کند که آن باغات و مزارع قلع و قمع گردد. دولت برای تسهیل انجام این دو تعهد می‌تواند حمایت مالی از طریق اعطای وام و تسهیل دسترسی به تجهیزات آبیاری هوشمند و نیز آموزش کاشت داشت و برداشت و کمک به بازاریابی و صادرات محصولات کم آب بر ارائه نماید و صرفا به برخورد سلبی اکتفا ننماید.در خصوص قلمرو تغییر الگوی کشت، باید همه کشاورزان ساکن در مجاور رودهای حوزه آبریز دریاچه ارومیه از ابتدای رود واقع در محدوده سرزمینی ایران تا دریاچه ارومیه مشمول این طرح باشند یعنی با اجرای طرح فوق الذکر صرفا در محدوده و حریم دریاچه ارومیه، به هیچ وجه این طرح موفق نخواهد شد چرا که اصولا آبی باقی نمی ماند تا به محدوده و حریمه دریاچه وارد شود چون این آب در ایام گرم سال در بالادست رودها برای مصارف کشاورزی(مخصوصا محصولات پر آب بر) مصرف می شود یا اینکه در باقی ایام وارد سد ها می شود. ضمن اینکه گستره مناطق ساحل شرقی دریاچه که با طوفان نمکی در معرض نابودی قرار می گیرند(آذربایجان شرقی، اردبیل، زنجان، قزوین و شاید حتی سایر مناطق) صلاحیت دولت و حاکمیت را در اجرای طرح مذکور به صلاحیت تکلیفی(و نه صلاحیت تخییری) تبدیل می کند چرا که با امنیت ملی گره خورده و منافع کشاورزان ساحل غربی دریاچه که با اجرای طرح مذکور، بیشتر هم تامین می شود نمی تواند با اصرار بر ادامه روند موجود، هم امنیت ملی و هم حیات فردی و اجتماعی نسل فعلی و آتی گستره وسیعی از کشور را نابود سازد.

در حوزه صنایع، یکی از راهکارهای موثر تغییر الگوی کشت، حمایت از صنایع تبدیلی محصولات کم آب بر به محصولات با ارزش افزوده بالا از طریق فرآوری آن محصول می‌باشد. احداث صنایع تبدیلی محصولات کم آب بر و فرآوری آنها ضمن تضمین خرید آن محصولات باعث صادرات و نیز اشتغال افراد خواهد شد. تسهیل صدور مجوزهای احداث این کارخانجات، ارائه وام‌های کلان کم بهره و معافیت مالیاتی آنها در سال‌های اولیه فعالیت و نیز در صورت به کارگیری کارگران بومی و نیز کمک به بازاریابی و صادرات محصولات آنها از جمله بهترین اقدامات دولت خواهد بود.

در حوزه خدمات، دولت می‌تواند با ایجاد استخرهای آب شور در سواحل غربی و شرقی دریاچه ارومیه و نیز مراکز لجن درمانی در مکان‌های مناسب سواحل آن و ارائه امکانات بهداشتی، اقامتی و تفریحی کنار آنها نسبت به جذب گردشگر داخلی و خارجی و نیز رونق کسب و کارها از جمله صنایع دستی و مواد فراوری شده دریاچه کمک نماید.

۳-۳. حمایت مالی و جبران ضررهای اشخاص متضرر

هیچ طرح و برنامه و اقدامی بدون پشتوانه مالی امکان‌پذیر نخواهد بود. احیای دریاچه ارومیه هم از این قاعده مستثنا نیست. دولت بایستی ردیف مستقلی را در بودجه ملی برای احیای دریاچه در نظر بگیرد. این بودجه بایستی با در نظر گرفتن هزینه‌های تکالیف دولت در همه حوزه‌های مرتبط با دریاچه ارومیه مقرر گردد. علاوه بر اختصاص بودجه ملی برای احیا می‌توان حساب بانکی ویژه‌ای را هم برای واریز منابع محلی و کمک های مردمی در نظر گرفت. به این معنا که دولت در وضعیت کنونی برای کاهش خطرات نمک و طوفان‌های نمکی با همکاری مشترک کارشناسان داخلی و خارجی نسبت به شناسایی مواد موجود در کف دریاچه اقدام نموده و متناسب با انواع مواد موجود، قراردادهایی را با شرکت‌های داخلی و خارجی به صورت مشترک در قالب مزایده و پیش بینی همه شروط الزامی جهت رعایت استانداردهای زیست محیطی برای برداشت مواد موجود و واریز همه درآمدهای حاصل به حساب ویژه احیای دریاچه اقدام نماید تا در راستای احیای دریاچه هزینه گردد.

از طرف دیگر، حساب بانکی ویژه ای برای کمک های مردمی و سازمانهای مردم نهاد در نظر گرفته شود. دولت می تواند بخشی از اقدامات احیا کننده را که در توان بخش خصوصی و سازمانهای مردم نهاد است برای آنها در نظر بگیرد.

در نهایت اینکه در قبال سیاست و خط مشی عدم کاشت محصولات پرآب بر تا زمان زمان ایجاد درآمد ناشی از تغییر الگوی کشت(جایگزینی محصولات کم آب بر با محصولات پرآب بر و رسیدن به مرحله ایجاد درآمد)، دولت حمایت های مادی و اعطای تسهیلات(از قبیل پرداخت مستمری نقدی، اعطای مجوز فعالیت جایگزین، وام کم بهره و...) به عمل آورد.

۳-۴.حمایت اساسی از حریم کانال‌های انتقال آب و اعمال مجازات‌های بازدارنده

زمانی انتقال آب بین حوزه‌ای جهت احیای دریاچه موثر خواهد بود که اولاً کانال‌های انتقال آب ترجیحاً از طریق لوله‌های بزرگ و از طریق زیرسطحی صورت گیرد. در صورتی که این آب از طریق کانال‌های سطحی انجام شود لازم است برای آنها حریم تعریف شده و هرگونه استفاده از آن به هر شکل ممنوع و با متخلفین به شدت برخورد شود تا این مجازات عامل بازدارندگی ایجاد کند (این مجازات‌ها شامل توقیف و مصادره ابزار جرم، جریمه‌های سنگین و تخریب مزرعه و باغاتی که با آب کانال‌ها به صورت غیرقانونی آبیاری می‌شود و در صورت تکرار، مجازات حبس باشد). بدین منظور می‌توان از پهپادهای شناسایی که عکس و فیلم‌های آنها قابل رصد محلی، منطقه‌ای و ملی است استفاده کرد.

۳-۵. باز چرخانی آب در صنایع و تصفیه فاضلاب های شهری

با توجه به اینکه آب در شرایط تغییر اقلیم و خشکسالی حکم طلا را دارد لذا نباید به این راحتی آب را هدر داد. از این رو بازچرخانی آب در صنایع و استفاده مکرر از آن از یک طرف و تصفیه آب فاضلاب همه شهرهای بالای ۱۰۰ هزار نفر استان‌های شمال غرب و غرب کشور و هدایت آن از طریق لوله‌های زیرسطحی به دریاچه، ضمن جلوگیری از تبخیر یا استفاده غیرقانونی از آن، منابع آبی پایداری را برای احیای دریاچه فراهم می‌کند.

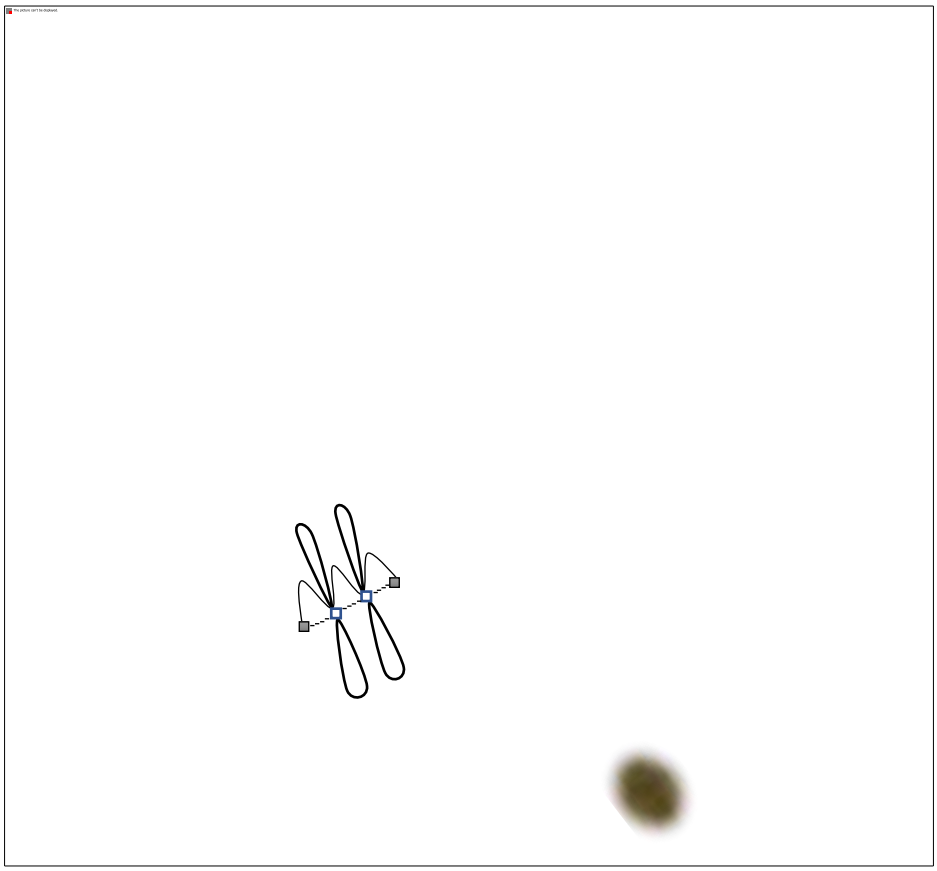
۳-۶. تضمین حقابه دریاچه ارومیه

حقابه دریاچه ارومیه زمانی تضمین خواهد شد که بین آب مورد نیاز برای احیای دریاچه و نیازهای کشاورزی و صنعتی تعادل ایجاد شود. نیازهای صنعت به آب از طریق بازچرخانی امکان‌پذیر است. اما زمانی می‌توان بین نیازهای آبی کشاورزی و نیاز آبی دریاچه تعادل برقرار کرد که بدون اغماض و بدون تبعیض الگوی کشت از محصولات پر آب بر به محصولات کم آب بر و نیز الگوی آبیاری از سنتی به مکانیزه و هوشمند تغییر یابد و توسعه کشاورزی هم با لحاظ الگوی کشت و الگوی آبیاری نوین متناسب با واقعیت‌های آبی توسعه یابد و نیازهای اشتغال فراتر از آن از طریق خدمات، تجارت (مخصوصاً استفاده از ظرفیت مرزهای این استان‌ها با چند کشور همسایه) و صنعت (مخصوصاً صنایع تبدیلی و با ارزش افزوده محصولات با مصرف آب پایین) تامین گردد.

۳-۷. اصلاح پل میانگذر دریاچه

از آنجا که بیشتر قسمت‌های پل میانگذر از طریق ریختن خاک و سنگ به داخل دریاچه از دو طرف ساحل غربی و شرقی آن و امکان جریان آب از معبر کوچکی در وسط دریاچه ایجاد شده است؛ لذا این امر به سکون آب و تبخیر شدید آن منجر شده است که نقش مهمی در خشکی دریاچه داشته است.

در صورتی که از همان ابتدای شروع میان گذر از هر دو ساحل، تعداد دهنه‌های پل زیاد می‌شد و در محل تقاطع پل ها، جزیره‌های کوچک توریستی ایجاد می‌شد که هر کدام دارای کاربری متفاوت و با امکانات مناسب می‌بود این امر هم به جریان آزاد آب کمک اساسی می‌کرد و هم با ایجاد اشتغال در بخش خدمات و توریسم، منابع پایداری را برای احیای دریاچه از محل مالیات و عوارض بر مشاغل ایجاد شده فراهم می‌کرد و هم بخشی از شاغلین فعالیت‌های کشاورزی در حوزه فعالیت‌های خدمات و گردشگری مشغول می‌شدند و همه بار اشتغال، به امر کشاورزی مخرب محیط زیست تحمیل نمی‌شد.



۴ . وظایف و تکالیف شهروندان در عدم تخریب و حفظ محیط زیست و احیای دریاچه

شهروندان و کشاورزان در راستای عمل به وظیفه مقرر در اصل ۵۰ قانون اساسی دو تکلیف اساسی دارند: اول، به عنوان اقدام عاجل و فوری الگوی آبیاری سنتی را تغییر داده و از شیوه‌های آبیاری نوین و تجهیزات هوشمند برای آبیاری استفاده کنند تا امکان عملیاتی شدن حقابه دریاچه ارومیه میسر گردد و در این راه از دولت مرکزی به صورت فعال تسهیلات و نیز دسترسی به ابزارهای نوین آبیاری را مطالبه کنند. دوم، توقف کامل کاشت محصولات پرآب بر یک ساله و عدم کاشت نهال‌های پر آب بر است و به جای آن، نوع و نحوه کاشت، داشت و برداشت محصولات کم آب بر یک ساله و نهال‌های با مصرف آبی کم را از دولت مطالبه کرده و در راستای افزایش ارزش افزوده، نسبت به راه‌اندازی کارخانجات تبدیلی و تکمیلی محصولات کم آب بر اقدام نمایند. از طرف دیگر نسبت به جایگزین کردن درختان پر آب بر با نهال‌های کم آب بر در بازه زمانی مشخص که از طرف دولت تعیین می‌شود اقدام نمایند.

امکان کسب درآمد از شیوه‌های نوین و با ارزش افزوده بالای الگوی کشت مناسب با اقلیم تغییر یافته و با شیوه‌های نوین آبیاری و تاسیس کارخانجات تبدیلی و تکمیلی وجود دارد؛ کافیست با طبیعت و با هیچکس لجبازی نکنیم و حیات اجتماعی نسل حاضر و نسل‌های آینده را به خطر نیندازیم.

نتیجه گیری و راهکارها

با توجه به مباحث مطرحه در این مقاله نتایج و راهکارها عبارتند از:

الف: حمایت و حفظ محیط زیست و یا حرکت در مسیر توسعه پایدار، اهدافی هستند که تحقق آنها نیازمند همکاری تمام بخش‌های جامعه است با این حال دولت، مسئولیت اصلی را در احیای دریاچه ارومیه دارد؛ چرا که دولت صلاحیت خط مشی گذاری، مقررات گذاری، تنظیم گری، اجرا و نظارت بر اجرا را بر عهده دارد . از این رو، دولت در درجه اول همه خط مشی‌هایی که متناسب با وضعیت قبل از تغییرات آب و هوایی بود را متناسب با وضعیت اسفبار فعلی تغییر یا اصلاح نماید؛ بعد از تغییر خط مشی و اصلاح و متناسب سازی آنها، صلاحیت تنظیم‌گری فعالیت‌های اقتصادی و غیر اقتصادی مخرب محیط زیست (دریاچه ارومیه) بخش دولتی، غیردولتی و خصوصی نیز در صلاحیت دولت و حاکمیت است. مسئولیت و تکالیف دولت و حاکمیت در احیای دریاچه ارومیه عبارتند از:

۱ . تنظیم‌گری رفتار اقتصادی و غیر اقتصادی مغایر با طرح احیای دریاچه ارومیه: تعیین زمان متعارف برای تغییر الگوی آبیاری سنتی به آبیاری مدرن و هوشمند، تعیین بازه زمانی متعارف برای تغییر الگوی کشت (جایگزینی نهالهای کم آب بر به جای درخت‌های با مصرف آبی بیشتر) و ممنوعیت کشت محصولات یک ساله پر آب بر که به دلیل نجات حیات فردی و اجتماعی نسل فعلی و آینده گستره وسیعی از سرزمین ایران که با امنیت ملی هم گره خورده است.

۲. حمایت مالی و جبران ضررهای اشخاص متضرر: اختصاص ردیف بودجه مستقل متناسب با وظایف دولت، مزایده برداشت مواد معدنی موجود در دریاچه و اختصاص درآمدهای حاصله به احیای دریاچه و حمایت های مادی و اعطای تسهیلات(از قبیل پرداخت مستمری نقدی، اعطای مجوز فعالیت جایگزین، وام کم بهره و...)در قبال خط مشی عدم کاشت محصولات با مصرف آبی بیشتر تا حصول درآمد ناشی از الگوی کشت تغییر یافته.

۳. حمایت اساسی از حریم کانال‌های انتقال آب و اعمال مجازات‌های بازدارنده و پایش آن بوسیله ابزارهای مدرن از جمله پهبادهای شناسایی: توقیف و مصادره ابزار جرم، جریمه‌های سنگین و تخریب مزرعه و باغاتی که با آب کانال‌ها به صورت غیرقانونی آبیاری می‌شود و در صورت تکرار، مجازات حبس

۴. باز چرخانی آب در صنایع و استفاده مجدد و تصفیه فاضلاب های شهری و هدایت آن به دریاچه ارومیه

۵ .تضمین حقابه دریاچه ارومیه بواسطه تغییر شیوه آبیاری، تغییر الگوی کشت و توسعه کشاورزی با توجه با وضعیت تغییر اقلیم و خشکسالی.

۶. اصلاح پل میانگذر دریاچه

ب:وظایف و تکالیف شهروندان در عدم تخریب و حفظ محیط زیست و احیای دریا: در خصوص فعالیت‌های کشاورزی اطراف رودخانه‌های آبریز دریاچه ارومیه در داخل مرزهای ملی (از مبدا تا دریاچه ارومیه) کشاورزان این مناطق، با ترک ذهنیت زمان قبل از تغییر اقلیم و لجبازی نکردن با هیچکس و آشتی با طبیعت، ضمن التزام عملی به طرح تغییر الگوی کشت که به مراتب ارزش اقتصادی بالاتری نسبت به محصولات پرآب دارند در فعالیت‌های دیگری چون توریسم، صنایع تبدیلی و تکمیلی مرتبط با محصولات کم آب بر، فعالیت‌های اقتصادی مرزی، صنایع دستی و غیر فعالیت داشته باشند.

ج: کمک‌های مردمی و سازمان‌های مردم نهاد:در این خصوص، دولت ضمن افتتاح حساب برای کمک‌های نقدی مردمی و سازمان‌های مردم نهاد، می‌تواند بخشی از وظایفی که این سازمان‌ها از عهده انجام آن برمی‌آیند را به آنها واگذار نماید.

منابع

قانون اساسی جمهوری اسلامی ایران.

قانون مدیریت خدمات کشوری مصوب ۱۳۸۶.

آقایان زاده، الیاس و پیرخراطی، حسین و رضایی، ندا، (۱۳۹۲)، خشک شدن دریاچه ارومیه و چالش های پیش روی آن، سی و دومین گردهمایی و نخستین کنگره بین المللی تخصصی علوم زمین.

احمدی، سیروس و اکبرزاده، محمد (۱۳۹۷)، پیامدهای سیاسی – امنیتی خشک شدن دریاچه ارومیه، فصلنامه ژئوپلیتیک، دوره ۱۴، شماره ۵۱ - شماره پیاپی ۵۱.

رزی، حمیدحسن؛ مظاهری، مهدی؛ ولی سامانی، جمال محمد و فرناندز، مارکوس کارواجالینو، (۱۳۹۵)، بررسی تاثیر بستن گذرگاه شهیدکلانتری بر تراز آب دریاچه ارومیه با استفاده از مدل هیدرودینامیک دو بعدی MOHID Water، فصلنامه علمی تخصصی مهندسی و مدیریت ساخت، سال اول، شماره دوم.

روناک م. اسمیت، (۱۳۸۸)، قواعد حقوق بین المللی بشر ترجمه فاطمه کیهانلو، چاپ اول، تهران:، انتشارات دانشکده حقوق و علوم سیاسی دانشگاه تهران.

هاشمی، سیدمحمد (۱۳۸۳)، حقوق اساسی جمهوری اسلامی ایران، جلد دوم، حاکمیت و نهادهای سیاسی، چاپ نهم، تهران: نشر میزان.

هاندل،گوندر (۱۳۸۹)، حقوق بشر و حفاظت از محیط زیست ترجمه علی نسیم فر در: آسبیورن ایده، کاتارینا کراوزه و آلن روساس، حقوق اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی، گروهی از مترجمان، تهران: انتشارات مجد.

1. Hornby, A.S., (2001), Oxford Advanced Learners Dictionary, Oxford University Press.

Anderson, James E. (2003), Public Policymaking: An Introduction, fourth Edition: Washington DC: Houghton Mifflin Company.

Ogus, Anthony, (1996), Regulation: Legal form and Economic Theory, Oxford University Press .

How to implement Article 50 of the Constitution in relation to Lake Urmia

Mojtaba hemmati

assistant professor of department of public law, university of judicial sciences and administrative services, Tehran, Iran.

* email:mhemmati1358@unsas.ir

Abstract

According to Article 45 of the Constitution, seas, lakes, rivers, and other public waters are part of the public good and wealth and are at the disposal of the Islamic government to act on them in accordance with the public interest. Article 8 of the Civil Service Management Law also specifies in paragraphs A, B, C, T, and K matters that are part of the government's affairs and are examples of the government's duties in the restoration of Lake Uremia and Article 50 of the Constitution considers environmental protection a public duty and prohibits economic and other activities that are associated with environmental pollution or its irreparable destruction. On the other hand, Lake Uremia, although a place of social life for the present and future generations, has dried up, endangering their social life. This article attempts to answer the question using a descriptive-analytical method and by collecting information through a library: How is Article 50 of the Constitution implemented in relation to Lake Uremia as an Anfal and public wealth at the disposal of the Islamic government?

Keywords: Article 50 of the Constitution, Article 45 of the Constitution, Lake Uremia Restoration, Environment, Policy Making, Regulation.

شناسایی نقش الگوهای پیوند از دور بر وقوع سیل ۱۴۰۱ مورد مطالعه شهرستان چادگان اصفهان

حسین لادور[۱] ، نسرین نیک اندیش[۲]

۱- دانشجوی دکتری آب و هواشناسی دانشگاه پیام نور اصفهان

۲-استادیار آب و هواشناسی دانشگاه پیام نور

red1619r@gmail.com

چکیده

در سال‌های اخیر، شناخت روابط بین‌المللی اقلیمی به‌ویژه الگوهای پیوند از دور (Teleconnection Patterns) به‌عنوان عامل کلیدی در تحلیل و پیش‌بینی پدیده‌های آب‌وهوایی و اقلیمی نظیر سیلاب‌های شدید، توجه ویژه‌ای یافته است. چادگان، از شهرستان‌های استان اصفهان، در مرداد ۱۴۰۱ شاهد وقوع سیل گسترده‌ای بود که خسارات قابل توجهی را به زیرساخت‌ها و محیط زیست وارد آورد. هدف این مطالعه، شناسایی و تحلیل نقش الگوهای پیوند از دور اقلیمی در وقوع این سیل با استفاده از داده‌های بارش و شاخص‌های اقلیمی مرتبط است. داده‌های بارشی روزانه و شاخص‌های استاندارد شده الگوهای پیوند از دور مانند NAO، PNA، TNA، ENSO، PDO و دیگر شاخص‌های موثر بین سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۲ تحلیل شد. نتایج نشان داد که شاخص‌های NAO و PNA به‌طور معناداری با رخداد سیلاب چادگان همبستگی داشته و نقش تعیین‌کننده‌ای در تغییرات بارش‌های حدی منطقه ایفا کرده‌اند. همچنین وجود همبستگی مستقیم بین شاخص‌های TNA و PNA با شدت و میزان بارش‌ها تأیید گردید، در حالی‌که NAO تمایل به همبستگی معکوس نشان داد. تحلیل‌های رگرسیونی چندگانه نشان داد که تا ۴۰ درصد تغییرات در وقوع سیلاب مرداد ۱۴۰۱ می‌تواند توسط تغییرات شاخص‌های اقلیمی پیوند از دور تبیین گردد. این یافته‌ها نشان دهنده اهمیت الگوهای پیوند از راه دور در پیش‌بینی و مدیریت حوادث سیل در مناطق نیمه‌خشک ایران مانند چادگان است. مطالعات میدانی و داده‌های تاریخی نشان می‌دهد که علاوه بر عوامل اقلیمی، عواملی مانند تغییرات کاربری زمین، فرسایش خاک و شرایط ژئومورفولوژیکی منطقه نیز اثر قابل توجهی در شدت و گستردگی سیل داشته‌اند. این پژوهش با بررسی پیوندهای اقلیمی دوردست و افزایش بهره‌گیری از فناوری سنجش از دور، روش تحلیلی جدیدی را برای مدیریت بهتر ریسک سیلاب ارائه داده است. نتایج حاکی از ضرورت تقویت سیستم‌های هشداردهی زودهنگام و بهبود سازگاری‌های منطقه‌ای بر اساس تحلیل‌های پیوند از راه دور و داده‌های ماهواره‌ای است که می‌تواند به کاهش خسارات ناشی از سیل در شهرستان چادگان و مناطق مشابه کمک کند.

کلید واژه‌ها: الگوهای پیوند،سنجش از دور ، شهرستان چادگان، مدیریت سیل

مقدمه

آب و هوا به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل طبیعی تأثیرگذار بر زندگی انسان‌ها و محیط زیست، از دیرباز مورد توجه جغرافی‌دانان و دانشمندان علوم زمین قرار داشته است. اقلیم هر منطقه بازتابی از الگوهای بلندمدت دما، بارش، باد و سایر عوامل جوی است که تکرارپذیری آن‌ها در طول زمان، ویژگی‌های خاص آب و هوایی آن منطقه را شکل می‌دهد. شناخت دقیق این ویژگی‌ها و نحوه تغییرات آن‌ها به ویژه در شرایطی که توده‌های هوایی ناپایدار موجب بروز بارش‌های شدید و مخاطراتی مانند سیل می‌شوند، از اهمیت حیاتی برخوردار است.ایران، به علت موقعیت جغرافیایی خاص خود و تأثیرپذیری از سامانه‌های جوی مختلف، از جمله سامانه‌های موسمی، و همچنین وجود ناهمواری‌های متعدد، از مناطق آسیب‌پذیر در برابر رخدادهای اقلیمی شدید مانند سیلاب‌ها به شمار می‌رود. سیل به عنوان یکی از پرخطرترین بلایای طبیعی، هر ساله در بسیاری از مناطق جهان خسارات جانی، مالی و زیست‌محیطی فراوانی به بار می‌آورد. وقوع سیل ناشی از بارش‌های سنگین و ناگهانی است که گاه به دلیل توپوگرافی، پوشش گیاهی، و شرایط زمین‌شناسی مناطق مختلف، اثرات مخرب آن تشدید می‌شود. در ایران، با توجه به موقعیت جغرافیایی و شرایط اقلیمی خاص، حوضه‌های آبریز متعددی در معرض خطر وقوع سیل قرار دارند که شهرستان چادگان یکی از این مناطق حساس است. وقوع سیل در مرداد ۱۴۰۱ این شهرستان نمونه‌ای بارز از چنین پدیده‌های اقلیمی شدید است که نیازمند بررسی جامع و دقیق علل وقوع آن است تا در مدیریت بحران و کاهش خسارات موثر واقع شود. عوامل مختلفی در بروز سیل نقش دارند که می‌توان آن‌ها را به دو دسته عوامل طبیعی و انسانی تقسیم کرد. از عوامل طبیعی می‌توان به الگوهای بارش، ویژگی‌های زمین‌شناسی و هیدرولوژیکی، نحوه توزیع فضایی و زمانی بارش‌ها و همچنین تغییرات اقلیمی جهانی اشاره کرد. از سوی دیگر، فعالیت‌های انسانی مانند تغییر کاربری زمین، کاهش پوشش گیاهی، ساخت و سازهای نامناسب و مدیریت ناکافی منابع آب می‌تواند میزان آسیب‌پذیری مناطق در برابر سیل را افزایش دهد. هر ساله سیلاب ها بیش از ۲۰۰۰ نفر را ازبین می برند و متاسفانه بر ۷۵ میلیون نفر از جمعیت مردم جهان تاثیر می گذارند(محمدی ۱۳۸۹) بارش های سنگین و سیل آسا از پدیده های خطرناک هستند که شناسایی شرایط سینوپتیک بوجود آورنده این بارش ها می تواند در پیش بینی زمان وقوع و کاهش خسارت و آمادگی لازم کند.سیلاب مردادماه ۱۴۰۱ خسارات متعددی در بخش های مختلف زیربنایی به همراه داشته است. این خسارت ها در زیرساخت های شهری، جاده ها و ابنیه فنی، شبکه و تأسیسات آب رسانی، توزیع برق و واحدهای مسکونی شهری و روستایی، بخش کشاورزی و حیات وحش رخ داده است.بارش‌های تابستانی در مردادماه سال ۱۴۰۱ در اقصی نقاط کشور منجر به جاری شدن سیلاب به‌ویژه در استان‌های شرقی و نیمه جنوبی کشور شد در این سیل ۲۴ استان کشور شامل آذربایجان شرقی، اصفهان، البرز، بوشهر، تهران، چهارمحال‌وبختیاری، خراسان جنوبی، خراسان رضوی، خوزستان، زنجان،

سمنان، سیستان و بلوچستان، فارس، قزوین، قم، کرمان، کهگیلویه و بویراحمد، گلستان، لرستان، مازندران، مرکزی، هرمزگان، همدان و یزد تحت تأثیر قرار گرفتند و متأسفانه تعدادی از هموطنانمان جان خود را از دست داده و خانه‌های مسکونی شماری از مردم نیز در تعداد زیادی از شهرها و روستاها دچار آبگرفتگی شدند. همچنین، خسارات فراوانی به زیرساخت‌های شهری و روستایی وارد گردید، به‌طوریکه ساکنین برخی روستاها ناچار به ترک محل زندگی خود شدند. شهرستان چادگان در محدوده‌ای به مختصات ۵۰ درجه و ۱۳ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۵۱ دقیقه طول شرقی و ۳۲ درجه و ۳۲ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۵۸ دقیقه عرض شمالی واقع شده‌است؛ بنابراین از طولی معادل ۳۸/۸ دقیقه یا ۵۸/۹ کیلومتر و عرضی معادل ۲۵/۵۸ دقیقه یا ۴۷/۱ کیلومتر برخوردار می‌باشد.مرکز شهرستان در فاصله تقریبی ۱۱۵ کیلومتری غرب مرکز استان واقع گردیده‌است و با مساحت ۱۲۰۰ کیلومتر مربع از سمت شمال و شرق با شهرستان تیران و کرون، از سمت شمال غرب با شهرستان فریدن، از سمت غرب با شهرستان فریدون‌شهر و از سمت جنوب با استان چهارمحال و بختیاری هم‌مرز می‌باشد.بلندترین و پست‌ترین نقاط ارتفاعی شهرستان به ترتیب برابر ۳۹۱۵ متر و ۱۹۵۰ متر از سطح دریا هستند که بر این اساس ارتفاع متوسط منطقه ۲۹۳۲ متر محاسبه می‌شود، در صورتیکه تراز سطوح ارتفاعی، میانگین ارتفاع شهرستان را بین خطوط تراز ۲۴۰۰ تا ۲۵۰۰ متر نشان می‌دهد.مهم‌ترین رشته کوه‌های شهرستان در حاشیه شمالی شامل ارتفاعات بزی نو (۲۹۵۲ متر) و دالان کوه (۳۹۱۵ متر)، در حاشیه جنوب غربی شامل کوه خوربه (۳۰۵۰ متر) و کوه سرچشمه کوگانک (۳۳۰۰ متر) و در حاشیه غربی شامل کوه سفید (۳۲۱۳ متر) و کوه ترکی (۳۰۸۵ متر) می‌باشند. شیب عمومی منطقه در دو جهت، از سمت شمال به جنوب و از سمت غرب به شرق کاهش می‌یابد. ارتفاع متوسط شهر چادگان ۲۳۱۰ متر محاسبه شده‌است. خسارات ناشی از سیل در چادگان بیشتر متوجه بخش کشاورزی بود. کشت و کارهایی که در مسیل‌ها انجام شده بود خسارات زیادی دیدند.ارزیابی و جمع بندی گزارش‌ها از میزان خسارت فعالیت سامانه‌های بارشی تابستانه و وقوع سیلاب الغ بر یک هزار و ۱۰۰ میلیارد تومان است.(ایسنا مرداد ۱۴۰۱)سیلاب‌های اخیر به ۹۸ کیلومتر از راه‌های استان آسیب زد و ۸۱ میلیارد تومان خسارت برجا گذاشت، سیل همچنین به ۶۱ پل و ابنیه و چادرهای عشایری، ایل‌راه‌ها و دام‌های عشایری خسارت وارد کرد.به ۹ هزار هکتار اراضی باغی و زراعی، ۳۴۵ هکتار سامانه‌های تحت فشار آبیاری، ۲۱۵ هکتار شبکه زهکشی و آبیاری، ۵۰ هکتار تجهیز نوسازی اراضی، ۳۹۰ هکتار لوله‌های آبیاری، ۱۰۶ کیلومتر قنات، ۱۴۱ کیلومتر کانال آبرسانی، ۱۳۳ کیلومتر جاده بین مزارع و استخرهای ذخیره آب و پرورش ماهی خسارت زد.(شیشه فروش ۱۴۰۱)

یکی از جنبه‌های کلیدی در تحلیل فرآیندهای اقلیمی مؤثر در وقوع سیل، بررسی نقش پیوندهای اقلیمی از راه دور (teleconnection) است که می‌تواند تغییرات گسترده در الگوهای جوی و هیدرولوژیکی منطقه‌ای را توضیح دهد. این پیوندها شامل پدیده‌هایی مانند نوسانات ال نینیو-لانینیا (ENSO)، نوسان Madden-Julian (MJO)، و نوسان شمال اطلس (NAO) است که با تغییراتی در میزان و شدت بارش‌ها ارتباط داشته و به عنوان عامل‌های محرک اصلی در بروز سیلاب‌های شدید در مناطق خشک و نیمه خشک ایران شناخته می‌شوند. استفاده از فناوری‌های نوین سنجش از راه دور و مدل‌سازی‌های مبتنی بر داده‌های ماهواره‌ای، امکان پایش لحظه‌ای بارش‌ها، تحلیل دقیق مناطق آسیب‌پذیر و پیش‌بینی رخدادهای سیلابی را فراهم نموده است. این فناوری‌ها با ارائه داده‌های دقیق و به‌روز، ابزاری قوی برای تصمیم‌گیری‌های سریع و هوشمند در مدیریت بحران‌های ناشی از سیل هستند.در این پژوهش، با تاکید بر نقش پیوندهای اقلیمی دوردست و بهره‌گیری از داده‌های سنجش از راه دور، به تحلیل عوامل موثر در وقوع سیل مرداد ۱۴۰۱ شهرستان چادگان پرداخته شده است. بررسی دقیق روندهای اقلیمی، نقشه‌برداری از مناطق آسیب‌دیده، و مدل‌سازی هیدرولوژیکی از اهداف اصلی این مطالعه است که در نهایت راهکارهای علمی و عملی برای مدیریت بهتر و کاهش خسارات ناشی از سیل ارائه می‌نماید

الگوهای پیوند از دور (Teleconnection Patterns)

الگوهای جوی و اقیانوسی هستند که بر اقلیم مناطق وسیعی تأثیر می‌گذارند و بین تغییرات جوی و شرایط سطحی اقیانوس‌ها ارتباط برقرار می‌کنند. نوسان اطلس شمالی یک الگوی دو قطبی فشار در اقیانوس اطلس شمالی است که بر دامنه فشار و جریان‌های غربی تأثیر می‌گذارد. در فاز مثبت NAO، پرفشار آزور تقویت شده و مسیر توده‌های هوایی از اقیانوس اطلس به سمت شمال جابجا می‌شود که منجر به زمستان‌های ملایم‌تر و مرطوب‌تر در شمال غرب اروپا و سردی و خشکی در جنوب اروپا می‌شود. در فاز منفی، این الگو برعکس عمل می‌کند و هوای سردتر و خشک‌تر را به غرب اروپا می‌آورد. NAO نقش مهمی در کنترل الگوهای هوا در نیمکره شمالی دارد و شدت فشار در قطب شمال و آزور را تغییر می‌دهد. الگوی PNA یکی از الگوهای مهم تغییرپذیری اقلیم در نیمکره شمالی است که به ویژه بر وضعیت هوا و جریان‌های جت در منطقه غرب آمریکای شمالی و اقیانوس آرام تاثیر می‌گذارد. در فاز مثبت آن، ارتفاع هوای گرم در حوالی هاوائی و کوهستان‌های آمریکا افزایش می‌یابد و کم‌فشار در جنوب شرق ایالات متحده شکل می‌گیرد که جریان‌های جت را به سمت شرق تغییر می‌دهد. این الگو با پدیده ENSO ارتباط قوی دارد و می‌تواند دمای هوا و یخ دریایی در مناطق تحت تاثیر خود را تغییر دهد. TNA الگوی نوسان دمای سطح دریا در اطلس گرمسیری است که بر الگوهای بارش و دمای مناطق پیرامونی اقیانوس اطلس و همچنین بخش‌هایی از نیمکره شمالی تاثیر می‌گذارد. این شاخص کمتر نسبت به سایر شاخص‌های بزرگ‌تر مورد بررسی عصری قرار می‌گیرد اما نقش مهمی در تغییرات آب و هوایی مناطق گرمسیری اطلس و

آفریقا دارد که می‌تواند بر الگوهای بارشی در این مناطق اثر بگذارد.ENSO مهم‌ترین پدیده پیوند از دور است که شامل تغییرات دمای سطح دریا در نواحی استوایی اقیانوس آرام و ارتباط آن با فشارهای جوی و جریان‌های هواست. فازهای النینو و لانینا شرایط اقلیمی متضاد و قابل توجه ایجاد می‌کنند؛ النینو با افزایش دمای سطح دریا در شرق اقیانوس آرام همراه است و بارش‌های بیش از حد و گرم‌تر شدن مناطق حاره‌ای می‌شود. لانینا برعکس است و شرایط سردتری نسبت به نرمال را ایجاد می‌کند.PDO یا نوسان اقیانوس آرام، یک الگوی تغییر دمای سطح دریا است که در مقیاس زمانی بلندتر (چند دهه) در شمال اقیانوس آرام رخ می‌دهد. PDO دو فاز گرم و سرد دارد که بر دمای سطح اقیانوس و الگوهای آب و هوایی اطراف آن تاثیر می‌گذارد. فاز گرم PDO معمولاً با دمای بالاتر و تقویت شرایط نینو مرتبط است و می‌تواند بر الگوهای بارشی و دمایی در آمریکای شمالی و آسیا تاثیر بگذارد. این توضیحات کلی هر یک از شاخص‌های مهم پیوند از دور را شرح می‌دهد که نقش اساسی در تغییرات اقلیمی منطقه‌ای و جهانی دارند و بیشتر برای پیش‌بینی‌های اقلیمی و تحلیل‌های تغییرات بلندمدت آب و هوا استفاده می‌شوند. هر کدام از این الگوها ویژگی‌ها و تاثیرات خاص خود را بر شرایط جوی مناطق مختلف دارند که بسته به فازهای مثبت یا منفی تغییرمی‌کنند.

جدول شماره یک بصورت خلاصه شاخص‌ها و تاثیرات آنها بر اقلیم ایران را ارائه میکند:

NAO	در فاز مثبت، باعث افزایش بارش در شمال غرب ایران و کاهش بارش در جنوب می‌شود. فاز منفی با برعکس شدن این الگو و شرایط خشک‌تر در شمال غرب همراه است.
PNA	با تاثیر بر الگوهای جریان جت، در فاز مثبت می‌تواند باعث افزایش دما و کاهش بارش در بخش‌هایی از ایران شود.
TNA	تغییرات در دمای سطح دریاهای اطلس گرمسیری می‌تواند بر بارش‌های جنوب غرب و جنوب شرق ایران اثر بگذارد.
ENSO	در فاز النینو معمولا بارش‌ها در ایران کمتر و دما بیشتر می‌شود؛ در لانینا بالعکس، بارش‌ها افزایش دارند.
PDO	در فاز گرم تاثیر مشابه النینو دارد و می‌تواند بارش و دما را در ایران تغییر دهد.

جدول شماره (۱)

در مجموع، این الگوهای پیوند از دور با تغییر فشارهای جوی، جریان‌های هوا و دمای سطح اقیانوس‌ها باعث بروز نوسانات بارشی و دمایی در ایران می‌شوند. شناخت دقیق این الگوها برای پیش‌بینی‌های اقلیمی و مدیریت و منابع آب ، کاهش خسارات ناشی از سیل ، خشکسالی ، کشاورزی و غیره در ایران بسیار اهمیت دارد.

پیشینه مطالعه

مطالعات بین‌المللی متعددی بر روی سیلاب‌ها در مناطق خشک و نیمه‌خشک انجام شده که در آنها به نقش بارش‌های نامنظم و شدید، تغییرات اقلیمی، نقش پوشش گیاهی و مدیریت منابع آب پرداخته شده است. از مهمترین این مطالعات می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. پژوهشی در ایستگاه پخش سیلاب آبباریک بم نشان داد که سیستم‌های پخش سیلاب می‌توانند به عنوان روشی مؤثر برای حفظ رطوبت و تغذیه سفره‌های آب زیرزمینی در مناطق خشک و نیمه‌خشک عمل کنند. این سامانه‌ها با افزایش رطوبت و مواد مغذی خاک سبب بهبود تراکم پوشش گیاهی و توان زیستی گونه‌های بومی شده‌اند. یافته‌ها حاکی از آن است که مدیریت بهینه این سیستم‌ها می‌تواند توسعه پایدار کشاورزی و منابع طبیعی در این مناطق را تسهیل کند (Aghamirzadeh, 2024) پژوهش دیگری در هند به بررسی نقش GIS و سنجش از دور در طبقه‌بندی و پهنه‌بندی مناطق مستعد سیل پرداخت. استفاده از شاخص‌های رطوبت خاک، ارتفاع، شیب و کاربری زمین به همراه روش تصمیم‌گیری سلسله مراتبی (AHP) منجر به تهیه نقشه‌های قابل اعتماد خطر سیل شد که با روش ROC تایید گردید. این مطالعه نشان داد ابزارهای داده‌محور و مدل‌سازی مکانی می‌توانند نقش مهمی در کاهش خسارات سیل ایفا کنند (Sasha et.al, ۲۰۲۰)تحلیل رویدادهای سیلاب اسفند ۱۳۹۷ گلستان نیز تأثیر تغییرات ترمودینامیکی جو و سامانه‌های جوی در وقوع سیلاب را نشان داده است. افت فشار سطح دریا و ارتفاع تراز میانی همراه با ناوه‌های عمیق جوی شرایط را برای بارش‌های سنگین و سیلاب‌های مخرب فراهم کرده است. این یافته‌ها اهمیت مطالعه سیستم‌های جوی و نقش اقلیم بر روی وقوع سیلاب‌ها را در مناطق خشک و نیمه‌خشک تأیید می‌نماید (Hedayati Dezfuli, 2024). مطالعه‌ای در مناطق خشک ایران به بررسی روش‌های سنتی کنترل سیلاب مانند بندسارها پرداخت که نشان‌دهنده نقش قابل توجه این سازه‌های خاکی کوچک در ذخیره آب حاصل از سیلاب، تغذیه آب‌های زیرزمینی و کنترل رواناب‌های سطحی بوده است. این فناوری بومی علاوه بر حفظ منابع آب، به توسعه اقتصادی و ایجاد اشتغال در مناطق روستایی کمک می‌کند و سازگاری بالایی با شرایط زیست‌محیطی منطقه دارد (مطالعه بیرجند، ۲۰۱۴).مقالات متعددی کاربرد فناوری‌های نوین سنجش از دور، رادار و GIS را برای شناسایی سریع مناطق آسیب‌دیده از سیل در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان تایید کرده‌اند (Sivanpillai et al., ۲۰۲۱)

داده ها و روش شناسایی پژوهش

در این مطالعه از دو دسته داده جهت تحلیل مخاطره سیل ۱۴۰۱/۰۵/۰۶ شهرستان چادگان اصفهان استفاده شده است، داده های ایستگاه زمینی و داده های سطوح فوقانی جو داده های ایستگاه زمینی پژوهش شامل داده های بارش روزانه سوم تا هفتم مرداد ۱۴۰۱ اصفهان می باشد. که از وب سایت هواشناسی به آدرس www.irimo.ir از ایستگاه های چادگان، داران، نجف آباد، خوانسار، فریدونشهر اخذ شده است.داده های سطوح فوقانی جو در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (برحسب ژئوپتانسیل بر صفر) باد مداری، باد نصف النهاری رطوبت ویژه، رطوبت نسبی در ساعت های ۰۰:۰۰، ۰۶:۰۰، ۱۲:۰۰، ۱۸:۰۰ در محدوده مختصات جغرافیایی ۰ تا ۸۰ درجه شمالی و ۰ تا ۱۲۰ درجه شرقی از پایگاه داده ای NCEP/NCAR و ابتدا به سازمان ملی جو و اقیانوس شناسی ایالات متحده آمریکا برداشت شده است. با توجه به سامانه های جوی فعال در آسیا و اروپا در این محدوده عرض جغرافی ۰ تا ۹۰ درجه شمالی و طول جغرافی ۰ تا ۱۲۰ درجه شرقی این محدوده به عنوان محور مطالعه انتخاب شده است.به دلیل اهمیت تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در تراز جوی به عنوان لایه میانی جو و نقش تعیین کننده آن در تغییرات دما و بارش در این مطالعه این تراز انتخاب شده است. در جدول شماره ۲ روزهای چهارم تا هفتم مرداد میزان بارش در طی ۲۴ ساعت در که از ایستگاههای شهرستانهای چادگان، داران، نجف آباد، خوانسار، فریدونشهر اخذ شده است ثبت شده است.

در این پژوهش به منظور تحلیل علل وقوع سیل مرداد ۱۴۰۱ شهرستان چادگان و نقش پیوندهای از راه دور، از داده‌های متنوع سنجش از راه دور، داده‌های اقلیمی و داده‌های مکانی استفاده شده است. داده‌های ماهواره‌ای شامل تصاویر ماهواره‌های Landsa با تفکیک مکانی حدود ۳۰ متر و تصاویر Sentinel با تفکیک مکانی ۱۰ متر در بازه زمانی قبل و پس از وقوع سیل دریافت شده‌اند. این داده‌ها برای شناسایی تغییرات پهنه‌های آبی و محدوده سیلاب به کار گرفته شده‌اند و شاخص‌های طیفی مختلفی مانند NDWI، AWEIsh و MNDWI برای استخراج پهنه‌های آب بهینه‌سازی شده‌اند تا محدوده دقیق سیل مشخص شود. برای پردازش و تحلیل داده‌های ماهواره‌ای از سامانه Google Earth Engine (GEE) به عنوان بستر ابری پردازش داده‌های فضایی استفاده شده است.

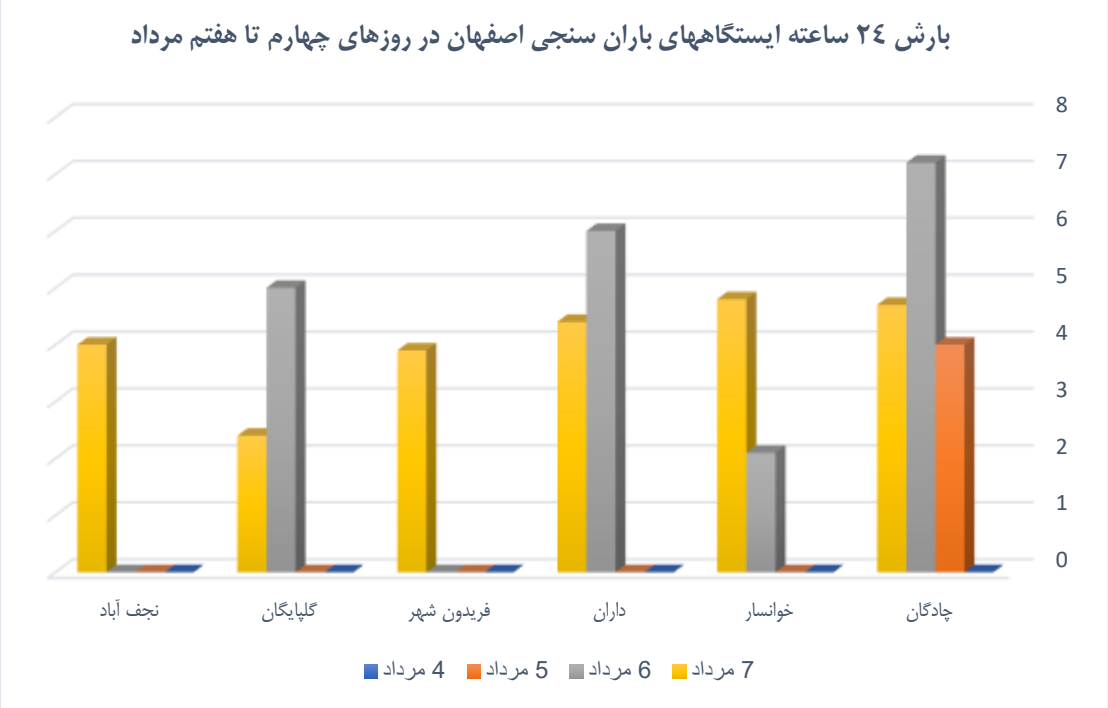
جدول شماره(۲) بارش روزانه(۲۴ ساعته) ایستگاه های باران سنجی استان اصفهان روز های ۴ تا ۷ مردادماه ۱۴۰۱

ردیف	ایستگاه	۴ مرداد	۵ مرداد	۶ مرداد	۷ مرداد
۱	چادگان	۰	۰/۴	۲۰/۷	۷/۴
۲	خوانسار	۰	۰	۱/۲	۸/۴
۳	داران	۰	۰	۰/۶	۴/۴

۴	فریدون شهر	۰	۰	۹/۳
۵	گلپایگان	۰	۰/۵	۴/۲
۶	نجف آباد	۰	۰	۰/۴

همچنین در نمودار شماره یک نیز بارش ۲۴ ساعت این ایستگاهها در طی روزهای چهارم تا هفتم مرداد بصورت نمودار میله ای نمایش داده شده است و نشان میدهد در روز ششم مرداد بیشترین میزان بارش در شهرستان چادگان رخ داده است.

نمودار شماره ۱ : بارش روزانه(۲۴ ساعته) ایستگاه های باران سنجی استان اصفهان روز های ۴ تا ۷ مردادماه ۱۴۰۱



روش شناسی

در این مطالعه، به منظور بررسی نقش الگوهای پیوند از دور (Teleconnection Patterns) بر وقوع سیل مرداد ۱۴۰۱ در شهرستان چادگان، از روش‌های متعددی شامل تحلیل داده‌های هواشناسی و اقلیمی، ارزیابی شاخص‌های teleconnection و مدل‌سازی آماری استفاده شده است. داده‌های بارش ماهانه و ساعتی از ایستگاه‌های هواشناسی چادگان و ایستگاه‌های

نزدیک به آن جمع‌آوری شده‌اند. همچنین، داده‌های شاخص‌های teleconnection شامل شاخص‌های NAO (North Atlantic Oscillation)، PNA (Pacific-North America)، ENSO (El Niño Southern Oscillation)، و TNA (Tropical North Atlantic)) از مراکز معتبر بین‌المللی (مانند NOAA و CPC) برای دوره زمانی بلندمدت چند ساله و به‌ویژه دوره اخیر مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

تعیین حوزه مطالعاتی و دوره مرجع

شهرستان چادگان در استان اصفهان به دلیل قرارگیری در بخش مرکزی-غربی فلات ایران و مجاورت با ارتفاعات زاگرس، منطقه‌ای مستعد بارش‌های موضعی شدید ناشی از نفوذ سیستم‌های رطوبتی غیرمعمول است. تحلیل حاضر بر رویداد سیل مرداد ۱۴۰۱(ژوئیه ۲۰۲۲) تمرکز دارد. برای اطمینان از اعتبار آماری ناهنجاری‌های مشاهده‌شده، دوره اقلیمی مرجع به منظور محاسبه میانگین‌های بلندمدت، بازه ۴۰ ساله ۱۹۸۱ تا ۲۰۲۰ در نظر گرفته می‌شود. مقایسه شرایط رویداد ۱۴۰۱ با این بازه زمانی طولانی، تضمین می‌کند که ناهنجاری‌های ثبت شده در خارج از واریانس طبیعی اقلیم تابستانه منطقه قرار دارند.

انتخاب و توجیه منابع داده‌های جوی و بارش

برای دستیابی به یک تحلیل جامع، تلفیق داده‌های جوی بازتحلیل با داده‌های سنجش از دور با وضوح بالا در دستور کار قرار دارد.

الف. داده‌های دینامیکی جوی

تمامی متغیرهای کلیدی دینامیکی و ترمودینامیکی در مقیاس سینوپتیک و جهانی، از جمله ارتفاع ژئوپتانسیل، مؤلفه‌های باد ،دمای لایه ای ، رطوبت ویژه و فشار سطح دریا از مجموعه استخراج میشوند. این مجموعه با وضوح مکانی ۲.۵*۲.۵ ، وضوح زمانی ۶ ساعته به عنوان استاندارد جهانی برای تحلیل‌های دینامیک جوی پذیرفته شده است. اگرچه مطالعاتی عملکرد در تخمین بارش در ایران را تأیید کرده‌اند ، اما به دلیل ماهیت موضعی سیل چادگان، از داده‌های مکمل زیر استفاده می‌شود.

ب: داده های بارش

برای تعیین دقیق شدت بارش منطقه‌ای و تعیین آستانه از داده های بارش با وضوح مکانی بسیار بالا استفاده میگردد.

تحلیل سازوکارهای دینامیکی و حمل رطوبت جوی

رویداد سیل مرداد ۱۴۰۱ به عنوان نتیجه یک تعامل غیرعادی بین نفوذ رطوبت گرمسیری (مانسون هند) و یک ناوه عرض میانی جنوبی‌شونده در نظر گرفته می‌شودبرای کمی‌سازی این سازوکار، دو تحلیل محوری شامل حمل رطوبت و دینامیک لایه‌های فوقانی جو ضروری است.

تشخیص حمل رطوبت یکپارچهIVT

برای کمی‌سازی مسیر و کمیت رطوبت ورودی که منجر به سیل شد، میدان برداری حمل رطوبت یکپارچه باید محاسبه شود این شاخص نشان‌دهنده شار خالص رطوبت در ستون جو است و معیار استاندارد برای شناسایی سامانه‌های انتقال رطوبت شدید مانند "رودخانه‌های جوی در مناطق خشک است. تحلیل الگوهای بردار در روزهای رویداد سیل، منبع رطوبت (که انتظار می‌رود عمدتاً از اقیانوس هند یا دریای عرب باشد) و مسیر غیرمعمول حرکت غرب‌سوی آن را مشخص می‌کند .از آنجایی که رودخانه‌های جوی نقش مهمی در انتقال رطوبت شدید به مناطق کوهستانی ایران ایفا می‌کنند

تحلیل دینامیک عرض‌های میانی و ناپایداری

برای وقوع بارش‌های شدید، علاوه بر رطوبت، مکانیزم‌های صعود ناپایداری جوی نیز حیاتی هستند. نفوذ ناوه عرض‌های میانی جنوبی‌شونده بر فراز ایران در رویداد ۱۴۰۱، عاملی کلیدی در ایجاد صعود بود. نقشه‌های ناهنجاری ارتفاع ژئوپتانسیل در ترازهای ۵۰۰ و ۲۰۰ هکتوپاسکال برای شناسایی ناوه فوقانی عرض میانی و بررسی الگوهای بلاکینگ مرتبط تحلیل می‌شوند.تحلیل ناهنجاری واگرایی شار رطوبت در ترازهای پایین (مانند ۸۵۰ هکتوپاسکال) انجام می‌شود. همگرایی رطوبت (مقادیر منفی شدید واگرایی شار رطوبت) در منطقه چادگان، مکانیزم نهایی تراکم و بارش را تأیید می‌کند.همچنین ناهنجاری‌های انرژی جنبشی گردابی در لایه‌های فوقانی (مانند ۲۰۰ هکتوپاسکال) محاسبه می‌شود. افزایش در این ترازها نشان‌دهنده تشدید ناپایداری‌های دینامیکی و مرتبط با دینامیک جت استریم فوقانی و ناوه است که در نهایت به توسعه یک سیستم کم‌فشار سطح زمین و تشدید بارش کمک کرده است .

تحلیل تأثیر الگوهای پیوند از دور

برای درک اینکه چگونه ناهنجاری‌های دمای سطح دریا و گردش‌های جوی-اقیانوسی در مقیاس‌های جهانی، رطوبت‌زایی غیرعادی را برای رویداد تابستانه ۱۴۰۱ فراهم کرده‌اند، تحلیل نقش الگوهای پیوند از دور ضروری است. با توجه به ماهیت گرمسیری رویداد ، تمرکز اصلی بر شاخص‌های اقیانوس هند است

تحلیل آماری و شناسایی الگوها

برای تعیین روندهای بارش و تغییرپذیری زمانی از آزمون‌های غیرپارامتری مانند آزمون مان-کندال و سن-کنته بهره‌گیری شد تا صحت و معناداری تغییرات بارش مشخص گردید.با استفاده از تحلیل همبستگی چندزمانه و مدل‌های رگرسیون چندگانه، روابط علت-معلولی بین شاخص‌های پیوند از دور و مقادیر بارش در روزهای سیل‌آسا با توجه به تأخیرهای احتمالی در انتقال تاثیرات بررسی شد. علاوه بر آن، با تحلیل سری‌های زمانی و روش‌های طیفی، الگوهای غالب تکرارشونده جریان جوی در دوران رخداد سیل استخراج گردید

سنجش از دور و مدل‌سازی هواشناسی

با بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای با وضوح مکانی و زمانی بالا، ساختار سیستم‌های بارشی و تجمع ابرهای همرفتی مرتبط با سیل مرداد ۱۴۰۱ شناسایی شد. این داده‌ها شامل تصاویر MODIS و داده‌های راداری برای تحلیل دقیق تجمع رطوبت به منطقه بودند مدل‌سازی عددی هواشناسی-اقلیمی با استفاده از مدل‌های دینامیکی WRF و RegCM برای بازسازی شرایط جوی در دوره وقوع سیل به‌کار گرفته شد. این مدل‌ها به بررسی نقش مراکز منطقه‌ای فشار جوی و تغییر در الگوهای باد غالب کمک کردند و امکان شبیه‌سازی فرآیندهای انتقال رطوبت و بارش را در مقیاس منطقه‌ای فراهم آوردند.

تحلیل الگوهای circulation patterns

با به‌کارگیری تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) و آنالیز مؤلفه‌های مستقل (ICA)، الگوهای غالب گردش هوا و موقعیت ناپایدار رودبادها (jet streams) در ترازهای میانی جو که بر شکل‌گیری سیلاب تاثیرگذار هستند، استخراج گشت. همچنین، بررسی موقعیت مکانی و شدت این مراکز منطقه‌ای کمک شایانی به درک بهتر چگونگی تقویت یا تضعیف سامانه‌های بارشی نمود.

جدول شماره (۳) خلاصه‌ای از ابزارهای اصلی روش‌شناسی و منابع داده مورد استفاده در این مطالعه را ارائه می‌دهد :

منبع داده	هدف کلیدی	تکنیک اصلی	بخش روش
ERA5, CHIRPS v3	تأمین متغیرهای جوی دینامیکی و داده‌های بارش با وضوح بالا	ERA5 & CHIRPS	داده‌ها و سینوپتیک
ERA5	تعیین مسیر، شدت و کمیت شار رطوبت ورودی تشخیص رودخانه‌های جوی	محاسبه IVT (Integrated Vapor Transport)	دینامیک جوی
ERA5	شناسایی ناپایداری‌های دینامیکی و تأثیر ناوه عرض میانی در طبقات فوقانی جو.	تحلیل ناهنجاری EKE و Geopotential	دینامیک جوی
NOAA/CPC/JMA	تعیین شاخص‌های پیوند از دور (IOD/WTIO) با بالاترین پتانسیل پیش‌بینی بارش‌های شدید منطقه.	همبستگی با تأخیر (Lagged Correlation)	الگوهای جهانی

ERA5	ترسیم و کمی‌سازی ناهنجاری‌های محیط جوی در روزهای سیل نسبت به اقلیم.	تحلیل ترکیبی (Composite Analysis)	اعتبارسنجی رویداد
N/A	تأیید معنی‌داری آماری ناهنجاری‌های جوی مشاهده شده	آزمون معنی‌داری ناپارامتریک (Mann-Whitney U)	اعتبارسنجی آماری
داده‌های شاخص و بارش	شناسایی دوره‌های تناوب مشترک و رابطه فاز بین شاخص‌های پیوند از دور و بارش	تحلیل همدوسی موجک (Wavelet Coherence)	تحلیل فرکانسی

نتایج پژوهش

نتایج این مطالعه درباره سیل مرداد ۱۴۰۱ شهرستان چادگان، نشان‌دهنده آن است که وقوع این رویداد پیچیده تحت تاثیر چندین عامل اقلیمی، جغرافیایی و انسانی بوده است..تحلیل داده‌های بارش نشان داد که شدت و تمرکز بارش‌ها در مرداد ۱۴۰۱ فراتر از میانگین‌های بلندمدت بوده است. این یافته همخوان با نتایج پژوهش‌هایی است که بارش‌های موسمی نامنظم را از ویژگی‌های اقلیمی ایران می‌دانند و اثر پیوندهای اقلیمی مانند ENSO و MJO را در افزایش شدت بارش‌ها تأیید کرده‌اند.اهمیت این یافته در این است که تغییرات اقلیمی و تغییر در فاز این الگوها می‌تواند منجر به افزایش فراوانی و شدت بارش‌های سیلابی در مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور شود. این موضوع هنگام برنامه‌ریزی برای مدیریت منابع آب و پیش‌بینی سیل باید به‌طور جدی در نظر گرفته شود. همچنین مطالعه تغییرات کاربری زمین در حوضه نشان داد که کاهش پوشش گیاهی و تبدیل اراضی به سطوح غیرمقاوم به نفوذ آب، مانند اراضی کشاورزی و مسکونی، پیامد مهمی در افزایش رواناب سطحی و شدت سیل داشته است. این نتایج با یافته‌های دیگر پژوهش‌ها که نشان‌دهنده تشدید سیل‌خیزی به دلیل تغییرات کاربری زمین و فرسایش خاک هستند، مطابقت دارد (علیجانی، ۱۴۰۲؛ Yari et al., 2019). مدیریت ناکارآمد اراضی و عدم رعایت فاصله‌گذاری مناسب از بستر رودخانه‌ها، منجر به افزوده‌شدن آسیب‌پذیری زیست‌محیطی و انسانی در برابر سیلاب شده استداده‌های سنجش از راه دور به عنوان ابزاری کلیدی در پایش و شناسایی پهنه‌های سیلابی کاربرد داشته‌اند. شاخص‌های NDWI و MNDWI و هم‌چنین تصاویر راداری Sentinel-1، تغییرات ناشی از سیلاب را با دقت بالا نمایش دادند و امکان برنامه‌ریزی دقیق‌تر منابع و اقدامات مدیریت بحران را فراهم کردند. این یافته‌ها تایید می‌کنند که سنجش از دور و فناوری GIS ابزارهای مؤثری برای مدیریت و پیشگیری سیلاب هستند که بایستی در سیستم‌های هشدار سریع کشور بیشتر مورد بهره‌برداری قرار گیرند

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر، با هدف بررسی علل وقوع سیل مرداد ۱۴۰۱ شهرستان چادگان و تاکید بر نقش پیوندهای اقلیمی از راه دور و داده‌های سنجش از راه دور صورت گرفت و نتایج آن پیامدهای مهمی در درک علمی و مدیریتی سیلاب‌ها در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران ارائه می‌دهد.تحلیل داده‌های اقلیمی و مدل‌سازی‌های هیدرولوژیکی نشان داد که وقوع این سیل شدید متاثر از بارش‌های متمرکز و فراگیر بوده که در اثر تقویت الگوهای پیوند از راه دور مانند ENSO و نوسان Madden-Julian شکل گرفته است. این عوامل اقلیمی به همراه تغییرات کاربری زمین و کاهش پوشش گیاهی سبب افزایش رواناب سطحی و تشدید اثرات سیلاب گردیدند. تصویربرداری ماهواره‌ای و شاخص‌های طیفی به طور موثر پهنه‌های آبگرفتگی را دقیقاً مشخص کردند و امکان پایش و تحلیل سریع را فراهم نمودند. یکی از یافته‌های برجسته این پژوهش، تاثیر مهم الگوهای پیوند از راه دور بر وقوع سیل مرداد ۱۴۰۱ شهرستان چادگان است. تحلیل داده‌های اقلیمی و بارشی نشان داد که شاخص‌های پیوند از راه دور مانند ENSO (نوسان جنوبی ال نینیو/لانینا)، نوسان Madden-Julian (MJO) و نوسان شمال اطلس (NAO) در دوره وقوع سیل در فازهای فعالی قرار داشتند که موجب تقویت سامانه‌های بارشی و افزایش میزان بارش‌های شدید و متمرکز شدند. این عوامل باعث بروز شرایط هواشناسی مناسب برای تجمع سریع آب و تشدید سیلاب در منطقه گردیدند. به‌عبارت دیگر، پیوندهای اقلیمی دوردست نقش کلیدی و تعیین‌کننده‌ای در هدایت جریان‌های جوی و بارش‌های شدید این اتفاق ایفا کردند که بدون شناسایی و تحلیل این الگوها، پیش‌بینی دقیق چنین رویدادهای شدیدی دشوار بود.بنابراین، نتایج این مطالعه اهمیت شناسایی و پایش مستمر پیوندهای اقلیمی از راه دور را در تهدید سیلاب‌های منطقه‌ای نشان می‌دهد و بر ضرورت ادغام این شاخص‌ها در سیستم‌های پیش‌بینی و مدیریت بحران آب تاکید می‌نماید.این گزاره علمی و دقیق می‌تواند جایگاه پیوند از راه دور را در تبیین علل اصلی سیلاب مرداد ۱۴۰۱ چادگان به خوبی بیان کند و ارتباط مستقیم آن را با داده‌های اقلیمی و بارشی مطالعه شده مشخص نماید.این نتایج بر اهمیت کاربرد فناوری‌های نوین سنجش از دور و GIS در مدیریت سیلاب تاکید می‌کند و نشان می‌دهد که ادغام این فناوری‌ها با شاخص‌های اقلیمی و مدل‌های پیشرفته هیدرولوژیکی می‌تواند کیفیت پیش‌بینی‌ها را به طور چشمگیری افزایش دهد. بهره‌گیری از این روش‌ها امکان ارائه هشدارهای زودهنگام دقیق‌تر را فراهم می‌آورد که در کاهش خسارات جانی و مالی ناگزیر هستند.از سوی دیگر، نقش برجسته عوامل انسانی مانند مدیریت ناکارآمد کاربری زمین و پوشش گیاهی نشان می‌دهد که کاهش آسیب‌پذیری در برابر سیل نیازمند هم‌افزایی راهکارهای مهندسی، اقلیمی و مدیریتی است. حفاظت از عرصه‌های طبیعی، احیای پوشش گیاهی و مدیریت پایدار منابع آب از ارکان اساسی کاهش ریسک سیل محسوب می‌شوند.در نهایت، مطالعه حاضر راهنمایی علمی و عملی برای مدیران بحران، پژوهشگران و سیاست‌گذاران فراهم می‌کند

تا با استفاده از الگوهای پیوند از راه دور، فناوری سنجش از دور و مدل‌سازی هیدرولوژیکی، برنامه‌ریزی جامع و هوشمندانه‌ای برای پیشگیری و کاهش اثرات سیلاب‌ها در شهرستان چادگان و مناطق مشابه شکل دهند.به این ترتیب، پیشرفت در فناوری‌های پیش‌بینی اقلیمی و هیدرولوژیکی و توجه به مکانیسم‌های اقلیمی دوردست، همراه با مدیریت صحیح کاربری زمین، مسیر مطمئنی جهت مقابله با سیلاب‌های احتمالی در آینده است. سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های پایش و آموزش، همچنین به‌کارگیری فناوری‌های نوین، کلید کاهش خسارات ناشی از سیلاب‌ها خواهد بود. نتایج این تحقیق بر لزوم تدوین برنامه‌های مدیریت جامع آبخیزداری، آبخوان‌داری، اصلاح کاربری زمین، و بهره‌گیری گسترده از فناوری سنجش از دور تاکید دارد. همچنین ضرورت توسعه شبکه‌های داده‌برداری و سامانه‌های هشدار سریع سیل به منظور کاهش خسارات جانی و مالی به صراحت نمایان است. آگاه‌سازی عمومی و آموزش جوامع محلی نسبت به خطرات سیلاب و رعایت مقررات محیط زیستی، از دیگر محورهای مهم پیشنهاد شده است .در نهایت، این پژوهش نشان داد که موفقیت در مدیریت سیلاب‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک همچون چادگان منوط به درک علمی دقیق عوامل اقلیمی، استفاده بهینه از فناوری‌های نوین و سیاست‌گذاری‌های مدیریتی آگاهانه خواهد بود.

منابع

اداره کل هواشناسی استان اصفهان (۱۴۰۴). اطلاعات بارندگی شدید و سیل مرداد ۱۴۰۱.

مظاهری، مهدی، عبدالمنافی، نرجس، اسدی، مراد و همکاران. (۱۴۰۱). بررسی و تحلیل وقایع سیل مردادماه سال ۱۴۰۱ شهرستان چادگان: بخش‌های زیربنایی [گزارش علمی].

عبدالله‌زاده، احمد و همکاران. (۱۴۰۲). مطالعه نواحی روستایی در معرض سیل استان گلستان و چالش‌های کاهش خطر سیلاب. مجله مدیریت بحران و مخاطرات طبیعی.

سلیقه، محمد (۱۳۹۶). آب و هواشناسی سینوپتیک ایران. تهران: انتشارات سمت.

علیجانی، بهلول (۱۳۸۵). اقلیم شناسی سینوپتیک. تهران: انتشارات سمت.

مرادی، حمیدرضا (۱۳۸۳). پیش‌بینی سیلاب‌ها بر اساس موقعیت‌های سامانه‌های همدید در شمال شرق ایران. فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، ۷۵، ۳۳-۴۱.

حلبیان، حسین، حسینعلی پورجزی، فرشته، و صابری، بیژن (۱۳۹۰). تحلیل همدید سامانه‌های سیل‌زا در قم سیلاب فروردین ۱۳۸۸.

مفیدی، عباس (۱۳۸۳). اقلیم‌شناسی سینوپتیکی بارش‌های سیل‌زا با منشا دریای سرخ در خاورمیانه. فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، ۷۵، ۷۱-۹۳.

علیزاده، امین (۱۳۷۹). هوا و اقلیم‌شناسی. مشهد: دانشگاه فردوسی مشهد.

لشگری، حسن (۱۳۷۵). الگوهای سینوپتیکی بارش شدید در جنوب غرب ایران. رساله دکتری جغرافیای طبیعی، دانشگاه تربیت مدرس.

سلیقه، محمد (۱۳۹۱). مکانیزم طوفان‌های گرد و غباری گوریچ. قطب علمی مخاطرات محیطی، دانشگاه خوارزمی، تهران.

ابریفام، محمدرضا (۱۳۸۰). تحلیل سینوپتیک توده‌های هوای ورودی به غرب ایران در سال‌های ۱۹۸۳-۱۹۸۴. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه رازی.

پارنال برنت (۱۳۸۵). آب و هواشناسی همدید و کاربردهای آن در مطالعات محیطی. ترجمه سید ابوالفضل مسعودیان. اصفهان: انتشارات دانشگاه اصفهان.

همایش ملی و بین‌المللی علوم و مهندسی آبخیزداری در ایران (۱۴۰۰-۱۴۰۲). مجموعه مقالات سال‌های ۱۴۰۰-۱۴۰۲، شامل مقالات تخصصی مرتبط با سیلاب و مدیریت آبخیزداری در ایران.

پژوهش‌های دانشگاه‌های معتبر ایران در زمینه سنجش از راه دور و مدیریت سیلاب از جمله دانشگاه تهران، دانشگاه گنبد کاووس، و دانشگاه صنعتی اصفهان.

Krichak, S., et al .(۲۰۰۰) .November 2 1994 severe storms in the southeastern Mediterranean. Atmospheric Research, 53, 45-62.

Rohli ,R. V., et al. (2001). Synoptic circulation and stream discharge in the Great Lake.

Ziv ,B., et al. (2005). A mild winter tropical extreme flood producing storm in southern Israel: Synoptic analysis.

Fritz ,H. M., Blount, D., Albusaidi, C. B., Hamoud, F. A & ,Al-Harthy, M .(۲۰۰۹) .Cyclone Gonu storm surge in Oman. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1-5.

Hordon ,R. M. (1987). Siberian High. In J. E. Oliver & R. W. Faibridge (Eds.) ,Encyclopedia of Climatology. London: Van Rainhold.

Hoskins ,B. (1996). On the existence and strength of the summer subtropical anticyclones. Bulletin of the American Meteorological Society, 77.۱۲۹۲-۱۲۸۷ ,(۶)

Kapala ,A., Machel, H & ,.Flohn, H. (1998). Behavior of the centres of action above the Atlantic since 1881 Part II: Associations with regional climate anomalies .International Journal of Climatology, 18, 23-36.

Schumann ,G. J-P., et al. (2024). Breakthroughs in satellite remote sensing of floods .Remote Sensing Journal.

Amatebelle ,C. E., et al. (2025). A systematic analysis of remote sensing and geographic information systems in flood risk management. Natural Hazards.

Bennett ,K. E., et al. (2018). Linkage of ENSO phases with extreme rainfall and flooding in semi-arid regions. Journal of Climate.

Tang ,Q., et al. (2021). Advances in hydrological modeling for flood simulation in complex terrains. Water Resources Research.

Sasha ,R., et al. (2020). GIS-based flood susceptibility mapping and risk assessment .Environmental Modelling & Software.

Hedayati Dezfuli, A. (2024). Atmospheric drivers of extreme floods in arid regions .Journal of Geophysical Research.

Sivanpillai ,R., et al. (2021). Use of remote sensing and GIS tools for rapid flood damage assessment. International Journal of Remote Sensing.

www.cdc.noaa.gov

Amatebelle ,C. E., et al. (2025). A systematic analysis of remote sensing and geographic information systems in flood risk management .Natural Hazards.

Rezaei ,P., Eslamiyan, S & ,.Abbasi, A. (2019). Relationship of drought and teleconnection patterns in western Iran .Journal of Hydrology.

Schumann ,G. J.-P. (2024). Breakthroughs in satellite remote sensing of floods .Remote Sensing.

Ghassabi ,Z., et al. (2023). Investigating the unprecedented 2022 monsoon penetration and flood events in Iran .Journal of Geophysical Research.

Bayat-Afshary ,N. (2023). Are the magnitude and frequency of floods increasing in Iran ?Hydrological Processes.

Bagheri-Gavkosh ,M. (2023). Flood seasonality analysis in Iran with implications for hydrological hazards . Journal of Hydrology.

Alborzi ,A., et al. (2022). The role of anthropogenic activities in flood impacts in Iran .Environmental Science & Policy.

Shastry ,A., et al. (2023). Mapping floods from remote sensing data and quantifying impact .Remote Sensing of Environment.

Preisser ,M., et al. (2025). Remote sensing improves multi-hazard flood detection in arid regions .Advances in Remote Sensing.

Hadian ,S., et al. (2022). Flood susceptibility evaluation using ensemble models in Golestan Province, Iran . Natural Hazards.

Bagheri ,A., et al. (2024). Climate change and urban flooding: assessing remote sensing applications . Environmental Research.

Askari ,E., et al. (2025). Factors influencing adoption of protective measures against floods in rural Iran . Journal of Environmental Management.

تحلیل زمانی و مکانی مناطق آسیب پذیر محصولات کشاورزی در اثر بارش تگرگ در استان آذربایجان شرقی

یونس اکبرزاده[۱]، ناصر منصوری درخشان[۲]

۱- دکتری مخاطرات آب و هوایی، اداره کل هواشناسی آذربایجان شرقی

Y.akbarzadeh@gmail.com

۲-دکتری آب و هواشناسی سینوپتیک، اداره کل هواشناسی آذربایجان شرقی

چکیده

پدیده تگرگ یکی از مهم‌ترین مخاطرات جوی است که هر ساله با صدمات به محصولات کشاورزی باعث ناپایداری فعالیت-های کشت و کار می شود. در تحقیق حاضر جهت بررسی تعداد روزهای همراه با تگرگ خسارت زا در دوره آماری ۱۴۰۲-۱۳۹۳ در سطح استان آذربایجان شرقی از آمار تگرگ ایستگاههای هواشناسی و داده های خسارت تگرگ بر محصولات زراعی و باغی صندوق بیمه محصولات کشاورزی استان استفاده گردید و جهت شناسایی مناطق آسیب پذیر در اثر این پدیده از تحلیل آمار فضایی لکه داغ از آماره گتیس- ارد جی ای بهره گرفته شد. نتایج نشان داد که بیشترین فراوانی بارش تگرگ خسارت زا در ماه اردیبهشت و کمترین فراوانی بارش در مرداد ماه اتفاق افتاده است. همچنین حدود ۷۱ درصد از بارش های تگرگ خسارت زا در منطقه مورد مطالعه در فصول گرم سال که منطبق با فصل رشد گیاهی در این منطقه می باشد، رخ داده است. در بررسی لکه های داغ براساس شاخص Gi* مشخص گردید که در بخش زراعت آسیب پذیرترین منطقه در سطح منطقه مورد مطالعه بخش هایی از جنوب استان و در بخش باغی آسیب پذیرترین منطقه در شمال غرب استان متمرکز شده است. همچنین بررسی مجموع خسارات بخش زراعت و باغی استان نشان داد که مناطق آسیب پذیر در بخش هایی از جنوب استان متمرکز شده است.

کلید واژه ها: تگرگ، آسیب‌پذیر، لکه داغ، محصولات کشاورزی، آذربایجان شرقی

مقدمه

با توجه به اهمیت مدیریت ریسک‌های کشاورزی در مناطق خاکی و اقلیمی متنوع استان آذربایجان شرقی، بررسی فضایی و زمانی مناطق آسیب‌پذیر در اثر بارش تگرگ بر محصولات کشاورزی به‌عنوان گام مهمی در کاهش زیان‌های اقتصادی و حفظ امنیت غذایی از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. بارش تگرگ که اغلب به‌صورت ناگهانی و با شدت‌های متغیر اتفاق می‌افتد، می‌تواند خسارت‌های گسترده‌ای به محصولات کشاورزی، صنایع تبدیلی و زیرساخت‌های روستاهای مرتبط وارد کند. این پدیده، به دلیل ماهیت غیرخطی و وابستگی‌های گسترده به عوامل اقلیمی، توپوگرافی، کاربری اراضی و مدیریت مزرعه‌ای، نیازمند تحلیل‌های فضایی-زمانی دقیق و گام‌به‌گام است تا بتوان نقاط حساس را به‌طور بهینه شناسایی و برای

حفاظت و مدیریت پایدار منابع کشاورزی اقدام کرد. در این زمینه، مطالعه حاضر با تمرکز بر استان آذربایجان شرقی و با بهره‌گیری از داده‌های فضایی و زمانی مربوط به بارش تگرگ، الگوهای مکانی- زمانی آسیب‌پذیری را مبتنی بر شاخص‌های آسیب محصول، دوره زمانی وقوع تگرگ و شدت بارش استخراج می‌کند. از منظر روش‌شناسی، استفاده از سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی(GIS)، نقشه‌های همسایگی، مدل‌سازی ریسک و تحلیل‌های زمانی- مکانی اجازه می‌دهد تا مناطق پرخطر با وضوح بیشتری نشان داده شوند و به مدیران کشاورزی، تصمیم‌گیران محلی و سازمان‌های حمایت از محصولات کشاورزی ابزارهای کارآمد برای تخصیص منابع، بهبود کشت‌ها، و اجرای طرح‌های حفاظت از باغات و مزارع ارائه شود.

هدف‌های کلیدی این مقاله عبارت‌اند از:

- بیان اهمیت مطالعات فضایی-زمانی در مدیریت آسیب‌های بارش تگرگ بر کشاورزی آذربایجان شرقی.
- تشریح چارچوب مفهومی و روابط بین متغیرهای اقلیمی، ژئومورفولوژی، کاربری اراضی و تولید محصول در بستر تگرگ‌خیزی.
- معرفی رویکرد پیشنهادی برای تعیین پهنه‌های آسیب‌پذیر و فازی‌سازی شدت خطر با توجه به حساسیت‌های محلی مزرعه‌ای.
- تأکید بر نقش داده‌های باکیفیت و به‌روز، همراه با الزامات سیاستی و مدیریتی برای تقویت تاب‌آوری کشاورزان در مواجهه با این پدیده.

این مطالعه با هدفِ ارائه نقشه‌های کاربرپسند از آسیب‌پذیری فضایی-زمانی، همراه با تحلیل‌های کمّی و تفسیرهای مدیریتی، می‌تواند به بهبود طراحی پوشش‌های حفاظتی، به‌کارگیری فناوری‌های کاهش خسارت، و افزایش پایداری تولیدات کشاورزی در استان آذربایجان شرقی کمک کند. در ادامه، چارچوب روش‌شناختی، منابع داده، و نتایج مورد انتظار به تفصیل توضیح خواهد شد.

طیف وسیعی از مخاطرات طبیعی که محیط زیست را مورد تهاجم خود قرار داده، به مخاطرات ناشی از پدیده‌های افراطی جوی اختصاص دارد. توفان‌های تندری از مهم‌ترین مخاطرات جوی هستند که هر ساله، علاوه بر نابود کردن مقدار زیادی از محصولات کشاورزی و تأسیسات عمرانی، موجب تلفات انسانی بسیاری در نقاط مختلف دنیا می شوند (خوشحال دستجردی و قویدل رحیمی، ۱۳۸۶). تگرگ فاجعه ای طبیعی برای همه مردم به ویژه کشاورزان محسوب می‌گردد(وایرنگا و لوماس، ۲۰۰۱). خسارت تگرگ به فراوانی و شدت بارش بستگی دارد(چانگنون، ۲۰۰۹). معمولاً در صنعت بیمه برای محاسبه ریسک خسارت تگرگ در هر ناحیه از فراوانی بارش(برحسب روز) و میانگین خسارت وارده که از نظر آماری معنی

دار است، استفاده می‌کنند. تگرگ یکی از پدیده‌های مرتبط با توفان‌های تندری است که در اتمسفر ناپایدار با رطوبت فراوان و در حضور بادهای قوی و همراه با مکانیزم‌هایی که باعث افزایش ناپایداری می‌شوند رخ می‌دهد که این شرایط به وسیله‌ی توپوگرافی محلی و اقلیم‌شناسی توده‌های هوا تحت تأثیر قرار می‌گیرند (علیزاده، ۱۳۸۶).

زیان‌های ناشی از تگرگ گاهی اوقات از زیان‌های ناشی از گردبادها و توفان‌ها نیز بیشتر بوده و اکثر این زیان‌ها در بخش کشاورزی، در اثر صدمه دیدن محصولات کشاورزی هنگام بارش تگرگ است. در اوایل بهار هنگام باز شدن شکوفه‌ها و تشکیل میوه‌های کوچک، این خسارات شدید و غیر قابل جبران است. صدمه مستقیم، مهم‌ترین خسارت تگرگ است و به اندازه تگرگ بستگی دارد(ضیائی اصل، ۱۳۸۸).

علت اصلی ایجاد تگرگ صعود سریع هوای نمناک به لایه‌های بالاتر و سردتر جو و انجماد ذرات بخار آب است. قطر تگرگ‌ها در حدود ۵ تا ۵۰ میلی متر است و بیش‌تر از ابرهای کومولونیمبوس(غالباً همراه با رعد و برق) می بارد (علیزاده، ۱۳۸۶). اغلب مشکل است که گفته شود، چه در صدی از کل خسارات به دلیل باد و چه در صدی مربوط به تگرگ می باشد، ولی معلوم شده که تگرگ خسارت اصلی را وارد می‌سازد و باد باعث افزایش نیروی ضربه تگرگ شده و در نتیجه خسارت را بیش‌تر می کند(اکبرزاده، ۱۳۸۷). خسارت تگرگ به فراوانی و شدت حالت توفانی بارش بستگی دارد (چانگنون ،۱۹۹۹). طی یک بررسی میزان خسارات وارده ناشی از پدیده‌ی تگرگ در ۱۳ و ۱۴ آوریل ۲۰۰۶ آمریکا ۱/۸۲۲ میلیارد دلار برآورد شده است (چانگنون، ۲۰۰۹). در ۳۰ آوریل ۱۸۸۸ در هندوستان بر اثر توفان تگرگ ۲۳۰ نفر در مراد آباد(یکصد مایلی دهلی)، ۱۶ نفر در غازی آباد و روز بعد از آن ۱۲ نفر دیگر نزدیکی غازی آباد، به وسیله تگرگ‌هایی به اندازهٔ توپ کریکت کشته شدند (گزارش پژوهشکده هواشناسی، ۱۳۸۵). هم چنین از خسارات ناشی از بارش تگرگ در کشور ایران، می‌توان به بارش تگرگی که در تاریخ ۳۱ فروردین ماه سال ۱۳۸۲ در استان اصفهان به مدت۲۰ الی ۲۵ دقیقه اتفاق افتاده اشاره نمود. در سال ۱۳۸۵ در شهرستان میانه در استان آذربایجان شرقی این نوع بارش حدود ۳۰ میلیارد ریال در بخش کشاورزی شهرستان خسارات وارد نمود (جوانمرد و همکاران، ۱۳۸۶).

در ایران یکی از نقاط مستعد بارش تگرگ، استان آذربایجان‌شرقی می باشد. استان آذربایجان‌شرقی به دلیل موقعیت توپوگرافیکی و جغرافیایی از توانمندی‌های قابل ملاحظه‌ای از نظر منابع و مزیت نسبی در تولید محصولات کشاورزی برخوردار است. وجود بیش از ۲/۱ میلیون هکتار اراضی مستعد کشاورزی، ۶/۴ میلیارد مترمکعب آب قابل استحصال، اقلیم متنوع آب‌وهوایی همه این عوامل دست به دست هم داده‌اند تا استان آذربایجان‌شرقی با مصرف حدود ۳ درصد آب مصرفی کشور بیش از ۳/۵ درصد تولیدات کشاورزی کشور را تولید کند. ۶۶ درصد اراضی کشاورزی استان به صورت دیم و ۳۴ درصد به صورت آبی مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. از کل ۱۳۲۰ هزار هکتار اراضی کشاورزی استان (زیر کشت و

آیش)، ۱۲۴۳۵۸۶ هکتار معادل۹۴درصد به اراضی زراعی و ۷۶۱۲۷ هکتار یعنی حدود ۶ درصد به اراضی باغی اختصاص داشته است. به این ترتیب استان آذربایجان‌شرقی به ترتیب ۷/۶۸ درصد اراضی زراعی کشور و ۵/۱۹ درصد اراضی باغی کشور را به خود اختصاص داده است که از لحاظ وسعت اراضی زراعی در کشور در مقام دوم و از لحاظ وسعت اراضی باغی در رتبه چهارم کشور قرار دارد. بررسی ارزش افزوده بخش کشاورزی استان نشان می‌دهد که ارزش افزوده بخش کشاورزی استان حدود ۱۱/۳۵ درصد ارزش افزوده بخش‌های مختلف اقتصادی استان بوده و بعد از بخش‌های خدمات و صنعت و معدن در رتبه سوم قرار داشته است. با این حال ارزش افزوده بخش کشاورزی استان ۴/۵۹ درصد ارزش افزوده بخش کشاورزی کشور بوده است(مطالعات برنامه آمایش استان آذربایجان شرقی،۱۳۹۶).

برای به‌دست آوردن یک دید کلی از توزیع فضایی و زمانی خسارت ناشی از بارش تگرگ بر محصولات کشاورزی در استان آذربایجان شرقی و بررسی تفاوت بارش آن در بخش‌های مختلف منطقه، بهتر دیده شد، که با دستیابی به پهنه بندی مناطق آسیب پذیر از نظر خسارت تگرگ، علت تفاوت احتمالی مناطق مختلف و شرایطی که تحت آن این بارش به وقوع پیوسته، شناسایی و معرفی گردد. بدین ترتیب با توجه و تأکید بر استراتژی برنامه مدیریت ریسک مخاطرات طبیعی که به عنوان یک پتانسیل و نقش بسیار جدی در تشدید و افزایش خسارات ناشی از بلایای طبیعی مناطق مطرح می‌باشند، می‌توان اقدام به پیش بینی و مقابله با بارش تگرگ نمود و منجر به کنترل صدمات ناشی از این پدیده گشت.

در زمینه بارش تگرگ تاکنون پژوهشهای زیادی با رویکردهای متفاوت در دنیا انجام شده است. فریزبای (۱۹۶۲)، به بررسی الگوهای آسیب ناشی از تگرگ در دشت‌های بزرگ ایالات متحده آمریکا طی دوره ۱۰ ساله (۱۹۶۰-۱۹۵۱) به وسیله نقشه‌های سینوپتیکی پرداخته است. نتیجه این تحقیق نشان داده است که سرعت حرکت سیستم‌های سینوپتیک تأثیر قابل توجهی بر میزان و درجه خسارات ناشی از تگرگ در زمین دارد. هم‌چنین فریزبای (۱۹۶۳)، در تحقیق دیگری نیز توفان‌های تگرگ دشت‌های عظیم ایالات متحده آمریکا را با استفاده از ثبت اطلاعات بیمه تگرگ بررسی کرده و مسیر تخریب تگرگ را به وسیله ادعاهای بیمه تگرگ ترسیم نموده است. چانگنون (۱۹۶۷)، تغییرات ناحیه‌ای- زمانی شدت تگرگ در الینویز را بررسی کرده و به این نتیجه رسیده که فراوانی تگرگ شدید در فصل برداشت محصول (ماه اکتبر) با گذشت زمان افزایش می‌یابد و در ماه سپتامبر به حداکثر شدت خود می‌رسد و با استفاده از مشاهدات یک شبکه متوسط مقیاس در مرکز ناحیه مورد مطالعه، نشان داده که میزان صدمات رسیده به محصولات با اندازه و تعداد تگرگ و مدت زمان توفان‌های تگرگ رابطه نسبتاً خوبی داشته، ولی با بادهای سطحی قوی، ارتباط نزدیک‌تری دارد. چانگنون (۱۹۸۴)، به منظور برآورد میزان خسارات تگرگ با استفاده از داده‌های روزانه تگرگ طی دوره آماری ۲۰ ساله (۱۹۸۰-۱۹۶۱)، تغییرات زمانی و مکانی این پدیده را در دشت‌های عظیم شرق کوه‌های راکی آمریکا و کانادا و منطقه میدوست غرب بررسی نموده

است. نتایج نشان داده که مناطق با احتمال بالای وقوع تگرگ، مرتبط با مناطق وقوع مکرر جبهه‌ها و یا ویژگی‌های عمده توپوگرافی بوده است. هم چنین فراوانی تگرگ به‌صورت سالانه و در ماه جولای (به صورت پراکنده اما پیوسته) از سال ۱۹۰۱ تا ۱۹۸۰ در داکاتا ، نبراسکا و مینه سوتا افزایش یافته است و در سال‌های اخیر (۱۹۸۰-۱۹۶۱) به اوج خود رسیده که منجر به خسارت زیاد به محصولات شده است. چانگنون(۲۰۰۰)، نوسانات و روند زمانی بروز تگرگ را طی یک دوره طولانی مدت ۱۰۰ ساله (۱۹۹۵-۱۹۸۶) در ایالات متحده مورد بررسی قرار داده‌اند. فرال و همکاران(۲۰۰۲)، در بررسی خود در تشخیص تگرگ با استفاده از تفاوت باندهای c و s راداری، بیان می‌کند که نسبت بازتاب دو طول موج برای تمام مشاهدات راداری شبیه‌سازی شده، تشخیص تگرگ را قادر می‌سازند. جیوتی و همکاران(۲۰۰۳)، اقلیم شناسی تگرگ در دشت فریلی ونزیا جیولیا را مطالعه و بیان می‌کنند حتی اگر تگرگ که یک پدیده محلی است، آب و هواشناسی تگرگ میتواند فقط به وسیله محسوب داشتن سازوکارهای متوسط مقیاس توسط فعلوانفعالات بین آشفتگیهای همدیدی و اوروگرافیکی پیچیده در این دشت تفسیر شده باشد. لوسیا و همکاران(۲۰۱۵)، بارش های روزانهٔ تگرگ را طی دورهٔ ۱۹۰۱ تا ۲۰۱۰ در جنوب غربی فرانسه مطالعه کردند و نتیجه گرفتند روند افزایش قابل توجهی در تعداد و شدت بارش تگرگ وجود دارد. هان و همکاران(۲۰۱۶)، کلیماتولوژی تگرگ را در کرهٔ جنوبی طی دورهٔ ۱۹۷۲ تا ۲۰۱۳ بررسی کردند. نتایج نشان داد که رخدادهای تگرگ روند کاهشی در هر سال دارد و اوج بارش تگرگ در ماه های آوریل و نوامبر است و حداقل رخداد آن در اگوست رخ می دهد.

در ایران رویکرد مطالعه تگرگ به نسبت مطالعات خارج از کشور، دارای تنوع کمتری است. جهانگیری و همکاران (۱۳۸۴)، وضعیت بارش تگرگ از نظر زمانی و مکانی و خسارت‌های ناشی از آن در ایران را مورد بررسی قرار داده و نواحی شمال‌غربی و شمال‌شرقی کشور را به عنوان بیش‌ترین فراوانی ریزش تگرگ در کشور شناسایی و راه‌کارهایی برای مقابله با این پدیده و کاهش اثرات زیانبار آن معرفی نموده‌اند. میرموسوی و اکبرزاده (۱۳۸۸)، بر اساس شاخص‌های ناپایداری در تشکیل تگرگ در ایستگاه هواشناسی تبریز نظیر شاخص‌های LCL و CCL و K نشان داده‌اند که در ایستگاه مورد مطالعه هر اندازه سطح یخبندان کم‌تر از ۳۰۰ متر باشد، احتمال وقوع تگرگ کم‌تر و هر چقدر فاصله سطح یخبندان تا قله ابر زیاد باشد، احتمال وقوع تگرگ بیش‌تر خواهد شد. لشکری و امینی (۱۳۹۳)، تحلیل همدید و پهنه بندی بارش تگرگ در خراسان بزرگ برای دوره آماری ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۵ را بررسی نموده و نتایج آنها نشان داد که در حداکثر بودن فراوانی وقوع تگرگ در نواحی تحت بررسی، علاوه بر ارتفاع زیاد آنها از سطح دریا، محل ورود سیستم های همراه با بارش تگرگ نیز نقش مؤثری داشته است. میرموسوی و همکاران (۱۳۹۰) با تأکید بر جنبه های آماری، فراوانی بارش تگرگ را برای استان کرمانشاه بررسی نمودند. فرج پور و مصطفی پور (۱۳۹۱)، با بررسی زمانی و مکانی بارش تگرگ در ایران؛ به بارش تگرگ ، رخداد

توفان تگرگ و توفان تندری در ایران پرداخته است. نتایج این تحقیق نشان می دهد که کانون های اصلی رخداد این ۳ پدیده در ایران بیشتر در نواحی غرب و شمال غرب می باشند. بیشترین فراوانی رخداد تگرگ در کشور در ماههای مارس و آوریل؛ رخداد توفان تگرگ در ماههای آوریل و می و رخداد توفان تندری در ماه می می باشد. شاکری و همکاران (۱۳۹۳) در شهرستان مشهد شاخصهای ناپایداری را برای این پدیده استفاده کردند و شکل گیری تگرگ را ناشی از ریزش هوای سرد از ترازهای بالا و نفوذ هوای گرم از سطح زمین بیان کرده اند. درگاهیان و همکاران(۱۳۹۳)، تحلیل آماری، ترمودینامیکی و همدیدی پدیده تگرگ را در استان لرستان بررسی نمودند. این مطالعه تأثیر برخی شاخصهای ترمودینامیکی را در ایجاد این پدیده بیان کرده و در رویکرد همدیدی، تگرگ را به دو رخداد گرم و سرد تفکیک کرده و ویژگی های همدید هریک از این دو دوره را بیان نموده اند. لشکری و همکاران(۱۳۹۴) بارش فراگیر تگرگ را در غرب کشور در استانهای کرمانشاه و کردستان و همدان و لرستان را با رویکرد همدیدی بررسی کرده و به این نتیجه رسیده اند که از لحاظ دوره شبانه روزی ساعات ۹ تا ۱۲ و ماههای آوریل و می و ایستگاههای مریوان و بانه و بیجار بیشترین فراوانی را داشته و از لحاظ الگوهای همدیدی، سامانه کم فشار دریای سرخ و سودان باعث بارش تگرگ گردیده‌اند. بازگیر و همکاران (۱۳۹۷) به بررسی همدید مخاطره تگرگ در شهرستان بجنورد پرداخته است. نتایج این تحقیق نشان داده که تشکیل سامانه‌های کم فشار و پرفشار در شمال و جنوب منطقه و تقویت جریان‌های نصف النهاری روی منطقه که سبب فرارفت رطوبت دریاهای عمان و خزر در ترازهای ۸۵۰ و ۷۰۰ هکتوپاسگال می شود در بیشتر الگوها سبب تقویت حرکات صعودی و تشکیل پدیده تگرگ شده است. سلیمی سبحان و همکاران (۱۴۰۲) به تحلیل همدیدی و شناسایی شار رطوبت روزهای همراه با تگرگ در غرب ایران پرداخته است. در این تحقیق با تحلیل خوشه ای بر روی داده های فشار تراز دریا و ارتفاع ژئوپتانسیل سه الگوی گردشی ضعیف، متوسط، و شدید در ارتباط با بارش تگرگ شناسایی شد. با توجه به اینکه پژوهش-هایی که در داخل کشور انجام گرفته، برخی از آنها در زمینه چگونگی تشکیل، توزیع مکانی و تحلیل همدیدی بارش تگرگ بوده است و پژوهش‌های کمتری در خصوص خسارات ناشی از تگرگ بر بخش کشاورزی صورت گرفته است، لذا بررسی توزیع فضایی و زمانی خسارات ناشی از بارش تگرگ در بخش کشاورزی به منظور شناسایی مناطق آسیب پذیر و مستعد رخداد آن در استان جهت برنامه ریزی‌های لازم در کاهش خسارات ناشی از این پدیده ضرورت می‌یابد.

منطقه مورد مطالعه

آذربایجان شرقی در شمال‌غرب ایران بین ۳۶ درجه و۴۷ دقیقه تا ۳۹ درجه و ۴۰دقیقه عرض شمالی و ۴۵درجه و۳ دقیقه تا ۴۸ درجه و۵۰دقیقه طول شرقی واقع شده است. آذربایجان شرقی با وسعت۴۵۲۶۱/۴ کیلومترمربع درگوشه شمال

غربی فلات ایران قرار دارد. موقعیت جغرافیایی و ایستگاههای مورد بررسی استان آذربایجان شرقی در شکل ۱ و نقشه پوشش گیاهی و کاربری اراضی منطقه مورد مطالعه در شکل ۲ نشان داده شده است.

مواد و روش ها

در این تحقیق برای بررسی و تحلیل خسارات بخش کشاورزی ناشی از بارش تگرگ از آمار خسارات صندوق بیمه محصولات کشاورزی برای دوره آماری(۱۴۰۲-۱۳۹۳) استفاده گردید که به‌دلیل کاغذی بودن بیشتر آمار و اطلاعات خسارات موجود در استان آذربایجان شرقی پس از وارد کردن این آمار در محیط اکسل مورد استفاده قرار گرفت و سپس برای بررسی زمان وقوع این پدیده از داده‌های ۱۳ ایستگاه متناظر موجود استفاده گردید.

جهت مقایسه زمان وقوع تگرگ‌های خسارت‌زا، داده‌های مربوط به این پدیده در یک دوره آماری ۱۰ ساله از سال ۱۳۹۳ تا ۱۴۰۲استخراج شد، که در گروه هوای حاضر کدهای شماره (۱۳ ، ۸۷-۹۰ ، ۹۳ ، ۹۴، ۹۶ ، ۹۹) مربوط به توفان تگرگ انتخاب شدند که در برگیرنده انواع مختلف بارش تگرگ با شدت‌های متفاوت هستند. اما با توجه به اینکه در بیشتر مواقع تگرگ در مساحت بسیار کم و در معدود ایستگاه‌های سینوپتیکی رخ می‌دهد، رخداد این پدیده قابل رویت و ثبت شدن نیست، به همین دلیل، تعداد تگرگ‌های رخداده که در ایستگاه‌های سینوپتیک هر منطقه ای ثبت می‌شود، تنها تعداد معدودی از این رخداد را شامل می‌شود. بنابراین برای ارزیابی خسارات ناشی از بارش تگرگ در منطقه مورد مطالعه از آمار خسارات صندوق بیمه محصولات کشاورزی و روزهایی که بارش تگرگ باعث خسارت شده‌اند، استخراج و مورد بررسی قرار گرفتند. سپس جهت شناسایی مناطق آسیب‌پذیر در برابر بارش تگرگ از آمار فضایی و شاخص لکه داغ و نرم افزار ARC GIS استفاده گردید که روند کلی تحلیل و بررسی پژوهش حاضر در شکل ۳ بصورت فلوچارت نشان داده شده است.

تحلیل لکه داغ از آماره گتیس - ارد جی ای (Getis – OrdGi) با استفاده از تحلیل همسایگی در داده ها جهت تعیین نواحی با مقادیر بالا که نقاطی با مقادیر بالا ، احاطه شده باشند (لکه داغ) و یا نواحی با مقادیر پایین که نقاطی با مقادیر پایین احاطه شده باشند(لکه سرد) استفاده می‌کند. این تحلیل آماری - فضایی طبق اصول تست فرضیه استوار می باشد که می تواند سطح معناداری لکه داغ و سرد را به‌صورت آماری تعیین نماید. پس از محاسبه Z-Score و P-value برای هر نقطه، نقاط با Z بالا و P کمتر از ۰/۰۵ از لحاظ آماری معنی‌دار می‌باشند که این مهم پس از مقایسه مجموع محلی مقادیر

عارضه و همسایه آن به طور نسبی با جمع کل مقادیر عوارض حاصل می‌گردد(گتیس و ارد، ۱۹۹۲; ارد و گتیس،۱۹۹۵) و به صورت رابطه ۱ و جدول ۱ محاسبه می شود.

$$Gi*=\sum j=1nwi,jxj-X^{-}\sum j=1nwi,jS[n\sum j=1nwi,j2-(\sum j=1nwi,j)2]n-1$$
$$X^{-}=\sum j=1nxjn$$
$$S=\sum j=1nxj2n-(X^{-})2$$

Xj = مقدار خصیصه برای عارضه j، W_{ij}^{*} = وزن فضایی بین عارضه j و i، n = برابر با تعداد کل عارضه ها می باشد.

جدول ۱. طبقه بندی نمره استاندارد در تحلیل نوع پراکنش داده های مکان محور

(Z-score) نمره استاندارد	(p-value) سطح معناداری	نوع الگوی پراکنش فضایی
کوچکتر از ۲/۵۸-	۰/۰۱	خوشه ای قوی- سرد-سرد
(۲/۵۸-) - (۱/۹۶-)	۰/۰۵	خوشه ای متوسط- سرد-سرد
(۱/۹۶-) - (۱/۶۵-)	۰/۱۰	خوشه ای ضعیف- سرد-سرد
(۱/۶۵-) - (۱/۶۵)	-	تصادفی-توزیع ناموزون
(۱/۶۵) - (۱/۹۶)	۰/۱۰	خوشه ای ضعیف- داغ-داغ
(۱/۹۶) - (۲/۵۸)	۰/۰۵	خوشه ای متوسط- داغ-داغ
بزرگتر از ۲/۵۸	۰/۰۱	خوشه ای قوی- داغ-داغ

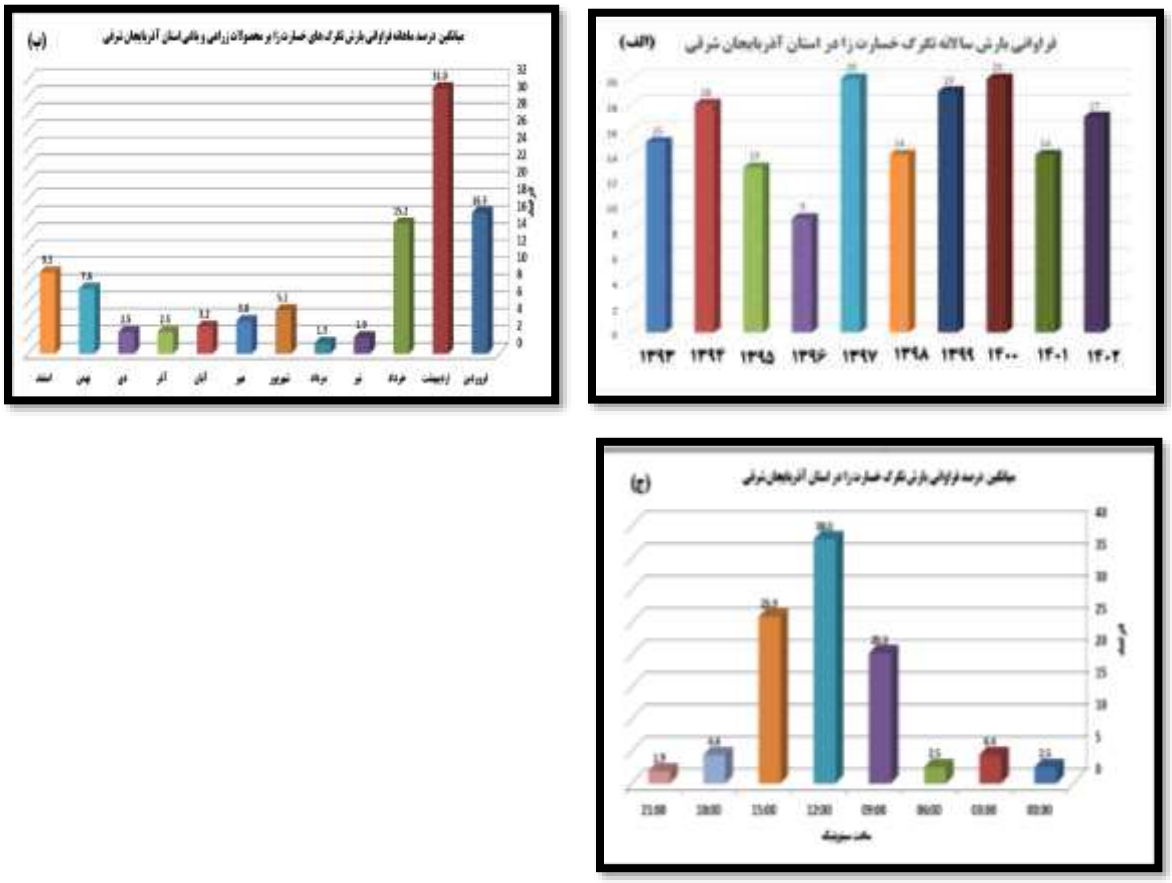
یافته های پژوهش

قبل از مقایسه مناطق مختلف با یکدیگر ابتدا توضیحات مختصری در زمینه فصول تندری در ایران و منطقه مورد مطالعه داده می‌شود. طبق تحقیقات به‌عمل آمده، توفان‌های تندری در ایران دو فصل مشخص؛ انتقالی گرم و انتقالی سرد را نشان می‌دهد. فصل انتقالی گرم از ماه مارس تا ژوئن با حداکثری در ماه می و فصل انتقالی سرد از اکتبر تا دسامبر با حداکثری در ماه اکتبر می‌باشد. در فصل انتقالی گرم به دلیل گرم شدن سریع سطح زمین و لایه‌های زیرین جو (افزایش طول روز و نزدیک شدن خورشید به خط قائم و بالا بودن رطوبت هوا (بارشهای فصل قبل) ناپایداری زیاد شده و جریان‌های همرفتی شدت یافته است. تحت شرایط مناسب، ابرهای همرفتی رشد کرده و باعث ایجاد توفان تندری می‌شوند. در فصل انتقالی سرد، فرا رفت هوای کاملاً سرد از عرض‌های بالاتر به روی مناطق گرم جنوبی‌تر باعث صعود لایه‌های زیرین و ناپایداری شده که در نتیجه آن توفان تندری در ماه‌های اکتبر و نوامبر افزایش می‌یابد. البته به دلیل کمتر بودن رطوبت هوای پائیز نسبت به بهار شدت وقوع توفان تندری در فصل سرد به مراتب از فصل گرم کمتر است. در منطقه پژوهش حاضر(آذربایجان

شرقی)، فصول انتقالی گرم و سرد تقریباً همان فصول بهار و پائیز می‌باشد که فصل انتقالی گرم از ماه‌های فروردین تا خرداد و انتقالی سرد از ماه‌های مهر تا آذر است.

توزیع زمانی بارش تگرگ های خسارت زا

در این بخش برای سه مقیاس زمانی سالانه، ماهانه و ساعتی جداولی بر اساس فراوانی بارش تگرگ‌های خسارت‌زا تنظیم گردید و سپس درصد فراوانی بارش های خسارت زا به‌صورت شکل ارائه گردید. با توجه به شکل ۴ مشاهده می شود که طی دوره آماری (۱۴۰۲-۱۳۹۳) میانگین سالانه وقوع بارش تگرگ خسارت زا در منطقه مورد مطالعه ۱۶ بار می‌باشد. بیشترین فراوانی بارش تگرگ خسارت‌زا در سال های ۱۳۹۱ و ۱۳۹۴ با ۲۰ بار رخداد و کمترین فراوانی در سال ۱۳۹۵ با ۹ بار رخداد در منطقه مورد مطالعه اتفاق افتاده است. بیشترین فراوانی بارش تگرگ در ماه اردیبهشت (۴۹ بار) رخ داده است که ۳۱ درصد کل بارش تگرگ در منطقه مورد مطالعه را نشان می دهد و پس از آن ماه فروردین (۲۶ بار) با ۱۶/۵ درصد کل بارش و ماه خرداد (۲۴ بار) با ۱۵/۲ درصد کل بارش، در رتبه های بعدی قرار دارند. کمترین فراوانی بارش تگرگ در ماه مرداد (۲ بار) با ۱/۳ درصد از کل بارش اتفاق افتاده است. همچنین نتایج نشان داد که حدود ۷۱ درصد از بارش‌های تگرگ خسارت زا در منطقه مورد مطالعه در فصول گرم سال(فروردین تا شهریور) که منطبق با فصل رشد گیاهی در این منطقه می باشد، رخ داده است و حدود ۲۹ درصد در فصول سرد سال(مهر الی اسفند) رخ داده است. طبق شکل ۴، در دوره زمانی مورد بررسی بارش تگرگ‌های خسارت‌زا در استان آذربایجان شرقی بطور میانگین بین ساعت ۰۹ تا ۱۵(G.M.T) بیشتر از ساعت‌های دیگر بوده و در این دوره ۱۰ ساله حداکثر بارش در ساعت ۱۲ اتفاق افتاده است که ۳۸ درصد از بارش را به خود اختصاص داده و بعد از آن ساعت ۱۵ با ۲۵.۹ درصد و ساعت ۰۹ با ۲۰.۳ درصد در رتبه های بعدی قرار دارند و کمترین درصد فراوانی در ساعت ۲۱ گرینویچ با ۱.۹ درصد رخ داده است. با توجه به شکل ۴، مشاهده می‌شود که درصد بارش تگرگ‌های روزانه در استان آذربایجان‌شرقی بیشتر از بارش‌های شبانه می‌باشد به‌طوری که بارش-های بین ساعت ۱۵-۰۶ گرینویچ ۸۶.۷ درصد بوده و تنها ۱۳.۳ درصد از بارش ها در طول شب رخ داده است.



شکل ۴. فراوانی سالانه(الف)، میانگین درصد ماهانه فراوانی(ب) و میانگین درصد فراوانی بارش شبانه روزی(ج) تگرگ های خسارت زا در استان آذربایجان شرقی طی دوره آماری(۱۴۰۲-۱۳۹۳)

توزیع فضایی خسارت ناشی از بارش تگرگ

توفان‌های تگرگ به‌طور قابل توجهی مجموع سطح برگ و بازده محصول را کاهش می دهد(پتومنو و همکاران، ۲۰۱۹). پدیده تگرگ، بیشترین رخداد را در فصل رشد گیاهان دارد. تفاوت‌های زیادی در میزان خسارت به محصولات کشاورزی به دلیل تفاوت در شدت ریزش تگرگ، نوع محصول و گیاه و مرحله رشد گیاه است(سانچز و همکاران، ۱۹۹۶). به‌همین منظور با توجه به تنوع محصولات در سطح منطقه مورد مطالعه، شدت خسارت وارده بر انواع محصولات زراعی و باغی مورد بررسی قرار گرفت. در این بخش برای طبقه‌بندی و ترسیم نقشه مناطق مستعد و آسیب‌پذیر بخش کشاورزی در برابر پدیده تگرگ، از آمار صندوق بیمه محصولات کشاورزی استفاده و مورد بررسی قرار گرفت و تعداد کل و میانگین سالیانه خسارات

ناشی از بارش تگرگ در سطح استان آذربایجان شرقی بدست آمد که نتایج آن در جدول ۲ و شکل ۵ آورده شده است. با توجه به جدول ۳ مشاهده می شود که خسارات وارده این پدیده بر محصولات باغی در سطح استان آذربایجان شرقی بطور میانگین سالانه ۱۲۳.۵ هکتار می باشد که بناب با میانگین سالانه ۵۶۸.۱ هکتار دارای بیشترین سطح خسارت و اهر با ۴۹۱.۲ هکتار و ترک با ۴۷۶.۲ هکتار در رتبه های بعدی قرار دارند. اما از نظر خسارات وارده بر محصولات زراعی مشخص گردید قره آغاج با میانگین سالانه ۱۱۴۳.۹ هکتار دارای بیشترین سطح خسارت و هشترود با ۸۲۶.۶ هکتار و اهر با ۳۶۹.۱ هکتار در رتبه های بعدی قرار دارند. از نظر سطح خسارات وارده بر مجموع محصولات زراعی و باغی طی دوره آماری مورد مطالعه مشخص گردید که در سطح استان بطور میانگین سالانه حدود ۲۶۲ هکتار خسارت می‌بینند. بیشترین سطح خسارت مربوط به بخش قره آغاج با میانگین سالانه ۱۱۵۹.۷ هکتار می باشد که ۱۴.۷ درصد از کل خسارات ناشی از تگرگ درسطح منطقه مورد مطالعه را شامل می شود و هشترود و اهر به ترتیب با ۱۰۵۷.۹ (۱۳.۴ درصد) و ۸۶۰.۳ هکتار(۱۰.۹ درصد) در رتبه‌های بعدی قرار دارند.

جدول ۲. تعداد کل و میانکین سالانه خسارات ناشی از تگرگ بر محصولات زراعی و باغی در آذربایجان شرقی طی دوره آماری (۱۴۰۲-۱۳۹۳)

شهرستان / بخش	فراوانی ۱۰ساله تگرگ	میانگین ۱۰ ساله فراوانی تگرگ	درصد فراوانی تگرگ	میانگین ۱۰ساله خسارت بر محصولات زراعی (هکتار)	میانگین ۱۰ساله خسارت بر محصولات باغی (هکتار)	میانگین ۱۰ساله خسارت بر کل محصولات کشاورزی (هکتار)	درصد میانگین ۱۰ساله خسارت بر کل محصولات کشاورزی
آذرشهر	۹	۰.۹	۱.۱	۳.۸	۱۲۶.۹	۱۳۰.۷	۱.۷
اسکو	۲	۰.۲	۰.۳	۰.۱	۸.۲	۸.۳	۰.۱
اهر	۸۸	۸.۸	۱۱.۱	۳۶۹.۱	۴۹۱.۲	۸۶۰.۳	۱۰.۹
ایلخچی	۱	۰.۱	۰.۱	۸.۴	۳.۴	۱۱.۸	۰.۲
بستان آباد	۲۶	۲.۶	۳.۳	۲۵۰.۸	۲۴.۴	۲۷۵.۱	۳.۵
بناب	۱۴	۱.۴	۱.۸	۰.۰	۵۶۸.۱	۵۶۸.۱	۷.۲
تبریز	۲۱	۲.۱	۲.۷	۱۰.۵	۲۴.۲	۳۴.۷	۰.۴
ترک	۴۶	۴.۶	۵.۸	۱۶۴.۱	۴۷۶.۲	۶۴۰.۴	۸.۱
ترکمانچای	۱۶	۱.۶	۲.۰	۱۱۵.۷	۳۶.۷	۱۵۲.۴	۱.۹
تسوج	۸	۰.۸	۱.۰	۲.۴	۳.۲	۵.۶	۰.۱

خاروانا	۱۵	۱.۵	۱.۹	۷.۸	۱۰۴.۸	۱۱۲.۷	۱.۴
خدا آفرین	۱۸	۱.۸	۲.۳	۱۱۳.۰	۰.۰	۱۱۳.۰	۱.۴
خسرو شاه	۱۷	۱.۷	۲.۱	۰.۹	۳۹.۱	۴۰.۱	۰.۵
سراب	۴۷	۴.۷	۵.۹	۲۶۰.۷	۲۹.۴	۲۹۰.۱	۳.۷
شبستر	۹	۰.۹	۱.۱	۰.۱	۱۴.۲	۱۴.۳	۰.۲
صوفیان	۱۲	۱.۲	۱.۵	۱۱.۰	۱۱.۲	۲۲.۲	۰.۳
عجب شیر	۱۲	۱.۲	۱.۵	۸.۶	۸.۹	۱۷.۵	۰.۲
قره آغاج	۴۷	۴.۷	۵.۹	۱۱۴۳.۹	۱۵.۷	۱۱۵۹.۷	۱۴.۷
کاغذکنان	۳	۰.۳	۰.۴	۲۲.۶	۰.۰	۲۲.۶	۰.۳
کلیبر	۴۰	۴	۵.۱	۲۰۲.۷	۲۳۶.۳	۴۳۹.۰	۵.۶
مراغه	۴۲	۴.۲	۵.۳	۳۵.۳	۳۷۵.۰	۴۱۰.۳	۵.۲
مرند	۶۸	۶.۸	۸.۶	۱۱۰.۰	۴۵۹.۶	۵۶۹.۶	۷.۲
ملکان	۲۶	۲.۶	۳.۳	۴.۱	۴۸.۹	۵۳.۰	۰.۷
مهربان	۲۳	۲.۳	۲.۹	۱۹۱.۸	۲.۱	۱۹۳.۸	۲.۵
میانه	۲۶	۲.۶	۳.۳	۹۰.۵	۷.۳	۹۷.۸	۱.۲
ورزقان	۲۰	۲	۲.۵	۹۵.۵	۴۴.۵	۱۴۰.۰	۱.۸
هادیشهر	۱۹	۱.۹	۲.۴	۲۱.۷	۲۶۰.۲	۲۸۲.۰	۳.۶
هریس	۱۸	۱.۸	۲.۳	۳۰.۱	۴۴.۵	۷۴.۶	۰.۹
هشترود	۷۲	۷.۲	۹.۱	۸۲۶.۶	۲۳۱.۳	۱۰۵۷.۹	۱۳.۴
هوراند	۲۷	۲.۷	۳.۴	۶۳.۸	۹.۹	۷۳.۷	۰.۹
جمع	۷۹۲.۰	۷۹.۲	۱۰۰.۰	۴۱۶۵.۵	۳۷۰۵.۶	۷۸۷۱.۱	۱۰۰.۰
میانگین	۲۶.۴	۲.۶	۳.۳	۱۳۸.۹	۱۲۳.۵	۲۶۲.۴	۳.۳

و خسارت بر مجموع محصولات زراعی و باغی(ج) در استان آذربایجان شرقی طی دوره آماری (۱۴۰۲-۱۳۹۳)

با توجه به تنوع محصولات کشت شده در سطح استان آذربایجان‌شرقی بررسی‌های به‌عمل آمده طبق شکل۶ نشان داد که بیشترین محصولات زراعی آسیب‌دیده از پدیده تگرگ شامل گندم دیم با میانگین خسارت سالانه ۳۱۹۳.۶ هکتار که با ۷۶.۷ درصد از کل خسارت بر این بخش در رتبه اول و محصول جو دیم با میانگین سالانه ۴۰۴ هکتار(۹.۷ درصد) و گندم آبی با میانگین ۲۶۹.۸ هکتار(۶.۵ درصد) به ترتیب در رتبه های دوم و سوم آسیب‌دیدگی قرار دارند. در مجموع این ۳ محصول(گندم دیم،جو دیم و گندم آبی) ۹۲.۸ درصد از کل خسارت بر این بخش را به خود اختصاص داده‌اند. همچنین با

توجه به بررسی های به‌عمل آمده مشخص گردید که بیشترین محصولات باغی آسیب دیده از پدیده تگرگ شامل گردو با میانگین خسارت سالانه ۲۶۱۸.۴ هکتار که با ۷۰.۷ درصد از کل خسارت بر این بخش در رتبه اول و محصول سیب با میانگین سالانه ۹۴۲.۹ هکتار(۲۵.۵درصد) و انگور آبی با میانگین ۸۱.۵ هکتار(۲.۲ درصد) به ترتیب در رتبه های دوم و سوم آسیب‌دیدگی قرار دارند. در مجموع این ۳ محصول(گردو، سیب و انگور آبی) ۹۸.۳ درصد از کل خسارت بر این بخش را به خود اختصاص داده است و تنها ۱.۷ درصد خسارت مربوط به محصولات باغی دیگر می‌باشد.

در استان آذربایجان شرقی طی دوره آماری (۱۴۰۲-۱۳۹۳)

تحلیل لکه های داغ و مناطق آسیب پذیر

به منظور شناسایی مناطق آسیب پذیر در برابر پدیده تگرگ از تکنیک‌های آمار فضایی و تحلیل خودهمبستگی فضایی و جهت حصول از اطمینان از مناطق با ارزش بالا و پایین از شاخص Gi* (گتیس - ارد جی ای) استفاده گردید که نتایج در شکل ۵ ارائه شده است. شاخص Gi* برای هر عارضه موجود در داده ها محاسبه می‌شود، نوعی امتیاز Z است. هر چه امتیاز Z بزرگتر، مقادیر بالا به نسبت خوشه‌بندی و لکه داغ تشکیل می‌دهند و بالعکس. امتیاز Z محاسبه شده در این تحلیل نشان می دهد در کدام ناحیه داده‌ها مقادیر زیاد یا کم خوشه‌بندی شده‌اند(علیجانی و همکاران، ۱۳۹۴). این ابزار در واقع، به هر عارضه در چارچوب عوارضی که در همسایگی‌اش قرار دارد، توجه می‌کند. براساس شکل های(۷ تا ۹)، مقادیر با ارزش بالا (خود همبستگی فضایی مثبت) نمایانگر لکه‌های داغ و مقادیر با ارزش پایین(خود همبستگی فضایی منفی) نمایانگر لکه‌های سرد است. باتوجه به شکل(۷) و نتایج بدست آمده مشخص گردید که در بخش زراعت مقادیر با خودهمبستگی فضایی مثبت در بخش‌هایی از جنوب استان متمرکز شده اند که ۶ بخش(تیکمه داش، مرکزی هشترود، نظرکهریزی، ترکمانچای، مرکزی چاراویماق و شادیان) از ۴ شهرستان(بستان آباد، هشترود، میانه و چاراویماق) را در بر می‌گیرد و در این میان آسیب پذیرترین منطقه در سطح منطقه مورد مطالعه بخش‌های مرکزی چاراویماق و شادیان می‌باشد که منطبق بر مناطقی است که دارای الگوی پراکنش فضایی با بالاترین خود همبستگی فضایی مثبت معنادار و ضریب اطمینان ۹۹ درصد(خوشه ای قوی- داغ-داغ) می باشند. در طرف دیگر منطقه‌ای با آسیب پذیری کمتر فقط در بخش خسروشاه با خود همبستگی فضایی منفی معنادار با ضریب اطمینان ۹۰ درصد(خوشه ای ضعیف- سرد-سرد) می‌باشد. بقیه بخش های استان(۳۷ بخش) دارای الگوی تصادفی و نامتوازن می‌باشند. باتوجه به شکل ۷ و نتایج بدست آمده مشخص گردید که در بخش باغی مقادیر با ارزش بالا(خودهمبستگی فضایی مثبت) در بخش‌هایی از شمال غرب استان(بخش های مرکزی و یامچی مرند و مرکزی جلفا) و جنوب غربی(بخش های مرکزی مراغه، مرکزی ملکان و نظر کهریزی) متمرکز شده اند. در این میان آسیب پذیرترین منطقه در سطح منطقه مورد مطالعه بخش های مرکزی و یامچی

مرند می باشد که منطبق بر مناطقی است که دارای الگوی پراکنش فضایی با بالاترین خود همبستگی فضایی مثبت معنادار و ضریب اطمینان ۹۹ درصد(خوشه ای قوی- داغ-داغ) می‌باشند. در طرف دیگر منطقه ای با آسیب‌پذیری کمتر فقط در بخش خسروشاه با خود همبستگی فضایی منفی معنادار با ضریب اطمینان ۹۰ درصد(خوشه ای ضعیف- سرد-سرد) می‌باشد. بقیه بخش‌های استان(۳۷ بخش) دارای الگوی تصادفی و نامتوازن می باشند. جهت بررسی آسیب‌پذیری کلی مناطق از مجموع خسارات بخش زراعت و باغی استفاده شد و نتایج بررسی در شکل ۷ نشان داده شده است. همانطوری که در شکل مشاهده می شود، مقادیر با ارزش بالا(خودهمبستگی فضایی مثبت) در بخش‌هایی از جنوب استان (بخش های مرکزی هشترود، نظرکهریزی، ترکمانچای، مرکزی چاراویماق و شادیان) از ۳ شهرستان(هشترود، میانه و چاراویماق)) متمرکز شده اند و در این میان آسیب پذیرترین منطقه در سطح منطقه مورد مطالعه بخش های مرکزی چاراویماق، شادیان و نظر کهریزی می باشد که منطبق بر مناطقی است که دارای الگوی پراکنش فضایی با بالاترین خود همبستگی فضایی مثبت معنادار و ضریب اطمینان ۹۹ درصد(خوشه ای قوی- داغ-داغ) می باشند. در طرف دیگر منطقه ای با آسیب پذیری کمتر در بخش هایی از غرب استان (بخش های مرکزی اسکو،خسروشهر، ممقان، ایلخچی، مرکزی تبریز، گوگان، مرکزی شبستر و حومه آذرشهر) از ۴ شهرستان(تبریز، آذرشهر، اسکو و شبستر)) متمرکز شده اند و در این میان بخش های مرکزی اسکو،خسروشهر، ممقان، گوگان و حومه آذرشهر منطبق بر مناطقی است که دارای الگوی پراکنش فضایی با بالاترین خود همبستگی فضایی منفی معنادار و ضریب اطمینان ۹۹ درصد(خوشه ای قوی- سرد-سرد) می‌باشند. بقیه بخش‌های استان(۳۱ بخش) دارای الگوی تصادفی و نامتوازن می‌باشند.

نتایج حاصل از پراکنش الگوی آسیب پذیری بخش زراعی و باغی استان آذربایجان شرقی در برابر پدیده تگرگ با استفاده از شاخص*Gi (الف) نتایج تحلیل نمره استاندارد بخش زراعی (ب) نتایج تحلیل لکه های داغ و سرد بخش زراعی (ج) نتایج تحلیل نمره استاندارد بخش باغی (د) نتایج تحلیل لکه های داغ و سرد بخش باغی (ح) نتایج تحلیل نمره استاندارد مجموع بخش زراعی و باغی (خ) نتایج تحلیل لکه های داغ و سرد مجموع بخش زراعی و باغی

نتیجه گیری

بررسی نتایج این تحقیق نشان داد که بیشترین فراوانی بارش تگرگ خسارت‌زا در ماه اردیبهشت و کمترین فراوانی بارش در مرداد ماه اتفاق افتاده است. همچنین نتایج نشان داد که حدود ۷۱ درصد از بارش های تگرگ خسارت زا در منطقه مورد مطالعه در فصول گرم سال که منطبق با فصل رشد گیاهی در این منطقه می باشد، رخ داده است. همچنین در دوره زمانی مورد بررسی بارش تگرگ‌های خسارت زا در استان آذربایجان شرقی بطور میانگین بین ساعت ۰۹ تا ۱۵(G.M.T) بیشتر از ساعت‌های دیگر بوده و در این دوره ۱۰ ساله حداکثر بارش در ساعت ۱۲ اتفاق افتاده است. همچنین بررسی‌ها

نشان داد که درصد بارش تگرگ های روزانه در استان آذربایجان شرقی بیشتر از بارش های شبانه می باشد. این نتایج با نتایج سیف(۱۳۷۵)، صناعی و همکاران(۱۳۸۲)، جهانگیری و همکاران(۱۳۸۴)، گزارش پژوهشکده‌ی هواشناسی(۱۳۸۵)، آسیایی و خزانه داری(۱۳۸۶)، قشلاقی(۱۳۸۶)، میرموسوی و اکبرزاده(۱۳۸۸)، میرموسوی و اکبرزاده(۱۳۹۳) و در اینکه که بیشترین فراوانی بارش تگرگ در فصل بهار و بین ساعت ۰۹ تا ۱۵(G.M.T) رخ داده است، مطابقت دارد.

در بررسی لکه های داغ براساس شاخص Gi* و باتوجه به نتایج بدست آمده، مشخص گردید که در بخش زراعت مقادیر با ارزش بالا(خودهمبستگی فضایی مثبت) در بخش‌هایی از جنوب استان متمرکز شده اند و در آسیب پذیرترین منطقه در محدوده مورد مطالعه بخش‌های مرکزی چاراویماق و شادیان می‌باشد که منطبق بر مناطقی است که دارای الگوی پراکنش فضایی با بالاترین خود همبستگی فضایی مثبت معنادار و ضریب اطمینان ۹۹ درصد(خوشه ای قوی- داغ-داغ) می باشند. در بخش باغی مقادیر با ارزش بالا(خودهمبستگی فضایی مثبت) در بخش‌هایی از شمال‌غرب استان متمرکز شده اند و آسیب‌پذیرترین منطقه در سطح منطقه مورد مطالعه بخش‌های مرکزی و یامچی مرند می‌باشد که منطبق بر مناطقی است که دارای الگوی پراکنش فضایی با بالاترین خود همبستگی فضایی مثبت معنادار و ضریب اطمینان ۹۹ درصد(خوشه ای قوی- داغ-داغ) می‌باشند. همچنین بررسی مجموع خسارات بخش زراعت و باغی نشان داد که مقادیر با ارزش بالا(خودهمبستگی فضایی مثبت) در بخش‌هایی از جنوب استان متمرکز شده‌اند که آسیب‌پذیرترین منطقه در سطح منطقه مورد مطالعه بخش‌های مرکزی چاراویماق، شادیان و نظر کهریزی می‌باشد که منطبق بر مناطقی است که دارای الگوی پراکنش فضایی با بالاترین خود همبستگی فضایی مثبت معنادار و ضریب اطمینان ۹۹ درصد(خوشه ای قوی- داغ-داغ) می‌باشند. در طرف دیگر منطقه‌ای با آسیب‌پذیری کمتر در بخش‌هایی از غرب استان به ویژه بخش های مرکزی اسکو،خسروشهر، ممقان، گوگان و حومه آذرشهر منطبق بر مناطقی است که دارای الگوی پراکنش فضایی با بالاترین خود همبستگی فضایی منفی معنادار و ضریب اطمینان ۹۹ درصد(خوشه ای قوی- سرد-سرد) می‌باشند، متمرکز شده اند. همچنین با بررسی مناطق آسیب پذیر می توان به سطح زیر کشت بالا در این مناطق و همچنین تأثیر عوامل محلی همچون توپوگرافی و ارتفاع و عوامل بیرونی از جمله مسیر ورود سیستم‌های جوی تگرگ‌زا از طرف غرب و جنوب غرب استان در وقوع و تشدید آن اشاره نمود. نتایج این مطالعه کارایی تکنیک‌های آمار فضایی را در شناسایی مناطق آسیب‌پذیر و تفکیک مناسب بر اساس اصول آمار فضایی بخوبی نشان می‌دهد و می‌تواند به عنوان الگویی در سایر مخاطرات بخش‌های کشاورزی بکار گرفته شود. همچنین مطالعه این شاخص و تلفیق اطلاعات حاصل از آمارفضایی با اطلاعات اقلیمی، بررسی تأثیر طولانی مدت پدیده‌ها بر تغییرات الگوی لکه‌های داغ و توسعه سایر شاخص های فضایی در مطالعات آینده پیشنهاد می‌گردد.

منابع

اکبرزاده، ی، ۱۳۸۷، تحلیل زمانی و مکانی بارش تگرگ در آذربایجان شرقی، پایان نامه کارشناسی ارشدجغرافیای طبیعی، دانشگاه زنجان، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، زنجان

آسیایی، م و خزانه داری، ل ۱۳۸۶، پهنه بندی بارش تگرگ درایران و ارائه روشهای مناسب جهت تعدیل آن، مجله علوم جغرافیای، شماره ۵ و ۶، ۱۹۴-۱۷۰.

بازگیر، س.، و ایلدرومی، ع.، و صابر، ق.، و ارشادی، ا.، و نوری، ح. (۱۳۹۷). واکاوی همدید مخاطره ی تگرگ در شهرستان بجنورد. مدیریت مخاطرات محیطی, ۵(۴), ۳۳۹-۳۵۸.

جوانمرد، س، فاتح، ش و دالایی، ح، ۱۳۸۶، مدیریت ریسک تگرگ جهت کاهش پتانسیل خطرپذیزی در کشور (مطالعه موردی محصولات سیب زمینی و برنج)، نخستین کنگره بین المللی مدیریت ریسک، ۲۰-۱.

جهانگیری، ز، پدرام، م و سیف، م، ۱۳۸۴، بررسی توزیع مکانی و زمانی بارش تگرگ و خسارتهای ناشی از آن در ایران، مجموعه مقالات کنفرانس بین اللملی مخاطرات زمین، بلایای طبیعی و راه کارهای مقابله با آنها، دانشگاه تبریز، تبریز.

خوشحال دستجردی، ج و قویدل رحیمی، ی، ۱۳۸۶، شناسایی ویژگیهای سوانح محیطی منطقه شمال غرب ایران/ نمونه مطالعاتی: خطر توفانهای تندری در تبریز، فصلنامه مدرس علوم انسانی، ۱۱۵-۱۰۱.

سلیمی سبحان، م.، و حجازی زاده، ز.، و صیادی، ف.، و قادری، ف. (۱۴۰۲). تحلیل همدیدی و شناسایی شار رطوبت روزهای همراه با تگرگ در غرب ایران (مطالعه موردی: حوضه آبریز زاب, آذربایجان غربی). پژوهشهای جغرافیای طبیعی (پژوهش های جغرافیایی), ۵۱(۴), ۷۱۵-۷۳۱.

سیف، م، ۱۳۷۵، بررسی توزیع بارش تگرگ در ایران و مطالعه موردی آن، پایان نامه کارشناسی ارشد، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران.

شاکری، ف. ۱۳۹۳ .تحلیل شاخص های ناپایداری هنگام وقوع پدیده تگرگ در شهرستان مشهد، پایان نامه دوره کارشناسی ارشد، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی تهران.

صناعی، ب، باستانی، خداداد و رفیع بخش، ف، ۱۳۸۲، بررسی مدل آماری پدیده تگرگ در کشور، نیوار،۴۹-۴۸.

ضیایی، س، ۱۳۸۸، تگرگ و اثرات آن، فصلنامه تخصصی بارش، نشریه داخلی اداره کل هواشناسی استان خوزستان، ۲۵-۱.

علیزاده، ا، ۱۳۸۶، اصول هیدرولوژی کاربردی، چاپ بیست و یکم، مشهد، انتشارات دانشگاه امام رضا(ع)، ۸۰۷-۱.

فرج زاده اصل، م.، و مصطفی پور، ط. ۱۳۹۱. تحلیل زمانی و مکانی بارش تگرگ در ایران. جغرافیا و توسعه, ۱۰(پیاپی ۲۸), ۵۵-۶۶.

قشلاقی، م، ۱۳۸۶، بررسی تأثیر تگرگ بر روی مناطق کشاورزی استانهای آذربایجان شرقی و غربی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات.

گزارش پژوهشکده هواشناسی، ۱۳۸۵، کاهش ریسک بلایای جوی و اقلیمی (خشکسالی و تگرگ)، گزارش ششم، مطالعه روش‌های مدیریتی در مقابله با بحران‌های جوی و اقلیمی و سازماندهی سیستم‌های هشدار پدیده‌های مخرب جوی.

لشکری، ح.، و امینی، م. (۱۳۹۳). تحلیل سینوپتیک و پهنه بندی بارش تگرگ در خراسان بزرگ برای دوره آماری (۱۹۹۶-۲۰۰۵). جغرافیا و برنامه ریزی, ۱۵(۳۱), ۵۱-۱۰۸.

لشکری، ح.، و پژوه، ف.، و بیتار، م. (۱۳۹۴). تحلیل همدید بارش تگرگ فراگیر در غرب ایران. فضای جغرافیایی, ۱۵(۵۰), ۸۳-۱۰۵.

مطالعات برنامه آمایش استان آذربایجان شرقی ، ۱۳۹۶، معاونت برنامه‌ریزی، دفتر برنامه‌ریزی و بودجه، گروه آمایش و برنامه‌ریزی. ـ تبریز: استانداری آذربایجان شرقی، ساختار کشاورزی، جلد ۹، ۲۲-۱۹.

میرموسوی، ح و اکبرزاده، ی، ۱۳۸۸، کاربست توزیعهای پواسن و دو جملهای منفی در برآورد احتمالات رخداد روزهای تگرگ/ مطالعه موردی: استان آزربایجان شرقی، مجله جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، شماره۴، ۸۴-۷۳.

میرموسوی، ح و اکبرزاده، ی، ۱۳۹۳، مطالعه زمانی- مکانی بارش تگرگ در فصل رشد گیاهان/ مطالعه موردی: استان اذربایجان شرقی، نشریه علمی- پژوهشی جغرافیا و برنامه ریزی، دانشگاه تبریز، شماره ۳۳، ۱۹۰-۱۷۵

میرموسوی، س.، و جلالی، م.، و کیانی، ح. (۱۳۹۲). تحلیل زمانی- مکانی احتمال وقوع بارش تگرگ در استان کرمانشاه. فضای جغرافیایی, ۱۳(۴۳), ۸۳-۹۸.

علیجانی، ب. (۱۳۹۴). تحلیل فضایی. تحلیل فضایی مخاطرات محیطی, ۲(۳), ۱-۱۴ .

Changnon, S. A. 1967, Areal-Temporal Variations of Hail Intensity in Illinois: Journal of Applied Meteorology Vol. 6, pp. 536–541.

Changnon, S. A. 1984, Temporal and Spatial Variations in Hail in the Upper Great Plains and Midwest: Journal of Applied Meteorology Vol. 23, pp. 1531-1541.

Changnon, S. A. 1999, Factors affecting temporal fluctuations in damaging storm activity in the United States based on insurance loss data: Journal Meteorol. Appl. 6, pp. 1–10.

Changnon, S. A. 2009, Increasing major hail losses in the U.S.: Climatic Change 96, pp.161–166.

Changnon, S. A. Changnon, D. 2000, Long-Term Fluctuations in Hail Incidences in the United States: Journal of Climate Vol. 13, pp. 658- 664.

Feral, L; Sauvageot, H, and Soula, S. 2002. Hail detection using S- and C-band radar reflectivity difference. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 20: 233-248.
Frisby, E. M. 1962, Relationship of Ground Hail Damage Patterns to Features of the Synoptic Map in the Upper Great Plains of the United States: Journal of Applied Meteorology Vol. 1, pp. 348-352.
Frisby, E. M. 1963, Hailstorms of the Upper Great Plains of the United States: Journal of Applied Meteorology Vol. 2, pp. 759-766.
Getis, A and Ord, J.K. 1992. The analysis of spatial association by use of distance statistics. Geographical Analysis 24.3: 189-206.
Giaiotti, D; Sergio, N, and Fulvio, S. 2003. The climatology of hail in the plain of Friuli Venetia Giulia. Atmospheric Research, 67– 68: 47–259.
Han-Gyul, J.; Hyunho, L.; Jambajamts, L. and Jong-Jin, B. (2016). A Hail Climatology in South Korea, Atmospheric research, 38-54.
Lucia, H.; Laura, L.; Merino, A.; Berthet, C.; García-Ortega, E.; Sánchez, J. and Dessens, L. (2015). Hailfall in southwest France: Relationship with precipitation, trends and wavelet analysis, Atmospheric Research, 156: 174-188.
Ord, J.K and Getis, A. 1995. Local spatial autocorrelation statistics: distributional issues and an application. Geographical Analysis. 27.4: 286-306.
Petoumenou, D. G., Biniari, K., Xyrafis, E., Mavronasios, D., Daskalakis, I., & Palliotti, A. (2019). Effects of Natural Hail on the Growth, Physiological Characteristics, Yield, and Quality of Vitis vinifera L. cv. Thompson Seedless under Mediterranean Growing Conditions. Agronomy, 9(4), 197.
Sánchez, J. L., Fraile, R., De La Madrid, J. L., De La Fuente, M. T., Rodríguez, P., & Castro, A. (1996). Crop damage: The hail size factor. Journal of Applied Meteorology, 35(9), 1535-1541.
Wieringa, J., and J. Lomas. 2001. Lecture notes for training agricultural meteorological personnel. WMO-No.551. ISBN 92-63-12551-1. 196 pp.

Temporal and spatial analysis of vulnerable areas of agricultural products due to hail in East Azerbaijan Province

Younes Akbarzadeh[1], Naser Mansouri Derakhshan[2]

PhD in Climate Hazards, East Azerbaijan Meteorological Department
PhD in Synoptic Meteorology, East Azerbaijan Meteorological Department

Abstract

Hail is one of the most important weather hazards that causes damage to agricultural products every year, causing instability in farming and working activities. In the present study, hail statistics from meteorological stations and hail damage data on crops and orchards from the province's Agricultural Products Insurance Fund were used to investigate the number of days with damaging hail in the statistical period 1402-1393 in East Azerbaijan province. In order to identify areas vulnerable to this phenomenon, hot spot spatial statistics

analysis from the Gettys-RDGE statistics was used. The results showed that the highest frequency of damaging hail precipitation occurred in the month of May and the lowest frequency of precipitation occurred in August. Also, about 71 percent of damaging hail precipitation in the study area occurred in the warm seasons of the year, which coincides with the plant growth season in this region. In the study of hot spots based on the Gi* index, it was determined that in the agricultural sector, the most vulnerable area in the studied region is concentrated in parts of the south of the province, and in the horticultural sector, the most vulnerable area is concentrated in the northwest of the province. Also, the study of the total losses in the agricultural and horticultural sectors of the province showed that the vulnerable areas are concentrated in parts of the south of the province.

Keywords: hail, vulnerable, hot spots, agricultural products, East Azerbaijan

سومین کنفرانس ملی آب و هواشناسی ایران (با محوریت تغییر اقلیم)
The 3rd National Conference on Climatology of Iran (Focusing on Climate Change)
ارومیه ۱۶ مهر ۱۴۰۴

بررسی نقش خشکسالی و تغییر اقلیم برتغییرات کاربری اراضی در ایران

محمود احمدی[۱]، شلیر کاتورانی[۲]

۱- دانشیار گروه جغرافیای طبیعی ،دانشکده علوم زمین ، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران
۲- مرکز سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، جهاد دانشگاهی، کردستان ، ایران.
.E-mail: sh.katorani99@gmail.com

چکیده

تغییرات اقلیمی، شدت و تداوم خشکسالی‌ها در دو دهه اخیر در ایران افزایش یافته و آثار آن به‌ویژه بر کاربری اراضی نمایان است. در این مطالعه تغییرات کاربری اراضی از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ به کمک مجموعه داده جهانی سامانه طبقه‌بندی پوشش زمین(LCCS) و خشکسالی به کمک شاخص (SPEI) بررسی شد. نتایج نشان داد مساحت مناطقی با پوشش گیاهی متراکم (از 7/6 به 7/3 درصد) و مراتع (از 3/1 به 2/8 درصد)کاهش و مساحت زمین های زراعی (از 16/1 به 16/25درصد) افزایش و پهنه های آبی(از ۰.۹ به ۰.۸ درصد) کاهش یافته است بیشینه فراوانی خشکسالی هواشناسی در مرکز و جنوب شرق ایران و قسمت هایی از جنوب غرب ایران شامل خوزستان و بوشهر (۴۰/۱۴ تا ۴۹/۱۴ درصد) شدت خشکسالی هواشناسی در مناطق مرکزی و جنوب شرق ایران با مقادیر ۱/۶۵- تا ۱/۸۵- نوسان دارد در خصوص خشکسالی هیدرولوژیکی پهنه وسیعتری از منطقه موردمطالعه با خشکسالی های شدید مواجه است و هسته‌های بیشنه آن در جنوب شرق ایران با مقادیر بین ۱/۷۱- تا ۱/۹۱- نوسان می‌کند. به طور کلی ترکیبِ خشکسالی‌های پیوسته، استفاده بی‌رویه آب (برداشت سطحی و زیرزمینی)، ساخت سدها و تغییرات مدیریتی باعث کاهش گسترده پهنه‌های آبی و افزایش بیان زایی شده است.

کلید واژه‌ها: خشکسالی، تغییر اقلیم، کاربری اراضی

مقدمه

تغییر کاربری اراضی یکی از عوامل انسانی مهم در تغییر اقلیم است که نه‌تنها شرایط محلی بلکه روندهای اقلیمی در مقیاس جهانی را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد.

تغییر کاربری اراضی (مثل جنگل‌زدایی، گسترش شهرنشینی یا تبدیل زمین‌ها به کشاورزی) باعث تغییر در میزان جذب و بازتاب انرژی خورشید، چرخه آب، و ذخیره کربن می‌شود. این تغییرات انتشار گازهای گلخانه‌ای را افزایش داده و شرایط آب‌وهوایی محلی و جهانی را دگرگون می‌کند.

کاربری اراضی به طور کلی به معنای نوع بهره‌برداری از زمین است و شامل وضعیت‌هایی می‌شود که در آن زمین برای اهداف گوناگون مانند کشاورزی، منابع طبیعی یا فعالیت‌های صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرد (سلاجقه و همکاران، ۱۳۹۰). بنابراین، تغییرات کاربری اراضی تنها به دگرگونی‌های اقلیمی محدود نمی‌شود بلکه تغییر در سطح کاربری زمین می‌تواند به تغییرات محلی و منطقه‌ای نیز منجر گردد. برای نمونه، ژائو و همکاران (۲۰۱۹) تأکید کردند که تغییر کاربری جنگل‌های جنوبی چین تأثیری قابل توجه بر اقلیم داشته است، از سوی دیگر، برکمنز و همکاران (۲۰۱۹) نشان دادند تغییرات اقلیمی خود عاملی تعیین‌کننده در تغییر نوع بهره‌برداری زمین است، به عبارت دیگر، کاربری اراضی و تغییرات اقلیمی رابطه‌ای متقابل دارند که موجب تغییر در سطوح محلی، منطقه‌ای و جهانی می‌شود. برای نمونه، تغییر اقلیم می‌تواند بر چرخه‌های اکولوژیکی (کیو و همکاران، ۲۰۱۳؛ کایت و همکاران، ۲۰۱۶) اثر بگذارد. نمونه‌هایی از این پیامدها شامل تغییر در زیست بوم منطقه(بیرو و همکاران ۲۰۱۳)، تغییر در میزان ذخایر آبی و تغییر کیفیت آب رودخانه‌ها (پیلگریم و همکاران، ۲۰۱۴) و تغییر در اکوسیستم‌های گوناگون است.

رشد روزافزون جمعیت جهان، افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی، و تغییر کاربری اراضی از طریق سدسازی، جنگل‌زدایی و تبدیل مراتع به اراضی کشاورزی یا شهری، همگی باعث ایجاد دگرگونی‌های گسترده در نظام اقلیمی شده‌اند (عساکره، ۱۳۸۶). پیامد این تغییرات، گرم‌تر شدن کره زمین و بروز اختلالات شدید ناشی از فعالیت‌های انسانی است (دنگشویی و همکاران، ۲۰۱۸).

در چنین شرایطی، رخدادهای اقلیمی و محیطی با شدت بیشتری مشاهده می‌شوند؛ مانند افزایش بسامد طوفان‌های سهمگین، بالا آمدن سطح آب دریاها به دلیل ذوب یخچال‌های قطبی، وقوع آتش‌سوزی‌های طبیعی و سایر مخاطرات محیطی. برای نمونه، کاهش سطح یخچال‌ها در جنوبگان، افزایش تعداد طوفان‌ها در استرالیا و اروپا، و همچنین افزایش شدت بارش‌های سنگین در آمریکای شمالی و شرق آسیا (هنری و همکاران ،۲۰۱۲ ؛ رائو پچ و همکاران ۲۰۲۱) نمونه‌هایی از این تغییرات هستند. در ایران نیز می‌توان به افزایش دمای مناطق جنوبی به‌ویژه خوزستان اشاره کرد (تبری ،۲۰۲۰) که خود نشان‌دهنده اثرات آشکار تغییر اقلیم است.

ایران به دلیل موقعیت جغرافیایی در کمربند خشک و نیمه‌خشک جهان، همواره با پدیده خشکسالی مواجه بوده است. در دو دهه اخیر، شدت و تداوم خشکسالی‌ها افزایش یافته و آثار آن به‌ویژه بر کاربری اراضی در بخش‌های مختلف کشور نمایان شده است

خشکسالی یکی از مهم‌ترین مخاطرات اقلیمی است که اثرات آن تنها به کاهش بارش و کمبود آب محدود نمی‌شود، بلکه پیامدهای عمیقی بر ساختار و کاربری اراضی برجای می‌گذارد. هنگامی که دوره‌های خشکسالی تکرار یا طولانی می‌شوند، فشار مضاعفی بر منابع خاک، پوشش گیاهی، تالاب‌ها و فعالیت‌های کشاورزی وارد می‌شود.

در بخش کشاورزی، کمبود آب سبب افت عملکرد محصولات، رها شدن زمین‌های زراعی و تغییر الگوهای کشت می‌گردد. مراتع و پوشش طبیعی تحت تأثیر خشکسالی دچار کاهش تراکم و تنوع گونه‌ای می‌شوند و به بیابان‌زایی و گسترش اراضی بایر دامن می‌زنند.

خشکسالی همچنین به تغییر کاربری غیرمستقیم منجر می‌شود؛ برای مثال، جوامع محلی به دلیل کاهش بهره‌وری کشاورزی یا دامداری، به سمت تغییر معیشت یا مهاجرت سوق پیدا می‌کنند که خود باعث توسعه ناپایدار شهرها، تغییر کاربری اراضی کشاورزی به سکونتگاهی یا صنعتی و فشار مضاعف بر منابع طبیعی پیرامون می‌شود.

به طور کلی، خشکسالی نه‌تنها به عنوان یک پدیده اقلیمی کوتاه‌مدت بلکه به‌عنوان یک عامل ساختاری در تغییرات کاربری اراضی مطرح است و در صورت تداوم می‌تواند الگوهای فضایی سرزمین را به شکلی بنیادین دگرگون سازد.

تغییرات اقلیمی یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی در قرن حاضر به شمار می‌رود که تأثیرات گسترده‌ای بر اکوسیستم‌های طبیعی و جوامع انسانی داشته است (چت ترجی و همکاران ،۲۰۱۴؛ فرویز و جان پتر ،۲۰۱۹) این پدیده با ایجاد اختلال در فرآیندهای طبیعی، موجب کاهش تنوع زیستی، تغییر در الگوهای بارندگی، افزایش دمای زمین و بروز پدیده‌های شدید آب‌وهوایی شده است. در این میان، تاب‌آوری و ظرفیت سازگاری جوامع انسانی در برابر این تغییرات، نقش مهمی در کاهش آسیب‌ها و افزایش توان پاسخ‌گویی ایفا می‌کند(ادجر و همکاران، ۲۰۱۴).

همکاری‌های بین‌المللی و اقدامات محلی، از جمله کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، توسعه فناوری‌های پاک و آموزش عمومی، از راهکارهای مؤثر در مقابله با تغییرات اقلیمی محسوب می‌شوند. همچنین، مشارکت جوامع محلی در تصمیم‌گیری‌ها و اجرای برنامه‌های سازگاری، می‌تواند به افزایش اثربخشی این اقدامات کمک کند. همان‌طور که (میبر و تورنر،۱۹۹۶) اشاره کرده‌اند، درک روابط میان انسان و محیط زیست، برای دستیابی به توسعه پایدار و مقابله با چالش‌های زیست‌محیطی ضروری است.

روش پژوهش:

منطقه مورد مطالعه:

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش کشور ایران است (شکل ۱) ایران کشوری وسیع با تنوع جغرافیایی بالاست. حداقل ارتفاع کشور ایران از ۲۷- در سواحل دریای خزر تا بیش از ۵۶۰۰ متر در رشته کوه البرز متغیر است. بخشهای بزرگی از آن در مناطق داخلی، شرقی و جنوب شرقی کشور پوشیده از بیابانهای بزرگی است؛ به طوری که دشت لوت ۱۰ درصد کل مساحت کشور را در برگرفته است (احمدی و همکاران،۲۰۲۱).

داده های مورد استفاده:

مجموعه داده های LCCS (Land Cover Classification System)

جهت تحقق اهداف این پژوهش لازم است تا تغییرات کاربری اراضی یا پوشش سطح زمین را نیز در منطقه مورد بررسی قرارداد. برای این منظور از مجموعه‌داده جهانی سامانه طبقه‌بندی پوشش زمین (LCCS) مورد تأیید سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO) استفاده خواهد شد. برای تولید این مجموعه‌داده، کل آرشیو تابش‌سنج طیفی تصویربرداری با تفکیک متوسط (MERIS) از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۲ استفاده‌شده است. سپس با استفاده از تغییرات شناسایی‌شده از سری زمانی رادیو متر پیشرفته با تفکیک بسیار بالا (AVHRR) از ۱۹۹۲ تا ۱۹۹۹، سری زمانی SPOT-Vegetation (SPOT-VGT) از ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۲ و سری زمانی PROBA-Vegetation (PROBA-V) و Sentinel-3 OLCI (S3 OLCI) از سال ۲۰۱۳ تاکنون داده مربوطه تولیدشده است. تفکیک افقی این داده‌ها ۳۰۰ متر و دوره آماری آن‌ها سالانه است.

شاخص بارش - تبخیر-تعرق استانداردشده (SPEI)

خشکسالی یکی مهم‌ترین دلایل خشک‌شدن رودها، تالاب‌ها و دریاچه‌ها است. در این مطالعه برای محاسبه خشکسالی از شاخص بارش - تبخیر-تعرق استانداردشده (SPEI) برای بررسی خشکسالی استفاده شد (ویسنته - سرانو و همکاران، ۲۰۱۰). شاخص SPEI نسخه اصلاح‌شده شاخص بارش استانداردشده (SPI) است و تبخیر - تعرق پتانسیل و بارش را در محاسبه شاخص در نظر می‌گیرد. برخلاف SPI که به طور گسترده برای مطالعات خشکسالی استفاده می‌شود. شاخص SPEI تأثیر افزایش دما بر تقاضای آب را نشان می‌دهد. SPEI بر اساس یک توازن اقلیمی ماهانه (بارش منهای تبخیر - تعرق پتانسیل) است که معمولاً با استفاده از توزیع لجستیکی سه پارامتری محاسبه می‌شود. در این تحقق از شاخص SPEI-1 و SPEI-12 که به ترتیب معرف خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی هستند، استفاده شد. تا اثرات کوتاه‌مدت و بلندمدت خشکسالی را بر تغییرات کاربری اراضی در ایران بتوان بررسی کرد.

شاخص SPEI الزامات یک شاخص خشکسالی را برآورده می‌کند، زیرا ویژگی چند مقیاسی آن امکان استفاده توسط رشته‌های علمی مختلف برای شناسایی، نظارت و تجزیه‌وتحلیل خشکسالی را فراهم می‌کند. این شاخص مانند SC-PDSI

و SPI، SPEI می‌تواند شدت خشکسالی را باتوجه‌به شدت و مدت آن اندازه‌گیری کند و می‌تواند شروع و پایان دوره‌های خشکسالی را شناسایی کند. شاخص SPEI امکان مقایسه شدت خشکسالی را از طریق زمان و مکان فراهم می‌کند، زیرا می‌توان آن را در طیف وسیعی از اقلیم‌ها محاسبه کرد، همان‌طور که SPI می‌تواند محاسبه شود. علاوه بر این، شاخص‌های خشکسالی باید از نظر آماری قوی و به‌راحتی محاسبه شوند و دارای یک روش محاسبه واضح و قابل‌درک باشند. تمام این الزامات توسط SPEI برآورده شده است. بااین‌حال، یک مزیت مهم SPEI نسبت به سایر شاخص‌های خشکسالی پرکاربرد که تأثیر PET را بر شدت خشکسالی در نظر می‌گیرند این است که ویژگی‌های چند مقیاسی آن امکان شناسایی انواع مختلف خشکسالی و اثرات آن را در زمینه گرمایش جهانی فراهم می‌کند (کیانتاش و دراکاپ،۲۰۰۲).

یافته های پژوهش

در این پژوهش باهدف بررسی نقش پوشش زمین و بررسی تاثیر تغییرات کاربری اراضی بر اقلیم ایران نقشه های پوشش زمین از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ مورد بررسی قرار گرفت(شکل ۲) سیستم طبقه بندی پوشش زمین(LCCS) ، منطقه مورد مطالعه را از لحاظ نوع پوشش زمین و کاربری اراضی به ۱۶ طبقه تقسیم می‌کند طبق این تقسیم بندی ۵۹ درصد از مساحت منطقه مورد مطالعه را زمین های برهنه تشکیل می‌دهند که بیشرین گستره را به خود اختصاص داده است و طبقات پوشش درختی مخلوط و پوشش درختی متراکم به ترتیب با 0/07و 0/08 درصد کمترین مساحت را در منطقه مورد مطالعه دارند. با توجه به درصد بالای زمین های برهنه در فلات مرکزی ایران چشمه‌های گرد و خاک در این مناطق دور از انتظار نخواهد بود و وجود بیابان‌ها وسیع با خاک‌های سست و در معرض فرسایش شرایط را برای رخداد گرد و خاک در نیمه گرم سال فراهم می‌نماید.

بررسی تغییرات کاربری اراضی از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ نشان می‌دهد پهنه های آبی در گذر زمان دچار تغییرات قابل توجهی شده است از جمله دریاچه های بخت یا پریشان در ایران، دریاچه و تالاب های هامون و هورالعظیم در گذر زمان دستخوش تغییرات قابل توجهی شده اند .

بررسی داده‌های کمی مقادیر مربوط به مساحت زمین‌های کشاورزی نشان می‌دهد با گذر زمان از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ مساحت مناطقی با پوشش گیاهی متراکم (از 7/6 درصد به 7/3 درصد) و مراتع (از 3/1 درصد به 2/8 درصد)کاهش یافته است و در مقابل مساحت زمین های زراعی (از 16/1 درصد به درصد 16/25) افزایش داشته است در خصوص نوع زمین های کشاورزی نیز مساحت زمین های کشاورزی آبی کاهش یافته و در مقابل مساحت زمین های کشاورزی دیم به دلیل بازدهی بالاتر و سود بیشتر برای کشاورزان افزایش یافته است با توجه به اینکه در کشورهای در حال توسعه بجای بهره‌گیری

از کشاورزی مکانیزه از کشاورزی سنتی استفاده می‌شود این روند افزایشی صدمات جبران ناپذیری به خاک این مناطق وارد کرده است. در خصوص تغیرات کمی پهنه های آبی نیز وسعت پهنه های آبی از ۰.۹ به ۰.۸ درصد کاهش یافته است مهمترین تغییرات صورت گرفته در پهنه های آبی به شرح زیر می باشد:

از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ تقریباً بیشتر دریاچه‌ها و تالاب‌های بزرگ ایران روند کاهش سطح و حجم شدید را تجربه کردند؛ برخی مثل هامون و بخش‌هایی از باختگان/گاوخونی تقریباً خشکی کامل را تجربه کردند، دریاچه ارومیه کاهش بسیار شدید تا اوایل ۲۰۱۰ها داشت و سپس تلاش‌هایی برای احیا آغاز شد که نتیجه‌ها ناهمگن بودند.

دریاچه ی ارومیه (شمال غرب)

تحلیل‌ها نشان می دهد از ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ بیش از حدود یک‌چهارم تا یک‌سوم از مساحت دریاچه از بین رفته و در دهه ی ۲۰۱۰ افتِ سطح و مساحت تشدید شد. در بعضی سال‌ها تا بیش از ۸۰–۹۰ درصد از پهنه ی آبی از دست رفته گزارش شده (بستگی به نقطه ی مرجع زمانی دارد). کاهش بارش، برداشت‌های کشاورزی، حفر چاه‌های زیاد، ساخت و مدیریتِ سدها در حوضه ی آبریز از علل این رویداد بود و تلاش‌های احیاء از اواسط دهه ی ۲۰۱۰ شروع شد و در پی بارش‌های سنگین ۲۰۱۸–۲۰۱۹ بخشی از آب بازگشت .

برای دریاچه ی ارومیه مطالعات نشان می‌دهند که از ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ کاهش قابل‌توجهی (بیش از ۲۸ درصد مساحت)رخ داده و از ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۴ شدت کاهش بیشتر شد و مجموع تغییرات بلندمدت (از دهه ی ۱۹۹۰ تا اواخر ۲۰۱۰) کاهش بسیار بیشتر (در بعضی تحلیل‌ها نزدیک به ۷۰ تا ۹۰ درصد در بخش‌هایی از دوره) را نشان می‌دهد.

هامون (مرز ایران–افغانستان، سیستان)

از اواخر دهه ی ۱۹۹۰ (خشکسالی شدید ۱۹۹۸–۲۰۰۱) و اوایل ۲۰۰۰ میلادی تا ۲۰۱۰ و بعد از آن، تکرار خشکی‌های گسترده؛ ترکیبِ خشکسالی‌های بلندمدت و کاهشِ جریانِ هلمند (به‌دلیل سدسازی و تغییرات مصرف در افغانستان) باعث شد تالاب‌های هامون بارها کاملاً خشک شوند و تنوع زیستی و معیشت محلی به شدت آسیب دید. بازگشت پایدار آب نیازمند توافق و مدیریت مشترک منطقه‌ای است

بخشی از تالاب‌ها و دریاچه‌های فلات مرکزی و جنوب (گاوخونیِ اصفهان، بختگان)

کاهش پیوسته ی آبدهی رودخانه‌ها (مثل زاینده‌رود برای گاوخونی) و بهره‌برداری بر حوضه‌ها سبب خشک شدن یا کوچک‌شدن شدید شده است. در جنوب (بختگان و پیرامون) نیز ترکیبِ خشکسالی و مصرفِ کشاورزی منجر به نمک‌زایی و از بین رفتن زیستگاه پرندگان مهاجر شده است

تالاب انزلی، شادگان، و سایر تالاب‌های ساحلی و جلگه‌ای

کاهش کیفیت آب (آلودگی، رسوب‌گذاری)، فرسایش زیستگاه نی‌زارها و تغییرات کاربری در حوضه‌های بالادست؛ در برخی سال‌ها مساحت کاهش یافته اما مقیاسِ فروپاشی به اندازه ی دریاچه‌های بسته ی داخلی نبوده است. مدیریت نامنسجم حوضه و ورود فاضلاب و رسوب از علل تاثیرگذار است .

در این پژوهش همچنین تغییرات صورت گرفته در منطقه مورد مطالعه از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ به کمک الگوریتم بررسی تغییرات پوشش زمین (Change count) که به صورت یک متغیر جدا در نقشه های پوشش زمین LCCS در دسترس می‌باشد ترسیم گردید این نقشه مناطقی را که در آن تغییرات کاربری اراضی اتفاق افتاده است به صورت تجمیعی از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ نشان داده است بررسی بصری این نقشه ها نشان داد تعداد و مساحت مناطق تغییر یافته روند افزایشی و گسترش قابل توجهی داشته است.

در این تحقیق خشکسالی هیدرولوژیکی (خشکسالی بلندمدت) و خشکسالی هواشناسی (خشکسالی کوتاه‌مدت) مورد بررسی قرار گرفته است. باتوجه‌به اینکه خشکسالی مؤلفه‌هایی دارد که مهم‌ترین آن‌ها فراوانی، شدت و نوع خشکسالی می‌باشد در اینجا به بررسی این ۳ مؤلفه مهم برای خشکسالی کوتاه‌مدت یا خشکسالی هواشناسی (SPEI 1) و برای خشکسالی بلندمدت یا خشکسالی هیدرولوژیکی (SPEI 12) از سال ۱۹۸۱ تا ۲۰۲۰ پرداخته شده است مهم‌ترین مزیت شاخص SPEI نسبت به دیگر شاخص‌های پایش خشکسالی که کاربرد زیادی نیز دارند در این امر نهفته است که این شاخص توانایی تشخیص اثر تغییر مقادیر تبخیر-تعرق و دما را در ارتباط با گرمایش جهانی داراست (ویسنت سرانو و همکاران،۲۰۱۰). باتوجه‌به اینکه فراوانی خشکسالی بیانگر این است که چند درصد از ماه‌های سال در این منطقه دارای رخداد خشکسالی هستند. مناطقی با بیشینه فراوانی خشکسالی هواشناسی در مناطق جنوبی منطقه موردمطالعه و در مرکز و جنوب شرق ایران و قسمت هایی از جنوب غرب ایران شامل خوزستان و بوشهر ، با مقادیر ۴۰/۱۴ تا ۴۹/۱۴ درصد نوسان می‌کند. همان‌طور که شکل ۳ نشان می‌دهد به‌جز مناطق کوچکی که در شمال و شمال غرب قراردارند بقیه مناطق با درصدهای متفاوت درگیر خشکسالی هواشناسی می‌باشند وسعت مناطق درگیر خشکسالی هیدرولوژیکی در منطقه مورد مطالعه نسبت به خشکسالی هواشناسی کمتر است همچنین مناطق بین‌النهرین، دشت لوت و دشت کویر و مناطق جنوبی ایران، بیشینه فراوانی خشکسالی هیدرولوژیکی را نشان داده است با مقایسه نقشه‌های مربوط به خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی در منطقه موردمطالعه مشخص شده است که مناطق بیشینه خشکسالی از لحاظ موقعیت مکانی کاملاً با هم منطبق می‌باشند، ولی از لحاظ مقادیر درصد فراوانی، نقشه خشکسالی هواشناسی مقادیر بالاتری را نسبت به خشکسالی هیدرولوژیکی نشان می‌دهد.

در خصوص مؤلفه شدت خشکسالی همان‌طور که شکل ۳ نشان می‌دهد پهنه وسیعی از منطقه موردمطالعه مقادیر بالایی را از لحاظ شدت خشکسالی نشان می‌دهد. در خصوص خشکسالی هواشناسی مناطق مرکزی و جنوب شرق ایران خشکسالی هایی با شدت ۱/۶۵- تا ۱/۸۵- را نشان می‌دهند در خصوص خشکسالی هیدرولوژیکی پهنه وسیعتری از منطقه موردمطالعه با خشکسالی های شدید نشان داده شده است که هسته‌های بیشنه آن در جنوب شرق ایران با مقادیر بین ۱/۷۱- تا ۱/۹۱- نوسان می‌کند.

در خصوص مؤلفه نوع خشکسالی باتوجه‌به شکل ۳ پهنه وسیعی از منطقه موردمطالعه در دسته خشکسالی های شدید از مقادیر ۱/۵۰- تا ۱/۹۰- نوسان می‌کند و لکه های کوچکی در شمال غرب ایران و شمال شرق ایران در رده خشکسالی های متوسط با مقادیر ۱/۰۱- تا ۱/۴۹- نوسان می‌کند.

این منطقه به‌طورکلی دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک است که بارش سالانه پایینی دارد و تغییر اقلیم منجر به افزایش دما و تبخیر بیشتر شده که این خود باعث تشدید خشکسالی در منطقه موردمطالعه شده است همچنین استفاده ناپایدار از منابع آب زیرزمینی و سطحی، بحران را تشدید کرده است.

باتوجه‌به اینکه پهنه وسیعی از منطقه موردمطالعه دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک است به طور طبیعی بارش کمی دریافت می‌کند همچنین گرمایش جهانی باعث تبخیر بیشتر و کاهش رطوبت خاک می‌شود و تغییر اقلیم منجر به ناپایداری الگوهای بارش در این مناطق شده است، استفاده بی‌رویه از آب برای مصارف کشاورزی و استفاده صنعتی و شهری بیش از حد مجاز منجر به فشار بر منابع آبی موجود شده است و رشد جمعیت و توسعه شهرنشینی منجر به افزایش تقاضا برای آب شده است همه این عوامل به‌صورت ترکیبی باعث افزایش فراوانی و شدت خشکسالی و ایجاد وضعیت موجود در منطقه موردمطالعه شده است.

باتوجه‌به اینکه خشکسالی هواشناسی با کاهش بارش و افزایش دما منجر به کاهش رطوبت خاک می‌شود و کشاورزی را مختل می نماید مقایسه بصری نقشه‌های خشکسالی و نقشه‌های تغییر کاربری اراضی نشان می‌دهد مناطق بایر و زمین های برهنه با مناطقی با شدت خشکسالی بالا منطبق است با توجه به اینکه با گذشت زمان فراوانی و شدت خشکسالی ها رو به افزایش است از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ وسعت زمین های بایر و برهنه اضافه شده است و وسعت زمین های کشاورزی آبی و جنگل ها و پوشش های گیاهی متراکم کاسته شده است.

نتیجه‌گیری

یافته های این پژوهش نشان داد خشکسالی‌های شدید و طولانی مدت، فرسایش خاک و کاهش رطوبت را تشدید کرده‌اند و با کاهش سطح آب‌های سطحی و زیرزمینی سبب خشک یا نیمه‌خشک شدن تالاب‌های مهم مانندگاوخونی، بختگان و جازموریان شده است

با بررسی بصری نقشه های کاربری اراضی مشخص شد در حوضه زاینده رود با کاهش بارش و خشک‌شدن زاینده‌رود کاربری اراضی کشاورزی اصفهان به کاربری زمین های بایر یا اراضی مسکونی تغییر یافته است در خوزستان خشک شدن تالاب‌ها و کمبود آب کارون منجر به رهاسازی مزارع و تغییر کاربری آن به زمین های بایر شده است و در سیستان با کاهش آب هیرمند و خشک‌شدن هامون، زمین‌های کشاورزی نابود و باگسترش بیابان‌زایی وسعت زمین های بایر افزایش یافته است، در تهران و کرج فشار مهاجرت ناشی از بحران‌های اقلیمی، زمین‌های کشاورزی حاشیه‌ای را به مناطق مسکونی و صنعتی تبدیل کرده است.

به‌طور کلی، خشکسالی و تغییر اقلیم در ایران منجر به کاهش زمین‌های کشاورزی و مراتع، افزایش اراضی بیابانی، گسترش اراضی شهری و صنعتی، کاهش تنوع زیستی و پوشش گیاهی طبیعی، افزایش ناپایداری اجتماعی و مهاجرت، این تغییرات یک چرخه بازخورد منفی به شکل زیر ایجاد می‌کنند:

تخریب منابع طبیعی ← مهاجرت و فشار بر زمین‌های جدید ← تغییر کاربری بیشتر ← تشدید بحران محیط‌زیستی

از تغییرات مهم پهنه های آبی در ایران از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ می توان به موارد زیر اشاره کرد:

دریاچه ارومیه (شمال‌غرب) :روند کاهش از اوایل ۲۰۰۰ شدت گرفت؛ تا میانه دهه ۲۰۱۰ بخش بزرگی از سطح آب از دست رفت و در برخی گزارش‌ها درصدهای بالایی از سطح دریاچه تا ۲۰۱۵ کاهش یافته است؛ سال‌های مرطوب (مثلاً ۲۰۱۹) موقتا بازگشت آب را نشان دادند اما وضعیت شکننده است. برنامه‌های بازگردانی و مدیریت اجرا شده‌اند اما چالش‌ها ادامه دارد

تالاب انزلی (شمال؛ حاشیه دریای خزر) :کاهش سطح آب و مسائلِ مربوط به رسوب و غنی‌شدن مواد آلی/نیترات، همراه با فشارهای شهری و توریستی؛ مطالعات ماهواره‌ای از تغییر ساختار و کاهش بخش‌های آبی گزارش داده‌اند.

تالاب‌ها/دریاچه‌های هامون (شرق/جنوب‌شرق مرز با افغانستان) :در دهه‌های اخیر تکرار خشک شدن شدید؛ کاهش آب‌رسانی از رودخانه‌ها و تغییرات اقلیمی سبب شده بخش‌های بزرگی خشک شوند و پیامدهای جدی اجتماعی و بهداشتی برای جوامع محلی پدید آید .

دریاچه بختگان، طشک و برخی تالاب‌های جنوبی و مرکزی :در نتیجه کاهش ورودی و استفاده کشاورزی، کاهش شدید سطح آب و خشک شدن بستر گزارش شده است که منبع جدیدی برای ریزگردها شده است.

سواحل و اکوسیستم‌های ساحلی جنوب (مانند جنگل‌های مانگرو) :در بعضی موارد مانند مانگروها رشد یا ثبات مشاهده شده یعنی تغییرات همه‌جانبه یکسان نبوده و برخی اکوسیستم‌های آبی ساحلی ممکن است تحت تأثیر عوامل متفاوت افزایش یافته و یا ثبات داشته‌اند

یه طور کلی ترکیبِ خشکسالی‌های پیوسته، استفاده بی‌رویه آب (برداشت سطحی و زیرزمینی)، ساخت سدها و تغییرات مدیریتی باعث کاهش گسترده پهنه‌های آبی شده است

کاهش بارش و خشکسالی‌های تکرارشونده و افزایش دما/تبخیر به همراه استفاده بیش از حد از منابع آب برای کشاورزی (پمپاژ چاه‌ها، سدسازی و تغییر مسیر رودخانه‌ها) جریان ورودی به تالاب‌ها و دریاچه‌ها را کاهش داده است به طوری که در بازه ۲۰۰۰–۲۰۲۰ بسیاری از تالاب‌ها و دریاچه‌های داخلی ایران کوچک‌تر یا خشک شده‌اند؛ برخی افزایش آب کوتاه‌مدت داشته‌اند، اما اغلب روند کلی کاهشی داشته اند. کاهش شدیدِ سطحِ آبِ دریاچه ارومیه که در اوایل دهه ۲۰۱۰ به اوج رسید، نمادی از این روند است.

در بسیاری از مناطق، زمین‌های زراعی به دلیل کم‌آبی رها و به اراضی بایر تبدیل شده‌اند. نمونه بارز این روند در استان‌های اصفهان، کرمان و یزد دیده می‌شود.

مراتع ایران که حدود نیمی از مساحت کشور را شامل می‌شوند، به شدت در برابر کم‌آبی آسیب‌پذیرند. خشکسالی باعث کاهش پوشش گیاهی، افت تولید علوفه و در بسیاری مناطق تبدیل مراتع به اراضی بیابانی شده است. استان‌های شرقی و جنوبی مانند سیستان و بلوچستان و خراسان جنوبی شاهد این تغییر بوده‌اند.

منابع

رزمی, رباب , عساکره, حسین و مسعودیان, سید ابوالفضل . (۲). تبیین تأثیر تغییر عناصر اقلیمی بر تغییرات کاربری‌های سطح زمین در زیرحوضه‌های حوضه آبریز کارون .مطالعات جغرافیایی نواحی ساحلی89-69 ,(4)3 .

سلاجقه، علی؛ رضوی‌زاده، سمانه؛ خراسانی، نعمت‌الله؛ حمیدی‌فر، مینا و سلاجقه، سوسن (۱۳۹۰). تغییرات کاربری اراضی و آثار آن بر کیفیت آب رودخانه (حوضه آبریز کرخه). محیط‌شناسی، ۳۷(۵۸)، صص. ۸۱-۸۶.

Adger, W. N., Pulhin, J. M., Barnett, J., Dabelko, G. D., Hovelsrud, G. K., Levy, M. (2014). Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press, Provides a human security perspective on the nexus of climate change and violent conflict.

Ahmadi, M., Mirzaei, Z.S., & Dadashiroudbari, A. (2021). Investigation of seasonal distribution and abnormal trend of day and night surface temperature in Iran using MODIS sensor data. Physical Geography Research

Quarterly,
53(3), 351-364. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22059/jphgr.2021.323144.1007615
Berckmans, J., Hamdi, R., Dendoncker, N. (2019). Bridging the Gap Between Policy-Driven Land Use Changes and Regional Climate Projections. Journal of Geophysical Research: Atmospheres. 10.1029/2018JD029207.
Biró. M., Szitár, K., Horváth, F., Bagi, I., and Molnár, Zs. (2013). Detection of long-term landscape changes and trajectories in a Pannonian sand region: comparing land-cover and habitat-based approaches at two spatial scales. COMMUNITY ECOLOGY, 14 (2): pp. 219-230.
Chatterjee, S., Dipak, B., Ansar, K. h. (2014). Detection of Approximate Potential Trend Turning Points in Temperature Time Series (1941-2010) for Asansol Weather Observation Station, West Bengal, India. Atmospheric and Climate Sciences, 4, 64-69
Dengshuai, C., Li, J., Zhou, Z., Liu, Y., Li, T., and Jingya, L. (2018). Simulating and mapping the spatial and seasonal effects of future climate and land -use changes on ecosystem services in the Yanh watershed, China. Environ Sci Pollut Res, 25: 1115-1131.
Froese, R., Janpeter, S. (2019). The Nexus of Climate Change, Land Use, and Conflicts. Current Climate Change Reports, 5: pp. 24–35.
Henry, J., Vaux, J. r., Deborah, B., Edward, R., Cook, P, Gleick, W., Lau, K. M., Levy, M., Elizabeth, L. et al. (2012). Himalayan Glaciers: Climate Change, Water Resources, And Water Security. The National Academies Press.
Kayet, N., Khanindra, P., Abhisek, C., and Satiprasad, S. (2016). Spatial impact of land use/land cover change on surface temperature distribution in Saranda Forest, Jharkhand " Model. Earth Syst. Environ.
Keyantash ،J. and J. Dracup.۲۰۰۲ ،: The quantification of drought: an evaluation of drought indices. Bulletin of the American Meteorological Society 83۱۱۸۰-۱۱۶۷ ،.
Meyer, W, B., Turner, B. L. (1996). Land-use/land-cover change: challenges for geographers. Get Journal, 39 (3), pp. 237-240.
Pilgrim, .C. M., Mikhailova, E. A., Post, C. J., and Hains, J. J. (2014). Spatial and temporal analysis of land cover changes and water quality in the Lake Issaqueena watershed, South Carolina. Environ Monit Assess, 186: 7617-7630.
Qu, R., Cui, X., Yan, H., Ma, E., and Zhan, J. (2013). Impacts of Land Cover Change on the Near-Surface Temperature in the North China Plain. Advances in Meteorology, Volume 2013.
Raupach, T. H., Martius, O., Allen, J. T., Kunz, M., Lasher-Trapp, S., Mohr, S., Rasmussen, K. L., Trapp, R. J., Zhang, Q. (2021). The effects of climate change on hailstorms. Nature Reviews Earth & Environment.
Tabari, H. (2020). Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability, Nature, Scientific RepoRtS, 10: 13768. [In Persian]

Vicente-Serrano S.M. ،Beguería S. ،and López-Moreno J.I. 2010. A Multi–scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index – SPEI. Journal of Climate ، ۲۳(7): 1696– 1718.

Zhuo, W., Dai, E., Wu, Z., and Lin, M. (2019). Future forest dynamics under climate change, land use change, and harvest in subtropical forests in Southern. ChinaLandscape Ecol, 34: pp. 843-863.

The Role of Drought and Climate Change in Land Cover Changes in Iran

Mahmoud Ahmadi [1], Shler Katorani [2]

Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
Remote Sensing and Geographic Information System, Academic Center for Education, Culture and Research (ACECR), Kurdistan, Iran

* Corresponding author: sh.katorani99@gmail.com

Abstract:
Climate change, along with the increasing intensity and duration of droughts over the past two decades in Iran, has had significant impacts, particularly on land use. This study examined land use changes from 2000 to 2020 using the global Land Cover Classification System (LCCS) dataset and assessed drought conditions using the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI). The results indicated a decrease in areas covered by dense vegetation (from 7.6% to 7.3%) and rangelands (from 3.1% to 2.8%), an increase in agricultural lands (from 16.1% to 16.25%), and a reduction in water bodies (from 0.9% to 0.8%). The highest frequency of meteorological drought occurred in central and southeastern Iran, as well as parts of southwestern Iran, including Khuzestan and Bushehr (14.40% to 14.49%). The intensity of meteorological drought in central and southeastern regions fluctuated between -1.65 and -1.85. Regarding hydrological drought, a wider area of the study region experienced severe drought, with its core in southeastern Iran fluctuating between -1.71 and -1.91. Overall, the combination of consecutive droughts, excessive water use (both surface and groundwater extraction), dam construction, and management changes has led to a widespread reduction in water bodies and increased land degradation.
Keywords: Drought, Climate Change, Land Use

تحلیل همدیدی بارش سنگین تابستان ۱۴۰۱ استان یزد (مطالعه موردی: ۷ مرداد ۱۴۰۱)

احمد مزیدی[۱]، حمیده دهقان[۲]

۱- نویسنده مسئول: دانشیار گروه جغرافیای دانشگاه یزد، یزد، ایران
۲- دانشجوی دکتری، دانشگاه یزد، یزد، ایران
mazidi@yazd.ac.ir

چکیده

بارش‌های سنگین از پدیده‌های بحران سازی محسوب می‌شوند که وقوع ناگهانی و شدید آنها منجر به خسارت‌های هنگفتی شده و جبران آن در کوتاه مدت غیرممکن خواهد بود. هدف این تحقیق بررسی عوامل همدیدی موثر بر بارش شدید تابستانه در ایران و بخصوص استان یزد در سال ۱۴۰۱ است. برای تحلیل شرایط همدیدی بارندگی ۷ مرداد ۱۴۰۱ نقشه‌های سطح زمین، تراز میانی ۵۰۰ و نقشه‌های وزش رطوبتی و امگا و چرخندگی تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. برای نمایش شاخص‌های ناپایداری (Si، KI، TTi، Li، Cape) نیز از نمودار ترمودینامیک ایستگاه شیراز استفاده شده است که ناپایداری جو در روز بارش را تایید می‌کند. یافته‌ها نشان داد که در این روز دو مرکز کم فشار پاکستان و کم فشار دریای سرخ در روی ایران گسترش یافته‌اند. از نقشه‌های وزش رطوبتی این گونه استنباط می‌شود که در زمان‌هایی که کم فشار پاکستان شدت و گسترش قابل ملاحظه‌ای داشته است، مسیر حرکت رطوبت از طریق دریاهای سرخ و دریای عمان به سمت شبه قاره هند بوده و از آنجا با حرکت غرب سو از غرب پاکستان جنوب شرق و نواحی مرکزی را متاثر کرده است. در بررسی نقشه تراز ۵۰۰ ژئوپتانسیل پرارتفاع جنب حاره‌ای مستقر بر روی ایران نسبت به روزهای قبل به سمت غرب حرکت کرده و باعث تاثیر موسمی‌ها بر روی ایران می‌شود. در نقشه امگا ۸۵۰ هکتوپاسکال شاخص منفی و هسته صعودی آن بر روی نواحی اکثر مناطق کشور مشاهده می‌شود. نقشه چرخندگی تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال نشان می‌دهد که چرخندگی مثبت بر روی شرق و قسمت‌های مرکزی و غربی کشور قرار دارد که همراه با ناپایداری و بارش در این مناطق بوده است. در ضمن با نفوذ جریان‌های هوایی از عرض‌های بالا به سمت منطقه این مکانیزم شدت یافته است.

کلیدواژه‌ها: بارش سنگین، تحلیل همدید، موسمی، شاخص ناپایداری، یزد

مقدمه

بارش‌های سنگین از پدیده‌های بحران سازی محسوب می‌شوند که وقوع ناگهانی و شدید آنها منجر به خسارت‌های هنگفتی شده و جبران آن در کوتاه مدت غیرممکن خواهد بود. سیل هر ساله در گوشه و کنار کشور، جان تعدادی از انسان‌ها را می‌گیرد و هزاران مترمکعب آب شیرین و هزاران تن خاک ارزشمند را از دسترس خارج ساخته و خرابی‌های فراوانی بر جای می‌گذارد (مرادی و همکاران، ۱۳۹۴). در بارش های سیلابی ۷ مرداد ۱۴۰۱ استان یزد آسیب‌های زیادی به بافت تاریخی شهر یزد وارد شد. ارزیابی اولیه این مناطق حاکی از این بود که از بین کل بناهای تاریخی موجود در شهر یزد دویست بنا به صورت اساسی تخریب شدند، چهارصد بنا تخریب جزئی داشتند، چهار هزار متر طول از قنات‌های شهر جهانی و بسیاری از اموال و تجهیزات موزه‌ها و ادارات نیز آسیب دیدند. مجموع خسارات وارده بر بافت تاریخی، اعم از بناها و قنات‌ها و تاسیسات و زیرساخت‌های شهری و اموال و تجهیزات، مبلغ حدود یک تریلیون و سیصد ریال برآورد شد (اداره کل میراث فرهنگی، گردشگری و صنایع دستی استان یزد: ۱۴۰۱). یکی از انواع حوادث طبیعی که هر ساله باعث به وجود آمدن خسارات زیادی در سراسر جهان می‌شود، وقوع سیلاب‌های ناگهانی و شدید است. این پدیده در ایران، به ویژه در مناطق خشک و بیابانی آن بیشتر رخ می‌دهد.

استان یزد به علت موقعیت جغرافیایی و اقلیمی آن که در منطقه خشک وبیابانی ایران مرکزی قرار دارد، همواره در معرض وقوع سیلاب‌ها قرار دارد و به صورت دوره‌ای خسارات زیادی از این جهت متحمل می‌شود(امیدوار، ۱۳۸۶: ۱۳۷). بارش‌های تابستانی در مرداد ماه سال ۱۴۰۱ در اقصی نقاط کشور منجر به جاری شدن سیلاب به ویژه در استان‌های شرقی و نیمه جنوبی کشور شد. در این سیل ۲۴ استان کشور تحت تاثیر قرار گرفتند و متاسفانه تعدادی از هموطنان جان خود را از دست داده و خانه‌های مسکونی شماری از مردم نیز در تعداد زیادی از شهرها و روستاها دچار آبگرفتی شدند. همچنین خسارات فراوانی به زیرساخت‌های شهری و روستایی وارد گردید، به طوری که ساکنین برخی روستاها ناچار به ترک محل زندگی خود شدند (پژوهشکده سوانح طبیعی، گزارش سیلاب مرداد ۱۴۰۱). رویداد فرینی مانند بارش‌های شدید، باعث رخداد سیلاب‌های بزرگ می‌شود که بر بسیاری از منابع طبیعی مورد نیاز انسان مانند خاک، آب و نیز فعالیت‌های اقتصادی همچون سازه‌های آبی، کشاورزی، گردشگری و حمل و نقل آسیب‌های زیادی وارد می‌نماید (زینالی، ۱۳۹۲: ۲). از آنجا که بسیاری از فرآبندهای محیطی نتیجه‌ی تاثیر گردش‌های جوی هستند، برای تبیین اندرکنش‌های کلیدی میان جو و محیط سطحی توجه به نقش الگوهای گردشی جوی و سامانه‌های فشار در مقیاس همدید لازم و ضروری است. با این توجیه که شدت و ضعف سامانه‌های فشار و الگوهای گردشی جو بر چگونگی و تبیین شرایط و عناصر اقلیمی یک قلمرو جغرافیایی نقش اساسی را ایفا می‌کنند (حلبیان و شبانکاری، ۱۳۹۳: ۱۳۴). وقوع بارش‌های شدید و رگباری در دوره‌ی گرم و کم

بارش تابستانه در کشور نمودهای برجسته تنوع بارش، در عین حال از چالش‌های پایه‌ای در حوزه‌ی پژوهش‌های اقلیمی ایران محسوب می‌شود (مفیدی و همکاران، ۱۳۹۰: ۲۲۷).

مطالعات متعددی در زمینه یافتن الگوهای سینوپتیکی حاکم بر بارش های سنگین در داخل و خارج از کشور صورت گرفته است. بورا و همکاران (Bohra ، ۲۰۰۶) پس از مطالعه‌ی بارش سنگین ۲۶ ژوئیه ۲۰۰۵ در بمبئی به این نتیجه رسیدند که در زمان این بارش، بخش گسترده‌ای از کشور هند، به خصوص در سواحل غربی زیر نفوذ باران‌های موسمی بوده است. در این زمان کم فشاری در غرب رود بنگال و سواحل اوراسیا شکل گرفته و شرایط را برای ورود باران‌های موسمی و جریان‌های قوی استوایی از جنوب فراهم کرده است. هویز (Houze، ۲۰۱۰) به بررسی رویدادهای ناهنجار جوی منتهی به سیل تابستان ۲۰۱۰ پاکستان پرداخت و نتیجه گرفت که این نوع بارش‌ها در پاکستان به طور معمول اتفاق نمی‌افتد و نتیجه‌ی ناهنجاری اقلیمی و جابجایی جریانات جوی از مسیر نرمال خود است. بطوری‌که رخداد این نوع بارش‌ها را در مناطق کوهستانی و تالاب‌ها در شمال شرق هند و بنگلادش دارای بالاترین فراوانی دانست. فلونی و همکاران (Felon & et.al، ۲۰۱۶) به مطالعه سینوپتیکی علت وقوع بارش سنگین فصلی در منطقه آتیکا پرداختند. کایی و همکاران (Kai & et.al، ۲۰۱۷) در بررسی جفت پارامترهای رطوبت دهی در بارش‌های سنگین منطقه‌ای، به این نتیجه رسیدند واگرایی و همگرایی، اساس تغییرات رودباد برای فراهم کردن رطوبت لازم برای بارش‌های سنگین است. بررسی مطالعات صورت گرفته در رابطه بارش‌های سنگین، نشان می‌دهد تحلیل سینوپتیکی و در برخی موارد تحلیل‌های دینامیکی از روش‌های پرکاربرد در زمینه مطالعه بارش‌های سنگین می‌باشند. در مطالعات مذکور عوامل مختلفی برای ایجاد بارش‌های سنگین شناسایی شده است که می‌توان به مواردی از قبیل سیستم‌های کم فشار، ناوه‌های تراز میانی جو، رودبادهای جبهه قطبی و جنب حاره، سردچال، بلاکینگ‌ها و دورپیوندها اشاره کرد. چن و همکاران (Chen & et.al، ۲۰۱۸) بارش شدید ۱۱ تا ۱۲ ژوئن ۲۰۱۲ در شمال تایوان را بررسی کردند و نشان دادند که بارش سنگین ۴۳۵ میلی متری شمال غرب تایوان و ۴۷۷ میلی متری منطقه تایپه در اثر وجود یک جبهه سرد ناشی از یک سامانه امگا شکل ریزش کرده است. یان ژن و همکاران (۲۰۲۰) ضمن بررسی آماری و سینوپتیکی رخداد بارش‌های سنگین در شمال چین به این نتیجه رسیدند که مهم‌ترین عامل بارش سنگین، وجود جت سطح فوقانی جو و توپوگرافی سطح زمین است. بعد از این عامل همگرایی ترازهای بالا و پایین جو نقش اساسی در رخداد بارش منطقه را ایفا می‌کند. لیو و همکاران (۲۰۲۲). با بررسی بارش‌های سنگین در چین به نفش جت استریم‌ها و بادهای زمینگرد در لایه‌های مرزی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که بادهای زمینگرد عمدتا همگرایی با بادهای جت استریم دارند. مفیدی و همکاران (۱۳۹۰) با بررسی الگوهای گردش جو بارش‌های تابستانه در جنوب شرق ایران به این نتیجه رسیدند که وجود مراکز کم فشار در قسمت شمالی خلیج فارس، ضمن افزایش گردش

چرخندی در نیمه جنوبی کشور، با ایجاد جریانات جنوبی مناسب روی جنوب شرق کشور و انتقال رطوبت دریای عمان در لایه کم ضخامت موجب بارش‌های شدید در جنوب شرق کشور شده است. محمود آبادی و همکاران (۱۳۹۵) نقش کم فشار سودانی در تراز دریا و بندال دو قطبی در تراز میانی تروپوسفر را در رخداد بارش‌های سیلابی فروردین ۱۳۹۲ در نیمه جنوبی ایران را حائز اهمیت می‌دانند. خسروی و همکاران (۱۳۹۶) درمطالعه خود نشان دادند که دریای عرب در تراز پایین و دریای مدیترانه در تراز بالا بیشترین نقش را در وزش رطوبتی بارش‌های ایران داشته است. خسروی و همکاران (۱۳۹۸) در بررسی منابع تامین رطوبت رویدادهای بارشی تابستان جنوب شرق ایران به این نتیجه رسیدند که وقوع بارش‌های سنگین در بیشتر مواقع به علت اختلاف فشار حاصل شده بین کم فشار پاکستان و پرفشار تبت بوده است. به علاوه در زمانه‌هایی که کم فشار پاکستان شدت و گسترش فراوانی داشته، مسیر حرکت رطوبت از طریق دریاهای گرم عرب و عمان به سمت شبه قاره هند بوده و از آنجا با حرکت غرب سو، جنوب شرقی ایران را نیز در برگرفته است. زینالی و همکاران (۱۳۹۹) با تحلیل همدیدی بارش سنگین در جنوب استان سیستان و بلوچستان به این نتیجه رسیدند که استقرار سامانه کم فشار بر روی جنوب شرق عربستان و گسترش آن به سمت جنوب شرق ایران همراه با جذب رطوبت از خلیج فارس و دریای عرب عامل اصلی در سطح زمبن برای ایجاد بارش سنگین در منطقه بوده است. ناظم السادات و اسمعیل‌زاده (۱۴۰۱) با تحلیل همدیدی بارش‌های موسمی تابستان ۱۴۰۱ استان فارس نشان دادند که حرکت بندال لایه میانی جو از غرب اروپا به شرق و تضعیف سلول پرفشار جنب حاره‌ای در خاورمیانه، جابجایی هسته واچرخند جنب حاره‌ای به شمال شرق ایران و هم زمانی جابجایی منطقه همگرایی درون حاره‌ای به عرض‌های بالاتر با لانینا، منجر به تقویت و تشدید اثرات فعالیت سامانه موسمی شده است. همچنین گسترش و نفوذ سامانه موسمی از سمت جنوب و جنوب شرقی و شکل‌گیری چرخند روی امارات، خلیج فارس و ادغام آن با چرخند پاکستان در اوج IOD منفی باعث تقویت شار رطوبت و انتقال بیشتر رطوبت از اقیانوس هند و دریای عمان،دریای عرب و خلیج فارس به سوی نیمه کشور شد. بنی نعیمه و همکاران (۱۴۰۲) با تحلیل همدیدی بارش‌های فوق سنگین و تاثیر آن بر آبدهی اوج سیلاب‌های رودخانه دز بیان کردند که سامانه موثر بر بارش‌های فوق سنگین این منطقه سامانه کم فشار سودانی بوده است. مطالعات زیادی در خصوص بارش‌های سنگین و علل وقوع آن در نقاط مختلف جهان و کشور انجام گرفته است که به نتایج مشابه و بعضا متفاوتی در این زمینه رسیده‌اند. لذا منشا هر بارش و بررسی و شناسایی آنها به منظور انجام پیش‌بینی و ارائه هشدارهای لازم جهت جلوگیری و کاستن از خسارات جانی و مالی حائز اهمیت می‌باشد. در تحقیق حاضر با استفاده از تحلیل همدیدی به بررسی سازوکارهای جوی ایجاد کننده بارش سنگین ۷ مرداد ۱۴۰۱ در پهنه مطالعاتی استان یزد پرداخته است که با توجه به اهمیت منطقه و خطرات جانی و مالی ناشی از سیلاب‌های ناگهانی همچنین پیش‌بینی طرح‌ها و پروژه‌های متعددی که برای آینده در

منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته شده، آگاهی از ویژگی‌های همدیدی سیستم‌های جوی جهت برنامه‌ریزی‌های بلند مدت و اجرای پروژه‌های عمرانی امری اجتناب ناپذیر است.

مواد و روش‌ها

موقعیت جغرافیایی استان یزد در ۲۹ درجه و ۵۲ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۱۰ دقیقه عرض شمالی و ۵۲ درجه و ۵۰ دقیقه تا ۵۸ درجه و۱۶ دقیقه طول شرقی واقع شده است. این استان با مساحت ۷۶۴۶۹ کیلومتر مربع در قسمت مرکزی فلات ایران قرار دارد. استان یزد از شمال با استان اصفهان، از شرق با استان خراسان جنوبی، از جنوب با استان کرمان و از غرب به استان فارس محدود می‌شود. در شکل شماره (۱) موقعیت ایستگاه مورد مطالعه مشخص شده است. در این پژوهش به منظور واکاوی الگوی همدیدی منجر به رخداد سیل در استان یزد، داده‌های مربوط به فشار سطح دریا، ارتفاع ژئوپتانسیل، وزش رطوبتی، امگا، چرخندگی برای ترازهای مختلف جوی از داده‌های بازکاوی شده از سایت NCEP /NCAR سازمان ملی جو و اقیانوس‌شناسی ایالات متحده آمریکا استفاده شد. نقشه‌های مربوط با استفاده از نرم افزار GRADS نقشه‌های فشار سطح زمین، ارتفاع تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، امگا، نقشه‌های وزش رطوبتی و نقشه چرخندگی، نمودار هاف مولر رطوبت ویژه، دما، ترسیم و الگوهایی که منجر به بارش شدید، شناسایی و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. برای بررسی بارش تابستان ۱۴۰۱ تحلیلی از یک روز قبل از ورود سیستم تا عبور آنها و خاتمه بارندگی بر روی نقشه‌های همدیدی در ساعت صفر و ۱۲ گرینویچ صورت گرفته است. برای بررسی ناپایداری‌ها و محاسبه شاخص‌های ناپایداری Si، Ki، Li، TT و Cape از داده‌های جو بالای ایستگاه شیراز به علت نزدیکی به منطقه در دوره انتخابی نمونه استفاده شده است. در ادامه تعاریف و جبر آماری این شاخص‌ها آورده شده است.

K INDEX: این شاخص برای محاسبه و آشکارسازی ناپایداری و همرفت در سطوح فوقانی جو استفاده می‌شود. در و در رابطه (۱) روش محاسبه این شاخص آورده شده است.

$$Ki = [T_{850} + T_{500}] + T_{850} - [T_{700} - Td_{700}] \quad (۱)$$

در این رابطه T دما، Td دمای نقطه شبنم در ترازهای مختلف جوی است. هر قدر این شاخص از ۲۰ بیشتر باشد، احتمال ناپایداری‌ها نیز زیادتر می‌گردد و اگر این مقدار به ۳۵ برسد، شدت ناپایداری‌ها قابل توجه خواهد بود.

شاخص بالاروی (Li) این شاخص اختلاف بین دمای محیط و بسته هوا را در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال بیان می‌کند. در رابطه ۲ روش محاسبه این شاخص آورده شده است.

$$Li = T_{500} - T_{P_{500}} \quad (۲)$$

در این رابطه T دما، Td دمای نقطه شبنم در ترازهای مختلف جوی هستند. اگر میزان این شاخص اگر میزان این شاخص مثبت باشد، توده هوا پایدار و هرچه منفی باشد، توده هوا ناپایدار است.

شاخص TTI این شاخص توسط میلر در سال ۱۹۷۲ برای شناخت نواحی که از پتانسیل لازم برای توسعه توفان‌های تندری برخوردارند، پیشنهاد شد. شاخص TTi از جمع دو شاخص همرفتی دیگر (VT) و (VC) محاسبه می‌شود. این روش از رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$\overrightarrow{TT} = \overrightarrow{VT} + \overrightarrow{CT}$$
$$\overrightarrow{TT} = [T_{850} - T_{500} + [Td_{850} - Td_{500}] \quad (۳)$$

شاخص شولتر (Si) این شاخص اختلاف بین دمای محیط و بسته هوا را در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال بیان می‌کند. Si ار تفاضل بین دمای محیط در تراز ۸۵۰ و دمای بسته هوا در همان تراز حاصل می‌گردد. در این شاخص اگر SI<0 باشد حالت ناپایداری در جو وجود دارد. این روش از رابطه (۴) بدست می‌آید:

$$Si = T_{850} - T_{\theta 850} \quad (۴)$$

شاخص Cape: معرف انرژی بالقوه در دسترس برای همگرایی یک بسته هوای در حال صعود و در محیطی بی تلاطم است. مقادیر زیاد Cape گویای اختلاف بیشتر بین دمای محیط و دمای بسته هوای بالاروند است. هرچه این اختلاف بیشتر باشد، نیروی شناوری قوی تر و شتاب بالارو بیشتر خواهد شد (صادقی حسینی ۱۳۸۵).

جدول ۱۶: محدوده شاخص‌های دینامیکی مورد استفاده (سیوتس و همکاران، ۲۰۰۳)

شاخص	میزان ناپایداری و همرفت				
Li	Li>0	0 > LI >-2	-3> Li >-5	-6> Li> -7	LI<-7

	پایدار	ناپایداری ضعیف	ناپایدار	ناپایداری شدید	ناپایداری فوق العاده شدید
Si	Si> 0	1-> Si>-4	-5>Si>-7	-8>Si >-10	Si <-11
	پایدار	ناپایداری مشروط	ناپایداری نسبتا زیاد	ناپایداری شدید	ناپایداری فوق العاده شدید
Ki	Ki <15	15< Ki<25	39<KI <26	Ki >40	
	عدم احتمال همرفت	پتانسیل اندک برای همرفت	پتانسیل متوسط برای همرفت	پتانسیل بالا برای همرفت	
TTi	TT <44	44< TT< 50	51< TT<52	53< TT<56	TT> 56
	عدم احتمال همرفت	احتمال رخداد همرفت	توفان شدید منفرد	توفان‌های شدید پراکنده در مقیاس وسیع	پراکنش توفان-های شدید
Cape	۱ تا ۱۵۰۰	۱۵۰۰ تا ۲۵۰۰	+۲۵۰۰		
	Cape مثبت	Cape وسیع	فوق العادهCape		

بحث و نتایج

تحلیل وضعیت نمودار ترمودینامیکی شاخص‌های ناپایداری

برای بررسی شاخص‌های ناپایداری به دلیل اینکه در ایستگاه یزد برداشت داده‌های جو بالا وجود ندارد، از داده‌های جو بالای ایستگاه شیراز به علت نزدیکی به منطقه استفاده شده است. نمودار ترمودینامیکی ایستگاه شیراز در روز ۲۹ ژولای (۷ مرداد) ساعت ۰/۰ گرینویچ، نشان دهنده وضعیتی ناپایدار در جو می‌باشد. از آنجایی‌که نمودار نیم رخ دما در سمت راست و نمودار نیم رخ رطوبت از سمت چپ به هم نزدیک شده‌اند شاهد یک جو ناپایدار هستیم که هوای ابری و بارانی را شامل می‌شود، لذا نیمرخ جو(Skew-T) بارش‌های سنگین در این روز را توجیه می‌کند (شکل ۲)

بررسی شاخص Ki در روزهای ۶ و ۷ مرداد به ترتیب ۴۰ و ۳۹/۶ نشان داد که وجود ناپایداری هوا و همرفت متوسط و بالا در منطقه با احتمال بارش را مشخص کرد. شاخص TTi در روزهای ۶ و ۷ مرداد به ترتیب ۴۴/۳ و ۴۵/۶ احتمال رخداد همرفت و طوفان در منطقه را نشان داد. مقدار Li در روز ۶ مرداد ۰/۶۳- را نشان داد که احتمال ناپایداری ضعیف و در روز ۷ مرداد ۲/۵۸- را نشان داد که شرایط ناپایدار و وقوع رگبار باران وجود داشت. بررسی شاخص Si در روز ۶ مرداد ۱/۵- است که ناپایداری مشروط را بیان می‌کند و مقدار شاخص در روز ۷ مرداد ۴/۲- است که ناپایداری نسبتا زیاد را نشان می‌دهد. بررسی شاخص Cape در روزهای ۶ و ۷ مرداد به ترتیب ۴۱۳/۳ و ۵۶۷/۶ ژول بر کیلوگرم نشان داد که وضعیت ناپایداری متوسط بوده است.

مقادیر بارش در برخی از ایستگاه‌ها در جدول (۱) آمده است. بررسی آمار بارندگی در هنگام رخداد بارش ۵ تا ۹ مرداد ماه نشان می‌دهد که طی این روزهای بارشی در ایستگاه‌های جنوبی استان بارش ثبت شده است. از مجموع ایستگاه‌ها، طی روز ۷ مرداد، ایستگاه‌های یزد، تفت بارش سنگین بیش از ۳۰ میلی‌متر داشته‌اند و یزد با ۴۸/۲ میلی متر بیشترین مقدار بارش را در این روز داشته‌است. در روز ۸ مرداد ایستگاه مروست با ۳۵ میلی‌متر بارش رکورد دار است. نقشه بارش ایستگاه‌های یزد روزهای ۵ تا ۸ مرداد در شکل (۳)نشان داده شده است. طبق این نقشه، میزان بارش در روزهای ۶ و ۷ مرداد در مناطق جنوبی و جنوب غربی استان بیشترین پراکندگی را نشان می‌دهد.

جدول ۱۷: مقادیر بارش برخی از ایستگاه استان یزد در روزهای ۵ تا ۹ مرداد ۱۴۰۱

روز	۵ مرداد	۶ مرداد	۷ مرداد	۸ مرداد	۹ مرداد	جمع
یزد	-	-	۴۸.۲	۸/۱	-	۵۶/۳
مهریز	-	-	-	۷	-	۷
هرات	۰/۱	۲۹/۶	۱۳	۱۲/۱	۵	۵۹/۸
مروست	-	۳	۱	۳۵	۲	۴۱
گاریز	-	-	۳/۱	۲۲	-	۲۵/۱
تفت	-	-	۳۹	-	-	۳۹

تحلیل‌های همدیدی بارش ۷ مرداد ۱۴۰۱

نقشه فشار سطح زمین در روز قبل از آغاز بارش سیلابی (۶ مرداد) ساعت صفر نشان می‌دهد که دو کم فشار یکی در پاکستان و بر روی دریای عمان و دیگری بر روی دریای سرخ در مناطق شمالی و مرکزی کشور مستقر است و باعث بارش‌هایی در این روز شده است (شکل ۴-الف). زبانه کم فشار ۱۰۰۲ هکتوپاسکال منشعب از کم فشار پاکستان- هند به کم فشار خلیج فارس ملحق شده قسمت اعظمی از ایران فرا گرفته‌اند و زبانه کم فشار خلیج فارس با فشار مرکزی ۱۰۰۰ هکتوپاسکال تا قسمت‌های غرب و شمال غرب کشور گسترش پیدا کرده است. در نقشه سطح زمین ساعت ۱۲ گرینویچ فشار مرکزی سامانه کاهش یافته و تقویت شده است (شکل ۴-ب). در نقشه سطح زمین روز ۷ مرداد ساعت صفر گرینویچ دو مرکز کم فشار پاکستان با فشار مرکزی (۱۰۰۰ هکتوپاسکال) و کم فشار دریای سرخ با فشار ۱۰۰۲ هکتوپاسکال در روی ایران گسترش یافته‌اند.. (شکل ۴-ج). این سیستم‌های کم فشار در ۷ مرداد ساعت ۱۲ نواحی وسیعتری را فراگرفته‌اند و بارش‌های سیلابی در مناطق مرکزی و جنوبی سبب شده‌اند. (شکل ۴-د).

در روز ۶ و ۷ مرداد در تراز ۵۰۰ ژئوپتانسیل پرارتفاع ۵۹۲ دکامتر بر روی قسمت اعظمی از ایران شکل گرفته است (شکل ۵-الف و ب).در نقشه تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال (شکل ۵-ج) مرکز چرخندی با پربند ۳۱۴۰ ژئوپتانسیل متر در موقعیتی پایین‌تر و عقب‌تر از چرخند تراز تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال (شکل ۵-د) با مرکزیت ۱۴۶۰ژئوپتاسیل متر قرار دارد. این ترتیب قرارگیری مراکز چرخندی در تراز قائم به گونه‌ای است که شرایط بسیار مناسبی برای تقویت کم فشارهای روی سطح زمین فراهم می‌شود و باعث نفوذ و گسترش کم فشارهای مستقر بر روی دریای‌های جنوبی کشور می‌شود.

نقشه وزش رطوبتی روز ۶ مرداد تراز ۸۵۰ ساعت صفر نشان می‌دهد که میزان رطوبت در نواحی جنوبی کشور حدود ۱۴ گرم بر کیلوگرم می‌باشد (شکل ۶-الف). در روز ۷ مرداد ساعت صفر نقشه وزش رطوبتی تراز ژئوپتانسیلی ۸۵۰ نشان می‌دهد که میزان رطوبت در نواحی پاکستان و مناطق شرقی و جنوبی کشور حدود ۱۶ گرم بر کیلوگرم می‌باشد (شکل ۶-ب). در ساعت ۱۲ گرینویچ جریان‌های مرطوب تا نواحی مرکزی نیز گسترش یافته‌اند و میزان رطوبت در مناطق مرکزی ایران حدود ۱۲ گرم بر کیلوگرم می‌باشد. نحوه وزش باد به گونه‌ای است که جریان باد رطوبت را از خلیج فارس و دریای عمان به مناطق جنوبی و مرکزی منتقل می‌کند و در افزایش میزان بارش در ایران موثر است.. (شکل ۶-ج).

بررسی الگوهای دمای در ترازهای سطح زمین، ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال نشان داده است که دو روز قبل از حدوث این بارش یعنی ۵ و ۶ مرداد ماه ۱۴۰۱ دمای سطح زمین افزایش یافته است به طور که دمای در روز ۵ مرداد ۳۳/۶ و در روز ۶ مرداد ۳۴/۴ درجه سلسیوس رسیده است، ولی در روز ۷ مرداد دمای سطح زمین نسبت به روز قبل کاهش حدود ۴ درجه سانتی‌گراد داشته است و به مقدار ۲۹/۴ درجه سلسیوس کاهش پیدا کرده است که نشان دهنده عبور سامانه کم فشار و کاهش دمای ناشی از جبهه سرد آن است؛ همچنین وضعیت دما برای ترازهای ۷۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال به صورت کاهش دما می‌باشد که نشان دهنده هوای سرد در عرض‌های بالاتر است. نقشه ترکیبی دمای سطح زمین در روزهای ۷ تا ۸ مرداد کاهش دما در منطقه را نشان می‌دهد (شکل ۶-د).

در نقشه چرخندگی روز ۶ مرداد ساعت ۱۲ گرینویچ نشان می‌دهد چرخندگی مستقر بر روی خلیج فارس و نواحی شرقی وجنوبی ایران مثبت است که در صعود توده‌های هوا و ناپایداری مناطق تاثیر دارد (شکل۷-الف). چرخندگی مثبت و هسته صعود در روز ۷ مرداد در مناطق وسیعتری گسترش پیدا کرده است که با ایجاد جریان چرخندی در نیمه جنوبی کشور، با ایجاد جریانات جنوبی مناسب روی جنوب شرق کشور و انتقال رطوبت دریای عمان به داخل کشور موجب بارش‌های شدید در منطقه شده است(شکل۷-ب). در نقشه امگا ۸۵۰ ژئوپتانسیل در روز ۷ مرداد (شکل ۷-ج) شاخص منفی و هسته صعودی آن بر روی اکثر مناطق کشور مشاهده می‌شود. در نمودار هاف مولر رطوبت ویژه در ترازهای ۱۰۰۰ تا ۵۰۰

ژئوپتانسیل از ۱۲ تا ۲۴ گرم بر کیلوگرم متغیر است. مقادیر رطوبت در این روز بالا بوده و نشانگر مهیا بودن شرایط رطوبتی برای بارش‌های شدید می‌باشد (شکل ۷-د).

نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر جهت تبیین ساز و کار حاکم بر وقوع بارش سیلابی ۷ مرداد ۱۴۰۱ در استان یزد، ساختار گردش و برخی مولفه‌های مهم در مقیاس منطقه‌ای بررسی گردید. بدین منظور با تحلیل نقشه‌های سطح زمین، تراز ۵۰۰ ژئوپتانسیل، وزش رطوبتی تراز ۸۵۰، نقشه امگا و نقشه چرخندگی، نمودار هاف مولر رطوبت ویژه، منشا و منابع رطوبتی بارش‌ها، همچنین مسیر آنها شناسایی شد. برای نمایش شاخص‌های ناپایداری (Si، KI، TTi، Li، Cape) نیز از نمودار ترمودینامیک ایستگاه شیراز استفاده شده است که ناپایداری جو در روز بارش را تایید کرد.

نتایج بررسی‌های سینوپتیکی بیانگر آن بود که در زمان رخداد بارش‌های سنگین، در سطح زمین حاکمیت با الگوی غالب کم فشار پاکستان بوده که این سیستم‌های کم فشار تا قسمت‌های غربی و شمال غربی گسترش پیدا کرده اند و بارش‌های سنگین را به دنبال داشته است. در روز ۷ مرداد دو مرکز کم فشار پاکستان و دریای سرخ در روی ایران گسترش یافته‌اند. از نقشه‌های وزش رطوبتی این گونه استنباط می‌شود که در زمان‌هایی که کم فشار پاکستان شدت و گسترش قابل ملاحظه‌ای داشته و حاکمیت پرفشار آزور در جهت غربی-شرقی محدود بوده است، مسیر حرکت رطوبت از طریق دریاهای سرخ و دریای عمان به سمت شبه قاره هند بوده و از آنجا با حرکت غرب سو از غرب پاکستان جنوب شرق و نواحی مرکزی را متاثر کرده است. در بررسی نقشه تراز ۵۰۰ ژئوپتانسیل پرارتفاع جنب حاره‌ای مستقر بر روی ایران نسبت به روزهای قبل به سمت غرب حرکت کرده و باعث تاثیر موسمی‌ها بر روی ایران می‌شود. در نقشه امگا ۸۵۰ هکتوپاسکال شاخص منفی و هسته صعودی آن بر روی نواحی اکثر مناطق کشور مشاهده می‌شود. نقشه چرخندگی تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال نشان می‌دهد که چرخندگی مثبت بر روی شرق و قسمت‌های مرکزی و غربی کشور قرار دارد که همراه با ناپایداری و بارش در این مناطق بوده است. نقشه ترکیبی دمای سطح زمین کاهش دما در منطقه را نشان می دهد. در همین راستا شبانکاری و حلبیان (۱۳۹۳) به این نتیجه رسیدند که ۱۰ تا ۲۰ درصد از نوسان بارش روزانه در کرانه‌های جنوبی ایران در سطح تراز دریا، با کاهش و افزایش میزان فشار، در عرصه‌های کنش قلمرو استیلای وضعیت موسمی مستقر بر روی جنوب و جنوب شرق آسیا، همچنین الگوی گردشی فشار سودانی مرتبط و همزمان است. پژوهش‌های دیگر بیانگر این هستند که رطوبت اقیانوس هند و دریای عرب درون گردش چرخندی کم فشار پاکستان از طریق دامنه‌های جنوبی کوه‌های هیمالیا و به موازات این کوه‌ها حرکت نموده و با جهت شرقی- غربی از طریق پاکستان به جنوب شرق ایران می‌رسد (سلیقه، ۱۳۸۳). ناظم السادات و اسمعیل زاده (۱۴۰۱) بیان کردند که گسترش و نفوذ سامانه موسمی از سمت جنوب و جنوب شرقی و

شکل‌گیری چرخند روی امارات، خلیج فارس و ادغام آن با چرخند پاکستان باعث تقویت شار رطوبت و انتقال بیشتر رطوبت از اقیانوس هند و دریای عمان، دریای عرب و خلیج فارس به سوی نیمه جنوبی کشور شده است. در ضمن با نفوذ جبهه هوای سرد از عرضهای بالا به سمت منطقه این مکانیزم شدت یافته است.

منابع

امیدوار، ک.، (۱۳۸۶، بررسی . تحلیل شرایط سینوپتیکی و ترمودینامیکی رخداد بارش در منطقه شیرکوه، پژوهش‌های جغرافیایی، شماره ۵۹، دانشگاه تهران.

بنی نعیمه، س.؛ لشکری، ح.؛ قربانیان، ج. و ج. مرشدی، (۱۴۰۲، تحلیل همدیدی بارشه‌های فوق سنگین و تاثیر آن بر آبدهی اوج سیلاب‌های رودخانه دز (سیلاب سال‌های ۱۹۹۳ و ۲۰۰۵)، نشریه مدل سازی و مدیریت آب و خاک، دوره ۳، ص ۵۵-۳۷.

پژوهشکده سوانح طبیعی، گزارش سیلاب مرداد ماه، ۱۴۰۱ (استان‌های تهران، یزد و چهار محال و بختیاری).

حلبیان، ا. ح. و م. شبانکاری، ۱۳۹۳. بررسی ارتباط بین نوسان بارش در سواحل جنوبی دریای خزر و تغییرات فشار تراز دریا، فصلنامه علمی پژوهشی تحقیقات جغرافیایی، جلد ۲۹، شماره ۲، ص ۱۳۴-۱۲۲

خسروی، ی.، دوستکامیان، م. و ا. م. طاهریان، ۱۳۹۶، بررسی وتحلیل الگوی فرارفت رطوبتی بارش‌های فراگیر ایران، فصلنامه علمی-پژوهشی انجمن جغرافیای ایران، شماره ۵۳، دوره ۱۵، ص ۲۵۲.

خسروی، م.، شجاع، ف. و ه. پاکباز، ۱۳۹۸، بررسی منابع تامین رطوبت رویدادهای بارشی تابستانه جنوب شرقی ایران، مجله مهندسی منابع آب، سال یازدهم، ص ۱۴۳-۱۲۷

زینالی، ب.، احدی، م.، حسینی صدر، ع. و ا. سیه سرانی، ۱۳۹۹، تحلیل همدیدی بارش سنگین منجر به سیلاب روز ۱۱ ژانویه ۲۰۲۰ در جنوب استان سیستان و بلوچستان، فصل‌نامه جغرافیای طبیعی، سال دوازدهم، شماره ۵۰، ص ۱۴-۱.

سلیقه، م. ۱۳۸۳، هماهنگی مراکز فشار جنب حاره‌ای در بارش‌های سیل آسای منطقه جنوب و جنوب شرق ایران مطالعه موردی : بارش جولای ۱۹۷۶، فصل‌نامه جغرافیایی سرزمین، سال اول، شماره ۱، ص ۱۱۶-۱۰۵.

صادقی حسینی، ع. ر. و م. رضائیان، ۱۳۸۵، بررسی تعدادی از شاخص‌های ناپایداری و پتانسیل بارورسازی ابرهای همرفتی منطقه اصفهان، مجله فیزیک زمین و فضا، جلد ۳۲، شماره ۲، ص ۹۸-۸۳.

صلاحی، ب. و س. سلیمانی، ۱۴۰۱، واکاوی همدید بارش‌های سیلابی شمال ایران (مطالعه موردی:: بارش سنگین و فراگیر ۱۲ تا ۱۵ مهرماه ۱۳۹۷)، نشریه پژوهش‌های اقلیم شناسی، سال سیزدهم، شماره ۵۱، ص ۳۱-۱۵.

اداره کل میراث فرهنگی، گردشگری و صنایع دستی استان یزد، " گزارش خسارات بارندگی مرداد ماه ۱۴۰۱ استان یزد".

ناظم السادات، م. ج. و ف. اسمعیل زاده، (۱۴۰۱، تحلیل همدیدی بارش‌های موسمی تابستان ۱۴۰۱ استان فارس، اولین همایش بین المللی و دومین همایش ملی مدل سازی و فناوری‌های جدید در مدیریت آب، ۲و ۳ اسفند ماه، دانشگاه بیرجند، ص ۱-۱۰.

مرادی، ع.، خداداده، س. و ز. صمدی، ۱۳۹۴. تحلیل سینوپتیک سیلاب روز ۳ خرداد ۱۳۹۱ رودخانه خیاوچای مشکین شهر"، اولین همایش ملی علوم زمین و توسعه شهری.

محمود آبادی، م.، امیدوار، ک.، نارنگی فرد، م. و م. فاطمی، ۱۳۹۵، تحلیل همدیدی اثرات پدیده بلاکینگ بر بارش سیلابی فروردین ماه ۱۳۹۲ در نیمه جنوبی ایران، نشریه پژوهش‌های اقلیم شناسی، دوره هفتم، شماره ۲۵، ص ۸۲-۶۷.

مفیدی، ع.، علیجانی، ب.، جعفرپور، ز. ع. علی اکبری بیدختی، ۱۳۹۰، الگوهای گردش جو بارش‌های تابستانه جنوب شرق ایران در ماه ژوئیه ۱۹۹۴، مجله فیزیک زمین و فضا، دوره ۳۷، شماره ۳، ص ۲۲۷-۲۰۵

Bohra, A. K., Basu, S., Rajagopal, E.N., Iyengar, G. R., Das Gupta, M., Ashrit, R. and Athiyaman, B. 2006, Heavy rainfall episode over Mumbai on 26 July 2005: Assessment of NWP guidance. Current Science 9:1188-1194.

Chen,Y.L., Ghu,Y.J., Chen, C.S., Tu, C.C.,Teng, J.H. and Lin,P.l. 2018. Analysis and Simulations of a Heavy Rainfall Event Over Northern Taiwan during 11–12 June 2012. Monthly Weather Review. 146, pp.2715-2697.

Feloni, E. Nastos, P. And Mastanguras, I. 2017 Seasonal Synoptic Characteristics of Heavy Rain Events In The Attica Region. 13th International Conference on Meteorology Climatology And Atmospheric Physics. Pp. 1-16

Houze Jr. R. A., Rasmussen K. L., Medina, S., Brodzik S.R., and Romatschke U., 2010. “Anomalous Atmospheric Events Leading to the Summer 2010 Floods in Pakistan”, Bulletin of the American Meteorological Society, Vol 92, Issue 3, Pp 291-298. https://doi.org/10.1175/2010BAMS3173.1

Kai, Y. Zhiwei, Z. And Ming, L. 2017. A Pair of New Moisture Dynamic Diagnostic Parameters For Heavy Rain Location. Springer.130: Pp. 325-331.

Liu, H., Huang, X., Fei, J., Zhang, C., & Cheng, X. 2022. Spatiotemporal features and associated synoptic patterns of extremely persistent heavy rainfall over China. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 127(15), e2022JD036604.

Sioutas, M.V., Flocas, H. A., 2003. Hailstorms in Northern Greece: synoptic patterns and thermodynamic environment, Theoretical and Applied Climatology, No 75, 189–202.

Yanzhen, K. Xindong, O. Shigong, W. Chunqing, D. Kezheng, S. And Yang, Z. 2020: “Statistical Characteristics and Synoptic Situations of Long-Duration Heavy Rainfall Events Over North China”. Earth And Space Science. Pp. 1-18.

Synoptic Analysis Of Heavy Precipitation In The Summer Of 2022 In The Province Of Yazd (Case Study: July 29, 2022)

Ahmad Mazidi[1], Hamideh dehghan.[2]
1- Associate professor of climatology, Yazd University, yazd,Iran
2- PhD student of climatology, University of Yazd, yazd, Iran

Abstract
Heavy precipitation is a critical phenomenon that can cause significant damage due to its sudden and intense nature. The aim of this study is to investigate the synoptic conditions that contributed to the heavy summer precipitation in Iran, especially in Yazd province, in 2022. To analyze the synoptic conditions related to the precipitation on July 29, 2022, surface, 500-hPa and 850-hPa level maps as well as moisture flux, omega and vorticity maps were evaluated. A thermodynamic diagram of the Shiraz station was used to display instability indices (SI, KI, TTi, Li, Cape), which confirmed the atmospheric instability on the day of the rainfall. The results showed that there were two low pressure areas over Iran on that day: the Pakistan low and the Red Sea low. The moisture flux maps showed that as the Pakistan low intensified and expanded, moisture was transported from the Red Sea and Arabian Sea towards the Indian subcontinent and then moved westward, affecting the southwestern and central regions of Iran. Analysis of the 500 hPa geopotential height maps showed that the subtropical high over Iran shifted westward compared to the previous days, resulting in the influence of monsoon systems on Iran. The 850 hPa omega map showed a negative anomaly and an ascending motion core over most of the country. The 850 hPa vorticity map showed a positive vorticity over the eastern, central and western parts of the country, accompanied by instability and precipitation in these regions. the penetration of air currents from high latitudes towards the region has intensified this mechanism

Keywords: Heavy Rain, Synoptic Analysis, Monsoon, Ya

تاثیر تغییرات اقلیمی بر امنیت ملی در ایران؛ ابعاد و نتایج

ناصر سلطانی[۱]، اکبر هوشمند[۲]، روزیتا میراحمدی[۳]،

۱- دکتری جغرافیای سیاسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
۲- دانشجوی دکتری برنامه ریزی آمایش سرزمین، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
۳- دانشجوی دکتری برنامه ریزی آمایش سرزمین، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

چکیده

امروزه مباحث تغییرات اقلیمی یکی از مهم ترین موضوعات مورد بحث در همه کشورهای جهان می باشد؛ دلیل این امر را می‌توان در نقش و تاثیرگذاری تغییرات اقلیمی در ابعاد مختلف، سیاست خارجی و بین المللی، اقتصادی و تولیدی، اجتماعی و جمعیتی، محیط زیست و بنیادهای زیستی، سیاست و امنیت داخلی و کالبدی و زیرساختی جستوجو کرد و ایران در طی دهه‌های اخیر، همواره تحت تاثیر تغییرات اقلیمی بوده است. در این تحقیق که یک تحقیق توصیفی- تحلیلی می باشد، مهمترین هدف آن، دستیابی به میزان تاثیر تغییرات اقلیمی بر امنیت ملی در ایران می باشد که جهت دستیابی به این هدف از روش میدانی و ابزار پرسشنامه(طیف لیکرت) استفاده شده است. جامعه آماری تحقیق نیز شامل نخبگان(دانشگاهی و دولتی و سایر) که در ارتباط با موضوع فعالیت داشته اند می باشند که از بین این جامعه ۴۲ نفر به صورت تصادفی به عنوان نمونه انتخاب شدند. پرسشنامه طراحی شده نیز متشکل از ۶ بعد و ۵۳ گویه می باشد که بعد از طراحی، اقدام به توزیع و سپس گردآوری داده های مورد نظر مبادرت گردید و در نهایت جهت تجزیه و تحلیل داده های گردآوری شده از نرم افزارهای SPSS و LISREL(تحلیل معادلات ساختاری) استفاده گردیده است. که نتایج به دست آمده از آزمون T نشان داد که تمامی امتیازات داده شده به گویه های پرسشنامه دارای امتیازات بالای ۳ می باشند. از نظر نتایج به دست آمده از تحلیل معادلات ساختاری نیز مشخص گردید که، به ترتیب، بیشترین تاثیر تغییرات اقلیمی بر امنیت ملی ایران در بعد محیط زیست و بنیان های زیستی با امتیاز ۱/۰۳ و سپس بعد سیاست و امنیت داخلی با امتیاز ۰/۹۹ و سپس بعد سیاست خارجی و بین المللی با امتیاز ۰/۹۳ و سپس بعداجتماعی و جمعیتی با امتیاز ۰/۹۰ و سپس بعد اقتصادی و تولیدی و بعد کالبدی و زیرساختی با امتیاز ۰/۸۶ می باشد.

کلید واژه:تغییرات اقلیمی، امنیت ملی، ایران

۱. مقدمه

توسعه و رشد اقتصادی و اجتماعی به طور قابل توجهی تحت‌تأثیر شرایط اقلیمی قرار دارد (Zhang & Masron, 2023). اقلیم‌های مناسب نه تنها کیفیت زندگی را بهبود می‌بخشند بلکه سرمایه‌گذاری‌ها را جذب و شیوه‌های پایداری را برای توسعه ترویج می‌دهند (Rozinskaya & Rozinskiy, 2019). یک اقلیم پایدار، محیط سرمایه‌گذاری‌ها را بهبود می‌بخشد، زیرا امنیت اجتماعی- اقتصادی برای جذب سرمایه‌گذاری‌ها که برای رشد پایدار ضروری است حیاتی هستند (Ohotina et al, 2018). ارزیابی تأثیر تغییرات آب و هوایی می‌توانند مسیر توسعه کشاورزی را مشخص و با انتخاب مناسب محصولات کشاورزی و بهینه‌سازی روش‌های کشت، امنیت غذایی و پایداری اقتصادی را تضمین کنند (Steyaert et al, 2022). محیط‌های مساعد برای کارآفرینی که با حمایت دولت و مسئولیت اجتماعی همراه باشد، رشد کسب‌وکارهای کوچک را تقویت و این برای توسعه اقتصادی هر منطقه‌ای ضروری است (Galina et al, 2018).

بهترین شرایط آب و هوایی برای رشد و توسعه اقتصادی و اجتماعی در یک کشور، معمولاً با دماهای معتدل و بارش کافی و عرض جغرافیایی مشخص می‌شود؛ این عوامل به‌طور قابل توجهی بر تولیدات کشاورزی، بهداشت و فعالیت‌های اقتصادی کلی تأثیر می‌گذارند که برای توسعه بسیار حیاتی هستند (Carleton & Hsiang, 2016)، مثلا در شرایط آب و هوایی معتدل، به دلیل مناسب بودن برای فعالیت های مختلف اقتصادی مانند کشاورزی و صنعت، معمولا درآمد و رشد اقتصادی بیشتری مشاهده می‌شود؛ در مقابل، دمای بالا می تواند بهره‌وری را کاهش دهد، به محصولات کشاورزی آسیب برساند و نیاز به انرژی را افزایش دهد، که در نهایت منجر به کاهش تولیدات و عدم رشد اقتصادی می‌گردد (Lyons, 2024). بارندگی ثابت و کافی، به ویژه در مناطقی که به کشاورزی وابسته هستند، بسیار مهم است. نوسانات بارندگی می تواند منجر به خشکسالی یا سیل شود که به تولیدات کشاورزی و ثبات اقتصادی آسیب می‌رساند (Solomon et al, 2022). مناطقی که تغییرات آب و هوایی در آن‌ها کمتر است، معمولاً رشد اقتصادی پایدارتری را در مقایسه با مناطقی که نوسانات شدید آب و هوایی دارند، تجربه می‌کنند. (Zhao & Liu, 2023). مناطقی با شرایط آب و هوایی مطلوب که از فعالیت های اقتصادی متنوع پشتیبانی می‌کند، رشد اقتصادی پایدارتری را تجربه می کنند (Masters & McMillan, 2001).

رسیدن به شرایط آب و هوایی بهینه برای توسعه اقتصادی و اجتماعی توسط عوامل متعددی از جمله نوسانات دما، رویدادهای آب و هوایی شدید و استراتژی‌های ناکافی سازگاری، با موانع جدی مواجه است. این عوامل می‌توانند به طور قابل توجهی بر کشاورزی، سلامت و ثبات اقتصادی تأثیر گذاشته و چالش‌هایی را برای توسعه پایدار ایجاد کنند؛ یکی از این عوامل، دمای بالا است که می‌تواند بهره‌وری کشاورزی را کاهش دهد، میزان مرگ و میر را افزایش و بهره‌وری انسانی را پایین آورد. همچنین می‌تواند خطر درگیری‌ها را افزایش و منجر به رکود اقتصادی شوند (He et al, 2020). عامل دیگر، طوفان‌های استوایی و خشکسالی که خسارات قابل توجهی به زیرساخت‌ها وارد می‌کنند، تولید اقتصادی را کاهش می‌دهند و امنیت غذایی را تهدید می‌کنند (Carleton & Hsiang, 2016). تغییرات اقلیمی امنیت انسانی را با کاهش دسترسی به

منابع طبیعی اساسی تضعیف می‌کند که می‌تواند منجر به افزایش درگیری‌های خشونت‌آمیز به‌ویژه در مناطقی که معیشت جوامع به شدت به منابع حساس و اقلیم وابسته هستند، مشهود است (Barnett & Adger, 2007)؛ مثلا در آفریقا عوامل ناشی از تغییرات اقلیمی به افزایش درگیری و بی‌ثباتی منجر می‌گردد. مطالعات نشان می‌دهند که بین افزایش دما و درگیری‌های مسلحانه رابطه‌ی معناداری وجود دارد (Zaidan, 2024)؛ یا مثلا در افغانستان، تغییر الگوهای بارش و خشکسالی‌های طولانی‌مدت امنیت غذایی را تهدید و مهاجرت‌ها را افزایش می‌دهد که به بی‌ثباتی بیشتر منجر می‌گردد (Fayaz et al, 2024). نظام امنیت بین‌المللی خود می‌تواند خطرات مرتبط با تغییرات اقلیمی را تشدید کند. عواملی مانند نظامی‌سازی و سرکوب فعالیت‌های اقلیمی به ارتباط بین اقلیم و درگیری‌ها کمک می‌کند و تلاش برای کاهش این خطرات را پیچیده‌تر می‌سازند (Conca & Dabelko, 2024). تغییرات اقلیمی به طور فزاینده‌ای به عنوان یک مسئله امنیتی در مقیاس جهانی دیده می‌شود که بر روابط و سیاست‌های بین‌المللی تأثیر می‌گذارد. این مسئله می‌تواند منجر به بی‌ثباتی سیاسی، افزایش مهاجرت و چالش‌هایی برای حاکمیت دولتی، به‌ویژه در مناطق آسیب‌پذیر مانند جوامع توسعه‌نیافته و کشورهای در حال توسعه شود (Mumtaz, 2021). شرایط نامساعد آب و هوایی می‌تواند بر ثبات اقتصادی و انسجام اجتماعی تأثیر بگذارد.

ایران دارای شرایط اقلیمی متنوعی است که تحت تأثیر ویژگی‌های جغرافیایی و تغییرات اقلیمی قرار دارد (Najafi & Alizadeh, 2023). مناطق ساحلی جنوبی شرایط گرم و مرطوبی را تجربه می‌کنند، در حالی که مناطق مرکزی عمدتاً گرم و خشک هستند (Solaimani et al, 2024). اقلیم ایران بسیار متغیر است (Mahmoudi et al, 2019). این افزایش نگران‌کننده خشکسالی‌ها و سیلاب‌ها به دلیل تغییر الگوهای بارش است (Iran’s changing climate over the past 30 years, 2023) و ایران در چند دهه اخیر روندی گرم را تجربه کرده است (Tabari et al, 2011) و با رویدادهای آب و هوایی شدید از جمله گرماهای شدید و فزاینده، خشکسالی‌ها و سیلاب‌ها مواجه بوده است. مناطق جنوبی و جنوب‌شرقی به ویژه در برابر این تغییرات آسیب‌پذیرتر هستند (Naderi et al, 2024). تغییرات اقلیمی تأثیرات گسترده‌ای بر روی ایران داشته که می‌توان آن‌ها را در سه حوزه اقتصادی، اجتماعی و سیاسی بررسی نمود، آثار اقتصادی آن، کاهش تولیدات کشاورزی، تغییرات اقلیمی منجر به رابطه معکوس U شکل بین دما، بارش و تولید محصولات کشاورزی شده است، که نشان می‌دهد هم گرمای شدید و هم بارش‌های بیش از حد می‌توانند به‌طور منفی بر عملکرد محصولات تأثیر بگذارند (Rajabalinejad et al, 2023). افزایش هزینه‌های انرژی، و افزایش تقاضای انرژی با افزایش هزینه‌ها همبستگی دارد که می‌تواند بر بودجه خانوارها و فعالیت‌های اقتصادی، به‌ویژه در مناطق کم‌درآمد فشار وارد کند (Roshan et al, 2018). تاثیر بر منابع آب، خشکسالی‌های مکرر در ایران تأثیر قابل توجهی بر منابع آب دارد و منجر به بحران آب بالقوه‌ای می‌شود که بخشهای وابسته به آب، به‌ویژه کشاورزی و صنعت را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Mehdipour et al, 2022). از آثار اجتماعی اقلیم خشک ایران می‌توان به چالش‌های شدیدی که باعث می‌شود افراد برای جستجوی فرصت‌های بهتر به شهرها مهاجرت

کنند، که این الگوهای مهاجرت منعکس‌کننده نابرابری‌های اجتماعی-اقتصادی هستند، که در استان‌های مرکزی جمعیت بیشتری جذب می‌کنند در حالی که مناطق حاشیه‌ای کاهش جمعیت دارند (Sadeghi et al, 2020). آثار سیاسی تغییرات اقلیمی در ایران که بر تنش‌های محلی و ملی تأثیر می‌گذارند، به‌ویژه در مناطقی با منابع محدود، که دولت‌ها را وادار به بازنگری در سیاست‌های زیست‌محیطی و انرژی می‌کند. این می‌تواند به افزایش همکاری‌های بین‌المللی منجر شود، زیرا کشورهایی مانند ایران ممکن است نیاز به همکاری در زمینه مسائل زیست‌محیطی و تغییرات اقلیمی برای کاهش تنش‌های ناشی از کمبود منابع داشته باشند (Zirman & Rahimi, 2024). به‌طور کلی، تغییرات اقلیمی آثار عمیق و چندبعدی بر روی ایران دارد که نیاز به برنامه‌ریزی و اقدام فوری برای کاهش این اثرات و سازگاری با شرایط جدید را ضروری می‌سازد.

۲. ادبیات نظری و پیشینه پژوهش

تغییرات آب و هوایی به تغییرات قابل توجهی در الگوهای آب و هوایی جهانی و شرایط محیطی اشاره دارد که عمدتاً ناشی از فعالیت‌های انسانی است (Cardoso, 2024). این تغییرات شامل مجموعه‌ای از پدیده‌ها، از جمله گرم شدن جهانی، حوادث جوی شدید و تغییرات در تنوع زیستی می‌شود (Saouter& Gibon, 2024) که همگی تهدیدات جدی برای سلامت انسان و سیستم‌های اکولوژیکی به شمار می‌روند (Cardoso, 2024). این علل شامل، عوامل طبیعی مانند تغییرات در تابش خورشیدی، تغییرات مداری زمین و حرکات تکتونیکی به نوسانات آب و هوایی کمک می‌کنند (Laha, 2024). انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از فعالیت‌های انسانی مانند فعالیت‌های انسانی، به ویژه سوزاندن سوخت‌های فسیلی، گازهای گلخانه‌ای مانند دی‌اکسید کربن و متان را آزاد می‌کنند (Hughes et al, 2024). تغییرات جوی مانند انباشت گازهای گلخانه‌ای در جو باعث افزایش نگهداری گرما می‌شود و اثرات تغییرات آب و هوایی را تشدید می‌کند که به طور قابل توجهی دماهای جهانی را افزایش می‌دهد (Laha, 2024). تغییرات در کاربری زمین با کاهش ذخایر کربن و تغییر در آب و هوای محلی، تغییرات آب و هوایی را تشدید می‌کند (Cemehob, 2024) همه‌ی این دلایل نشان دهنده‌ی انحراف از تغییرات تاریخی آب و هوا است که به دلیل تأثیرات انسانی با سرعتی بی‌سابقه رخ می‌دهد. در کل، تغییرات آب و هوایی یک مسئله چند بعدی است. درک این جنبه‌ها برای توسعه استراتژی‌های مؤثر کاهش، اهمیت دارد (White, 2024).

تغییر اقلیم چالش‌های قابل توجهی برای امنیت ملی به وجود می‌آورد که ابعاد مختلفی از جمله امنیت انسانی، ثبات ژئوپلیتیکی و زیرساخت‌های حیاتی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. رابطه بین تغییر اقلیم و امنیت ملی پیچیده و چندوجهی است و نیازمند تحلیلی جامع و ادغام سیاست‌ها می‌باشد. تأثیرات تغییرات اقلیمی، از جمله تخریب محیط زیست، بلایای طبیعی و کمبود منابع، می‌تواند نارضایتی‌ها را تشدید کند و احتمالاً به خشونت و درگیری منجر گردد (Sullivan & Townsend, 2022). بلایای طبیعی مانند سیل و آتش‌سوزی‌های جنگلی که جان انسان‌ها و زیرساخت‌ها را تهدید می‌کنند (Bhattarai, 2023). این می‌تواند، آسیب‌پذیری‌ها و نارضایتی‌های موجود را تشدید و منجربه درگیری‌ها و تنش‌های

ژئوپلیتیکی شود و بر دینامیک‌های امنیت ملی و بین‌المللی تأثیر بگذارد (Sharmila, 2023). همچنین، بر درگیری‌های مسلحانه سازمان‌یافته درون کشورها تأثیر گذارد، هرچند که عوامل دیگری مانند توسعه اقتصادی پایین و ضعف قابلیت‌های دولتی غالباً تأثیر بیشتری دارند (Podkolzina et al, 2023). تغییرات اقلیم بر امنیت غذایی، کمبود آب و سلامت، می‌تواند امنیت انسانی را تهدید و منجر به مهاجرت‌های گسترده و بی‌ثباتی اجتماعی شود که این می‌تواند منجربه چالش امنیت ملی گردد و حاکمیت و تاب‌آوری اجتماعی را تضعیف کنند (Jalali et al, 2020). تغییرات آب و هوایی با افزایش سطح دریاها، افزایش فراوانی حوادث جوی شدید و تهدیدات قابل توجه برای تنوع زیستی است (Ebert, 2023). پیش‌بینی شده است که این تغییرات منجر به ۲۵۰.۰۰۰ مرگ در سال‌های ۲۰۳۰ تا ۲۰۵۰ شود که نشان‌دهنده نقش موثر آن، به عنوان یک مسئله حیاتی در بهداشت عمومی است (Panda et al, 2023). هم‌چنین تغییرات آب و هوایی به طور نامتناسبی بر جوامع حاشیه‌نشین تأثیر می‌گذارد و منجر به ناامنی غذایی، آبی و از دست دادن معیشت می‌شود (Thomas & Cheung 2024 ,). ظرفیت نهادی ضعیف و نابرابری‌های اجتماعی- اقتصادی همراه با مهاجرت ناشی از تغییرات اقلیمی، به درگیری‌های خشونت‌آمیز کمک می‌کند. تغییرات اقلیمی تنش‌های را تشدید می‌کند و مهاجرت و رقابت بر سر منابع به عنوان عوامل کلیدی درگیری عمل می‌کنند (Makki et al, 2024). در کل، تغییرات اقلیمی به عنوان یک تهدید شناخته می‌شود که می‌تواند آسیب‌پذیری‌های اجتماعی، سیاسی و اقتصادی را تشدید کند (Mach et al, 2019) که برای امنیت بین‌المللی و منافع استراتژیک، تهدیدات مستقیمی برای سرزمین‌های ملی و منافع استراتژیک در خارج از کشور به وجود می‌آورد (Busby, 2008) و نیاز فوری به اصلاح سیاست‌های داخلی برای بهتر ادغام کردن امنیت اقلیمی در چارچوب‌های دفاع ملی ایجاد می‌مند (Alfaro, 2023)؛ بنابراین ضروری است که این خطرات از طریق سیاست‌های ملی مورد توجه قرار گیرد، زیرا تلاش‌های بین‌المللی هنوز به طور کامل تغییر اقلیم را در دستور کار امنیتی قرار نداده‌اند (Sikorsky, 2022).

در زمینه تاثیر تغییرات اقلیمی بر امنیت ملی هم در داخل ایران و خارج از آن تحقیقات زیادی صورت پذیرفته است که از جمله تحقیقات داخلی می توان به تحقیقات سلیمی سبحان و همکاران (۱۴۰۳) در مقاله ای با عنوان تغییر اقلیم و تأثیر آن بر امنیت ملی و بین المللی ایران اشاره کرد که در کانون تغییرات اقلیمی اثرگذار بر زیست بوم ایران، بحران آب قرار دارد که می بایست تهدید امنیتی فوری تلقی شود و دولت ایران سیاست بی تصمیمی را کنار گذاشته و در حوزه سیاست سخت با پیامدهای فراگیر تغییر اقلیم، به شدت مقابله نماید؛ در غیر این صورت، مشروعیت حکومت به عنوان متولی سنتی توزیع آب در کشور با بحران بسیار جدی مواجه می شود. در تحقیق دیگر که توسط اسماعیلی و همکاران (۱۴۰۲) با عنوان تاثیر تغییرات اقلیمی، زیست محیطی و آب و هوایی بر امنیت ملی (مطالعه موردی جمهوری اسلامی ایران) صورت پذیرفت به این امر مهم دست پیدا کردند که مسائل مربوط به تغییرات اقلیمی، زیست محیطی و آب و هوایی به نوعی با یکدیگر وابسته بوده و موجب تأثیر بر امنیت ملی و ایجاد تهدیدات ملی می شوند. در تحقیق سلطانی و همکاران (۱۴۰۱) با عنوان شناسایی مهمترین تغییرات اقلیمی موثر بر امنیت ملی ایران، عوامل اقلیمی به صورت زنجیره ای باهم در ارتباط هستند و کم توجهی

به این مساله می تواند صدمات اقلیمی دیگری در پی داشته باشد و امنیت داخلی و خارجی را تهدید نماید. در مطالعات رومی (۱۴۰۱) که با موضوع تغییرات اقلیمی و پیامدهای آن بر امنیت ملی ایران انجام شد نتایج نشان داد که، پیامدهای تغییرات اقلیمی دومین عامل اصلی تهدید امنیت ملی بعد از یک جنگ اتمی می باشد که دولت باید سخت به آن توجه داشته باشد. در تحقیقی دیگر که توسط اخوان کاظمی و همکاران (۱۳۹۸) با عنوان مطالعه واکاوی تاثیرات تغییرات آب و هوایی بر امنیت بین المللی صورت پذیرفت نتایج نشان داد که، تغییرات آب و هوایی آتی بر همگرایی ملی جوامع و صلح و امنیت پایدار و امنیت نظام بین الملل تأثیراتی غیر قابل انکار بر جای خواهند گذارد و منشأ انواع جدیدی از منازعات خواهند شد.

از مهم ترین تحقیقات خارجی که در این زمینه انجام گرفته است می توان به شفران[130] (2022) در مقاله ای با عنوان تغییر اقلیم، امنیت انسانی بین درگیری و همکاری، به این نتیجه دست پیدا کرد که، جوامع شکننده با توسعه انسانی و ظرفیت تاب‌آوری پایین، عموماً در برابر خطر آب و هوا آسیب پذیرتر هستند که می تواند مهاجرت را تشدید کند. در بررسی های دوان[131] و همکاران (2018) با عنوان بررسی تأثیرات بالقوه سیاست های آب و هوایی چین بر امنیت انرژی این نتایج به دست آمد که، اجرای سیاست آب و هوا به طور کلی برای بهبود امنیت انرژی مفید است. به طور خاص، سیاست آب و هوا به کاهش ریسک سیستماتیک سیستم انرژی چین با توجه به معیارهای شدت انرژی، مخارج انرژی و مصرف سرانه انرژی مستقل از گزینه های مقیاس زمانی کمک می کند. اگر منافع مشترک امنیت انرژی در نظر گرفته شود، انتظار می رود اقتصاد سیاست آب و هوا به طور قابل توجهی بهبود یابد.

130) scheffran

131) duan


تغییرات اقلیمی
سیاسی
اجتماعی
زیست محیطی
کالبدی
اقتصادی
سیاست خارجی
تنشهای دیپلماتیک، تهدید امنیت بین المللی، کاهش ظرفیت تجارت بین المللی، مناقشه بر سر منابع زیستی مشترک، بروز تنش های ژئوپلیتیکی، وابستگی به افزایش شکاف توسعه ای بین کشورها و غیره
سیاست داخلی
کاهش اعتماد بین جامعه و حاکمیت،تنش‌های اجتماعی ،تشدید چالش-های امنیتی نهادهای نظامی،وقوع تنش و درگیری بر سر منابع زیستی، تمرکز سیستم سیاسی بر کنترل و مدیریت چالش ها،تغییر در سیاستگذاری‌ها و بودجه-ریزی دولتی و حکمرانی و غیره
تخریب زیرساخت‌های شهری و ساختمان‌ها، تخریب شبکه ها و سیستم های حمل ونقل، تخریب تاسیسات و شبکه های انرژی، تخریب تاسیسات و شبکه های ارتباطاتی و مخابراتی، تخریب فضاهای شهری و محیط¬های عمومی، تخریب بناهای تاریخی و میراث
کاهش تولیدات کشاورزی،کاهش تولیدات دامی،کاهش تولیدات صنعتی،کاهش جذب درآمدهای گردشگری،کاهش جذب سرمایه-گذاری‌ها،افزایش ریسک موسسات مالی و بیمه‌ای،افزایش نابرابری اقتصادی،کاهش تولید ناخالص داخلی،کندی رشد اقتصادی،افول فعالیت‌های خدماتی
کاهش منابع آب شیرین و خشکسالی،کاهش کیفیت هوا،وقوع فرونشت،افزایش دما، کاهش تنوع زیستی جانوری و گیاهی،تهدید اکوسیستم‌ها آبی،تهدید اکوسیستم‌های جنگلی و مرتعی،تأثیر منفی بر خاک و کیفیت اراضی کشاورزی،افزایش تراز آبی دریاها،وقوع بلایای طبیعی
افزایش بیماری‌ها و مرگ-ومیر،کاهش ضریب امنیت غذایی و بروز سوء تغذیه،کندی رشد جمعیت،وقوع مهاجرت‌های اجباری،فقر و نابرابری‌های اجتماعی،افزایش نرخ بیکاری و تشدید مشاغل کاذب،افت کیفیت زندگی و تغییر در سبک زندگی،تشدید معضلات و ناهنجاری‌های اجتماعی و خانوادگی،تشدید تنش بین گروههای اجتماعی،تضعیف فرهنگ و هویت جوامع بومی

شکل شماره۱:مدل مفهومی تحقیق

۳. مواد و روش تحقیق

۳-۱. محدوده مورد مطالعه

ایران کشوری با وسعت ۱/۶ میلیون کیلومتر مربع، که در مختصات جغرافیایی ۲۵ تا ۴۰ درجه عرض شمالی و ۴۴ تا۶۳ درجه طول شرقی قرار دارد. سرزمین ایران به شکل کلی کوهستانی و نیمه خشک است و میانگین بلندی آن بیش از ۱۲۰۰ متر از سطح دریا است. کشور ایران به دلیل گستردگی و وجود کوهستان های بسیار و زمین های بیابانی و همجواری با دو دریای بزرگ در شمال و جنوب و نیز به علت قرار داشتن در مجاورت نسبی اروپا و دریای مدیترانه و صحرای بزرگ آفریقا و اقیانوس هند و ارتفاعات داخلی آسیا و سرزمین وسیع سردسیری، دارای تنوع اقلیمی فراوانی می باشد(مرکز آمار ایران، ۱۴۰۱). اما در طی چند دهه گذشته کشور ایران دچار تغییر اقلیم شده است. به طوری که، بر اساس گزارش مدیریت منابع آب و سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی در سال۱۳۹۹ برآیند دو وضعیت(میانگین بارش و دما) در مدت 30سال گذشته نشان می دهد در ایران تغییرات اقلیمی شدیدی در حال رخ دادن است که این تغییرات با توجه به وضعیت جهانی بسیار نگران کننده است. به عبارت دیگر بر اساس اطلاعات مرکز ملی خشکسالی و مدیریت بحران سازمان هواشناسی، در طول 30 سال به ازای هر یک دهه، یک درجه افزایش دما به صورت میانگین برای کشور به ثبت رسیده که رقم قابل توجه و هشداری جدی است و حتی به طور قطع آثار افزایش دما در بسیاری از نقاط ایران در طول سه دهه گذشته بسیار بیشتر از سه درجه بوده است. نمودار شماره۱ افزایش دما را در دهه های اخیر در نقاط مختلف کشور نشان می دهد(سلیمی سبحان و همکاران،۱۴۰۳).

۳-۲. روش تحقیق

در این تحقیق که یک تحقیق توصیفی- تحلیلی می باشد، از نظر هدف در زمره تحقیقات کاربردی قرار دارد. که مهمترین هدف آن بررسی تاثیر تغییرات اقلیمی بر امنیت ملی در ایران است که با توجه به اهداف و مولفه های مورد بررسی درصدد آن است ابتدا مهم ترین ابعاد و گویه هایی که تحت تاثیر تغییرات اقلیمی می باشند را شناسایی و سپس به تاثیرگذاری هر یک از این ابعاد و گویه های موردنظر در امنیت ملی ایران پرداخته شود. به همین دلیل ۵۳ گویه در ۶ بعد اصلی یعنی اقتصادی تولیدی، اجتماعی جمعیتی، محیط زیست و بنیاد های زیستی، سیاست و امنیت داخلی، سیاست خارجی و بین

المللی و کالبدی و زیرساختی به عنوان ابعاد و گویه های تاثیر پذیر از تغییرات اقلیمی شناسایی و تقسیم بندی شدند(جدول شماره۱). ابزار گردآوری اطلاعات در این تحقیق از هر دو روش کتابخانه ای(مبانی تئوریکی) و میدانی(پرسشنامه برای گردآوری اطلاعات) استفاده شده است. که بعد از مشخص شدن ابعاد و گویه ها اقدام به طراحی پرسشنامه در قالب طیف لیکرت(۵گزینه ای) مبادرت گردید. و از آنجا که جامعه آماری تحقیق مورد مطالعه نیز، نخبگان دانشگاهی و دولتی(که دارای سابقه فعالیت در زمینه موضوع مورد نظر می باشند) است، بنابراین به صورت تصادفی ۴۲ نفر برای سنجش داده‌های کمی و تعیین رابطه و میزان تاثیر تغییرات اقلیمی بر امنیت ملی در ایران انتخاب شدند. و در نهایت با توزیع و سپس گردآوری پرسشنامه از افراد نمونه، برای تجزیه و تحلیل داده ها از نرم افزار SPSS(آزمونT تک نمونه که جزء آزمون های پارامتریک می باشد) و از نرم افزار LISREL(تحلیل معادلات ساختاری) جهت تجزیه و تحلیل داده ها استفاده شده است.

جدول شماره۱:ابعاد و گویه های مورد استفاده در تحقیق

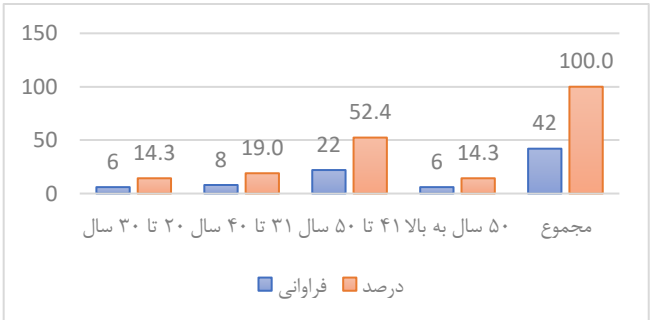
ابعاد	گویه	منبع
سیاست و امنیت داخلی	کاهش اعتماد بین جامعه و حاکمیت،تنش‌های اجتماعی و ناآرامی‌های داخلی،تشدید چالش‌های امنیتی نهادهای انتظامی، نظامی و اطلاعاتی،وقوع تنش و درگیری بر سر منابع زیستی، تمرکز سیستم سیاسی بر کنترل و مدیریت چالشها،تغییر در سیاست‌گذاری‌ها و بودجه‌ریزی دولتی و حکمرانی،افزایش نیاز به مدیریت بحران و آمادگی دفاعی	Gleick ،(۲۰۱۴)،(عراقچی، ۱۳۹۳)، Schaar(۲۰۱۹ ،)
اقتصادی و تولیدی	کاهش تولیدات کشاورزی،کاهش تولیدات دامی،کاهش تولیدات صنعتی،کاهش جذب درآمدهای گردشگری،کاهش جذب سرمایه‌گذاری‌ها،افزایش ریسک موسسات مالی و بیمه‌ای،افزایش نابرابری اقتصادی،کاهش تولید ناخالص داخلی،کندی رشد اقتصادی،افول فعالیت‌های خدماتی	Michel ، ۲۰۱۴)، (Madani و همکاران، Antonelia۲۰۱۷)، United Nations (۲۰۲۲ ،)۲۰۱۵)،
اجتماعی و جمعیتی	افزایش بیماری‌ها و مرگ‌ومیر،کاهش ضریب امنیت غذایی و بروز سوء تغذیه،کندی رشد جمعیت،وقوع مهاجرت‌های اجباری،فقر و نابرابری‌های اجتماعی،افزایش نرخ بیکاری و تشدید مشاغل کاذب،افت کیفیت زندگی و تغییر در سبک زندگی،تشدید معضلات و ناهنجاری‌های اجتماعی و خانوادگی،تشدید تنش بین گروههای اجتماعی،تضعیف فرهنگ و هویت جوامع بومی	(رومی،۱۴۰۱)،(بیانی و همکاران، Alam et al(۲۰۱۵ ،)۱۳۹۳)،
محیط زیست و بنیادهای زیستی	کاهش منابع آب شیرین و حشکسالی،کاهش کیفیت هوا،وقوع فرونشت،افزایش دما، کاهش تنوع زیستی جانوری و گیاهی،تهدید اکوسیستم‌ها آبی،تهدید اکوسیستم-	Ibid ،(۲۰۲۲)، (عراقچی،۱۳۹۳)، ((کاویانی راد، ۱۳۹۵)، (برنا و همکاران، ۱۳۹۸)،(جلالی و همکاران،۱۳۹۹)

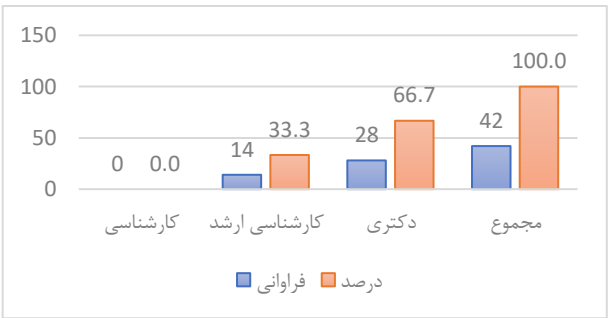
	های جنگلی و مرتعی،تأثیر منفی بر خاک و کیفیت اراضی کشاورزی،افزایش تراز آبی دریاها،وقوع بلایای طبیعی	
سیاست خارجی و بین المللی	تنشهای دیپلماتیک، تهدید امنیت بین‌المللی، کاهش ظرفیت تجارت بین‌المللی، مناقشه بر سر منابع زیستی مشترک، مناقشه بر سر معاهدات و تعهدات بین‌المللی، تشدید موجهای بین‌المللی مهاجرت و پناهندگی، بروز تنش‌های ژئوپلیتیکی، وابستگی به کمک‌های بین‌المللی، تاثیرپذیری از اقدامات مخرب زیستی سایر کشورهاافزایش شکاف توسعه‌ای بین کشورها.	Gleick(۱۳۹۳،عراقچی)، (۲۰۱۴ ،
کالبدی و زیرساختی	تخریب زیرساخت‌های شهری و ساختمان‌ها، تخریب شبکه ها و سیستم های حمل ونقل، تخریب تاسیسات و شبکه های انرژی، تخریب تاسیسات و شبکه های ارتباطاتی و مخابراتی، تخریب فضاهای شهری و محیط های عمومی، تخریب بناهای تاریخی و میراث	(جلالی و همکاران،۱۳۹۹)،(بیانی و و همکاران،۲۰۲۰) Hillهمکاران،۱۳۹۳)،(

۴. یافته های تحقیق

۴-۱. یافته های توصیفی

بر اساس نتایج به دست آمده از جامعه آماری تحقیق مشخص گردید که از ۴۲ نفر از حجم نمونه مورد نظر، از لحاظ سنی(نمودار شماره۱) بیشترین سهم طبقه سنی پاسخ دهندگان بین ۴۱ تا ۵۰ سال می باشد که حدود ۵۲/۴ درصد از حجم پاسخ دهندگان را شامل می باشد و کمترین میزان نیز مربوط است به طبقه سنی ۲۰ تا ۳۰ سال و ۵۰ سال به بالا با میزان ۶ درصد می باشد. از لحاظ تحصیلات(نمودار شماره۲) نیز مشخص گردید که، بیشترین سهم پاسخ دهندگان با ۶۶/۷ درصد دارای مدرک دکتری می باشند و تمامی پاسخ دهندگان دارای مدرک بالاتراز کارشناسی می باشند. از لحاظ داشتن سابقه فعالیت در حوزه نقش تغییرات اقلیمی در امنیت ملی نیز مشخص گردید که ۶۶/۷ درصد از پاسخ دهندگان





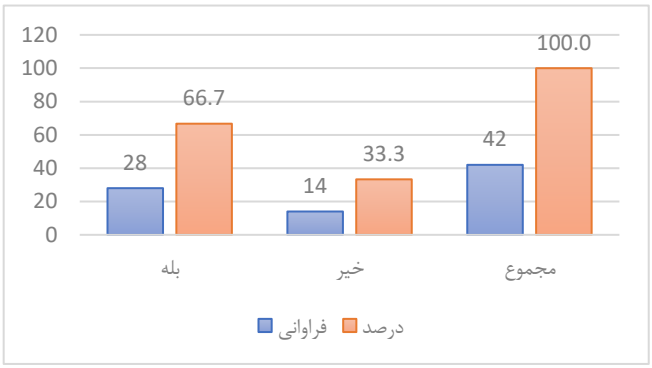
دارای آشنایی با موضوع مورد تحقیق را دارا بوده اند(نمودار شماره۳). بر اساس حوزه فعالیت(نمودار شماره۴) نیز مشخص گردید که بیشتر پاسخ دهندگان در حوزه دانشگاهی با ۸۱ درصد و سپس در سایر حوزه ها با ۱۴/۳ درصد فعالیت دارند.

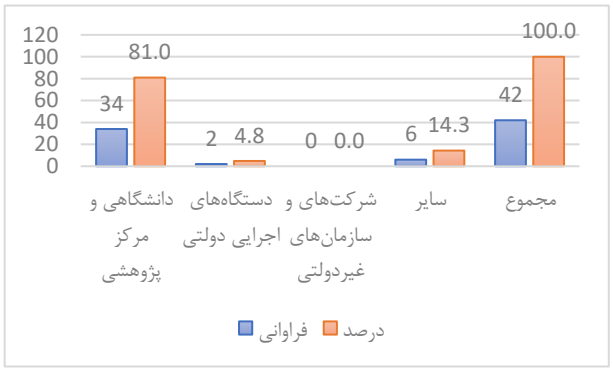
نمودار شماره۲:درصد ویژگی های تحصیلی پاسخ دهندگان

نمودار شماره۱:درصد ویژگی های سنی پاسخ دهندگان

نمودار شماره۳:درصد زمینه فعالیت پاسخ دهندگان

نمودار شماره۴:درصد حوزه فعالیت پاسخ دهندگان





۴-۲. یافته های تحلیلی

۴-۲-۱. آزمون تی(تعیین ارزش امتیازی گویه ها)

برای نتیجه گیری در مورد معنی داری هر یک از گویه های مورد نظر تحقیق در قالب تاثیرات تغییرات اقلیمی بر امنیت ملی ایران در جدول شماره۲ زیر با توجه به مقدار میانگین به دست آمده از آزمون تی تک نمونه می توان پی برد که میانگین عددی تمامی ۵۳ گویه مورد نظر تحقیق که در قالب ۶ بعد: اقتصادی تولیدی، اجتماعی جمعیتی، محیط زیست و بنیاد های زیستی، سیاست و امنیت داخلی، سیاست خارجی و بین المللی و کالبدی و زیرساختی ذکر شده اند همگی دارای امتیاز بالای ۳ می باشند.

جدول شماره۲: آمار تک نمونه‌ای۱۳۲

ابعاد	گویه ها	کد	نمونه	میانگین	انحراف معیار	خطای میانگین انحراف معیار
اقتصادی و تولیدی	کاهش تولیدات کشاورزی	a1	42	4.7619	.57634	.08893
	کاهش تولیدات دامی	a2	42	4.7143	.59615	.09199
	کاهش تولیدات صنعتی	a3	42	4.3095	.68032	.10498
	کاهش جذب درآمدهای گردشگری	a4	42	4.5476	.73923	.11407
	کاهش جذب سرمایه‌گذاری‌ها	a5	42	4.2857	.74197	.11449
	افزایش ریسک موسسات مالی و بیمه‌ای	a6	42	4.6429	.65598	.10122
	افزایش نابرابری اقتصادی	a7	42	4.4048	.70051	.10809
	کاهش تولید ناخالص داخلی	a8	42	4.5714	.54740	.08447
	کندی رشد اقتصادی	a9	42	4.4762	.55163	.08512
	افول فعالیت‌های خدماتی	a10	42	4.5238	.63392	.09782
اجتماعی و جمعیتی	افزایش بیماری‌ها و مرگ‌ومیر	b1	42	4.2143	.97620	.15063
	کاهش ضریب امنیت غذایی و بروز سوء تغذیه	b2	42	4.3095	.84068	.12972
	کندی رشد جمعیت	b3	42	4.0476	.90937	.14032
	وقوع مهاجرت‌های اجباری	b4	42	4.1905	.96873	.14948
	فقر و نابرابری‌های اجتماعی	b5	42	4.1905	.94322	.14554
	افزایش نرخ بیکاری و تشدید مشاغل کاذب	b6	42	4.2381	.79048	.12197
	افت کیفیت زندگی و تغییر در سبک زندگی	b7	42	3.9286	.89423	.13798

132-One-Sample Statistics

	تشدید معضلات و ناهنجاری‌های اجتماعی و خانوادگی	b8	42	3.8095	.83339	.12860
	تشدید تنش بین گروههای اجتماعی	b9	42	3.9524	.98655	.15223
	تضعیف فرهنگ و هویت جوامع بومی	b10	42	3.9524	.96151	.14836
محیط‌زیست و بنیادهای زیستی	کاهش منابع آب شیرین و خشکسالی	c1	42	4.1905	.77264	.11922
	کاهش کیفیت هوا	c2	42	4.0952	.72615	.11205
	وقوع فرونشت	c3	42	4.1190	.86115	.13288
	افزایش دما	c4	42	4.3333	.90167	.13913
	کاهش تنوع زیستی جانوری و گیاهی	c5	42	4.1905	.89000	.13733
	تهدید اکوسیستم‌ها آبی	c6	42	4.1429	.81365	.12555
	تهدید اکوسیستم‌های جنگلی و مرتعی	c7	42	4.0714	.86653	.13371
	تأثیر منفی بر خاک و کیفیت اراضی کشاورزی	c8	42	4.1429	.81365	.12555
	افزایش تراز آبی دریاها	c9	42	4.0952	.87818	.13551
	وقوع بلایای طبیعی	c10	42	4.1667	.88115	.13596
سیاست و امنیت داخلی	کاهش اعتماد بین جامعه و حاکمیت	d1	42	4.5714	.76963	.11876
	تنش‌های اجتماعی و ناآرامی‌های داخلی	d2	42	4.5714	.70340	.10854
	تشدید چالش‌های امنیتی نهادهای انتظامی، نظامی و اطلاعاتی	d3	42	4.1667	.82393	.12714
	وقوع تنش و درگیری بر سر منابع زیستی	d4	42	4.0476	.82499	.12730
	تمرکز سیستم سیاسی بر کنترل و مدیریت چالشها	d5	42	3.7381	.79815	.12316
	تغییر در سیاست‌گذاری‌ها و بودجه‌ریزی دولتی و حکمرانی	d6	42	4.0714	.80828	.12472

	افزایش نیاز به مدیریت بحران و آمادگی دفاعی	d7	42	3.8571	.89909	.13873
سیاست خارجی و بین‌المللی	تنشهای دیپلماتیک	e1	42	4.1905	.89000	.13733
	تهدید امنیت بین‌المللی	e2	42	4.0476	.93580	.14440
	کاهش ظرفیت تجارت بین‌المللی	e3	42	3.9524	.93580	.14440
	مناقشه بر سر منابع زیستی مشترک	e4	42	4.1905	.89000	.13733
	مناقشه بر سر معاهدات و تعهدات بین‌المللی	e5	42	3.9524	.90937	.14032
	تشدید موجهای بین‌المللی مهاجرت و پناهندگی	e6	42	4.1429	.87154	.13448
	بروز تنش‌های ژئوپلیتیکی	e7	42	3.9524	.88214	.13612
	وابستگی به کمک‌های بین‌المللی	e8	42	3.7143	.96993	.14966
	تاثیرپذیری از اقدامات مخرب زیستی سایر کشورها	e9	42	3.9762	.84068	.12972
	افزایش شکاف توسعه‌ای بین کشورها	e10	42	4.0000	.76509	.11806
کالبدی و زیرساختی	تخریب زیرساخت‌های شهری و ساختمان‌ها	f1	42	3.4762	.89000	.13733
	تخریب شبکه‌ها و سیستم‌های حمل‌ونقل	f2	42	3.8571	.95180	.14687
	تخریب تاسیسات و شبکه‌های انرژی	f3	42	3.6905	.94966	.14654
	تخریب تاسیسات و شبکه‌های ارتباطاتی و مخابراتی	f4	42	3.8095	1.06469	.16429
	تخریب فضاهای شهری و محیط‌های عمومی	f5	42	3.6190	1.03482	.15968
	تخریب بناهای تاریخی و میراث	f6	42	3.8571	.92582	.14286

به طوری که با نگاه به جدول شماره۳ زیر می توان پی برد که سطح معنی داری تمامی ۵۳ گویه تقریبا حدود صفر(۰/۰) یعنی کمتر از ۰.۰۵ است، پس بنابراین می توان بیان کرد که تمامی گویه های در نظر گرفته شده تحقیق دارای معنی داری۹۵ درصدی و همگی دارای امتیاز بالای متوسط یعنی۳ می باشند(جدول شماره۳).

جدول شماره۳: آزمون تک نمونه‌ای۱۳۳

ابعاد	گویه	کد	۳= مقدار آزمون					
			مقدار تی	درجه آزادی	سطح معنی داری	اختلاف میانگین	فاصله اطمینان ۹۵٪ برای اختلاف	
							پایین ترین	بالاترین
اقتصادی و تولیدی	کاهش تولیدات کشاورزی	a1	19.812	41	.000	1.76190	1.5823	1.9415
	کاهش تولیدات دامی	a2	18.636	41	.000	1.71429	1.5285	1.9001
	کاهش تولیدات صنعتی	a3	12.475	41	.000	1.30952	1.0975	1.5215
	کاهش جذب درآمدهای گردشگری	a4	13.568	41	.000	1.54762	1.3173	1.7780
	کاهش جذب سرمایه‌گذاری‌ها	a5	11.230	41	.000	1.28571	1.0545	1.5169
	افزایش ریسک موسسات مالی و بیمه‌ای	a6	16.231	41	.000	1.64286	1.4384	1.8473
	افزایش نابرابری اقتصادی	a7	12.996	41	.000	1.40476	1.1865	1.6231
	کاهش تولید ناخالص داخلی	a8	18.604	41	.000	1.57143	1.4008	1.7420
	کندی رشد اقتصادی	a9	17.343	41	.000	1.47619	1.3043	1.6481
	افول فعالیت‌های خدماتی	a10	15.578	41	.000	1.52381	1.3263	1.7214
اجتماعی و جمعیتی	افزایش بیماری‌ها و مرگ‌ومیر	b1	8.061	41	.000	1.21429	.9101	1.5185
	کاهش ضریب امنیت غذایی و بروز سوء تغذیه	b2	10.095	41	.000	1.30952	1.0476	1.5715
	کندی رشد جمعیت	b3	7.466	41	.000	1.04762	.7642	1.3310
	وقوع مهاجرت‌های اجباری	b4	7.964	41	.000	1.19048	.8886	1.4924
	فقر و نابرابری‌های اجتماعی	b5	8.180	41	.000	1.19048	.8965	1.4844

133- One-Sample Test

	افزایش نرخ بیکاری و تشدید مشاغل کاذب	b6	10.151	41	.000	1.23810	.9918	1.4844
	افت کیفیت زندگی و تغییر در سبک زندگی	b7	6.730	41	.000	.92857	.6499	1.2072
	تشدید معضلات و ناهنجاری‌های اجتماعی و خانوادگی	b8	6.295	41	.000	.80952	.5498	1.0692
	تشدید تنش بین گروههای اجتماعی	b9	6.256	41	.000	.95238	.6449	1.2598
	تضعیف فرهنگ و هویت جوامع بومی	b10	6.419	41	.000	.95238	.6528	1.2520
محیط‌زیست و بنیادهای زیستی	کاهش منابع آب شیرین و خشکسالی	c1	9.985	41	.000	1.19048	.9497	1.4312
	کاهش کیفیت هوا	c2	9.775	41	.000	1.09524	.8690	1.3215
	وقوع فرونشت	c3	8.422	41	.000	1.11905	.8507	1.3874
	افزایش دما	c4	9.583	41	.000	1.33333	1.0524	1.6143
	کاهش تنوع زیستی جانوری و گیاهی	c5	8.669	41	.000	1.19048	.9131	1.4678
	تهدید اکوسیستم‌ها آبی	c6	9.103	41	.000	1.14286	.8893	1.3964
	تهدید اکوسیستم‌های جنگلی و مرتعی	c7	8.013	41	.000	1.07143	.8014	1.3415
	تأثیر منفی بر خاک و کیفیت اراضی کشاورزی	c8	9.103	41	.000	1.14286	.8893	1.3964
	افزایش تراز آبی دریاها	c9	8.083	41	.000	1.09524	.8216	1.3689
	وقوع بلایای طبیعی	c10	8.581	41	.000	1.16667	.8921	1.4413
سیاست و امنیت داخلی	کاهش اعتماد بین جامعه و حاکمیت	d1	13.232	41	.000	1.57143	1.3316	1.8113
	تنش‌های اجتماعی و ناآرامی‌های داخلی	d2	14.478	41	.000	1.57143	1.3522	1.7906
	تشدید چالش‌های امنیتی نهادهای انتظامی، نظامی و اطلاعاتی	d3	9.177	41	.000	1.16667	.9099	1.4234
	وقوع تنش و درگیری بر سر منابع زیستی	d4	8.230	41	.000	1.04762	.7905	1.3047

	تمرکز سیستم سیاسی بر کنترل و مدیریت چالشها	d5	5.993	41	.000	.73810	.4894	.9868
	تغییر در سیاست‌گذاری‌ها و بودجه‌ریزی دولتی و حکمرانی	d6	8.591	41	.000	1.07143	.8196	1.3233
	افزایش نیاز به مدیریت بحران و آمادگی دفاعی	d7	6.178	41	.000	.85714	.5770	1.1373
سیاست خارجی و بین‌المللی	تنشهای دیپلماتیک	e1	8.669	41	.000	1.19048	.9131	1.4678
	تهدید امنیت بین‌المللی	e2	7.255	41	.000	1.04762	.7560	1.3392
	کاهش ظرفیت تجارت بین‌المللی	e3	6.596	41	.000	.95238	.6608	1.2440
	مناقشه بر سر منابع زیستی مشترک	e4	8.669	41	.000	1.19048	.9131	1.4678
	مناقشه بر سر معاهدات و تعهدات بین‌المللی	e5	6.787	41	.000	.95238	.6690	1.2358
	تشدید موجهای بین‌المللی مهاجرت و پناهندگی	e6	8.498	41	.000	1.14286	.8713	1.4144
	بروز تنش‌های ژئوپلیتیکی	e7	6.997	41	.000	.95238	.6775	1.2273
	وابستگی به کمک‌های بین‌المللی	e8	4.773	41	.000	.71429	.4120	1.0165
	تاثیرپذیری از اقدامات مخرب زیستی سایر کشورها	e9	7.525	41	.000	.97619	.7142	1.2382
	افزایش شکاف توسعه‌ای بین کشورها	e10	8.471	41	.000	1.00000	.7616	1.2384
کالبدی و زیرساختی	تخریب زیرساخت‌های شهری و ساختمان‌ها	f1	3.467	41	.001	.47619	.1988	.7535
	تخریب شبکه‌ها و سیستم‌های حمل‌ونقل	f2	5.836	41	.000	.85714	.5605	1.1537
	تخریب تاسیسات و شبکه‌های انرژی	f3	4.712	41	.000	.69048	.3945	.9864
	تخریب تاسیسات و شبکه‌های ارتباطاتی و مخابراتی	f4	4.928	41	.000	.80952	.4777	1.1413
	تخریب فضاهای شهری و محیط‌های عمومی	f5	3.877	41	.000	.61905	.2966	.9415
	تخریب بناهای تاریخی و میراث	f6	6.000	41	.000	.85714	.5686	1.1456

۴-۲-۲. تحلیل معادلات ساختاری(لیزرل)

برای تحلیل پیامدهای تغییرات اقلیمی بر امنیت ملی ایران از ۵۳ گویه در قالب ۶ بعد، ۱- سیاست خارجی و بین‌المللی، ۲- اقتصادی و تولیدی، ۳- اجتماعی و جمعیتی، ۴- محیط‌زیست و بنیادهای زیستی، ۵- سیاست و امنیت داخلی و ۶- کالبدی و زیرساختی استفاده شده است (مطابق جدول شماره۳ فوق). به همین دلیل حال با توجه به نتایج به دست آمده از لیزرل به بررسی وضعیت تاثیر گذاری هر یک از این ابعاد و گویه ها به عنوان پیامدهای تغییر اقلیم بر امنیت ملی ایران پرداخته می شود. در مجموع تحلیل معادلات ساختاری به عنوان روشی برای ارائه یک سیستم ارتباطی بین متغیرها است که بر اساس شاخص های برازش شده تهیه شده اند. به طور کلی تحلیل معادلات ساختاری دارای برخی شاخص هایی می باشد که این شاخص‌ها عبارتنداز، GFI(نیکویی برازش)، CFI (برازش تطبیقی)، NNFI(برازش هنجار نشده)، NFI(برازش هنجار شده)، IFI(برازش افزایش)، AGFI(نیکویی برازش تعدیل یافته)، RFI (نیکویی برازش اصلاح شده) و PNFI(برازش تعدیل یافته هنجار شده) می باشد که میزان بیش‌تر از ۰/۹ نشانگر برازش خوب الگو می باشند و RMSEA نیز میانگین مجذور خطاهای مدل می باشد. این مقدارخطا اگر بین۰- ۰/۰۵ باشد ایده آل و اگر بین۰/۰۵ - ۰/۰۹ باشد خطای قابل قبول و اگر بالاتر از۰/۰۹ باشد نشان دهنده خطا بالا است و برازش ضعیف می باشد. مطابق جدول شماره ۴، در این تحقیق نتایج نشان دهنده این می باشد که، ریشه میانگین مربعات خطا برابر با(۰/۰۵۸) است که میزان آن کمتر از ۰/۰۹ می باشد بنابراین با توجه به مقدار به دست آمده در پژوهش مدل از برازش خوبی برخوردار می باشد. شاخص نیکویی برازش مطلوب (۰/۹۰) می باشد پس مدل از برازش قابل قبولی برخوردار می باشد شاخص برازش هنجار شده ۱ می باشد که میزان آن حدود (۰ تا۱) می باشد و به خاطر اینکه اندازه قابل قبولش برای برازش مطلوب مدل(برابر یا بیشتر از ۰/۹) می باشد پس مدل از برازش قابل قبولی برخوردار می باشد، برازش هنجار نشده هم(۱/۳۵) می باشد که میزان آن بین (۰ و بزرگتر از ۱) می باشد. بخاطر اینکه میزان قابل قبول آن برای برازش مطلوب مدل(برابر یا بزرگتر از ۰/۹) می باشد پس از برازش قابل قبولی برخوردار می باشد. برازش افزایشی مساویست با۱/۳۳ ، که میزان آن بین (۰ و بزرگتر از ۱) می باشد و بخاطر اینکه میزان آن برابر برازش مطلوب مدل (برابر یا بزرگتر از ۰/۹) می باشد پس مدل از برازش قابل قبولی برخوردار می باشد شاخص تطبیقی مساوی است با ۱ که میزان آن بین (۰ و بیشتراز۱) می باشد و به خاطر اینکه میزان قابل قبول آن برای برازش مطلوب مدل(برابر یا بیشتر از ۰/۹) می باشد پس مدل از برازش قابل قبولی برخوردار می باشد. سطح معنا داری داده ها ۰/۰۴۲ می باشد.

جدول شماره۴: میزان شاخص‌های نیکویی برازش به دست آمده از تحلیل معادلات ساختاری

شاخص	نتایج	برازش قابل قبول

برازش) نیکویی (شاخصGFI	۰/۹۰	۰/) 9(مساوی یا بیشتر از
نشده) هنجار برازش (شاخصNNFI	۱/۳۵	(مساوی یا بیشتر از۰/۹)
تطبیقی) برازش (شاخصCFI	1	(مساوی یا بیشتر از۰/۹)
افزایش) برازش (شاخصIFI	۱/۳۳	(مساوی یا بیشتر از۰/۹)
اصلاح شده) برازش نیکویی (شاخصRFI	1	(مساوی یا بیشتر از۰/۹)
شده) هنجار برازش (شاخصNFI	1	(مساوی یا بیشتر از۰/۹)
شده) هنجار تعدیل یافته برازش (شاخصPNFI	۰/۹۶	(مساوی یا بیشتر از۰/۹)
برآورد شده) (خطایRMSEA	۰/۰۵۸	(مساوی یا کمتر از ۰/۰۹)

در نمودار شماره۵ که بارهای عاملی استاندارد شده را نشان می دهد، هر چقدر بار عاملی بیشتر و به عدد ۱ نزدیک‌تر باشند دارای حداکثر امتیار تاثیر گذاری را در میان ابعاد و گویه ها را دارد. بار عاملی کمتر از ۰/۳ باشد رابطه ضعیف و در بین عوامل کمترین امتیاز تاثیر گذاری را شامل می باشد، و اگر بارعاملی بین ۰/۳ تا ۰/۶ باشد قابل قبول می باشد و با توجه به نتایج نمودارشماره ۵ مشخص می شود که از بین ۶ ابعاد مورد نظر به ترتیب بیشترین تاثیر گذاری تغییرات اقلیمی در امنیت ملی ایران در زمینه،۱- محیط‌زیست و بنیادهای زیستی با امتیاز تاثیرپذیری۱/۰۳، ۲- سیاست و امنیت داخلی با امتیاز تاثیرپذیری ۰/۹۹، ۳- سیاست خارجی و بین‌المللی با امتیاز تاثیرپذیری۰/۹۳، ۴- اجتماعی و جمعیتی با امتیاز تاثیرپذیری ۰/۹۰، ۵-اقتصادی و تولیدی با امتیاز تاثیرپذیری ۰/۸۶ و ۶- کالبدی و زیرساختی با امتیاز تاثیرپذیری ۰/۸۶ می باشند. در زمینه میزان تاثیرگذاری تغییرات اقلیمی در هر یک از گویه های ابعاد۶ گانه تحقیق نیز نتایج به دست آمده بدین شرح زیر می باشد که در بعد اقتصادی و تولیدی، از ۱۰ گویه مورد نظر گویه ای که دارای بالاترین امتیاز تاثیرپذیری بالاتراز۰/۶ را دار می باشد عبارتنداز؛ a1 کاهش تولیدات کشاورزی با امتیاز تاثیرپذیری (0/87) و دو گویه a8 کاهش تولید ناخالص داخلی با امتیاز تاثیرپذیری (۰/01) وa10 افول فعالیت‌های خدماتی با امتیاز تاثیرپذیری (۰/01) دارای کمترین تاثیر پذیری را دارا می باشند.از نظر بعد اجتماعی و جمعیتی، نیز که دارای ۱۰ گویه می باشد،بیشترین امتیاز تاثیر پذیری مربوط است به گویه b10 تضعیف فرهنگ و هویت جوامع بومی دارای امتیاز تاثیرپذیری (۰/۶۴) و کمترین تاثیر پذیری نیز مربوط است به گویه b3 کندی رشد جمعیت با امتیاز تاثیرپذیری (0/46) می باشد. از نظر بعد محیط‌زیست و بنیادهای زیستی، نیز بیشترین تاثیر پذیری مربوط است به گویه c4 افزایش دما با امتیاز تاثیرپذیری (0/67) و کمترین تاثیر پذیر نیز مربوط می شود به گویه c5کاهش تنوع زیستی جانوری و گیاهی با امتیاز تاثیرپذیری (0/49) می باشد.از نظر بعد

سیاست و امنیت داخلی نیز می توان بیان کرد که بیشترین تاثیر پذیری گویه ها مربوط است به گویه d1 کاهش اعتماد بین جامعه و حاکمیت با امتیاز تاثیرپذیری (۰/68) و کمترین تاثیر پذیری نیز مربوط است به گویه d5 تمرکز سیستم سیاسی بر کنترل و مدیریت چالشها با امتیاز تاثیرپذیری (۰/59) می باشد. در بعد سیاست خارجی و بین‌المللی هم مشخص شد که بیشترین تاثیر پذیری مربوط است به گویهe9 تاثیرپذیری از اقدامات مخرب زیستی سایر کشورها با امتیاز تاثیرپذیری (۰/67) و کمترین تاثیر پذیری نیز مربوط است به گویهe8 وابستگی به کمک‌های بین‌المللی با امتیاز تاثیرپذیری (۰/52) می باشد. و در نهایت در بعد کالبدی و زیرساختی نیز بیشترین تاثیر پذیری مربوط است به گویه f2 تخریب شبکه‌ها و سیستم‌های حمل‌ونقل باامتیاز تاثیر پذیری(۰/۶۴) و کمترین تاثیر پذیری نیز مربوط است به گویه f6 تخریب بناهای تاریخی و میراث با امتیاز تاثیرپذیری(۰/۲۷) می باشد.

در کنار تاثیرپذیری مستقیم گویه ها از تغییرات اقلیمی، تاثیرپذیری غیر مستقیم نیز وجود دارد که به میزان امتیاز ابعاد و امتیاز خود گویه بستگی دارد و هر چقدر امتیاز هردو بیشتر باشد میزان تاثیر پذیری غیر مستقیم نیز بیشتر می شود. بنابراین با نگاهی به جدول شماره۵ زیر می توان به این نتیجه رسید که از بین گویه هایی که دارای بیشترین تاثیر پذیری غیر مستقیم را از تغییرات اقلیمی داشتند عبارتنداز: کاهش تولیدات کشاورزی، کندی رشد اقتصادی، افزایش دما، کاهش اعتماد بین جامعه و حاکمیت می باشند. که وضعیت سایر گویه ها را نیز می توان در جدول شماره۵ زیر مشاهده نمود.

جدول شماره۵: تاثیرپذیری مستقیم و غیر مستقیم گویه ها از تغییرات اقلیمی

ابعاد	گویه	تاثیر پذیری مستقیم	تاثیر پذیری غیر مستقیم
اقتصادی و تولیدی(۰/۸۶)	کاهش تولیدات کشاورزی	۰/۸۷	۰/۷۴
	کاهش تولیدات دامی	۰/۰۴	۰/۰۳
	کاهش تولیدات صنعتی	۰/۰۲	۰/۰۱
	کاهش جذب درآمدهای گردشگری	۰/۴۷	۰/۴۰
	کاهش جذب سرمایه‌گذاری‌ها	۰/۶۳	۰/۵۴
	افزایش ریسک موسسات مالی و بیمه‌ای	۰/۶۷	۰/۵۷
	افزایش نابرابری اقتصادی	۰/۰۲	۰/۰۱
	کاهش تولید ناخالص داخلی	۰/۰۱	۰/۰۰۸۶

	کندی رشد اقتصادی	۰/۷۵	۰/۶۴
	افول فعالیت‌های خدماتی	۰/۰۱	۰/۰۰۸۶
اجتماعی و جمعیتی(۰/۹۰)	افزایش بیماری‌ها و مرگ‌ومیر	۰/۴۷	۰/۴۲
	کاهش ضریب امنیت غذایی و بروز سوء تغذیه	۰/۶۱	۰/۵۴
	کندی رشد جمعیت	۰/۴۶	۰/۴۱
	وقوع مهاجرت‌های اجباری	۰/۶۱	۰/۵۴
	فقر و نابرابری‌های اجتماعی	۰/۵۰	۰/۴۵
	افزایش نرخ بیکاری و تشدید مشاغل کاذب	۰/۶۱	۰/۵۴
	افت کیفیت زندگی و تغییر در سبک زندگی	۰/۴۹	۰/۴۴
	تشدید معضلات و ناهنجاری‌های اجتماعی و خانوادگی	۰/۵۶	۰/۵۰
	تشدید تنش بین گروههای اجتماعی	۰/۶۳	۰/۵۶
	تضعیف فرهنگ و هویت جوامع بومی	۰/۶۴	۰/۵۷
محیط‌زیست و بنیادهای زیستی(۱/۰۳)	کاهش منابع آب شیرین و خشکسالی	۰/۶۰	۰/۶۱
	کاهش کیفیت هوا	۰/۵۷	۰/۵۸
	وقوع فرونشت	۰/۵۲	۰/۵۳
	افزایش دما	۰/۶۷	۰/۶۹
	کاهش تنوع زیستی جانوری و گیاهی	۰/۴۹	۰/۵۰
	تهدید اکوسیستم‌ها آبی	۰/۵۷	۰/۵۸
	تهدید اکوسیستم‌های جنگلی و مرتعی	۰/۶۰	۰/۶۱
	تأثیر منفی بر خاک و کیفیت اراضی کشاورزی	۰/۶۵	۰/۶۶
	افزایش تراز آبی دریاها	۰/۶۱	۰/۶۲

	وقوع بلایای طبیعی	۰/۵۰	۰/۵۱
سیاست و امنیت داخلی(۰/۹۹)	کاهش اعتماد بین جامعه و حاکمیت	۰/۶۸	۰/۶۷
	تنش‌های اجتماعی و ناآرامی‌های داخلی	۰/۶۶	۰/۶۵
	تشدید چالش‌های امنیتی نهادهای انتظامی، نظامی و اطلاعاتی	۰/۶۶	۰/۶۵
	وقوع تنش و درگیری بر سر منابع زیستی	۰/۶۳	۰/۶۲
	تمرکز سیستم سیاسی بر کنترل و مدیریت چالشها	۰/۵۹	۰/۵۸
	تغییر در سیاست‌گذاری‌ها و بودجه‌ریزی دولتی و حکمرانی	۰/۶۶	۰/۶۵
	افزایش نیاز به مدیریت بحران و آمادگی دفاعی	۰/۶۰	۰/۵۹
سیاست خارجی و بین‌المللی(۰/۹۳)	تنشهای دیپلماتیک	۰/۵۶	۰/۵۲
	تهدید امنیت بین‌المللی	۰/۵۷	۰/۵۳
	کاهش ظرفیت تجارت بین‌المللی	۰/۵۶	۰/۵۲
	مناقشه بر سر منابع زیستی مشترک	۰/۶۴	۰/۵۹
	مناقشه بر سر معاهدات و تعهدات بین‌المللی	۰/۶۱	۰/۵۶
	تشدید موجهای بین‌المللی مهاجرت و پناهندگی	۰/۵۵	۰/۵۱
	بروز تنش‌های ژئوپلیتیکی	۰/۵۸	۰/۵۳
	وابستگی به کمک‌های بین‌المللی	۰/۵۲	۰/۴۸
	تاثیرپذیری از اقدامات مخرب زیستی سایر کشورها	۰/۶۷	۰/۶۲
	افزایش شکاف توسعه‌ای بین کشورها	۰/۶۵	۰/۶۰

کالبدی و زیرساختی(۰/۸۶)	تخریب زیرساخت‌های شهری و ساختمان‌ها	۰/۵۸	۰/۴۹
	تخریب شبکه‌ها و سیستم‌های حمل‌ونقل	۰/۶۴	۰/۵۵
	تخریب تاسیسات و شبکه‌های انرژی	۰/۵۱	۰/۴۳
	تخریب تاسیسات و شبکه‌های ارتباطاتی و مخابراتی	۰/۵۲	۰/۴۴
	تخریب فضاهای شهری و محیط‌های عمومی	۰/۴۹	۰/۴۲
	تخریب بناهای تاریخی و میراث	۰/۲۷	۰/۲۳

در نمودار شماره ۶ زیر که نشان دهنده میزان همبستگی ابعاد ۶ گانه تحقیق(یعنی،۱- سیاست خارجی و بین‌المللی، ۲- اقتصادی و تولیدی، ۳- اجتماعی و جمعیتی، ۴- محیط‌زیست و بنیادهای زیستی، ۵- سیاست و امنیت داخلی و ۶- کالبدی و زیرساختی) می باشد. یک نوع همبستگی و ارتباط منطقی و معنا دار در ارتباط ابعاد نسبت به همدیگر ایجاد شده است، و بر اساس نتایج این تحقیق بیشترین همبستگی ها بین ابعاد محیط زیست و بنیان های زیستی با سیاست و امنیت داخلی با امتیاز (۱/۰۲) و بعداز آن بین محیط زیست و بنیان های زیستی با اجتماعی و جمعیت با امتیاز (۰/۹۲) و بین سیاست و امنیت داخلی با سیاست خارجی و بین المللی با امتیاز(۰/۹۲) می باشند و وضعیت همبستگی سایر ابعاد را نیز می توان در نمودار شماره ۶ زیر مشاهده نمود؛که نتایج کلی نشان از تاثیرپذیری هر یک از ابعاد امنیت ملی از تغییرات اقلیمی در ایران می باشند.

نمودار شماره ۶: خروجی Y-Model مدلسازی معادلات ساختاری تاثیرات تغییرات اقلیمی بر امنیت ملی ایران

۴-۳.بحث و نتیجه گیری تحقیق

صلح و امنیت آینده جهان در ارتباطی تنگاتنگ با مساله تغییرات آب و هوایی و اقلیمی می باشد. از این رو بروز تغییرات اقلیمی، امنیت جهان را با خطر مواجه خواهد ساخت. تغییراتی که می تواند به بروز جنگ ها و منازعات داخلی و خارجی ختم شود. فلذا شناسایی این تغییرات و تبعات ناشی از آنها در راستای پایدارسازی آنها و پیشگیری از پیامدهای منفی آنها از ضروریات می باشد.

بنابراین در این تحقیق که یک تحقیق توصیفی-تحلیلی می باشد، با هدف بررسی تاثیر تغییرات اقلیمی بر امنیت ملی در ایران انجام شده است.که جهت انجام آن از روش میدانی(پرسشنامه ای) و در قالب لیکرت(۵ گزینه ای) استفاده کرده است.

از نظر جامعه مورد استفاده نیز ۴۲ نفر به صورت تصادفی از دانشگاهیان، کارکنان دولتی و سایر افراد(که سابقه فعالیت و مطالعه در موضوع مورد نظر را داشتند) به عنوان نمونه انتخاب شدند و جهت تجزیه و تحلیل داده های گردآوری شده نیز از نرم افزارهای SPSS و LISREL(تحلیل معادلات ساختاری) استفاده شده است.

در نهایت نتایج به دست آمده نیز بدین شرح می باشد که، از بین ۶ بعد اصلی،۱- سیاست خارجی و بین‌المللی، ۲- اقتصادی و تولیدی، ۳- اجتماعی و جمعیتی، ۴- محیط‌زیست و بنیادهای زیستی، ۵- سیاست و امنیت داخلی و ۶- کالبدی و زیرساختی، بیشترین تاثیر گذاری تغییرات اقلیمی مربوط می باشد به بعد محیط زیست و بنیان های زیستی با امتیاز ۱/۰۳ . که این نتیجه نشان دهنده این می باشد که تغییرات اقلیمی اول از همه بیشترین تاثیر خودرا در بعد محیط زیست نظیر گویه های افزایش دما(امتیاز ۰/۶۵)،تاثیر منفی بر خاک و کیفیت اراضی کشاورزی(امتیاز۰/۶۵) و افزایش تراز آبی دریاها(امتیاز ۰/۶۱) و غیره خواهد داشت. که نمونه این نتایج را نیز می توان در مطالعاتی که اسماعیلی و همکاران در سال ۱۴۰۲ در مقاله ای با عنوان تاثیر تغییرات اقلیمی، زیست محیطی و آب وهوایی بر امنیت ملی در جمهوری اسلامی ایران انجام دادند و یافته های آن ها نیز مشخص کرد که بیشترین تاثیر تغییرات اقلیمی در محیط زیست به ویژه در گویه افزایش دما و مسائل مربوط به آب ها خواهد بود و یا در مطالعات دیگری که توسط سلطانی و همکاران در سال ۱۴۰۱ با عنوان شناسایی مهمترین تغییرات اقلیمی موثر بر امنیت ملی ایران انجام پذیرفت مشخص گردید که تغییرات اقلیمی بیشترین نقش و تاثیر گذاری را در بعد محیط زیستی و نظیر گویه های افزایش دما، کاهش بارندگی و بروز خشکسالی دارد مشاهده کرد.

دومین بعدی هم که در این تحقیق دارای بیشترین تاثیر پذیری را از تغییرات اقلیمی دارد بعد سیاست و امنیت داخلی با امتیاز ۰/۹۹ می باشد که در آن نیز گویه هایی نظیر، کاهش اعتماد بین جامعه و حاکمیت(امتیاز۰/۶۸)،ایجاد تنش‌های اجتماعی و ناآرامی‌های داخلی(امتیاز ۰/۶۶)،تشدید چالش‌های امنیتی نهادهای انتظامی، نظامی و اطلاعاتی(امتیاز۰/۶۶)، تغییر در سیاست‌گذاری‌ها و بودجه‌ریزی دولتی و حکمرانی(امتیاز۰/۶۶) همواره دارای بیشترین تاثیر پذیری را از تغییرات اقلیمی دارند. که نمونه نتایج این بعد را نیز می توان در تحقیقاتی که رومینا(۱۴۰۳) در مقاله ای با عنوان تاثیر تغییرات اقلیمی بر امنیت داخلی در ایران انجام داد و نتایج آن ها نیز مشخص کرد که تغییرات اقلیمی تأثیرات قابل توجهی بر امنیت داخلی ایران دارد. از جمله این تأثیرات می توان به افزایش تنش های اجتماعی و فشار بر زیرساخت های شهری اشاره کرد.

سومین بعد هم که در این تحقیق از تغییرات اقلیمی تاثیر می پذیرد بعد سیاست خارجی و بین المللی با امتیاز ۰/۹۳ می باشد که در آن هم گویه هایی نظیر تاثیرپذیری از اقدامات مخرب زیستی سایر کشورها(امتیاز۰/۶۷)، افزایش شکاف توسعه ای بین کشورها(امتیاز ۰/۶۵) و مناقشه بر سر منابع زیستی مشترک(امتیاز۰/۶۴) می باشند که نمونه نتایج این بعد را نیز

می توان در تحقیقاتی که کامران و همکاران(۱۳۹۶) در بررسی های خود با عنوان امنیت زیست محیطی و امنیت ملی ایران در بستر تحولات هیدروپلیتیک مرزی مطالعه موردی: هریرود انجام دادند و نتایج آن ها نیز مشخص کرد که با توجه به موقعیت بالادستی سد سلما با در نظر گرفتن فاکتور فصلی بودن آب هریرود، می تواند موضوع امنیت زیست محیطی باشد و از منظر امنیت ملی، با توجه به انداز چشم وابستگی شهرهای بزرگ منطقه شمال شرقی کشور به منابع آب این رود و بالا بودن ریسک امنیت آبی کشور، می تواند باعث ایجاد چالش بین کشورهای ایران، افغانستان و ترکمنستان باشد. در جهت مدیریت مطلوب چالش مذکور، داشتن نگاه سیستمی، در قالب رویکردهای حقوقی، اقتصادی و سیاسی ضروری می باشد.

چهارمین بعد هم اجتماعی و جمعیتی با امتیاز ۰/۹۰ می باشد که گویه هایی که در این بعد دارای بیشترین تاثیر پذیری را از تغییرات اقلیمی دارند نیز شامل، تضعیف فرهنگ و هویت جوامع بومی(امتیاز ۰/۶۴)، تشدید تنش بین گروه های اجتماعی(امتیاز ۰/۶۳) و گویه های کاهش ضریب امنیت غذایی و بروز سوء تغذیه- وقوع مهاجرت‌های اجباری و فقر و نابرابری‌های اجتماعی همگی با امتیاز ۰/۶۱ می باشند که نمونه نتایج این بعد را نیز می توان در تحقیقاتی که حافظی بیر گانی و همکاران(۱۴۰۳) در بررسی های خود با عنوان تحلیل تأثیرات اقتصادی و اجتماعی تغییرات اقلیمی بر معیشت و فرهنگ ایل بختیاری انجام دادند و نتایج آن ها نیز مشخص کرد که تغییرات اقلیمی در چند سال اخیر، منجر به کوچ نشینی و در نتیجه باعث تغییر در الگوهای فرهنگی و اجتماعی به خصوص یکجانشینی ایل بختیاری شده است.

و پنجمین بعد تاثیر پذیر از تغییرات اقلیمی نیز بعدهای اقتصادی و تولیدی و بعد کالبدی و زیرساختی با امتیاز های ۰/۸۶ می باشند که در بعد اقتصادی و تولیدی گویه های کاهش تولیدات کشاورزی(امتیاز۰/۸۶)،افزایش ریسک موسسات مالی و بیمه‌ای(امتیاز ۰/۷۵) و کندی رشد اقتصادی(امتیاز۰/۶۷) دارای بیشترین تاثیر پذیری را می باشدکه نمونه نتایج این بعد را نیز می توان در تحقیقاتی که خالقی و همکاران(۱۳۹۳) در مطالعات خود با عنوان اثر تغییر اقلیم بر تولید بخش کشاورزی و بر اقتصاد ایران انجام دادند و نتایج آن ها نیز مشخص کرد که که در اثر تغییر اقلیم پیش بینی شده برای ایران در دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۵, تولید کشاورزی ۵/۳۷ درصد کاهش می یابد همچنین نتایج نشان می دهند که در دهک های پایین تر, خانوارهای روستایی و شهری درآمدشان کاهش می یابد.

در نهایت در بعد کالبدی و زیرساختی نیز گویه های تخریب شبکه ها و سیستم های حمل ونقل(امتیاز ۰/۶۴)، تخریب زیرساخت‌های شهری و ساختمان‌ها(امتیاز۰/۵۸) و تخریب تاسیسات و شبکه های ارتباطاتی و مخابراتی(امتیاز ۰/۵۲) می باشند. که نمونه نتایج این بعد را نیز می توان در تحقیقاتی که خالقی و همکاران(۱۳۹۳) در تحقیقی با عنوان اثر تغییر اقلیم بر تولید بخش کشاورزی و بر اقتصاد ایران انجام دادند و نتایج آن ها نیز مشخص کرد که ایجاد تغییرات اقلیمی باعث کاهش تولید بخش ساختمان در حدود ۲/۲۷ درصد و در بخش خدمات نیز در حدود ۱/۶۴ درصد می شود.

که با توجه به نتایج به دست امده از تحقیق مشخص می شود که تغییرات اقلیمی یکی از بزرگترین چالش های اساسی در ایران امروزی می باشد که به مرور زمان نیز این چالش بزرگتر و خطرات ناشی از ان نیز رفته رفته بیشتر می شود. که ایجاد چنین روندی پیامدهای منفی زیادی در جهان و به ویژه کشورهایی که دارای مشکلات زیست محیطی دارند بیشتر خواهد شد. و از جمله این کشورها ایران می باشد که در طی چندین سال اخیر(از دهه۷۰ به بعد) با بروز خشکسالی در آن که همواره می تواند یکی از دلایل تغییرات اقلیمی رخ داده باشد اشاره کرد که وقوع پدیده خشکسالی و افزایش دما در منطقه جنوب غربی آسیا باعث کمبود بارش، کاهش ذخایر آبی در کشورهای این منطقه و به دنبال آن تغییر سیاست های مدیریتی در داخل کشورها و از طرف دیگر بروز اختلافات سیاسی بین کشورها در مسائل آبی به ویژه در مناطق مرزی شده است. که نمونه این اختلافات بین المللی را می توان در حقابه آب دریاچه هامون در ایران که از رودخانه هیرمند از افغانستان تامین می شود که در طی چند سال اخیر به دلیل جلوگیری از ورود آب ایرن رودخانه(هیرمند) دریاچه هامون خشک و مشکلات سیاسی بین ایران و افغانستان ایجاد گردیده است و یا نمونه دیگر آن را می توان بین کشورهای عراق و ترکیه بر سر رودخانه های دجله و فرات که از ترکیه سرچشمه و از کشور عراق عبور می کند و کشور ترکیه با اتخاذ برنامه های توسعه آبی حقابه این رودخانه ها را کم و در نتیجه باعث ایجاد تنش بین این دو کشور شده است.

بروز تغییرات اقلیمی علاوه بر ایجاد مسائل و اختلافات بین المللی در سطح داخلی نیز باعث ایجاد مشکلات اساسی از جمله تغییر در برنامه های توسعه داخلی کشورها نظیر، اختصاص بودجه زیاد جهت احیاء مناطق آبی خشک شده یا صرف هزینه های فراوان جهت تامین آب مناطق شهری، روستایی و یا مراکز صنعتی می شود و از طرف دیگر بروز چنین روندی باعث تخریب محیط و تشدید فشار بر محیط زیست می شود که پیامدهای ناگوار دیگری نظیر تخریب منابع زیرزمینی و غیره می شود که به دنبال این امر عواملی نظیر افزایش بیکاری، مهاجرت های اجباری و بروز اختلافات داخلی بین مناطق مختلف بر سر دسترسی به منابع بیشتر طبیعی می باشد. تمامی عوامل ذکر شده تنها بخش کوچکی از تاثیرات تغییرات اقلیمی در ایران می باشد که به نوعی باعث تاثیر گذاری مستقیم در امنیت ملی کشور ایران می باشد که نیازمند اتخاذ برنامه ریزی و مدیریت مناسب جهت مقابله با مسائل و مشکلات به وجود آمده و مسائلی که در آینده نزدیک قرار است ایجاد شود باید اتخاذ گردد.

۴-۴.منابع

سلیمی سبحان، محمدرضا و قادری، فاطمه(۱۴۰۳)تغییر اقلیم و تاثیر آن بر امنیت ملی و بین المللی ایران، فصلنامه علمی آماد و فناوری دفاعی، سال ۶، شماره۲۱، ۱۲۹-۹۷.Doi.20.1001.1.28212606.1403.7.1.4.2

رومینا، ابراهیم(۱۴۰۳)تاثیر تغییرات اقلیمی بر امنیت داخلی در ایران، فصلنامه مطالعات و پژوهش های امنیت داخلی، سال سوم، شماره۹، ۷-۳۱.https://issrq.sndu.ac.ir/article_3506_4d8258b926adda200d47b979db561f22.pdf

کامران، حسن و یاری، احسان و عابدی، مرضیه(۱۳۹۶) امنیت زیست محیطی و امنیت ملی ایران در بستر تحولات هیدروپلیتیک مرزی(مطالعه موردی: هریرود)، جغرافیا، سال ۱۵، شماره۵۲، ۳۰۵-۳۲۸. http://journalie.ir/Article/8955/FullText

خالقی، سعیده و بزازان، فاطمه و مدنی، شیما(۱۳۹۳) اثر تغییر اقلیم بر تولید بخش کشاورزی و بر اقتصاد ایران، تحقیقات اقتصاد کشاورزی، شماره ۱، ۱۱۳-۱۳۵.https://sid.ir/paper/158676/fa

حافظی بیرگانی، مهران و نیک بخش، بهرام(۱۴۰۳) تحلیل تاثیرات اقتصادی و اجتماعی تغییرات اقلیمی بر معیشت و فرهنگ ایل بختیاری، نشریه مطالعات برنامه ریزی قلمرو کوچ نشینان، دوره۴، شماره۲، ۱۱۱-۱۲۸. DOI: 10.22034/jsnap.2025.495316.1110

برنا، رضا و فرزانه، مهسا(۱۳۹۸) گرد و غبار و اثرات آن بر محیط زیست و راهکارهای کاهش، کنفرانس گردوغبار در جنوب غرب آسیا.https://civilica.com/doc/۸۹۴۶۶۹/

جلالی، محمد و افشاری، مریم و مزینانیان، زینب(۱۳۹۹) تاثیر ابعاد زیست محیطی تغییرات اقلیمی بر امنیت ملی، فصلنامه علوم و فناوری محیط زیست، دوره۲۲، شماره۹، ۱۹۰-۱۷۹.https://sid.ir/paper/۴۰۱۲۵۱fa#downloadbottom/

رومی، فرشاد(۱۴۰۱) تغییرات اقلیمی و پیامدهای آن بر امنیت ملی ایران، فصلنامه علمی رهیافت های سیاسی و بین المللی، دوره۱۴، شماره۱.doi.10.29252/PIAJ.2022.228257.1280

عراقچی، عباس(۱۳۹۳)دیپلماسی آب، از منازعه تا همکاری، فصلنامه سیاست جهانی، دوره۳، شماره۴، ۹۱-۱۱۹. https://ensani.ir/file/download/article/۲۰۱۴۰۱۰۶۶۳-۵۰c۲۰d۸a۷b۶۴۶-۱۴۰۰-۶۶.pdf

اسماعیلی، مصطفی و هاشمی، حمیدرضا(۱۴۰۲) تاثیر تغییرات اقلیمی، زیست محیطی و آب و هوایی بر امنیت ملی مطالعه موردی جمهوری اسلامی ایران، فصلنامه پژوهش های روابط بین الملل، دوره۱۳، شماره۱، ۳۱۱-۳۳۹. Doi.10.22034/irr.2023.383485.2345

سلطانی، فخرالدی و فلاح نژاد، مرتضی و راشدی، یداله(۱۴۰۱) شناسایی مهمترین تغییرات اقلیمی موثر بر امنیت ملی ایران، مطالعات علوم محیط زیست، دوره۷، شماره۱، ۴۷۰۵-۴۶۹۷. doi.۲۰۲۲.۱۴۴۶۵۸/JESS.۱۰.۲۲۰۳۴

اخوان کاظمی، مسعود و حسینی، طیبه و بهرامی پور، فرشته(۱۳۹۸) مطالعه واکاوی تاثیر تغییرات آب و هوایی بر امنیت بین المللی، فصلنامه مطالعه روابط بین الملل، سال۱۲، شماره ۴۶، ۹-۳۹.DOI:20.1001.1.24234974.1398.12.46.1.4

بیاتی، پریسا و نادی، رویا(۱۳۹۳)گردوغبار و اثرات منفی آن بر سلامتی، محیط زیست و اقتصاد، کنفرانس بین المللی توسعه پایدار، راهکارها و چالش ها با محوریت کشاورزی، منابع طبیعی، محیط زیست و گردشگری، ۱-۶. https://civilica.com/doc/۳۵۵۵۱۸/

کاویانی راد، مراد(۱۳۹۵) آشفتگی الگوی بارش و ناکارآمدی مدیریت بحران، مجله دیده بان امنیت ملی، شماره ۴۹-۴۸، ۲۳-۲۸.

Zhang, X., & Masron, T. (2023). Does climate affect regional economic development in China? Cogent Social Sciences, 9. https://doi.org/10.1080/23311886.2023.2283918

Alam, Mayesha & Bhatia, Rukmani & Mawby, Briana (2015), Women and Climate Change: Impact and Agency in Human Rights, Security, and Economic Development, Georgetown Institute for Women, Peace and Security.Pp.1-72 .https://giwps.georgetown.edu/resource/women-and-climate-change/

Duan, H, Wang, Sh, 2018. Potential impacts of China's climate policies on energy security .Environmental Impact Assessment Review. Volume 71. PP 94-101. https://doi.org/10.1016/j.eiar.2018.04.007

Scheffran, J. 2022. Climate Change: Human Security between Conflict and Cooperation, Encyclopedia of Violence. Peace & Conflict (Third Edition), Volume 2. PP 807-819. https://doi.org/10.5194/egusphere-2023-1766

Hill, Alice & Martinez-Diaz, Leonardo (2020), Adapt or Perish: Preparing for the Inescapable Effects of Climate Change, Foreign Affairs, Jan/Feb 2020. https://www.jstor.org/stable/26855358Cite

Antonellia, Marta & Tamea, Stefania)2015(, Food-water security and virtual water trade in the Middle East and North Africa, International Journal of Water Resources Development, Vol. 31, No. 3, Pp.326-342. https://doi.org/10.1080/07900627.2015.1030496

Gleick, Peter H. (2014), Water, Drought, Climate Change, and Conflict in Syria .American Meteorological Society, Vol. 6. July 2014. Pp. 331-340. https://doi.org/10.1175/WCAS-D-13-00059.1

Madani, Kaveh & AghaKouchak, Amir& Mirchi, Ali (201۴), Iran's Socio-economic Drought: Challenges of a Water-Bankrupt Nation, Iranian Studies, Vol. 49. No. 6. Pp. 997–1016. https://doi.org/10.1080/00210862.2016.1259286

Schaar, Johan (2019), A Confluence of Crises: On Water, Climate and Security in the Middle East and North Africa, Sipri Insights on Peace and Security, No.4. pp.1-

20.https://www.sipri.org/publications/2019/sipri-insights-peace-and-security/confluence-crises-water-climate-and-security-middle-east-and-north-africa

Michel, David (2017), Iran's Impending Water Crisis, 21 March 2017. Pp.168-188. In book: Water, Security and US Foreign Policy, Publisher: Routledge. Available at: https ://www.researchgate.net/profile/DavidMichel2/publication/327752628_Iran%27s_Impending_Water_Crisis/links/5dc98bf5a6fdcc57504066a7/Irans-Impending-Water-Crisis.pdf

United Nations (2022), Climate Action needed now, the United Nations country team website of I.R. Iran, 22 March 2022. Available at: https://iran.un.org/en/175463- climate-action-needed-now.

Rozinskaya, N. A., & Rozinskiy, I. A. (2019). Southwest vector: The climatic factor in the socio-economic development of Russia. Voprosy Economiki, 5, 122-135. https://doi.org/10.32609/0042-8736-2019-5-122-135

Ohotina, A., Lavrinenko, O., Ignatjeva, S., & Lonska, J. (2018). Socio-economic security as a determinant of regional differences in the investment climate in the region. Journal of Security and Sustainability Issues. https://doi.org/10.9770/JSSI.2018.7.3(5)

Steyaert, L. T., Sakamoto, C. M., Hock, J. C., & Krumpe, P. F. (2022). Climatic impact assessment programs as a resource for economic planning, agricultural development, and food security. https://doi.org/10.4324/9780429049323-17

Galina, K., Divichenko, O., & Demenenko, I. A. (2018). Formation of entrepreneurial climate as a factor of social and economic development of the region. SHS Web of Conferences, 50, 01012. https://doi.org/10.1051/SHSCONF/20185001012

Carleton, T., & Hsiang, S. (2016). Social and economic impacts of climate. Science, 353. https://doi.org/10.1126/science.aad9837

Lyons, W. F. (2024). Climate action as a strategic deterrent. Scientific Journal of the Military University of Land Forces. https://doi.org/10.5604/01.3001.0054.7399

Solomon, M., Abiodun, O., Olalekan, O., & Bolarinwa, O. (2022). The future climatic variabilities in the Mano River union and their implications on socio-economic development. Geographica Pannonica. https://doi.org/10.5937/gp26-36677

Zhao, Y., & Liu, S. (2023). Effects of climate change on economic growth: A perspective of the heterogeneous climate regions in Africa. Sustainability. https://doi.org/10.3390/su15097136.

Masters, W., & McMillan, M. (2001). Climate and Scale in Economic Growth. Journal of Economic Growth, 6, 167-186. https://doi.org/10.1023/A:1011398431524.

He, J., Su, Y., & Fang, X. (2020). To what extent did changes in temperature affect China's socioeconomic development from the Western Han Dynasty to the Five Dynasties period? Journal of Quaternary Science, 35. https://doi.org/10.1002/jqs.3183

Barnett, J., & Adger, W. (2007). Climate change, human security and violent conflict. Political Geography, 26, 639-655. https://doi.org/10.1016/J.POLGEO.2007.03.003

Zaidan, M. (2024). Climate impacts on security in Sub-Saharan Africa. https://doi.org/10.19088/k4dd.2024.039

Fayaz, G., Mazloum, Y., Sayyed, H., & Zarghani. (2024). Investigating the consequences of climate change and its impact on Afghanistan's security. [Title of the Journal], 3(2), Article 276. https://doi.org/10.70436/nuijb.v3i02.276

Conca, K., & Dabelko, G. D. (2024). The international (in)security order and the climate-conflict-security nexus. Environment and Security. https://doi.org/10.1177/27538796241287358

Mumtaz, T. (2021). Climate Change as an International Security Issue. Journal of Peace and Diplomacy. https://doi.org/10.59111/jpd.002.01.012.

Najafi, M. S., & Alizadeh, O. (2023). Climate zones in Iran. Meteorological Applications, 30(5), e2147. https://doi.org/10.1002/met.2147

Solaimani, K., Bararkhanpour, A., & Ahmadi, S. (2024). Evaluation of TerraClimate gridded data in investigating the changes of reference evapotranspiration in different climates of Iran. European Journal of Hydrology. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101678

Mahmoudi, P., Mohammadi, M., & Daneshmand, H. (2019). Investigating the trend of average changes of annual temperatures in Iran. International Journal of Environmental Science and Technology, 16, 1079-1092. https://doi.org/10.1007/s13762-018-1664-4.

Iran's changing climate over the past 30 years. (2023). Meteorologiâ i gidrologiâ. https://doi.org/10.52002/0130-2906-2023-1-76-89

Tabari, H., Somee, B., & Zadeh, M. (2011). Testing for long-term trends in climatic variables in Iran. Atmospheric Research, 100, 132-140. https://doi.org/10.1016/J.ATMOSRES.2011.01.005.

Naderi, M., Saatsaz, M., & Peely, A. (2024). Extreme climate events under global warming in Iran. Hydrological Sciences Journal, 69, 337 - 364. https://doi.org/10.1080/02626667.2024.2317269.

Rajabalinejad, A., Nozari, N., & Badr, B. R. (2023). The effect of climate change on agricultural production in Iran. Brazilian Journal of Biology, 83, Article 277383. https://doi.org/10.1590/1519-6984.277383

Roshan, G., Orosa, J. A., Costa, Á. M., & Bouzón, R. (2018). Building energy consumption and carbon dioxide emissions in a small region with a warm and semi-humid climate type (Iran) (pp. 179–182). In Advances in Energy and Environmental Science (pp. 179–182). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01599-2_42

Mehdipour, S., Nakhaee, N., Khankeh, H. R., & Haghdoost, A. A. (2022). Impacts of drought on health: A qualitative case study from Iran. International Journal of Disaster Risk Reduction, 76, Article 103007. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2022.103007

Sadeghi, R., Abbasi-Shavazi, M. J., & Shahbazin, S. (2020). Internal migration in Iran. In Demographic Challenges and Opportunities in the Middle East and North Africa (pp. 295–317). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44010-7_15

Zirman, M., & Rahimi, F. (2024). The warming conflict: Climate change and its impacts on Afghanistan's ongoing conflicts. NUI Journal of International Business, 3(2), 358–361. https://doi.org/10.70436/nuijb.v3i02.239

Cardoso, P. (2024). Climate change: Past, present and future. Deleted Journal, 2(5), 157–176. https://doi.org/10.46691/p3kfma23

Saouter, E., & Gibon, T. (2024). Climate change. In Climate Change (pp. 31–44). https://doi.org/10.1007/978-3-031-51332-9_2

Laha. M. Climate change: causes and impacts. (2024). International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science. https://doi.org/10.56726/irjmets51857

Hughes, F., Romanello, M., Walawender, M., & Montgomery, H. (2024). Health consequences of climate change. Encyclopedia of Life Sciences, 1–6. https://doi.org/10.1002/9780470015902.a0029650

Семенов, В. А. (2024). Climate change: Causes, consequences, imperatives. Vestnik Rossijskoj Akademii Nauk, 94(3), 246–254. https://doi.org/10.31857/s0869587324030076

White, R. (2024). Climate change. In Oxford Research Encyclopedia of Criminology and Criminal Justice. https://doi.org/10.1093/acrefore/9780190264079.013.762

Sullivan, J., & Townsend, K. (2022). Climate migration: Adding fuel to the ethnocentric fire. Terrorism and Political Violence, 34, 914–925. https://doi.org/10.1080/09546553.2022.2069446

Bhattarai, K. (2023). Interface between climate change and national security threat. Journal of Foreign Affairs. https://doi.org/10.3126/jofa.v3i01.56510

Sharmila, R. (2023). Climate security: An evolving dimension to climate change. GLS Law Journal, 5(2), 83–93. https://doi.org/10.69974/glslawjournal.v5i2.107

Podkolzina, I., Tenishchev, A., Gornostaeva, Z., Tekeeva, H., & Tandelova, O. (2023). Assessment of threats to environmental security and climate change. BIO Web of Conferences, 63, Article 04002. https://doi.org/10.1051/bioconf/20236304002

Jalali, M., Afshari, M., & Mazinanian, Z. (2020). Environmental impact of climate change on national security. Journal of Environmental Science and Technology, 22, 179–190. https://doi.org/10.30489/CIFJ.2020.207971.1009

Ebert, S. (2023). Climate change. In Advances in Human Resources Management and Organizational Development Book Series (pp. 168–193). https://doi.org/10.4018/978-1-6684-6878-4.ch011

Panda, U. K., Sahoo, S. S., & Parija, P. P. (2023). Climate change. Indian Journal of Social Psychiatry. https://doi.org/10.4103/ijsp.ijsp_139_22

Thomas, A., & Cheung, W. W. L. (2024). Impacts of climate change. Frontiers for Young Minds, 12. https://doi.org/10.3389/frym.2024.1355408

Makki, M., Butt, F., Akash, S., Petrova, K., & Naeem, S. (2024). Fragile geographies and the climate-conflict nexus: Investigating climate-induced security risks, migration, and inequality in Balochistan, Pakistan. Alternatives: Global, Local, Political. https://doi.org/10.1177/03043754241291728

Mach, K. J., Kraan, C., Adger, W. N., Buhaug, H., Burke, M., Fearon, J. D., Field, C. B., Hendrix, C., Maystadt, J. F., O'Loughlin, J., Roessler, P., Scheffran, J., Schultz, K., & Uexkull, N. (2019). Climate as a risk factor for armed conflict. Nature, 571, 193–197. https://doi.org/10.1038/s41586-019-1300-6

Busby, J. (2008). Who cares about the weather?: Climate change and U.S. national security. Security Studies, 17, 468–504. https://doi.org/10.1080/09636410802319529

Alfaro, V. A. M. (2023). Cambio climático: Desafíos de la seguridad y defensa en la adaptación y mitigación. Revista del Colegio Interamericano de Defensa, 9, 82–98. https://doi.org/10.59848/24.1207.hv9n4

Sikorsky, E. (2022). National security and climate change: The attention it deserves? Survival, 64, 67–73. https://doi.org/10.1080/00396338.2022.2032961

سومین کنفرانس ملی آب و هواشناسی ایران (با محوریت تغییر اقلیم)
The 3rd National Conference on Climatology of Iran (Focusing on Climate Change)
ارومیه ۱۶ مهر ۱۴۰۴

تحلیل تطبیقی شاخص‌های SPEI و SPEIbase به عنوان ابزارهای ارزیابی خشکسالی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه

دکتر حمید نظری‌پور*[۱]، دکتر محمود خسروی[۲] نادیا پودینه[۳]

۱. دانشیار اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.
(h.nazaripour@gep.usb.ac.ir)
۲. استاد اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.
۳. کارشناسی ارشد اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

چکیده

محاسبه SPEI در سطح ایستگاه‌های هواشناسی، نیازمند داده‌های زمانی با دقت بالا شامل بارش ماهانه و دمای هوا (به منظور تخمین تبخیر و تعرق) است. محدودیت دسترسی به داده‌های ایستگاهی بلندمدت و یکنواخت، به‌ویژه در مناطق کم‌برخوردار، چالشی جدی در پایش دقیق شرایط اقلیمی ایجاد می‌کند. در این راستا، استفاده از پایگاه‌های داده شبکه‌بندی شده جهانی مانند SPEIbase که مبتنی بر تلفیق داده‌های ماهواره‌ای، مدل‌های اقلیمی و داده‌های اندازه‌گیری‌شده هستند، به عنوان جایگزینی مناسب برای نواحی فاقد داده‌های کافی مطرح می‌گردد. هدف از این مطالعه ارزیابی عملکرد شاخص خشکسالی SPEIbase برپایه داده‌های شبکه‌ای با شاخص خشکسالی SPEI محاسباتی برپایه داده‌های ایستگاهی می‌باشد تا امکان جایگزینی آن را به دلیل وضوح زمانی و مکانی بالا و دسترسی سریع‌تر فراهم نماید. داده‌های دما و بارندگی مقیاس ماهانه از ۳ ایستگاه هواشناسی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه طی دوره ۱۹۸۶ تا ۲۰۲۳ گردآوری و شاخص SPEI برپایه برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل مبتنی بر معادله تورنت‌ویت در مقیاس‌های زمانی ۱، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه محاسبه شده است. داده‌های شبکه‌بندی شاخص SPEIbase نیز برای دوره مشابه استخراج شده است. برای ارزیابی میزان هماهنگی و توافق بین سری‌های زمانی این شاخص‌ها از آزمون همبستگی خطی پیرسون، نمودار بلند- آلتمن و آزمون کاپای کوهن استفاده شده است. یافته‌ها بیانگر ضریب همبستگی قوی و توافق زیاد بین SPEI و SPEIbase در پایش خشکسالی بوده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده، پایگاه داده SPEIbase می‌تواند در مطالعات خشکسالی حوضه آبریز دریاچه ارومیه به‌عنوان جایگزینی قابل اعتماد برای داده‌های ایستگاهی مورد استفاده قرار گیرد.

کلید واژه‌ها: خشکسالی، شاخص استاندارد شده تبخیر- تعرق پتانسیل، آماره کاپای کوهن، نمودار بلند- آلتمن.

مقدمه

یکی از چالش‌های اساسی در مطالعات اقلیم‌شناسی و مدیریت منابع آب، پایش دقیق خشکسالی در مناطق مختلف جغرافیایی به‌ویژه در کشورهایی با تنوع اقلیمی زیاد مانند ایران است. خشکسالی پدیده‌ای پیچیده و چندبُعدی است که ارزیابی آن تنها بر پایه یک متغیر (بارش) کافی نیست؛ چرا که تبخیر و تعرق نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در تعیین تراز آبی مناطق دارد. شاخص استاندارد شده بارش-تبخیر و تعرق (SPEI) به عنوان ابزاری توسعه‌یافته برای بررسی جامع‌تر خشکسالی، در سال‌های اخیر توجه گسترده‌ای را به خود جلب کرده است. با این حال، دقت آن به شدت وابسته به کیفیت و صحت داده‌های ورودی است(Vicente-Serrano et al. 2010). برای محاسبه این شاخص در سطح ایستگاه‌های هواشناسی، دست‌کم به داده‌های سری زمانی ماهانه بارش و دمای هوا نیاز است؛ چرا که دما برای تخمین تبخیر و تعرق از طریق روش‌هایی مانند پنمن- مانتیث ضروری است. در ایران، محدودیت پوشش مکانی و زمانی ایستگاه‌های هواشناسی، به‌ویژه در نواحی کوهستانی و بیابانی، باعث شده تا بهره‌گیری از پایگاه‌های داده جهانی شبکه‌بندی شده مانند SPEIbase ، که داده‌ها را با دقت فضایی مشخص و با استفاده از تلفیق منابع گوناگون تولید می‌کنند، به گزینه‌ای قابل توجه تبدیل شود (Raziei et al. 2009).

با وجود مزیت‌های استفاده از این پایگاه‌ها برای پر کردن خلأ داده‌ای، میزان تطابق نتایج آن‌ها با داده‌های واقعی ایستگاهی در مناطق مختلف همچنان محل تردید است (Mehran et al. 2015). عملکرد این پایگاه‌ها ممکن است تحت تأثیر شرایط اقلیمی گوناگون کشور، مانند اقلیم خشک مناطق مرکزی ایران، یا اقلیم کوهستانی، دچار نوسان شود. از این‌رو، ارزیابی دقت پایگاه SPEIbase در مقایسه با داده‌های زمینی در حوضه‌های آبریز مختلف، گامی حیاتی برای افزایش اعتمادپذیری این داده‌ها در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی، مدل‌سازی‌های اقلیمی و برنامه‌ریزی منابع طبیعی به شمار می‌آید.

شاخص SPEI قادر به برآورده کردن الزامات یک شاخص خشکسالی چند مقیاسی است که برای شناسایی، نظارت و تجزیه و تحلیل خشکسالی توسط رشته‌های علمی مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. این شاخص، می‌تواند شدت خشکسالی را با توجه به شدت و مدت آن اندازه‌گیری، شروع و پایان دوره‌های خشکسالی را در طیف وسیعی از اقلیم‌ها شناسایی کند(Beguería et al. 2010). شاخص‌های خشکسالی باید از نظر آماری قوی بوده و به راحتی با یک روش محاسباتی واضح و قابل درک محاسبه شوند (Keyantash and Dracup. 2002). تمامی این الزامات توسط SPEI برآورده شده است (Brands et al. 2025). با این حال، یک مزیت مهم SPEI نسبت به سایر شاخص‌های خشکسالی پُرکاربرد که تأثیر تبخیر و تعرق(PET) را بر شدت خشکسالی در نظر می‌گیرند این است که ویژگی‌های چند مقیاسی آن امکان شناسایی انواع مختلف خشکسالی و اثرات آن را در زمینه گرمایش جهانی فراهم می‌کند (Manzano et al. 2019). این ویژگی به‌ویژه در مناطق

خشک و نیمه‌خشک که تبخیر و تعرق نقش مهمی در کمبود منابع آبی دارد، اهمیت دوچندان می‌یابد. همچنین، SPEI دارای ماهیت چندمقیاسی است و می‌تواند برای تحلیل خشکسالی در بازه‌های زمانی مختلف (از یک ماهه تا چند ساله) مورد استفاده قرار گیرد، در حالی که شاخص‌هایی مانند PDSI فاقد این انعطاف‌پذیری زمانی هستند. به همین دلیل، SPEI به عنوان شاخصی جامع‌تر و حساس‌تر نسبت به تغییرات اقلیمی، در بسیاری از مطالعات اقلیمی و منابع آب توصیه شده است (Peña-Gallardo et al. 2019; Ahmadalipour et al. 2017).

چندین پایگاه داده مربوط به پایش خشکسالی در سطح جهانی تهیه شده است. در این بین پایگاه داده شبکه‌بندی شده خشکسالی شاخص استاندارد تبخیر- بارش(SPEIbase) یک از پایگاه های داده با وضوح بالا، می‌باشد که دوره‌ای به نسبت طولانی از ۱۹۰۱ تا ۲۰۲۴ را پوشش می‌دهد. SPEIbase v.2.11 جدیدترین نسخه این پایگاه داده است که از مجموعه داده‌های CRU TS 4.09 که دوره بین ژانویه ۱۹۰۱ تا دسامبر ۲۰۲۴ را در برمی‌گیرد، محاسبه می‌گردد. در مجموع، خلأ دانش در زمینه ارزیابی دقت پایگاه‌های داده جهانی خشکسالی مانند SPEIbase در مناطق متنوع اقلیمی ایران، از اصلی‌ترین انگیزه‌های انجام این پژوهش به شمار می‌رود. علی‌رغم مزایای بالقوه این پایگاه‌ها در پوشش گسترده و در دسترس بودن داده، عدم شناخت کافی از میزان دقت و قابلیت اعتماد آن‌ها در سطوح محلی، تصمیم‌گیری‌های مدیریتی را با چالش مواجه می‌کند. از این‌رو، این تحقیق درصدد است تا با ارزیابی عملکرد شاخص SPEIbase در بازتاب واقعیت‌های اقلیمی ایستگاه‌های هواشناسی و در مقیاس‌های حوضه‌ای، بستری علمی برای بهبود استفاده از داده‌های شبکه‌بندی‌شده در مطالعات خشکسالی و مدیریت منابع آب فراهم سازد. هدف از این مطالعه ارزیابی میزان دقت شاخص خشکسالی SPEIbase برپایه داده‌های شبکه‌ای با شاخص خشکسالی SPEI محاسباتی برپایه داده‌های ایستگاهی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه می‌باشد تا امکان جایگزینی آن را به دلیل وضوح زمانی و مکانی بالا و دسترسی سریع‌تر فراهم نماید.

داده و روش‌شناسی

محدوده مورد مطالعه این پژوهش شامل حوضه آبریز دریاچه ارومیه می‌باشد که یکی از حوضه‌های آبریز شش‌گانه درجه یک بوده که در شمال‌غرب ایران واقع شده است. دست نخست از داده‌های این پژوهش شامل شامل سری‌های زمانی مجموع بارندگی ماهانه و میانگین دمای ماهانه از ایستگاه هواشناسی تبریز، سقز و ارومیه می‌باشند. موقعیت این ایستگاه‌ها در روی شکل (۱) و مشخصات آن‌ها در جدول (۱) آورده شده است. دسته دوم داده‌ها، شامل داده‌های شبکه‌بندی شده شاخص بارش- تبخیر و تعرق است که اصطلاحاً SPEIbase نامیده می‌شود. با بهره‌گیری از تابع inpolygon در محیط برنامه‌نویسی متلب، یاخته‌های موجود در گستره حوضه آبریز دریاچه ارومیه استخراج شده و موقعیت آن‌ها در روی شکل(۱)

به صورت منظم نشان داده شده است. مقیاس زمانی هر دو شاخص SPEI و SPEIbase شامل ۱، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه و دوره آماری آن‌ها ۱۹۸۶ تا ۲۰۲۳ می‌باشد. برای موقعیت هریک از ایستگاه‌های هواشناسی تبریز، سقز و ارومیه، سری‌های زمانی SPEIbase از طریق میانگین نقاط پیرامونی آن‌ها به دست آمده است.

جدول ۱- مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های هواشناسی حوضه دریاچه ارومیه

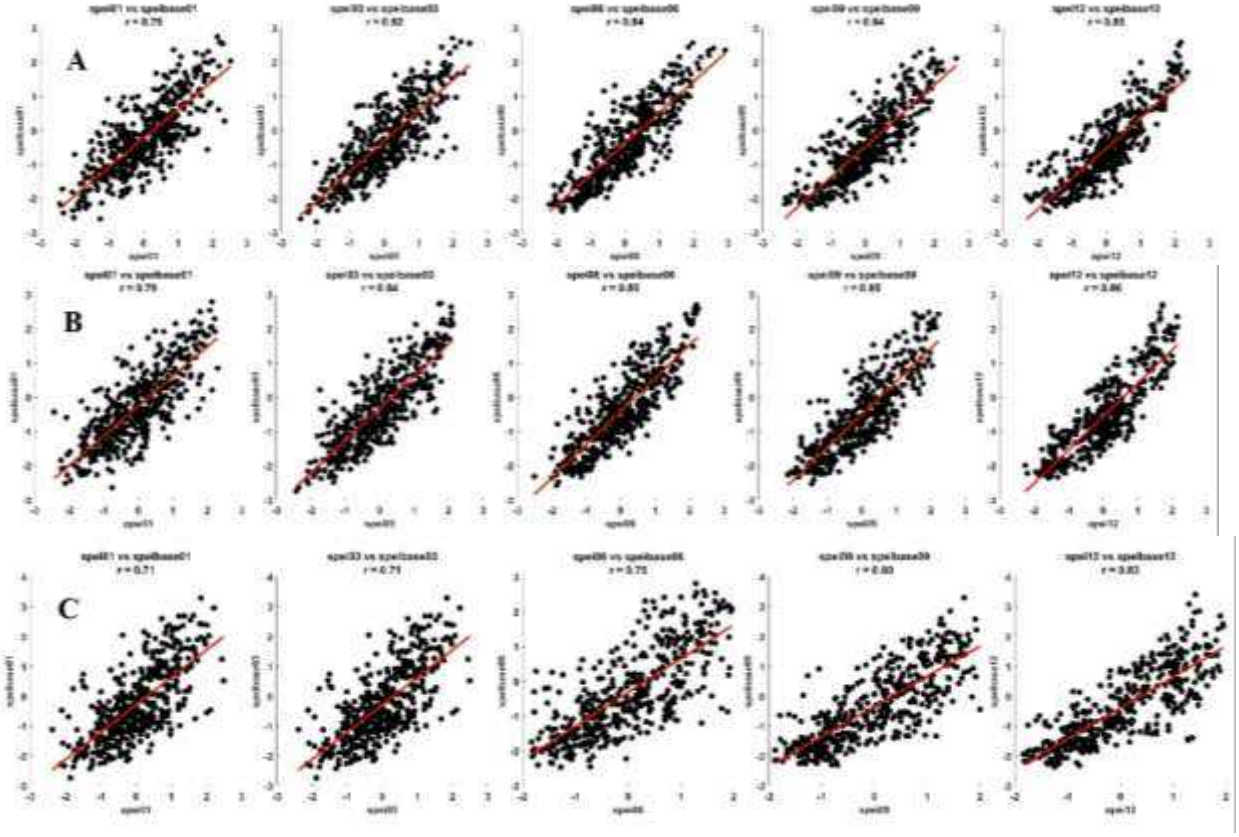
ردیف	ایستگاه	طول و عرض جغرافیایی		ارتفاع	بارش(میلی‌متر)	دما (سلسیوس)
۱	تبریز	۳۸/۰۸	۴۶/۲۸	۱۳۶۱	۲۵۴/۴۲	۱۳/۴۴
۲	سقز	۳۶/۲۵	۴۶/۲۷	۱۵۲۲/۸	۴۵۳/۰۷	۱۱/۱۱
۳	ارومیه	۳۷/۵۳	۴۵/۰۸	۱۳۲۸	۳۱۱/۷۸	۱۱/۷۹

شاخص SPEI در بر اساس داده‌های دما، بارش ماهانه و عرض جغرافیایی ایستگاه‌های هواشناسی در پکیج SPEI نرم افزار R و بر اساس دستورالعمل (Vicente-Serrano et al., 2010) محاسبه می‌گردد. اساس محاسبه تبخیر و تعرق بالقوه (PET) استفاده از معادله تورنت‌ویت می‌باشد. اما در پایگاه داده SPEIbase برآورد تبخیر و تعرق بالقوه (PET) با استفاده از روش پنمن-مانتیث فائو-۵۶ انجام شده است.

برای محاسبه میزان همبستگی بین مقادیر SPEI و SPEIbase از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شده است. ضریب همبستگی بین ۰/۵ تا ۰/۷ (همبستگی نسبتاً قوی)، ۰/۷ تا ۰/۹ (همبستگی قوی) و بیشتر از ۰/۹ (همبستگی بسیار قوی) را بیان می‌کند (Schober et al. 2018). آماره کاپای کوهن برای وضعیت‌های بیان خشکسالی در SPEI و SPEIbase با استفاده از زبان برنامه‌نویسی متلب محاسبه شده تا میزان توافق بین این دو روش در پایش وضعیت خشکسالی اندازه‌گیری شود. مقادیر کاپا بزرگ‌تر از ۰/۷۵+ دلالت بر توافق عالی، مقادیر بین ۰/۴+ تا ۰/۷۵+ بیانگر توافق متوسط تا خوب و مقادیر کمتر از ۰/۴+ دلالت بر توافق ضعیف دارند (Landis and Koch 1977). نمودارهای بلند- آلتمن که به عنوان نمودارهای اختلاف یا تفاوت نیز شناخته می‌شوند، رویکرد گرافیکی با ارائه یک ارزیابی بصری از توافق، آزمون‌های آماری را تکمیل و آن را به ابزاری قوی برای مطالعات مقایسه روش، تبدیل نموده است (Giavarina, 2015). مراحل تولید نمودار بلند- آلتمن در محیط برنامه‌نویسی متلب انجام شده است.

نتایج و بحث

حوضه آبریز دریاچه ارومیه در شمال‌غرب ایران مشترک میان استان‌های آذربایجان غربی، کردستان و آذربایجان‌شرقی می‌باشد. این حوضه آبریز یکی از حوضه‌های آبریز بسته و اصلی ایران به شمار می‌رود. میزان همبستگی شاخص SPEIbase که منتج از داده‌های شبکه‌ای بارش و دمای جهانی می‌باشد با شاخص SPEI محاسباتی برای ایستگاه‌های هواشناسی تبریز (A) ، ارومیه (B) و سقز (C) که در درون این حوضه آبریز قرار دارد بررسی شده است. مقدار ضریب همبستگی در مقیاس‌های ۱، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه بین شاخص‌های SPEI و SPEIbase در ایستگاه هواشناسی تبریز به ترتیب، ۰/۷۹، ۰/۸۲، ۰/۸۴، ۰/۸۴ و ۰/۸۵ می‌باشد. این مقادیر برای ایستگاه هواشناسی ارومیه به ترتیب۰/۷۹، ۰/۸۴، ۰/۸۵، ۰/۸۵ و ۰/۸۶ و برای ایستگاه هواشناسی سقز به ترتیب ۰/۷۱، ۰/۷۱، ۰/۷۵، ۰/۸۰ و ۰/۸۳ می‌باشد (نمودار ۴-۴). این ضرایب همبستگی در هر سه ایستگاه هواشناسی و همچنین مقیاس‌های زمانی ۵گانه (۱، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه) در محدوده همبستگی قوی قرار دارند. میزان همبستگی بین شاخص‌های SPEI و SPEIbase در مقیاس‌های زمانی بلندتر نسبت به مقیاس‌های زمانی کوتاه‌تر افزایش می‌یابد. مقیاس‌های زمانی کوتاه (به عنوان مثال، ۱ماهه) بیانگر خشکسالی هواشناسی، مقیاس‌های میانی (به عنوان مثال، ۶ ماهه) بیانگر خشکسالی کشاورزی و مقیاس‌های بلندتر (به عنوان مثال، ۱۲ ماهه) بیانگر خشکسالی هیدرولوژیکی می‌باشند.



شکل ۲- مقادیر ضریب همبستگی شاخص‌های SPEI و SPEIbase در حوضه آبریز دریاچه ارومیه در مقیاس‌های زمانی مختلف

بیان تصویری مقایسه سری‌های زمانی از شاخص SPEI و SPEIbase درحوضه آبریز دریاچه ارومیه نیز یک هماهنگی قوی را در نمایش دوره‌های خشکسالی و ترسالی نشان می‌دهد (شکل‌های ۳، ۴ و ۵). تحلیل‌های کمّی‌تر در حوضه آبریز دریاچه ارومیه نیز نشان می‌دهد که SPEIbase نسبت به SPEI در نمایش دوام و شدت خشکسالی متفاوت عمل می‌کند. این تفاوت‌ها به ویژه در نمایش وضعیت خشکسالی‌های کشاورزی و هیدرولوژیکی بارزتر می‌گردد. شاخص SPEIbase خشکسالی‌های هیدرولوژیکی سه دهه اخیر در حوضه آبریز دریاچه ارومیه را به خوبی به نمایش می‌گذارد که منجر به خشکیدگی دریاچه ارومیه گردیده است.

محدوده باریک توافق در تمامی مقیاس‌های زمانی طبق نمودارهای بلند- آلتمن بررسی و در نمودارهای (۶، ۷ و ۸) آورده شده است. این نمودارها بیانگر سطح بالایی از همخوانی بین شاخص‌های SPEI و SPEIbase درحوضه آبریز دریاچه ارومیه در تمامی مقیاس‌های مورد بررسی بوده است. بنابراین، نمودارهای بلند- آلتمن این نتیجه را تقویت می‌کنند که هر دو شاخص ارزیابی‌های قابل مقایسه‌ای از خشکسالی در حوضه آبریزدریاچه ارومیه ارائه می‌دهند. در همه نمودارها، نقاط به طور تصادفی و بدون الگوی خاصی در اطراف خط میانگین پراکنده بوده و نشانه‌ای از توافق خوب بین دو شاخص SPEI و SPEIbase در نمایش خشکسالی می‌باشد. خط میانگین اختلاف‌ها (بایاس) صفر نبوده و نشان می‌دهد که یکی از روش‌ها به طور نظام‌مند بیشتر یا کمتر اندازه‌گیری می‌کند. بنابراین یک خطای نظام‌مند هرچند جزئی بین این روش اندازه‌گیری خشکسالی وجود دارد. محدوده توافق بین دو روش در تمامی مقیاس‌های اندازه‌گیری اختلاف چندانی نداشته و باریک می‌باشند؛ بنابراین اختلاف چندانی بین شاخص شاخص SPEI و SPEIbase در نمایش خشکسالی وجود ندارد.

مقدار آماره کاپای کوهن به همراه خلاصه سایر آزمون‌های توافق بین SPEI و SPEIbase در حوضه آبریز دریاچه ارومیه در مقیاس‌های زمانی متفاوت در جدول (۲) آورده شده است. مشابه توافق قوی بین SPEI و SPEIbase در آزمون‌های همبستگی خطی پیرسون و نمودار بلند – آلتمن، یک توافق زیاد نیز بین وضعیت‌های خشکسالی در آماره کاپای کوهن مشاهده می‌گردد. زیرا، مقادیر آماره کاپای کوهن در تمامی مقیاس‌های زمانی در دامنه ۰/۶+ تا ۰/۸۰+ بوده که بیان‌گر توافق زیاد می‌باشد.

جدول ۲- خلاصه آزمون‌های توافق بین SPEI و SPEIbase در حوضه آبریز دریاچه ارومیه در مقیاس‌های زمانی مختلف

Station	Timesclae (month)	Kappa (κ^*)	Perarson (r^{**})	Bland-Altman (Range)
Tabriz	1	0.69	0.79	Upper= +1.55 , Lower= -1.08
	3	0.72	0.82	Upper= +1.55 , Lower= -0.93
	6	0.73	0.84	Upper= +1.55 , Lower= -0.76
	9	0.70	0.84	Upper= +1.60 , Lower= -0.67
	12	0.66	0.85	Upper= +1.63 , Lower= -0.56
Urmia	1	0.67	0.79	Upper= +1.59 , Lower= -1.08
	3	0.62	0.84	Upper= +1.55 , Lower= -0.89
	6	0.68	0.85	Upper= +1.57 , Lower= -0.76
	9	0.70	0.85	Upper= +1.66 , Lower= -0.66
	12	0.72	0.86	Upper= +1.68 , Lower= -0.55
Saqez	1	0.59	0.71	Upper= +1.79 , Lower= -1.12

3	0.64	0.71	Upper= +1.81 , Lower= -1.01
6	0.67	0.75	Upper= +1.82 , Lower= +0.85
9	0.69	0.80	Upper= +1.85 , Lower= -0.68
12	0.67	0.83	Upper= +1.82 , Lower= -0.55

نتیجه‌گیری

این پژوهش یک رویکرد عملی و قابل اعتماد برای بررسی هماهنگی و توافق میان SPEI و SPEIbase در سطح حوضه آبریز دریاچه ارومیه پیاده‌سازی نموده است. برای این منظور، داده‌های دما و بارش ماهانه ایستگاه‌های هواشناسی تبریز، ارومیه و سقز در بازه ۱۹۸۶ تا ۲۰۲۳ میلادی از آرشیو سازمان هواشناسی کشور تهیه شده است. شاخص SPEI بر اساس برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل مبتنی بر روش تورنت‌ویت در مقیاس‌های زمانی ۱، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه برای این مجموعه داده محاسبه شده که بیانگر خشکسالی هواشناسی، کشاورزی و هیدرولوژیکی می‌باشد. از سوی دیگر داده‌های شبکه‌بندی شده SPEIbase که بر اساس اطلاعات ماهانه بارندگی و تبخیر و تعرق پتانسیل (مبتنی بر روش پنمن- مانتیث FAO-56) می‌باشد در مقیاس و دوره زمانی مشابه SPEI از واحد تحقیقات اقلیمی دانشگاه انگلیای شرقی تهیه شده است. با بهره‌گیری از امکانات برنامه‌نویسی در بستر نرم‌افزار متلب، داده‌ها جهت بررسی همبستگی و توافق در بیان وضعیت‌های خشکسالی در گستره ایران آماده گردیدند. از آزمون همبستگی خطی پیرسون برای بررسی درجه هماهنگی بین مقادیر SPEI و SPEIbase و از آزمون‌های بلند- آلتمن و کاپای کوهن برای سنجش میزان توافق بین این دو شاخص در پایش وضعیت خشکسالی در گستره ایران استفاده شده است. یافته‌ها نشان دادند که میزان همبستگی خطی پیرسون بین مقادیر شاخص SPEI محاسباتی برای ایستگاهای هواشناسی و شاخص SPEIbase که منتج از داده‌های شبکه‌ای بارش و دمای جهانی بود، در ایستگاه‌های هواشناسی حوضه آبریز دریاچه ارومیه، در دامنه همبستگی قوی (۰/۷۰ تا ۰/۹۰) قرار دارد. این مقدار از همبستگی در برخی از موارد حتی به آستانه همبستگی بسیار قوی نیز نزدیک شده است. به طور کلی، میزان همبستگی از مقیاس‌های کوتاه‌تر (۱ و ۳ ماهه) به مقیاس‌های بلندتر (۶، ۹ و ۱۲ ماهه) افزایش داشته است. بیان تصویری مقایسه سری‌های زمانی از شاخص SPEI و SPEIbase نیز یک هماهنگی قوی را در نمایش دوره‌های خشکسالی و ترسالی نشان داد. با این‌حال، تحلیل‌های کمّی‌تر نشان داد که SPEIbase نسبت به SPEI در نمایش دوام و شدت خشکسالی متفاوت عمل می‌کند. این تفاوت‌ها شامل ۱) در شاخص SPEIbase آغاز دوره خشکسالی را نسبت به SPEI زودتر بوده؛ بنابراین دوام خشکسالی در این شاخص طولانی‌تر می‌باشد. ۲) شاخص SPEIbase شدت و سختی خشکسالی را بزرگ‌تر برآورد می‌کند. ۳) شاخص SPEIbase خشکسالی‌های وابسته را ادغام و به صورت یک رویداد گسترده خشکسالی نمایش

می‌دهد. این وضعیت‌ها منجر به عدم توافق هرچند اندک میان SPEI و SPEIbase در بیان وضعیت‌های خشکسالی (خشکسالی خیلی شدید، خشکسالی شدید و خشکسالی متوسط) می‌گردد که در آزمون‌های بلند- آلتمن و کاپای کوهن، نمود یافته است. . با وجود تفاوت ماهیت این روش‌ها در برآورد تبخیر و تعرق (روش برآورد مبتنی بر معادله تونت‌ویت در SPEI و روش برآورد مبتنی بر معادله پنمن- مانتیث FAO-56 در SPEIbase)، میزان توافق بین این شاخص‌ها در بیان وضعیت‌های خشکسالی در اکثر موارد در دامنه توافق زیاد (بر اساس آزمون کاپای کوهن) قرار دارد. بنابراین SPEI و SPEIbase شباهت‌های زیاد در پایش خشکسالی و توافق زیاد در بیان وضعیت خشکسالی دارند. به عنوان یافته نهایی، شاخص خشکسالی SPEIbase با دقت مناسب در در حوضه آبریز دریاچه ارومیه قابلیت جایگزینی برای داده‌های ایستگاهی را دارد.

منابع

Ahmadalipour, A., Moradkhani, H., and Svoboda, M. 2017. A comparison of projected drought indices under climate change scenarios. International Journal of Climatology 37(6): 2475–2491.

Beguería, S., Vicente-Serrano, S. M., & Angulo-Martínez, M. (2010). A multiscalar global drought dataset: The SPEIbase: A new gridded product for the analysis of drought variability and impacts. Bulletin of the American Meteorological Society, 91(10), 1351–1356.

Brands, S., Iturbide, M., González-Pardo, J.D., Herrera, S., Bedia, J., Manzanas, R., Rodríguez-Guisado, E., Beguería, S., Vicente-Serrano, S.M. and Gutiérrez, J.M., 2025. Seasonal drought predictions in the Mediterranean using the SPEI index: Paving the way for their operational applicability in climate services. Climate Services, 38, p.100555.

Giavarina, D. 2015. Understanding Bland Altman analysis. Biochemia Medica 25(2): 141–151.

Keyantash, J., & Dracup, J. A. (2002). The quantification of drought: An evaluation of drought indices. Bulletin of the American Meteorological Society, 83(8), 1167–1180.

Landis, J.R., and Koch, G.G. 1977. The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. Biometrics 33(1): 159–174.

Manzano, A., Clemente, M.A., Morata, A., Luna, M.Y., Beguería, S., Vicente-Serrano, S.M., and Martín, M.L. 2019. Analysis of the atmospheric circulation pattern effects over SPEI drought index in Spain. Atmospheric Research 230: 104630.

Mehran, A., AghaKouchak, A., Nakhjiri, N., Stewardson, M. J., Peel, M. C., Phillips, T. J., Wada, Y., & Ravalico, J. K. (2015). Evaluation of CMIP5 continental hydrology components and drought propagation: Case study of the 2012 Midwest US drought. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 120(17), 8661–8677.

Peña-Gallardo, M., Vicente-Serrano, S.M., Domínguez-Castro, F., Beguería, S., and Luna, M.Y. 2019. Assessing drought severity and risk in a changing climate: A case study in southern Europe. Atmospheric Research 233: 104712.

Raziei, T., Saghafian, B., Paulo, A. A., Pereira, L. S., & Bordi, I. (2009). Spatial patterns and temporal variability of drought in western Iran. Water Resources Management, 23(3), 439–455.
Schober, P., Boer, C. & Schwarte, L.A., 2018. Correlation coefficients: appropriate use and interpretation. Anesthesia & Analgesia, 126(5), pp.1763–1768.
Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. Journal of Climate, 23(7), 1696–1718.

Comparative Analysis of SPEI and SPEIbase as Drought Assessment Tools in the Lake Urmia Basin

Hamid Nazaripour[1], Mahmood Khosravi[2], Nadia Poodineh[3]

Associate Professor of Climatology, Department of Physical Geography, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.
Professor of Climatology, Department of Physical Geography, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.
M.Sc. in Climatology, Department of Physical Geography, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

* Corresponding author: (h.nazaripour@gep.usb.ac.ir)

Abstract
Calculation of SPEI at meteorological stations requires high-temporal-resolution data, including monthly precipitation and air temperature (for estimating potential evapotranspiration). Limited access to long-term and uniform station data, especially in underprivileged areas, poses a significant challenge for accurate climate monitoring. In this regard, global gridded databases such as SPEIbase, which integrate satellite data, climate models, and ground-based measurements, have been proposed as a suitable alternative for data-scarce regions. This study aimed to evaluate the performance of the gridded SPEIbase drought index against the station-based computed SPEI to assess its feasibility as a substitute due to its higher spatiotemporal resolution and faster accessibility. Monthly temperature and precipitation data from 3 meteorological stations in the Lake Urmia Basin were collected for the period 1986–2023. The SPEI was calculated using the Thornthwaite equation for potential evapotranspiration at 1, 3, 6, 9, and 12-month time scales. Gridded SPEIbase data were also extracted for the same period. To evaluate the alignment and agreement between the time series of these indices, Pearson's linear correlation coefficient, Bland–Altman plots, and Cohen's Kappa coefficient were employed. The findings revealed a strong correlation and high agreement between SPEI and SPEIbase in drought monitoring. Based on the results, the SPEIbase database can be used as a reliable alternative to station-based data for drought studies in the Lake Urmia Basin.
Keywords: Drought, SPEI, Cohen's Kappa coefficient, Bland–Altman plot.

سومین کنفرانس ملی آب و هواشناسی ایران (با محوریت تغییر اقلیم)
The 3rd National Conference on Climatology of Iran (Focusing on Climate Change)
ارومیه ۱۶ مهر ۱۴۰۴

تحلیل روند فراوانی و مشخصه‌های رودخانه‌های جوی وارد شده به حوضه آبریز دریاچه ارومیه

صبا نادری[۱]، مجید منتصری[۲]، سمیه حجابی*[۳]

۱- دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
۲- استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
۳- دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول s.hejabi@urmia.ac.ir

چکیده

رودخانه‌های جوی ساختارهای باریک و کشیده‌ای از بخار آب بسیار مرطوب در جو هستند که در ارتفاعات میانی تروپوسفر جریان دارند و حجم عظیمی از رطوبت را از مناطق استوایی به عرض‌های بالاتر منتقل می‌کنند. در این مطالعه، با هدف بررسی روند فراوانی و مشخصه‌های رودخانه‌های جوی وارد شونده به حوضه آبریز دریاچه ارومیه، از یک رهیافت مبتنی بر الگوریتم پردازش تصویر THR در بسته پایتون IPART برای شناسایی رودخانه‌های جوی استفاده شد و روند تغییرات فراوانی و مشخصه‌های آنها در دوره آماری ۲۰۲۰-۱۹۹۱ بررسی شد. نتایج نشان داد که ماه‌های آوریل (۳۲/۶۴ درصد) و مارس (۲۶/۷۴ درصد) بیشترین فراوانی رودخانه‌های جوی را داشتند و همچنین اغلب رودخانه‌های جوی دارای منشاء دریای مدیترانه (۳۳/۶۸ درصد)، دریای سرخ (۱۷/۷۱ درصد) و خلیج عدن (۱۳/۸۹ درصد) بودند. نتایج تحلیل روند نشان داد که فراوانی رودخانه‌های جوی در ماه مارس روند افزایشی معناداری با شیب ۰/۱ year-1 و در ماه نوامبر روند کاهشی معناداری با شیب ۰/۰۴۵۵ year-1- داشتند؛ اما در سایر ماه‌ها، روند معناداری در فراوانی این رودخانه‌های جوی مشاهده نشد. همچنین، در مقیاس سالانه، هیچ‌یک از مشخصه‌های رودخانه‌های جوی در دوره آماری مورد بررسی، روند معناداری نشان ندادند.

کلید واژه‌ها: بسته پایتون IPART، رودخانه جوی، روند تغییرات، رهیافت THR.

مقدمه

میزان و نحوه جابجایی بخار آب موجود در جو، یکی از فرایندهای اساسی در چرخه هیدرولوژیکی است که بر الگوهای اقلیمی و منابع آب شیرین در مناطق مختلف جهان اثر می‌گذارد. بخشی از این انتقال در قالب ساختارهای باریک و کشیده‌ای در تروپوسفر رخ می‌دهد که به رودخانه‌های جوی (Atmospheric river, AR) معروف شده‌اند. این اصطلاح نخستین بار توسط Newell et al. (1992) مطرح گردید و به دلیل حجم چشمگیری از انتقال رطوبت که مشابه با بزرگ‌ترین رودخانه‌های زمینی است چنین نامی به آن‌ها داده شد. این سامانه‌ها که غالباً از مناطق گرمسیری و نیمه‌گرمسیری سرچشمه می‌گیرند، در انتقال نصف‌النهاری بخار آب به عرض‌های میانی نقشی اساسی دارند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که نزدیک به ۹۰ درصد انتقال بخار آب یکپارچه به خارج از مناطق استوایی به واسطه رودخانه‌های جوی انجام می‌شود و اهمیت اصلی این رودخانه‌ها در توانایی آن‌ها برای تأمین رطوبت و بارش در بسیاری از مناطق جهان است؛ به گونه‌ای که سهم قابل توجهی از منابع آب شیرین از طریق بارش باران و برف ناشی از آن‌ها تأمین می‌شود (Ralph et al., 2017; Dettinger et al., 2011). با این حال، در صورتی که وقوع رودخانه‌های جوی با شرایط دینامیکی و ترمودینامیکی خاص همراه گردد، این پدیده می‌تواند به بارش‌های سنگین و سیلاب‌های مخرب منجر شود (Knippertz et al., 2013).

بررسی‌های گسترده‌ای در سال‌های اخیر به مطالعه رودخانه‌های جوی از جنبه‌های مختلف از جمله شناسایی، ویژگی‌های ساختاری و اثرات اقلیمی آن‌ها اختصاص یافته است. این مطالعات نقش مهمی در درک بهتر فرآیندهای انتقال رطوبت و ارتباط آن با رخدادهای حدی جوی ایفا کرده‌اند. برای نمونه، Ramos et al. (2015) با هدف شناسایی و توصیف جامع رویدادهای شاخص رودخانه‌های جوی در شبه‌جزیره ایبری طی دوره زمانی ۱۹۸۴ تا ۲۰۱۲، از یک الگوریتم خودکار تشخیص رودخانه‌های جوی در حوضه اقیانوس اطلس شمالی بهره بردند. یافته‌های این پژوهش بیانگر آن بود که ارتباط معناداری میان وقوع رودخانه‌های جوی و روزهای بارش شدید در حوضه‌های غربی منطقه وجود دارد؛ در حالی که در بخش‌های شرقی و جنوبی شبه‌جزیره، این ارتباط به‌طور محسوسی کاهش می‌یابد.

Whan et al. (2020) روند، تنوع و اثر رودخانه‌های جوی بر بارش‌های شدید در نروژ را مورد بررسی قرار دادند و تغییرات فراوانی رویدادهای این سامانه‌ها را تحلیل کردند. یافته‌های آن‌ها نشان داد که در آینده، رویدادهای رودخانه‌های جوی نسبت به شرایط اقلیمی کنونی، هم بیشتر و هم شدیدتر خواهند شد. افزایش میانگین دمای منطقه در طول رخدادهای زمستانی این سامانه‌ها موجب خواهد شد که بارش‌ها به جای برف عمدتاً به صورت باران رخ دهند، امری که می‌تواند شدت جریان‌های سیلابی را تشدید کرده و پیامدهای قابل توجهی برای مدیریت منابع آب سطحی به همراه داشته باشد. Doiteau et al. (2021) دریافتند که تا ۴۰ درصد از بارش‌های سواحل غرب اروپا با حضور رودخانه‌های جوی مرتبط است و هیچ

روند معناداری در وقوع آن‌ها طی سال‌های مورد مطالعه مشاهده نشد. Tan et al. (2022) در مطالعه‌ای جامع به بررسی ویژگی‌های بارندگی مرتبط با سه نوع رودخانه‌های جوی شامل جنوبی، میانی و شمالی پرداختند و نقش آن‌ها را در ایجاد بارش‌های شدید در بخش‌هایی از غرب آمریکای شمالی تحلیل کردند. نتایج آنان بر اساس ارزیابی بیلان رطوبتی نشان داد که رودخانه‌های جوی به عنوان حاملان عمده رطوبت جوی، می‌توانند شرایط لازم برای وقوع بارش‌های سنگین و در نتیجه افزایش خطر وقوع سیلاب را فراهم کنند. Mahto et al. (2023) طی پژوهشی که انجام دادند، نقش حیاتی AR ها در بارش شدید و سیل در هند را در طول سال های ۱۹۵۱ تا ۲۰۲۰ بررسی نمودند. نتایج نشان داد که حدود ۶۵ درصد از رودخانه های جوی که به خشکی می رسند در دوره ی ۱۹۸۵ تا ۲۰۲۰ با سیل مرتبط بوده و نیز دریافتند که هفت مورد از ده سیل شدید هند در فصل باران های موسمی تابستانی با مرگ و میر قابل توجه با رودخانه های جوی ارتباط داشته است. در پژوهشی دیگر، Kingston et al. (2025) به بررسی و پیش‌بینی رخداد بارش‌های شدید ناشی از رودخانه‌های جوی در نیوزیلند پرداختند. یافته‌های آنان نشان داد که این سامانه‌های انتقال رطوبت، نقش محوری در شکل‌گیری بارش‌های فراتر از حد نرمال دارند و می‌توانند به عنوان یکی از محرک‌های اصلی وقوع سیلاب‌های گسترده در این منطقه شناخته شوند..

از میان مطالعات انجام‌شده در ایران، برای نمونه، Esfandiari and Lashkari (2020) ورود رودخانه‌های جوی به ایران، مسیر حرکت آن‌ها و عوامل همدیدی مؤثر بر مسیرهایشان را بررسی کردند. آن‌ها طی دوره آماری ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۸، رودخانه‌های جوی در ماه‌های بارانی (آوریل تا نوامبر) را شناسایی کرده و تأثیر شرایط سینوپتیک بر مسیرهای این سامانه‌ها را تحلیل نمودند. نتایج نشان داد که بیشترین ورود رودخانه‌های جوی از جنوب (۴۴.۷٪) و جنوب غربی (۲۲٪) بوده و دریای سرخ و خلیج عدن منبع اصلی رطوبت در بیش از نیمی از موارد هستند. Dezfuli (2020) ویژگی‌های رودخانه جوی نادری را که در ماه مارس سال ۲۰۱۹، باعث سیل بی‌سابقه در سراسر خاورمیانه از جمله ایران شد، مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان داد که سیل مذکور، توسط یک رودخانه جوی قدرتمند و منشاء گرفته از اقیانوس اطلس، ایجاد شده و در حین عبور از رشته‌کوه‌های بلند زاگرس بارندگی‌های شدیدی تولید کرده است. مشخص شد که جنوب غربی ایران، بیشترین تأثیر را از سیل مذکور داشت که ۲۶ استان از ایران را تحت تأثیر قرار داد. در مطالعه دیگری، Esfandiari and Lashkari (2021) تأثیر رودخانه‌های جوی بر رخدادهای بارش شدید در ماه‌های سرد و بارانی ایران را در یک بازه زمانی ۱۱ ساله (۲۰۱۸-۲۰۰۷) بررسی کردند و نشان دادند که تمامی رودخانه‌های جوی شناسایی‌شده (۳۶۴ مورد) لزوماً منجر به بارش شدید نشده‌اند، که بر اهمیت تحلیل عوامل زمینه‌ای و دینامیک این سامانه‌ها تأکید دارد. Dezfuli et al. (2021) در یک مطالعه موردی نشان دادند که سیل ویرانگر سال ۲۰۱۷ در شمال غربی ایران، ناشی از یک رودخانه جوی بسیار گسترده با

طول تقریبی ۵۵۰۰ کیلومتر بود و مسیر آن از شمال‌شرق آفریقا تا آسیای مرکزی امتداد داشت. این رودخانه جوی با تجمع مقادیر عظیم رطوبت و انتقال آن به حوضه آبریز، موجب بارش‌های شدید و سیلاب‌های گسترده شد که پیامدهای انسانی و اقتصادی قابل توجهی به همراه داشت. با این حال، برخلاف آثار تخریبی، این رخداد هیدرولوژیکی به‌طور همزمان تأثیر مثبتی بر منابع آبی منطقه داشت و به احیای نسبی سطح آب دریاچه ارومیه کمک کرد که نشان‌دهنده پیچیدگی و دوگانگی نقش رودخانه‌های جوی در ایجاد سیلاب‌های ویرانگر و تقویت منابع آبی منطقه است.

حوضه آبریز دریاچه ارومیه، با کمبود منابع آبی و نوسانات شدید بارشی، یکی از مناطق چالش‌برانگیز کشور از منظر مدیریت منابع آب به شمار می‌آید. افزایش تقاضای آب برای مصارف شرب و کشاورزی، همراه با تغییرپذیری بالای بارش‌ها، به کاهش آب دریاچه و اثرات مخرب زیست‌محیطی گسترده منجر شده است. در طول سال، حوضه آبریز دریاچه ارومیه می‌تواند تحت تأثیر امواج متنوع و گسترده مرتبط با رودخانه‌های جوی قرار گیرد که از مسیرهای مختلف وارد منطقه می‌شوند. با توجه به گرمایش جهانی و اثرات آن بر پدیده‌های جوی به ویژه رخدادهای حدی، شناسایی رودخانه‌های جوی وارد شونده به حوضه و همچنین بررسی روند تغییرات فراوانی و مشخصه‌های آنها در مدیریت ریسک رخدادهای حدی مرتبط با این پدیده ضرورت دارد. بنابراین، در این مطالعه، رودخانه‌های جوی تأثیرگذار بر حوضه آبریز دریاچه ارومیه و روند تغییرات فراوانی و مشخصه‌های آنها در یک بازه زمانی ۳۰ ساله (۲۰۲۰-۱۹۹۱) مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به اهمیت رودخانه‌های جوی در ایجاد رویدادهای شدید بارشی و سیلابی، بررسی روند تغییرات فراوانی و مشخصه‌های رودخانه‌های جوی تحت تأثیر تغییرات اقلیمی اخیر می‌تواند نقش مهمی در آگاهی‌بخشی از میزان تاثیرپذیری این پدیده از تغییر اقلیم ایفا کند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد بررسی در این مطالعه، حوضه آبریز دریاچه ارومیه است. این حوضه بسته با مساحت ۵۱۸۷۶ کیلومترمربع یکی از شش حوضه آبریز اصلی ایران و شامل بخش‌هایی از استان‌های آذربایجان غربی، آذربایجان شرقی و کردستان است. این حوضه عموماً کوهستانی بوده و دامنه ارتفاع در این حوضه از حدود ۱۲۶۵ متر در دشت‌های اطراف دریاچه ارومیه آغاز شده و به سمت مرزهای حوضه افزایش می‌یابد و تا ۳۶۴۷ متر می‌رسد. میانگین بارش سالانه حوضه ۳۰۲/۸ میلی‌متر است و مشخصه اقلیمی حوضه دریاچه ارومیه زمستان‌های سرد (با میانگین دمای ۰/۲ °C و ژانویه و فوریه به‌عنوان سردترین ماه‌ها) و تابستان‌های نسبتاً معتدل (با میانگین دمای ۲۳/۹ °C و ژوئیه و اوت به‌عنوان گرم‌ترین ماه‌ها) است، در حالی که

میانگین دمای سالانه حوضه ۱۲/۳ °C است (Alizadeh-Choobari et al., 2016). از منظر سیستم‌های جوی، این منطقه عمدتاً تحت تأثیر سامانه‌های غربی با منشاء چرخندهای مدیترانه‌ای قرار دارد و ورود چرخندهای اطلس شمالی و دریای سیاه نیز بر الگوی بارش منطقه تأثیرگذار است، به‌گونه‌ای که بارش‌های غالب در این حوضه عمدتاً در فصل بهار متمرکز هستند (Sabziparvar et al., 2014). شکل (۱) موقعیت حوضه آبریز دریاچه ارومیه را نشان می‌دهد.

روش شناسایی رودخانه‌های جوی

گام اول در اجرای این پژوهش، شناسایی رودخانه‌های جوی است. عموماً، دو رهیافت اصلی برای شناسایی رودخانه‌های جوی وجود دارد (Gimeno et al., 2014). یک رهیافت مبتنی بر داده‌های کل بخار آب یکپارچه (Integrated Water Vapor, IWV) جو است و تنها بیانگر تمرکز و تراکم بخار آب در جو است. در حالی که رهیافت دوم مبتنی بر داده‌های انتقال بخار آب یکپارچه (Integrated Vapor Transport, IVT) است. مقدار IVT با استفاده از داده‌های روزانه مؤلفه‌های مداری و نصف‌النهاری سرعت باد و رطوبت ویژه هوا در ترازهای مختلف فشار هوا قابل محاسبه است. بردارهای IVT برای عرض جغرافیایی (φ) و طول جغرافیایی (λ) و زمان (t) به صورت زیر است:

$$Q(\lambda, \varphi, t) = Q_\lambda i + Q_\varphi j \quad (۱)$$

رودخانه‌های جوی با استفاده از انتقال بخار آب یکپارچه بین ترازهای فشار ۱۰۰۰ hPa و ۳۰۰ hPa تعیین می‌شوند. لذا، مؤلفه‌های مداری (Qλ) و نصف‌النهاری (Qφ) از روابط زیر بدست می‌آید:

$$Q_\lambda = -\int_{1000}^{300} qu\frac{dp}{g} \quad (۲)$$

$$Q_\varphi = -\int_{1000}^{300} qv\frac{dp}{g} \quad (۳)$$

که u و v به‌ترتیب مؤلفه مداری و نصف‌النهاری باد (m s-1)، q رطوبت ویژه (kg kg-1)، g ثابت گرانش (m s-2) و dp اختلاف فشار بین دو تراز مجاور است.

مقدار IVT (kg m-1 s-1) از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$IVT = \sqrt{{Q_\varphi}^2 + {Q_\lambda}^2} \quad (۴)$$

در این مطالعه، به جای روش‌های متداول برای شناسایی رودخانه‌های جوی، مانند روش‌های مبتنی بر تعیین آستانه IWT، IVT یا طول و پهنای باریکه حاوی رطوبت (Ralph et al., 2004) یا روش‌های مبتنی بر صدک معین IVT یا IWV (Guan

and Waliser, 2015)، از یک رهیافت مبتنی بر فرایندهای فیلترسازی روی میدان‌های IVT استفاده شد که توسط Xu et al. (2020) تحت عنوان روش مسیریابی رودخانه‌های جوی مبتنی بر پردازش تصویر (Image-Processing-based Atmospheric River Tracking, IPART; Xu et al., 2020) ارائه شده است. در این رهیافت، از الگوریتمی به نام تکنیک پردازش تصویر THR (Top-Hat by Reconstruction) برای شناسایی و مسیریابی رودخانه‌های جوی استفاده می‌شود. این روش حساسیت کمتری به انتخاب پارامترها داشته و کمتر مستعد مشکلات ناشی از ماهیت ناایستای وضعیت رطوبتی جو، تحت شرایط گرمایش جهانی است. به‌علاوه، در این روش، یک رهیافت جدید برای شناسایی محور رودخانه جوی ارائه شده که مبتنی بر شناسایی جهت کلی جریان‌های رودخانه جوی بر اساس اطلاعات شار رطوبت است. جزئیات مربوط به این روش در Xu et al. (2020) تشریح شده است. در این پژوهش، برای شناسایی رودخانه‌های جوی از بسته پایتون IPART برای شناسایی خودکار رودخانه‌های جوی، بر اساس مقادیر IVT، برای یک دوره آماری ۳۰ ساله (۲۰۲۰-۱۹۹۱) استفاده شد. این رهیافت بر روی محدوده‌ای شبکه‌ای با تفکیک مکانی ۰/۲۵×۰/۲۵ درجه، در بازه جغرافیایی صفر تا ۹۰°E و صفر تا ۵۰°N، استفاده شد که دربرگیرنده رودخانه‌های جوی است که در محدوده شرق هند تا غرب آفریقا و خط استوا تا مناطق شمالی دریای خزر شکل می‌گیرند. موقعیت جغرافیایی این محدوده در شکل (۱) نشان داده شده است.

در رهیافت THR، فرایند تعیین رودخانه‌های جوی شامل دو گام کلیدی است: ۱) استخراج عارضه رودخانه جوی بر اساس بزرگی IVT در هر نقطه از شبکه مورد بررسی و ۲) به‌کارگیری معیار فیلترسازی هندسی (شامل جهت IVT، طول IVT و نسبت طول به عرض عارضه). در اینجا، رودخانه‌های جوی شناسایی‌شده باید طولی مساوی یا بزرگتر از ۲۰۰۰ km و نسبت طول به عرض مساوی یا بزرگتر از ۲ داشته باشند. مساحت محدوده رودخانه باید در حدود ۵۰۰-۱۰۰۰۰ km2 باشد تا عارضه‌های خیلی بزرگ یا خیلی کوچک فیلتر شوند. نحوه اجرای الگوریتم در پایتون در https://github.com/ihesp/IPART قابل دسترسی است. خروجی‌های این برنامه نه تنها شامل تعداد و مختصات نقاط محور رودخانه جوی بلکه شامل مشخصه‌های دیگری مانند مختصات نقاط مرزی و مرکز ثقل رودخانه جوی، طول، عرض، نسبت طول به عرض، مساحت رودخانه جوی، متوسط و بیشینه IVT رودخانه جوی و همچنین مسیریابی رودخانه‌ها است.

داده‌ها

داده‌های مورد نیاز در این مطالعه شامل مؤلفه‌های مداری و نصف‌النهاری (Qφ وQλ) انتقال بخار آب یکپارچه (IVT) است که به عنوان ورودی بسته پایتون IPART برای محاسبه IVT (رابطه ۴) استفاده شدند. در این مطالعه، از داده‌های روزانه مؤلفه‌های مداری و نصف‌النهاری IVT مربوط به نسل پنجم داده‌های بازتحلیل مرکز اروپایی پیش‌بینی‌های میان‌مدت وضع

هوا (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) به نام ERA5 برای دوره آماری ۲۰۲۰-۱۹۹۱ استفاده شد. این داده‌ها با تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه از سال ۱۹۵۰ به بعد موجود هستند. داده‌های بازتحلیل جوی به عنوان کامل‌ترین برآوردهای تاریخی جو زمین در نظر گرفته می‌شوند که از طریق داده‌گواری (Data Assimilation) متغیرهای اندازگیری‌شده در خشکی، اقیانوس، جو و همچنین تصاویر ماهواره‌ای، به سیستم‌های پیش‌بینی وضع هوا تولید می‌شوند. این نسل جدید از داده‌های بازتحلیل با تفکیک مکانی بهتر و دوره آماری طولانی‌تر امکان بررسی دقیق‌تر رفتار رودخانه‌های جوی را در بلندمدت ممکن می‌سازد.

تحلیل فراوانی رودخانه‌های جوی

پس از اجرای بسته IPART، در گام بعد، با استفاده از اطلاعات مختصات نقاط تشکیل‌دهنده محور و مرز رودخانه‌های جوی، شیپ‌فایل‌های محور و مرز رودخانه‌ها در محیط برنامه‌نویسی پایتون و با استفاده از بسته Arcpy تهیه شد و همچنین، کدی جهت بررسی میزان هم‌پوشانی محدوده حوضه دریاچه ارومیه با محدوده رودخانه‌های جوی نوشته شد تا رودخانه‌های واردشده به حوضه مشخص گردد. شایان ذکر است که بر خلاف مطالعات پیشین که مبنای انتخاب رودخانه‌ها را هم‌پوشانی منطقه مورد مطالعه با محور رودخانه‌ها و یا حریمی به پهنای نصف عرض متوسط رودخانه جوی در دو طرف محور رودخانه لحاظ می‌کنند، در این مطالعه از هم‌پوشانی محدوده حوضه دریاچه ارومیه با محدوده واقعی رودخانه جوی (بر اساس شیپ فایل مرز رودخانه جوی) برای تعیین عبور/عدم عبور رودخانه جوی از حوضه دریاچه ارومیه استفاده شد. رودخانه‌های جوی وارد شونده به حوضه به تفکیک ماه‌های بارانی (نوامبر تا آوریل) دسته‌بندی شد و نقشه‌های پراکندگی رودخانه‌های جوی واردشونده به حوضه، در ماه‌های مختلف رسم شد. همچنین، منشاء شکل‌گیری هر رودخانه جوی به صورت بصری تعیین شد.

آزمون روند تغییرات

برای آزمون روند تغییرات فراوانی و مشخصه‌های رودخانه‌های جوی، از آزمون روند شیب Sen و من-کندال (M-K test; Mann, 1945; Kendall, 1948) در سطح معنی‌داری ۵ درصد استفاده شد. آزمون M-K یک روش ناپارامتری است که برای تحلیل داده‌هایی که توزیع غیر نرمال دارند و داده‌هایی که لزوماً از توزیع خاصی تبعیت نمی‌کنند، قابل استفاده است. آماره آزمون M-K تقریباً نرمال است و دارای میانگین صفر است. فرمول‌های محاسبه آماره آزمون، واریانس آماره آزمون و آماره آزمون استاندارد شده به صورت زیر است (Mann, 1945; Kendall, 1948):

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^{n} \text{sign}(x_j - x_k) \qquad (۵)$$

$$\mathrm{sign}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1, & x_j - x_k > 0 \\ 0, & x_j - x_k = 0 \\ -1, & x_j - x_k < 0 \end{cases} \quad (۶)$$

$$\mathrm{VAR}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^{g} t_p(t_p-1)(2t_p+5)}{18} \quad (۷)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\mathrm{VAR}(S)}}, & S > 0 \\ 0, & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\mathrm{VAR}(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (۸)$$

که S آماره آزمون M-K، n طول سری داده‌ها، xj و xk مقادیر داده‌های زمان j و k، VAR(S) واریانس آماره S، g تعداد گروه‌های یکسان و tp تعداد داده‌ها در p-اُمین گروه و Z آماره آزمون استاندارد شده است. اگر $|Z|>Z_{1-\alpha/2}$ باشد، فرض صفر در سطح معنی‌داری α رد می‌شود؛ به عبارت دیگر، روند معنی‌داری در سری زمانی داده‌ها وجود دارد. اگر Z>0، روند داده‌ها افزایشی و اگر Z<0، روند داده‌ها کاهشی است.

نرم‌افزارهای مورد استفاده در این پژوهش شامل بسته پایتون IPART برای شناسایی خودکار رودخانه‌های جوی، برنامه-نویسی Python برای تفکیک رودخانه‌های حوضه، نرم‌افزار MATLAB برای تحلیل روند، نرم‌افزار Grapher برای رسم نمودارها و نرم‌افزار ArcGIS 10.8 برای رسم نقشه‌ها است.

نتایج و بحث

مشخصات رودخانه‌های جوی وارد شونده به حوضه

شکل (۲) توزیع مکانی محور رودخانه‌های جوی را که در ماه‌های مختلف از روی حوضه آبریز دریاچه ارومیه عبور کرده‌اند، نشان می‌دهد. همانطور که قبلاً ذکر شد، مبنای تعیین ورود رودخانه‌های جوی به حوضه، بررسی همپوشانی محدوده هر رودخانه جوی با محدوده حوضه است. مجموعاً ۲۸۸ رودخانه جوی در دوره آماری ۲۰۲۰-۱۹۹۱ در شش ماه مورد بررسی (نوامبر تا آوریل) از حوضه آبریز دریاچه ارومیه عبور کرده‌اند که از میان آنها، ماه‌های آوریل و مارس به‌ترتیب با ۹۴ و ۷۷ رودخانه (معادل ۳۲/۶۴، ۲۶/۷۴ درصد کل رودخانه‌ها)، دارای بیشترین تعداد رودخانه جوی و با اختلاف قابل توجه نسبت به سایر ماه‌ها بودند. بیشتر بودن تعداد رودخانه‌های جوی در ماه‌های آوریل و مارس با رژیم بارش بهاره حوضه هماهنگ است. همچنین، در تایید یافته‌های Esfandiari and Lashkari (2020) در ماه‌های آوریل و مارس، بیشترین تراکم رودخانه-های جوی در بخش‌های شمال غربی کشور است که حوضه آبریز دریاچه ارومیه را نیز شامل می‌شود. با توجه به شکل (۲)

رودخانه‌های جوی منشاءهای مختلفی دارند. جدول (۱) فراوانی رودخانه‌های جوی را به تفکیک منشاءهای مختلف در ماه‌های مختلف نشان می‌دهد. به‌طور کلی، از ۲۸۸ رودخانه جوی عبور کرده از حوضه دریاچه ارومیه، ۹۷ رودخانه جوی (۳۳/۶۸ درصد) منشاء مدیترانه‌ای داشته و پس از آن رودخانه‌های جوی با منشاء دریای سرخ (۱۷/۷۱ درصد) و خلیج عدن (۱۳/۸۹ درصد) دارای بیشترین فراوانی هستند. رودخانه‌های مربوط به سایر منشاءها شامل اقیانوس اطلس، غرب آفریقا و شمال شرق آفریقا، فراوانی نسبتاً یکسانی (حدود ۱۲ درصد) نشان داشتند.

جدول ۱- فراوانی رودخانه‌های جوی وارد شده به حوضه آبریز دریاچه ارومیه در ماه‌های مختلف و با منشاءهای مختلف (NEA: شمال شرق آفریقا، WA: غرب آفریقا، RS: دریای سرخ، GA: خلیج عدن، MS: دریای مدیترانه، AO: اقیانوس اطلس) در دوره آماری ۲۰۲۰-۱۹۹۱

ماه	منشاء						مجموع	درصد (٪)
	NEA	WA	RS	GA	MS	AO		
ژانویه	۲	۶	۲	۱	۷	۴	۲۲	۷/۶۴
فوریه	۳	۵	۱	۴	۷	۷	۲۷	۹/۳۸
مارس	۱۱	۱۰	۸	۱۴	۲۳	۱۱	۷۷	۲۶/۷۴
آوریل	۱۶	۱۱	۲۲	۱۶	۲۶	۳	۹۴	۳۲/۶۴
نوامبر	۱	۳	۱۰	۱	۲۴	۱	۴۰	۱۳/۸۹
دسامبر	۱	۱	۸	۴	۱۰	۴	۲۸	۹/۷۲
مجموع	۳۴	۳۶	۵۱	۴۰	۹۷	۳۰	۲۸۸	۱۰۰
درصد (٪)	۱۱/۸۱	۱۲/۵۰	۱۷/۷۱	۱۳/۸۹	۳۳/۶۸	۱۰/۴۲	۱۰۰	

شکل ۲- محور رودخانه‌های جوی وارد شده به محدوده حوضه آبریز دریاچه ارومیه در ماه‌های مختلف در دوره آماری ۲۰۲۰-۱۹۹۱. محدوده آبی رنگ، محدوده پوشش همه رودخانه‌های جوی وارد شده به محدوده حوضه را به صورت ادغام‌شده نشان می‌دهد.

روند تغییرات فراوانی و مشخصه‌های رودخانه‌های جوی

شکل (۳) فراوانی رودخانه‌های وارد شده به حوضه را به تفکیک هر ماه و هر سال نشان می‌دهد. برای بررسی روند تغییرات فراوانی رودخانه‌های جوی از آزمون روند من-کندال استفاده شد. نتایج تحلیل روند برای هر ماه و در سر جمع ماه‌های مورد بررسی در جدول (۲) نشان داده شده است. با توجه به جدول (۲)، فراوانی رودخانه‌های جوی در ماه مارس یک روند افزایشی (۰/۱ year-1) معنی‌دار (P-value<۰/۰۵) را نشان می‌دهد؛ در حالی‌که در ماه نوامبر یک روند کاهشی (year-1

-۰/۰۴۵۵) معنی‌دار (P-value<۰/۰۵) در تعداد رودخانه‌های جوی مشاهده می‌شود. اما، در سایر ماه‌ها روند معنی‌داری در فراوانی رودخانه‌های جوی وجود ندارد. در سر جمع ماه‌های مورد بررسی نیز، روند معنی‌داری در تعداد رودخانه‌های جوی مشاهده نمی‌شود. از آنجا که ماه مارس، پس از ماه آوریل، دارای بیشترین فراوانی وقوع رخداد رودخانه جوی است، روند افزایشی فراوانی رودخانه‌های جوی در این ماه می‌تواند از طریق مکانیزم‌های مختلفی سبب افزایش تعداد و شدت بارش‌ها و سیلاب‌های حدی در این ماه گردد. برای مثال، مکانیزم‌هایی مانند بارش باران روی برف و یا فرارفت هوای گرم توسط رودخانه‌های جوی، می‌تواند سبب تسریع ذوب برف شده و دبی رودخانه‌ها را افزایش دهد و در موارد شدیدتر سبب وقوع سیلاب شود (Whan et al., 2020).

جدول ۲- نتایج بررسی روند تعداد رودخانه‌های جوی وارد شده به حوضه در دوره آماری ۲۰۲۰-۱۹۹۱ به تفکیک ماه‌ها

ماه‌های بارانی	شیب Sen (year-1)	Z-value	P-value
ژانویه	۰/۰۰۰	۱/۸۷۲	۰/۰۶۱۲
فوریه	۰/۰۰۰	-۰/۵۵۸	۰/۵۷۷۰
مارس	۰/۱۰۰۰	۲/۵۹۱	۰/۰۰۹۶*
آوریل	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۱/۰۰۰
نوامبر	-۰/۰۴۵۵	-۲/۱۱۸	۰/۰۳۴۲*
دسامبر	۰/۰۰۰	۱/۳۵۰	۰/۱۷۶۹
همه ماه‌های بارانی	۰/۱۰۵۳	۱/۱۶۹	۰/۲۴۲۴

شکل (۴) نمودارهای سری زمانی فراوانی و میانگین مشخصه‌های مختلف رودخانه‌های جوی وارد شده به حوضه شامل فراوانی، میانگین IVT رودخانه‌ها، میانگین پهنای رودخانه‌ها، میانگین مساحت رودخانه‌ها، میانگین جریان رطوبت رودخانه-ها و مجموع جریان رطوبت رودخانه‌ها را به صورت سالانه نشان می‌دهد. نوسانات شدید در سری‌های زمانی بیانگر تغییرپذیری زیاد فراوانی و مشخصه‌های مختلف رودخانه‌های جوی است که در سال‌های مختلف وارد حوضه شده‌اند. برازش خط روند بر سری‌های زمانی، نشان می‌دهد که علاوه بر فراوانی رودخانه‌ها، مجموع جریان رطوبت رودخانه‌ها نیز روند افزایشی ضعیف اما غیر معنی‌دار نشان می‌دهند. اما در مورد سایر سری‌های زمانی روندهای کاهشی و غیر معنی‌دار مشاهده می‌شود. نتایج تحلیل روند مشخصه‌های مذکور در جدول (۳) نشان داده شده است. با توجه به جدول (۳) روند سالانه مشاهده شده در هیچ یک از مشخصه‌های رودخانه‌های جوی در سطح معنی‌داری ۵ درصد معنی‌دار نیست.

جدول ۳- نتایج بررسی روند سالانه مشخصه‌های رودخانه‌های جوی وارد شده به حوضه در دوره آماری ۲۰۲۰-۱۹۹۱

مشخصه رودخانه‌های جوی	شیب Sen	Z-value	P-value
فراوانی	۰/۱۰۵۳	۱/۱۶۹	۰/۲۴۲۴
میانگین IVT (kg m-1 s-1)	-۰/۲۶۶	-۰/۸۲۱	۰/۴۱۱۸
میانگین پهنا (km)	-۱/۹۲۹	-۰/۵۷۱	-۰/۵۶۸۱
میانگین مساحت (km2)	-۱۷۲۷۰/۰	-۰/۸۵۶	۰/۳۹۱۸
میانگین جریان رطوبت (m3 s-1)	-۵۴۹/۸	-۱/۲۴۹	۰/۲۱۱۷
مجموع جریان رطوبت (m3 s-1)	۱۵۴۵۰/۰	۰/۸۹۲	۰/۳۷۲۴

نتیجه‌گیری

در این مطالعه با هدف بررسی روند تغییرات فراوانی و مشخصه‌های مختلف رودخانه‌های جوی در محدوده حوضه آبریز دریاچه ارومیه، برای اولین بار از یک رهیافت مبتنی بر الگوریتم پردازش تصویر THR در بسته پایتون IPART برای شناسایی رودخانه‌های جوی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه استفاده شد و از روش من-کندال برای آزمون روند مشخصه‌های رودخانه‌های جوی استفاده شد. یافته‌های اصلی پژوهش به شرح زیر است:

بیشترین فراوانی رودخانه‌های جوی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه مربوط به ماه‌های آوریل و مارس بود.

رودخانه‌های جوی با منشاء مدیترانه‌ای (۳۳/۶۸ درصد)، دریای سرخ (۱۷/۷۱ درصد) و خلیج عدن (۱۳/۸۹ درصد) دارای بیشترین فراوانی بودند.

فراوانی رودخانه‌های جوی در ماه مارس یک روند افزایشی (شیب ۰/۱) معنی‌دار و در ماه نوامبر یک روند کاهشی (شیب ۰/۰۴۵۵-) معنی‌دار نشان دادند. اما، در سایر ماه‌ها روند معنی‌داری در فراوانی رودخانه‌های جوی وجود نداشت.

در مقیاس سالانه هیچ یک از مشخصه‌های رودخانه‌های جوی روند معنی‌داری در دوره آماری مورد مطالعه نشان ندادند.

علی رغم عدم وجود روند در مقیاس سالانه، وقوع رویدادهای شدیداً حدی (مانند سیل ویرانگر سال ۲۰۱۷ در شمال غربی ایران) و نحوه ارتباط آنها با رودخانه‌های جوی، همچنان به عنوان یک پرسش باز برای پژوهش‌های آینده باقی مانده است. لذا، موضوع بررسی اثر شدت و تواتر رویدادهای رودخانه‌های جوی بر رخدادهای حدی بارش و سیلاب، با توجه به گستردگی عوامل مؤثر، پیچیدگی مکانیزم‌ها و رفتار شدیداً غیرخطی این پدیده‌ها دارای اولویت بالایی در پژوهش‌های آینده است. همچنین تحلیل احتمالاتی رویدادهای حدی بارش و سیلاب‌ها در ارتباط با رودخانه‌های جوی و تهیه نقشه‌های ریسک وقوع بارش حدی و سیلاب، برای مدیریت ریسک و مقابله با اثرات مخرب این پدیده‌ها ضرورت دارد.

منابع

Alizadeh-Choobari, O., Ahmadi-Givi, F., Mirzaei, N., & Owlad, E. (2016). Climate change and anthropogenic impacts on the rapid shrinkage of Lake Urmia. International Journal of Climatology, 36(13), 4276-4286. doi: 10.1002/joc.4630

Dettinger, M. D., Ralph, F. M., Das, T., Neiman, P. J., & Cayan, D. R. (2011). Atmospheric rivers, floods and the water resources of California. Water, 3(2), 445–478. doi: 10.3390/w3020445

Dezfuli, A. (2020). Rare atmospheric river caused record floods across the Middle East. Bulletin of the American Meteorological Society, 101(4), E394–E400. doi: 10.1175/BAMS-D-19-0247.1

Dezfuli, A., Bosilovich, M. G., & Barahona, D. (2021). A dusty atmospheric river brings floods to the Middle East. Geophysical Research Letters, 48(23), e2021GL095441. doi: 10.1029/2021GL095441

Doiteau, B., Dournaux, M., Montoux, N., & Baray, J. L. (2021). Atmospheric rivers and associated precipitation over france and western europe: 1980–2020 climatology and case study. In Atmosphere (Vol. 12, Issue 8). https://doi.org/10.3390/atmos12081075

Esfandiari, N., & Lashkari, H. (2020). Identifying atmospheric river events and their paths into Iran. Theoretical and Applied Climatology, 140(3), 1125–1137. doi: 10.1007/s00704-020-03148-w

Esfandiari, N., & Lashkari, H. (2021). The effect of atmospheric rivers on cold-season heavy precipitation events in Iran. Journal of Water and Climate Change, 12(2), 596–611. doi: 10.2166/wcc.2020.259

Gimeno, L, Nieto, R, Vázquez, M & Lavers, D.A. (2014) Atmospheric rivers: a mini-review. Front Earth Sci, 2, 1–6. doi: 10.3389/feart. 2014.00002

Guan, B., & Waliser, D. E. (2015). Detection of atmospheric rivers: Evaluation and application of an algorithm for global studies. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 120(24), 12514–12535. doi: 10.1002/2015JD024257

Kendall, M. G. (1948). Rank correlation methods.

Kingston, D. G., Cooper, L., Lavers, D. A., & Hannah, D. M. (2025). Brief communication: Forecasting extreme precipitation from atmospheric rivers in New Zealand. Natural Hazards and Earth System Sciences, 25(2), 675-682.

Knippertz, P., Wernli, H., & Gläser, G. (2013). A global climatology of tropical moisture exports. Journal of Climate, 26(10), 3031–3045. doi: 10.1175/JCLI-D-12-00401.1

Mahto, S. S., Nayak, M. A., Lettenmaier, D. P., & Mishra, V. (2023). Atmospheric rivers that make landfall in India are associated with flooding. Communications Earth & Environment, 4(1), 120.

Mann, H. B. (1945). Nonparametric tests against trend. Econometrica: Journal of the econometric society, 245-259.

Newell, R. E., Newell, N. E., Zhu, Y., & Scott, C. (1992). Tropospheric rivers?–A pilot study. Geophysical Research Letters, 19(24), 2401–2404. doi: 10.1029/92GL02916

Ralph, F. M., Dettinger, M., Lavers, D., Gorodetskaya, I. V, Martin, A., Viale, M., White, A. B., Oakley, N., Rutz, J., & Spackman, J. R. (2017). Atmospheric rivers emerge as a global science and applications

focus. Bulletin of the American Meteorological Society, 98(9), 1969–1973. doi: 10.1175/BAMS-D-16-0262.1

Ralph, F. M., Neiman, P. J., & Wick, G. A. (2004). Satellite and CALJET aircraft observations of atmospheric rivers over the eastern North Pacific Ocean during the winter of 1997/98. Monthly weather review, 132(7), 1721-1745.

Ramos, A. M., Trigo, R. M., Liberato, M. L. R., & Tomé, R. (2015). Daily precipitation extreme events in the Iberian Peninsula and its association with atmospheric rivers. Journal of Hydrometeorology, 16(2), 579–597. doi: 10.1175/JHM-D-14-0103.1

Sabziparvar, A. A., Movahedi, S., Asakereh, H., Maryanaji, Z., & Masoodian, S. A. (2014). Geographical factors affecting variability of precipitation regime in Iran. Theoretical and Applied Climatology, 120, 367-376. doi: 10.1007/s00704-014-1174-3

Tan, Y., Yang, S., Zwiers, F., Wang, Z., & Sun, Q. (2022). Moisture budget analysis of extreme precipitation associated with different types of atmospheric rivers over western North America. In Climate Dynamics (Vol. 58, Issues 3–4, pp. 793–809). doi: 10.1007/s00382-021-05933-3

Whan, K., Sillmann, J., Schaller, N., & Haarsma, R. (2020). Future changes in atmospheric rivers and extreme precipitation in Norway. Climate Dynamics, 54(3), 2071–2084. doi: 10.1007/s00382-019-05099-z

Xu, G., Ma, X., Chang, P., & Wang, L. (2020). Image-processing-based atmospheric river tracking method version 1 (IPART-1). In Geoscientific Model Development (Vol. 13, Issue 10, pp. 4639–4662). doi: 10.5194/gmd-13-4639-2020

Trend analysis of the frequency and characteristics of atmospheric rivers entering the lake Urmia basin

Saba Naderi[1], Majid Montaseri[2], Somayeh Hejabi[3]*

PhD student in Water Resources Engineering, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran.
Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran.
Associate professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran
* Corresponding author: s.hejabi@urmia.ac.ir

Abstract

Atmospheric rivers are narrow and elongated structures of highly moist water vapor in the atmosphere that flow within the mid-levels of the troposphere and transport a large amount of moisture from tropical regions to higher latitudes. In this study, aiming to investigate the trends in the frequency and characteristics of atmospheric rivers entering the Lake Urmia basin, the THR approach based on image processing algorithms

in the IPART Python package was used to identify atmospheric rivers. The trends in the frequency and characteristics of these rivers were then analyzed over the 1991–2020 period. The results showed that April (32.64%) and March (26.74%) had the highest frequency of atmospheric rivers, and that most of these rivers originated from the Mediterranean Sea (33.68%), the Red Sea (17.71%), and the Gulf of Aden (13.89%). Trend analysis indicated that the frequency of atmospheric rivers showed a significant increasing trend of 0.1 year-1 in March and a significant decreasing trend of -0.0455 year-1 in November; however, no significant trends in frequency were observed in other months. Moreover, at the annual scale, none of the atmospheric river characteristics showed significant trends during the study period.

Keywords: Atmospheric river, IPART Python package, Trend analysis, THR approach.

سومین کنفرانس ملی آب و هواشناسی ایران (با محوریت تغییر اقلیم)
The 3rd National Conference on Climatology of Iran (Focusing on Climate Change)
ارومیه ۱۶ مهر ۱۴۰۴

مروری بر ادغام علوم داده و سنجش‌ازدور در هیدرولوژی: کاربردهای یادگیری ماشین و تلفیق داده‌ها

توحید خانی ئیلانلو[۱]، میرحسن میر یعقوب زاده[*۲]

۱- دانشجویی دکترا علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران (t.khanieilanlo@gmail.com)

۲-دانشیار دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران (m.miryaghoobzadeh@gmail.com)

چکیده

پیشرفت‌های اخیر در فناوری‌های سنجش‌ازدور و روش‌های علم داده، فرصت‌های نوینی برای پایش و مدیریت منابع آب فراهم کرده است. این مقاله مروری متمرکز بر یکپارچه‌سازی داده‌های ماهواره‌ای و پهپادی با روش‌های نوین یادگیری ماشین و داده‌های آماری در کاربردهای هیدرولوژیک است. با بررسی و تحلیل مقالات منتخب منتشرشده بین سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۲۴، هدف ما شناسایی الگوهای تکنولوژیکی و مقایسه عملکرد الگوریتم‌ها برای برطرف‌کردن چالش‌ها و مسیرهای تحقیقاتی آینده است. نتایج نشان می‌دهد که داده‌های چند منبع و روش‌های تلفیقی مانند Ensemble Kalman Filter و Particle Filter می‌توانند عدم قطعیت مدل‌های هیدرولوژیک را کاهش داده و دقت پیش‌بینی‌ها را ارتقا دهند. الگوریتم‌های یادگیری عمیق در مسائل پیش‌بینی زمانی و استخراج ویژگی از تصاویر ماهواره‌ای عملکرد بالاتری نسبت به مدل‌های قدیمی نشان داده‌اند. بااین‌وجود وابستگی به داده‌های برچسب‌دار باکیفیت و نیاز به زیرساخت محاسباتی قوی از محدودیت‌های اصلی هستند. کاربردهای عملی این ترکیب فناوری‌ها نوین را در پیش‌بینی سیلاب، پایش خشکسالی و ارزیابی سطح آب‌های زیرزمینی بررسی می‌کند و راهکارهایی برای بهبود تفسیرپذیری مدل‌ها و یکپارچه‌سازی داده‌های چند مقیاسی برای توسعه سامانه‌های بلادرنگ پیشنهاد می‌شود. این مروری تحلیلی می‌تواند به پژوهشگران و تصمیم‌گیران کمک کند تا روش‌های مناسب‌تر و پایدارتر برای مدیریت منابع آب در مواجهه با چالش‌های اقلیمی و انسانی انتخاب و پیاده‌سازی کنند.

کلیدواژه‌ها: هیدرولوژی، سنجش از راه دور، فناوری‌های نوین، یادگیری عمیق، تلفیق داده

مقدمه

هیدرولوژی به عنوان شاخه‌ای از علوم زمین که به مطالعه گردش، توزیع و کیفیت آب در سطوح مختلف چرخه هیدرولوژیکی می‌پردازد و نقش حیاتی در مقابله با چالش‌های جهانی نظیر کمبود منابع آب، وقوع سیلاب‌های مخرب، آلودگی آب و تغییرات اقلیمی ایفا می‌کند (Gebremichael & Hossain, 2010) افزایش فشارهای انسانی و زیست‌محیطی نیاز به ابزارهای دقیق و کارآمد برای پایش و مدیریت منابع آب بیش از پیش احساس می‌شود. روش‌های قدیمی هیدرولوژیکی که عمدتاً بر پایه ایستگاه‌های اندازه‌گیری زمینی استوار هستند که اغلب با محدودیت‌هایی همچون پراکندگی مکانی، هزینه‌های بالا و عدم پوشش مناسب در مناطق دورافتاده یا در حال توسعه مواجه‌اند که این امر منجر به عدم قطعیت‌های قابل توجه در مدل‌سازی و پیش‌بینی فرآیندهای هیدرولوژیکی می‌گردد. پیشرفت‌های چشمگیر در فناوری‌های سنجش از دور (Remote Sensing) این محدودیت‌ها را تا حد زیادی برطرف کرده است(Brocca et al., 2023). این فناوری‌ها، شامل تصاویر ماهواره‌ای اپتیکی و راداری، پهپادها (UAVs)، لیزر اسکنرهای هوایی (LiDAR) و سنجش‌های گرانشی (مانند مأموریت GRACE و GRACE-FO)، امکان جمع‌آوری داده‌های سینوپتیک، تکراری و در مقیاس جهانی را فراهم می‌آورند. برای نمونه، مأموریت GRACE توانسته تغییرات ذخیره آب زیرزمینی را در سطح جهانی نظارت کند و روندهای تخلیه منابع آب را آشکار سازد، در حالی که فناوری‌های راداری مانند SAR (Synthetic Aperture Radar) در نظارت بر رطوبت خاک و پوشش برفی حتی در شرایط ابری مؤثر عمل کرده‌اند. همچنین، پیشرفت‌های اخیر در سنجش از دور فعال (Active Remote Sensing)، مانند استفاده از روش‌های GNSS و آلتیمتری که درک ما از چرخه هیدرولوژیکی زمینی را متحول کرده و امکان نظارت بر تغییرات فیزیکی و فرآیندهای هیدرولوژیکی را بهبود بخشیده است(Pietroniro & Prowse, 2002). هم‌زمان با این پیشرفت‌ها، علوم داده (Data Science) با بهره‌گیری از تکنیک‌های پیشرفته تحلیل داده‌های بزرگ(Big Data)، یادگیری ماشین (Machine Learning) و یادگیری عمیق (Deep Learning) قابلیت پردازش، تفسیر و پیش‌بینی این حجم عظیم داده‌ها را فراهم آورده است. الگوریتم‌هایی نظیر شبکه‌های عصبی کانولوشنی (CNN) برای استخراج ویژگی‌های مکانی از تصاویر ماهواره‌ای، و شبکه‌های حافظه کوتاه‌مدت بلندمدت (LSTM) برای مدل‌سازی سری‌های زمانی هیدرولوژیکی که عملکرد برتری نسبت به مدل‌های قدیمی فیزیکی یا آماری نشان داده‌اند (Zounemat-Kermani et al., 2020). علاوه بر این، روش‌های تلفیق داده (Data Assimilation) مانند فیلتر کالمن گروهی (Ensemble Kalman Filter) و فیلتر ذرات (Particle Filter) با ادغام مشاهدات سنجش از دور با مدل‌های هیدرولوژیکی و عدم قطعیت‌ها را کاهش داده و دقت پیش‌بینی‌ها را ارتقا می‌بخشند(Saha & Pal, 2024) پیشرفت‌های اخیر در این حوزه، از جمله استفاده از داده‌های

SnowEx برای بهبود سنجش از دور ذخیره برف، و ادغام هوش مصنوعی با داده‌های ماهواره‌ای برای تحلیل کیفیت آب و پوشش زمین نشان‌دهنده پتانسیل بالای این هم‌افزایی در مدیریت منابع آب است(Ali et al., 2025)

این تحولات که ناشی از پیشرفت در کوچک‌سازی حسگرها و افزایش قدرت محاسباتی و دسترسی به مجموعه‌داده‌های آزاد همچون Google Earth Engine است(Gorelick et al., 2017). هیدرولوژی را از یک علم توصیفی به سمت یک رویکرد پیش‌بینی‌کننده و عملیاتی سوق داده‌اند. مطالعات موردی در مناطق متنوع مانند حوضه ابخیز رود نیل در کشور مصر برای پیش‌بینی جریان رودخانه برای ارزیابی کیفیت آب را نشان می‌دهنده کاربردهای عملی این فناوری‌ها هستند (Jiang & Wang, 2019)با این حال، چالش‌هایی نظیر هماهنگ‌سازی داده‌های چندمقیاسی، نیاز به زیرساخت‌های محاسباتی قوی و ملاحظات اخلاقی در استفاده از داده‌ها همچنان باقی است.

این مقاله مروری، با تمرکز بر مروری بر ادغام علوم داده و سنجش‌ازدور در هیدرولوژی با محوریت کاربردهای یادگیری ماشین و تلفیق داده‌ها به بررسی پیشرفت‌های اخیر (۲۰۰۸ تا ۲۰۲۴) می‌پردازد. اهداف اصلی عبارت‌اند از: شناسایی الگوهای تکنولوژیکی، مقایسه عملکرد الگوریتم‌ها، تحلیل چالش‌ها و پیشنهاد مسیرهای تحقیقاتی آینده که ساختار مقاله به شرح زیر است: ابتدا روش‌شناسی مرور سیستماتیک توصیف می‌شود، سپس نتایج تحلیل مقالات منتخب ارائه می‌گردد و در نهایت نتیجه‌گیری و چشم‌اندازها بیان می‌شود. این سنتز نه‌تنها به پژوهشگران کمک می‌کند تا روش‌های نوین را بشناسند؛ بلکه تصمیم‌گیران را در اتخاذ راهکارهای پایدار برای مدیریت منابع آب در برابر تغییرات اقلیمی و انسانی یاری می‌رساند.

مواد و روش‌ها

این مطالعه مروری سیستماتیک بر اساس PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) طراحی و اجرا شد تا ادغام علوم داده و فناوری‌های سنجش‌ازدور در کاربردهای هیدرولوژیک را به طور جامع بررسی کند. جستجوی مقالات در پایگاه‌های داده علمی معتبر شامل Web of Science و Scopus انجام گردیده مقالات مرتبط با جنبه‌های زیست‌محیطی و منابع آب استفاده شد. بازه زمانی جستجو از سال ۲۰۰۸ تا سپتامبر ۲۰۲۵ انتخاب گردید تا پیشرفت‌های اخیر در فناوری‌های سنجش‌ازدور و روش‌های یادگیری ماشین را پوشش دهد. این بازه بر اساس نقطه عطف انتشار مقالات کلیدی در ادبیات و تحولات معاصر تعیین شد.

معیارهای ورود مقالات به شرح زیر بودند:

۱) کاربرد هم‌زمان علوم داده که شامل یادگیری ماشین، یادگیری عمیق یا تکنیک‌های تلفیق داده و فناوری‌های سنجش‌ازدور مانند داده‌های ماهواره‌ای، پهپادی یا حسگرهای in-situ در مسائل هیدرولوژیک
۲) تمرکز بر الگوریتم‌های نوین مانند LSTM، CNN، Random Forest، Ensemble Kalman Filter یا Particle Filter؛
۳) انتشار در ژورنال‌های معتبر با ضریب تأثیر (Impact Factor) بالای ۲ یا همایش‌های بین‌المللی معتبر. معیارهای خروج شامل مقالات تکراری، غیرمرتبط (مانند کاربردهای صرفاً کشاورزی بدون تمرکز هیدرولوژیک)، مقالات قبل از ۲۰۰۸ و مطالعاتی بدون ارزیابی کمی عملکرد (مانند RMSE، R^2 یا Nash-Sutcliffe Efficiency) بودند.
در مرحله جستجوی اولیه حدود ۳۵۰ مقاله شناسایی گردید سپس با بررسی عنوان و چکیده ۱۵۰ مقاله برای ارزیابی دقیق‌تر انتخاب شدند. در مرحله بعدی، متن کامل مقالات بررسی گردید و در نهایت ۲۰ مقاله با بیشترین ارتباط و کیفیت انتخاب شدند افزایش از ۱۰ مقاله اولیه برای پوشش جامع‌تر با افزودن مطالعات جدید از سال‌های اخیر این فرایند با استفاده از ابزارهای مدیریت منابع EndNote برای حذف تکراری‌ها و ثبت مراحل انجام شد. جریان غربالگری بر اساس نمودار PRISMA ترسیم گردید شکل ۱ که شامل تعداد مقالات در هر مرحله است: شناسایی=۳۵۰، غربالگری=۱۵۰، واجد شرایط=۵۰، انتخاب نهایی=۲۰ است.

برای استخراج ساختارمند داده‌ها یک چارچوب داده‌ای استاندارد تعریف شد که شامل ستون‌های زیر بود: نوع مطالعه مروری، تجربی یا ترکیبی که منابع داده ماهواره‌ای همچون GRACE و Sentinel، پهپادی مانند UAV، حسگرهای in-situ یا چند منبع و همچنین روش‌های علوم داده از الگوریتم یادگیری ماشین مانند SVM یا Random Forest و یادگیری عمیق مانند CNN یا LSTM و همچنین تلفیق داده حوزه کاربرد پیش‌بینی سیلاب، پایش خشکسالی، ارزیابی آب‌های زیرزمینی، کیفیت آب یا مدیریت منابع آب و مقیاس فضایی/زمانی (محلی/جهانی، روزانه/فصلی) به نتایج ارزیابی عملکرد و محدودیت‌های گزارش‌شده. داده‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای تحلیل مانند Excel برای شمارش فراوانی و Python (با کتابخانه‌های Pandas و Matplotlib) برای تحلیل کمی و visualization استخراج و پردازش شدند.
تحلیل داده‌ها به دو صورت توصیفی و کمی انجام گردید. تحلیل توصیفی شامل شناسایی تم‌های اصلی مانند روندهای تکنولوژیکی و چالش‌های ادغام با استفاده از روش تحلیل محتوایی کیفی (content analysis) بود که تم‌ها را از طریق کدگذاری دستی و نرم‌افزاری استخراج کرد. تحلیل کمی شامل شمارش فراوانی روش‌ها مانند درصد استفاده از LSTM در پیش‌بینی سری زمانی، توزیع موضوعی ۴۰٪ تمرکز بر سیلاب وسعت جغرافیایی توزیع مطالعات در قاره‌ها و مقایسه عملکردی extraction of effect sizes از مقالات مبنا مانند بهبود دقت مدل‌های هیبرید تا ۲۵-۳۰٪ نسبت به مدل‌های قدیمی بود. در مواردی که مقالات مقایسه مستقیم ارائه کرده بودند.

محدودیت‌های روش‌شناسی شامل احتمال سوگیری انتشار publication bias به دلیل تمرکز بر مقالات منتشرشده در ژورنال‌های محدودیت تعداد مقالات انتخاب‌شده برای تحلیل عمیق ۲۰ مورد که ممکن است تمام ادبیات را پوشش ندهد تفاوت در معیارهای ارزیابی عملکرد بین مطالعات مانند استفاده از شاخص‌های متفاوت برای دقت و عدم دسترسی به برخی مقالات پشت paywall بودند. همچنین، تمرکز بر مقالات انگلیسی ممکن است مطالعات محلی را نادیده بگیرد. این محدودیت‌ها در بخش بحث بررسی و پیشنهادهایی برای مطالعات آینده ارائه خواهد شد.

نتایج

تحلیل سیستماتیک ۱۰ مقاله منتخب از بازه زمانی ۲۰۰۸ تا ۲۰۲۴ نشان‌دهنده نقش محوری ادغام فناوری‌های سنجش از دور و علوم داده در ارتقای مدل‌سازی هیدرولوژیک است. این ادغام با بهره‌گیری از داده‌های چندمنبعی مانند تصاویر ماهواره‌ای، پهپادی و حسگرهای in-situ به‌طور قابل‌توجهی خلأهای داده‌ای را در مناطق دورافتاده یا با پوشش ایستگاهی محدود پر کرده و دقت پیش‌بینی‌های هیدرولوژیک را افزایش داده است. به ویژه در محصولات ماهواره‌ای چندحسگری شامل داده‌های اپتیکی، راداری و میکروویو غیرفعال بیشترین فراوانی کاربرد را داشته‌اند زیرا امکان پایش سینوپتیک و تکراری را فراهم می‌کنند(Jiang & Wang, 2019; Xu et al., 2014). این فناوری‌ها، در ترکیب با روش‌های داده‌کاوی توانسته‌اند متغیرهای کلیدی هیدرولوژیک مانند ذخیره آب زیرزمینی (با استفاده از GRACE) و جریان رودخانه‌ای را با رزولوشن فضایی-زمانی بهبودیافته مدل‌سازی کنند (Hasan et al., 2024; Sun & Scanlon, 2019). در حوزه الگوریتم‌های علوم داده مدل‌های یادگیری عمیق برجسته‌ترین عملکرد را نشان داده‌اند. شبکه‌های عصبی حافظه‌دار بلندمدت-کوتاه‌مدت (LSTM) برای پیش‌بینی سری‌های زمانی، مانند تخمین دبی رودخانه یا رطوبت خاک، به دلیل توانایی در وابستگی‌های زمانی طولانی، برتر از مدل‌های سنتی ظاهر شده‌اند(Zounemat-Kermani et al., 2020). همچنین، شبکه‌های عصبی کانولوشنی (CNN) در استخراج ویژگی‌های مکانی از تصاویر ماهواره‌ای، مانند شناسایی مناطق سیل‌زده یا پوشش گیاهی، کارایی بالایی داشته‌اند (Acharya et al., 2021). الگوریتم‌های یادگیری ماشین جنگل تصادفی (Random Forest) و ماشین بردار پشتیبان (SVM) در مسائل طبقه‌بندی (مانند تشخیص خشکسالی) و رگرسیون مؤثر بوده‌اند. در حالی که مدل‌های گرادیان بوستینگ (GBM) برای مدیریت داده‌های نویزی مناسب‌تر گزارش شده‌اند (Hasan et al., ۲۰۲۴). مطالعات نشان می‌دهند که این الگوریتم‌ها، با کاهش میانگین مربعات خطا (RMSE) تا ۲۰-۴۰ درصد نسبت به روش‌های آماری کلاسیک، دقت را افزایش می‌دهند، هرچند وابستگی به داده‌های آموزشی گسترده و پیش‌پردازش (مانند نرمال‌سازی و حذف ناهنجاری‌ها) یک محدودیت کلیدی است (Zanella et al., 2023)

تکنیک‌های تلفیق داده (data assimilation) نقش حیاتی در کاهش عدم قطعیت مدل‌های هیدرولوژیک ایفا کرده‌اند. فیلتر کالمان گروهی (Ensemble Kalman Filter) و فیلتر ذرات (Particle Filter) بیشترین کاربرد را داشته‌اند و در ادغام مشاهدات ماهواره‌ای با مدل‌های فیزیکی خطاهای پیش‌بینی را تا ۱۵-۳۰ درصد کاهش داده‌اند (Gebremichael & Hossain, 2010; Moradkhani, 2008) روش‌های واریانسی نیز در مطالعات مقیاس بزرگ برای بهینه‌سازی پارامترها مؤثر بوده‌اند و به‌ویژه در شرایط غیرگوسی (non-Gaussian) که فیلتر ذرات برتری دارد (Xu et al., 2014)این تکنیک با ترکیب داده‌های چندمقیاسی امکان مدل‌سازی بلادرنگ را فراهم کرده‌اند.

از منظر حوزه‌های کاربردی پیش‌بینی سیلاب بیشترین تمرکز را داشته ۴۰ درصد با کاربردهایی مانند نظارت بر حوضه‌های رودخانه‌ای با استفاده از UAVها و داده‌های راداری (Acharya et al., 2021)پایش خشکسالی ۳۰ درصد و ارزیابی سطح آب زیرزمینی ۲۰ درصد در رتبه‌های بعدی قرار دارند، در حالی که مدیریت کیفیت آب و مدل‌سازی شهری کمتر پوشش داده شده‌اند (Sun & Scanlon, 2019; Thenkabail, 2015) یافته‌های عملکردی حاکی از آن است که مدل‌های هیبریدی (ترکیبی فیزیکی-داده‌محور) در دستیابی به تعادل بین دقت (مانند R^2 بالای ۰/۸۵) و تفسیرپذیری (interpretability) موفق‌تر بوده‌اند در مقایسه با مدل‌های صرفاً داده‌محور که ممکن است به over-fitting حساس باشند (Hasan et al., 2024; Zounemat-Kermani et al., 2020). توزیع جغرافیایی مطالعات متنوع اما نامتوازن است و در مناطق اروپایی و آمریکای شمالی (۶۰ درصد) به دلیل دسترسی به داده‌های دقیق و زیرساخت‌های پیشرفته سهم غالب را دارند. مناطق در حال توسعه مانند آسیا و آفریقا (۳۰ درصد) کمتر پوشش داده شده‌اند، که این امر می‌تواند به محدودیت‌های داده‌ای و محاسباتی نسبت داده شود (Jiang & Wang, 2019)

جدول ۱ ویژگی‌های مطالعات مروری انتخاب‌شده

روش‌های علم داده	کاربرد هیدرولوژیکی	فناوری اصلی	نوع مطالعه	مطالعه
یادگیری ماشینی (ذکر کلی)، روش‌های همگرایی داده‌ها	پیش‌بینی جریان در حوضه‌های با تنظیم بالا (آب سطحی)	سنجش‌ازدور ماهواره‌ای، همگرایی داده‌ها	مرور نظام‌مند	(Jiang & Wang, 2019)
LSTM، RF، SVM، ANN، GBM، CNN، مدل‌های دومسیرهLSTM ، مدل‌های رمزگذاری فیزیکی، DHI-GHM	پیش‌بینی جریان، پیش‌بینی سطح آب زیرزمینی، پیش‌بینی سیلاب، ارزیابی خشکسالی (مقیاس جهانی)	یادگیری ماشینیLSTM) ، RF، SVMو غیره(، پایگاه‌های داده بزرگ هیدرولوژیکی	مرور نظام‌مند با تحلیل کتاب‌سنجی	(Hasan et al., 2024)
شبکه‌های عصبی(PERSIANN) ، همسوسازی داده‌ها، رگرسیون	آب سطحی: پایش کشاورزی/محصول، شناسایی	محصولات بارش ماهواره‌ای (TMPA)، (PERSIANN، همسوسازی داده‌ها	مرور نظام‌مند و تحلیل نظری	(Gebremichael & Hossain, 2010)

	سیلاب، پایش خشکسالی (جهانی)			
روش درج مستقیم، DVAR۴، EnKS، DVAR۳، KF، EKF، EnKF، PF	پیش‌بینی سیلاب، مدیریت منابع آب (منطقه‌ای تا جهانی)	سنجش‌ازدور، همگرایی داده‌ها (KF)، EnKF، (PF)	مرور نظام‌مند	(Xu et al., 2014)
یادگیری ماشینی (ذکر کلی)، الگوریتم‌های پردازش داده	مدیریت منابع آب (کلی)	فناوری‌های سنجش، پردازش داده‌ها، یادگیری ماشینی	مرور	(Zanella et al., 2023)
ذکر نشده	مدیریت آب در کشاورزی/جنگلداری، پایش اکوسیستم، مدل‌سازی هیدرولوژیکی محلی/منطقه‌ای	پهپادها(UAVs) ، سنجش‌ازدور، اندازه‌گیری میدانی	مرور نظام‌مند	(Acharya et al., 2021)
یادگیری عمیق، خودرمزگذارها، CNN، انتقال یادگیری، مدل‌سازی مولد، TGDS، مدل‌های جانشین	پیش‌بینی سیلاب، پایش خشکسالی (منطقه‌ای تا جهانی)	کلان‌داده، یادگیری عمیق، سنجش‌ازدور، اینترنت اشیا (IoT)	مرور نظام‌مند با تحلیل کتاب‌سنجی و مدل‌سازی موضوعی	(Sun & Scanlon, 2019)
EnKF، PF، استنباط بیزی	پیش‌بینی سیلاب، مدیریت منابع آب/کشاورزی (محلی/منطقه‌ای)	سنجش‌ازدور، همگرایی داده‌ها (EnKF)، (PF	مرور	(Moradkhani, 2008)
ANNs، پس‌انتشار خطا، الگوریتم لونبرگ-مارکوارت، PSO، شبکه‌های پیشخور/بازگشتی/ترکیبی/عمیق	پیش‌بینی سطح آب، مدل‌سازی سیلاب، انتقال رسوب، تقاضای آب شهری، سازه‌های هیدرولیکی (آب سطحی)	نورومحاسباتANN) ، RNN(مدل‌های ترکیبی	مرور نظام‌مند با تحلیل کتاب‌سنجی	(Zounemat-Kermani et al., 2020)
-	شناسایی آب زیرزمینی، پیش‌بینی سیلاب، نقشه‌برداری تالاب، برف، خشکسالی، تخریب اراضی	سنجش‌ازدور چند حسگری و چند تفکیکی	مرور نظام‌مند	(Thenkabail, 2015)

نتیجه‌گیری

تحلیل سیستماتیک مقالات منتخب از سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۲۴ نشان‌دهنده آن است که ادغام فناوری‌های سنجش‌ازدور مانند داده‌های ماهواره‌ای چند حسگری پهپادها وLiDAR با روش‌های پیشرفته علوم داده از جمله الگوریتم‌های یادگیری ماشین

و یادگیری عمیق به طور قابل‌توجهی دقت پوشش فضایی - زمانی و قابلیت پیش‌بینی مدل‌های هیدرولوژیکی را ارتقا می‌دهد. این هم‌افزایی در کاربردهای کلیدی نظیر پیش‌بینی سیلاب، پایش خشکسالی، ارزیابی سطح آب‌های زیرزمینی و مدیریت کیفیت آب با کاهش عدم قطعیت مدل‌ها از طریق تکنیک‌های تلفیق داده همراه بوده است. یافته‌ها حاکی از آن است که مدل‌های مبتنی بر یادگیری عمیق، در مقایسه با رویکردهای سنتی فیزیکی یا آماری، بهبودهای کمی قابل‌ملاحظه‌ای همچون کاهش میانگین خطای ریشه دوم (RMSE) تا ۲۰-۳۰ درصد در پیش‌بینی سری‌های زمانی را به ارمغان آورده‌اند. پیشرفت‌ها اغلب به داده‌های تاریخی گسترده، پیش‌پردازش دقیق و زیرساخت‌های محاسباتی قوی وابسته هستند. توزیع جغرافیایی مطالعات نیز بر تمرکز بیشتر بر مناطق توسعه‌یافته (مانند اروپا و آمریکای شمالی) تأکید دارد که این امر لزوم گسترش تحقیقات به نواحی درحال‌توسعه با محدودیت‌های داده‌ای را برجسته می‌سازد.

باوجود این دستاوردها، چالش‌های ساختاری مانع از تحقق کامل پتانسیل این ادغام می‌شوند. محدودیت‌های اصلی شامل وابستگی به داده‌های برچسب‌دار باکیفیت بالا، ناهماهنگی مقیاس‌های داده‌ای چند منبع، الزامات محاسباتی پرهزینه و کمبود تفسیرپذیری مدل‌های مانند شبکه‌های عصبی عمیق است که اعتماد تصمیم‌گیران را کاهش می‌دهد. علاوه بر این، مسائل اخلاقی مانند حفظ حریم خصوصی داده‌ها و سوگیری‌های الگوریتمی در کاربردهای عملی در سامانه‌های بلادرنگ نیازمند توجه فوری هستند.

چشم‌انداز تحقیقاتی آینده بر توسعه مدل‌های هیبریدی فیزیکی - داده‌محور تمرکز دارد که در آن ترکیب CNN-LSTM یا معماری‌های مبتنی بر Transformer امکان استخراج هم‌زمان ویژگی‌های مکانی و زمانی را فراهم می‌کند، درحالی‌که تکنیک‌های تلفیق داده پیشرفته‌تر ازجمله Particle Filter در فضاهای توزیع غیرگوسی عدم قطعیت را بیشتر کاهش می‌دهند. پیشنهاد می‌شود که سامانه‌های عملیاتی مبتنی بر پلتفرم‌های ابری مانند Google Earth Engine و هوش مصنوعی توضیح‌پذیر برای نظارت بلادرنگ طراحی شده اند. قابلیت مقیاس‌پذیری و دسترسی در مناطق دورافتاده افزایش‌یافته و همکاری میان‌رشته‌ای میان هیدرولوژیست‌ها، متخصصان علوم داده، مهندسان نرم‌افزار و سیاست‌گذاران ضروری است تا چارچوب‌های یکپارچه‌ای توسعه یابند که نه‌تنها دقت پیش‌بینی را بهینه کنند، بلکه جنبه‌های اقتصادی، پایداری و کاربردی را نیز مدنظر قرار دهند.

در نهایت، این ادغام فناوری‌ها می‌تواند نقش‌محوری در مقابله با چالش‌های جهانی ناشی از تغییرات اقلیمی و فشارهای انسانی ایفا کند، مشروط بر اینکه پژوهش‌های آتی بر تعادل میان نوآوری فنی و نیازهای تصمیم‌گیری واقعی تمرکز نمایند. چنین رویکردی نه‌تنها مدل‌های هیدرولوژیکی را دقیق‌تر و تفسیرپذیرتر می‌سازد، بلکه به مدیریت پایدار منابع آب در سطح جهانی کمک شایانی خواهد کرد.

منابع

Acharya, B. S., Bhandari, M., Bandini, F., Pizarro, A., Perks, M., Joshi, D. R., Wang, S., Dogwiler, T., Ray, R. L., Kharel, G., & Sharma, S. (2021). Unmanned Aerial Vehicles in Hydrology and Water Management: Applications, Challenges, and Perspectives. Water resources research, 57(11). https://doi.org/10.1029/2021wr029925

Ali, A., Jat Baloch, M. Y., Naveed, M., Nigar, A., Almalki, A. S., Rasool, A. G., Gedfew, M. A., & Arafat, A. A. (2025). Advanced satellite-based remote sensing and data analytics for precision water resource management and agricultural optimization. Scientific Reports, 15(1), 27527. https://doi.org/10.1038/s41598-025-13167-0

Brocca, L., Zhao, W., & Lu, H. (2023). High-resolution observations from space to address new applications in hydrology. The Innovation, 4 .(۳)

Gebremichael, M., & Hossain, F. (2010). Satellite Rainfall Applications for Surface Hydrology (M. Gebremichael & F. Hossain, Eds.). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2915-7

Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment, 202, 18-27. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031

Hasan, F ,.Medley, P., Drake, J., & Chen, G. (2024). Advancing Hydrology through Machine Learning: Insights, Challenges, and Future Directions Using the CAMELS, Caravan, GRDC, CHIRPS, PERSIANN, NLDAS, GLDAS, and GRACE Datasets. Water, 16(13), 1904. https://doi.org/۱۰.۳۳۹۰/w16131904

Jiang, D., & Wang, K. (2019). The role of satellite-based remote sensing in improving simulated streamflow: A review. Water, 11(8), 1615 .

Moradkhani, H. (2008). Hydrologic Remote Sensing and Land Surface Data Assimilation. Sensors ,(۵)۸ , .۳۰۰۴-۲۹۸۶https://doi.org/10.3390/s8052986

Pietroniro, A., & Prowse, T. D. (2002). Applications of remote sensing in hydrology. Hydrological Processes, 16(8), 1537-1541 .

Saha, A., & Pal, S. C. (2024). Application of machine learning and emerging remote sensing techniques in hydrology: A state-of-the-art review and current research trends. Journal of Hydrology, 632, 130907.

Sun, A. Y., & Scanlon, B. R. (2019). How can Big Data and machine learning benefit environment and water management :a survey of methods, applications, and future directions. Environmental Research Letters, 14(7), 073001. https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab1b7d

Thenkabail, P. (2015). Remote Sensing of Water Resources, Disasters, and Urban Studies. https://doi.org/10/۱۲۰۱.b19321

Xu, X., Li, J., & Tolson, B. A. (2014). Progress in integrating remote sensing data and hydrologic modeling. Progress in Physical Geography: Earth and Environment, 38(4), 464-498. https://doi.org/10.1177/0309133314536583

Zanella, A., Zubelzu, S., & Bennis, M. (2023). Sensor Networks, Data Processing, and Inference: The Hydrology Challenge. IEEE Access, 11, 107823-107842. https://doi.org/10.1109/access.2023.3318739

Zounemat-Kermani, M., Matta, E., Cominola, A., Xia, X., Zhang, Q., Liang, Q., & Hinkelmann, R. (2020). Neurocomputing in surface water hydrology and hydraulics: A review of two decades retrospective, current status and future prospects. Journal of Hydrology, 588, 125085. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125085

A review of data science integration and remote sensing in hydrology: machine learning applications and data integration

Tohid Khani Ilanlo[1], Mirhassan Miryaghoubzadeh*[2]

[1] Ph.D. Candidate in Watershed Science and Engineering, Faculty of Natural Resources, UrmiaUniversity, Urmia, Iran. (t.khanieilanlo@gmail.com)
[2] Associate Professor, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia,Iran. (m.miryaghoobzadeh@gmail.com)
* Corresponding author: m.miryaghoobzadeh@gmail.com

Abstract

Recent advances in measurement technologies and data science methods have provided new opportunities for monitoring and water resources management. This article focuses on integrating satellite and drone data by new machine learning methods and statistical data in hydrological applications. By analyzing and analyzing selected articles between years 1 and 2, our goal is to identify technological patterns and compare the performance of algorithms to address future research challenges and paths. The results show that multi -source data and integrated methods such as Ensemble Kalman Filter and Particle Filter can reduce the uncertainty of hydrological models and improve the accuracy of forecasts. Deep learning algorithms have shown higher performance in time forecasting issues and extracting features from satellite images than older models. However, dependence on quality label data and the need for strong computational infrastructure are key limitations. Practical applications of these technologies examine new technologies in flood forecasting, drought monitoring and groundwater evaluation, and strategies for improving the interpretability of models and integrating data. This analytical review can help researchers and decision makers select and implement more suitable and sustainable ways to manage water resources in the face of climate and human challenges.

Keywords: Hydrology, Remote Sensing, New Technologies, Deep Learning, Data Integration

نقش استراتژیکی نهادهای مدنی در تقویت ظرفیت‌های سازگاری جوامع با تغییر اقلیم

محترم محمدیاریان[۱]

۱- گروه آموزش جغرافیا، دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران
Mohtaram.meteo65@gmail.com

چکیده

تغییر اقلیم به عنوان یکی از چالش‌های پیچیده و چندبُعدی قرن بیست‌ویکم، اثرات مستقیم و غیرمستقیمی بر منابع حیاتی، به‌ویژه منابع آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک، بر جای گذاشته است. کشور ایران نیز با توجه به موقعیت جغرافیایی و اقلیم غالب، از جمله کشورهایی است که آسیب‌پذیری بالایی در برابر پیامدهای تغییر اقلیم نظیر کاهش بارش، افزایش دما، تبخیر شدید، خشکسالی‌های مکرر و ناهنجاری‌های اقلیمی دارد. در این میان، سازمان‌های مردم‌نهاد (NGOs) می‌توانند به عنوان واسطه‌ای کارآمد میان دولت و جامعه، نقش کلیدی در افزایش تاب‌آوری اجتماعی و محیط‌زیستی ایفا کنند. این پژوهش با مروری تحلیلی بر وضعیت اقلیمی کشور، روندهای جهانی تغییر اقلیم و تجربیات بین‌المللی، به بررسی قابلیت‌ها، چالش‌ها و موانع موجود در مسیر نقش‌آفرینی سازمان‌های مردم‌نهاد در حوزه سازگاری با تغییر اقلیم، به‌ویژه در مدیریت بحران آب می‌پردازد. نتایج مطالعه نشان می‌دهد که سمن‌ها می‌توانند از طریق آموزش عمومی، تسهیل‌گری مشارکت اجتماعی، انتقال دانش بومی، نظارت مردمی، و اجرای پروژه‌های میدانی، نقش مکمل دولت‌ها در تحقق سیاست‌های اقلیمی ایفا نمایند. با این حال، چالش‌هایی نظیر ضعف زیرساخت‌های قانونی، کمبود منابع مالی، محدودیت‌های فرهنگی و ضعف در ظرفیت‌سازی تخصصی، اثربخشی این نهادها را کاهش داده است. بر این اساس، تقویت جایگاه سازمان‌های مردم‌نهاد از طریق تدوین سیاست‌های حمایتی، ظرفیت‌سازی نهادی، و توسعه همکاری‌های بین‌بخشی، شرطی ضروری برای دستیابی به توسعه پایدار و انطباق مؤثر با تغییر اقلیم در سطح ملی و محلی خواهد بود.

کلیدواژه‌ها :تغییر اقلیم، سازمان‌های مردم‌نهاد، منابع آب، تاب‌آوری اجتماعی، توسعه پایدار، ایران

مقدمه:

تغییر آب و هوا یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های محیطی قرن بیست‌یکم است که جهان امروز به واسطه‌ی افزایش دما از آن متاثر شده و در نتیجه آن، الگوهای آب و هوایی تغییر کرده است. آمار ثبت شده، میانگین جهانی دمای هوا را در طول

سال‌های ۱۹۶۱ تا ۱۹۹۰ میلادی، ۱۴ درجه سانتی‌گراد نشان می‌دهد، با ادامه روند افزایش دما این میانگین در طول سال‌های ۱۹۹۱ تا ۲۰۰۰ به ۱۴/۲۹ درجه و از ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۷ به ۱۴/۴۴ درجه سانتی‌گراد رسیده است (ترابی آزاد و همکاران، ۱۳۸۹). این درحالی است که کشور ایران از لحاظ جغرافیایی در منطقه‌ای قرار گرفته که نه تنها بطور طبیعی و ذاتی بخش عمده آن جزو مناطق نیمه‌خشک، خشک و فراخشک محسوب می‌شود (نزدیک به ۸۵ درصد) بلکه جزو کشورهایی است که ضریب تاثیرپذیری آن از تغییرات اقلیمی بالاتر از بسیاری مناطق دیگر کره زمین است (شکل ۱) و به تبع بارش نیز با کاهش روبرو است به ویژه طی دهه‌های اخیر (شکل ۲). شکل ۲ ضریب تغییرات بارش را برای منطقه ایران حدود ۰تا ۵- میلی‌متر محاسبه کرده است. اگر چه تغییر اقلیم در مقایسه با برخی از برنامه‌ها مثل کاهش فقر، گرسنگی و توسعه سلامت و اقتصادی جامعه؛ به عنوان یک چالش در مورد وضع آب و هوا برای آینده مطرح می‌شود اما آنچه که دارای اهمیت است و توجه همگان را به خود جلب کرده است این است که تغییر آب و هوا به مسائلی همچون آب و غذا مرتبط است که این موارد می‌تواند به طور جدی توسط تغییر اقلیم تاثیر بپذیرد. حال با توجه به اثراتی که تغییر اقلیم بر روی برنامه‌ها و منافع انسانی دارد ضروری است؛ به منظور سازگاری با تغییر اقلیم و همچنین گسترش مفهوم آن در بین مردم از سازمان‌های مردم نهاد استفاده نمود. اقلیم ما در حال تغییر است— این ایده به طور ویژه‌ای در اواخر دهه‌ی ۱۹۷۰ به دنبال همایش محیط در استکهلم شروع شد. این دوره به یافته‌های هشداردهنده‌ی متعددی همچون ذوب یخچال‌های قطب و هیمالیا، کشف سوراخ شدن لایه ازن، افزایش سطح دریا، الگوهای ناگهانی هوا و شرایط گرمایی نابهنجار اشاره دارد. که عوامل منجر به تاسیس سازمان UNFCCC (یک عهدنامه‌ی بین‌المللی که به شناسایی و ارزیابی تغییر در مقیاس جهانی بپردازد) گردید (Vijeta Rattani). سازمان UNFCCC بر پیامدهای مستقیم و غیر مستقیم بر روی انسان در اثر سامانه‌ی اقلیم تاکید داشت و به طور برجسته نسبت به فعالیت بی‌پروای انسانی که باعث تغییر ترکیبات اتمسفر جهانی می شود تاکید داشت (UNFCCC Charter 1992). نمونه‌ای از این اثرات سوء می‌تواند؛ سو استفاده از منابع آبی، سوخت‌های فسیلی ، الگوهای نایکنواخت کاربری اراضی، فعالیت‌های بدون کنترل آبیاری و زهکشی، جنگل‌زدایی، گسترش معادن، انتشار کربن توسط آلاینده‌های منتشر شده از صنایع اشاره داشت. اینچنین فعالیت‌های ناپایدار و کوته‌نظر بر اکوسیستم‌ها اثر داشته و منجر به تغییر ناگهانی سامانه اقلیمی زمین شده است. بارش‌های ناهمگون، تغییرات در چرخه‌ی هوا و الگوهای مونسون و تخریب تنوع گیاهان و جانوران و . . . همه این موارد یک گذر جهانی را به نمایش می‌گذارند.

تا کنون مطالعات فراوانی در مورد تأثیر و نقش سازمان‌های مردم نهاد در مورد تغییر اقلیم صورت گرفته است که به مختصری از این مطالعات اشاره می‌شود (آرون آگراول، ۲۰۰۸؛ لووچوکو و همکاران، ۲۰۱۴؛ لانی و رایانتی ۲۰۱۱). یکی از نقش‌های مهم سازمان‌های مردم‌نهادNGO) ها) در سطح بین‌المللی، مشارکت فعال در مذاکرات تغییر اقلیم و حمایت از

جوامع محلی در فرآیند سازگاری با تغییرات آب و هوایی است. برای نمونه، پژوهش‌ها نشان داده‌اند کهNGO ها به‌عنوان پل ارتباطی میان جوامع محلی و سیاست‌گذاران جهانی، در تسهیل اجرای برنامه‌های سازگاری در کشورهای در حال توسعه مانند بنگلادش نقش کلیدی دارند .(Betsill & Corell, 2008) همچنین دانشگاه داکا در بنگلادش تحلیل‌هایی در زمینه طرح‌های سازگاری تغییر اقلیم انجام داده است که بر مشارکت و توانمندسازی سازمان‌های مردم‌نهاد در این حوزه تأکید دارد .(Pandey, 2015) افزون بر این، نقشNGO ها در شکل‌دهی و توسعه قراردادهای بین‌المللی زیست‌محیطی به ویژه مذاکرات تغییر اقلیم، از دیرباز تا کنون مورد توجه محققان بوده است و اثبات شده که حضور فعال این نهادها موجب تقویت فرآیندهای تصمیم‌گیری و اجرای تعهدات شده است.(Betsill, 2002) کریمی (۱۳۹۳) در تحقیقی تحت عنوان سازمان‌های مردم نهاد (غیردولتی) و تغییر اقلیم بیان دارد که در یک نگاه تاریخی به کشور ما نشان می‌دهد که سازمان‌های مردمی در قالب گروه‌ها و انجمن‌های خیرخواهانه و داوطلبانه مردمی صدها سال است که در حیات اجتماعی مردم حضور داشتند و از انجام و ساختار نظام‌مند به دور بوده که همین امر باعث ایجاد آسیب‌های فراوان به این حرکت تاریخی و فرهنگی شده است. مردم همیشه دولت‌ها را عاجز از اجرای عدالت اجتماعی و تحقق اهداف مورد نظر می‌دانند لذا تنها بستری را که جهت بروز اراده‌ی خود متصور هستند نهادهای مردمی و خودجوش است. به عبارت ساده‌تر مشارکت مردم یعنی سپردن کار مردم به دست خود مردم با یک مکانیزم نظارتی و نظام مند است (سازمان جنگل ها و مراتع کشور، دی ماه ۱۳۸۷). زارعی (۱۳۹۳) با توجه به نقش سازمان‌های مردم نهاد در حل مسائل زیست محیطی با استفاده از روش‌های تحلیل آماری به بررسی عملکرد سازمان‌های مردم نهاد در ۳۱ استان کشور می‌پردازد که نتایج او نشان می‌دهد شکاف عمیقی بین این سازمان‌ها مردم نهاد در بین استان‌های مختلف کشور وجود دارد. در کشور، استان‌های تهران و گلستان در این زمینه توسعه یافته و لرستان، مازندارن و کرمان در سطح متوسط با ضریب میانگین ۰.۵۷ و ۲۶ استان کشور محروم تلقی می‌شوند.

بر اساس گزارش پنجم مرکز بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC) پیامدهای تغییر اقلیم عبارتند از:

کم‌تر شدن روزهای ابری و گرم‌تر شدن شب‌ها بر روی خشکی‌ها؛

گرم‌تر شدن و یا فراوان‌تر شن روزهای داغ و افزایش فراوانی روزهای داغ؛

افزایش فراوانی و مدت روزهای گرم و امواج گرمایی؛

افزایش فراوانی، شدت، و میزان بارش‌های سنگین (محتمل‌تر برای مناطق عرض‌های میانه)؛

افزایش سطح آب دریاها.

همانطور که بیان شد اثرات و پیامدهای این بحران قرن بیست و یکم به صورت مستقیم و غیر مستقیم بر روی آب و دسترسی به آب است. در واقع افزایش دما به افزایش مصرف آب آبیاری، شرب و بهداشت و مصرف آب دام و طیور دامن می‌زند. وقتی افزایش دما موجب افزایش تبخیر روزانه ۲ میلیمتر رطوبت از سطح خاک و یا آب شود برابر ۲۰ مترمکعب آب در هکتار است که با توجه به مساحت کشور معادل از دست رفتن روزانه حدود ۲/۳ میلیارد مترمکعب آب است (خبرگزاری ایسنا ،۱۳۹۴ ، متن مصاحبه با دکتر حسن‌لی). براساس پیش‌بینی ناسا و دیگر پژوهش‌های مربوطه، برخی نقاط کره زمین، مرطوب‌تر و برخی خشک‌تر می‌شوند. متاسفانه ایران جزو مناطقی است که رو به خشکی است و پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد در دو سه دهه آینده تا ۲۰ درصد خشک‌تر خواهد شد (خبرگزاری ایسنا، ۱۳۹۴). از دیگر تاثیر تغییرات اقلیمی افزون بر افزایش گرما و کاهش نزولات جوی، ناهنجاری‌های اقلیمی و بروز حالت‌های غیر طبیعی مثل بارش‌های تند و رگباری و نابهنگام، افزایش تکرار دوره‌های خشک طولانی، شوک‌های گرمایی و حتی یخبندان‌های غیرمنتظره و بی‌موقع است که خود علاوه بر تاثیرات نامطلوب بر پایداری منابع آب بر موثر بودن بارش‌ها تاثیر منفی دارد. تاثیر گرما تنها در فرار آب‌های شیرین نیست بلکه افزایش گرما و خشکی موجب بی‌حوصلگی، نا آرامی و کاهش تحمل نیز می‌شود و این خود می‌تواند موجب دامن زدن به برخی نزاع‌های داخلی، کشمکش‌ها و حتی شورش‌ها و درگیری‌های محلی، قومی و مرزی می‌شود (خبرگزاری ایسنا، ۱۳۹۴). در حال حاضر میانگین درازمدت بارنگی کشور از ۲۵۰ میلیمتر کمتر شده و شکل و نظام بارش‌ها نیز تغییر کرده است. با این توصیف کشور ما از دو سو، گرفتار تهدید است، یکی افزایش گرما که نتیجه آن افزایش تبخیر و مصرف بیشتر آب‌ها است و دیگری کاهش بارندگی و کم اثرتر شدن آن. حال آنکه باید اثرات توسعه شهرنشینی، افزایش جمعیت و صنعتی شدن نیز برافزایش مستقیم مصرف آب، دیده شود، لذا این واقعیت تلخ را نه تنها باید پذیرفت بلکه با گوشت و پوست آن‌هم در سطح ملی حس کرد و دنبال اقدامات عملی، موثر و فوری بود (خبرگزاری ایسنا، ۱۳۹۴). یکی از راه‌های کاهش عواقب تغییر اقلیم به کارگیری استراتژی‌ها و سیاست‌های تغییر اقلیم به ویژه در خصوص سیاست‌های سازگاری (تطبیق) می‌باشد. واژه سازگاری نخست در زیست‌شناسی تکاملی مورد استفاده بوده و پس از آن وارد ادبیات تغییر اقلیمی شده است (گیدنز، ۲۰۰۹، مک‌گرگور، ۲۰۰۹). اتخاذ و اجرای سیاست‌های کاهش اثرات تغییر اقلیم منجر به کاهش هزینه‌های جاری از سمت تغییر اقلیم گردد. در واقع عدم برنامه‌ریزی در خصوص سازگاری با تغییر اقلیم؛ در آینده دچار هزینه‌های گزاف‌تری در خصوص تغییر اقلیم به ویژه در خصوص آب خواهیم شد. همانطور که در شکل مشاهده می‌گردد در صورتی که با داشتن استراتژی‌های ویژه در خصوص تغییر اقلیم و آب می‌توان با اطمینان بیشتری به برنامه‌ریزی پرداخت.

حال در این میان یکی از سازمان‌های کمک کننده در رایج شدن این مبحث در میان مردم و مشارکت داشتن مردم سازمان‌های مردم نهاد می‌باشند. در کشور ما به دلیل پیشینه تاریخی طولانی مشارکت‌های مردمی در شکل گروه‌های همیار و خودیار و آموزه‌های دینی و اخلاقی مشوق افراد نسبت به امور، ظرفیت‌های مشارکت همیشه وجود داشته و در برهه‌های تاریخی نقش‌آفرینی کرده است. به همین دلیل است که در قوانین کشور به صراحت بر اهمیت و جایگاه ظرفیت‌های مشارکت مردمی تاکید شده است. امروزه استفاده از مشارکت‌های مردمی در قالب نهادهای رسمی و مدنی مثل سازمان‌های مردم نهاد و یا در اشکال سنتی و دیرینه آن مثل مساجد و هیات‌ها، کانون‌های فرهنگی و غیره می‌تواند دارای آثار توسعه‌ای مثبت باشد. امروزه این سازمان‌ها و تشکل‌ها به عنوان بازوهای اصلی دولت، در پیشرفت کشور می‌توانند تصدی‌گری دولت‌ها را در برنامه‌ها کاهش داده و رسالت و نقش هدایت کنندگی، حمایت و نظارت را بر دولت واگذار نمایند (محمدی و همکاران، ۱۳۹۰) اما چگونگی نقش این سازمان‌ها جای بحث و تامل دارد. اما قبل از پرداختن به نقش این سازمان‌های مردم نهاد در سازگاری با تغییر اقلیم آن هم در حوزه منابع آب به برخی از تعاریف و مبانی پرداخته می‌شود.

چرا نقش سازمان‌های مردم نهاد اهمیت دارد؟

در حال حاضر زندگی در قرن بیست و یکم به صورت کاملاً پیچیده به یکدیگر گره خورده است و این گره پیچیده منجر به تشدید اثرات متقابل بر یکدیگر شده است و از طرفی برخی از نیازهای انسانی و به طور اعم موجودات زنده از جمله آب به قدری مهم است که زندگی بدون آن به هیچ شکل من الوجوهی امکان‌پذیر نیست. در این میان سازمان‌های مردم نهاد در این مسیر کمک شایانی می‌توانند انجام دهند که اولاً در گذشته ساکنین چه راه‌کارهای در قبال چالش‌های پیش رو از جمله کمبود آب و سازگاری با کمبود آب اتحاذ می‌نمودند و دوم اینکه این موسسات مردم نهاد با توجه به ذی‌نفع نبودن خود می‌توانند به خوبی مردم را در خصوص پیامدها و اثرات آسیب‌پذیر و زیان بار تغییر اقلیم آشکار نموده و راه‌کارهای سازگاری با آن را خیلی سریع‌تر از مباحث علمی روشن نمایند. ضمن اینکه برخی از رفتارها مردم را که به تشدید بحران آب کمک می‌کند آشنا نموده؛ به طوری که بتوان خود را به سطوح استاندارد جهانی رساند. به عنوان نمونه براساس آخرین آمار وزارت نیرو مصرف سرانه آب در کشور ۲۳۶ لیتر در روز است که بالاتر از بسیاری کشورهای دنیا است.

ایران کشوری با اقلیم گرم و خشک است و عواملی همچون رشد روز افزون جمعیت، گسترش شهرنشینی، توسعه بخش‌های کشاورزی و صنعت، پدیدههای اکوسیستمی، باعث کاهش منابع آب تجدیدپذیر در قرن گذشته شده است. میزان سرانه آب تجدیدپذیر سالانه کشور از میزان حدود۱۳۰۰۰ متر مکعب به ازای هر نفر در سال ۱۳۰۰، به حدود ۱۴۰۰ متر مکعب

به ازای هر نفر در سال ۱۳۹۳، تقلیل یافته و در صورت ادامه این روند، وضعیت در آینده به مراتب حادتر خواهد شد. با توجه به میزان منابع آب و سرانه مصرف، ایران از جمله کشورهایی است که در گروه کشورهای مواجه با کمبود فیزیکی آب قرار دارد؛ این گروه شامل کشورهایی است که در سال ۲۰۲۵ با کمبود فیزیکی آب مواجه هستند. این بدان معناست که این کشورها، حتی با بالاترین راندمان و بهره‌وری ممکن در مصرف آب، برای تأمین نیازهایشان آب کافی در اختیار نخواهند داشت. لذا لازم است دست اندرکاران بخش آب توجه ویژه‌ای به کنترل مصرف آب و استفاده بهینه از آن معطوف دارند.

سهم استفاده از آب در بخش‌های مختلف در کشورهای توسعه یافته با کشورهای در حال توسعه متفاوت است. برای کشورهای با درآمد کم تا متوسط، مصارف صنعتی در حدود ۱۰ درصد و مصارف کشاورزی در حدود ۸۰ درصد کل مصارف آب آن کشورها را تشکیل میدهد و در کشورهای با درآمد بالا، مصارف صنعتی در حدود ۶۰ درصد و مصارف کشاورزی در حدود ۳۰ درصد کل مصارف آب است. در کشور ایران، در حدود ۹۲ درصد کل مصارف آب مربوط به بخش کشاورزی بوده و مصارف صنعتی در حدود ۲ درصد و مصارف شرب در حدود ۶ درصد کل مصارف آب را تشکیل می‌دهند.

در حال حاضر میانگین سرانه کل مصرف آب شرب در ایران (شامل تجاری-صنعتی-خانگی –فضای سبز و...) در حدود ۲۰۴ لیتر در روز است که در مقایسه با اکثر کشورهایی اروپایی مانند اسپانیا (۲۰۰ لیتر در روز)، پرتقال (۱۹۴ لیتر در روز)، یونان (۱۷۵ لیتر در روز)، سوئد (۱۶۴ لیتر در روز)، دانمارک (۱۵۹ لیتر در روز)، انگلستان (۱۵۳ لیتر در روز)، اتریش (۱۵۳ لیتر در روز)، ایرلند (۱۴۲ لیتر در روز)، فرانسه (۱۳۹ لیتر در روز)، آلمان (۱۲۹ لیتر در روز)، هلند (۱۲۹ لیتر در روز)، بلژیک (۱۱۲ لیتر در روز) و لهستان (۹۸ لیتر در روز)، بالاتر بوده، ولی نسبت به برخی کشورهای اروپایی از جمله سوئیس، فنلاند و ایتالیا و همچنین آمریکا و کانادا کمتر است؛ سرانه مصرف آب شرب در سوئیس ۲۵۲، در فنلاند ۲۱۳، در ایتالیا ۲۱۳، در آمریکا ۲۹۵ و در کانادا ۳۲۶ لیتر در روز است.

سازمان‌های مردم نهاد (NGOs):

امروزه با اصطلاحNGO134 فراوان مواجه می‌شویم و جایگاه رفیع و تأثیر ژرف آن را در روابط ملی و بین‌المللی مشاهده می‌کنیم. در ترجمه‌ی واژه به واژه NGO به معنی سازمان غیر دولتی است اما در زبان فارسی واژۀ مردم نهاد با اختصار "سمن" برای ترجمه این واژه انتخاب شده است. در تمام این نوشتار واژۀ سمن را به معنای سازمان‌های مردم نهاد به کار می‌بریم. هر گونه داوری در خصوص سمن و نقش اجتماعی آن در گرو تعریف آن است (قراملکی و سالاری؛ ۱۳۸۸). سمن

134 - non-governmental organization

از جمله سازمان‌های تازه تأسیس و نوپا هستند و دارای ویژگی‌هایی هستند که آن‌ها را از سازمان‌های دولتی متمایز می‌سازد که عبارتند از:

سازمان های مردم نهاد با مشارکت داوطلبانه شهروندان شکل می‌گیرند. یعنی روش شکل‌گیری و اداره آنها توسط گروهی از مردم و به شکل داوطلبانه است

سازمان‌های مردم نهاد متشکل از افرادی می باشند که انگیزه بالایی برای فعالیت گروهی در راستای هدف مشخصی هستند و فعالیت آنها معطوف به منافع همگانی است. سازمان غیر انتفاعی، خدمت مدار و توسعه محور که در جهت منافع افراد جامعه عمل می نماید.

سازمان‌های مردم نهاد غالباً به دنبال سود به معنای درآمدزایی نیستند و بیشتر جز سازمان‌های غیرانتفاعی هستند. سازمانی که از نظر ساختاری انعطاف‌پذیر و مردمی است و بدون منفعت طلبی در جهت ارائه خدمات به جامعه تلاش می کند.

غالباً این سازمان‌ها با توجه به اهداف ویژه ایی تعریف می شوند و هدف آن توانمندسازی افراد جامعه است.

سازمانی که به هیچ حزب سیاسی وابسته نبوده و به طور کلی متعهد به خدمت برای توسعه و رفاه اجتماعی است.

سازمان های مردم نهاد با اراده دولت ها تأسیس نشده و توسط دولت ها مدیریت نمی شوند.

مزیت این سازمان بر سازمان‌های دولتی در این است که اولاً این سازمان‌ها می‌توانند مردم فقیر و افراد آسیب دیده و در معرض آسیب را در سطح محدود محله، روستا و غیره شناسایی کرده و به آنها کمک می‌نمایند. دوماً این سازمان‌ها به دلیل ماهیت داوطلبی خود با هزینه‌های کمتر، بهترین کارایی را در خدمت‌رسانی دارند. سوماً سازمان‌های مردم نهاد به وسیله کار با گروه‌های جامعه مشارکت محلی را ارتقا می‌بخشند و بر ابتکارات خودیاری محلی و کنترل برنامه‌ها تأکید دارند و نهایتاً این سازمان متناسب با نیازها و شرایط محلی نوآوری می‌کنند و خود را با آنها تطبیق می‌دهند.

امروزه در کشورهای توسعه یافته، مردم از طریق نهادهای مختلف اجتماعی، سازمان‌های اقتصادی، سیاسی و آموزشی، در تصمیم‌گیری‌های علمی، تخصصی، تجاری در قالب سازمان‌های رسمی و غیر رسمی در زمینه‌های گوناگون فعالیت دارند. این در حالی است که در کشورهای در حال توسعه، به دلیل اشتباه در تعریف جایگاه مردم و دولت، مردم و سازمان‌های غیردولتی از نقش ضعیفی در امر توسعه برخوردار می‌باشند. رشد و توسعه پایدار در هر کشور یکی از ضروریات غیرقابل انکار در دنیای امروز است. جوامع بشری با ایجاد همبستگی عمومی می توانند مسیر ایجاد ثبات و امنیت را هموار سازند و به تبع این پویایی سازوکار نظام‌مندی را ایجاد نمایند. تجارب فعالیت‌های جهانی نشان می‌دهد که سازمان‌های غیردولتی (NGOS) با ایفای نقش‌های نظارتی، بسیج، جذب و هدایت منابع انسانی، مادی و معنوی می‌توانند بهترین نمود از مشارکت

مردمی باشند که با انسجام بخشی به گروه‌های انسانی هم هدف راه‌گشای دستیابی به اهداف توسعه پایدار در منابع ملی باشند (کریمی، ۹۳). سازمان‌های مردم نهاد از پنج مولفه‌ی گروه اجتماعی، سازمان، هویت غیر دولتی، تعاون و جنبه غیر انتفاعی حاصل می‌آید که در کل شماره (۴) آمده است (قراملکی و سالاری،۱۳۸۸) این سازمان به بخش جامعه مدنی نه به بخش خصوصی اختصاص دارد. تفاوت بخش خصوصی با سازمان مدنی در این است که شکل سازمانی بخش خصوصی که بنگاه یا شرکت است صرفا در پی سود و رقابت است در حالی‌که شکل سازمانی جامعه مدنی که سازمان غیر دولتی است بیشتر در پی ترویج همکاری در کنار رقابت و تأکید بر توسعه پایدار و همه جانبه در کنار کسب سود کوتاه مدت، و توانمندسازی و ارتقاء و افزایش مشارکت توده مردم در عرصه‌های مختلف اجتماعی، سیاسی، اقتصادی و فرهنگی به منظور بیان نیازها و احقاق هر چه بیشتر حقوق خود است (قراملکی و سالاری؛ ۱۳۸۸) طی مطالعه ای که در ایالت انامبرا در سال ۲۰۱۴ صورت گرفته است، ۶۰ ٪ از اعضای سازمان‌های غیردولتی از تغییرات آب و هوایی آگاهی کافی ندارند و و در حالی که حدود ۶۳ ٪ از سازمان های غیردولتی تغییرات آب و وهوایی را در کار گروه برنامه‌های خود قرار داده‌اند. سازمان‌های غیردولتی برای ایجاد آگاهی و حساسیت مردم روستا و کشاورزان در مورد تغییرات آب و هوا و کمک به دولت در اجرای سیاست ها و قوانین برای کاهش تغییرات آب و هوا و سازگاری آنها تلاش بسیار کردند. آگراوال (۲۰۰۸) در مطالعه ای که تحت عنوان نقش نهادهای محلی در انطباق با تغییر آب و هوا انجام داده است به این نکته اشاره می‌کند که با تمرکز روی نهادهای مردمی دو شکاف آشکار موجود بین تفاهم نهادها و تغییرات آب و هوایی پر خواهد شد. آگراوال (۲۰۰۸) کار پژوهشی با عنوان نقش دولت‌ها و نهادهای محلی در معیشت سازگار با تغییرات آب و هوایی انجام داده است. او به این مطلب اشاره می‌کند که از نظر بانک جهانی مهم‌ترین نتیجه تغییرات آب و هوایی اثرات بالقوه فاجعه بار آن بر چشم‌انداز توسعه به ویژه برای جمعیت‌های فقیر می‌باشد. اداره توسعه اجتماعی بانک جهانی اخیراً به این نکته اشاره می‌کند که " تغییرات آب و هوایی تعریف چالش توسعه نسل ماست (SDV, ۲۰۰۷)

اهداف سازمان های مردم نهاد در حوزه تغییرات اقلیمی

عمده ترین اهدافی که را که سازمان های غیردولتی و مردم نهاد غالباً به دنبال آن هستند را می توان در نمودار زیر نشان داد



شکل شماره ۵- اهداف سازمان های غیردولتی و مردم نهاد

نقش سمن‌ها (سازمان های مردم نهاد) در خصوص تغییر اقلیم

تغییر اقلیم یکی از چالش‌های بزرگ جهانی است که نیازمند مشارکت گسترده همه بخش‌های جامعه، به‌ویژه سازمان‌های مردم‌نهاد (سمن‌ها)، می‌باشد. سمن‌ها به عنوان نهادهای غیردولتی و مستقل، نقش کلیدی و مؤثری در مقابله با پیامدهای تغییر اقلیم ایفا می‌کنند. این سازمان‌ها با بهره‌گیری از ظرفیت‌های محلی، دانش بومی و ارتباط مستقیم با جوامع، توانسته‌اند اقدامات مؤثری را در زمینه آموزش، اطلاع‌رسانی و اجرای پروژه‌های محیط‌زیستی انجام دهند.

یکی از مهم‌ترین نقش‌های سمن‌ها، افزایش آگاهی عمومی درباره علل و پیامدهای تغییر اقلیم است. با برگزاری کارگاه‌ها، سمینارها و کمپین‌های محیط‌زیستی، این سازمان‌ها مردم را به تغییر رفتارهای روزمره و کاهش مصرف انرژی تشویق می‌کنند. این آموزش‌ها معمولاً به گونه‌ای طراحی می‌شوند که افراد جامعه بتوانند نقش فعال و مسئولانه‌ای در حفظ محیط زیست ایفا کنند.

علاوه بر آموزش، سمن‌ها در اجرای پروژه‌های عملی مقابله با تغییر اقلیم نیز مشارکت دارند. نمونه‌هایی از این فعالیت‌ها شامل کاشت درخت، مدیریت پسماند، ترویج استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر و حفاظت از منابع آبی است. این اقدامات، علاوه بر کاهش گازهای گلخانه‌ای، به بهبود کیفیت زندگی مردم و حفظ تنوع زیستی کمک می‌کند.

سازمان‌های مردم‌نهاد همچنین در نقش پل ارتباطی میان دولت‌ها و مردم عمل می‌کنند. آنها می‌توانند خواسته‌ها و نیازهای جوامع محلی را به مسئولان منتقل کرده و در طراحی و اجرای سیاست‌های اقلیمی مشارکت فعال داشته باشند. این نقش تسهیل‌گرانه باعث می‌شود که سیاست‌های اقلیمی با توجه به واقعیت‌های اجتماعی و اقتصادی هر منطقه تنظیم شوند و اثرگذاری بیشتری داشته باشند.

از سوی دیگر، سمن‌ها با تشکیل شبکه‌های همکاری بین‌المللی، تبادل دانش و تجربیات موفق در زمینه مقابله با تغییر اقلیم را تسریع می‌کنند. این همکاری‌ها امکان دسترسی به منابع مالی و فناوری‌های نوین را فراهم ساخته و ظرفیت‌های محلی را تقویت می‌کند.

در نهایت، می‌توان گفت که سازمان‌های مردم‌نهاد به عنوان بازیگران کلیدی در فرایند مقابله با تغییر اقلیم، نه تنها به کاهش اثرات مخرب این پدیده کمک می‌کنند، بلکه موجب تقویت مشارکت مدنی، توسعه پایدار و ایجاد فرهنگ مسئولیت‌پذیری زیست‌محیطی در جامعه می‌شوند. توجه و حمایت از این سازمان‌ها باید یکی از اولویت‌های سیاستگذاران و جامعه جهانی باشد تا بتوان به اهداف مقابله با تغییر اقلیم دست یافت.

موانع موجود در مقابل سازمان‌های مردم نهاد

سازمان‌های مردم‌نهاد (سمن‌ها) به عنوان یکی از ارکان مهم جامعه مدنی در پیشبرد اهداف توسعه پایدار و مقابله با چالش‌هایی مانند تغییر اقلیم نقش اساسی ایفا می‌کنند. با این حال، این سازمان‌ها در مسیر فعالیت‌های خود با موانع متعددی روبرو هستند که می‌تواند اثرگذاری آنها را محدود کند. شناخت و تحلیل این موانع برای بهبود عملکرد سمن‌ها و تقویت مشارکت مردمی در مسائل زیست‌محیطی و اجتماعی ضروری است.

یکی از مهم‌ترین موانع پیش روی سمن‌ها، محدودیت‌های مالی است. بسیاری از سازمان‌های مردم‌نهاد با کمبود منابع مالی مواجه‌اند و این موضوع اجرای پروژه‌ها و برنامه‌های آنها را دچار مشکل می‌کند. عدم دسترسی پایدار به منابع مالی و وابستگی به کمک‌های کوتاه‌مدت، موجب شده است که سمن‌ها نتوانند برنامه‌ریزی بلندمدت و اثربخشی داشته باشند.

محدودیت‌های قانونی و ساختاری نیز از دیگر موانع مهم هستند. در بسیاری از کشورها، قوانین و مقررات مربوط به ثبت، فعالیت و دریافت حمایت از سمن‌ها پیچیده و غیرشفاف است. این امر باعث می‌شود که بسیاری از گروه‌های مردمی با

مشکلات اداری مواجه شوند و فعالیت‌های آنها به صورت رسمی به رسمیت شناخته نشود. همچنین نبود چارچوب‌های قانونی مناسب، امکان تعامل موثر میان سمن‌ها و نهادهای دولتی را کاهش می‌دهد.

مسأله اعتماد عمومی نیز چالشی جدی برای سازمان‌های مردم‌نهاد محسوب می‌شود. در برخی موارد، نبود شفافیت در عملکرد، گزارش‌دهی ناقص و عدم پاسخگویی کافی، موجب کاهش اعتماد جامعه به این سازمان‌ها شده است. این موضوع مانع جذب حمایت مردمی و مشارکت فعال‌تر آنها در پروژه‌ها می‌شود.

کمبود نیروی انسانی متخصص و آموزش دیده نیز یکی دیگر از مشکلات پیش روی سمن‌ها است. فعالیت‌های موثر در زمینه‌های تخصصی مانند مدیریت پروژه، جمع‌آوری داده‌های علمی و ارتباطات نیازمند مهارت‌ها و دانش ویژه‌ای است که بسیاری از سازمان‌ها به آن دسترسی ندارند. این امر موجب کاهش کیفیت فعالیت‌ها و کاهش توان اثرگذاری سمن‌ها می‌شود.

در نهایت، محدودیت‌های فرهنگی و اجتماعی نیز در برخی جوامع نقش مهمی در کاهش فعالیت سمن‌ها دارند. ناآگاهی عمومی درباره اهمیت فعالیت‌های مدنی، مقاومت در برابر تغییر و کمبود حمایت خانواده‌ها و نهادهای محلی، محیطی نامناسب برای فعالیت سمن‌ها ایجاد می‌کند.

در جمع‌بندی، رفع این موانع نیازمند اقدامات چندجانبه و همکاری دولت‌ها، جامعه مدنی و نهادهای بین‌المللی است. با فراهم آوردن منابع مالی پایدار، اصلاح قوانین مرتبط، افزایش شفافیت و ارتقای مهارت‌های نیروی انسانی، می‌توان ظرفیت سازمان‌های مردم‌نهاد را برای مقابله با چالش‌های پیچیده‌ای مانند تغییر اقلیم به طور قابل توجهی افزایش داد.

نتیجه‌گیری

تغییر اقلیم به عنوان یک چالش جهانی پیچیده، پیامدهای گسترده‌ای بر منابع آب، کشاورزی و امنیت زیست‌محیطی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک دارد. یافته‌های اخیر گزارش‌های بین‌المللی(IPCC و سایر مراجع معتبر) نشان می‌دهد که افزایش دمای متوسط جهانی و تغییر الگوهای بارش، منجر به تشدید خشکسالی‌ها، کاهش منابع آبی تجدیدپذیر و افزایش ناپایداری‌های اکوسیستمی می‌شود. این تحولات فشار قابل توجهی بر زیرساخت‌های آبی، معیشت جوامع محلی و امنیت غذایی وارد می‌آورد.

در این میان، سازمان‌های مردم نهاد (NGOs) به عنوان بازیگران کلیدی جامعه مدنی، نقش تعیین‌کننده‌ای در ارتقای آگاهی عمومی، آموزش‌های تخصصی، و ترویج راهبردهای مدیریت پایدار منابع آب ایفا می‌کنند. این نهادها با بهره‌گیری از شبکه‌های گسترده اجتماعی و قابلیت‌های ارتباطی، می‌توانند انتقال دانش علمی به زبان ساده و قابل فهم را تسهیل کنند و مشارکت فعال مردم در پروژه‌های سازگاری با تغییر اقلیم را افزایش دهند. از طرفی، NGOs با نظارت مستمر بر

سیاست‌ها و برنامه‌های دولتی، نقش بازدارنده در مواجهه با ناکارآمدی‌ها و فساد ایفا کرده و باعث ارتقای پاسخگویی و شفافیت در مدیریت منابع می‌شوند.

با توجه به شرایط اقلیمی ایران و محدودیت‌های منابع آبی، تقویت و حمایت مستمر از این سازمان‌ها در قالب سیاست‌های قانونی، تأمین منابع مالی پایدار و آموزش‌های فنی ضروری است. این اقدامات می‌تواند به افزایش تاب‌آوری جامعه و محیط زیست در برابر تهدیدات ناشی از تغییر اقلیم کمک کند و زمینه توسعه پایدار را فراهم آورد.

در نهایت، مقابله مؤثر با تغییر اقلیم و مدیریت منابع آب، نیازمند همکاری هماهنگ میان دولت، بخش خصوصی، نهادهای بین‌المللی و جامعه مدنی است. مشارکت فعال سازمان‌های مردم نهاد، به عنوان واسطه‌ای میان این بازیگران، می‌تواند به بهینه‌سازی راهبردهای مقابله‌ای، کاهش هزینه‌های اجتماعی و زیست‌محیطی، و تضمین بهره‌برداری عادلانه و پایدار از منابع حیاتی منجر شود.

منابع

اورمزدی، م، ر.. ۱۳۹۰، الزامات بازنگری سیاست های توسعه ی سازمان های مردم نهاد (سمن) در برنامه ریزی و مدیریت گردشگری روستای ایران همایش گردشگری و توسعه پایدار، ۲۲ و ۲۳ تیرماه ۱۳۹۰، دانشگاه آزاد اسلامی واحد همدان

ترابی آزاد، م.. جعفری، ا.. شهابی، س.. (۱۳۸۹)، بررسی رابطه خطی (رگرسیونی) افزایش دمای ناشی از تغییر آب و هوای جهانی بر میانگین سالانه دمای سطحی آب در سواحل هرمزگان، مجله علوم و فن‌آوری دریا، ۵۴، ۱۱-۲۱.

جورابلو، م، موسوی جهرمی، ح، جعفری نیا، ر، (۱۳۸۵)، بررسی عوامل مؤثر در افزایش میزان جلب مشارکت کشاورزان گرمسار در مدیریت شبکه آبیاری و زهکشی درشت گرمسار، اولین همایش ملی مدیریت شبکه آبیاری و زهکشی، دانشگاه چمران، صص ۱۷۲۴-۱۷۲۱

خدری، ف.. (۱۳۸۳)، بررسی عوامل مؤثر بر مشارکت بهره بردارن در اجرای شبکه های آبیاری و زهکشی خوزستان به منظور ارائه راهکار مناسب، پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مدیریت اجرایی، دانشگاه شهید چمران اهواز

زارعی، ی، (۱۳۹۳)، ارزیابی استان های کشور در حوضه ی زیست محیطی با تأکید بر سنجش عملکرد سازمان های مردم نهاد، کنفرانس بین المللی یافته های نوین در علوم کشاورزی منابع طبیعی و محیط زیست، ۲۵ بهمن ۱۳۹۳،تهران

قراملکی، ا. ف.، و سالاری، ز.. (۱۳۸۸). اخلاق در سازمان‌های مردم‌نهاد .تهران: مرکز امور زنان و خانواده، نهاد ریاست جمهوری.

کردانی، م.، داوری دهکردی، ف.، بقایی، ح.، باقری، ه.، سروستانی، م.، (۱۳۹۲)، بررسی نقش سازمان های مردم نهاد در ارتقاء مدیریت و توسعه ی پایدار طرح های منابع آب، پنجمین کنفرانس مدیریت منابع آب، ۲۹ بهمن ۱۳۹۲ تا ۳۰ بهمن ۱۳۹۲ توسط دانشگاه شهید بهشتی - انجمن علوم و مهندسی منابع آب ایران، تهران

کریمی، ش، (۱۳۹۳)، سازمان های مردم نهاد (غیردولتی) و تغییر اقلیم، نخستین همایش تغییر اقلیم و راهی به سوی آینده پایدار،۲۰ مرداد ۹۳- سالن همایش وزارت نیرو

محمدی، ع.، و رضایی، م. (۱۳۹۰). بررسی نقش سازمان‌های مردم نهاد در توسعه مشارکت اجتماعی در ایران .مجله مطالعات توسعه اجتماعی، ۵ (۱),۴۵-۲۵.

نوری اسفندیاری، ا.، (۱۳۷۴)، مدیریت اقتصادی طرح های بزرگ توسعه منابع آب، مجموعه مقالات کنفرانس منطقه ای مدیریت منابع آب، اصفهان

11- Iwuchukwu J.C, Nwankwo O.J and Ogbonna, O.I,(2014), Knowledge and Roles of Non-Governmental Organizations (NGOs) in Climate Change Mitigation and Adaptation in Anambra State, Journal of Agricultural Extension,Vol.18 (2) December, 2014,ISSN 1119-944X

12- mukheibir, P., (2007), Water resources management strategies for adaptation to climate induced impacts in South Africa, Published in Water Resources Management, 2007,DOI: 10.1007/s11269-007-9224-6

13- Dhaka, Bangladesh,(2010) A Situation Analysis of Climate Change Adaptation Initiatives in Bangladesh, September 2012

14- Lönnqvist, L., Nurul H., Nurul K., Rokeya Z. K., Mahmuda K., Subhash S. C., (2010), Shortcut to the frontline: supporting local NGOs on climate change in Bangladesh, An INTRAC/PRIP Trust research report, Occasional Papers Series No: 50, January 2010

15- Giorgetti, Chiara, (1998), The Role of Nongovernmental Organizations in the Climate Change Negotiations, University of Richmond UR Scholarship Repositor y, 9 Colo . J . Int' l Envtl. L. & P ol' y 115

16- Betsill, M., & Corell, E. (2008). NGO Diplomacy: The Influence of Nongovernmental Organisations in International Environmental Negotiations. MIT Press.

17- Pandey, C. L. (2015). Managing Climate Change: Shifting Roles for NGOs in the Climate Negotiations. Environmental Politics, 24(4), 567–586. https://doi.org/10.1080/09644016.2015.1035101

18- Betsill, M. (2002). Environmental NGOs meet the sovereign state: The Kyoto protocol negotiations on global climate change. Colorado Journal of International Environmental Law and Policy, 13(1), 49–64.

19- Giddens, A. (2009). The politics of climate change. Polity Press

20- McGregor, J. (2009). Climate change and adaptation. Journal of Environmental Studies, 4, 1-15

The strategic role of civil institutions in strengthening the adaptive capacities of communities to climate change

Mohtaram Mohammadiarian[1]

[1] Department of Geography Education, Farhangian University, Tehran, Iran
* Corresponding author: Email: Mohtaram.meteo65@gmail.com

Abstract
Climate change, as one of the complex and multidimensional challenges of the 21st century, has direct and indirect impacts on vital resources, especially water resources in arid and semi-arid regions. Iran, due to its geographical location and dominant climate, is among the countries highly vulnerable to the consequences of climate change such as decreased precipitation, rising temperatures, severe evaporation, recurrent droughts, and climatic anomalies. In this context, non-governmental organizations (NGOs) can act as effective intermediaries between the government and society, playing a key role in enhancing social and environmental resilience. This study, through an analytical review of the country's climatic conditions, global climate change trends, and international experiences, examines the capabilities, challenges, and obstacles faced by NGOs in the domain of climate change adaptation, particularly in water crisis management. The results indicate that NGOs can complement government efforts in implementing climate policies through public education, facilitating social participation, transferring indigenous knowledge, community monitoring, and executing field projects. However, challenges such as weak legal frameworks, financial constraints, cultural limitations, and deficiencies in specialized capacity-building have reduced the effectiveness of these institutions. Therefore, strengthening the position of NGOs through supportive policy development, institutional capacity-building, and fostering intersectoral collaborations is essential for achieving sustainable development and effective climate adaptation at national and local levels.
Keywords: Climate change, Non-governmental organizations, Water resources, Social resilience, Sustainable development, Iran

تغییرات اقلیم وپیامدهای آن درایران

دکترسهراب عسگری[۱]، ملکاچنور[۲]
۱-استادیار کارگروه پیام نور
۲-دانش اموخته دانشگاه پردیس فارابی
ادرس پست نویسنده مسئول s.asgari@pnu.ac.ir

چکیده

موضوع تغییراقلیم و پیامدهای مخرب آن امروزه یکی از ابرچالش های جهانی تلقی می شود. برای مقابله با آن راهکارهایی ارائه شده و پیوسته از سوی دانشمندان و افراد دوستدار طبیعت هشدار داده می‌شود اما سرعت اقدامات مثبت برای کاهش اثرات کمتر ویرانی از سرعت تخریب محیط زیست کمتر است. در نتیجه روند تخریب محیط زیست در کره زمین همچنان ادامه دارد و شوربختانه رو به رشد است. اگرچه مقیاس تخریب در مواردی محلی یا منطقه‌ای است اما آثار آن جهانی است و امروزه هیچ نقطه از کره زمین از نتایج زیانبار ویرانی محیط زیست در امان نخواهد بود. ایران هم مانند بسیاری از کشورهای در حال توسعه هم گرفتار ویرانی محیط زیست به دلیل فعالیت‌های اقتصادی و صنعتی داخلی است و هم در مقایسه با دیگر کشورها بیشتر از دیگران از نتایج تخریب محیط زیست صدمه می‌بینند. تغییر اقلیم یکی از پیامدهای تخریب محیط زیست است. این مقاله که به شیوه کتابخانه و با رویکرد استقرایی انجام شده تلاش می‌کند نتایج حاصل از تغییر اقلیم در کشور را بیان نماید.

واژگان کلیدی: محیط زیست، تغییر اقلیم، ایران.

مقدمه

تغییراقلیم به تغییرات جهتدار میانگین پارامترهای اقلیمی در یک دورهٔ طولانی مدت گفته می‌شود؛ به همین جهت، تغییر در مقادیر حدی و میانگین های پارامترهای اقلیمی از پیامدهای مهم تغییر اقلیم است (Ipcc,2014)که بانوسانات اقلیمی تفاوت علمی دارد. بر اساس گزارشهای هیات بین دولتی تغییر آب و هوا (IPCC1)، تغییر اقلیم که بزرگترین چالش بشر در قرن اخیر است، پیامدهای جبران ناپذیری بر روی منابع آب، کشاورزی، گردشگری و نیاز به انرژی سرمایشی و گرمایشی تأثیر شدید خواهد داشت(li et al,2015).سازمان جهانی هواشناسی از سال 1987بر لزوم تحقیق درباره تأثیرات تغییر اقلیم بر منابع آب تأکید کرده است.به علت سرشت اثرگذاری بلندمدت تغییر اقلیم، ضرورت دارد هرگونه برنامه ریزی، با در نظر گرفتن دورنمای موردنظر در هر بخش، در قالب برنامه های کوتاه مدت، میان مدت و بلندمدت

سازماندهی شود(جعفری,۱۳۹۶).ایران کشوری است که از شمال تا جنوب آن تغییرات آب و هوایی بسیار زیاد است. بخش شمالی کشور با سیل های پر هزینه،کاملا مرطوب است، در حالیکه قسمت جنوبی با کمبود آب زیاد، خشکسالی‌های مکرر و وابستگی زیاد به کاهش منابع آب زیرزمینی خشک است. در سال‌های اخیر، تغییرات اقلیمی تاثیر قابل توجهی در اکوسیستم زمین و سیتسم اقتصادی و اجتماعی انسانی داشته است. درپاسخ به تغییرات اقلیم در سراسر جهان، کشورها اقدامات مختلفی را جهت کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای اتخاذ کرده‌اند تا مانع افزایش بیشتر دمای متوسط جهانی شود تا بدینوسیله خطرات و ضررهای ناشی از تغییرات اقلیم را کاهش دهند. آلودگی دی اکسیدکربن و سایر گازهای گلخانه‌ای مانند CFCها بیش از یک قرن باقی می‌ماند و دلیل اصلی افزایش این گازها استفاده بیش از حد از سوختهای فسیلی، تغییر کاربری اراضی، افزایش جمعیت و گسترش روزافزون فعالیت‌های صنعتی است که باعث تغییرات مشهودی در اقلیم کره زمین شده است. براساس روند فعلی جمعیت جهان، در صد سال آینده دو برابر خواهد شد. این در حالی است که تغییرات اقلیم به طور مستقیم بر بخش کشاورزی تاثیر خواهد گذاشت و تشدید ناهنجاریهای اقلیمی در آینده تامین نیاز غذایی بشر را تهدید خواهد کرد. انسان عامل اصلی گرمایش فعلی جهانی است. تغییرات اقلیم اخیرا تاثیرات گسترده ای روی سیستم‌های انسانی و طبیعی داشته است. تغییر اقلیم در علوم طبیعی، اجتماعی و سیاسی مورد توجه قرار گرفته است.دانشمندان برای درک وضعیت آب و هوای گذشته و پیش بینی وضعیت آینده، از مشاهدات و مدلهای نظری استفاده می‌کنند به گونه‌ای که کلید واژه هایی چون دما، محیط، بارش، گازهای گلخانه‌ای، خطر و تنوع زیستی محورهای تحقیقات تغییر اقلیم در قرن بیست و یکم هستند. تاکنون در ایران مطالعات متعددی در زمینه تغییرات اقلیم انجام شده است.با این حال با توجه به شرایط اقلیمی کشور انجام مطالعات بیشتر در شهرهای مختلف در جهت بررسی تبعات تغییرات آب و هوایی و همچنین کاهش اثرات ناشی از تغییر اقلیم و یا سازگاری در برابر اثرات این پدیده ضرورت دارد.

بنابراین با توجه به پیامدهای ناشی از تغییرات آب و هوایی و پیامدهای مخاطره آمیز و یا فرصت های ناشی از آنها، به منظور برنامه ریزی های بلندمدت و ترسیم چشم اندازی از شرایط آب و هوایی دوره های زمانی آینده، لزوم انجام پژوهش و شبیه سازی شرایط آب و هوایی آتی، آشکار است. پیش بینی تغییرات آب و هوایی از جمله راهکارهای توصیه شده جهت برنامه ریزی صحیح برای استفاده از منابع آب و... است .بدین منظور، بهره گیری از مدل های آب و هوایی مورد توجه بوده است. مدلهای آب و هوا، مهمترین ابزار موجود برای افزایش درک علمی از پیچیدگی های سیستم آب و هوایی و پیش بینی تغییرات آب و هوایی هستند (Yukimoto et al,2012). کشور ایران، به لحاظ موقع جغرافیایی خاص خود نسبت به گردش عمومی جو، درکمربند خشک جهان قرار گرفته و در مجاورت با پُرفشار جنب حاره ای بیشتر بخش های کشور دارای اقلیم خشک و نیمه خشک است. هر چند که با توجه به تنوع خصوصیات توپوگرافی

و تغییرات فصلی مکان گزینی سامانه‌های گردش عمومی جو، خشکسالی و ترسالی‌های هواشناسی متناوب رخ می‌دهد و معضل کمبود منابع آب در کشور همواره وجود داشته و امنیت اقتصادی و غذایی را تهدید می‌کند .در این مطالعه، با استفاده از روش کتابخانه ای و جستجو در منابع معتبر علمی- پژوهشی به مرور و تحلیل تحقیقات انجام شده در مورد تغییر اقلیم در ایران پرداخته شده به این گونه که تغییرات زمانی و مکانی تغییر اقلیم در طی چند سال در ایران بررسی و تحلیل شده و نتایج بر و نتایج بر اساس مطالعات انجام شده در زمینه‌های مختلف تغییر اقلیم به زیربخشهای اقلیم کشاورزی، هیدرولوژیکی، شهری، اجتماعی، اقتصادی، و مخاطرات تقسیم‌بندی و تحلیل شده است.

مفاهیم و پیش زمینه نظری

تغییر اقلیم به عنوان تغییر در الگوهای آب و هوایی عمدتاً ناشی از انتشار گازهای گلخانه ای تعریف می شود. انتشار گازهای گلخانه ای باعث می شود که گرما در جو زمین به دام افتد که عامل اصلی گرمایش جهانی است(Fawzy et al,2020).

توجه متداول عمومی به احتمال تغییرات آب و هوایی مرتبط با اثر گلخانه‌ای، اغلب بر اساس سوء تفاهمی است که این پدیده را جدید می‌انگارد، در حالی که این پدیده، یک نتیجهٔ طبیعی در حال رخداد از موازنهٔ تابشی کره زمین است و شواهد موجود، نشان می‌دهد که این اثر، چندین مرتبه در طول چند میلیون سال گذشته رخ داده است و آنچه جدید است، این است که فعالیت های انسان ممکن است به شکلی منجر به افزایش اثرات گلخانه‌ای شود که پیش‌تر، زمین با آن روبرو نبوده است (Bowma,1990) گرمایش گلخانه ای زمین به عنوان یکی از پیچیده ترین و پُربحث ترین مسائل زیست محیطی مطرح شده است زیرا دی اکسیدکربن و سایر گازهای گلخانه‌ای که میلیاردها سال، سطح زمین را گرم کرده‌اند، در نتیجهٔ فعالیتهای انسانی افزایش یافته و باعث افزایش اثر طبیعی گلخانه‌ای و گرم شدن آب و هوای جهانی می‌شوند(Singer et al,1992). تغییرات در میزان دی اکسیدکربن، باعث تغییرات دمایی شده و بر آب و هوا تأثیر می گذارد، اگر دی اکسیدکربن جو، دو برابر شود، دمای سطح زمین ۳/۶ درجه سلسیوس افزایش یابد و اگر نصف شود، دمای سطح زمین ۳/۸ درجه سلسیوس کاهش می یابد.در اواسط قرن ۱۹، مقادیر چشمگیری دی اکسیدکربن حاصل از سوخت های فسیلی به جو اضافه شد و این میزان، به طور پیوسته افزایش یافت.فعالیت های انسانی این قرن، موجب افزایش تراکم گازهای موجود در اتمسفر شده که این گازها با جلوگیری از خروج امواج تابشی فروسرخ گرمایی، دمای هوای کره زمین را افزایش می دهند

(Dickinson & Cicerone, 1986).

مروری بر تغییرات اقلیمی ثبت شده در دهه های اخیر

تغییرات اقلیمی اثراتی را در سطح جهانی و در سطح ملی بر کلیه کشورها از جمله کشور ایران دارد. این اثرات با توجه به جایگاه جغرافیایی کشورها و آسیب پذیری محیط زیستی آنها تفاوت می‌کند. اما همه آنها از یک الگوی مشابه کلی پیروی می‌کنند. بدیهی است تغییرات اقلیمی کشوری مانند ایران به دلیل تخریب محیط زیست در مقابل تغییرات اقلیمی آسیب پذیرتر است. این تغییرات را می توان در سطح کلان کشور و منطقه ای ارزیابی نمود. میزان تأثیر نیز در جاهای مختلف کشور تفاوت می‌کند.

در مناطقی که رشد غیرمنطقی جمعیت و فقر وجود دارد آثار و تخریب محیط زیست نیز شدیدتر است. همچنین همه کشور از کمبود باران و پدیده گرد و غبار متأثر نیستند درحالی که در همه کشور متوسط بارندگی کاهش و دمای متوسط افزایش یافته است. بررسی تطبیقی میزان کل انتشار وسرانه انتشار دی اکسید کربن نیز تفاوت های معنی داری را دربین کشورهای جهان نشان

می‌دهد. این مسئله به تعدادجمعیت، الگوهای تولید ومصرف منابع انرژی،وضعیت اکولوژیکی، ساختار فناوری، درامدسرانه، ویژگی های اقتصادی وغیره بستگی دارد.ایران نیز به عنوان یکی از آسیب پذیرترین کشورهای منطقه خاورمیانه و شمال آفریقا (MENA) در برابر تغییرات اقلیمی، دستخوش عوارض ناشی از تغییر اقلیم است که در درجه اول با کاهش بارندگی و افزایش دما خود را نشان می‌دهد. پیش‌بینی می‌شود دمای کشور تا سال ۲۰۳۰ افزایش یابد. تغییرات رواناب تمامی حوضه‌ها تا سال ۲۰۳۰ نیز کاهشی خواهد بود و بیشترین درصد کاهش رواناب به ترتیب مربوط به حوضه‌های بندرعباس-سدیج، کرخه و کارون است. در چنین شرایطی امکان بروز خشکسالی‌های شدید و سیلاب‌های شدید افزایش می‌یابد؛ چرا که با افزایش دو درجه دمای کشور، حدود ۲۷ میلیارد مترمکعب بر حجم تبخیر کشور افزوده شده و میزان تغذیه آب زیرزمینی تا حدود ۲۰ درصد کاهش می‌یابد و نهایتاً تأمین آب شرب در اکثر کلان شهرهای کشور نیز در آینده با مشکل مواجه خواهد شد. تغییر اقلیم در ایران با توجه به موقعیت آن در کمربند عرض جغرافیایی میانی، تغییرات زیست محیطی چالش‌های قابل توجهی را برای ایران ایجاد می‌کند؛

بیش از ۸۲ درصد ایران به عنوان مناطق خشک و نیمه‌خشک طبقه‌بندی شده و بارش سالیانه کمتر از یک سوم میانگین جهانی است (میانگین بارش تجمعی کشور حدود ۲۳۷ میلیمتراست).دمای هوا در ایران با میانگین ۵۰ تا ۵۴ درجه سانتی‌گراد در فصول گرم سال همچنان در حال افزایش است و گزارش‌های اخیر حاکی از آن است که منطقه خاورمیانه و ایران در دهه‌های آینده شاهد افزایش میانگین دمای ۲.۶ درجه سانتی‌گراد و کاهش ۳۵ درصدی بارندگی است. از این رو، تغییر اقلیم در ایران و خاورمیانه شدیدتر از مناطق دیگر جهان است.ایران در دوره آینده نزدیک (تا سال۲۰۴۰) با شتاب

بیشتری گرم خواهد شد و یکی از پیامدهای مستقیم این تغییرات اقلیمی، افزایش شاخص فرابنفش (UV) است. کاهش پوشش ابر و افزایش دمای هوا، باعث شده است که تابش اشعه‌های مضر خورشید به سطح زمین افزایش یابد.افزایش دما و تغییرات اقلیمی باعث تغییر در زیستگاه های طبیعی بسیاری از گونه ها شده است. برخی گونه ها برای بقا مجبور به مهاجرت به مناطق جدید با شرایط مناسب تر می شوند، اما این جابه جایی ممکن است باعث ایجاد رقابت با گونه های بومی و تغییرات در زنجیره های غذایی شود. از سوی دیگر، برخی گونه ها که قادر به مهاجرت نیستند، ممکن است با کاهش جمعیت یا حتی انقراض مواجه شوند. با افزایش دمای زمین، بسیاری از گونه های جانوری و گیاهی در معرض خطر انقراض قرار گرفته اند، و تخریب زیستگاه ها بر زنجیره های غذایی و پایداری منابع طبیعی تاثیر گذاشته است. علاوه بر این، تغییرات در آب و هوای اقیانوسی باعث کاهش جمعیت گونه های آبزی شده و معیشت جوامعی که به این منابع وابسته هستند را تهدید می کند.برای مقابله با این بحران، اقداماتی همچون کاهش انتشار گازهای گلخانه ای،حفاظت از مناطق طبیعی، و توسعه فناوری های پایدار ضروری است. مشارکت بین المللی، سیاست های حمایتی و آگاهی عمومی می توانند نقش مهمی در کاهش اثرات مخرب تغییرات اقلیمی و حفظ تنوع زیستی ایفا کنند.

وضعیت تغییر اقلیم در ایران

روندهای اب وهوایی درایران

سازمان جهانی آب وهوا بر لزوم تحقیق بر منابع آب بسیار تأکید دارد (مدرسی و همکاران، ۱۳۹۰). برهم خوردن تعادل سیستم اقلیمی ناشی از افزایش گازهای گلخانه‌ای بر اهمیت بررسی اثر تغییر اقلیم بر روی پارامترهای هیدرولوژیکی همچون تبخیر و تعرق می افزاید(کلانکی و کاراندیش، ۱۳۹۴).تبخیر و تعرق از اصلی ترین اجزای بیلان هیدرولوژیکی و بسیار متأثر از مؤلفه های اقلیمی مهم همچون دما بوده و تحت تأثیر تغییر اقلیم می تواند واکنشهای مختلفی از خود بروز دهد (گویال، ۲۰۱۴.)گرم شدن جهانی زمین ممکن است چرخهٔ هیدرولوژی را تسریع و منابع آب جهانی را دوباره توزیع نماید- که این حالت موجب تغییر بیشتر پارامترهای اقلیمی می شود(کمال,۲۰۰۹). کاهش غیرطبیعی پدیده های بارشی و افزایش غیرطبیعی تابش موج بلند و دما اثرهای گرم شدن کرهٔ زمین و تأثیرات تغییرات آب وهوایی را بر منابع آب تأیید می کند (دانشور و همکاران، ۲۰۱۹.)تغییر اقلیم و خسارات ناشی از آن مهمترین عامل مخرب در مدیریت منابع آب است (IPCC,2014)که با تغییر در میزان بارش و دمای هوا بر سیستم هیدرولوژی یک حوضه و به دلیل تعامل میان سیستمها بر زیرسیستمهای کشاورزی، اقتصادی، اجتماعی، و زیست محیطی اثرگذار است (انصاری و همکاران,1397).

تغییرات اقلیمی از طریق تأثیر در چرخهٔ هیدرولوژی بر میزان دبی حوضه و تبخیر و تعرق سطح آن اثرگذار است. همچنین، در اثر فرسایش زیاد و جاری شدن آب بارش، نفوذپذیری خاک در سطح حوضه کاهش می یابد و در نتیجه سطح آبهای زیرزمینی نیز پایین می رود و به دنبال آن افزایش حجم روانابها موجب کاهش سطح بهره وری سدها می شود. وجود تالابها نیز عاملی برای تعدیل اثرهای تغییر اقلیم است که متأسفانه با نابودی آنها اثرهای تغییر اقلیم تشدید شده است.

در ایران، تاکنون، مطالعات بسیاری در زمینهٔ تأثیر تغییر اقلیم بر منابع هیدرولوژیکی انجام شده است که پژوهشگران در آنها به نتایج زیادی دست یافته اند. ارزیابی اثرهای تغییر اقلیم بر رواناب رودخانه ها در ایران نشان داد که تغییر شرایط آب وهوایی موجب کاهش رواناب شده است(عجم زاده و ملایی نیا، ۱۳۹۵؛ یعقوبی و مساح بوانی، ۱۳۹۴).

در نتیجه افزایش دما در کره زمین رخدادهای آب و هوایی گستردهای به طور متناوب و با شدت زیاد اتفاق می افتد که برابر این تغییرات حدود ۴۰ درصد از مردم دنیا تحت تأثیر قرار گرفته و آسیب خواهند دید. بیشترین تغییر را نیمکره جنوبی زمین، مخصوصاً بخشهایی از آفریقا، آمریکای جنوبی و مرکزی و جنوب آسیا تجربه خواهند نمود(IPCC,2020) .اثر تدریجی اصلی افزایش دما بر ذوب شدن یخهای نواحی قطبی است. صخرههای یخی قطب جنوب و گرینلند در حال ذوب شدن و جریان بیشتر هستند. پراکنده شدن یخهای پوششی و حل شدن آنها در آب دریا منجر به بالا آمدن سطح آب دریاها در دنیا می شود(بروغنی و همکاران،1401).افزایش میانگین دمای جهانی با تغییرات گسترده در الگوهای آب و هوا همراه است. مطالعات علمی نشان می‌دهد که رویدادهای شدید آب و هوایی مانند امواج گرما و طوفان‌های بزرگ احتمالاً با تغییرات آب و هوایی ناشی از انسان مکرر یا شدیدتر می‌شوند. این فصل بر تغییرات مشاهده شده در دما، بارندگی، طوفان، سیل و خشکسالی تمرکز دارد. تغییرات شدیدتر آب و هوا نیز تهدیدی برای جامعه است. گرمای شدید مکرر و شدیدتر می‌تواند باعث افزایش بیماری‌ها و مرگ و میرها، به ویژه در میان جمعیت‌های آسیب پذیر شود و به برخی از محصولات آسیب برساند. در حالی که افزایش بارندگی می‌تواند منابع آب را دوباره پر کند و از کشاورزی حمایت کند، طوفان‌های شدید می‌تواند به اموال آسیب برساند، باعث تلفات جانی و جابجایی جمعیت شود و خدمات ضروری مانند حمل‌ونقل، مخابرات، انرژی و آب را به طور موقت مختل کند.

داده ها و آمار از سازمان‌های رسمی

سازمان جهانی هواشناسی در گزارشی که روی سایت رسمی این نهاد بین‌المللی منتشر شده اعلام کرد: انجام ارزیابی های علمی و جامع در زمینه ارتباط بین پدیده تغییر اقلیم و زمین که توسط هیأت بین الدول تغییر اقلیم (IPCC) انجام می شود، نقش بسیار مهمی در مهار انتشار گازهای گلخانه‌ای جهت مقابله با اثر گرمایش زمین و حفظ امنیت غذایی دارد. در این گزارش تأکید شده است، کاربری های مختلف از اراضی زمین اعم از کشاورزی، جنگلداری و غیره موجب انتشار ۲۳٪

از گازهای گلخانه‌ای می شود که ناشی از دخالت های مستقیم و غیر مستقیم انسان است. قابل ذکر است، زمین در وضعیت طبیعی و مدیریت شده، تقریباً یک سوم دی اکسید کربن حاصل از سوخت های فسیلی و صنعتی را جذب می کند.

یکی از فعالیت های مهم سازمان جهانی هواشناسی، نظارت کلی بر گازهای گلخانه‌ای موجود در اتمسفر است. در این راستا برنامه نظارت جهانی بر اتمسفر با ارائه داده های مربوطه، به بهداشت، بهره وری کشاورزی و امنیت غذایی افراد کمک می کند. در این برنامه، مشاهدات میزان غلظت گاز دی اکسید کربن و سایر گازهای جذب کننده گرما، در بولتن سالیانه گازهای گلخانه‌ای منتشر می‌شود که همانند دیگر گزارش های هیأت بین الدول تغییر اقلیم، تصمیم گیرندگان سازمان ملل متحد را در مذاکرات مربوط به مسئله تغییر اقلیم یاری می رساند. گزارش ویژه تغییر اقلیم و زمین پس از تصویب آن توسط اعضای هیأت بین الدول تغییر اقلیم در هفتم ماه اوت منتشر شد. نتایج این گزارش حاکی از این واقعیت است که زمین به شدت تحت تاثیر دستاوردهای بشری قرار گرفته و مسئله تغییر اقلیم نیز بر مشکلات آن افزوده است که این امر مدیریت بهینه کره زمین را می‌طلبد. در پی اهداف توافقنامه پاریس در سال ۲۰۱۵، دولت‌ها موفق شدند جهت تقویت واکنش بین‌المللی به مسئله تغییر اقلیم، افزایش دمای متوسط جهانی را به میزان ۲ درجه سانتیگراد بالاتر از سطح پیش از صنعتی شدن ثابت نمایند و تلاش خود را برای رساندن این میزان به ۱.۵ درجه سانتیگراد دنبال کردند. طبق گزارش هیأت بین الدول تغییر اقلیم، ثابت نگه داشتن گرمایش جهانی به میزان پایین‌تر از ۲ درجه سانتیگراد - در صورت عدم امکان دستیابی به ۱.۵ درجه سانتیگراد - تنها با کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از همه بخش‌ها از جمله زمین و غذا قابل دسترسی خواهد بود. با توجه به روند رو به رشد جمعیت و اثرات منفی تغییر اقلیم بر افزایش پوشش گیاهی، حفظ زمین های زراعی حاصلخیزی آن برای تامین مواد غذایی حائز اهمیت است. زمین برای مقابله با حل مشکل تغییر اقلیم، مانند کشت محصولات زراعی مولد انرژی و جنگل‌زایی دچار محدودیت هایی است، از طرفی ذخیره‌سازی موثر کربن در بهره وری درخت و خاک نیز زمانبر خواهد بود. جلوگیری از خطر امنیت غذایی، تنوع زیستی و تخریب زمین، نیازمند مدیریت زیست شناختی دقیق است. به عنوان مثال، با تخریب زمین‌های زراعی و بروز پدیده بیابانزایی، بارش های شدید موجب فرسایش خاک و کاهش میزان حاصلخیزی و روند رو به رشد گیاهان شده و توانایی خاک را در جذب کربن کاهش می‌دهد. این امر موجب تشدید پدیده تغییر اقلیم و کاهش امنیت تولید مواد غذایی خواهد شد، در حالی که تغییر اقلیم به نوبه خود از بسیاری جهات باعث تخریب زمین نیز می شود. سازمان جهانی هواشناسی با استفاده از برنامه هایی مانند سیستم مشاوره و ارزیابی اخطار طوفان شن و گرد و غبار، برنامه جامع مدیریت خشکسالی و خدمات اقلیمی دیگر به مقابله با چالش هایی همانند مسائل کشاورزی، آب و بهداشت می پردازد. ارزیابی سالیانه سازمان جهانی هواشناسی در خصوص موضوع تغییر اقلیم، مانند اعلام شاخص وضعیت اقلیم، از جمله فعالیت های هیأت بین الدول تغییر اقلیم به شمار می آید. در ماه ژوئن،

هجدهمین کنگره جهانی هواشناسی تصمیمات مهمی را در مورد حمایت بیشتر این سازمان از ارزیابی های هیأت بین‌الدول تغییراقلیم اتخاذ نمود. تا با همکاری سازمان جهانی هواشناسی و کمیسیون بین‌الدول اقیانوس‌شناسی (IOC) و همچنین شورای بین‌المللی علوم هماهنگی بیشتر فعالیت‌های این هیأت را با برنامه های تحقیقات جهانی آب و هوا فراهم آورد. متأسفانه میزان میانگین فرسایش خاک در ایران حدود ۱۶.۵ تن در هکتار و نرخ فرسایش خاک تقریباً معادل ۲ تا ۲.۵ برابر آسیا و ۶ تا ۷ برابر میانگین جهانی است. ایران دارای بالاترین نرخ فرسایش خاک در جهان است و در حالی که تنها ۱.۱ درصد از مساحت خشکی زمین را دربردارد، به تنهایی حدود ۸ درصد فرسایش خاک جهان را به خود اختصاص داده است. از این رو، مطالعه فرسایش خاک و یافتن راهی برای مهار این پدیده، به ویژه در کشور ما ضرورتی انکارناپذیر دارد.

پیامدهای تغییراقلیم درایران

۳.۱- پیامدهای محیط زیستی

یکی از مهمترین پیامدهای تغییرات اقلیمی کشور در حوزه تنوع زیستی است. در ایران ۲۵۰ تالاب بزرگ و کوچک با مساحت حدود ۲.۵ میلیون هکتار وجود دارد که هم اکنون بسیاری از آنها در معرض خشک شدن قرار دارند. این تالابها محل زیست طبیعی انواع گونه های جانوری و گیاهی است. تغییرات اقلیمی بر تنوع زیستی دارای آثاری به شرح زیر خواهد شد.کاهش بارشها و افزایش دما در اکثر مناطق کشور به ویژه در البرز و زاگرس، اکثر تالابهای کشور را با کاهش قابل ملاحظه آب روبه رو کرده و زندگی حیوانات،پرندگان و گونه های گیاهی ساکن در این تالابها را با تهدید روبرو خواهد کرد. در طی این سالهازنجیره زاد و ولد حیات وحش تغذیه کننده از جنگلها و مراتع کشور در معرض تهدید و انقراض قرارخواهد گرفت. افزایش دما کاهش زاد و ولد گونه های جانوری و پرندگان را موجب خواهد شد و مهاجرت پرندگان از کشوررا افزایش خواهد داد.افزایش دما، کاهش طول زمستان وبهار زودرس بر چرخه تولیدمثل گیاهان و جانوران تأثیر خواهدداشت و خطر انقراض نسلهای گیاهی و جانوری را افزایش می‌دهد. بنابراین، بررسی پیامدهای تغییر اقلیم و مطالعه رخدادهای اقلیمی به عنوان راه کار ی برا ی بهبود درک پیامدهای گرمایش جهانی به موضوع مهمی در دهه های اخیر تبدیل شده است خشکسالیِ گستردهٔ سالهای اخیر در ایران، نمادی از رخدادهای اقلیمی تحت شرا یط تغییر اقلیم است که چالش های پیچیده تأمین آب را برای مصارف رقابتی در مناطق مختلف در زمان کمبود شدید برجسته می کند. نگرانی روزافزونی در خصوص ناکارآمدی شیوه های کنونی مد یریت خشکسالی که عمدتاً مبتنی بر مدیریت بحران است (زرین و داداشی رودباری,۱۴۰۰) افزا یش یافته است. با توجه به اثرات پیچیده خشکسالی و افزایش فراوانی، شدت و توالی زمانی رخدادهای خشکسالی همراه با تغییر اقلیم ضرورت دارد تا شناختی صحیح از این پدیده مخرب اقلیمی در آینده تحت سناریوهای تغییر اقلیم داشت. خشکسالی یک مخاطره پیچیده اقلیمی است که جامعه را به طرق مختلف

تحت تأثیر قرار می‌دهد. در یک تعریف ساده بارش کمتر از نرمال به عنوان خشکسالی هواشناسی توصیف می شودکه در صورت تداوم می تواند باعث کاهش منابع آب سطحی و زیرسطحی شود. خشکسالی هواشناسی
منجر به خشکسالی هیدرولوژیکی و سرانجام کاهش رطوبت خاک (SM) و از بین رفتن محصولات کشاورزی می شود که در
نتیجه آن باید شاهد خشکسالی کشاورزی بود.خشکسالی به دلیل پیامدهای گسترده ای که به خصوص بر منابع آبی و کشاورزی دارد در بسیاری از کشورهای خشک و نیمه و خشک جهان به عنوان یک مسئله جدی به آن توجه می‌شود. همین امر باعث شده مطالعات مربوط به خشکسالی طیف گسترده‌ای داشته باشد.

منابع آب شیرین کشور از جمله بخش هایی است که به طور جدی ازتغییرات اقلیمی متأثر خواهد شد و حوزه های وسیعی از آن شامل منابع آب های سطحی و زیرزمینی، سازه های آبی، شبکه های آب و فاضلاب شبکه های آب رسانی شهری، ایستگاه های پمپاز و سازه های مرتبط با بخش آب با پیامدهای قابل ملاحظه ای از جمله موارد زیر رو به رو خواهد بود.

در طی این سالها با روند کاهش بارندگی فعلی سرانه ذخایر آبی کشور کاهش یافته است.کاهش بارش ها اثرات سوء قابل توجهی برموانع و جنگل ها و پوشش گیاهی دارد. رشد و توسعه‌های انجام گرفته در دو دهه اخیر، بهره برداری بیش از توان منابع آب زیرزمینی و عدم مدیریت مناسب در عرضه و تقاضای منابع آبی باعث شده تا علاوه بر مشکلات کمّی در بخش منابع آب، مشکالت زیست محیطی نیز به وجود آید. یکی از مشکلات زیست محیطی که به صورت یک فرآیند خطرزمین شناسی بروز می کند، فرونشست است. این فرآیند می تواند ناشی ازاکسیداسیون خاکهای آلی ،فروافتادگی آبفروچاله ها، حفره تراکم طبیعی زمین ،تحکیم ساختار زمین شناسی در اثر افت آب زیرزمینی رخ دهد.سوابق موجود در زمینه بررسی پدیده فرونشست در ایران نشانگر این است که مهمترین علت فرونشستها، عوامل انسانی در اثر برداشت بی رویه از آبخوانها است. برداشت بی رویه از آبهای زیرزمینی باعث افت تراز سطح ایستابی و خروج آب از منافذلایه های خاک می گردد که می تواند منجر به کاهش فشار آب منفذی و در نتیجه تراکم لایه های خاک و فرونشست زمین شود(Sneed and Brandt,2007).بنابراین فرونشست علاوه برفروریزشهای موضعی یا نشست عمومی سطح زمین، باعث خساراتی مانند کاهش ظرفیت ذخیره خاک از طریق سازوکار فوق الذکر نیز می گردد. این اتفاق باعث تغییر در بیلان آب زیرزمینی شده و ظرفیت سفره آب زیرزمینی به عنوان تنها منبع تامین آب بسیاری از مناطق را کاهش می‌دهد.از دیگر خسارات ناشی از فرونشست می توان به نابودی زمینهای کشاورزی، تخریب سیستمهای آبیاری، افزایش سیل خیزی مناطق، کج شدن و بیرون زدگی لوله های چاه، خرابی ساختمانها، خیابانها و شریانهای حیاتی، پلها، بزرگراهها، خطوط آبرسانی، گاز و فاضلاب

اشاره نمود.ایران با خشک شدن رودخانه‌ها و تالاب‌ها، کاهش شدید آب‌های زیرزمینی، بیابان‌زایی، کاهش تنوع زیستی، آلودگی هوا و خاک، مدیریت نامناسب زباله، فرسایش خاک، تخریب مراتع و جنگل‌ها و طوفان‌های گرد و غبار مواجه است. این دشواری‌ها نتیجه چندین دهه سیاست‌گذاری است و نمی‌توان بدون تغییر چشمگیر در رویکردهای محلی و ملی به طور مؤثر با آنها مقابله کرد. در غیاب چنین اصلاحاتی، ایران احتمالاً در سال‌های آینده مشکلات به مراتب بزرگتری را تجربه خواهد کرد.

۳.۲- پیامدهای اقتصادی

اگرچه فعالیت های اقتصادی گسترده هستند اما فعالیت های مرتبط با محیط زیست بیشتر در برگیرنده فعالیت های کشاورزی هستند. فعالیتهای کشاورزی شامل تولید محصولات زراعی، باغی و گلخانه‌ای، دامداری، پرورش طیور، کرم ابریشم و زنبور عسل، آبزی پروری و... است. فعالیتهای کشاورزی در ایران به شرایط جوی به ویژه میزان بارش و تغییرات دما وابستگی شدیدی دارد، به ویژه آنکه بیش از ۵۰ درصد اراضی کشاورزی ایران به صورت دیم کشت می‌شوند. به همین دلیل تغییرات اقلیمی آثار شدید و تعیین کنندهای بر بخش کشاورزی خواهد داشت(سازمان هواشناسی،۱۳۹۴).در سالهای اخیر بحث تغییرات اقلیمی و اثرات آن بر محیط یکی از موضوعات مهم در مطالعات و تحقیقات در سراسر دنیا به شمار می رود. مطالعات و تحقیقات با محوریت تغییرات اقلیمی در بسیاری از جنبه های محیطی و مرتبط با زیست انسان و سایر موجودات انجام می گیرد. اثر تغییرات آب وهوا بر بهداشت و سلامت، مخاطرات محیطی، منازعات و امنیت کشورها، منابع آب، زیست اقلیم، توریسم، کشاورزی، امنیت غذایی، اقتصاد وغیره از موضوعات مهم و کاربردی در تحقیقات به شمار می رود. در حال حاضر علم درباره تغییر اقلیم در یک تردید به سر می برد اما فعالیتهای انسانی، به ویژه انتشار گازهای گلخانه ای مانند دی اکسید کربن به عنوان گاز گلخانه ای شناخته شده،علت اصلی ویرانی و زیان در سراسر جهان معرفی شده است(فهمی،۱۳۹۴).اقلیم اولین گام برای سازگاری رشد اقتصادی در حوزههای مختلف است. برای مثال می توان در صنعت گردشگری سرمایه گذاری کرد. باید به دنبال زیر ساختهای منعطف و بادوام بود، یعنی هرجایی که زمینه توسعه اقتصادی وجود دارد، باید از آن استفاده کرد. فقر یک عامل تشدیدکننده تغییر اقلیم از نظر آسیب پذیری است، باید در ساخت وسازهای شهری زیرساختهای منعطف و بادوام ساخت به دلیل اینکه کلانشهرها از تغییرات اقلیمی بیشترین آسیب را میبینند، باید به طور مشخص شهرهایی ساخت که در مقابل این تغییرات اقلیمی سازگار باشند.کشورهای توسعه یافته باید منابع مالی کافی برای کمک به کشورهای درحال توسعه

برای مقابله با تغییرات اقلیمی اختصاص دهند و مطمئن شوند این بودجه از طریق توانمندسازی جوامع برای پیگیری راه حلهای سازگاری موردنیاز، به آسیب پذیرترین کشورها کمک خواهد کرد.

۳.۳- پیامدهای اجتماعی

تغییرات محیط زیستی بسیاری در جهان وجود دارد که منجر به مهاجرت انسانها می شود. مسلما تغییر اقلیم یک عامل اثرگذار اصلی است. با این حال، بهره وری چندگانه ای برای مهاجرت وجود دارد و به جای تلاش برای شناسایی مهاجرتهای محیط زیستی، که ممکن است سخت و حتی ناممکن باشد، بهتر است که همه بهره وری مهاجرت و چگونگی تاثیر تغییرات محیط زیست بر آنها بررسی شوند. عده ای از پژوهشگران (بلک، ادگر، آرنل، درکون، گدس و توماس)، پنج عامل اصلی را که در مقیاس بـزرگ بر تصمیـم مردم مبنـی بر مانـدن یا رفتن تاثیر میگذاردشناسایی کردند (Black al et,2011).

اقتصادی که شامل فرصت های اشتغال، درآمد و هزینه زندگی می شوداجتماعی که دربرگیرنده جستجو برای فرصتهای آموزشی یا تعهدات به خویشاوندان نزدیک مثل ازدواج یا رسوم ارثی است. سیاسی، که شامل تبعیض یا آزار و اذیت، جنگ، سطح امنیت و مشوقهای سیاسی،برای مثال تغییر در سیاست مالکیت زمین، می شود.جمعیتی که شامل تراکم جمعیت و ساختار و خطر ابتلا به بیماری می شود.محیط زیستی که شامل در معرض مخاطره های طبیعی بودن، بهره وری زمین و قابلیت سکونت می شود در مقیاس کوچکتر، ویژگی های فردی مثل سن، جنسیت، آموزش، ثروت و وضعیت تاهل ممکن است بر مهاجرت اثرگذار باشد. ایران پتانسیل عظیمی برای انرژی‌های تجدیدپذیر دارد. به دلیل تعداد بالای روزهای آفتابی و سطوح تابش خورشیدی ، به‌طور بالقوه یکی از بهترین مناطق برای استفاده از سلول‌های فتوولتائیک است. برنامه مهم آینده ایران می‌تواند توسعه شهرک‌های خورشیدی به عنوان ، پروژه‌های " مسکن پایدار" باشد. فتوولتائیک یا پنل‌های خورشیدی فناوری تبدیل نور به الکتریسیته با استفاده از مواد نیمه هادی است. اثر فتوولتائیک به طور تجاری برای تولید الکتریسیته و به عنوان حسگرهای نوری استفاده می‌شود. از سوی دیگر فرصت‌های قابل توجهی برای توسعه انرژی باد ایران و انرژی زمین گرمایی در سراسر منطقه شمال غرب، شمال – رشته کوه‌های البرز و قله دماوند – و جنوب شرق ایران وجود دارد. در حالی که در سال های اخیر سیاست‌ها و برنامه‌هایی برای توسعه تجدیدپذیر وجود داشته است، پیشرفت‌ها کند بوده است. ایران تنها ۰.۱ درصد از انرژی خود را از انرژی‌های تجدیدپذیر غیر آبی مانند باد و خورشید تامین می‌کند. منابع آبی تجدیدشونده ایران در ۳۰ سال گذشته از ۱۳۰ میلیارد مترمکعب در سال به حدود ۱۰۰ میلیارد مترمکعب کاهش یافته و به‌عبارتی، این کاهش منابع آب تجدیدشونده، به‌طور متوسط سالانه حدود یک میلیارد مترمکعب بوده که رقم بسیار بزرگی است. به‌تبع کاهش منابع آب تجدیدشونده و افزایش جمعیت طی دهه‌های اخیر، سرانه آب تجدیدشونده کشور نیز به‌شدت با کاهش همراه بوده است.سرانه آب تجدیدشونده کشور نشان‌دهنده درگیر بودن ایران با تنش آبی است.

نکته حائز اهمیت این است که این سرانه نیز به‌طور متوازن و یکسان در نقاط مختلف کشور تقسیم نشده است و برخی از نقاط کشور، تنش آبی شدیدتری را تجربه می‌کنند و برخی از نقاط کشور از مرحله تنش آبی عبور کرده و وارد مرحله فقر آبی شده‌اند. بحران آب در ایران طی سال‌های اخیر از یک چالش محیط‌زیستی فراتر رفته و به یک مساله پیچیده اجتماعی بدل شده است. این بحران نه‌تنها زندگی میلیون‌ها نفر از ساکنان مناطق مختلف کشور را تحت تأثیر قرار داده، بلکه پیامدهای گسترده‌ای در حوزه‌هایی مانند مهاجرت، معیشت، بهداشت، آموزش و روابط اجتماعی برجای گذاشته است.در مناطقی که با کاهش شدید منابع آبی مواجه هستند، فشار اقتصادی حاصل از خشکسالی به کاهش درآمد خانوار، تضعیف رفاه اجتماعی و از بین رفتن مشاغل سنتی منجر شده است. بخش بزرگی از جمعیت روستایی کشور که معیشت آن‌ها به فعالیت‌های کشاورزی و دامداری وابسته است، به‌ویژه در استان‌هایی چون سیستان و بلوچستان، کرمان، خوزستان و یزد، با محدودیت جدی در دسترسی به منابع آبی روبه‌رو شده‌اند.ادامه این روند سبب شده بخشی از ساکنان این مناطق به ناچار به شهرهای بزرگ مهاجرت کنند. این مهاجرت‌ها که عمدتاً بدون برنامه‌ریزی و امکانات لازم انجام می‌گیرد، منجر به شکل‌گیری سکونت‌گاه‌های غیر رسمی، گسترش حاشیه‌نشینی و فشار مضاعف بر خدمات عمومی شهری شده است. پیامد این وضعیت، افزایش نرخ بیکاری، آسیب‌های اجتماعی و نابرابری‌های منطقه‌ای است.بحران آب همچنین بر سلامت روانی و کیفیت زندگی خانواده‌ها تأثیر گذاشته است. ناامیدی ناشی از عدم اطمینان به آینده، فرسودگی روانی به دلیل شرایط سخت معیشتی، و احساس ناتوانی در برابر وضعیت پیش‌آمده، در برخی مناطق موجب افزایش تنش‌های خانوادگی، کاهش انگیزه تحصیل در بین نوجوانان و تضعیف همبستگی اجتماعی شده است.از سوی دیگر، کمبود آب در برخی مناطق به بروز تعارضات محلی منجر شده است. رقابت بر سر دسترسی به منابع آب، گاه میان روستاها، شهرستان‌ها یا حتی استان‌ها، تنش‌هایی را ایجاد کرده که در صورت عدم مدیریت صحیح، می‌تواند بستر نارضایتی اجتماعی را فراهم کند. در همین زمینه، مشارکت مردمی در حفاظت از منابع آبی و آگاه‌سازی اجتماعی از اهمیت بالایی برخوردار است. تجربه کشورهای مختلف نشان داده که بدون همراهی جامعه محلی، هیچ برنامه‌ای در زمینه مدیریت پایدار منابع آبی به نتیجه مطلوب نخواهد رسید.کم‌آبی همچنین بر فرصت‌های آموزشی و رشد فردی نسل‌های آینده تأثیرگذار است. خانواده‌هایی که با مشکل دسترسی به آب آشامیدنی یا آبیاری مزارع خود مواجه‌اند، ناگزیر از کاهش هزینه‌های جانبی از جمله آموزش فرزندان خود هستند. این وضعیت به نابرابری آموزشی دامن زده و چرخه فقر را در مناطق محروم تقویت می‌کند. در چنین شرایطی، تقویت عدالت اجتماعی و اجرای سیاست‌هایی که به نیازهای مناطق آسیب‌پذیر پاسخ دهد، ضرورتی انکارناپذیر است.

سیاست ها و راهکارهای مقابله باتغییراقلیم

از منظر ساختاری مهمترین چالش کشور فقدان دیدکلان در تخصیص منابع پایه همچون آب و انرژی و امنیت غذایی وکاربری اراضی (منابع طبیعی و تنوع زیستی) در زیر چتر تغییر اقلیم به عنوان پیشران اصلی شکل گیری پویایی (دینامیسم) جدید در محیط و منابع است. علاوه بر نبود توانمندی در سطح برنامه ریزی کلان،کارگروه ملی تغییر اقلیم به رغم دو بار تغییر ماهیت و ساختار در رسیدن به حداقل انسجام دستگاهی و تهیه گزارش عملکرد سالانه، استقرار واحدها وکمیته های تغییر اقلیم در دستگاههای مرتبط توفیق چندانی نداشته که این امر ناشی از عمق و نفوذ سطحی درک کارشناسی از سطح اثرگذاری تغییر اقلیم است؛ همچنین عدم توانمندی فنی و مؤثر دستگاه میزبان این کارگروه به دلیل ضعف وکم بنیه بودن تاریخی از دیگر دلایل عدم توفیق بلندمدت کارگروه ملی تغییر اقلیم است هرچند متناسب با فراز و فرود توانمندی افراد و مسئولین این کمیته ملی، اثرگذاری این کمیته نیز تحت تأثیر جدی قرارگرفته است از دیگر چالشهای ساختاری که در کشور به وضوح خودنمایی می کند، عدم بومی شدن و استقرار درک صحیح از تغییر اقلیم و در مرتبهای بالاتر، ضعف در استقرار، تثبیت و فراگیری این دانش راهبردی است. این چالش هم در سطح فردی (توان کارشناسی) و هم در سطح دستگاهی اثر قابل ملاحظه ای به همراه دارد. دانش تغییر اقلیم، تمامی عرصه های کلان کاهش انتشار و سازگاری در عرصه سیاستگذاری تا توسعه فناوری سازگار با شرایط ملی متأثر از تغییر اقلیم را در بر میگیرد.

معاهده پاریس وجایگاه ایران

لایحه توافقنامه پاریس در راستای اجرای کنوانسیون تغییرات آب و هوای ملل متحد با تصویب دولت و مجلس، هم اکنون منتظر اعلام نظر شورای نگهبان است. از آنجا که با پذیرش این توافقنامه ملاحظات اقتصادی – سیاسی و امنیتی متعددی متوجه کشور می شود لازم است به ابعاد پذیرش آن توجه لازم صورت پذیرد

1 :اگرچه این توافقنامه مرتبط با محیط زیست معرفی می شود لیکن اجرای آن تاثیری در بهبود آلودگی هوا و محیط زیست کشور ندارد زیرا اصوال گازهای گلخانه‌ای و دی اکسید کربن برای سلامتی انسان مضر نیستند، بلکه منواکسید کربن و سایر آلاینده های زیست محیطی نظیر اکسیدهای گوگرد و نیتروژن و ذرات معلق برای سلامت انسان مضر هستند.

۲: پذیرش توافقنامه پاریس محدودیت های مشخصی را برای بهره برداری از منابع نفت و گاز کشور ایجاد می کند که باعث کند شدن پیشرفت کشور می شود، زیرا اجرای تعهدات در قالب کاهش استفاده از نفت و گاز، محدودیت در ساخت نیروگاهها با سوخت فسیلی، پاالیشگاه ها، مجتمع های پتروشیمی و هر مصرف کننده دیگر صنعتی نفت و گاز و نیز اخذ مالیات برای انتشار کربن بروز پیدا می کند و لذا پذیرش آن، مغایر سیاست های کلی نظام و مانعی برای تحقق اقتصاد مقاومتی ارزیابی می شود.

۳: عمل به چارچوب های مورد اشاره در توافقنامه به ویژه چارچوب شفافیت آن با عنوان اعتماد سازی، می تواند به افشای اطلاعات کشور از جمله اطلاعات نظامی و امنیتی را در فضای بین‌المللی منجر شود.

۴ :شرایط خروج از این توافقنامه به سادگی امکان پذیر نیست زیرا با پذیرش این توافقنامه امکان خروج تا سه سال منع شده

است هر زمان کشور اقدام به خروج از آن کند، تا یکسال فرآیند خروج از آن بطول می انجامد که در این دوره امکان تحمیل جرایم بر کشور وجود دارد.

۵: مقام معظم رهبری نیز در دیدار اخیر خود با فرماندهان نیروی دریایی در تاریخ 9/7 / ۱۳۹۵ عجله در به سرانجام رساندن توافق هسته ای را عامل بروز مشکلات فعلی در این توافق اعلام فرمودند. از آنجا که کشورهای روسیه و امریکا این توافق را درمجالس خود تصویب نکرده‌اند، هر گونه عجله و شتاب زدگی در تصویب این توافقنامه در مجلس شورای اسلامی خلاف عقلانیت و منافع ملی است. به علاوه در متن توافقنامه هیچ قید و زمانی برای تصویب آن در مجالس کشورها در نظر گرفته نشده است. لذا عجله در پذیرش توافقنامه پاریس بدون توجه به خطرات پذیرش آن دور از مصلحت و خلاف منطق است.

توافق آب و هوایی پاریس در بیست و یکمین نشست اعضا عضو کنوانسیون چارچوب سازمان ملل متحد در مورد تغییرات آب و هوایی UNFCCC (cop21)در ۱۲دسامبر ،۲۰۱۵ مورد موافقت ۱۹۵ کشور قرار گرفت. هدف این توافق جلوگیری از افزایش دمای کره زمین در این قرن زیر ۲درجه سانتی گراد و همچنین تلاش برای محدود کردن دما به افزایش آن به زیر ۱.۵ درجه سانتی گراد نسبت به سطح آن قبل از صنعتی شدن است. هدف بلند مدت توافق پاریس این است که دمای کره زمین تا پایان قرن به جای دو درجه، ۱.۵ درجه سانتی گراد افزایش یابد.

در توافقنامه پاریس با عنایت به الزام تمامی دولتها به ارائه برنامه ملی به نوعی دسته بندی تعهدات دولتها برای میزان کاهش

انتشار از تقسیم بندی دولتهای جهان به دو دسته توسعه یافته و در حال توسعه تغییری اساسی پیدا کرده است و در حال حاضرتمامی دولتهای عضو متعهد به ارائه برنامه ملی جهت کاهش میزان انتشار و برنامه های سازگاری شده اند به وجود این میزان کاهش انتشار و نحوه تحقق آن با عنایت به توانمندی های داخلی دولت در اختیار خود دولتها قرار داده شده است.در نتیجه دولتهاآگاهانه با ارائه برنامه ملی کاهش و روش رسیدن به آن تعهداتی را متقبل می‌شوند.

از سوی دیگر با توجه به ماهیت توافقنامه پاریس به عنوان یک معاهده بین‌المللی، طرفین معاهده مذکور علاوه بر ملزم بودن بر اجرای تعهدات شکلی مانند ارائه اطلاعات درست، همکاری با دیگر دولتها در زمینه های مطروحه، متعهد خواهد شدمفاد برنامه ملی را نیز اجرایی کنند. همچنین در سازوکار کنترل پایبندی به تعهدات به نحوی که مقرر خواهد شد نیز

مشارکت داشته باشند. بدان معنا که با توجه به ماهیت توافقنامه و مفاد تعهدات آن ضروری است شکل و ماهیت برنامه ملی ارائه شده و توان داخلی دولت برای اجرای برنامه مذکور و همچنین اتخاذ سیاستها و برنامههای داخلی برای تناسب با برنامه ارائه شده، اطلاعات بیان شده و روشهای حصول به آن مورد توجه جدی قرار گیرد.

شایان توجه است مکانیزم کنترل پایبندی دولتها در چارچوب مصوبات کنفرانس اعضا توسعه پیدا خواهد کرد. اگرچه تصمیمات کمیته کنترل پایبندی تنبیهی و خصمانه نباید باشد، این بدان معنا نیست که فاقد هرگونه آثار حقوقی مشخص به ویژه در خصوص اعلام پایبندی دولتها به تعهدات پذیرفته شده خواهد بود.

علی رغم تلاش جمهوری اسلامی ایران و پیشرفت های قابل توجه دانشمندان و متخصصان صنعت هسته ای کشور متأسفانه برخورداری ایران از این صنعت مورد تبعیض و بی مهری کشورهای قدرتمند قرار گرفته است. بنابراین این موضوع بایستی از نظر اقتصادی و محیط زیستی به عنوان جایگزینی برای سوخت های فسیلی حل شود.(مهدی,۱۳۹۷)

کنوانسیون های بین المللی زیست محیطی و مشارکت ایران

رشد روزافزون آلودگی و تخریب محیط زیست و بروز بحران های پی درپی زیست محیطی باعث شد دولت ها از حدود چهار دهه قبل به طور جدی به تکاپو افتاده تا چاره یی بیندیشند. به این ترتیب تاکنون حدود ۲۸۰معاهده و موافقت نامه بین المللی و منطقه یی در زمینه حفاظت محیط زیست و مسائل مرتبط با آن منعقد شده است که از این میان حدود ۷۰ کنوانسیون و پروتکل جنبه جهانی داشته و مابقی منطقهای است. عزم جهانی برای حفاظت محیط زیست با تشکیل نخستین کنفرانس جهانی سازمان ملل متحد درباره انسان و محیط زیست معروف به «کنوانسیون استکهلم» در سال ۱۹۷۲در سوئد جنبه عینی پیدا کرد، به طوری که حق برخورداری انسان از محیط زیست سالم هم طراز با حقوق بشر شناخته شد. در این میان ایران نیز به تعدادی از کنوانسیون ها و پروتکل ها پیوست و سازمان حفاظت محیط زیست به عنوان مرجع ملی، اجرای اکثر آنها را بر عهده دارد. کنوانسیون تغییر آب و هوا در سال ۱۹۹۲ میلادی (۱۳۷۱ شمسی) با شرکت نمایندگان بیش از ۱۵۰ کشور در اجلاس ریو با هدف تثبیت غلظت گازهای گلخانهای ناشی از فعالیتهای صنعتی در سطحی که از آسیبهای ناشی از تغییر اقلیم بر زندگی انسان و حیات روی زمین بکاهد، تدوین و از سال ۱۹۹۴ میلادی اجرایی شد، اکنون ۱۹۷ کشور این کنوانسیون را امضا کردهاند و دولت جمهوری اسلامی ایران نیز فرایند الحاق به کنوانسیون مذکور را در سال ۱۹۹۶ به انجام رسانید و به عضویت کنوانسیون مذکور درآمد.

کنوانسیون تغییر آب و هوا

کنوانسیون تغییرات آب و هوا با نام رسمی کنوانسیون ساختاری سازمان ملل درباره تغییرات اقلیم، یکی از مباحث مهم همایش زمین یا اجلاس «ریو» در سال ۱۹۹۲در خصوص محیط زیست و توسعه محسوب می شود. این کنوانسیون در

سال ۱۹۹۲میلادی در نیویورک منعقد شد. بر اساس پیمان موردنظر، کشورهای عضو مسوولیت های مشترک اما متمایز و متفاوت بر عهده دارند. آنچه در این کنوانسیون به عنوان اساسی ترین الزام برای کشورهای توسعه یافته از اولویت برخوردار است، عبارت است از اینکه سطح انتشار گازهای گلخانه یی توسط آنها در دو دهه اول سده ۲۰۰۰میلادی به سطح سال ۱۹۹۰برگردانده و تثبیت شود.

کنوانسیون رامسر

کنوانسیون مربوط به تالاب های مهم بین المللی به ویژه تالاب های زیستگاه پرندگان آبزی(کنوانسیون تالاب ها) معروف به کنوانسیون رامسر در سال ۱۳۵۰ در شهر رامسر ایران با حضور ۱۸کشور جهان مورد تصویب قرار گرفت. این کنوانسیون نخستین معاهده نوین جهانی بین الدولی پیرامون حفاظت و بهره برداری منطقی از منابع طبیعی است و هم اکنون ۱۳۴عضو رسمی را در سراسر دنیا شامل می شود.

کنوانسیون سایتیسCITES

کنوانسیون تجارت بین المللی گونه های حیوانات و گیاهان وحشی در معرض خطر انقراض و نابودی در سال ۱۳۵۲در واشنگتن امریکا مورد تصویب قرار گرفت. هدف این معاهده، اطمینان از آن است که تجارت حیوانات وحشی و گونه های گیاهی ارزشمند و در خطر انقراض، بقای آنها را دستخوش تهدید نکند. این کنوانسیون هم اکنون ۱۶۰کشور را به عنوان عضو رسمی دارد. باید توجه کرد هیچ یک از گونه های تحت حفاظت این کنوانسیون از زمان به اجرا درآمدن این پیمان بر اثر تجارت معدوم نشده و سال ها است که این معاهده در شمار مهمترین و پردامنه ترین پیمان نامه های بین المللی بوده است.

کنوانسیون وین برای حفاظت از لایه ازن

با توجه به ضرورت پیش بینی چاره و راهکارهایی برای پیشگیری از تخریب لایه ازن، در سال ۱۹۸۵میلادی(۱۳۶۶هجری شمسی) به دعوت سازمان ملل متحد، نمایندگان ۲۱ کشور جهان و کشورهای عضو جامعه اروپا در وین پایتخت اتریش، گرد هم آمدند و مفاد معاهده یی را که کنوانسیون وین نامیده شد، تدوین کردند.

کنوانسیون بازل

این کنوانسیون درباره کنترل انتقالات برون مرزی مواد زاید زیان آور و دفع آنها در شهر «بازل» سوئیس در سال ۱۹۸۹میلادی به امضای ۳۵ کشور شرکت کننده رسید.

کنوانسیون CEP

با توجه به اهمیت زیست بومدریای خزر و شرایط نامطلوب حاکم بر آن، کشورهای ساحلی این دریا با همکاری برنامه محیط زیست سازمان ملل UNEP اقداماتی را برای برقراری یک چارچوب مناسب حقوقی- قانونی جهت حفاظت از این دریا آغاز کردند. براساس مفاد این کنوانسیون، کشورهای ساحلی منطقه یی برای حفظ محیط زیست دریای خزر در زمینه جلوگیری، کاهش و کنترل آلودگی، جلوگیری از ورود، کنترل و از بین بردن گونه های مهاجم، موارد اضطراری زیست محیطی، حفاظت و نگهداری و احیا و منابع زنده دریایی و مدیریت مناطق ساحلی دریای خزر همکاری خواهند کرد.

کنوانسیون منطقه یی کویت

کنوانسیون منطقه یی کویت برای همکاری درباره حمایت و توسعه محیط زیست دریایی و نواحی ساحلی خلیج فارس، دریای عمان و قسمتی از دریای عرب در برابر آلودگی شکل گرفت. این یک کنوانسیون منطقه یی بین دولت های بحرین، ایران، عراق، کویت، عمان، قطر، عربستان و امارات متحده عربی است. آلودگی محیط زیست دریایی منطقه مشترک بین کشورهای مذکور توسط نفت یا سایر مواد مضر یا سمی ناشی از فعالیت های انسان در خشکی و یا در دریا.

کنوانسیون حمایت از میراث طبیعی

این کنوانسیون در سال ۱۹۷۲در شهر پاریس به تصویب رسید. عمده ترین نکته مورد نظر کنوانسیون این است که ویرانی یا انهدام هر قسمت از میراث فرهنگی و طبیعی موجب فقر شدید میراث همه جهان می شود و باید به عنوان میراث جهانی بشریت حفظ شود.

کنوانسیون بیابان زدایی

هدف از این کنوانسیون بیابان زدایی و کاهش اثرات خشکسالی در کشورهایی است که به طور جدی با خشکسالی و بیابان زایی به خصوص در آفریقا مواجه هستند. از این طریق اقدام موثر در تمام سطوح، با حمایت همکاری های بین المللی و ترتیبات مشارکت در چارچوب یک رویه جامع همسو با دستور کار و به منظور کمک به دستاوردهایی توسعه پایدار در مناطق آسیب دیده صورت می گیرد.

کنوانسیون تنوع زیستی

کنوانسیون تنوع زیستی CBD، بخشی از روند کنفرانس سازمان ملل متحد در خصوص محیط زیست و توسعه به شمار می رود. این معاهده در سال ۱۹۹۲در ریودوژانیرو امضا و در سال ۱۹۹۳لازم الاجرا شد و هم اکنون ۱۸۴عضو دارد. این کنوانسیون بر مبنای سه هدف اصلی حفاظت از تنوع زیستی، بالابردن ظرفیت کاربرد پایدار آن و سهیم شدن عادلانه در منافع حاصل از استفاده ذخایر ژنتیکی تشکیل شد. ایران در خرداد ۱۳۷۵به طور رسمی به این کنوانسیون پیوست و نسبت

به تعیین راهبردها و برنامه اقدام ملی در خصوص حفاظت از تنوع زیستی که جزء یکی از الزامات ناشی از پیوستن به این پیمان بود، اقدام کرد.

پروتکل کارتاهنا

پروتکل ایمنی زیستی یا کارتاهنا در سال ۲۰۰۰میلادی در«مونترال» کانادا به تصویب نمایندگان کشورهای عضو رسید. براساس موادی از کنوانسیون تنوع زیستی، کاربری سالم و بی خطر روش های فناوری زیستی)بیوتکنولوژی(به نحوی که این روش ها و یا فرآیند آنها تاثیر زیانباری بر محیط زیست نداشته باشد، مورد تاکید قرار گرفته و از تعهدات کشورهای عضو شمرده شده است.

کنوانسیون جلوگیری از آلودگی دریایی

مواد این کنوانسیون در سال ۱۹۷۲)۱۳۵۱شمسی(در شهر لندن به امضای نمایندگان تعدادی از کشورها رسید و دولت ایران در سال ۱۳۷۵شمسی با تصویب مجلس به آن پیوست. هدف از تصویب این کنوانسیون، کنترل و جلوگیری از آلودگی دریایی ناشی از تخلیه و دفع مواد زائد و تشویق و حمایت از انعقاد قراردادها و توافقنامه های منطقه یی مکمل این کنوانسیون است.

کنوانسیون آلاینده های آلی پایدار POPs

هدف از این پیمان، حذف و یا کاهش آلوده کننده های آلی پایدار و ممنوع کردن تولید، مصرف، صادرات و واردات و فروش آنها، مساعدت و ترغیب کشورها به انجام اقدامات ملی و منطقه یی برای کاهش خطرات مواد مزبور، مساعدت به کشورها برای ایجاد صنایع پاکیزه به منظور جلوگیری و یا کاهش انتشار مواد مذکور، استفاده از جایگزین های مناسب، ترغیب کشورها به شناسایی منابع مواد آلوده کننده آلی پایدار و نابود کردن آنها است.

کنوانسیون روتردام PIC

کنوانسیون گسترش تجارت جهانی در دهه های ۱۹۶۰و۱۹۷۰ توجه مجامع بین المللی و سازمان های دولتی و غیردولتی حفاظت محیط زیست در سراسر جهان را به خطرات تجارت و مصرف مواد شیمیایی بالقوه خطرناک از جمله سموم شیمیایی دفع آفات نباتی معطوف کرد. به منظور کاهش خطرات مواد مذکور، برقراری کد بین المللی نحوه توزیع و مصرف سموم در بیست و سومین اجلاس کنفرانس عمومی سازمان خواربار و کشاورزی جهانی (FAO)در سال ۱۹۸۵در رم به تصویب رسید.

نتیجه گیری

در مقیاس جهانی به طورکلی گرمایش زمین در اثر افزایش گازهای گلخانه‌ای و توسعه فعالیتهای صنعتی، گسترش شهرنشینی، باعث تغییرات اقلیمی در کره زمین خواهد شد. این تغییرات بر منابع آب شیرین، بر نواحی ساحلی، بر تنوع زیستی جهان، بر کاهش مقدار جنگلها و مراتع و حتی بر تولیدات محصولات زراعی، باغی و گلخانه‌ای، دامداری اثرات شگرفی خواهد گذاشت

به طوری که ممکن است حیات بشری را به نابودی سوق دهد. این تغییرات در کشورهایی مثل ایران به دلیل داشتن محیط زیست آسیب پذیر، اثرات سوء بیشتری خواهد داشت. عامل دیگری که سبب می شود کشور ما در برابر تغییرات اقلیمی آسیب پذیرتر باشد کاهش منابع آب سطحی و زیرزمینی است. افزایش جمعیت و گسترش شهرنشینی نیز سبب به هم خوردن تعادل اکوسیستم شده است. دو اثر اصلی و چشمگیر تغییرات اقلیمی در کشور ما افزایش دما و کاهش منابع آب است. نتیجه نهایی این دو اثر از یکسوباعث افزایش مصرف برق، راه اندازی نیروگاههای بیشتر، افزایش میزان آلودگی هوا و گازهای گلخانه‌ای را به دنبال دارد. از طرف دیگرباعث افزایش مصرف آب و کاهش منابع آب، افزایش بیابان و ریزگردها را به همراه خواهد داشت.

باکاهش بارش ها وافزایش دما حجم اکثر تالاب های کشور کاهش واز این طریق زندگی بسیاری ازگونه های جانوری وگیاهی درمعرض تهدید خواهد بود.بدین ترتیب طی سالهای آینده تغییرات اقلیمی منابع تولید دربخش کشاورزی ومحیط زیست را با آسیب های گسترده وقابل توجهی روبروخواهدکردو کاهش ظرفیت های تولیددر این بخش وبحران منابع آب وخاک و زیست محیطی کشور که در سال های اخیرروندفزاینده ای یافته اند را تشدید خواهد کرد.اثرهای تغییراقلیم وگرمایش جهانی موجب کاهش راندمان کشت محصولات شده است;این اثرها متعاقبا باعث تغییر الگوی کشت ونوع محصولات شده است وامنیت غذایی، بهداشت انسانها،واقتصاد کلان تحت تاثیرکمبودآب به شدت صدمه دیده است.دراین میان کارشناسان پیشنهاد داده اندکه به منظور افزایش راندمان محصولات کشاورزی بایددانش کشاورزی راافزایش دادتا بتوان اثرهای تغییراقلیم راتعدیل یاباآن سازگاری کرد.درشهرها نیز تغییراقلیم باعث افزایش الودگی هوا،به وجودآمدن ودرنهایت ازبین رفتن آسایش اقلیمی شده است.باتوجه به اینکه تاکنون جامع ترین ارزیابی تغییرات اقلیمی جهانی توسط IPCC انجام شده است.باتوجه به مطالعات تغییراقلیم درایران ومطالعات جهانی،ملاحظه می شودکه نتایج حاصل از این مطالعه دقیقا مطابق با مطالعات جهانی است;بدین گونه که هردو مطالعه ثابت شده است که تغییر اقلیم باعث افزایش دما،کاهش بارش است.با توجه به روند کاهشی بارش وروند افزایشی دما در درصدبسیار بالایی ازپهنه سرزمین ایران،رخدادمخاطرات اقلیمی ومحیطی ناشی از آن همانند امواج گرمایی،خشکسالی،وسیل نیز می تواند درآینده افزایش یابد.همچنین، تغییراقلیم تهدیدی برای انسان ها چه در زمینه اقتصادی چه درزمینه های سیاسی وامنیتی خواهدبود.هم

مطالعات داخل ایران هم مطالعات جهانی تنها راه مقابله با تغییراقلیم راافزایش دانش دراین زمینه دانسته اند وپیشنهاد داده اند که با کاهش استفاده از سوخت های فسیلی تا حدی ازپدیده تغییراقلیم جلوگیری شودتابتوان باآن سازگاری کرد یا اثر آن را کاهش داد. دراین راستا،تحقیقات ومطالعات باید روش های جدیدی را برای کشف برنامه های انرژی های تجدیدپذیر و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای درنظربگیرند تا برافزایش خطر اثرتغییرات آب وهوایی غلبه کرد. برای کاهش تاثیرات مخرب آب وهوا وگرم شدن کره زمین درجامعه انسانی و محلی،توصیه می شود استرانژی های مدیریت تطبیقی تغییراقلیم دراین مناطق درالویت قرارگیرد.در بسیاری از نقاط جهان این تفکر وجود دارد که تهدید واقعی جوامع انسانی وقوع جنگ و برخوردهای نظامی و مسلحانه است حال آنکه تغییرات اقلیمی به اندازه جنگها می تواند خسارت وارد کند و موجب مرگ ومیر می‌شوند، گزارش های مکرر مؤسسات و نهادهای علمی- تحقیقاتی به ویژه اقلیم شناسی، تغییر عمیق و گسترده ساختار اکوسیستم طبیعی حیات، هوا و محیط زیست را به طور مکرر گزارش می دهند و دولتها و ملتها را به تغییر کارکردها و برنامه های خود در جهت دستیابی به درآمد بیشتر و توسعه و رفاه تشویق می‌کنند. در حال حاضر، سیاستها، عهدنامه ها و اهدافی که وجود دارند چندان در راستای محدودسازی گرمایش زمین به ۱/۵ درجه ً سانتیگراد قرار ندارند. این بدین معنی است که لازم است تا هرچه سریعتر اقداماتی فوری برای کاهش انتشارات گازهای گلخانه‌ای به منظور مهار کردن افزایش دما انجام شود. با توجه به این شرایط، کشورها باید در چارچوب مذاکرات اقلیمی در اجلاس کاپ ۲۷اقدامهای سازگاری قوی تری را ازجمله توافق بر سر هدف جهانی سازگاری، نحوه ردیابی پیشرفت و ارائه منابع مالی کافی و باکیفیت برای حمایت از ابتکارات سازگاری در جوامع محلی تدوین و اجرا کنند. ابتکارات سازگاری از بازسازی زیست بوم های ساحلی برای مهار طوفانها گرفته تا رشدمحصولات مقاوم در برابر خشکسالی را شامل می شود. برای موفقیت، دولتها باید اطمینان یابند جوامع محلی قدرت تصمیمگیری در مورد تلاشهای سازگاری را دارندبه علاوه، برای پیشبرد اقدامهای ملی و ارائه برآورد دقیق تر از نیاز مالی سازگاری، اعضای موافقتنامه پاریس باید برنامه های سازگاری ملی و گزارش های سازگاری خود را آماده و ارائه کنند. کشورهای توسعه یافته باید متعهد شوند به طور خاص برای (ضرر و زیان)ناشی از تغییرات اقلیمی که بیش ازاندازه توان کشورها و جوامع است، منابع مالی ارائه کنند. درحالی که چنین تأثیراتی ماهیت جهانی دارند، بیشترین آسیب را به آسیب پذیرترین افراد وارد می‌کنند، مانند جزایر کم ارتفاع که به دلیل بالا آمدن سطح دریاها ناپدید می‌شوند، کشاورزانی که دیگر قادر به حمایت از محصولات زراعی به دلیل گرمای شدید نیستند، یا جوامعی که مجبور به ترک سرزمینهای اجدادی خودشده اند، دیگر نمی تواند از آنها حمایت کند و تاکنون کمک مالی در این زمینه به این جوامع ارائه نشده است.

۶-منابع

انصاری، مساح، باقری، (۱۳۹۸). ارزیابی راهبردهای سازگاری با تغییر اقلیم بر اساس شاخص های اجتماعی، اقتصادی و زیست محیطی امنیت آب، ۱۴(۵): ۲۶۵-۲۷۷.

بروغنی،مهدی وهمکاران(۱۴۰۱)،پیش بینی خشکسالی سواحل دریای خزرباتاثیرتغییراقلیم

پیری.مهدی.(۱۳۹۷).تاملی برآثارحقوقی الحاق جمهوری اسلامی ایران به توافقنامه پاریس درخصوص تغییرات اقلیمی

جعفری.مهدی(۱۳۹۶).اقدامات،ساختار تحقیقاتی وآثارعلمی چاپ شده درزمینه تغییرات اقلیمی دربیش از۲۰سال گذشته ،انتشارات حکمت روزآمد.

دانش فراز و رزاق پور،(۱۳۹۳).ارزیابی اثرات تغییراقلیم برتبخیر وتعرق پتاسیل در استان آذربایجان غربی،فضای جغرافیایی۱۴(۴۶)۲۱۱-۱۹۹

دانشوروهمکاران(۱۳۹۸). مروری بر تغییرات اقلیمی در ایران: حقایق و آمار. تحقیقات سیستم های زیست محیطی،

زرین آذر وداداشی رودباری،عباسعلی.(۱۴۰۰)،پیش نگری دوره های خشک و مرطوب متوالی درایران ,مجله ژئوفیزیک ایران

سازمان هواشناسی کشور.(۱۳۹۴).گزارش اقلیم پایه کشور وچشم انداز آن تحت گرمایش جهانی(گزارش تلفیقی دستگاه های مختلف)

صبوری.(۱۳۹۳).مطالعه تغییرات پهنه های اقلیمی ایران در دوره ۲۰۰۹-۲۰۱۰تحت پدیده گرمایش جهانی بااستفاده از ریزمقیاس نمایی مدل های گردش کلی جو ،پایان نامه کارشناسی ارشد،دانشکده کشاورزی ،دانشگاه فردوسی مشهد

عجم زاده وملایی نیا،(۱۳۹۵).ارزیابی اثرات تغییراقلیم برروناب رودخانه فیروزآباد استان فارس،تحقیقات منابع آب ایران

فهمی.(۱۳۹۴).بررسی اثرات تغببراقلیم برمنابع آب،وزارت نیرو

کلانکی،و کاراندیش، (۱۳۹۴). پیش بینی اثرات بلند مدت تغییر اقلیم بر اجزای آب و هوا در تالاب ها، مجله مهندسی آبیاری و آب، ۵(۲۰).

کمال، ع.(۱۳۸۸). ارزیابی شبیه‌سازی جریان و احتمال انتقال آن در دوره‌های آینده تحت تغییرات آب و هوا. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران.

گویال، (۱۳۸۳). حساسیت تبخیر و تعرق به گرمایش جهانی: مطالعه موردی منطقه خشک راجستان (هند). مدیریت آب کشاورزی، ۶۹: ۱-۱۱.

مدرسی وهمکاران .(۱۳۹۰).بررسی اثراقلیم برمیزان آبدهی سالانه رودخانه ها(مطالعه موردی :رودخانه گرگانرود) ۱۳۶۵

یعقوبی.مساح بوانی.(۱۳۹۴).مقایسه وارزیابی منابع مختلف عدم قطعیت درمطالعه اثرتغییر اقلیم بر رواناب حوضه های نیمه خشک(مطالعه موردی:حوضه رودخانه اعظم-هرات یزد)،تحقیقات منابع آب ایران،(مسلسل ۳۴) ۱۳۰-۱۱۳

Black, R.; Adger, W.N.; Arnell, N.W.; Dercon, S.; Geddes, A. & Thomas, D. 2011. The effect of environmental change on human migration. Global Environmental Change, 21(1)

Bowman, J. (1990). The Greenhouse Effect. Land Use Policy. 7 (2): 101- 108.

Dickinson, R., R, Cicerone. (1986). Future Global Warming from Atmospheric Trace Gases. Nature. 319: 109- 115.

Fawzy, S., A, Osman., J, Doran & D, Rooney. (2020). Strategies for mitigation of climate change: a review. Environmental Chemistry Letters. 18: 2069-2094.

IPCC, Climate Change (2014). Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K., and Meyer, L.A., (eds.)]. 2014, IPCC, Geneva, Switzerland

Li, M., J, Shi., J, Guo., C, Jingfu., N, Jide., X, Mingming. (2015). Climate Impacts on Extreme Energy Consumption of Different Types of Buildings. Public Library of Scince. 10 (4).

Singer, F., R, Revelle., Ch, Starr. (1992). What to do Greenhouse Warming: Look Before You leap. Journal of Emerging Issues. 5 (2)

Sneed M, Brandt J (2007) Detection and Measurement of Land Subsidence Using Global Positioning System Surveying and Interferometric Synthetic Aperture Radar, Coachella Valley, California, 1996- 2005. US.Geological Survey Scientific Investigations Report 2007–5251

Yukimoto, S., Y, Adachi., M, Hosaka., T, Sakami., H, Yoshimura. (2012). A New Global Climate Model of Meteorological Reaserch Institute: MRI CGCM4, Model Description and Basic Performance.

Climate change and its consequences in Iran

Dr. Sohrab Asgari
Maleka chenor

1- Payam Noor working group assistant professor
2- Graduated from Farabi University campus

ABSTRACT

The issue of climate change and its destructive consequences is considered one of the global super-challenges today. Solutions have been proposed to deal with it and scientists and nature lovers are constantly warning, but the speed of positive actions to reduce the effects of the destruction is slower than the speed of environmental destruction. As a result, the process of environmental destruction on Earth continues and

is unfortunately growing. Although the scale of destruction is local or regional in some cases, its effects are global, and today no part of the Earth will be safe from the harmful results of environmental destruction. Like many developing countries, Iran is both caught in environmental destruction due to domestic economic and industrial activities and, compared to other countries, it suffers more from the results of environmental destruction than others. Climate change is one of the consequences of environmental destruction. This article, which is conducted in a library manner and with an inductive approach, attempts to explain the results of climate change in the country.

Keywords: Environment, climate change, Iran.

تحلیل برخی از شاخص های اقلیم آسایش در شهر تبریز

عاطفه حسینی صدر[۱]، غلام حسن محمدی[۲]

۱- گروه جغرافیا، دانشگاه پیام نور، صندوق پستی ۳۶۹۷-۱۹۳۹۵، تهران، ایران
۲- دکتری آب و هواشناسی، سازمان هواشناسی کشور، اداره کل هواشناسی استان آذربایجان شرقی، تبریز، ایران
آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول (Sadr88@pnu.ac.ir)

چکیده

بهره گیری از شاخص های آسایش زیست اقلیمی در مناطق مختلف جغرافیایی، می تواند به برنامه ریزان گردشگری کمک نماید تا از توانمندیهای محیطی به منظور جذب گردشگران استفاده نمایند. در این مطالعه با استفاده از ۵ شاخص متفاوت کاربردی به مطالعه اقلیم آسایش در شهر تبریز پرداخته شد. شاخص ها عبارتند از: PMV، PET، SET، ET و فشار عصبی. برای محاسبه شاخص های مذکور از متغیرهای اقلیمی شاملِ درجه حرارت هوا، رطوبت نسبی، سرعت باد، فشار بخار آب و میزان ابرناکی آسمان؛ و متغیرهای فردی(شامل وزن، قد، سن و جنسیت) و متغیرهای دسته سوم(شامل نوع پوشش بر حسب کلو و فعالیت بر حسب وات، طول و عرض جغرافیایی، ارتفاع از سطح دریا استفاده شد. بعد از پردازش متغیرهای ذکر شده در محیط نرم افزارهای تخصصی، خروجی های هر یک از شاخص آسایش، به صورت یکجا مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج تحقیق نشان داد تمام شاخص های آسایشی ماه های تیر و مرداد را به عنوان ماه های آسایش و ماه های خرداد و شهریور را به عنوان ماه های نیمه آسایش نشان دادند. شاخص فشار عصبی برای این منطقه کارآیی ندارد. تحلیل همبستگی نشان داد که بین عناصر اقلیمی با تعداد گردشگران رابطه معناداری وجود دارد به طوری که تعداد گردشگران با درجه حرارت رابطه مستقیم و با رطوبت نسبی رابطه معکوس دارد که در سطح اطمینان ۰/۱ معنادار است.

کلید واژه‌ها: اقلیم آسایش، شاخص های آسایش، پارامترهای اقلیمی، شهر تبریز.

مقدمه

رابطه بین هوا، اقلیم و توریسم به اشکال گوناگونی وجود دارد. از یک سو با شرایط آب و هوایی سرو کار داریم که از مکانی به مکان دیگر و در مقاطع زمانی، بسیار متغیر است و از سویی دیگر توریسم نیز پدیده ای چند جانبه است. اثرهای متقابل این دو بسیار پیچیده است. علت اصلی فصلی بودن توریسم آب و هواست(خالدی ۱۳۷۴: ۱۷۴).

با توجه به زندگی ماشینی امروزه انسان ها از لحاظ روحی و جسمی به فرسایش تدریجی مبتلا شده اند، برای فرار از اثرات سوء آن بایستی به دنبال تنوع در محیط زندگی بود که سیر و سیاحت یکی از روش ها در این زمینه است. گردشگری پدیده ای است که از قرون متمادی در جوامع مختلف انسانی وجود داشته است و بر اساس نیازهایی که بشر با آن درگیر بوده روز به روز به تکامل وپ ویایی رسیده است. تا حدی که امروزه از آن به عنوان یک صنعت نام برده می شود. گردشگری با توجه به اینکه یکی از منابع درآمدزا برای توسعه اقتصادی جوامع به حساب می آید، همیشه در حال ترقی و تکاپو است. بنابراین برای استفاده از این منبع درآمد بایستی برنامه ریزی های آگاهانه و جدی صورت گیرد تا بتوان گردشگران را به این مناطق گردشگری جذب کرد. امروزه مقوله جهانگردی مرزهای جغرافیایی را در هم نوردیده است و بیشتر کشورها که ارزش اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی گردشگری را می دانند مرزهای خود را به نفع توسعه این صنعت برداشته اند.

با عنایت به اینکه ایران توان و زمینه های لازم برای توسعه صنعت گردشگری را داراست بایستی برنامه ریزی ها متوجه این امر مهم گردد. در بسیاری از مناطق جهان، صنعت گردشگری کاملاً وابسته به اقلیم می باشد (مک بویل، ۲۰۰۱). آب و هوا به عنوان یکی از مهمترین عوامل در توسعه گردشگری محسوب می شود. مسافرت های گروهی و دسته جمعی با شرایط آب و هوایی پیوند خورده است (ذوالفقاری ۱۳۷۸). هر چند اقلیم تنها یکی از متغیرهایی است که باعث می شود افراد به مسافرت بروند. بسیاری از گردشگران به وسیله ملاحظات اقلیمی تحریک می شوند. حتی وقتی که محرک ها غیر اقلیمی هستند (مثل توریسم آموزشی یا فرهنگی)، گردشگران علاقه دارند اوقاتی از سال را برای مسافرت انتخاب کنند که سلامت اقلیمی شان در بهترین وضعیت باشد(میک ژوسکی، ۹۸۵). اطلاع رسانی خوب و صحیح از شرایط آب و هوایی می تواند مسافران و قشرهای آسیب پذیری چون بازنشستگان، بیماران و کودکان را در مقابل بعضی تنش های اقلیمی پشتیبانی نماید. در زمان حاضر صنعت توریسم بزرگترین صنعت جهان محسوب می گردد و پیش بینی می شود در دهه ۲۰۲۰ میلادی به صنعت شماره یک جهان تبدیل گردد. به همین خاطر مطالعات علمی مختلفی با استفاده از روشهای مختلف برای بررسی اقلیم آسایش انجام شده است. آلن پری (۱۹۹۷) به بررسی اهمیت اقلیم برای صنعت توریسم پرداخته و اطلاعات اقلیمی مورد نیاز برای صنعت توریسم را مورد ارزیابی قرار داده است. همچنین نتایج تغییر اقلیم بر توریسم را در مناطقی مانند کشور انگلستان و دریای مدیترانه تشریح کرده است. دفریتاس (۲۰۰۱) بر اهمیت اطلاعات هوا و اقلیم، هم برای توریست‌ها و هم برای صنعت توریسم تاکید کرده است. اسکات و سی بویل (۲۰۰۱) با استفاده از شاخص اقلیم

توریسم میک ژوسکی (TCI) به مطالعه سه شهر انگلیسی و مقایسه آنها پرداخته اند. بیگرم (به نقل از جان،۱۹۸۳) اشاره کرده است که بسیاری از جهانگردان علاقمند به سیاحت مشتاق به مکانهایی هستند که آفتاب گیر باشند. آملونگ و وینر (۲۰۰۴) با استفاده از شاخص‌های تعیین آسایش، اثر تغییر اقلیم در منطقه مدیترانه را بر آسایش توریست‌ها، با توجه به مبدا آنها (عمدتا اروپا)، مشخص نموده اند. مازاراکیس و همکاران (۲۰۰۷) در مقاله ای تحت عنوان «اقلیم توریسم و آسایش حرارتی در دریاچه سان مون تایوان» اقلیم آسایش ماهانه و روزانه تایوان را با اقلیم آسایش اروپای میانه و اروپای غربی مقایسه کرده اند.

ابراهیمی (۱۳۸۳) با استفاده از شاخص اقلیمی برای توریسم، اقلیم آسایش شهرستان سردشت را مطالعه کرده است. عسگری (۱۳۸۱) در کار خود با استفاده از داده های آماری سی ساله دما و رطوبت و تاثیر گذاری توامان آنها بر آسایش و گردشگری به مطالعه گردشگری رامسر پرداخته است. لایقی(۱۳۸۲) ضرایب آسایش ۱۵ ایستگاه در شمال کشور را مورد بررسی قرار داده است. وی با توجه به میانگین ماهانه داده ها و محاسبه نحوه تغییر آنها، بهترین اقلیم را در ماههای گرم و در ماههای سرد از نظر شرایط آسایش بررسی کرده است. محمدیان (۱۳۸۳) در پایان نامه خود تحت عنوان تاثیر اقلیم بر صنعت گردشگری کرمانشاه ضریب آسایش اقلیمی فصول مختلف کرمانشاه را با استفاده از پارامترهای دما و رطوبت محاسبه کرده است.

ایران از لحاظ جاذبه های گردشگری طبیعی در جهان جزء ۱۰ کشور برتر جهان و از لحاظ جاذبه های تاریخی جزء ۵ کشور برتر جهان است. بنابراین پتانسیل بالایی در جذب گردشگر دارد. از طرف دیگر ایران با تنوع اقلیمی که داراست می تواند سلیقه هر فردی را در جهت استفاده از اقلیم های آن ارضاء نماید. در برنامه ریزی هایی که برای گردشگری در مناطق مختلف صورت می گیرد آنچنان که شایسته است به نقش اقلیم پرداخته نمی شود، لذا با توجه به چهارفصل بودن اقلیم کشورمان و دلایل مذکور لزوم یک برنامه ریزی دقیق برای صنعت توریسم کشور مبتنی براقلیم (که شهر تبریز هم از این قائده مستثنی نیست) احساس می شود. چون هر فصل گردشگرهای مخصوص به خود را دارد لذا ما می توانیم با استفاده از پارامترهای اقلیمی همچون دما و رطوبت، مناسب ترین و نامناسب ترین زمان را برای ورود گردشگرها تعیین کرده و متناسب با آن، خدمات و اطلاعات مناسب و به موقع به گردشگران ارائه شود. این خدمات که نسبت به هر فصل متفاوت است در صورت ارائه به موقع می تواند تاثیر چشمگیری در وجهه توریستی شهر داشته باشد. شهر تبریز گذشته از آثار تاریخی، فرهنگی، باستانی و گذشته درخشانی که دارد، دارای اقلیم منحصر به فردی است که چهار فصل متفاوت برایش به ارمغان آورده است. هر کدام از این فصل ها جذابیت ها و پتانسیل های مخصوص به خود را برای جذب گردشگر دارند.

همچنین با عنایت به اینکه در سال ۲۰۱۸ شهر تبریز به عنوان «پایتخت گردشگری جهان اسلام» معرفی شد نتایج این مطالعه می تواند در برنامه ریزی و پذیرایی شایسته از میهمانان داخلی و خارجی مفید واقع شود.

داده ها و روش ها

بسیاری از شهرهای ایران (از جمله شهر تبریز) رشد فضایی و اهمیت یافتن خود را مدیون موقعیت (ممتاز) جغرافیایی خود هستند (رهنمایی، ۱۳۷۱). شهر تبریز به عنوان بزرگترین شهر شمال غرب ایران با وسعتی حدود ۱۳۱ کیلومتر مربع در موقعیت جغرافیایی ´۲۳، °۴۶-´۱۱، °۴۶ طول شرقی و ´۹، °۳۸-´۱، °۳۸ عرض شمالی با ارتفاع متوسط حدود ۱۳۴۰ متر در جلگه‌ای به نام جلگه تبریز واقع شده است.

متغیرهای به کار رفته در این مقاله شامل موارد زیر می باشد:

۱- متغیرهای اقلیمی شامل درجه حرارت هوا به سانتیگراد، رطوبت نسبی به درصد، سرعت باد بر حسب متر بر ثانیه، فشار بخار بر حسب هکتوپاسکال ، میزان ابرناکی آسمان بر حسب اکتای و متوسط دمای تابشی محیط از ایستگاه سینوپتیک تبریز در طول دوره آماری ۱۹۷۰-۲۰۰۵ .

۲- متغیرهای فردی شامل وزن، قد، سن و جنسیت.

۳- متغیرهای دسته سوم شامل نوع پوشش بر حسب کلو و فعالیت بر حسب وات.

۴- متغیرهای محیطی شامل طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع از سطح دریا.

متغیرهای بالا بر حسب روش مورد استفاده، توسط نرم افزار های RAY MAN و EXCEL مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته اند. شاخص‌های PET135، PMV136، ET۱۳۷, SET138 و فشار عصبی از جمله مهمترین شاخص های فیزیولوژی- دما محسوب می‌شوند که علاوه بر مطالعات مربوط به برنامه ریزی شهری و منطقه‌ای به ویژه در تعیین مولفه حرارتی میکروکلیماهای شهری، در مطالعات مربوط به آب و هواشناسی توریسم نیز جهت بررسی محیط های آسایش اقلیمی برای گردشگران کاربرد وسیعی پیدا کرده‌اند. در این تحقیق نیز برای تعیین زمان‌های آسایش اقلیمی از شاخص‌های بالا استفاده شده است.

135 -Physiological Equivalent Temperature

136-Predicted Mean Vote

137 - Effective Temperature

1384- Standard Effective Temperature

مقیاس PMV نوعی تقسیم بندی احساس حرارتی ۷ درجه ای است که دامنه آن از ۳/۵- (سرد) تا ۳/۵+ (گرم) تغییر می کند. صفر در این مقیاس نشانگر احساس حرارتی خنثی است (جدول ۱) و از طریق فرمول زیر قابل محاسبه است :

$$PMV=(0.303\ e^{-0.036M}+0.028)[(M-W)-H-E_C-C_{rec}-E_{rec}]$$

در رابطه فوق مقادیر C_{rec} ,EE_C , E_{rec} , به صورت زیر قابل محاسبه اند:

$$E=3.05\times10^{-3}(526t_{sk}-3373-P_a)+E_{SW}$$

$$[5733-6.99\times(M-W)-P_a]+0.42\ (M-W-Ec=3.05\times10^{-3}$$

58.15)

$$0.0014\ M\ (34-Ta)C_{rec}=$$

$$=1.72\times10^{-3}\ M\ (5867-P_a)\ E_{rec}$$

H مستقیماً قابل اندازه گیری بوده و یا از طریق رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$H=K_{cl}=t_{sk}-t_{cl}/I_{cl}$$

PET از شاخص های معروف دما- فیزیولوژیک است که از معادله بیلان انرژی بدن انسان مشتق شده است. در تعریف این شاخص برای نرخ سوخت و ساز با کار سبک و میزان نارسانایی لباس به ترتیب اعداد ۸۰ وات و ۰/۹کلو۱۳۹ به طور میانگین در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که در این مدل متغییرهای قد، وزن، سن و جنس افراد با توجه به میانگین قد، وزن، سن و جنس افراد آن جامعه تعیین می شود.

جدول۱ : مقادیر آستانه شاخص های PET و PMV در درجات مختلف حساسیت انسان

درجه تنش فیزیولوژی	حسایت حرارتی	PET(C^0)	PMV
تنش سرمای بسیار شدید	خیلی سرد	۱	-۴/۵
تنش سرمای شدید	سرد	۴	-۳/۵
تنش سرمای متوسط	خنک	۸	-۲/۵
تنش سرمای اندک	کمی خنک	۱۳	-۱/۵
بدون تنش سرما	راحت	۱۸	-۰/۵
تنش گرمای اندک	کمی گرم	۲۳	۰/۵
تنش گرمای متوسط	گرم	۲۹	۱/۵
تنش گرمای شدید	خیلی گرم	۳۵	۲/۵

139- واحد نارسانایی لباس را کلو گویند.که یک کلو معادل ۰/۱۵۵وات بر درجه سانتی گراد در متر مربع است.

تنش گرمای بسیار شدید	داغ	۴۱	۳/۵

شاخص ET از طریق رابطه زیر محاسبه می شود. برای تعیین ضریب آسایش از طریق این فرمول از جدول ۲ استفاده می شود.

$$ET= T- 0.6(T - 10)(1- \frac{RH}{100})$$

در رابطه فوق T بر حسب درجه سیلسیوس و RH رطوبت نسبی بر حسب درصد می باشد.

جدول ۲ : جدول ضریب آسایش شاخص ET و SET

ضریب آسایش	ضریب SET و ET به سلسیوس
فوق العاده گرم	بیشتر از ۳۰
شرجی	۲۷/۵ تا ۳۰
خیلی گرم	۲۵/۶ تا ۲۷/۵
گرم	۲۲/۲ تا ۲۵/۶
آسایش	۱۷/۸ تا ۲۲/۲
خنک	۱۵/۵ تا ۱۷/۸
خیلی خنک	۱/۶۷ تا ۱۵/۵
سرد	۱۰- تا ۱/۶۷
خیلی سرد	۲۰- تا ۱۰-
فوق العاده سرد	کمتر از ۲۰-

شاخص SET نوع پیشرفته شاخص دمای موثر یا ET است و در محاسبه آن از پارامترهایی استفاده می شود که برای محاسبه شاخص های PET وPMV از آنها استفاده شد ولی مقادیر آستانه شاخص از طریق جدول ۲ که جدول مشترک بین شاخص ET وSET است محاسبه می شود که برای محاسبه دقیق تر آن از نرم افزار RAY MAN استفاده می کنیم. مهمترین نکته در شاخص فشار عصبی این است که نتایج محاسبات در دو اقلیم گرم و سرد به ترتیبی است که برای اقالیم سردسیر شاخص فشار عصبی برای ماه‌های با دماهای متوسط ماهانه کمتر از ۲۰ درجه سانتی گراد محاسبه می شود. برای اقلیم‌های گرمسیری نیز شاخص برای ماه‌های با دماهای متوسط ماهانه بیشتر از ۲۰ درجه سانتی گراد محاسبه می گردد.

هدف شاخص فشار عصبی برای دماهای بیش از ۲۰ درجه سانتی گراد تشریح سطح آسایش با استفاده از دما، رطوبت و باد است. شاخص به صورت زیر بیان می شود:

$$CI= I - dI$$

که CI شاخص عددی آسایش،I شاخص دمای موثر و رطوبت با فرض شرایط آرام هوا و dI شاخص دیگری است که اثر سرمایش اضافی ناشی از حرکت هوا را اضافه می کند که به صورت زیر محاسبه می شوند:

$$I=(0.5+U^{2}\times10^{-4})\times(T-80+0.11U)$$

$$dI =-0.35v^{0.5}\ (20+0.5U-0.2T)$$

که T دما بر حسب فارنهایت و U رطوبت نسبی بر حسب درصد و V نسبت باد بر حسب مایل بر حسب ساعت است.جدول شماره ۳ درجه بندی ضریب های آسایش مربوط به آب و هواهای گرم را بیان کرده است.

در شاخص فشار عصبی برای دماهای کمتر از ۲۰ درجه سانتی گراد برای اقلیم های سرد و خنک به ترکیب وضعیت‌های باد و دما توجه شده است، بدون اینکه عامل رطوبت وارد شود. علاوه بر این، بر قدرت خنک کنندگی شرایط جوی محیط اطراف تأکید شده است.

جدول ۳ : درجه بندی ضریب های آسایش مربوط به آب و هواهای گرم

CI ضریب آسایش	آهنگ گرمایش
کمتر از ۵-	خنک با شرایط عدم آسایش
کمتر از ۵- تا ۱-	خنک
۰	آسایش
بین ۱ تا ۵	گرم با شرایط آسایش
بین ۶ تا ۱۰	گرم با شرایط عدم آسایش
بین ۱۱ تا ۱۵	شرایط عدم آسایش زیاد
بیشتر از ۱۵	کاملاً شرایط عدم آسایش

در هر یک از این فرمول ها:

H= شاخص دمای موثر و سرعت باد برای دماهای کمتر از ۲۰ درجه سانتی گراد،

T= دمای هوا بر حسب درجه سانتی گراد،

V= سرعت باد بر حسب متر بر ثانیه است.

در جدول شماره ۴ ضرایب احساس آسایش حاصل از این دماهای سرد آمده است.

به منظور بررسی وجود رابطه معنی دار بین تعداد توریست ها و دمای میانگین روزانه و رطوبت نسبی هوا از رگرسیون خطی و ضریب همبستگی استفاده می شود(محمدی،۱۳۸۵).

جدول ۴ : درجه بندی ضرایب آسایش مربوط به آب و هواهای سرد

ضریب آسایش H	آهنگ گرمایش
۳۹۶ – ۵۴۰	خنک
۵۴۱ – ۷۹۰	خیلی خنک
۷۹۱ – ۹۹۹	سرد
۱۰۰۰ - ۱۱۹۹	خیلی سرد
۱۲۰۰ – ۱۴۳۹	سرمای گزنده
۱۴۴۰ و بیشتر	سطح پوست به سرعت یخ می زند.

یافته های تحقیق

بعد از انجام محاسبات شاخص های مختلف برای شهر تبریز نتایج زیر به دست آمد:

در مجموع از تحلیل شاخص PMV این نتایج به دست می آید که از لحاظ ضریب آسایش ماه های تیر و مرداد بالاترین ضریب آسایش را جهت ورود توریست دارا می باشند. تحلیل شاخص PET نیز نتایج مشابه ای را نشان می دهد. این شاخص نیز به ماه های تیر و مرداد بالاترین ضریب آسایش را می دهد. بررسی دو شاخص SET و ET نیز همین نتیجه را نشان می دهد. تعداد کل توریست های وارد شده در این دو ماه با ۲۶/۶ درصد که مقداری بیش از یک چهارم کل توریست سالانه را تشکیل می دهد، موید این مطلب است.

شاخص‌های PMV، PET، SET و ET در مجموع ماه‌های تیر و مرداد را به عنوان ماه‌های آسایش، ماه‌های خرداد و شهریور را به عنوان ماه‌های نیمه آسایش، ماه‌های فروردین، اردیبهشت و مهر را به عنوان ماه‌هایی با ضریب آسایش کم و ماه های آبان، آذر، دی، بهمن و اسفند را به عنوان نامناسب‌ترین ماه‌ها جهت ورود توریست به تبریز نشان دادند (جدول ۵).

جدول ۵ : ضرایب راحتی برای ماه های مختلف بر اساس شاخص های مختلف

شاخص / ماه	PMV	PET	SET	ET	فشار عصبی	
					(CI)	(H)
فروردین	سرد	سرد	خیلی خنک	خیلی خنک	-	خیلی خنک
اردیبهشت	خنک	خنک	خیلی خنک	خیلی خنک	-	خنک
خرداد	کمی خنک	کمی خنک	خیلی خنک	خنک	کاملاًشرایط عدم آسایش	-

تیر	آسایش	آسایش	آسایش	آسایش	کاملاًشرایط عدم آسایش	-
مرداد	آسایش	آسایش	آسایش	آسایش	کاملاًشرایط عدم آسایش	-
شهریور	کمی خنک	کمی خنک	خیلی خنک	خنک	شرایط عدم آسایش زیاد	-
مهر	سرد	سرد	خیلی خنک	خیلی خنک	-	خنک
آبان	خیلی سرد	خیلی سرد	سرد	خیلی خنک	-	خیلی خنک
آذر	خیلی سرد	خیلی سرد	خیلی سرد	خیلی خنک	-	خیلی خنک
دی	خیلی سرد	خیلی سرد	خیلی سرد	سرد	-	سرد
بهمن	خیلی سرد	خیلی سرد	خیلی سرد	خیلی خنک	-	خیلی خنک
اسفند	خیلی سرد	خیلی سرد	سرد	خیلی خنک	-	خیلی خنک

شاخص فشار عصبی برای این منطقه کارآیی لازم را ندارد. با توجه به آمار ورود گردشگران به شهر تبریز می توان چنین نتیجه گرفت که شاخص فوق در این منطقه کارآیی لازم را ندارد. چنانکه دو ماه از چهار ماه اشاره شده (خرداد، تیر، مرداد و شهریور) در شاخصهای قبلی جزء ماه‌های آسایش و دو ماه دیگر جزء ماه‌های نیمه آسایش هستند. همچنین با توجه به آمار ورود گردشگران حدود ۵۱ درصد کل گردشگران در این ماه‌ها وارد تبریز می‌شوند که این امر گویای مناسب نبودن این شاخص برای این منطقه می باشد.

جدول ۶ : متغیرهای شاخص فشار عصبی برای دماهای بالای ۲۰ درجه سانتیگراد (CI) و متغیرهای آن

ماه	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
دما (فارنهایت)	۷۱.۳۱	۷۸.۱۵	۷۸.۰۷	۶۹.۷۲
رطوبت نسبی(٪)	۴۱	۳۳.۷	۳۳.۸	۳۳.۷
باد (مایل بر ساعت)	۶.۶۱	۸.۱۷	۷.۷۴	۵.۷۴
عدد به دست آمده CI	۲۰.۸۱	۲۲.۳۱	۲۱.۸۱	۱۵
آهنگ گرمایش	کاملاًشرایط عدم آسایش	کاملاًشرایط عدم آسایش	کاملاًشرایط عدم آسایش	شرایط عدم آسایش زیاد

همچنین به منظور بررسی وجود یا عدم وجود یک رابطه معنی دار بین پارامترهای دما و رطوبت نسبی با تعداد توریست ها در هر ماه ما از رابطه رگرسیونی برای آنها استفاده شد که این رابطه نشان دهنده وجود رابطه مشخصی بین این دو پارامتر با تعداد توریست ها می باشد. به این صورت که با افزایش رطوبت نسبی تعداد توریست ها کمتر می شود و با افزایش

دما تعداد توریست ها بیشتر می شود (نمودار های ۲ و۳). تعداد توریست ها با افزایش درجه حرارت رابطه مستقیم و با افزایش رطوبت نسبی رابطه معکوس دارد که در سطح ۰/۱ معنادار است (منصورفر، ۱۳۸۵).

نتیجه گیری

نتایج حاصل از بررسی اقلیم آسایش شهر تبریز و ارتباط آن با گردشگری در این شهر نشان می دهد که چهار شاخص PMV، PET، SET و ET در نتایج به دست آمده باهمدیگر همخوانی بسیار زیادی دارند. به طوریکه هر چهار شاخص مذکور ماه های تیر و مرداد را به عنوان بهترین ماه جهت ورود گردشگر از منظر اقلیم آسایش معرفی کرده اند. همچنین ماه های فروردین و اردیبهشت نیز پس از ماه های مذکور در رده های بعدی قرار دارند. نتیجه دیگر این تحقیق نشان می دهد که شاخص فشار عصبی در تحلیل اقلیم آسایش شهر تبریز، ناکارامد است و نمی توان به نتایج حاصل از این شاخص اعتماد کرد. چرا که بر طبق نتایج حاصل از اعمال این شاخص(فشار عصبی)، ۴ ماه خرداد، تیر، مرداد و شهریور جزء نامناسب ترین ماه های ورود گردشگر به شمار می روند در حالی که آمار ورود گردشگران به تبریز نشان دهنده این واقعیت است که بیش از ۵۰ درصد گردشگران در این ۴ ماه وارد تبریز شده اند. شایان ذکر است نتایج حاصل از روابط همبستگی بین عناصر اقلیمی دما و رطوبت نشان می دهد که تعداد توریست ها با افزایش درجه حرارت رابطه مستقیم و با افزایش رطوبت نسبی رابطه معکوس دارد که در سطح ۰/۱ معنادار است.

منابع

۱. ابراهیمی، ناصر، ۱۳۸۳، ارزیابی اقلیم برای توریسم در شهرستان سردشت، پایان نامه کارشناسی ارشد اقلیم شناسی، دانشگاه تهران، دانشکده جغرافیا.
۲. بوچانی، محمد حسین، ۱۳۸۳، گردشگری برنامه ای برای توسعه شهری بندر کیاشهر، مجله شهرداریها، شماره ۶۷، سال ششم، ۵۱-۴۵ .
۳. خالدی،شهریار(۱۳۷۴)؛آب و هواشناسی کاربردی، تهران ،نشر قومس
۴. ذوالفقاری،حسن،ارزیابی تأثیر آب و هوا بر صنعت توریسم،مجله رشد آموزش جغرافیا،شماره۵۳،۱۳۷۸.
۵. رهنمایی، محمد تقی، ۱۳۷۱، جایگاه توریسم در طرح های ملی و منطقه ای، مجله ایران زمین، شماره ۳، تهران، وزارت فرهنگ و ارشاد اسلامی.
۶. سازمان میراث فرهنگی و گردشگری تبریز، آمار ورود توریست در سال های ۱۹۸۶-۱۹۸۲.

۷. عسگری، الف، ۱۳۸۱، گردشگری و جنبه های دمایی و رطوبتی اقلیم در رامسر، سازمان هواشناسی کشور.
۸. لایقی، ب، ۱۳۸۲، بررسی نحوه ی تاثیر عناصر اقلیمی بر صنعت گردشگری در استان گیلان، هواشناسی رشت.
۹. محمدی، حسین، ۱۳۸۵، آب و هواشناسی کاربردی، انتشارات دانشگاه تهران، ۱۹۰-۱۶۱.
۱۰. محمدیان، نوشین، ۱۳۸۳، تاثیر اقلیم بر صنعت گردشگری شهرستان کرمانشاه، پایان نامه کارشناسی ارشد اقلیم شناسی، دانشگاه تهران، دانشگده جغرافیا.
۱۱. منصورفر، کریم، ۱۳۸۵، روش های آماری، انتشارات دانشگاه تهران، ۳۳۴.
- Amelung, B & Viner, D, (2003), Scorchio tourism comfort in the Mediterranean, www.icis.unimass.nl/worlshop.
- Defreitas, C,R & Matzarakis, A (2001), Summary report of a workshop held at Porto Carras, Neos Marmaras, Halkid, Greece, 5-10.
- Matzarakis, A, (1999), Example of climate an tourism research for tourism demand University of Freiburg, Germany.
- Andreas Matzarakis & Frank Rutz & Helmut Mayer, (2007), Modelling radiation fluxes in simple and complex environments—application of the RayMan model Int J Biometeorol 51:323–334.
- Matzarakis, A, (2001), climate and biclimate information for tourism in Greece, First international workshop on climate tourism and recreation, Halkidi, Greece.
- Mieczkoski, Z, (1985), The tourism climate index, A method of evaluating world climate for tourist, the Canadian geographer, 220.
- Perry, A,H (1997), Recreation and tourism, applied climatology, principles and practice, Routledge, London, 240-248.
- Scott, D, & McBoyle, G, (2001), Using a tourism climate index to examine the implication of climate change for climate as a tourism resource.proceeding of international society of biometeorology, commission 5, 5-10 October, Halkidi, Greece, 69-68.

A Study On the climatic Comfort indices outputs in Tabriz city

Atefeh Hoseini Sadr[1]*, Gholam Hasan Mohammadi[2]

Department of Geography, Payame Noor University (PNU), PO BOX 19395-3697 Tehran, I. R. of Iran.
2- Ph.D. in Climatology, Iranian Meteorological Organization (IRIMO), East Azerbaijan Province Central Bureau of Meteorology, Tabriz, Iran (Gh-Mohammadi@irimo.ir)
* Corresponding author: Sadr88@pnu.ac.ir

Abstract

Using biological indicators of climatic comfort or Bioclimatic in geographical areas can help the planner of tourism attractions. In this study, five climatic comfort indices have been used to study Tabriz comfort climate. These indices are included: PMV, PET, SET, ET, and stress index. To determine relationship between climatic factors and the number of tourists, the correlation coefficient is used. For calculation the above parameters the following variables are used: temperature, rate of moisture, wind speed, vapor pressure and sky cloudiness since 1970 to 2020. Second type of variabales are personal variables (including weight, height, age and sexuality). Also third group variables such as, cloth cover and activity rate, longitude and latitude; And, finally the data of Tabriz city tourists numbers since 1392 to 1400. To analyze of these variables, RAY MAN and excel software have been used. above indexes showed that TIR and MORDAD month are comfort for tourists and KHORDAD and SHAHRIVAR are semi comfort. Stress index is not suitable for this city. Tabriz numbers of tourists are significantly related to temperature monthly fluctuations but are inversely related to relative humidity changes at 0.01 significant level.

Keywords: Climatic comfort, meteorological parameters, RAYMAN, Tabriz City.

تحلیل سینوپتیک یخبندان استان اردبیل

بهروز صراف[۱] و کاظم رجبی[۲]

۱- استاد اقلیم شناسی دانشگاه تبریز behroz_saraf2002@yahoo.com

۲- دانشجوری دکترایاقیلم شناسی دانشگاه تبریز rajabikazem3@gmail.com

چکیده

برای، مشخص نمودن نواحی مستعد به یخبندان در استان اردبیل به روش سینوپتیکی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. در این پژوهش با دریافت آمار ۱۰ ساله حداقل و میانگین دمای روزانه از سازمان هواشناسی استان و به منظور تجزیه و تحلیل سینوپتیکی پرفشارهای مهاجر، نقشه‌های همدیدی هوا(سطح زمین و ۵۰۰ هکتوپاسکال) از سایت اینترنتی نوا اخذ گردید.

از آنجا که استان اردبیل یکی از قطب‌های مهم کشاورزی ایران محسوب می‌شود، توجه به اثرات عناصر و عوامل اقلیمی از جمله یخبندان بر روی فعالیت‌های کشاورزی از اهمیت بالایی برخوردار است .

در این پژوهش مشخص گردید وقوع یخبندان‌های فرارفتی با جابجایی پرفشارهای مهاجر در ارتباط است. به علاوه مشخص شد نواحی مرکزی(اردبیل) و جنوبی استان(خلخال) نسبت به سایر نواحی آن از نظر وقوع یخبندان متوسط و شدید از پتانسیل بالاتری برخودار است.

واژه‌های کلیدی: یخبندان، سینوپتیک، پرفشار، استان اردبیل

مقدمه

انسان جهت ادامه زندگی سه اصل اساسی را باید در نظر بگیرد؛ غذا، پوشاک، مسکن، و مصرف هر یک از این موارد به شرایط آب و هوایی بستگی دارد. زندگی بشر از بدو تشکیل تاکنون همواره با بلایای طبیعی و جوی نظیر آتشفشان، سیل، زلزله، رانش زمین تسونامی، هاریکون بادهای توفنده، رعد و برق تگرگ، خشکسالی یخبندان و..... مواجه بوده است.

مطالعه ودیده ی یخبندان‌های بهاره و پاییزه در کشاورزی بیش از سایر عوامل مورد توجه بوده است.(بتن کورت-۱۹۶۸) و هر سال خسارت فراوانی بر محصولات کشاورزی وارد می‌کند (علیجانی ۱۳۷۶) یخبندان‌های بهاره معلول عواملی چون فرودهای غربی و پرفشارهای مهاجر هستندـ این دو با هم روابط متقابل دارند و بررسی یکی از آنها بدون توجه به عامل

دیگری و حتی بررسی تمامی عوامل به صورت مستقل و بدون توجه با روابط حاکم میان آنها هرگز راهگشا نخواهد بود. در این میان از اجزای مهم سیستم‌های ایجاد کننده یخبندان ایران «پرفشارهای مهاجر» هستند که به صورت مرکز یا زبانه‌های هوای سرد عموماً از شمال شرق یا شمال غرب به ایران وارد می‌شوند (تحقیقات جغرافیایی علیجانی و براتی ۱۳۷۸)کاجفز(۱۹۸۹) تاریخ وقوع یخبندان‌های زودرس پاییزه در ۹ مکان در منطقه کورنجسکا در اسلوونی در طول سال‌های ۱۹۴۷ تا سال ۱۹۸۷ مورد مطالعه قرار داده است.

در سال ۱۹۹۸ میلادی اس ام وایت ساید یخبندان‌ها را به دو نوع فرارفتی و تابشی تقسیم کرد و متذکر می‌شود نوع یخبندان فرا رفتی برای محصولات زراعی خسارت بار از سایر انواع یخبندان‌هاست.
پری(۲۰۰۲) به اثر یخبندان در کاهش محصولات باغی پرداخته و ضمن تفکیک یخبندان تابشی و فرارفتی خسارت ناشی از سرما را در محصولات باغی را بیان می‌کند و و در ضمن به معرفی روش‌های مقابله با سرمازدگی محصولات باغی می‌پردازد.
در زمینه مطالعات همدیدی براتی(۱۳۷۵) مطالعه‌ای بر روی الگوهای همدیدی یخبندان‌های بهاره در ایران انجام داده است.
مطابق با نتایج این تحقیق،جابه جا یی سیستم‌های پرفشار از هرض های بالاتر (از سمت سیبری و اروپای مرکزی) برخلاف جهت عقربه‌های ساعت به یخبندان‌های شدید و فراگیر می‌انجامد و برعکس جابجایی از عرض های پایین‌تر،(از سمت دریای مدیترانه) در جهت حرکت عقربه های ساعت به یخبندان های ملایم و نیمه فراگیرمنتهی می‌شود.
قطره سامانی(۱۳۷۹) با تعیین احتمال شروع یخبندان در شهر کرد به مطالعه اثر تنش سرما در منطقه سامان پرداخته است. پوشر(۱۹۹۴) بر این باور است که دماهای سطح زمین اگرچه مستقیماً به دماهای سطح ۷۰۰ هکتوپاسکال مربوط نمی‌شود ولی با همدیگر همبستگی شدیدی دارند وی در ادامه می‌گوید؛ «در زیر قسمت غربی فرود هوا به طرف جنوب شرقی حرکت می کند. این قسمت در سطح زمین روی اقیانوس‌ها و ساحل غربی خشکی‌ها با توده‌های هوای اقیانوس قطبی ولی در داخل قاره‌ها با توده‌های هوای سرد و احتمالاً شمالگان مشخص می‌شود.

داده‌های تحقیق

در این پژوهش با توجه به اهداف تحقیق مراحل ذیل به عنوان داده های تحقیق به شرح زیر مشخص گردید:
آمار حداقل دمای روزانه و میانگین روزانه دما
وقوع یخبندان ها در طی دوره آماری مشترک ۱۰ ساله (۲۰۰۴-۱۹۹۵)

نقشه‌های هوا (سطح زمین و ۵۰۰ هکتوپاسکالی)

روش تحقیق

جهت شناخت عوامل هواشناختی موثر بر وقوع یخبندان در نواحی مختلف استان اردبیل اقدام به بررسی و مطالعه موارد زیر گردید:

جمع آوری آمار حداقل و میانگین روزانه دمای ایستگاههای همدیدی استان

استخراج نقشه‌های همدیدی هوا اعم از سطح زمین و ۵۰۰ هکتوپاسکالی از سایت اینترنتی c.d.c۱۴۰

استخراج ۴۰ مورد وقوع یخبندان در طی دوره آماری مشترک ۱۰ ساله (۲۰۰۴-۱۹۹۵)

انتخاب چهار دوره بعنوان طولانی‌ترین دوره یخبندان در ماههای ژانویه، فوریه، مارس و دسامبر.

انتخاب زودرس‌ترین یخبندان در طی دوره آماری مشترک

انتخاب دیررس‌ترین یخبندان در طی دوره آماری مشترک

تحلیل همدیدی الگوهای فشاری که سبب یخبندانهای فرارفتی در نواحی مختلف استان شده‌اند.

آمار روزانه حداقل دما:

پس از اخذ آمار از سازمان هواشناسی و اداره کل هواشناسی استان اردبیل مراحل زیر انجام پذیرفت:

الف) جهت همگن‌سازی داده‌ها از روش ران تست (نرم افزار spss) و همچنین به لحاظ کافی بودن و اطمینان از داده‌ها از روش معکوس استفاده شد.

ب) دمای مبنای شروع روز یخبندان را صفر درجه و یا کمتر در نظر گرفته شد و مطابق آن تاریخهای وقوع یخبندان استخراج گردید.

ج) ملاک کار یخبندانهایی در نظر گرفته شد که اولاً در هر ۴ ایستگاه همدیدی استان یخبندان بصورت مشترک رخ داده بود و ثانیاً یخبندان حداقل چندین روز پشت سر هم و به طور متوالی اتفاق افتاده بود این نوع یخبندان بعنوان فرا رفتی تلقی می‌شوند.

نقشه‌های همدیدی هوا:

پس از استخراج تاریخهای یخبندان جهت تحلیل همدیدی الگوهای فشاری نیاز به نقشه‌های هوا است چرا که منبع اولیه اطلاعات موردنیاز، نقشه‌های هوا می‌باشد. هر نقشه هوا پراکندگی هوای یک منطقه یا ناحیه را در یک لحظه زمانی نشان می‌دهد به طور کلی دو نوع نقشه هوا وجود دارد:

140 -www.cdc.noaa.gov

الف) نقشه سطح زمین که پراکندگی هوای سطح زمین را نشان می‌دهد. در این نقشه ارتفاع ایستگاهها به سطح دریا تبدیل شده است به عبارت دیگر در همه جای نقشه ارتفاع از سطح دریا صفر است: در این نقشه از بین عناصر هوا تنها مقدار فشار هوا به سطح دریا تبدیل می‌شود، اندازه بقیه عناصر، وضعیت هوا را در ارتفاع سطح ایستگاه بیان می‌کند.

ب) نقشه‌های سطوح بالا که ارتفاع یک سطح فشاری معین را در ترازهای بالایی جو نشان میدهد .

در این نقشه ها ارتفاع سطح همفشار در گستره نقشه به وسیله منحنیهای هم ارتفاع نشان داده می‌شود.

نقشه هوای سطوح بالای اتمسفر معمولاً برای سطوح ۸۵۰-۷۰۰-۵۰۰-۳۰۰-۲۰۰-۱۰۰-۵۰-۱۰ هکتوپاسکال تهیه می‌شود.

از بین نقشه‌های سطوح بالا، نقشه 500 Hpa بیش از همه اهمیت دارد (هژبرپور، ۱۳۸۴).

هارمان[141] (2004)علاوه بر استفاده از دوره آماری طولانی‌تر به جای سطح ۷۰۰ هکتوپاسکالی از سطح ۵۰۰ هکتوپاسکالی استفاده کرده است. زیرا در مجموع این سطح (500Hp) بهتر از سطح (700 Hpa) می‌تواند الگوهای جوی بویژه هسته‌های سرعت رود باد جبهه قطبی را نشان دهد (نقل از علیجانی، ۱۳۸۱).

در این تحقیق بیش از ۲۰۰ نقشه هوا اعم از سطح زمین و ۵۰۰ هکتوپاسکال از سایت اینترنتی c.d.c تهیه و سپس به بررسی الگوهای فشاری در زمانهای بروز یخبندان در منطقه پرداخته شده و نحوه گسترش سرما به منطقه مورد تحلیل قرار گرفت.

انتخاب تاریخهای وقوع یخبندان

طول دوره آماری مورد مطالعه از سال ۱۹۹۵ لغایت ۲۰۰۴ میلادی می‌باشد. در گام نخست سعی شد که تاریخهای وقوع یخبندان بصورت ماهانه و به تفکیک سال پردازش و استخراج گردد در گام بعدی تعداد تداوم روزهای یخبندان که بیشترین **روزها**

را به خود اختصاص داده، مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت تاریخهای شروع و خاتمه یخبندان دوره آماری ایستگاههای مورد مطالعه در جدول 1 تهیه و ارایه گردید.

با بررسی‌هائیکه در فصل سوم در مورد مجموع روزهای یخبندان در منطقه انجام گرفته مبین این مهم است که نواحی شمالی استان (پارس آباد و بیله سوار) کمترین روزهای یخبندان و بالعکس مناطق مرکزی و جنوبی استان اردبیل دارای بیشترین تعداد روزهای یخبندان می‌باشد.

141 - Harman

() جدول تاریخ‌های شروع و خاتمه یخبندان درطی دوره آماری ایستگاه همدیدی استان اردبیل

ردیف	شروع یخبندان			خاتمه یخبندان		تعداد روزهای یخبندان برحسب روز
	Year	Month	day	Month	day	
1	1995	11	30	12	4	5
2	1995	12	16	12	25	10
3	1996	1	11	1	26	16
4	1996	1	29	2	4	7
5	1996	2	16	2	18	3
6	1996	2	27	3	4	7
7	1996	3	16	3	18	3
8	1997	1	18	2	15	29
9	1997	2	21	2	23	3
10	1997	3	7	3	17	11
11	1997	12	14	12	22	9
12	1997	12	27	1	17	22
13	1998	2	9	3	7	27
14	1998	12	27	1	8	13
15	1999	1	26	2	7	13
16	1999	11	27	12	6	10
17	2000	1	16	1	26	11
18	2000	1	29	2	5	8
19	2000	2	8	2	10	3
20	2000	2	15	2	17	3
21	2000	3	15	3	18	4
22	2000	12	23	12	25	3
23	2001	1	20	2	1	13
24	2001	2	23	2	25	3
25	2001	12	21	12	23	3
26	2002	1	9	1	15	7
27	2002	1	18	1	28	11
28	2002	2	17	2	21	5
29	2002	12	9	1	5	28
30	2003	1	17	1	30	14

31	2003	2	17	2	19	3
32	2003	3	2	3	4	3
33	2003	12	21	12	28	8
34	2003	12	31	1	4	5
35	2004	1	10	1	12	3
36	2004	1	19	1	21	3
37	2004	2	17	2	20	4
38	2004	4	3	4	7	5
39	2004	12	10	12	14	5
40	2004	12	17	12	30	14

بررسی تمامی موارد یخبندان در این پژوهش مقدور نمی‌باشد لذا ۶ دوره یخبندان بعنوان منتخب یخبندانهای حادث شده، انتخاب (جدول 2) که بشرح زیرموردتفسیر قرار گرفت:

۱ – ژانویه۱۹۹۷با ۲۹ روز یخبندان بعنوان منتخب طولانی‌ترین یخبندان درطول دوره آماری

۲ – فوریه۱۹۹۸با۲۸ روز یخبندان بعنوان منتخب طولانی‌ترین یخبندان در طول دوره آماری

۳ – مارس۱۹۹۷ با۱۰روز یخبندان بعنوان منتخب طولانی‌ترین یخبندان در طول دوره آماری

۴ – دسامبر۲۰۰۲با۲۸روز یخبندان بعنوان منتخب طولانی‌ترین یخبندان در طول دوره آماری

۵ – نوامبر ۱۹۹۹ با ۱۰ روز یخبندان بعنوان زودرس ترین یخبندان در طول دوره آماری

۶ – آوریل ۲۰۰۴ با ۵ روز یخبندان بعنوان دیررس ترین یخبندان در طول دوره آماری

جدول (2) منتخب تاریخ‌های های وقوع یخبندان در طی دوره آماری

ردیف	عنـــــوان	شروع یخبندان			خاتمه یخبندان		مجموع روزهای یخبندان بر حسب روز
		سال	ماه	روز	ماه	روز	
1	منتخب طولانی‌ترین یخبندان در ماه ژانویه	1997	01	18	02	15	29
2	منتخب طولانی‌ترین یخبندان در ماه فوریه	1998	02	9	03	7	27
3	منتخب طولانی‌ترین یخبندان در ماه مارس	1997	03	07	03	17	11
4	منتخب طولانی‌ترین یخبندان در ماه دسامبر	2002	12	9	01	05	28
5	منتخب یخبندان زودرس در ماه نوامبر	1999	11	27	12	06	10
6	منتخب یخبندان دیررس در ماه آوریل	2004	04	03	4	07	5

تحلیل همدیدی طولانی‌ترین دوره یخبندان در ماه ژانویه ۱۹۹۷:

ژانویه ۱۹۹۷ با ۲۹ روز یخبندان بعنوان طولانی‌ترین یخبندان دوره مطالعه انتخاب، سپس نقشه‌های سطح زمین و ۵۰۰ هکتوپاسکالی این دوره تهیه و به تحلیل الگوهای فشـاری پرداخته شد. در نگرش کلی به نقشه‌های هوا، سامانه‌های هوائی که منطقه را تحت تأثیر قرار داده‌اند به چند دسته تقسیم گردیده که عبارتند از:

سیستم هوای پرفشار سرد و سامانه کم فشار (در سطح زمین)

ناوه ژرف و عمیق با منشأ شمالی (سطح ۵۰۰ هکتوپاسکالی)

با بررسی نقشه سطح زمین در روز هفدهم ژانویه (شکل ۱)، یک سامانه کم فشار با فشار مرکزی ۹۹۰ هکتوپاسکالی با منشأ شمالی از روی دریای خزر به سمت شرق کشور در حال گذر بوده و موج هائی از آن، نواحی شمالی کشور را فرا گرفته است. با مطالعه دماهای ثبت شده افزایش نسبی دما در منطقه مشاهده می‌شود که از تأثیر سامانه کم فشار با فشار مرکزی ۹۹۰ هکتوپاسکالی می‌توان به حساب آورد. در همین روز زبانه‌هائی از سیستم پر فشار در حال نزدیک شدن به منطقه می‌باشد که تأثیر خاصی در منطقه ندارد.

در روز هجدهم ژانویه، سامانه کم فشار از ایران خارج شده ولی در عوض یک سلول بسته پرفشار با فشار مرکزی ۱۰۲۵ هکتوپاسکالی که منشأ شمالی داشته منطقه را تحت نفوذ قرار داده و سبب افت نسبی دما گردیده است، بعنوان مثال حداقل دمای شهرستان اردبیل از ۹/۰ – به ۱۸/۰ – درجه سانتیگراد رسیده که نسبت به روز قبل ۹/۰ درجه کاهش داشته است (جدول 3). در طول این دو روز یک ناوه نسبتاً عمیق با منشأ شمالی در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکالی جریانات سطح زمین را همراهی نموده که نتیجه برآیند این سامانه‌ها تداوم و تشدید یخبندان در منطقه بوده است (شکل ۲).

شکل (۱): نقشه های سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال و سطح زمین در روزبیست وهشتم دیماه ۱۳۷۵

شکل(۲): نقشه های سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال و سطح زمین در روز بیست و نهم دی ماه ۱۳۷۵

جدول 3) حداقل دما و میانگین روزانه دمای ایستگاههای همدیدی در نواحی مختلف استان در ژانویه ۱۹۹۷

پارس آباد		مشگین شهر		خلخال		اردبیل		تاریخ
میانگین روزانه دما	حداقل دما	میانگین روزانه دما	حداقل دما	میانگین روزانه دما	حداقل دما	میانگین روزانه دما	حداقل دما	
5.0	0.4	-1.5	-6.0	-9.4	-16.8	-4.4	-9.2	1997.01.18
2.9	-0.8	-1.8	-5.4	-8.7	-17.5	-8.5	-18.0	19
5.2	-2.8	-0.9	-4.6	-9.0	-18.2	-1.8	-5.2	20
7.8	-0.2	-0.9	-4.8	-10.2	-17.8	-7.4	-15.0	21
5.5	0.0	-0.9	-4.6	-8.7	-17.5	-7.2	-15.0	22
5.1	2.4	-3	-4.6	-3.1	-4.8	-1.4	-4.8	23
3.5	-3.0	-2.4	-6.2	-7.5	-16.2	-7.4	-16.0	24
5.2	-2.8	-1.5	-5.0	-7.9	-15.5	-3.0	-7.0	25
5.6	1.8	-2.5	-6.0	-4.5	-11.0	-4.0	-8.0	26
2.5	-1.6	-7.3	-9.8	-5.4	-7.6	-7.1	-8.0	27
0.7	-3.8	-7.8	-9.6	-13.5	-18.5	-12.0	-20.0	28
0.4	-6.8	-6.4	-12.0	-19.6	-31.5	-10.9	-19.8	29
1.2	-4.0	-4.7	-9.4	-10.1	-17.0	-5.5	-11.0	30
0.9	-2.0	-5.3	-8.0	-7.7	-10.2	-6.9	-7.8	31
0.0	-7.6	-7.8	-12.6	-17.0	-26.6	-13.7	-23.6	1997.02.01
5.2	-6.2	-2.8	-7.0	-10.2	-16.8	-4.2	-8.0	2
3.0	1.6	-0.5	-3.7	-11.3	-22.6	-4.8	-10.5	3
3.7	3.4	2.1	-0.2	-7.0	-17.2	0.0	-4.6	4
0.1	-0.2	-2.3	-6.4	-4.3	-9.5	-7.3	-9.4	5
-0.6	-4.6	-8.6	-11.2	-15.0	-20.5	-14.7	-23.2	6
-2.1	-8.0	-7.4	-11.8	-17.4	-27.6	-13.0	-20.0	7
0.1	-4.4	-5.9	-9.8	-12.3	-24.5	-13.4	-21.6	8
0.6	-3.4	-5.0	-9.4	-13.8	-24.2	-11.7	-21.0	9
1.7	-3.8	-6.6	-9.8	-12.8	-23.6	-12.2	-22.0	10
2.5	-4.8	-5.2	-9.4	-11.9	-22.6	-13.8	-24.6	11
3.2	-3.6	-4.8	-9.2	-12.0	-23.5	-12.3	-23.0	12
5.2	-3.0	-3.5	-8.4	-10.7	-20.6	-8.0	-15.6	13
6.4	-3.6	-1.7	-4.4	-9.1	-18.2	-4.2	-10.6	14
10.5	1.4	1.1	-3.8	-7.8	-17.0	-4.6	-11.0	1997.02.15

در روز بیست و یکم علی رغم نبود سیستم پرفشار در سطح زمین، آرایش توپوگرافی سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال هوای سرد شمال و غرب را به منطقه سرازیر نموده است که سبب تداوم یخبندان ملایم و متوسط گردیده است.

شکل 3 نقشه سطح زمین در روز بیست و هفتم را نشان می‌دهد که بیانگر وجود دو سامانه است. یکی به صورت یک سامانه کم فشار بر روی دریای خزر فعال بوده و دیگری سیستم پرفشار که بر روی اروپا مستقر بوده و موجهائی را بسوی ایران گسیل داشته است.

فردای همان روز مناطق شمال غرب کشور شاهد جایگزینی سیستم پرفشار به جای سامانه کم فشار است به طوریکه در روز بیست و نهم سطح زمین کاملاً تحت استیلای پرفشار بوده و این در حالی است که زبانه‌های کم فشار از سوی دریای خزر در حال نزدیک شدن به ایران می‌باشد. اما فعلاً منطقه تحت تأثیر پرفشار می‌باشد، در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکالی نیز ناوه عمیقی که بر روی دریای خزر مستقر بوده جریانات سطح زمین را همراهی نموده و سبب کاهش دما و یخبندان شدید گردیده است به نحوی که ثبت دمای ۳۱/۵- درجه سانتیگراد در شهرستان خلخال گواه این ادعا می‌باشد (شکل ۴).

با مطالعه نقشه‌های همدیدی، در برخی موارد حرکت کند و بطئی و در بعضی مواقع حرکت سریع سامانه‌های پرفشار و کم فشار در سطح زمین بوضوح قابل رویت می‌باشد.

با بررسی شکل ۵ مشاهده می‌شود که در روز ششم فوریه توده هوای پر فشار سرد با مرکز فشاری ۱۰۳۵ هکتوپاسکال در روی غرب و بخشی از دریای خزر ریزش نموده که با استقرار ناوه کم ارتفاع ناپایدار نسبتاً قوی‌تر از ۵۰۰ هکتوپاسکالی در منطقه همراهی داشته که در نهایت تداوم و تشدید یخبندان در منطقه را حادث گردیده است.

تحلیل همدیدی طولانی‌ترین دوره یخبندان در ماه فوریه ۱۹۹۸:

فوریه ۱۹۹۸ با ۲۷ روز یخبندان بعنوان طولانی‌ترین یخبندان دوره آماری انتخاب شد، با نگرش کلی به نقشه‌های همدیدی می‌توان الگوهای فشاری و توده‌های هوائی که منطقه را تحت نفوذ قرار داده‌اند به سه دسته اصلی کم فشار، پرفشار، تراف کم ارتفاع تقسیم‌بندی گردیده و به تحلیل آنها پرداخته شده است.

در روز هشتم فوریه نقشه سطح زمین بیانگر وجود دو سامانه می‌باشد (شکل ۶-۴) به طوریکه زبانه‌هایی از سیستم کم فشار که در حال گذر از منطقه بوده نواحی شمالغرب کشور را فرا گرفته است ولی امواجی که از یک سیستم پرفشار با منشأ سرد شمالی در حال نزدیک شدن به منطقه است که بررسی حداقل دماهای ثبت شده در ایستگاههای نواحی مختلف استان همچنان مؤید وجود یخبندان از نوع ملایم در منطقه است.

روند یخبندان ادامه دارد تا اینکه در روز دهم و یازدهم فوریه، منطقه کاملاً تحت استیلای سیستم پرفشار با فشار مرکزی ۱۰۳۰ هکتوپاسکال قرار داشته که منجر به افت شدید دما گردیده به طوریکه ایستگاه اردبیل در مقایسه با روز قبل ۱۵/۰

درجه سانتیگراد کاهش نشان داده و با حداقل دمای ۲۵/۰- درجه سانتیگراد سردترین نقطه استان را به خود اختصاص داده است (جدول ۴).

جدول5) حداقل دما و میانگین روزانه دمای ایستگاههای همدیدی در نواحی مختلف استان در نوامبر ۱۹۹۹

پارس آباد		مشگین شهر		خلخال		اردبیل		تاریخ
میانگین روزانه دما	حداقل دما	میانگین روزانه دما	حداقل دما	میانگین روزانه دما	حداقل دما	میانگین روزانه دما	حداقل دما	
3.8	0.0	-6.0	-10.0	-3.4	-4.8	-3.4	-4.0	1999.11.27
4.0	-1.6	-7.4	-12.0	-5.1	-8.2	-11.3	-19.0	28
4.5	-0.6	-4.5	-7.6	-9.6	-18.2	-10.8	-18.6	29
4.1	1.4	-5.7	-8.0	-8.8	-16.6	-7.8	-14.6	30
4.0	-0.4	-4.1	-10.0	-2.2	-5.6	-7.6	-11.8	1999.12.01
3.5	-2.2	-0.1	-5.4	-7.3	-14.6	-2.1	-7.2	2
5.7	-1.8	1.6	-4.8	-0.5	-4.6	0.7	-5.4	3
5.8	-1.8	4.2	1.0	-4.3	-13.0	2.5	-2.0	4
5.1	-1.4	0.3	-4.4	-4.1	-11.0	-0.8	-6.6	5
5.7	-1.4	3.0	-3.8	-4.7	-13.0	3.7	0.0	1999.12.06

تحلیل همدیدی آوریل ۲۰۰۴ بعنوان دیررس ترین یخبندان دوره آماری مورد مطالعه:

شکل(7) آرایش توپوگرافی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکالی را در روز چهارم آوریل را نشان می‌دهد که حاکی از استقرار یک ناوه کم ارتفاع قوی با ارتفاع مرکزی ۵۲۰ دکامتر در شمال دریای خزر بوده و موج‌هایی از سرما را به سوی ایران هدایت می‌نماید که این سامانه، با یک سلول بسته پرفشار شمالی که فعلاً بر روی دریای سیاه بوده و زبانه‌های آن به مناطق شمالی کشور رسیده، همراهی دارد. به عبارتی منطقه کم و بیش تحت فعالیت سامانه‌های کم فشار و پرفشار می‌باشد. فردای همانروز سیستم پرفشار ضمن حرکت شرق سوی خود تقویت نیز شده به طوریکه بر روی دریای خزر استقرار یافته و با شارشهای سطح ۵۰۰ هکتوپاسکالی، همخوانی دارد.

بررسی نقشه سطح زمین روز ششم آوریل (شکل8) نشان دهنده اوج فعالیت این سیستم است که افت نسبی دما، تداوم و تشدید یخبندان را به همراه داشته است. جدول ۹ نوسانات دمایی را نشان می‌دهد

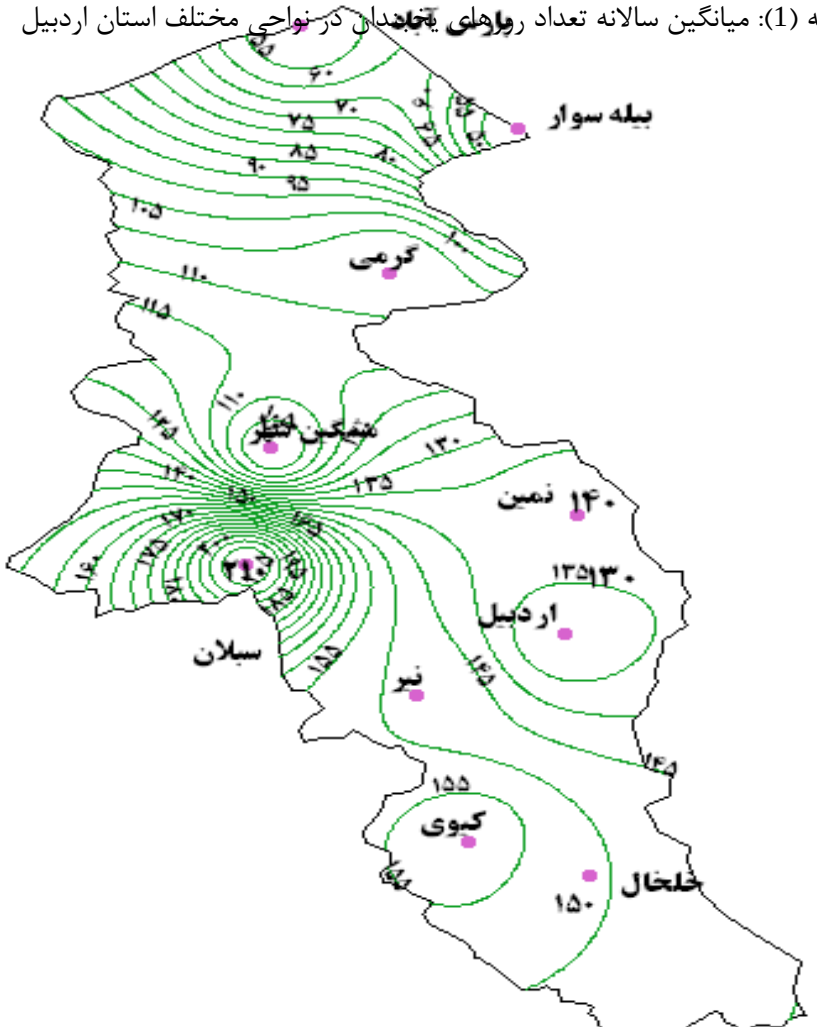
جدول 7) حداقل دما و میانگین روزانه دمای ایستگاههای همدیدی در نواحی مختلف استان در آوریل ۲۰۰۴

پارس آباد		مشگین شهر		خلخال		اردبیل		تاریخ
میانگین روزانه دما	حداقل دما	میانگین روزانه دما	حداقل دما	میانگین روزانه دما	حداقل دما	میانگین روزانه دما	حداقل دما	
8.5	3.0	1.0	-2.4	10.6	6.0	2.8	-4.0	2004.04.03
1.8	0.2	-6.2	-8.0	3.2	-4.2	-4.3	-5.6	4

5	-9.0	-5.6	-7.6	-4.4	-12.0	-7.0	-3.4	2.1
6	-12.6	-3.8	-11.2	-2.4	-9.0	-2.2	-1.8	6.2
2004.04.07	-5.4	2.8	-5.4	2.8	-1.0	5.0	-0.8	8.8

نقشه (1) میانگین سالانه تعداد روزهای یخبندان و نقشه (2) میانگین سالانه تعداد روزهای یخبندان در رابطه با ارتفاع در نواحی مختلف استان اردبیل را به تفکیک ایستگاههای همدیدی در طی دوره آماری مشترک ۱۰ ساله نشان می‌دهد. طبق نقشه های مذکور با افزایش ارتفاع تعداد روزهای یخبندان نیز افزایش می یابد. به طوری که در نواحی مرکزی و جنوبی استان به علت افزایش ارتفاع، تعداد روزهای یخبندان افزایش یافته ولی در نواحی شمالی استان با کاهش ارتفاع، از تعداد روزهای یخبندان نیز کاسته شده است.

نقشه (1): میانگین سالانه تعداد روزهای یخبندان در نواحی مختلف استان اردبیل



نقشه(۲): میانگین سالانه تعدادروزهای یخبندان دررابطه باارتفاع درنواحی مختلف استان اردبیل

نتیجه گیری

استان اردبیل یکی از مهم‌ترین قطب‌های کشاورزی و دامپروری به حساب می‌آید و درآمد اغلب مردم از طریق فعالیت‌های کشاورزی تامین می‌گردد. بنابراین توجه به عوامل اقلیمی و عناصر آن بر روی فعالیت کشاورزی از اهمیت ویژه برخوردار است. به همین علت شناسایی برنامه‌ریزی در منطقه بر روی مسائل کشاورزی معطوف گردد. عوامل و عناصر محدود کننده ضروری به نظر می‌رسد- از جمله پدیده یخبندان و سرما این بین فعالیت‌های کشاورزی عناصر اقلیمی و جوی هستند که در خسارات و زیان‌های فراوانی به محصولات کشاورزی وارد می‌نماید.

سیستم‌های پرفشاری که سطح منطقه را تحت تاثیر خود قرار داده‌اند عبارتند از سیستم‌های پرفشار سرد با منشا شمالی سرد اروپایی (کانادا و گروئنلند) وسیبری (سازمان هواشناسی)

در بعضی موارد پرفشار سیبری با فشار مرکز ۱۰۴۰ تا ۱۰۵۰ هکتوپاسکال نیز تشکیل یافته که نشانه قوی بودن آن است- همچنین در طول دوره آمار مورد مطالعه نفوذ توده هوای پرفشار سیبری به سوی ایران و منطقه نسبت به سایر سامانه ها کمتر بوده است.

از طریق تجزیه و تحلیل نقشه‌های ۵۰۰ هکتو پاسکالی مشخص می‌گردد، که غالباً وجود ناوه های ژرف در منطقه لازم است تا با شارش های خود هوای سرد را به طرف پایین، از عرض های شمالی سرازیر نماید و موجب تداوم تشدید یخبندان گردد.

در بعضی موارد مشاهده گردیده که سطح زمین در منطقه COL(سازمان هواشناسی ۱۳۸۳) واقع شده اما همچنان سرما و یخبندان در منطقه تسلط داشته است که این امر به علت فعالیت ناوه ژرف در تراز ۵۰۰ هکتتوپاسکالی است که موجب ناپایداری و هدایت موج‌های سرما به منطقه گردیده است.

thy Synoptic Analysis of thy frost in Ardebil province

استاد اقلیم شناسی دانشگاه تبریز 1-behroz_saraf2002@yahoo.com

دانشجوری دکترایاقیلم شناسی دانشگاه تبریز 2-rajabikazem3@gmail.com

Abstract

snoptic methodhas been analyzed to indentify areas of frost in Ardebil provinc. In this study, with the minimum and average daily temperature from the province's meteorological organization and thy analysis of thy synoptic of thy immigrant pressures,air synoptice maps (land level and ۵۰۰hectopaskal) were obtained from the NOAA website. Since Ardebil province is one of the most important agricultural hubs,of lran, attention is important to the effects of climate elements and factors such as frost on agricultural

activities. In this study, it was identified that the occurrence of advocated frosts is in connection with the diplacement of immigrtory pressures. In addition, it was identifief to be central (Ardebil) and southern regions of the province (Khalkhal) had higher potential than other areas in terms of medium and severe frost.

Keywords; frost, synoptic, high -pressure, Ardebil province

منـابع و مأخذ :

۱- آقازاده، بهروز، (۱۳۸۳)، معرفی ارقام سیب‌زمینی (اولین جشنواره و همایش ملی سیب‌زمینی)، انتشارات مدیریت ترویج ومشارکت مردمی سازمان‌جهادکشاورزی‌استان اردبیل

۲- اچ، پی، بیوکما، دی. ای وان، درزاگ، (۱۳۸۳)، زراعت سیب‌زمینی، ترجمه‌ی عبدالحمید رضایی و افشین سلطانی، انتشارات جهاد دانشگاهی، مشهد.

۳- استانداری اردبیل، گزارش بررسی وضعیت اجتماعی، اقتصادی، فرهنگی استان ۱۳۷۵.

۴- آ.استین . گودار، (۱۳۵۸)، آب و هواشناسی، ترجمه عبدالحمید رجایی، انتشارات نیا، تبریز.

۵- براتی، غلامرضا، (۱۳۷۷)، تحلیل همدیدی یخبندان در غرب کشور، رساله دکترا، دانشگاه تربیت مدرس تهران

۶- بوشر، کیت، (۱۳۷۳)، آب و هوای کره زمین (منطقه برون حاره) ترجمه بهلول علیجانی، نشر سمت تهران.

۷- بهیار، محمدباقر، بررسی پدیده ی سرمازدگی در استان چهارمحال و بختیاری از دیدگاه همدیدی – دینامیکی (۱۳۸۲)، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، شماره مقاله ۵۷۳.

۸- جداری عیوضی، جمشید، (۱۳۷۴)، ژئومورفولوژی ایران، دانشگاه پیام نور، تهران.

۹- جعفرپور، ابراهیم، (۱۳۷۳)، اقلیم‌شناسی، انتشارات دانشگاه تهران.

۱۰- جی، پتر، (۱۳۷۹)، آب و هوا و عملکرد گیاهان زراعی، ترجمه محمدکافی، علی گنجعلی و احمد نظامی، انتشارات جهاد دانشگاهی، مشهد.

منابع و مأخذ انگلیسی:

11) Annual Report, 1976 and 1977. International Potato Center. Lima, Peru.

12) APPL, D., 1906 zur kenntnis des wnndrershlusses bei kart offeln. Berich der deutschen Botanischer besellschaft 26: 118-122.

13) Australia Aust. J. Agric. Res, 44 (8): 1731-1743.

14) Nebraska. Monthly weather review. Novamber (1962) 471-478.

مروری بر زمینه زمینه‌های کاربست هوش مصنوعی در مدیریت آب مجازی

مهناز محمدزاده[۱]، نصیرآبادی[۲]

۱- و ۲- استادیار گروه مهندسی آب و مدیریت کشاورزی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
nasirabadi55@uma.ac.ir

چکیده

وجود آب لزوم حیات و پیش نیاز توسعه جوامع انسانی است. افزایش جمعیت، نیاز به آب شرب، مدیریت نامناسب آب و تغییرات اقلیمی و گرم شدن کره زمین، منابع آب را با چالش‌های عمده‌ای مواجه ساخته است. در قرن اخیر، نرخ رشد سریع جمعیت، مهم‌ترین عامل در کاهش سرانه آب تجدید پذیر کشور بوده است. این مسائل باعث شده مفهومی به نام آب مجازی و بحث صادرات و واردات آن مطرح شود. اهمیت آب مجازی در مدیریت منابع آب در ابعاد اقتصادی و زیست محیطی قابل بحث است. از نظر اقتصادی، آب مجازی منجر به کاهش برداشت از منابع داخلی می شود. در واقع واردات محصولات آب‌بر، به‌ویژه در کشورهای خشک و نیمه‌خشک، به کاهش برداشت بی‌رویه از منابع محدود آب کمک می‌کند و در این میان، هوش مصنوعی می‌تواند ابزاری کلیدی برای درک و مدیریت مؤثر آب مجازی باشد. در حوزه آب، هوش منصوعی به تحلیل داده‌های پیچیده مانند داده‌های هواشناسی، زنجیره تأمین، و مصرف منابع کمک می‌کند. کاربردهای هوش مصنوعی در مدیریت آب مجازی در ابعاد مختلف و گسترده بهینه‌سازی تجارت آب مجازی، پیش‌بینی مصرف آب در تولید، تحلیل زنجیره تأمین کشاورزی و ردیابی و پایش منابع پنهان آب مورد توجه می باشد.

کلید واژه‌ها: آب مجازی، هوش مصنوعی، مدیریت آب

مقدمه

رقابت برای کاربرد آب در بخش های مختلف، محیط زیست و تولید مواد غذایی نه تنها در ایران، بلکه در سراسر جهان به عنوان تهدیدی در حال افزایش است. چراکه آب یکی از اساسی ترین منابع طبیعی برای توسعه کشورها، توسعه بخش محیط زیست وثروت مشترک برای همه جوامع بشری است که باید با مصرف پایدار، بهینه و صحیح به نسل های بعدی انتقال یابد(هانگ و همکاران، ۲۰۱۹). در واقع وجود آب لزوم حیات و پیش نیاز توسعه جوامع انسانی است. افزایش جمعیت،

نیاز به آب شرب، مدیریت نامناسب آب و تغییرات اقلیمی و گرم شدن کره زمین، منابع آب را با چالش های عمده ای مواجه ساخته است. وجود این چالش ها، مشکلات زیست محیطی، اجتماعی، سیاسی و اقتصادی به همراه داشته و جوامع بشری را با تهدیدهای جدی روبرو ساخته است(کشاورز و همکاران، ۱۴۰۰). از مجموع کل آب های جهان، ۹۷/۴ درصد آن ها را آب شور دریاها و اقیانوس ها تشکیل می دهند که به دلیل شوری در عمل قابل استفاده نیستند. به این ترتیب از مجموع منابع آبی جهان، ذخایر آب شیرین تنها ۲/۶ درصد کل حجم ذخایر آب های سطح زمین را شامل می شود که بخش اعظم آن به صورت یخ در قطب های کره زمین و یخچال های طبیعی(۱/۹۸) و آب های زیر زمینی(۰/۵۹ درصد) وجود دارند که در دسترس نیستند. بنابراین از مجموع آب های کره زمین تنها ۰/۰۱۴ درصد آب قابل استفاده است و در واقع حیات آدمی وابسته به همین مقدار اندک است(خوش رفتار و همکاران، ۱۳۹۸). کشورهای زیادی همچون چین، هند، پاکستان، ایران و مکزیک، تحت تأثیر جدی آب آشامیدنی ناکافی و پیامدهای آن بر سلامت انسان قرار دارند. در این میان، ایران به دلیل داشتن آب‌وهوای اغلب گرم و خشک و موقعیت خاص جغرافیایی با مشکلات جدی مواجه است. خشک‌سالی‌های مکرر در کنار بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب سطحی و زیرزمینی از طریق شبکه بزرگ زیرساخت‌های هیدرولیکی و چاه‌های عمیق، وضعیت آب کشور را به حد بحرانی رسانده است. همچنین در قرن اخیر، نرخ رشد سریع جمعیت، مهم‌ترین عامل در کاهش سرانه آب تجدید پذیر کشور بوده است. این مسائل باعث شده در رابطه با این منبع مهم و ارزشمند، مفهومی به نام آب مجازی[142] و بحث صادرات و واردات آن مطرح شود (راسخی و کریمی، ۱۴۰۱). در واقع مفهوم آب مجازی به‌عنوان ابزاری برای تحلیل بهره‌وری آب در زنجیره تأمین جهانی مورد توجه قرار گرفته است (Allan, 1998). به‌ویژه در کشورهایی با تنش آبی بالا، درک و مدیریت مصرف غیرمستقیم آب از اهمیت استراتژیک برخوردار است. هوش مصنوعی به عنوان یک فناوری نوظهور، می‌تواند با تحلیل داده‌های پیچیده و ارائه راهکارهای بهینه، نقش مهمی در پایش، تخصیص و بهینه‌سازی مصرف آب مجازی ایفا کند. می‌توانند داده‌های پیچیده تولید، تجارت و اقلیم را تحلیل کرده و مدل‌های پیش‌بینی و تصمیم‌گیری دقیق‌تری ارائه دهند(Hoekstra & Mekonnen, 2012) .

اهمیت آب مجازی در مدیریت منابع آب

مدیریت پایدار منابع آب یکی از مهم‌ترین چالش‌های قرن ۲۱ است. در بسیاری از کشورها، کشاورزی به‌عنوان بزرگ‌ترین مصرف‌کننده آب شناخته می‌شود و بیش از ۷۰ درصد برداشت‌های آبی به این بخش اختصاص دارد(FAO, 2023). در چنین شرایطی، توجه به آب مجازی می‌تواند نقشی کلیدی در صرفه‌جویی منابع، امنیت غذایی و سیاست‌گذاری آبی ایفا کند(Hoekstra, 2003) . آب مجازی عبارت است از حجم آبی که در فرآیند تولید یک کالا یا خدمت مصرف می‌شود. برای

142 . Virtual Water

مثال، تولید یک کیلوگرم گندم به‌طور متوسط به ۱۳۰۰ لیتر آب نیاز دارد(Mekonnen & Hoekstra, 2011). اهمیت آب مجازی در مدیریت منابع آب در ابعاد اقتصادی و زیست محیطی قابل بحث است. بلحاظ اقتصادی، آب مجازی منجر به کاهش برداشت از منابع داخلی می شود. در واقع واردات محصولات آب‌بر، به‌ویژه در کشورهای خشک و نیمه‌خشک، به کاهش برداشت بی‌رویه از منابع محدود آب کمک می‌کند(Saha & Kapuria, 2021). همچنین آب مجازی منجر به صرفه جویی در هزینه های زیر ساختی می شود، تجارت آب مجازی نیاز به سرمایه‌گذاری سنگین در سدها و شبکه‌های آبیاری را کاهش می‌دهد(IWA, 2022) و نهایتا آب مجازی افزایش بهره وری اقتصادی را به دنبال خواهد داشت، بطوریکه تخصیص منابع داخلی به محصولات با ارزش افزوده بالاتر، به جای محصولات آب‌بر، می‌تواند بازده اقتصادی کشور را افزایش دهد (FAO, 2023). تجارت آب مجازی نه‌تنها بر اقتصاد، بلکه بر محیط‌زیست نیز اثرگذار است؛ واردات آب مجازی باعث کاهش فرونشست و تخلیه آبخوان‌ها در مناطق خشک می شود(Qadir et al., 2020). از طرفی تجارت آب مجازی با جلوگیری از توسعه بی‌رویه کشاورزی در مناطق کم‌آب به حفظ تنوع زیستی و اکوسیستم‌ها کمک می کند (Hoekstra et al., 2011). همچنین منجر به کاهش ردپای آب[143] جهانی با توزیع بهینه تولید محصولات در مناطقی با منابع آبی فراوان‌تر می شود.

نقش هوش مصنوعی در مدیریت آب مجازی

هوش مصنوعی[144] مجموعه‌ای از الگوریتم‌ها و مدل‌ها است که توانایی یادگیری، پیش‌بینی و تصمیم‌گیری مشابه انسان را دارند. در حوزه آب، هوش منصوعی به تحلیل داده‌های پیچیده مانند داده‌های هواشناسی، زنجیره تأمین، و مصرف منابع کمک می‌کند. کاربرد هوش مصنوعی منجر به کاهش اتلاف آب غیرمستقیم در تولید کالاها، بهبود بهره‌وری سیستم‌های تولید کشاورزی، افزایش شفافیت در زنجیره‌های تأمین آب‌بر و افزایش ظرفیت تصمیم‌گیری راهبردی در تجارت جهانی می شود (Dai et al., 2020). کاربردهای هوش مصنوعی در مدیریت آب مجازی در ابعاد مختلف و گسترده مورد بحث قرار می گیرد: الف)تحلیل زنجیره تأمین کشاورزی: با استفاده از یادگیری ماشین، می‌توان سهم آب مجازی هر محصول در مراحل مختلف تولید، بسته‌بندی و انتقال را محاسبه و مدل‌سازی کرد(Sood & Smakhtin, 2015) . ب)پیش‌بینی مصرف آب در تولید: مدل‌های یادگیری عمیق قادر به پیش‌بینی میزان آب مورد نیاز برای تولید محصولات در سناریوهای مختلف اقلیمی و اقتصادی هستند(Zhuo et al., 2019) . ج) بهینه‌سازی تجارت آب مجازی: هوش مصنوعی می‌تواند مدل‌هایی برای پیشنهاد مسیرهای بهینه تجارت محصولات کشاورزی با کمترین مصرف آب مجازی طراحی کند، به‌ویژه برای کشورهای واردکننده خالص آب(Chapagain & Hoekstra, 2008) . د) ردیابی و پایش منابع پنهان آب: با ترکیب هوش

143 . Water Footprint

144 . Artificial intelligence

مصنوعی و اینترنت اشیاء[145] ، می‌توان منابع پنهان مصرف آب در بخش صنعتی یا شهری را شناسایی و کاهش داد (Dai et al., 2020).

کاربردهای هوش مصنوعی در زنجیره تأمین کشاورزی

زنجیره تأمین کشاورزی شامل فرآیندهایی از تولید تا مصرف نهایی محصولات کشاورزی است. به دلیل ماهیت فسادپذیری و تنوع عوامل محیطی، مدیریت این زنجیره به روش‌های سنتی دشوار است. استفاده از هوش مصنوعی می‌تواند تصمیم‌گیری‌ها را دقیق‌تر، سریع‌تر و کارآمدتر نماید. الگوریتم‌های هوش مصنوعی به تحلیل حجم عظیمی از داده‌ها از جمله شرایط آب و هوایی، سلامت خاک، تقاضای بازار و روند قیمت‌ها کمک می‌کنند. اگرچه هوش مصنوعی پتانسیل بالایی در زنجیره تأمین کشاورزی دارد، اما چالش‌هایی همچون عدم دسترسی به داده‌های با کیفیت، محدودیت‌های زیرساختی در مناطق روستایی، و نبود تخصص فنی در بهره‌برداری از سیستم‌های هوشمند در راستای کاربرد هوش مصنوعی در زنجیره تامین کشاورزی ایجاد محدودیت می کند(Wolfert et al., 2017). با اینحال کاربردهای هوش مصنوعی در زنجیره تامین کشاورزی در حیطه های زیر قابلیت اجرایی دارد:

پیش‌بینی تقاضا و عرضه: الگوریتم‌های یادگیری ماشین مانند شبکه‌های عصبی و مدل‌های رگرسیونی می‌توانند با تحلیل داده‌های تاریخی، تقاضا را پیش‌بینی کرده و از تولید مازاد یا کمبود محصول جلوگیری کنند. به طور مثال کشور هند از مدل‌های LSTM[146] برای پیش‌بینی قیمت گوجه‌فرنگی در بازارهای عمده‌فروشی استفاده کرد و توانست به سود اقتصادی دست یابد(Patel et al., 2022).

مدیریت موجودی و انبارداری: سیستم‌های هوش مصنوعی قادرند شرایط بهینه برای نگهداری محصولات کشاورزی را با در نظر گرفتن دما، رطوبت و ماندگاری هر محصول تعیین کنند، که این امر منجر به کاهش ضایعات می‌شود (Kamilaris et al., 2017).

بهینه‌سازی لجستیک و حمل‌ونقل: با استفاده از الگوریتم‌های مسیریابی هوشمند مانند الگوریتم‌های ژنتیک و کلونی مورچگان، هوش مصنوعی می‌تواند مسیرهای حمل‌ونقل بهینه برای کاهش زمان تحویل و هزینه سوخت پیشنهاد دهد(Patel et al., 2022).

کشاورزی دقیق و تحلیل میدانی: استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و پهپادها همراه با بینایی ماشین، اطلاعات دقیقی از وضعیت محصولات، رطوبت خاک، و بیماری‌های گیاهی ارائه می‌دهد که در تصمیم‌گیری‌های زنجیره تأمین مؤثر است. بطور مثال

145 . Internet of Things

146 . long short-term memory

از این تکنولوژی می توان در تشخیص آفات در مزارع ذرت با استفاده از شبکه‌های عصبی کانولوشن استفاده نمود (Zhao et al., 2021).

تحلیل ریسک و تاب‌آوری زنجیره: هوش مصنوعی می‌تواند مدل‌های شبیه‌سازی برای سنجش تاب‌آوری زنجیره در برابر بحران‌هایی نظیر خشکسالی یا بیماری‌های همه‌گیر طراحی کند(Kamilaris et al., 2017).

کاربرد هوش مصنوعی در پیش‌بینی مصرف آب در تولید

افزایش فشار بر منابع آبی، ناشی از رشد جمعیت، توسعه صنعتی و تغییرات اقلیمی، موجب شده است که مدیریت مصرف آب به یکی از چالش‌های اساسی در بخش تولید تبدیل شود. مصرف آب در فرآیندهای تولیدی یکی از شاخص‌های کلیدی بهره‌وری و پایداری زیست‌محیطی است. نوسانات اقلیمی، تنوع نیاز تولیدی و کمبود داده‌های دقیق، موجب شده‌اند که پیش‌بینی مصرف آب پیچیده‌تر شود. روش‌های سنتی اغلب به دلیل ایستا بودن و عدم توانایی در تحلیل داده‌های غیرخطی، کارایی لازم را ندارند. در مقابل، هوش مصنوعی با بهره‌گیری از تکنیک‌های یادگیری از داده‌های تاریخی، امکان مدل‌سازی رفتارهای پیچیده و غیرخطی را فراهم می‌آورد. پیش‌بینی دقیق مصرف آب می‌تواند به بهینه‌سازی مصرف، کاهش هزینه‌ها، و حفظ منابع کمک کند. در سال‌های اخیر، الگوریتم‌های هوش مصنوعی مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی، الگوریتم‌های جنگل تصادفی، و یادگیری ماشین تقویتی، نقش مؤثری در پیش‌بینی مصرف آب ایفا کرده‌اند. هر چند نیاز به داده‌های بزرگ و دقیق، هزینه‌های اولیه توسعه و آموزش مدل‌ها و تفسیرپذیری محدود در برخی مدل‌ها (مانند شبکه‌های عمیق) وسعت کاربرد هوش مصنوعی در پیش بینی مصرف آب را محدود می کند(Wang & Li, 2021). با اینحال زمینه های مختلف کاربرد هوش مصنوعی در پیش بینی مصرف آب عبارتند از:

شبکه‌های عصبی مصنوعی[147](ANN) : شبکه‌های عصبی به دلیل توانایی در مدل‌سازی روابط غیرخطی بین متغیرها، در بسیاری از مطالعات برای پیش‌بینی مصرف آب استفاده شده‌اند. برای مثال، در یک مطالعه بر روی گلخانه‌های هلند، مدل ANNتوانست با دقت بالایی میزان نیاز آبی روزانه را بر اساس دما، رطوبت و تابش خورشید پیش‌بینی کند (Ferreira & Silva, 2021).

الگوریتم‌های درخت تصمیم و جنگل تصادفی[148] : الگوریتم‌های RF به دلیل مقاومت در برابر بیش‌برازش و توانایی در رتبه‌بندی اهمیت متغیرها، در پیش‌بینی مصرف آب صنایع غذایی و کارخانه‌ها به‌کار رفته‌اند (Mohammadi & Asadi, 2020).

147 . Artificial neural networks

148 . Random Forest

یادگیری عمیق[149] : مدل‌هایی نظیر LSTM که قابلیت یادگیری توالی زمانی را دارند، برای پیش‌بینی مصرف آب بر اساس داده‌های زمانی مانند هفته‌ها یا ماه‌های گذشته بسیار مؤثر بوده‌اند. در پروژه‌ای در استرالیا، مصرف آب یک کارخانه لبنی با دقت بالایی توسط مدل LSTM پیش‌بینی شد(Kumar et al., 2022) .

الگوریتم‌های ترکیبی و بهینه‌سازی: ترکیب الگوریتم‌های هوش مصنوعی با تکنیک‌های بهینه‌سازی (مانند الگوریتم ژنتیک یا الگوریتم زنبور عسل) می‌تواند در تنظیم پارامترهای مدل و افزایش دقت پیش‌بینی مفید باشد(Zhang et al., 2019).

کاربرد هوش مصنوعی در بهینه‌سازی تجارت آب مجازی

همانطور که پیشتر مطرح گردید در عصر تغییرات اقلیمی و افزایش تقاضای آب، مفهوم آب مجازی به عنوان ابزاری برای تحلیل مصرف پنهان آب در تجارت بین‌المللی اهمیت یافته است. کشورهایی که با کمبود آب مواجه‌اند، با واردات محصولات آب‌بَر می‌توانند از فشار بر منابع داخلی خود بکاهند. با این حال، تصمیم‌گیری در مورد اینکه چه محصولاتی وارد یا صادر شوند، نیازمند تحلیل داده‌های پیچیده و چندبعدی است. هوش مصنوعی با توانایی پردازش داده‌های بزرگ و یافتن الگوهای پنهان، به ابزاری مؤثر برای بهینه‌سازی این فرآیند تبدیل شده است. با اینکه کاربست هوش مصنوعی در تحلیل بهینه سازی تجارت آب مجازی با محدودیت دسترسی به داده‌های کامل و دقیق، پیچیدگی مدل‌سازی روابط بین تجارت، آب و اقلیم و نیاز به ظرفیت فنی برای پیاده‌سازی سیستم‌های هوش مصنوعی مواجه است؛ با اینحال می توان با استفاده از هوش مصنوعی به تصمیم‌گیری سریع و داده‌محور، کاهش مصرف آب داخلی از طریق واردات هدفمند و تحلیل های چندبعدی همراه با پیش‌بینی دقیق دست یافت (Wada et al., 2019) . برخی کاربردهای هوش مصنوعی در بهینه سازی تجارت آب مجازی عبارت است از:

تحلیل داده‌های تجارت و الگوهای مصرف: الگوریتم‌های یادگیری ماشین، مانند Random Forest و XGBoost[150] ، می‌توانند الگوهای تجاری گذشته را تحلیل کرده و پیش‌بینی کنند که کدام محصولات باید وارد یا صادر شوند تا مصرف آب مجازی بهینه گردد. تجارت کشاورزی بین هند و چین با استفاده از الگوریتم‌های طبقه‌بندی برای شناسایی محصولات با بیشترین بازده آب مجازی مورد تحلیل قرار گرفته و نتایج رضایتبخشی را به دنبال داشته است(Singh et al., 2021).

مدل‌سازی شبکه تجارت آب مجازی: با استفاده از شبکه‌های عصبی و الگوریتم‌های گرافی، ساختار تجارت آب مجازی بین کشورها یا استان‌ها مدل‌سازی می‌شود. این روش‌ها می‌توانند به شناسایی گره‌های حیاتی و مسیرهای بهینه در شبکه کمک کنند.

149 . Deep Learning

150 . Extreme Gradient Boosting

بهینه‌سازی تصمیم‌گیری در سیاست‌گذاری: الگوریتم‌های بهینه‌سازی چندهدفه مانند NSGA-II151 در کنار مدل‌های پیش‌بینی می‌توانند سناریوهای مختلف واردات و صادرات را بر اساس معیارهایی مانند بهره‌وری آبی، هزینه اقتصادی، و اثرات محیط‌زیستی تحلیل و رتبه‌بندی کنند. در همین راستا از ترکیب الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی برای بهینه‌سازی واردات محصولات کشاورزی در ایران با هدف کاهش مصرف آب استفاده شده است(Rahimi et al., 2020) .

شبیه‌سازی و پیش‌بینی آینده‌نگر: هوش مصنوعی می‌تواند با استفاده از داده‌های اقلیمی، اقتصادی و سیاسی، شبیه‌سازی‌هایی از آینده تجارت آب مجازی ارائه دهد. این مدل‌ها به سیاست‌گذاران کمک می‌کنند تا اثرات تصمیمات بلندمدت را بر منابع آب درک کنند(Chini et al., 2018) .

کاربرد هوش مصنوعی در ردیابی و پایش منابع پنهان آب

منابع پنهان آب، نظیر آب‌های زیرزمینی، رطوبت خاک، و جریان‌های زیرسطحی، بخش مهمی از چرخه هیدرولوژیکی زمین را تشکیل می‌دهند؛ در واقع نقش کلیدی در تأمین آب برای کشاورزی، صنعت و شرب دارند. با این حال پایش آن‌ها با روش‌های سنتی چون حفر چاه، داده‌برداری میدانی یا مدل‌های هیدرولوژیکی سنتی، هزینه‌بر، زمان‌بر و اغلب نادقیق است و نیازمند روش‌های پیشرفته و تحلیل داده‌های پیچیده است. در سال‌های اخیر، هوش مصنوعی با توانایی‌های بی‌نظیر در یادگیری از داده‌های متنوع مکانی-زمانی، به ابزاری حیاتی در پایش منابع پنهان آب تبدیل شده است. فناوری‌های نوین مانند سنجش از دور(RS152) ، GPS153و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی۱۵۴ (GIS) در ترکیب با هوش مصنوعی، رویکردهای نوینی برای پایش این منابع فراهم کرده‌اند. الگوریتم‌هایی مانند شبکه‌های عصبی مصنوعی۱۵۵(ANN) ، یادگیری عمیق۱۵۶(DL) ، ماشین بردار پشتیبان۱۵۷(SVM) ، و جنگل تصادفی۱۵۸ (RF) برای پیش‌بینی نوسانات سطح آب زیرزمینی، شناسایی نشت آب، و تخمین رطوبت خاک کاربرد گسترده‌ای یافته‌اند. کاربرد هوش مصنوعی در ردیابی و

151 . Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II

152 . Remote sensing

153 . Global Positioning System

154 . Geographic Information Systems

155 . Artificial neural networks

156 . Deep Learning

157 . Support vector machine

158 . Random Forest

پایش منابع آب پنهان، توانایی یادگیری از داده‌های چندمنبعی (ماهواره، زمینی، اقلیمی)، دارد. منجر به کاهش وابستگی به داده‌برداری پرهزینه میدانی می شود و سرعت و دقت بالا در پیش‌بینی نوسانات منابع پنهان دارد. در عین حال این تکنولوژی ها نیاز مند داده‌های آموزشی با کیفیت بالا دارد. در برخی موارد مشکل عدم تفسیرپذیری برخی مدل‌های یادگیری عمیق محدودیت ایجاد می کند و مستلزم ترکیب دانش فنی حوزه هیدرولوژی با علوم داده می باشد (Abedini & Noori , 2019). کاربرد های هوش مصنوعی در ردیابی و پایش منابع پنهان آب در حیطه های زیر می تواند کارساز باشد:

پایش آب زیرزمینی: شبکه‌های عصبی مصنوعی و مدل‌های LSTM در پیش‌بینی تغییرات سطح آب زیرزمینی با استفاده از داده‌های بارش، دما، و کاربری اراضی عملکرد مؤثری داشته‌اند. در مطالعه‌ای Khandelwal et al, (2022)، با استفاده از مدل LSTM با دقت بالا تغییرات ماهانه سطح آب زیرزمینی در ایالت مهاراشترا هند را پیش‌بینی نمودند.

تخمین رطوبت خاک از تصاویر ماهواره‌ای: با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین نظیر Random Forest وXGBoost ، می‌توان داده‌های سنجش از دور مانند تصاویر ماهواره‌های Sentinel و MODIS را تحلیل کرده و رطوبت سطحی خاک را تخمین زد. این روش‌ها نسبت به مدل‌های فیزیکی سنتی عملکرد سریع‌تر و قابل تعمیم‌تری دارند. در پژوهشی Peng et al. (2021)، با استفاده از ترکیب داده‌های ماهواره‌ای و جنگل تصادفی نقشه‌های رطوبت خاک سطحی را با دقت بالا در چین تولید کردند.

شناسایی نشت و ناپایداری در شبکه‌های آب زیرزمینی: سیستم‌های تشخیص نشت با استفاده از الگوریتم‌های طبقه‌بندی مانند SVM و CNN در لوله‌های زیرزمینی توسعه یافته‌اند. این سیستم‌ها از طریق داده‌های سنسورها یا امواج لرزه‌ای می‌توانند نشت‌های پنهان را شناسایی کنند (Zhang et al., 2020).

مدل‌سازی جریان زیرسطحی و انتقال آلاینده‌ها: ترکیب مدل‌های مبتنی بر AI با مدل‌های عددی مانند MODFLOW امکان مدل‌سازی حرکت آب و آلاینده‌ها در آبخوان‌ها را فراهم کرده است. مدل‌های هیبریدی ANN-GA برای کالیبراسیون پارامترهای پیچیده مورد استفاده قرار گرفته‌اند(Zounemat-Kermani et al., 2020).

نتیجه‌گیری

همانطور که بیان گردید با توجه به افزایش خشکسالی‌ها و فشار بر منابع آب شیرین، تجارت آب مجازی به‌عنوان یکی از ابزارهای مهم در مدیریت بحران آب مطرح شده است و در این میان، هوش مصنوعی می‌تواند ابزاری کلیدی برای درک و مدیریت مؤثر آب مجازی باشد. کاربرد هوش مصنوعی در زنجیره تأمین کشاورزی، از پیش‌بینی و مدیریت تقاضا تا بهینه‌سازی حمل‌ونقل و تحلیل ریسک، نقش حیاتی در ارتقاء کارایی، کاهش ضایعات و افزایش پایداری ایفا می‌کند. برای

بهره‌برداری مؤثرتر، سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های دیجیتال، آموزش کشاورزان، و توسعه پلتفرم‌های بومی هوش مصنوعی ضروری است. از طرفی هوش مصنوعی توانسته است جایگزین مناسبی برای روش‌های سنتی پیش‌بینی مصرف آب در تولید باشد. انتخاب صحیح الگوریتم، کیفیت داده‌ها و طراحی مناسب مدل، از عوامل کلیدی در موفقیت پروژه‌های هوش مصنوعی هستند. استفاده گسترده از این فناوری می‌تواند به پایداری زیست‌محیطی و صرفه‌جویی منابع کمک شایانی کند. همچنین کاربست هوش مصنوعی در تحلیل و بهینه‌سازی تجارت آب مجازی، امکان تصمیم‌گیری هوشمندانه و پایدار در شرایط محدودیت منابع آبی را فراهم می‌کند. با توسعه داده‌های بین‌المللی و بهبود زیرساخت‌های دیجیتال، می‌توان بهره‌گیری از هوش مصنوعی را در طراحی سیاست‌های کلان آب مجازی گسترش داد. بکارگیری هوش مصنوعی در پایش منابع پنهان آب نیز، امکان پیش‌بینی دقیق‌تر و تصمیم‌گیری مؤثرتر در مدیریت منابع آبی را فراهم می‌کند. توسعه زیرساخت‌های داده‌ای، آموزش متخصصان، و استفاده ترکیبی از سنجش از دور و هوش مصنوعی، مسیر آینده در مدیریت پایدار آب‌های زیرزمینی و منابع پنهان آبی خواهد بود.

منابع مورد استفاده

راسخی،س و کریمی، م. (۱۴۰۱). تجارت آب‌مجازی ایران با کشورهای مستقل مشترک‌المنافع. فصلنامه مطالعات اقتصادی کاربردی ایران. ۱۱(۴۲)، ۱۳۴-۱۰۹.

خوش‌رفتار، ر.، عساکره، ح.، غفوری، ک. (۱۳۹۸). جایگاه آب مجازی در مدیریت منابع آب. مجله رشد آموزش جغرافیا، ۳، ۲۳-۱۳.

کشاورز، ع.، ملکیان، ر.، نژند علی، ع.، بیگی، ا. (۱۴۰۰). مجموعه اسناد مرتبط با سند ملی و راهبردی امنیت غذایی؛ تبیین وضعیت آب کشور. تهران: نشر آموزش کشاورزی

Abedini, M. J., & Noori, R. (2019). Hybrid AI Models for Simulating Groundwater Contamination Transport. Journal of Hydrologic Engineering, 24(4), 04019008

Chapagain, A. K., & Hoekstra, A. Y. (2008). The global component of freshwater demand and supply: An assessment of virtual water flows between nations as a result of trade in agricultural and industrial products. Water International, 33(1), 19–32.

Chini, C. M., Stillwell, A. S. (2018). Where Are All the Data? The Case for a Comprehensive Water Data Infrastructure for the United States. Earth's Future, 6(7), 863–873.

Dai, H., Zhang, J., Wang, H., & Yu, Y. (2020). Artificial intelligence for water resources management: A review. Water, 12(6), 1519.

FAO. (2023). Global water resources and agricultural trade. Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Ferreira, A., & Silva, L. (2021). Application of Artificial Neural Networks for Water Consumption Prediction in Greenhouse Agriculture. Computers and Electronics in Agriculture, 182, 105991.

Huang H, Wang J, Han Y, Wang L and Li X, (2019). Assessing impacts of water regulations on alleviating regional water stress with a system dynamics model. Water Supply, 19(2): 635-643

Hoekstra, A. Y. (2003). Virtual water: An introduction. Value of Water Research Report Series No. 12. UNESCO-IHE

Hoekstra, A. Y., & Mekonnen, M. M. (2011). The water footprint of humanity. Proceedings of the National Academy of Sciences, 109(9), 3232–3237.

IWA. (2022). Virtual water trade and its implications on water sustainability. Water Supply, 22(2), 1704–1720.

Kamilaris, A., Kartakoullis, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2017). A Review on the Practice of Big Data Analysis in Agriculture. Computers and Electronics in Agriculture, 143, 23–37.

Khandelwal, A., Kumar, D. N., & Srinivasulu, S. (2022). Groundwater Level Forecasting Using LSTM Neural Network in Semi-Arid Regions of India. Journal of Hydrology, 605, 127370.

Kumar, S., Jain, R., & Walker, M. (2022). Deep Learning-Based Forecasting of Industrial Water Consumption. Journal of Water Resources Planning and Management, 148(6), 04022026.

Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2011). National water footprint accounts: The green, blue and grey water footprint of production and consumption. UNESCO-IHE Institute for Water Education.

Mohammadi, B., & Asadi, H. (2020). Predicting Irrigation Water Demand Using Hybrid Artificial Intelligence Models. Water Resources Management, 34(2), 445–462.

Patel, R., Mehta, A., & Shah, D. (2022). Forecasting Tomato Prices Using LSTM Neural Networks. Journal of Agricultural Informatics, 13(1), 34–45.

Peng, J., Loew, A., Merlin, O., & Verhoest, N. (2021). A Review of Spatial Downscaling of Satellite Soil Moisture Data. Reviews of Geophysics, 59(2), e2020RG000726.

Qadir, M., et al. (2020). The challenges of water scarcity and the role of virtual water trade in addressing food security. Water Policy, 22(6), 1112–1128.

Rahimi, M., Ahmadi, H., & Abbaspour, K. (2020). Multi-Objective Optimization of Iran's Agricultural Trade Using AI-Based Models to Reduce Water Scarcity. Water, 12(11), 3057.

Saha, S., & Kapuria, P. (2021). Finding solutions to water scarcity: The potential of virtual water trade in agricultural products. Observer Research Foundation.

Singh, R., Kumar, S., & Prakash, A. (2021). Optimizing Virtual Water Trade Using Machine Learning: A Case Study of Indo-China Agricultural Trade. Journal of Environmental Informatics, 38(4), 112–126.

Sood, A., & Smakhtin, V. (2015). Global hydrological models: A review. Hydrological Sciences Journal, 60(4), 549–565.

Wada, Y., et al. (2019). Modeling Global Water Security and the Role of Virtual Water Trade. Nature Communications, 10, 554.

Wang, J., & Li, Q. (2021). A Review of Artificial Intelligence Applications in Water Resource Management. Water, 13(10), 1393.

Zhang, Y., Yang, J., & Sun, X. (2020). Leak Detection in Underground Water Pipelines Using CNN and Vibration Sensors. Sensors, 20(18), 5274.

Zhang, Y., Chen, X., & Li, L. (2019). Forecasting Urban Water Demand Based on Random Forest and Time Series Models. Environmental Modelling & Software, 119, 207–214.
Zhao, Y., Liu, Q., & Wang, H. (2021). Pest Detection in Corn Fields Using Deep Learning and UAV Imagery. Computers and Electronics in Agriculture, 189, 106402.
Zhuo, L., Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2019). The effect of different agricultural management practices on irrigation efficiency, water productivity and water footprint. Water Resources Management, 33, 461–474.
Zounemat-Kermani, M., Toth, E., Kisi, O. (2020). Artificial Intelligence Models for Groundwater Level Forecasting: A Review. Environmental Earth Sciences, 79, 342.

A Review of the Fields of Application of Artificial Intelligence in Virtual Water Management

Mahnaz Mohammadzadeh Nasirabadi

Assistant Professor, Department of Water Engineering and Agricultural Management, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

* Corresponding author: nasirabadi55@uma.ac.ir

Abstract

In Persian The existence of water is a necessity for life and a prerequisite for the development of human societies. Population growth, the need for drinking water, improper water management, and climate change and global warming have presented water resources with major challenges. In the last century, the rapid population growth rate has been the most important factor in reducing the country's per capita renewable water. These issues have led to the emergence of a concept called virtual water and the discussion of its export and import. The importance of virtual water in water resource management is debatable in economic and environmental dimensions. From an economic perspective, virtual water leads to a reduction in the withdrawal of domestic resources. In fact, importing water-intensive products, especially in arid and semi-arid countries, helps reduce the overexploitation of limited water resources, and in this regard, artificial intelligence can be a key tool for understanding and effectively managing virtual water. In the field of water, artificial intelligence helps analyze complex data such as meteorological data, supply chain, and resource consumption. Applications of artificial intelligence in virtual water management are of interest in various and broad dimensions, such as optimizing virtual water trade, predicting water consumption in production, analyzing agricultural supply chains, and tracking and monitoring hidden water resources.

Keywords: virtual water, artificial intelligence, water management

شاخص های حدی و مخاطرات آب و هوایی

دنیا ولی زاده[۱]، زهرا توحیدی[۲]

۱- وابستگی سازمانی نویسنده اول (دانشجوی کارشناسی جغرافیا، دانشگاه تبریز)
۲- وابستگی سازمانی نویسنده دوم (دانشجوی کارشناسی جغرافیا، دانشگاه تبریز)
آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول (zahratohidi1382@gmail.com)

چکیده

کاربرد نمایه های اقلیمی معرفی شده توسط تیم متخصصین شناسایی تغییر اقلیم و نمایه ها یکی از پرکاربردترین شیوه های تشخیص تغییر اقلیم می باشد. فعالیت های انسان جو زمین را در طی صد سال گذشته به طور قابل توجهی تغییر داده است. افزایش غلظت گازهای گلخانه ای منجر به گرمایش جهانی شده ودر نتیجه تغییردر نمایه های حدی اقلیمی سبب شده است. تغییرات آب و هوایی با تغییر الگوهای اقلیمی و به هم ریختن نظم اکوسیستم ها ، عواقب جدی بر محیط زیست وارد می کند. تغییر در الگو های آب و هوایی می تواند به وقوع سیل های شدید ، گرما و سرمای شدید ، خشکسالی و قحطی ، بالاآمدن سطح اب دریاها ، گرم شدن جهانی هوا و ذوب شدن کوه های یخی منجر شود. این رویداد ها ، تاثیرات عمیقی بر اقتصاد و معیشت بسیاری از مردم و مناطق جهان می گذارند. مطالعه تغییرات اقلیمی می تواند به برنامه ریزی در استفاده از منابع طبیعی کمک شایانی کند.این تحقیق به منظور شناخت روند تغییرات شاخص های حدی بارش روزانه ایران انجام گرفته است .بدین منظور، از داده های بارش ۲۴ ساعته ۴۷ ایستگاه سینوپتیک استفاده شده است و برای استخراج روند ها ازشاخص های ETCCDI با استفاده از نرم افزار RC limDexتحت زبان برنامه نویسی R بهره گیری شده است . نتایج این تحقیق نشان می دهد در دوره مورد مطالعه همه شاخص های حدی بارش در ایران دارای روند و تغییر است . توجه به تغییرات اقلیمی در سال های اخیر به دلیل پیامد های اقتصادی ، اجتماعی و خسارات مالی مربوط به رویداد های حدی جوی اهمیت زیادی پیدا کرده است . در اکثر مطالعات توجه به تغییر اقلیم فقط در صدد آشکار سازی روند های پتانسیلی یا نوسانات در متوسط طولانی مدت علایم اقلیمی است ، اما مطالعه تغییرپذیری و تغییر رفتار رویداد های حدی جوی نیز مهم است. پدیده تغییر اقلیم باعث تغییر در شدت و فراوانی پدیده های حدی به ویژه بارش های حدی شده است .

کلید واژه‌ها: تغییرات اقلیمی ، شاخص های حدی ، ایران ، بارش

مقدمه

فعالیت های انسانی از آغاز انقلاب صنعتی در قرن نوزدهم غلظت دی اکسید کربن در جو را تا حدود ۵۰ درصد افزایش داده است. افزایش میانگین دمای جهانی آشکارترین پیامد افزایشی دی اکسید کربن در سطح جهانی است. با این حال افزایش دما پیامد هایی برای الگوی بارش به همراه دارد ، گرم شدن آب و هوا می تواند به طور مستقیم بر مقادیر فرین اقلیمی تاثیر گذارد ، ظرفیت نگهداری آب اتمسفر را افزایش و احتمال وقوع شرایط آب و هوایی شدید غیر طبیعی جهانی و رویداد های اقلیمی حدی مانند دمای بالا ، امواج گرما ، سیل ، تگرگ و گردباد را افزایش دهد بر اساس مطالعات انجام شده ، فرین های اقلیمی در مناطق مختلف جهان رخ می دهد. با وجود این مناطق خشک و نیمه خشک در برابر پیامد های آنها آسیب پذیر هستند.دوره های طولانی مدت سالانه یا فصلی متغیر های اقلیمی همچون دما و بارندگی معمولا به عنوان شاخصی برای تغییرات اقلیمی کاربرد دارند . اخیرا آب و هوای غیرعادی ناشی از تغییرات اقلیمی و در نتیجه وقوع مکرر آب و هوای حدی به عنوان یک موضوع مهم زیست محیطی تلقی و تبدیل شده است که در بحث سیاست های زیست محیطی مورد توجه قرار گرفته است. به طور کلی ، یک رویداد حدی اقلیمی به عنوان یک پدیده اقلیمی تعریف می شود که در ۳۰ سال گذشته مشاهده نشده است و ممکن است به دلیل تغییرات اقلیم و تغییر پذیری اقلیمی رخ داده باشد. کمیته بین الدول تغییرات اقلیم ۵ (IPCC)، الگویی از آب و هوای حدی که برای مدتی مانند یک فصل ادامه دارد و ممکن است منجر به اختلال در امنیت غذایی و آب ، بدتر شدن کیفیت هوا ، افزایش بیماری های منتقله از طریق ناقلین ، تشدید بیماری های مزمن ، آسیب های زیست محیطی ، خسارت های جانی و مالی ، استرس های سلامت روانی و خطرات اسیب کارگران شود، رویداد های حدی اقلیمی و آب و هوایی تعریف کرده است. رویداد های حدی اقلیمی ، تاثیرات عمیقی بر اقتصاد و معیشت بسیاری از مردم و مناطق جهان دارند. افزایش فزاینده خسارات و زیاده روی اقتصادی ، همراه با افزایش مرگ و میر ناشی از این رخداد ها در حال افزایش است. قرارگیری ایران در کمربند بیابانی و برخورداری از یک چهارم منابع آبی (بارش و آب های سطحی) ، لزوم توجه به پیامد های تغییرات اقلیمی را بیش از پیش آشکار می کند. مطالعه مقادیر حدی دما و بارش و رویداد های حدی ناشی از آن ، اهمیت ویژه ای در سیاست گذاری و برنامه ریزی های بخش هایی مانند کشاورزی ، مدیریت آب ، شهرسازی ، ساختمان و راه ترابری دارد.کشور ایران با توجه به تنوع محیطی زیاد و موقعیت جغرافیایی خود از گذشته همواره با مخاطرات طبیعی زیادی مواجه بوده است. مطالعه مخاطرات طبیعی همواره در سطح کشور مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. پژوهشگران داخلی تحقیقاتی در زمینه اثر تغییر اقلیم و رویدادهای حدی انجم داده که در زیر به آنها اشاره می شود: با استفاده از مدل LARS-WG تعداد روز های داغ و یخبندان ، تعداد روز های بارانی و فراوانی روز های تر و خشک را در منطقه سنندج مطالعه کردند. نتایج نشان داد که با توجه به

افزایش تعداد روز های خشک از روز های تر این منطقه در دهه های آنی با خشکسالی مواجه خواهد شد. در مطالعه ای به پیش بینی بارش های سنگین در استان گلستان پرداختند. نتایج نشان داد بارش های سنگین ، در ایستگاه های مرطوب و در ایستگاه های نیمه خشک ، افزایش خواهد یافت که این شرایط در آینده دور حاد تر می شود تحلیل اثرات تغییر اقلیم و بارش های سنگین (۱۰،۲۰و۲۵ میلی متر و بیشتر) همراه با بارش سنگین ۱۰ میلی متر کاسته خواهد شد. در حالی که بر تعداد روز های همراه با بارش خیلی سنگین ۲۰ و ۲۵ میلی متر و بیشتر از آن خواهد شد. به بررسی اثر گرمایشی جهانی بر نمایه های اقلیمی فرین در استان گیلان پرداختند. نتایج نشان داد در دوره اینده کمیت های دمایی با سطح اطمینان مناسبی دارای روند افزایشی هستند. در پژوهشی به ارزیابی روند تغییر اقلیم با استفاده از شاخص های حدی داده های بلند مدت بارش و دما در جنوب شرق ایران پرداختند. نتایج تحقیق حاکی از روند افزایشی غیر منطقی دار در شاخص های دما و روند کاهشی نمایه های مربوط به بارش نیز در سرتاسر استان دارد.

مواد و روش

منطقه مورد مطالعه

ایران در نیمکره شمالی بین ۲۵ تا ۴۰ درجه عرض شمالی از خط استوا و بین ۴۴ تا ۶۳.۵ درجه طول شرقی از گرینویچ واقع شده است و با وسعت ۱۶۴۸۱۹۵ کیلو متر مربع معادل یک بیست و هفتم قاره آسیا و نزدیک به یک نودم خشکی های جهان است. تنوع آب و هوایی ایران عمدتا ناشی از تنوع عرض جغرافیایی ، توپوگرافی ، نزدیکی به اب های آزاد و تاثیر پذیری از سیستم های جوی با منشا مختلف است. به ویژه رشته کوه های البرز و زاگرس تعیین کننده تغییرات مکانی دما و بارش هستند. با توجه به این واقعیت ، مرز های اقلیمی ایران تا حد زیادی از توپوگرافی تبعیت می کند.

تصویری از کشور ایران

اساس و مبنای تراز و تعدیل آماری ، آمار و اطلاعات ایستگاه های هواشناسی می باشد که در مطالعات پتانسیل یابی به صورت شبکه ای انجام می شود. هر چه تراکم ایستگاه ها بیشتر باشد نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل آمار و اطلاعات دقیق تر می باشد. مبنای انتخاب ایستگاه های هواشناسی طول دوره آماری قرار گرفته است. یعنی ایستگاه هایی که دارای دوره های آماری طولانی تر باشند به عنوان ایستگاه های مورد مطالعه انتخاب می شوند. در این راستا ، ایستگاه های سینوپتیک به دلیل کیفیت بالای داده های آن انتخاب می شوند که علاوه بر کیفیت ، تنوع عناصر اندازه گیری شده در ایستگاه های سینوپتیک بیشتر است. تیم کارشناسی شناسایی تغییر اقلیم و شاخصها 27 ((ETCCDI شاخص اقلیمی برای بررسی نمایههای اقلیمی معرفی نمود که از این تعداد ۱۶ شاخص مربوط به وقایع دمایی و ۱۱ شاخص به بررسی مقادیر بارشی

اختصاص دارد (جدول ۱ و ۲). این نمایه ها را می توان به پنج گروه دسته بندی کرد که شامل ۱): نمایه های صدکی R99p ، R95p، TX90p، TX10p، (TN90p، 2): نمایه های مطلق (RX1DAY،TXn TNn،TNX،TXx، (RX5day، 3): نمایه های آستانه ای ((FD ID SU TR R10 R20، 4): نمایه های دوره ای (CSDI WSDI GSL CDD CWD)، و ۵): نمایه های دیگر که در هیچ یک از گروه های فوق نمی گنجد، اما تغییرات آنها می تواند اثرات اجتماعی گسترده ای داشته باشد (PRCPTOT DTR SDII ETR R95pT) می باشند. این نمایه ها لزوما برای هر اقلیمی مناسب نیستند، چرا که آستانه هایی که در نظر گرفته شده اند در همه جا کاربرد پذیر نیستند. در مطالعات گوناگون با اهداف متفاوت، پژوهشگران از شاخصهای مورد نیاز خود استفاده می نمایند. برای مثال در مناطق گرمسیری شاخص مربوط به روزهای یخی (DI) کاربردی در مطالعات نخواهد داشت و باید از نمایه هایی که متناسب با شرایط آب و هوایی آن منطقه هستند استفاده نمود.

در دوره زمانی مورد مطالعه دوره ی ۱۹۸۲-۲۰۱۲ است. بر این اساس از میان همه ایستگاه های سینوپتیک موجود در کشور ، ۴۷ ایستگاه دارای آمار کافی و بلند مدت بودند ،

برای استخراج روند بارش روزانه از نرم افزار RClimDex استفاده شده است. . RClimDexبه وسیله زانگ و یانگ در شعب تحقیقات اقلیمی سرویس هواشناسی کانادا توسعه یافته است. توسعه اولیه آن در آژانس توسعه ملی کانادا از طریق پروژه ی همکاری تغییرات اقلیمی کانادا-چین انجام گرفته است. این نرم افزار برای محاسبه روند شاخص های حدی دما و بارش توسعه یافته است. تیم کارشناسی آشکارسازی و نمایش تغییر اقلیم و شاخص ها ETCCDI)) بر اساس مجموع استاندارد ۲۷ شاخص حدی در زبان برنامه نویسی R (R یک زبان، محیط محاسبه، و گرافیکی آماری است) و بر اساس الگوریتم های بهبود یافته و کاهش خطای عددی طراحی کرده است. ETCCDI به صورت مشترک به وسیل کمیسیون اقلیم شناسی ، سازمان جهانی هواشناسی و برنام جهانی دیده بانی داده ها، و تغییرپذیری و پیش بینی اقلیم (CLIVAR) حمایت می شود.

بحث و نتایج

با توجه به شرایط جغرافیایی و همچنین عملکرد و اثر سامانه های اقلیمی مختلف در ریزش های جوی ایران، مقداربارش ها در مناطق گوناگون ایران تفاوت های زیادی دارد. به طور میانگین، در دورهٔ ۱۹۸۲ ـ ۲۰۱۲ ایستگاه هایی مانند بم، زابل، یزد، طبس، جاسک، و زاهدان مقدار ریزش های جوی کمتر از ۸۰ میلی متر و ایستگاه های بندرانزلی، رشت، نوشهر، و رامسر مقدار بارش بالای ۱۰۰۰ میلی متر را تجربه کرده اند. ایستگاه انزلی، با حدود ۱۷۶۳ میلی متر

بـارش، در میان هم ایستگاه های مورد مطالعه، بیشترین بارش و ایستگاه زابل با حدود ۵۲ میلی متر کمترین بـارش را در طـی دوره مطالعاتی داشته است

در کشور میزان بارش در سال های گوناگون دارای تغییرات زیادی است و از سالی به سال دیگر متفاوت است. به طور میانگین ، بیشترین بارش همه ایستگاه های مورد مطالعه در دوره زمانی ۱۹۸۲-۲۰۱۲ مربوط به سال های ۱۹۸۲ به میزان حدود ۴۸۰ میلی متر و کمترین بارش نیز مربوط به سال ۲۰۱۰ به میزان حدود ۲۶۱ میلی متر است. البته ، با توجه به دخیل نشدن بسیاری از ایستگاه های موجود ، به خصوص نواحی داخلی و شرق ایران ، این مقدار بارش نمی تواند نماینده کل بارش ایران باشد.

شاخص PRCPTOT

بررسی شاخص کل بارش سالانه در روز های مرطوب (PRCPTOT) در ایران نشان می دهد که در طی دوره مورد مطالعه شیب بارش در بیشتر ایستگاه ها کاهشی است. این شیب منفی در برخی مناطق شدیدتر و در برخی ملایم تر است. به طور میانگین ، در کل ایران در دوره ۱۹۸۲-۲۰۱۲ بارش کل سالانه حدود ۲.۵ میلی متر در سال با کاهش مواجه است. با توجه به روند داده های مشاهداتی ، بیشترین شیب کاهشی در شاخص PRCPTOT مربوط به ایستگاه رشت ، سنندج و سقز است. البته ، علاوه بر این ، ایستگاه های انزلی ، رامسر و خرم آباد نیز در دوره مطالعاتی شیب کاهشی فراوانی دارند و تقریبا بالای ۹ میلی نتر در سال با کاهش مواجه است (شکل ۳).

در پژوهشی رحیم زاده (۲۰۰۶) تغییرات اندازه های حدی بارش در ایران را بررسی کرد. نتایج پژوهش ایشان نشان داد که روند شاخص های بارش در کشور مانند دیگر نقاط از الگوی یکسانی پیروی نمی کند و این روند در برخی مناطق کاهشی بود و فاصله از منابع رطوبتی و موقعیت جغرافیایی از عامل های موثر بر تغییرات شاخص PRCPTOT بود.

حداکثر بارش یک روزه (Rx1day)

به دلیل اثرات مخرب و زیان بارشان بر طبیعت ، لازم است مورد بررسی دقیق قرار بگیرند و در مدت زمان برنامه ریزی برای امور مختلف کشاورزی ، عمرانی و ... بایستی از لحاظ شدت و مدت فراونی کاملا مورد توجه باشند.در بین ایستگاه های مورد مطالعه ، بیشترین مقدار بارش ۲۴ ساغته مربوط به ایستگاه رامسر و بعد از آن ایستگاه نوشهر است. از نظز منطقه ای ، بیشترین مقادیر بارش ۲۴ ساعته مربوط به ایستگاه های واقع در نوار ساحلی شمالی و بعد از ان ایستگاه ملی واقع در نوار جنوبی و جنوب غربی است. در واقع ، یکی از عوامل موثر در میزان بارش ۲۴ ساعته ی ایستگاه های مورد

مطالعه دوری یا نزدیکی به منابع رطوبتی است.کمترین مقادیر بارش ۲۴ ساعته مربوط به ایستگاه های یزد ، زابل ، طبس و بم است (شکل ۴).

تعداد روز های با بارش مساوی و بالاتر از ۱۰(R10mm)

از نظر شاخصR10m m ، در بین ایستگاه های مورد مطالعه حدود ۱۳.۳ درصد روند افزایشی دارند و حدود ۸۶.۳ درصد نیز روند کاهشی دارند. بیشترین شیب افزایشی این شاخص مربوط به ایستگاه اصفهان است ودر رتبه بعد ایستگاه های شرق اصفهان ، کاشان و آباده قرار دارند. بیشترین شیب کاهشی مربوط به ایستگاه سنندج است و در رتبه بعد ایستگاه های خرم اباد ، رشت و سقز قرار دارند(شکل ۵).

روز های خیلی مرطوب(R95p)

منظور از شاخص R95p ، مجموع بارش روز های متوالی با میزان بارش بیش از صدک ۹۵ ام دوره پایه است. در میان ایستگاه های مورد مطالعه ، ایستگاه رامسر بیشترین شیب کاهشی شاخص R95p را تجربه کرده است و از این نظر ایستگاه های بعد از آن به ترتیب سقز ، رشت ، سنندج و بندرعباس می باشد. ایستگاه گرگان بیشترین روند افزایشی شاخص مورد نظر را در بین ایستگاه ها داراست و ایستگاه های شیراز ، بجنورد ، اصفهان و چابهار نیز به ترتیب در ردیف های بعدی قرار دارند (شکل ۶).

نتیجه‌گیری

پدیده تغییر اقلیم در دوران های گوناگون زمین شناسی از گذشته تا کنون وجود داشته و واقعه جدیدی نمی باشد و منحصر به عصر حاضر نیست. اما آنچه که پدیده تغییر اقلیم در قرن حاضر را با گذشته متمایز می نماید ، ماهیت ، شدت و سرعت تغییر اقلیم می باشد. علت پدیده تغییر اقلیم در گذشته صرفا طبیعی بوده است. این در صورتی است که علل غیر طبیعی و اقدامات و فعالیت های انسانی در سال های اخیر در وقوع یا سرعت بخشیدن به این واقعه موثر بوده است و این امر یکی از مهم ترین چالش های پیش رو بشر می باشد.تغییر اقلیم در بسیاری از نقاط جهان آثار خود را در دهه های اخیر به جای گذاشته و انتظار می رود در دهه های آینده اثرات این تغییرات تشدید شود. پژوهش های پرشمار نشان می دهند که تغییرات اقلیم در سراسر جهان منجر به تغییرات شاخص های حدی بارش می شود.این تغییرات شامل کاهش دامنه بارش و تغییر الگوی بارش هستند. با تغییر الگوی بارش ، اندازه بارش های سنگین افزایش یافته و موجب رخداد سیلاب و خسارت های جدی و تغییرات در تعادل آب و هوا می شود. در گزارش پنجم IPCC در دوره ۱۹۹۰-۲۱۰۰

گزارش شده است که افزایش گرمایش جهانی موجب تغییر نمایه های حدی بارش ، دما و افزایش شدت و فراوانی رخداد های حدی مانند سیل و خشکسالی شده است وبر زندگی انسان و موجودات زنده تاثیر گذار بوده است. نتایج این پژوهش ، که برای دوره ۱۹۸۲-۲۰۱۲ انجام گرفته ، به طور خلاصه به صورت ذیل می باشد : به طور میانگین ، در کل ایستگاه های مورد مطالعه در دوره ۱۹۸۲-۲۰۱۲ شاخص بارش کل سالانه PRCPTOT حدود ۲.۵ میلی متر در سال با کاهش مواجه است. از نظر حداکثر بارش ۲۴ ساعته (Rx1day) و شاخص روز های خیلی مرطوب بیشتر ایستگاه های کشور به خصوص ایستگاه های واقع در سواحل شمال کشور دارای شیب کاهشی است. بررسی ها نشان داد که شاخص R10mm روند کاهشی شدید تری را داراست. نتیجه تحقیق حاضر با نتایج به دست آمده در منطقه خاورمیانه و سایر مطالعات انجام شده در منطقه همخوانی نسبی دارد. در بیشتر این مطالعات ، میزان کلی بارش های سالانه دارای شیب منفی است. بنابراین ، با توجه به وضعیت منابع آب در کشور و همچنین مدیریت ضعیف منابع آب در بخش های مختلف ، بی نظمی بارش ها در کشور نیز یکی از عوامل هم افزا در ایجاد شرایط بحران آب در اینده خواهد بود. وابستگی بخش عمده جمعیت کشور به بخش کشاورزی لزوم توجه به روند و وضعیت بارش های کشور ، آینده نگری درباره ی آن و همچنین اثر های آن بر وضعیت کمی و کیفی منابع آب و مشخص کردن پهنه های آسیب پذیر کشور را بیش از پیش آشکار می سازد.

منابع

اسدی، ا. و حیدری، ع. (۱۳۹۰). تحلیل تغییرات سری های دما و بارش شیراز طی ۲۰۰۵-۱۹۵۱، مجله جغرافیا و برنامه

تقوی، ف. و محمدی، ح. (۱۳۸۶). بررسی دوره بازگشت رویداد های اقلیمی حدی به منظور شناخت پیامد های زیست محیطی، محیط شناسی، ۳۳(۴۳): ۱۱-۲۰.

جاوری ، مجید(۱۳۸۰)، تغییرت دما و بارش در ایران، پایان نامه دکترای جغرافیا، دانشگاه تهران.

خورشید دوست، ع.، زنگنه، سعید. و زراعی، یوسف.،۱۳۹۲. تحلیل و بررسی روند شاخص های حدی دما و بارش بر اساس سری های زمانی روزانه ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه در دوره آماری ۴۸ ساله (۲۰۰۹-۱۹۶۱)، سی دومین گردهمایی و نخستین کنگره بین المللی تخصص علوم زمین، سازمان زمین شناسی و اکتشتفات معدن، ص۱-۷.

رحیم زاده، ف. دزفولی، ه و پوراصغریان،آ.(۱۳۹۰). ارزیابی روند و جهش نمایه های حدی دما و بارش استان هرمزگان، مجله توسعه جغرافیایی، ۲۱: ۹۷-۱۱۶.

رحیم زاده و عسگرری (۱۳۸۲)، نگرشی بر تفاوت نرخ افزایش دمای حداقل و حداکثر و کاهش دامنه شبانه روزی دما، فصل نامه تحقیقات جغرافیایی، شماره ۷۳، ص ۱۵۳-۱۷۱.

فتحیان، ف. قدمی، م.، حقیقی، پ.امینی، م.، نادری، س.(۲۰۲۰). ارزیابی تغییرات در حد های اقلیمی دما و بارش در ایران.

عباس، ا. بهاتی، س.۲۰۲۳. پیش بینی بارش های حدی در جنوب آسیا از مدل های گردش عمومی جو. مجله سرزمین های خشک، ۱۵(۳): ۲۷۴-۲۹۶.

عساکره، ح. (۱۳۹۱). تغییر توزیع فراوانی بارش های فرین شهر زنجان، مجله جغرافیا برنامه ریزی محیطی، ۲۳(۴۵): ۶۶-۵۱.

عسگری، ا. رحیم زاده، ف. محمدیان، ن. و فتاحی، ا.(۱۳۸۶). تحلیل روند نمایه های بارش های حدی در ایران، تحقیقات منابع آب ایران، ۳(۳).

علوی نیا، ش. زراعی، م.۲۰۲۱. تحلیل تغییرات مکانی بارش های حدی و دما در ایران طی یک دوره ۵۰ ساله. مجله بین المللی اقلیم شناسی.

علوی نیا، ش. زارعی، م.۲۰۲۲. تحلیل روند تغییرات اقلیمی با استفاده از شاخص های حدی بارش و دمای بلند مدت.

علیجانی، ب.(۲۰۰۷). تحلیل سری های زمانی تغییر پذیری بارش روزانه و رویداد های حدی .مقاله در دهمین نشست بین المللی اقلیم شناسی آماری، پکن، چین.

غم دیده، ا.(۱۳۸۸). اثرات تغییرات اقلیمی بر دما وبارش بر اساس خروجی های مدل GCM مطالعه موردی: استان کردستان، پایان نامه کارشناسی ارشد ، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی.

سومین کنفرانس ملی آب و هواشناسی ایران (با محوریت تغییر اقلیم)
The 3rd National Conference on Climatology of Iran (Focusing on Climate Change)
ارومیه ۱۶ مهر ۱۴۰۴

ناحیه بندی منطقه ای و محلی بارش های استان آذربایجان غربی

عاطفه حسینی صدر[۱]، غلام حسن محمدی[۲]

۱- گروه جغرافیا، دانشگاه پیام نور، صندوق پستی ۳۶۹۷-۱۹۳۹۵، تهران، ایران
۲- دکتری آب و هواشناسی، سازمان هواشناسی کشور، اداره کل هواشناسی استان آذربایجان شرقی، تبریز، ایران
آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول (Sadr88@pnu.ac.ir)

چکیده

آگاهی از توزیع جغرافیایی بارش ها در هر منطقه ای به دلیل استفاده گسترده آن در کشاورزی، منابع آب، صنعت و بهره برداری از سدها و نیز آبیاری حائز اهمیت است. به لحاظ گسترش استان آذربایجان غربی در میان۴درجه عرض جغرافیایی، وضعیت توپوگرافی و پراکندگی کوهها و تاثیرپذیری از سامانه‌های سینوپتیک متفاوت در فصول مختلف سال دارای مقدار و پراکندگی بارش نامتقارنی است. لذا، مطالعه مقدار بارش و ناحیه بندی منطقه ای و محلی آن در این استان انگیزه اصلی ما برای انجام این تحقیق را شکل داد.

برای انجام این کار بعد از تهیه داده‌های جمع بارش ماهانهٔ ۹۴ ایستگاه هواشناسی؛ بارش‌های این ایستگاهها در محیط GIS وارد شده و با بکارگیری روش‌های زمین-آماری کریجینگ درون‌یابی شده و نقشه پراکندگی بارش سالانه استان ترسیم شد. با استفاده از قابلیت‌های نرم‌افزار ARC GIS میانگین وزنی برای آنها اجرا شده و نمودار کاربردی مقدار-مساحت بارش برای استان تهیه شد. سپس با تهیه ماتریس داده‌های بارش ماهانه ایستگاههای هواشناسی و وارد کردن آنها در محیط نرم‌افزار SPSS؛ تحلیل خوشه‌های سلسله مراتبی Ward بر روی داده‌ها اجرا گردید. با انجام عملیات برش دندوگرام در دو مرحله و استفاده از قابلیت‌های سامانه اطلاعات جغرافیایی(GIS) نواحی بارشی استان آذربایجان غربی در مقیاس منطقه‌ای و محلی ترسیم گردید. یافته‌های تحقیق حاکیست میانگین وزنی بارش سالانه در استان آذربایجان غربی ۳۴۲/۵ میلیمتر محاسبه شده است اما طبق نمودار توزیع مقدار-مساحت بارش اکثر قریب به اتفاق مناطق استان کمتر از این مقدار بارش دریافت می‌کنند. ناحیه بندی بارش استان سه ناحیه بارشی منطقه‌ای نشان داد که با عنوان نواحی بارشی نیمه‌خشک، نیمه خشک و نیمه مرطوب نامگذاری شدند. در مرحله آخر هر کدام از نواحی به نواحی بارشی کوچکتر(نواحی بارشی محلی) تقسیم شده و نقشه‌های هرکدام در محیط سامانه اطلاعات جغرافیایی ترسیم شد.

کلید واژه‌ها: بارش، ناحیه بندی منطقه ای و محلی، تحلیل خوشه ای، سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)، استان آذربایجان غربی

مقدمه

عنصر بارش یکی از عناصر مهم اقلیمی است که از دیر باز مورد توجه بشر بوده است. اهمیت زیاد این عنصر از یک طرف و نوسانات فراوان آن از طرف دیگر سبب شده که اقلیم شناسان به دنبال یافتن روشهایی برای بیان ویژگی های بارش باشند. بارندگی در سطح کره زمین دارای تغییرات مکانی و زمانی زیاد است. میانگین بارندگی در سطح کره زمین بین ۷۰۰ تا ۹۰۰ میلی متر در سال تخمین زده شده است. این پارامتر مهم آب و هوایی از عوامل جوی می باشد که تغییرات آنها از روند خاصی پیروی نمی کند و عوامل زیادی از قبیل شرایط همدیدی، وضعیت توپوگرافی، دوری و نزدیکی از منابع آبی، عرض جغرافیایی و غیره در تغییرات آنها دخیل می باشد. توزیع جغرافیایی و الگوی پراکندگی بارش به دلیل استفاده گسترده آن در کشاورزی، منابع آب، صنعت و بهره برداری از سدها و نیز آبیاری حائز اهمیت است. لذا شناخت وضعیت بارش مناطق از حیث مقدار بارش، نحوه توزیع آن در طول سال و شناسایی عوامل سینوپتیکی ایجاد کننده چنین شرایطی امری ضروری بوده و می تواند مدیران محلی را در برنامه ریزی دقیقتر یاری رساند.

استان آذربایجان غربی به لحاظ گسترش در میان ۴ درجه عرض جغرافیایی، وضعیت توپوگرافی و پراکندگی کوهستان ها و برخورداری از سامانه های سینوپتیک مختلف با اثرگذاری های متفاوت در فصول مختلف سال دارای پراکندگی بارش ناموزونی است. به همین خاطر مطالعه پراکندگی جغرافیایی بارش ها و ناحیه بندی آن انگیزه اصلی ما برای انجام این تحقیق را شکل داد. یافته های این مطالعه به لحاظ کاربرد در برنامه ریزی و مدیریت محیط از اهمیت زیادی برخوردار است. می دانیم که در دهۀ اخیر بحران خشک شدن دریاچه ارومیه به عنوان یک چالش منطقه ای بسیاری از دستگاههای علمی و اجرایی کشور مخصوصاً شمال غرب کشور را به چالش کشیده است. به لحاظ اینکه بخش بزرگی از حوضه آبریز این دریاچه در استان آذربایجان غربی قرار دارد؛ ضرورت انجام این تحقیق را دو چندان کرده است.

اهمیت پراکندگی بارش‌ها در مدیریت منابع آب و بخش کشاورزی مخصوصاً مدیریت کشت دیم بر کسی پوشیده نیست. به طوری که طبق مطالعات دین‌پژوه و موحددانش(۱۳۷۵) در شمال غرب کشور و محمدی(۱۳۸۵) در محدوده استان آذربایجان غربی؛ تنها با بررسی و مطالعه بارش‌ها می‌توان توانمندی‌های مناطق برای کشت گندم دیم (و احتمالاً برای اکثر کشت‌های دیم) را مشخص کرد.

مطالعات انجام شده در رابطه با بارندگی همانند رژیم بارش، ناحیه بندی مناطق بارش، نوسانات بارشی و به طور کلی تغییرات بارش در جهان سابقه ای طولانی دارد. آنیادیک (۱۹۹۲) تغییرات بارش ماهانه و سالانه مناطق مرکزی و جنوبی نیجریه را در یک دوره ۷۲ ساله بررسی نموده است. او با تحلیل بارش به عدم تصادفی بودن ریزش بارش در منطقه پی برده است و به بررسی روند (نزولی) و تغییرات دوره ای بارش پرداخته است. فاول و فاول(1993) ضمن شرح مفصل

روش‌های ناحیه‌بندی تحلیل عاملی و خوشه‌ای، با استفاده از دما و بارش ماهانه ۳۴۳ ایستگاه ایالت متحده، تنوع اقلیم این کشور را تعیین کرده و دقت نتایج را با روش کوپن مقایسه کردند. دمروس و راناتونگ (۱۹۹۳) در مطالعه ای بارش آماری برای ناحیه بارش های روزانه در سریلانکا با استفاده از داده های روزانه بارش ۴۲ ایستگاه هواشناسی طی یک دوره ۱۵ ساله از ۱۹۷۱ تا ۱۹۸۵ نوسانات بارش نواحی مختلف سری‌لانکا با استفاده از روش چرخش واریماکس و تحلیل عاملی بررسی نمودند. آنها بر اساس عامل های بدست آمده بارش های سینوتیک را تفسیر و تحلیل نمودند و نشان دادند که فصلی بودن بارش های روزانه در این کشور متاثر از کمبود همگرایی حاره‌ای و توپوگرافی منطقه مورد مطالعه است. گردیسمن (۲۰۰۰) با یک سری صد ساله بارش متوسطه سالانه به تحلیل تغییرات بارش مناطقی از روسیه و اروپا و آمریکای شمالی پرداخته است. او به روند افزایش بارش حدود ۶ درصد در ۱۰۰ سال در عرض‌های ۳۰ تا۷۰ درجه شمالی اشاره کرده است. همچنین معتقد است بیشتر افزایش بارش را می توان در ۵۵ درجه شمالی جستجو کرد.

در ایران تحقیقات و پژوهش های فراوانی در مورد تفاوت های زمانی و منطقه ای صورت گرفته است. در تقسیم‌بندی کلی آب و هوای ایران، آذربایجان غربی جزء آب و هوای معتدل کوهستانی آمده است. با توجه به متغیرهای مورد مطالعه از دیدگاه محققین تقسیم‌بندیهای متفاوتی از استان آذربایجان غربی ارائه شده است به عنوان اولین مطالعات علیجانی (۱۳۷۵) با استفاده از بارش سالانه و تعداد روزهای یخبندان، ایران را به ۶ منطقه تقسیم کرده است و آذربایجان غربی به همراه کردستان، خراسان، کرمان و زاگرس شمالی در یک ناحیه قرار گرفته‌اند. ذوالفقاری و ساری صراف (۱۳۷۷) نیز در مطالعه بارش‌های شمال غرب ایران استان آذربایجان غربی را به سه ناحیه‌ی بارشی تقسیم کرده‌اند. علیجانی (۱۳۷۳) با تجزیه و تحلیل آمار و بارش ماهانه ۱۰۸ ایستگاه باران سنجی به مدت ۱۳ سال و ترسیم نقشه های متفاوت نشان داده است که مقدار بارش در طول سال و فصول مختلف بسیار متنوع است که حاکی از تنوع شدید بارش مکانی است. علیجانی(۱۳۷۴) با در نظر گرفتن ویژگی های مهم بارندگی و با استفاده از روش سینوپتیک آذربایجان غربی و زاگرس را در قالب یک ناحیه بارشی ارایه نموده است. غیور و مسعودیان (۱۳۷۵) با بررسی الگوی تغییرات زمانی و مکانی بارندگی کشور به این نتیجه رسیدند که تغییرات مکانی بارش در ایران در الگوی ناهمواری ها تبعیت می کند که همچنین با هدف شناسایی تغییرات زمانی مکانی میانگین مجموع بارش سالانه کشور ۲۹ نقشه همباران برای سال ۱۹۵۹ تا ۱۹۸۷ تهیه نموده و براساس حدود ۴۵۰ ایستگاه برای هر نقشه و بر پایه شبکه بندی ۱۴×۱۴ کیلومتر و با بهره گیری از روش کریچینگ، تغییرات بارش ایران را بررسی نموده اند. ذولفقاری (۱۳۷۷) در مقاله ای طی یک دوره آماری ۳۰ ساله با تقسیم بندی بارش های ماهانه فصل بهار به ۳ دوره مستقل ۱ ساله اشاره می کند که بیشتر بارش های غرب ایران در فصل بهار بوده و علت آن را نیز خروج جریان های بادآور غربی از منطقه می داند. ساری صراف (۱۳۷۷) با استفاده از روش تحلیل عاملی، تفاوت های زمانی و

مکانی بارش و عوامل موثر بر این تفاوت ها را مورد مطالعه قرار داده است. یافته های تحقیق وجود نواحی متعدد بارش در منطقه آذربایجان را به اثبات می رساند. ذولفقاری و ساری صراف(۱۳۷۸) در مقاله های تحت عنوان مطالعه بارش های شمالغرب ایران با تکیه بر تحلیل خوشه ای با استفاده از تکنیک چند متغیره تحلیل خوشه‌ای نتیجه گرفته اند که منطقه وسیع آذربایجان را به طور اعم نمی توان دارای تنها یک نظام بارشی دانست بلکه در مکان های مختلف عوامل مختلف بر بارش آذربایجان تاثیر می گذارد. ذولفقاری و ساری صداف(۱۳۷۸) نشان دادند که ناهواری ها و جهت گیری آنها نقش تعیین کننده‌ای در انتقال توده های هوا و چگونگی توزیع مکانی بارندگی در آذربایجان دارند. حیدری (۱۳۸۲) نیز بر اساس مقادیر کو واریانس بارش ماهانه ایستگاه هواشناسی با استفاده از روش ها تحلیل مولفه های اصلی و تجزیه و تحلیل خوشه ای اقدام به ناحیه بندی بارش در شمالغرب و غرب ایران کرده اند. ذولفقاری و همکاران (۱۳۸۸) با استفاده از داده های بالاترین بارش روزانه ۴۶ ایستگاه سینوپتیک ایران طی سال ها ۱۹۷۶ تا ۲۰۰۵ با استفاده از روش های آماری که شامل رگرسیون دو متغیره آنالیز واریانس و ... استفاده کرده و پهنه بندی اقلیمی ایستگاه های مورد مطالعه را از نظر نسبت بارش با وجود پنج منطقه اقلیمی نشان دادند و نتیجه گرفتند که با کاهش عرض جغرافیایی از شمال کشور میزان این نسبت افزایش می یابد و به رابطه معنی دار میان بارش سالانه و حداکثر بارش روزانه ایستگاه ها پی بردند. ساری صراف و محمدی(۱۳۸۵) با استفاده از داده‌های بارش ماهانه و متغیرهای دما(حداقل، میانگین و حداکثر) و با بکارگیری روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی(روش Ward) شمال غرب کشور را به ۵ ناحیه آب و هوایی متفاوت تقسیم کرده‌اند. در ایران پهنه‌بندی‌های اقلیمی ثابتی(۱۳۴۸)، علیجانی(۱۳۷۴)، حیدری(۱۳۷۸) نصیری (۱۳۸۰)، عزیزی(۱۳۸۳) از کوشش هائی دیگری است که برای شناسائی نواحی اقلیمی در سطح ملی و منطقه ای صورت گرفته است.

داده ها و روش ها

استان آذربایجان غربی در شمال غرب ایران واقع شده که با وسعت ۳۷۱۱۳/۴ کیلومتر مربع معادل ۲/۲۵ درصد از مساحت کشور را به خود اختصاص داده است (معاونت برنامه‌ریزی و بودجه وزارت کشاورزی، ۱۳۷۸: ۲). محدوده جغرافیایی استان بین ۴۴درجه و ۳۰دقیقه تا ۴۷درجه و ۲۳دقیقه طول شرقی و $^{\circ}۳۵$, $^{\prime}۵۸$ تا $^{\circ}۳۹$, $^{\prime}۴۷$ درجه عرض شمالی واقع شده است. در مطالعات آب و هواشناختی، آمار و اطلاعات آب و هواشناسی به عنوان اصلی ترین منبع اطلاعاتی به حساب می آیند. در این گونه مطالعات که محاسبات به صورت شبکه‌ای صورت می پذیرد، هر چه تراکم ایستگاهها بیشتر باشد نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل آمار و اطلاعات دقیق‌تر خواهد بود.

در بررسیهای اولیه، مبنای انتخاب ایستگاههای هواشناسی اعم از سینوپتیک، اقلیم شناسی و بارانسنجی، داشتن طول دوره آماری قابل قبول(۲۰ سال)، پیوسته بودن(نداشتن خلاء آماری) و پراکندگی آنها در سطح منطقه مورد ملاک قرار گرفت، بطوریکه پوشش مناسبی از ایستگاهها را در استان آذربایجان غربی ایجاد کند. با توجه به نکات فوق‌الذکر داده های تعداد ۹۴ ایستگاه هواشناسی از سازمان هواشناسی و شرکت آب منطقه‌ای استان آذربایجان غربی تهیه گردید که در شکل (۱) تراکم شبکه ایستگاهها به همراه نوع ایستگاهها نمایش داده شده است.

با توجه به هدف این تحقیق که مطالعه بارش‌های استان آذربایجان غربی و ناحیه‌بندی آن می‌باشد از متغیرهای مجموع بارش سالانه، بارش ماهانه، ارتفاع از سطح دریا[159]، طول و عرض جغرافیایی استفاده گردیده است. تجزیه و تحلیل این متغیرها با استفاده از نرم افزارهای مناسب و با اتکا به آمارهای ماهانه و سالانه انجام شد. داده‌های بارش تهیه شده از سازمان هواشناسی و شرکت آب منطقه‌ای در مقیاس‌های متفاوتی ثبت شده بودند(به ترتیب با تاریخ‌های میلادی و شمسی) که به منظور یکسان سازی داده‌ها هر دوی آنها بر اساس تاریخ زراعی(اول مهر هرسال تا آخر شهریور سال بعد) تنظیم شدند. ناحیه‌بندی براساس داده‌های بارش سال زراعی برای مدیریت کشاورزی و مدیریت منابع آب در استان مفید خواهد بود.

در این تحقیق به دلایل زیر طول دوره آماری ۲۰ ساله(سال زراعی ۷۸- ۱۳۷۷ تا ۹۷- ۱۳۹۶ شمسی) انتخاب گردیده است.

الف) با توجه به اهداف و روشهای مورد نظر در انجام این تحقیق و به دلیل اینکه تعداد ایستگاههای بیشتری مورد نیاز است؛ دوره‌ی آماری را کوتاهتر انتخاب گردید تا ایستگاههای بیشتر با پراکندگی مناسب در سطح استان مورد مطالعه قرار گیرد.

ب) به منظور افزایش دقت عملیات و بکار بردن آمار واقعی، همچنین به دلیل اینکه تقریباً همه مدلهای بازسازی داده ها با خطا همراه هستند؛ سعی شده است از آمار سازی خودداری شود.

در این مطالعه از قابلیت‌های سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی(GIS) برای برآورده شدن دو هدف مهم استفاده گردید. یکی برای تبدیل اطلاعات بارش از حالت نقطه‌ای(ایستگاه هواشناسی) به پهنه‌های بارش در سطح استان آذربایجان غربی است که در این راستا از تکنیک زمین آماری کریجینگ عمومی استفاده گردید. به این طریق که در ابتدا داده‌های بارش ایستگاهی در محیط GIS با تکنیک‌های مطمئن درون‌یابی شده و پهنه‌های بارش ایجاد گردید و سپس با بکارگیری قابلیت‌های این

159 - Elevation

سامانه در ایجاد آمارهای فضایی به محاسبه میانگین وزنی بارش و ترسیم نمودار مربوطه اقدام شد. همچنین از توانمندی-های GIS برای ترسیم نواحی بارشی(ناحیه‌بندی بارش‌ها) استان آذربایجان غربی در مقیاس منطقه‌ای و محلی استفاده شده است.

در این مطالعه برای ناحیه بندی اقلیمی از تحلیل خوشه‌ای استفاده شد. این تکنیک راهی است برای تقسیم یک مجموعه داده به زیرمجموعه‌های (خوشه‌ها یادسته‌ها) همگن و مفیدی که دارای ویژگی‌های مشابه باشند. داده‌هایی که همانند باشند در یک خوشه جا می‌گیرند و داده‌های ناهمانند درخوشه‌های جداگانه قرارمی‌گیرند(یارنال، ۱۹۹۳: ۲۸). در تحلیل خوشه ای برای اندازگیری فاصله از روش فاصله اقلیدسی[160] استفاده شد. این روش عمومی‌ترین روش محاسبه فاصله است که بطورساده فاصله هندسی در فضای چندی بعدی را اندازه گیری می‌کند. فرمول فاصله اقلیدسی به صورت زیر است(فرج زاده،۱۳۸۹: ۱۰۳):

$$(x,y) = \{\sum_i (x_i - y_i)^2\}^{\frac{1}{2}}$$

برای روش ترکیب پارامترها از روش وارد[161] استفاده شده است. این روش نسبت به سایر روشها به دلیل این که از رویکرد تحلیل واریانس برای ارزیابی فاصله بین خوشه‌ها استفاده می‌کند تفاوت دارد(فرج زاده، ۱۳۸۹).

یافته های تحقیق

در مطالعه حاضر برای بررسی پراکندگی مکانی بارش‌های سالانه‌ی استان آذربایجان غربی از داده‌های ۹۴ ایستگاه هواشناسی(بر اساس ایستگاههای نشان داده شده در شکل ۱) استفاده شد بدین ترتیب که بعد از مرتب سازی داده ها و وارد کردن اطلاعات به سامانه اطلاعات جغرافیایی و اجرای فرمان درونیابی کریجینگ نقشه پراکندگی جغرافیای بارش ترسیم شد(شکل ۲). همانطور در شکل مشخص است میزان بارندگی‌های استان آذربایجان غربی از شمال و شمال شرق به طرف جنوب و جنوب غرب افزایش می‌یابد. کمترین میزان بارندگی‌ها در سواحل رودخانه ارس در شهرستان‌های پلدشت و ماکو و مناطق شرق شهرستان خوی و شمال شهرستان میاندوآب می‌باشد. بیشترین بارندگی‌ها نیز جنوب غرب استان در شهرستان‌های سردشت و پیرانشهر مشاهده می‌گردد. با دقت در پراکندگی بارش‌ها می‌توان به راحتی نقش پراکندگی ارتفاعات را در میزان دریافت بارش در شمال غرب استان در شهرستان‌های چالدران و در جنوب شرق استان در شهرستان-های تکاب و شاهیندژ پی برد. در بررسی ایستگاهی بارش‌های استان؛ ایستگاههای شوطلو، موسی قلی و پلدشت با میانگین بارش سالانه‌ی ۱۵۲/۶، ۱۷۱/۶ و ۱۹۹/۵ میلی‌متر کمترین میزان بارندگی ها را در استان دریافت می‌کنند. و ایستگاههای

160- Euclidean distance

161 - ward

سردشت، کرزال و بریسو به ترتیب با میانگین ۸۷۹/۴، ۸۰۸/۹ و ۶۶۸/۲ میلی‌متر بیشترین بارندگی‌های استان آذربایجان غربی را دریافت می‌کنند.

به منظور ارتقاء دقت محاسبات مربوط به تعیین میانگین بارش و نحوه توزیع مقادیر بارش در استان آذربایجان غربی از روش میانگین‌گیری وزنی با استفاده از قابلیت‌های سامانه اطلاعات جغرافیایی ARC GIS استفاده گردید. در این راستا میانگین بارش سالانه در استان ۳۴۲/۵ میلی‌متر محاسبه شده است. اما نکته قابل توجه در این زمینه این است که همانطور که در نمودار نیز مشخص است؛ با وجود اینکه میانگین بارندگی استان ۳۴۲/۵ میلیمتر محاسبه شده است ولی اکثر مناطق استان کمتر از آن بارندگی دریافت می‌کنند. بیشترین مساحت استان نزدیک به ۳۰۰ میلمتر بارندگی داشته و مناطقی که بیش از ۵۰۰ میلمتر دارند دارای مساحت نسبتاً کمی می‌باشند. این مسئله توجه هرچه بیشتر مسئولین اجرایی استان را می‌طلبد که در تصمیم‌گیری‌ها و برنامه‌ریزی‌های محیطی در استان تنها براساس میانگین بارش سالانه قضاوت نکنند. باید توجه گردد که این نوع تغییرات زیاد در پراکندگی مقادیر بارش در استان آذربایجان غربی می‌تواند منشاء ایجاد محدودیت-هایی از لحاظ امکان طراحی و اجرای برنامه واحد برای کل مناطق استان و همچنین باعث شکل‌گیری توانمندی‌هایی در ایجاد تنوع آب و هوایی در استان گردد.

به منظور منطقه بندی بارشهای استان آذربایجان غربی؛ داده‌های بارش ماهانه و سالانه برای ۹۴ ایستگاه مورد مطالعه در دوره آماری ۲۰ ساله(ماتریسی به ابعاد ۹۴×۲۶۰) در محیط نرم‌افزار SPSS وارد گردید. با اجرای روش خوشه بندی Ward با در نظر گرفتن فاصله اقلیدسی[162]؛ خوشه‌های همگن(ایستگاههای مشابه) استخراج شدند. نمودار درختی[163] ایجاد شده توسط نرم افزار در شکل پیوست ۱ ارائه شده است. هدف از اجرای این آماره منطقه بندی بارش‌های استان به صورت منطقه‌ای و محلی است. به این منظور نمودار درختی ایجاد شده در دو مرحله(با دو دید منطقه‌ای و محلی) بُرش داده شد. همانطور که در نمودار درختی نیز کاملاً مشهود است در دید اول می‌توان سه گروه متفاوت از ایستگاهها را تشخیص داد. برای درک بهتر؛ نواحی بارشی استان طوری در محیط GIS پهنه‌بندی گردید که به طرز صحیحی نواحی متفاوت بارشی استان را از هم تفکیک کند. نواحی مذکور در شکل ۴ به صورت نقشه نشان داده شده است. همانطور که در نقشه نیز به شکل واضحی نمایش داده شده است سه ناحیه بارشی در استان ایجاد شده است. ناحیه اول در مناطق شمالی(شامل شهرستان‌های پلدشت، ماکو، بخشی از شهرستان شوط، بخشی از شهرستان خوی، سلماس، چالدران و چایپاره)، بخشی از سواحل غربی دریاچه ارومیه و در مناطق جنوبی استان در شهرستان میاندوآب، شاهیندژ، مناطق شمالی مهاباد و بوکان،

162 - Euclidean Distance

163 - Dendogram

شمال غرب تکاب و شرق نقده را در برگرفته است. این ناحیه نسبت به نواحی دیگر استان بارش‌های کمتری دریافت می‌کنند. به این خاطر ناحیه مذکور با عنوان ناحیه نیمه خشک نام گذاری شده است. با مراجعه مجدد به خوشه اول(ناحیه محلی) به این نتیجه رسیدیم که می‌توان این ناحیه را به سه ناحیه محلی(ناحیه بندی محلی بارش) تقسیم کرد. لذا با استفاده از قابلیت‌های نرم افزار Arc GIS خشک به نقشه تبدیل شد. این نواحی در شکل ۵ نواحی بارشی محلی واقع در بطن ناحیه نیمه با نام‌های A1، A2 وA3 (با تن رنگ‌های متفاوت قهوه‌ای) مشخص شده‌اند.

ناحیه دوم با عنوان ناحیه نیمه مرطوب نام گذاری شده است که تکه اول آن به صورت نواری در میان شهرستانهای خوی، چایپاره، شوط و ماکو کشیده شده و بدنه اصلی آن مناطق مرکزی و جنوبی استان را در برگرفته است. علت نام گذاری آن با عنوان نیمه مرطوب این است که نسبت به ناحیه اول میزان بارندگی های آن نسبتاً بیشتر است. با دقت در ساختار خوشه‌بندی این ناحیه نیز سه ناحیه محلی بارش قابل تشخیص است. این نواحی نیز در محیط GIS ترسیم شده و در شکل ۴-۴۲ با نام‌های B1، B2 وB3 (با تن رنگ‌های متفاوت سبز) مشخص شده‌اند.

ناحیه سوم که در نواحی جنوب غرب استان آذربایجان غربی(سردشت، پیرانشهر و مهاباد) شکل گرفتند به میزان قابل ملاحظه¬ای بیشتر از مناطق دیگر استان بارندگی دریافت می کنند. این ناحیه بیشترین بارندگی ها را در دوره سرد سال از سیکلون های مدیترانه دریافت می کنند. به همین دلیل این ناحیه را با عنوان ناحیه مرطوب نام گذاری شده است. در داخل این ناحیه دو ناحیه بارشی محلی قابل تشخیص است که در شکل۵ با نام های C1 وC2 (با تن رنگ های متفاوت آبی) مشخص شده اند.

نتیجه گیری

آگاهی از پراکندگی مکانی بارش و ناحیه بندی آن در مناطق مختلف امری ضروری بوده و می‌تواند مدیران محلی را در برنامه‌ریزی دقیقتر یاری رساند. گسترش شمال-جنوب استان آذربایجان غربی به میزان۴درجه عرض جغرافیایی، داشتن توپوگرافی ناهمگون و برخورداری از سامانه‌های همدیدی مختلف با اثرگذاری‌های متفاوت در فصول مختلف سال باعث ایجاد اختلاف قابل ملاحظه بارش در نواحی مختلف گردد. بررسی پراکندگی مکانی بارش‌ها و ناحیه بندی آن در مقیاس منطقه ای و محلی در استان آذربایجان غربی هدف اصلی ما برای انجام این مطالعه را شکل داد. لازمه انجام چنین مطالعه ای بکارگیری تعداد زیادی از ایستگاههای هواشناسی است. لذا این کار با جمع آوری داده های بارش ماهانه ۹۴ ایستگاه هواشناسی که جغرافیای استان آذربایجان غربی را به شکل مناسبی پوشش داده بودند؛ آغاز شد. با گردآوری داده های و

وارد کردن آنها در محیط نرم افزارهای کاربردی تحلیل داده ها انجام شد. در ابتدا با بکارگیری روش‌های زمین آماری پراکندگی بارش در این استان به نقشه تبدیل شد. میانگین بارش سالانه استان آذربایجان غربی ۳۴۲/۵ میلیمتر محاسبه شده است. اما بررسی نمودار توزیع مقدار-مساحت بارش حاکی از این است که اکثر قریب به اتفاق مناطق استان کمتر از این مقدار بارش دریافت می کنند. سپس با اجرای روش خوشه بندی سلسله‌مراتبی Ward؛ خوشه بندی بارش های ایستگاهها انجام شدشدند. نتیجه اجرای این روش سه ناحیه بارشی منطقه‌ای ایجاد گردید که به نواحی بارشی نیمه‌خشک (شامل ۳ ناحیه محلی)، نیمه مرطوب (شامل ۳ ناحیه محلی) و نسبتاً مرطوب (با ۲ ناحیه محلی) تفکیک شدند.

منابع

- آریانپور، جمشید و پرویز سبزی پرور (۱۳۸۴)؛ جغرافیای استان آذربایجان غربی، وزارت آموزش و پرورش، سازمان پژوهش و برنامه ریزی آموزشی، چاپ ششم.
- پژوهشکدهٔ هواشناسی،۱۳۷۹: پهنه بندی اقلیمی ایران در دوره‌های مختلف با استفاده از تحلیل خوشه‌ای (پروژه آشکارسازی تغییر اقلیم در ایران) گزارش شمارهٔ ۱۴، سازمان هواشناسی کشور، تهران.
- حیدری، حسن (۱۳۸۴)؛ «ناحیه بندی بارش شمالغرب و غرب ایران بر مبنای تحلیل مولفه های اصلی مقادیر کوواریانس»، مجله پژوهشهای جغرافیایی.
- خلیلی (۱۳۵۲)؛ شناخت علمی اقلیمها، نشریه هواشناسی سازمان هواشناسی کشور.
- دین پژوه، یعقوب و علی اصغر موحد دانش. (۱۳۷۵)؛ تعیین مناطق مساعد برای تولید غلات دیم با توجه به بارشهای ماهانه آذربایجانشرقی، غربی و اردبیل، مجلهٔ نیوار، شمارهٔ ۳، صفحات: ۳۸-۲۵.
- ذوالفقاری، حسن و بهروز ساری صراف(۱۳۷۸)؛ «تحلیل بارشهای شمال غرب ایران با تکیه بر تحلیل خوشه ای». نشریه دانشکده ادبیات و علوم انسانی دانشگاه فردوسی مشهد، سال سی و یکم، شماره های اول و دوم.
- رسولی، علی اکبر (۱۳۷۴)؛ توزیع آماری بارشها روزانه آذربایجان، مجموعه مقالات هفتمین کنگره جغرافیایی ایران، جلد دوم، دانشگاه تهران.
- رضیئی، طیب و قاسم عزیزی (۱۳۸۷)، «بررسی توزیع مکانی مکانی بارندگی فصلی و سالانه در غرب ایران»، مجله پژوهش های جغرافیایی، شماره ۶۵.
- ساری صراف، بهروز و غلام حسن محمدی، ۱۳۸۵، بررسی پراکندگی خرداقلیم ها در شمال غرب کشور، مجله دانشکده علوم انسانی و اجتماعی دانشگاه تبریز، شماره زمستان.

- علیجانی ، بهلول، ۱۳۸۰: تیپ‌های هوا و اثر آنها بر اقلیم ایران، کاوش نامه، سال دوم، شماره ۴۲.
- علیجانی، بهلول و مجید زاهدی (۱۳۸۳)؛ تحلیل آماری و سینوپتیک بارندگی آذربایجان، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی شماره ، صفحات ۲۱۷- ۲۰۲.
- علیجانی، بهلول(۱۳۸۳)؛ آب و هوای ایران، تهران: انتشارات دانشگاه پیام نور، چاپ ششم.
-غیور، حسنعلی و سید ابوالفضل مسعودیان (۱۳۷۵)؛ «بررسی رابط مکانی بارش با ارتفاع در ایران زمین» فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، شماره ۴۱.
- مخدوم، مجید و همکاران(۱۳۸۰)؛ ارزیابی و برنامه ریزی محیط زیست با سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) ، تهران انتشارات دانشگاه تهران.
- مسعودیان، سید ابوالفضل، ۱۳۸۲: نواحی اقلیمی ایران، مجلهٔ جغرافیا وتوسعه، شماره پاییز و زمستان، صفحات ۱۷۱ الی ۱۸۴.
- معاونت برنامه‌ریزی و بودجه وزارت کشاورزی، ۱۳۷۸؛ مطالعات سنتزاستانی طرح جامع توسعه کشاورزی (استان آذربایجان غربی)، جلد دوازدهم : ۴۲-۳.

Anyadike, R.N.C., 1992. Seasonal & Annual Rainfall Variations over Nigeria, International Journal of Climatology, Vol.13, Nov 1992.
Fovel, R.G. and Fovel, M.C. 1993. Climate zones of the conterminous United States define using cluster analysis, Journal of climate, 6: 2103-2135.
Kalkstein, LS, Tan GR, Skindlor JA. 1987. An evaluation of 3 clustering procedures for use inn synoptic climatologically classification, journal of climate and applied meteorology 26: 717-730.
Milligan, G.W. and cooper, M.C. (1986). An examination of procedures the number of clusters in a data set. Psychometrical. 50, 159179
Wolter, K.(1994). Cluster Analysis in climate variability Research Recent Developments proceedings of the 5th International meeting on statistical climatology.
Yurdanur unal, Tayfun Kidnap and Mehmet karaka. 2003. Redefining the Climate zones of turkey using cluster analysis. Int. J. Climatol. 23: 1045-1055.

Regional and local zoning of annual precipitations over West Azarbaijan Province

Atefeh Hoseini Sadr[1]*, Gholam Hasan Mohammadi[2]

Department of Geography, Payame Noor University (PNU), PO BOX 19395-3697 Tehran, I. R. of Iran.
2- Ph.D. in Climatology, Iranian Meteorological Organization (IRIMO), East Azerbaijan Province Central Bureau of Meteorology, Tabriz, Iran (Gh-Mohammadi@irimo.ir)

* Corresponding author: Sadr88@pnu.ac.ir

Abstract

Investigating the spatial distribution of precipitation is important due to its widespread application in agricultural and water resources management, industry, and the operation of dams as well as irrigation. Due to expansion of West Azerbaijan Province across 4 degrees of latitude, heterogeneous topography, and exposure to different synoptic systems, has a different amount of precipitation in different areas. Therefore, studying the spatial distribution of precipitation and its classification in regional and local scales in this province formed our main goal for conducting this research. For this, monthly precipitation data from 94 meteorological stations were used. These data were entered into the GIS environment and by implementing the geostatistical Kriging interpolation method, a map of the annual precipitation over West Azerbaijan Province was drawn. Then, a precipitation amount-area diagram was prepared using the capabilities of ARC GIS software. At next step, monthly precipitation matrix was transferred into the SPSS environment and Ward's hierarchical cluster analysis was performed. The obtained dendrograms was cut in two stages and annual rainfalls of West Azerbaijan Province were classified in regional and local scales through GIS capabilities. The research findings showed that the weighted average annual precipitation in this province was calculated to be 342.5 mm, but according to the precipitation amount-area distribution diagram, most regions of the province receive less than this amount of precipitation. Three regional scale rainfall areas were named as semi-arid, semi-humid, and humid regions. In the final stage, each of the regions was divided into smaller rainfall regions (i.e., local rainfall regions).

Keywords: Annual rainfalls, Regional and Local Zoning, Cluster Analysis, GIS, West Azarbaijan Province

تاثیر تغییرات آب و هوایی و اکولوژیکی بر اقتصاد در ایران

مینا زرگرزاده[۱]، علی حقی وایقان[۲]

۱-دکترا اقتصاد مالی، مدرس دانشگاه (نویسنده مسئول)

۲-گروه اکولوژی و مدیریت ذخایر آبزیان، پژوهشکده آرتمیا و آبزی پروری، دانشگاه ارومیه

آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول: Zargarzadeh.economic@gmail.com

چکیده

پیامدهای نوسانات دما بر فعالیت‌های اقتصادی در بنگاه های اقتصادی، به دلیل پیامدهای عمیق آنها برای تخمین تأثیرات اقتصادی تغییرات اقلیمی، توجه زیادی را در ادبیات اخیر به خود جلب کرده است. رابطه بین تغییرپذیری اقلیمی و عملکرد اقتصادی، به ویژه برای کشوری مانند ایران، که دارای کشاورزی و صنعت غنی و قوی بوده و به سمت صنعتی شدن بزرگ گام بر می دارد قابل توجه است. درک تأثیرات اقتصادی و تغییرات اقلیمی برای شکل‌دهی به واکنش‌های مؤثر در سیاست‌گذاری بسیار مهم است. این مقاله تغییرات اقلیمی و تاثیر آن بر اقتصاد ایران را بررسی می‌کند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که تغییرات اقلیمی می‌تواند بر اقتصاد در بلند مدت به طور قابل توجهی تاثیر گذارد. همچنین نتایج نشان می دهد احتمال افزایش سطح قیمت‌ها در کشورهایی مثل ایران، توسط تغییرات اقلیمی بیشتر است و به طور خاص، ریسک اقلیمی بر اقتصاد تأثیر می‌گذارد. این یافته‌ها به سیاست‌گذاران بینش‌هایی در مورد چگونگی مقابله با تأثیرات تغییرات اقلیمی در آینده بر اقتصاد و اجرای برخی اقدامات در حال حاضر ارائه می‌دهد. کاهش مؤثر تغییرات اقلیمی در ایران نیازمند سیاست‌های جامع، همکاری بین‌المللی و شیوه‌های پایدار برای حفاظت از محیط زیست، رونق اقتصادی و بهبود کیفیت زندگی است.

کلیدواژه ها: تغییرات آب و هوا، تاثیرات اقتصادی، اقتصاد ملی.

مقدمه

تغییرات اقلیمی یکی از مهمترین تهدیدات معاصر برای بشریت است که سیاره ما را از طریق گرمایش جهانی و تخریب محیط زیست تغییر شکل می‌دهد (جوانشیری و همکاران، ۱۴۰۰). پیامدهای این بحران بسیار فراتر از محیط زیست است و بر ثبات اقتصادی و مالی جهانی تأثیر می‌گذارد. به عنوان مثال، افزایش فراوانی و شدت رویدادهای شدید آب و هوایی

می‌تواند منجر به خسارات مالی شود. به همین ترتیب، گذار فوری و سراسری مورد نیاز برای مبارزه با تغییرات اقلیمی می‌تواند بر بخش‌های مختلف اقتصاد تأثیر بگذارد(Bejarano, et al., 2025) . تغییرات اقلیمی یک بحران جهانی با تأثیرات محلی است که نیازمند راه‌حل‌های متناسب است. کشورهایی مانند ایران که به ویژه در برابر این تغییرات آسیب‌پذیر هستند، اعضای بنیانگذار سازمان همکاری اقتصادی (ECO) و همچنین به عنوان دروازه اروپا-جنوب آسیا در نظر گرفته می‌شوند و با تأثیرات اقلیمی منحصر به فردی به دلیل چارچوب‌های جغرافیایی و اجتماعی-اقتصادی خود مواجه هستند (برابرجان پور و همکاران، ۱۴۰۲). در همین حال، ایران، در منطقه‌ای واقع شده‌است که در آن افراط‌های اقلیمی رایج است، از بیابان‌های خشک گرفته تا دشت‌های حاصلخیز، که آنها را در معرض طیف وسیعی از خطرات زیست‌محیطی قرار می‌دهد(Talha et al., 2025). تغییرات اقلیمی از جمله چالش برانگیزترین مسائل دهه‌های اخیر است. زندگی انسان و محیط زیست تحت تأثیر تغییرات اقلیمی قرار خواهد گرفت. گرمایش جهانی در آینده به طور قابل توجهی بر جامعه بشری، مانند کمبود منابع آب، تأثیر خواهد گذاشت. دما و بارش ناشی از گرمایش جهانی در آینده متفاوت خواهد بود. تغییرات در متغیرهای اصلی اقلیمی باعث افزایش وقوع رویدادهای شدید آب و هوایی مانند سیل و خشکسالی خواهد شد. در مناطق خشک و نیمه خشک، به دلیل آسیب‌پذیری آنها در برابر تغییرات اقلیمی، انتظار می‌رود این تأثیرات شدیدتر و فاجعه‌بارتر باشند .ایران به دلیل فعالیت‌های انسانی و تغییرات اقلیمی ناشی از انسان، با چالش‌های زیست‌محیطی مختلفی روبرو است. در سال‌های اخیر، چندین رودخانه و دریاچه در ایران کاهش یافته‌اند، سطح آب‌های زیرزمینی به طرز چشمگیری کاهش یافته است و بخش‌های مختلف کشور خشکسالی‌های شدیدی را تجربه کرده‌اند(Ghazal, et al., 2025).

نقشه مدل ارتفاعی رقومی (DEM) ایران و موقعیت شهرهای مرکزی، طبقه بندی اقلیمی ایران بر اساس طبقه بندی کوپن-گایگر* (بک و همکاران، ۲۰۲۳). و S2 تمام طبقه بندی های اقلیمی موجود در ایران را بر اساس کوپن-گایگر(منبع: Ghazal, et al., 2025).

مجمع جهانی اقتصاد (۲۰۱۹) تأکید می‌کند که ریسک تغییرات اقلیمی تهدیدی قابل توجه در سطح جهانی است. در پیش‌بینی‌های سطح بنگاه، روستون (۲۰۲۱) (Roston) به ضرر یک تریلیون دلاری در سطح بنگاه به دلیل قرار گرفتن در معرض تغییرات اقلیمی اشاره می‌کند. قرار گرفتن در معرض تغییرات اقلیمی باعث می‌شود که بنگاه در بازارهای سرمایه به اشتباه قیمت‌گذاری شود و احتمالاً پایین‌تر از پتانسیل خود برای به حداکثر رساندن ارزش بنگاه خواهد بود (Doruk, 2025). تغییرات اقلیمی پدیده‌ای است که به طور مداوم در حال تحول است. در حال حاضر، افزایش مداوم میانگین دمای جهانی و افزایش فراوانی و شدت رویدادهای شدید آب و هوایی، مانند امواج گرما، خشکسالی و دوره‌های سرما، روندهای قابل مشاهده‌ای هستند. پیش‌بینی می‌شود که میانگین دمای جهانی تا قرن بیست و دوم ۴ درجه سانتیگراد افزایش یابد

(Qi, et al., 2025) که ممکن است برای محیط زیست و زندگی مخرب باشد. تغییرات اقلیمی به یک عامل کلیدی مؤثر بر توسعه اقتصاد مدرن تبدیل شده است. به عنوان یک عامل خارجی، از طریق مجموعه‌ای از کانال‌های انتقال بر سیستم اقتصادی تأثیر می‌گذارد و منجر به افزایش ریسک اقتصادی می‌شود (Kemfert et al., 2019; SARB, 2020).

از اینرو و بر طبق مطالعات دیگر، انتظار می‌رود تغییرات اقلیمی، رشد جمعیت و مشکلات اقتصادی، مسائل زیست‌محیطی را در ایران که در حال حاضر با چالش‌های متعددی روبرو است، تشدید کند (جوان، ۱۴۰۰). به عنوان مثال، کمبود آب، تنش‌ها را تشدید می‌کند، به ویژه در مناطقی که به رودخانه‌های تغذیه شده توسط یخچال‌های طبیعی و ذوب برف از رشته‌کوه‌های زاگرس و البرز وابسته هستند. بنابراین، ارزیابی جنبه‌های مختلف تأثیر تغییرات اقلیمی بر ایران بسیار ضروری است. یکی از پیامدهای تغییرات اقلیمی و تغییرات دما و بارش، تغییر در نقشه‌ها و طبقه‌بندی مناطق اقلیمی در مناطق مختلف جهان است. انتظار می‌رود که تغییرات اقلیمی منجر به تغییراتی در طبقه‌بندی‌های اقلیمی در مقیاس جهانی شود (فرجی و همکاران، ۱۴۰۲). بنابراین، تأثیر تغییرات اقلیمی بر تغییرات طبقه‌بندی اقلیمی باید بررسی شود. طبقه‌بندی کوپن-گایگر از جمله رایج‌ترین و شناخته‌شده‌ترین منابع برای طبقه‌بندی‌های اقلیمی در جوامع علمی است. ارزیابی تغییرات در طبقه‌بندی‌های اقلیمی در آینده تحت تأثیر تغییرات اقلیمی، بینش روشنی را از قبل برای درک بهتر آسیب‌پذیری آینده مناطق مختلف در برابر رویدادهای حدی فراهم می‌کند (نادری، ۱۴۰۴).

پیشینه

محققان تأثیر تغییرات اقلیمی بر اقتصاد کلی را مطالعه کرده‌اند. تغییرات اقلیمی در درجه اول یک شوک منفی عرضه است؛ این شوک با کاهش عرضه مؤثر نیروی کار و نرخ انباشت سرمایه مولد، تولید را کاهش داده و منجر به افزایش نرخ تورم می‌شود. .مطالعات مربوط به تأثیرات اقتصادی تغییرات اقلیمی در ادبیات موضوع به خوبی تثبیت شده‌اند (عساکره و همکاران، ۱۴۰۱). تحقیقات فراوانی با تمرکز بر تأثیرات کلان اقتصادی ملی یا شهری رویدادهای شدید اقلیمی وجود دارد که ایران نیز از این حالت مستثنی نیست، همچنین توجه کمی به تأثیرات آن بر تصمیمات و نتایج سرمایه‌گذاری شرکت‌ها در کشور شده است(جهانبخش و همکاران، ۱۳۸۸). از طرفی، حتی در سطح کلان نیز، برخی مطالعات نشان می‌دهند که چگونه تغییرات اقلیمی جهانی بر ارزش شرکت، از جمله تجارت انتشار کربن و کارایی سرمایه‌گذاری تأثیر می‌گذارد (Arian & Naeem, 2025).تحقیقات فراوانی در زمینه تغییرات آب و هوا در ایران و کشورهای همسایه مانندترکیه و پاکستان و... انجام شده است که این نشان از اهمیت مطالعه در این زمینه است (شکل۲).

تا به امروز، چندین محقق طبقه‌بندی‌های اقلیمی ایران را بر اساس طبقه‌بندی‌های مختلف ارزیابی کرده‌اند. نجفی و علیزاده (۱۴۰۲) مناطق اقلیمی ایران را از ۱۳۹ مجموعه داده سینوپتیک بین سال‌های ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۰ شناسایی کردند. نتایج

نشان داد که ایران شش منطقه اقلیمی دارد، از جمله معتدل و مرطوب، سرد و نیمه‌خشک، گرم و نیمه‌خشک، خنک و نیمه‌مرطوب، گرم و فراخشک و خنک و خشک. راضیه (۲۰۲۲) طبقه‌بندی‌های مختلف اقلیمی در ایران را ارزیابی کرد. نویسنده نتیجه گرفت که طبق مجموعه داده‌های شبکه‌بندی شده از سال ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۷، بیشتر بخش‌های ایران متعلق به طبقه‌بندی‌های اقلیمی "Bwh"، "Bsk"، "Csa"، "Bsh"و " "Bwkهستند. اسدی اسکوئی و همکاران. (۱۴۰۱) همچنین نتیجه گرفتند که بیشتر مناطق ایران در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک طبقه‌بندی می‌شوند. اگرچه مطالعات قبلی طبقه‌بندی اقلیمی در ایران را بررسی کرده‌اند، اما تنها تعداد کمی از مطالعات، تغییرات آینده در طبقه‌بندی‌های اقلیمی ایران را پیش‌بینی کرده‌اند. کیانی و کمانگر (۲۰۲۲) آینده طبقه‌بندی اقلیمی در ایران را طبق طبقه‌بندی کوپن-گایگر تحت سناریوهای A1B و A2 بررسی کردند. نتایج نشان داد که اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک که در دوره مرجع (۱۹۷۵) ۸۲.۳ درصد از کشور را پوشش می‌دادند، در دوره ۲۰۵۰-۲۱۰۰ به ۸۷ تا ۹۴ درصد از منطقه افزایش خواهند یافت. رحیمی و همکاران. (۲۰۲۰) از ۱۷ مدل گردش عمومی ((GCMاز پروژه مقایسه متقابل مدل جفت‌شده فاز ۵ (CMIP5) برای پیش‌بینی مناطق اقلیمی کوپن-گایگر ایران تحت دو سناریوی مسیر غلظت نماینده ((RCP، یعنی RCP8.5 و RCP4.5 استفاده کرد. نتایج نشان داد که مناطق با BW وBS اقلیم‌های خشک-بیابانی و خشک-استپی) افزایش خواهند یافت، در حالی که مناطق با Ds و Cs (اقلیم‌های معتدل و برفی) تحت سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 کاهش خواهند یافت.

در سطح جهانی و تاثیر آب و هو بر اقتصاد، مطالعات باوا و همکاران (۲۰۱۶) (Bawa et al, 2016) از رویکرد آزمون مرزی همجمعی برای بررسی تاثیر اقلیم بر اقتصاد در نیجریه از سال ۱۹۸۱ تا ۲۰۱۵ استفاده کردند و دریافتند که میانگین بارندگی یک عامل تعیین‌کننده کلیدی تورم در این کشور است. علاوه بر این، کاشین و همکاران (۲۰۱۷) (Cashin et al., 2017) انتقال شوک‌های آب و هوایی ال نینو به تورم در اقتصاد کلان را بررسی می‌کنند. کوناوتور و همکاران (۲۰۲۲) (Kunawotor et al., 2023) با استفاده از یک استراتژی تخمین دو مرحله‌ای سیستم پویا با روش گشتاورهای تعمیم‌یافته (GMM) با خطاهای استاندارد قوی، دریافتند تولید کشاورزی را به عنوان مکانیسم کلیدی که از طریق آن رویدادهای شدید آب و هوایی بر تورم کلی تأثیر می‌گذارند.. ژانگ (۲۰۲۳) (Zhanc, 2023)دریافت که ریسک آب و هوایی بر تورم در چین، هند و روسیه تأثیر می‌گذارد و هند و آفریقای جنوبی نسبت به تغییرات آب و هوایی حساس‌تر هستند. تحقیقاتی مانند نوی (۲۰۰۹)؛ هسیانگ (۲۰۱۶)؛ بوتزن و همکاران (۲۰۱۹)؛ کالکول و ونز (۲۰۲۰)؛ گوردل و همکاران(۲۰۲۴)؛ کوتز و همکاران (۲۰۲۴)؛ وایدلیچ و همکاران(۲۰۲۴)، (Noy, 2009; Hsiang, 2016; Botzen et al., 2019; Kalkuhl and Wenz, 2020; Gourdel et al., 2024; Kotz et al., 2024 ;Waidelich et al., 2024)، نشان داده اند در دهه گذشته،

درک و مدل‌سازی ما از تأثیرات مستقیم بلایای مرتبط با آب و هوا، مانند خطرات فیزیکی حاد، به طور قابل توجهی پیشرفت کرده است.

با بررسی ادبیات فوق، ادبیات موجود عمدتاً اثرات تغییرات اقلیمی بر اقتصاد کلی را بررسی می‌کند. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که عوامل مرتبط با تغییرات اقلیمی، از جمله افزایش دما، خشکسالی، سیل و طوفان، اغلب منجر به عدم ثبات اقتصادی در این منطقه شده است. با این حال، تحقیقات دیگر نشان داده‌اند که دماهای شدید نیز توانسته بر این روند تاثیر گذار باشد. شایان ذکر است که در ادبیات گسترده، کمبود نسبی تحقیقات در مورد چگونگی تأثیر تغییرات اقلیمی بر اقتصاد در طول زمان وجود دارد و مطالعات کمی در مورد مکانیسم‌های انتقال تأثیر تغییرات اقلیمی بر اقتصاد این منطقه وجود دارد. بنابراین، این مقاله به بررسی فرآیند پویای چگونگی تأثیر تغییرات اقلیمی بر اقتصاد (به صورت توصیفی)، می پردازد (صادقی نیا و همکاان، ۱۴۰۰)

بحث

برخی مطالعات به صراحت نشان داده‌اند که تغییرات دما، بارندگی و بلایای طبیعی می‌توانند مانع بهره‌وری کشاورزی و تولیدات صنعتی شوند و سطح تولید کشاورزی و صنعتی را کاهش دهند(Qi, et al., 2025). بلایای مرتبط با آب و هوا و رویدادهای شدید آب و هوایی مانند امواج گرما، سیل و خشکسالی، که خطرات فیزیکی حاد نیز نامیده می‌شوند، یک نگرانی جهانی قابل توجه و رو به افزایش هستند(WMO, 2024). در طول ۵۰ سال گذشته، تعداد بلایای مرتبط با آب و هوا پنج برابر شده است. بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹، این بلایا منجر به تخمین ۱.۲ میلیون مرگ و میر، ۳.۲ میلیارد نفر را تحت تأثیر قرار داده و خسارات اقتصادی بیش از ۱.۶ تریلیون دلار آمریکا را به بار آورده است(CRED, 2021). پیش‌بینی‌های آینده سیستم آب و هوایی نشان می‌دهد که با گرم‌تر شدن کره زمین، رویدادهای شدید آب و هوایی احتمالاً تشدید و بیشتر می‌شوند. این می‌تواند منجر به تأثیرات مستقیم حتی بیشتر بر جمعیت و اقتصاد شود، در حالی که دولت‌ها را نیز مجبور به مواجهه با افزایش هزینه‌های عمومی برای واکنش به بلایا و بازیابی می‌کند، بنابراین به طور بالقوه بر امور مالی عمومی فشار می‌آورد و بر اقتصاد تأثیر می‌گذارد. آب و هوایی ابعاد اصلی تاثیر آب و هوا بر کل اجتماع هنوز به خوبی درک نشده است، و تأثیرات آن بر اقتصاد و امور مالی عمومی نیز به همین ترتیب. در واقع، بسیاری از مدل‌های اقتصاد کلان، تأثیرات اقتصادی محدودی را از خطرات فیزیکی آب و هوا پیش‌بینی می‌کنند، در تلاشند تا طیف وسیعی از کانال‌های انتقال را در نظر بگیرند و بنابراین تهدیدات کلان بحرانی برای ثبات اقتصادی و مالی را دست کم می‌گیرند(جهانبخش و همکاران، ۱۳۸۸). علاوه بر این، شرایط لازم برای مداخلات مالی و پولی جهت تقویت یا برعکس، حمایت از بهبود روان

در مرحله پس از فاجعه، توجه کمی را به خود جلب کرده است. تحقیقات موجود تا حد زیادی بر جهت یک‌جانبه تأثیر افزایش دما بر اقتصاد متمرکز بوده‌اند. پر کردن این شکاف دانش برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری آگاهانه برای طراحی سیاست‌های سازگاری مؤثر و استراتژی‌های منسجم سرمایه‌گذاری در زمینه سازگاری با تغییرات اقلیمی ضروری است. درک شرایطی که تحت آن اقتصاد یک کشور مانند ایران ممکن است اختلالات مداوم را تجربه کند. مثلا اگرچه عوامل اقلیمی و محیطی در درجه اول شدت وقایع سیل را تعیین می‌کنند، اما تأثیرات آنها بر ساکنان به طور قابل توجهی تحت تأثیر عناصر مرتبط با انسان قرار دارد. از آنجایی که بیشتر سیل‌ها بسیار متغیر و غیرقابل پیش‌بینی هستند، افزایش ظرفیت و تاب‌آوری ساکنان برای مقاومت و همزیستی با این بلایا بسیار مهم است(صابری فر، ۱۴۰۱). کشورهای در حال توسعه بیشترین آسیب را از بلایای طبیعی می‌بینند و سیل تهدیدی به ویژه قابل توجه برای آنها محسوب می‌شود. این اثرات را می‌توان عمدتاً به شرایط نامناسب مسکن، فقر، سازگاری پایین و زیرساخت‌های ضعیف یا ناکافی نسبت داد. ناتوانی در توسعه استراتژی‌های مؤثر کاهش خطر سیل، مانع قابل توجهی برای جوامع کمتر توسعه یافته است. در نتیجه، در ایران، خسارات مالی ناشی از سیل در دهه‌های اخیر افزایش یافته است(جوانشیری و همکاران، ۱۴۰۰).

ایران یکی از کشورهای خشک خاورمیانه است که بین عرض جغرافیایی ۲۵ تا ۴۰ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۴۴ تا ۶۶ درجه شرقی شکل (a1) با مساحت ۱,۶۴۸,۱۹۵ کیلومتر مربع واقع شده است. ایران با چشم‌اندازهای متنوع خود که شامل بیابان‌ها، کوه‌ها و خطوط ساحلی در امتداد دریای خزر و خلیج فارس می‌شود، دارای طبقه‌بندی اقلیمی متنوعی با آب و هوای غالب خشک و نیمه‌خشک است (شکل b1) آب و هوای نیمه‌مرطوب تا بسیار مرطوب عمدتاً در بخش‌های شمالی و غربی کشور یافت می‌شود. از نظر توپوگرافی، ارتفاع زمین ایران از ۱۲۸- تا ۵۶۰۰ متر بالاتر از سطح دریا متغیر است. بر اساس داده‌های مشاهده‌شده (۱۹۹۰-۲۰۲۰)، میانگین دمای سالانه در ایران از ۹ درجه سانتیگراد در شمال و شمال غربی تا ۲۵-۲۷ درجه سانتیگراد در جنوب و جنوب شرقی متغیر است. میانگین بارندگی سالانه کشور از ۵۲ تا ۱۸۰۰ میلی‌متر متغیر است، که کمتر از یک سوم میانگین بارندگی جهانی است.(Ghazi, et al., 2025) صراف و همکاران (۲۰۱۸) تغییرات اقلیمی در ایران را مورد مطالعه قرار دادند و نتیجه گرفتند که طول فصل رشد در مقایسه با دوره پایه آنها ۱۹۸۱-۲۰۱۰، به ترتیب تقریباً ۱۳.۵، ۱۸ و ۱۹.۵ روز تحت سه سناریوی B1، A1B و A2 افزایش خواهد یافت. در همین حال، کوچکی و همکاران (۲۰۰۶) نشان دادند که تحت تغییرات اقلیمی، طول فصل رشد ۱۶ روز و طول دوره خشک ۲۲ روز افزایش می‌یابد. تجزیه و تحلیل دمای حداقل و حداکثر از ۴۵ ایستگاه هواشناسی در سراسر ایران نشان می‌دهد که دمای حداقل و حداکثر به ترتیب ۰.۴ و ۰.۲ درجه سانتیگراد در هر دهه، در طول دوره مطالعه ۱۹۶۷-۲۰۰۵ افزایش یافته است (فرجی و همکاران، ۱۴۰۲). تجزیه و تحلیل فصلی نشان می‌دهد که روزها و شب‌های سرد تمایل به کاهش

دارند، در حالی که شاخص‌های گرمای فصلی (روزها و شب‌های گرم) در اکثر ایستگاه‌های ایران در طول دوره ۱۹۶۷-۲۰۰۵ افزایش یافته است. با این حال، تغییرات اقلیمی در آینده بر شاخص‌های سرما و گرمای فصلی تأثیر بیشتری خواهد گذاشت (فلاح-قالهری و همکاران، ۲۰۱۹). بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر بارش سالانه، دما و تبخیر و تعرق پتانسیل تحت سناریوهای B2 و A2 نشان می‌دهد که غرب ایران بیشترین گرمایش را در داخل کشور تجربه خواهد کرد، در حالی که بیشترین افزایش تبخیر و تعرق پتانسیل در مرکز ایران رخ خواهد داد. در همین حال، ناهنجاری بارش سالانه بین ایستگاه‌ها، سناریوها و دوره زمانی انتخاب شده متفاوت است (دوستداری و پورمحمدی، ۱۴۰۰) . کامیار و همکاران (۱۴۰۱) دریافتند که درجه روزهای رشد در کشور تحت تغییرات اقلیمی (RCP4.5 و RCP8.5) افزایش خواهد یافت، که بیشترین افزایش در مرکز و جنوب ایران و کمترین افزایش در شمال غربی ایران است (نادری، ۱۴۰۴).

ایران، به عنوان یکی از بزرگترین تولیدکنندگان نفت و گاز در جهان، به شدت به منابع عظیم سوخت فسیلی خود برای تولید انرژی متکی است. این وابستگی منجر به سطوح بالای مصرف سوخت فسیلی در بخش‌های مختلف، از جمله حمل و نقل، صنعت و مصارف خانگی شده است. استفاده گسترده از نفت، گاز طبیعی و زغال سنگ در این بخش‌ها به طور قابل توجهی در انتشار دی اکسید کربن کشور نقش داشته است، که از جمله بالاترین‌ها در منطقه است. در نتیجه، ایران با چالش‌های زیست‌محیطی فزاینده‌ای مانند آلودگی هوا و تأثیرات بلندمدت تغییرات اقلیمی روبرو است. وابستگی کشور به سوخت‌های فسیلی، نیاز فوری به راه‌حل‌های پایدار انرژی و تلاش برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای برای کاهش تخریب محیط زیست را برجسته می‌کند. تغییرات در الگوهای استفاده از زمین در ایران، از جمله تبدیل جنگل‌ها به زمین‌های کشاورزی و مناطق شهری، منجر به افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای شده است. جنگل‌زدایی و کشاورزی نقش حیاتی در تغییرات اقلیمی دارند. جنگل‌ها که اغلب به عنوان "ریه‌های زمین" شناخته می‌شوند، برای جذب دی‌اکسید کربن و تولید اکسیژن حیاتی هستند. هنگامی که درختان در مناطق مختلف ایران قطع می‌شوند و مناطق جنگلی به کاربردهای دیگری مانند کشاورزی، مسکونی یا صنعتی تبدیل می‌شوند، مقدار دی‌اکسید کربن در جو افزایش می‌یابد. این به این دلیل است که درختان قطع شده دیگر قادر به جذب CO_2 نیستند و کربن ذخیره شده در آنها آزاد می‌شود. جنگل‌زدایی منجر به کاهش تنوع زیستی، تغییرات در الگوهای آب و هوایی محلی و فرسایش خاک می‌شود - که همه اینها به تشدید تغییرات اقلیمی کمک می‌کنند. کشاورزی در ایران همچنین تأثیرات متعددی بر تغییرات اقلیمی دارد. تولید متان یک تأثیر عمده کشاورزی است، به ویژه در دامداری و شالیزارهای برنج. حیوانات نشخوارکننده مانند گاوها در طول هضم متان تولید می‌کنند و کشت برنج به دلیل مزارع غرقابی، انتشار متان را افزایش می‌دهد. استفاده از کودهای نیتروژنی در کشاورزی منجر به انتشار اکسید نیتروژن، یک گاز گلخانه‌ای قوی، می‌شود. علاوه بر این، تغییرات کاربری زمین مانند تبدیل جنگل‌ها

به زمین‌های کشاورزی منجر به تخریب زیستگاه‌ها و افزایش سطح CO2 اتمسفر می‌شود. مصرف بالای آب در کشاورزی و استفاده نادرست از منابع آب می‌تواند منجر به کاهش منابع آب و بحران آب شود که بر الگوهای آب و هوایی محلی و کشوری تأثیر می‌گذارد. شیوه‌های کشاورزی ناپایدار همچنین می‌توانند باعث فرسایش و تخریب خاک شوند و توانایی زمین را در جذب و ذخیره کربن کاهش دهند. برای کاهش اثرات منفی جنگل‌زدایی و کشاورزی بر تغییرات آب و هوایی، می‌توان اقدامات متعددی انجام داد. مدیریت پایدار جنگل، جلوگیری از قطع غیرقانونی درختان، احیای جنگل و حفاظت از جنگل‌های موجود می‌تواند به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک کند. اتخاذ شیوه‌های کشاورزی پایدار مانند کشاورزی بدون شخم، کشت پوششی و تناوب زراعی می‌تواند به حفظ سلامت خاک و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک کند. بهینه‌سازی مصرف آب در کشاورزی از طریق تکنیک‌هایی مانند آبیاری قطره‌ای و مدیریت هوشمند آب می‌تواند فشار بر منابع آب را کاهش داده و از بحران آب جلوگیری کند. با توجه به نقش قابل توجه جنگل‌زدایی و کشاورزی در تغییرات اقلیمی، تغییرات اساسی در مدیریت و بهره‌برداری از منابع مورد نیاز است. اجرای تکنیک‌های پایدار، بهبود بهره‌وری انرژی و مدیریت صحیح منابع طبیعی می‌تواند به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و حفظ محیط زیست کمک کند(جوانشیری و همکاران، ۱۴۰۰).

تغییرات اقلیمی تأثیرات گسترده‌ای بر محیط زیست و جامعه ایران داشته است، از جمله افزایش دما، کاهش بارندگی، کاهش منابع آب، خشکسالی، آلودگی هوا و سیل. افزایش میانگین دمای سالانه، به ویژه در فصول گرم‌تر، پدیده گرما و خشکسالی را در ایران تشدید کرده است. تغییرات در الگوهای بارندگی منجر به کاهش بارندگی و دوره‌های طولانی‌تر خشکسالی شده است. کاهش بارندگی و افزایش تبخیر منجر به کاهش منابع آب سطحی و زیرزمینی شده است. مناطق مرکزی و جنوبی ایران به ویژه تحت تأثیر خشکسالی قرار گرفته‌اند که منجر به کاهش تولیدات کشاورزی شده است. افزایش دما و کاهش بارندگی همچنین به افزایش گرد و غبار و آلودگی هوا در شهرهای بزرگ کمک کرده است. تغییرات در الگوهای بارندگی باعث سیل ناگهانی در مناطق خاص شده است. تغییرات اقلیمی فراتر از تأثیرات زیست‌محیطی، پیامدهای اقتصادی و اجتماعی گسترده‌ای دارد. کاهش منابع آب و تغییرات در الگوهای بارندگی منجر به کاهش تولید کشاورزی و افزایش قیمت‌ها شده است که به طور مستقیم بر معیشت کشاورزان و امنیت غذایی در ایران تأثیر می‌گذارد. افزایش دما و آلودگی هوا به افزایش مشکلات تنفسی، قلبی عروقی و سایر مشکلات سلامتی کمک کرده است. همچنین بیماری‌های مرتبط با گرما افزایش یافته است. کمبود آب و خشکسالی در مناطق روستایی منجر به مهاجرت گسترده به مراکز شهری، تشدید گسترش شهرها و افزایش فشار بر زیرساخت‌های شهری شده است که به طور بالقوه منجر به مشکلات اجتماعی

می‌شود. کاهش تولید کشاورزی و صنعتی به دلیل کمبود آب و اثرات تغییرات اقلیمی می‌تواند درآمد ملی را کاهش داده و بیکاری را در ایران افزایش دهد(Talaie & rezania, 2024).

مطالعات علوم اقلیمی نشان می‌دهد که آب و هوا به سرعت در حال تغییر است. رویدادهای شدید اقلیمی به عنوان تهدیدات اصلی زیست‌محیطی پیش روی اقتصاد جهانی در مقیاس‌های مختلف شناخته می‌شوند. در سطح جهانی، شواهد فزاینده‌ای وجود دارد که نشان می‌دهد تغییرات اقلیمی یکی از بزرگترین چالش‌ها برای توسعه پایدار کشاورزی و سیستم‌های غذایی، امنیت غذایی و تغذیه است. تغییرات در الگوهای بارندگی و افزایش دما ممکن است بر بخش‌های حساس به آب و هوا مانند کشاورزی تأثیر منفی بگذارد. شرایط نامساعد اقلیمی و کمبود آب منجر به تعطیلی مزارع و جابجایی کشاورزان، به ویژه در کشورهایی با روستاهای بزرگ شده است. از طرفی، نامرئی بودن اقتصادی تغییرات آب و هوایی در کشوری مانند ایران، بر تصمیمات مدیریت کاربری زمین تأثیر می‌گذارد و منجر به اولویت‌بندی آب وهوایی خاص نسبت به سایرین می‌شود.(برابرجان پور و همکاران، ۱۴۰۲) این امر با این واقعیت تأیید می‌شود که بهینه‌سازی همه مناطق به طور همزمان چالش برانگیز است و اغلب منجر به بده بستان می‌شود. تحقیقات نشان می‌دهد که جنگل‌های اولیه ذخایر کربن قابل توجهی هستند که ارتباط نزدیکی با حفظ تنوع زیستی بالا دارند، در حالی که جنگل‌های تولیدی جوان‌تر در جذب CO_2 از جو مؤثرتر هستند و نشان‌دهنده‌ی مخازن کربنی هستند که راه‌حل‌های مبتنی بر طبیعت را برای کاهش تغییرات اقلیمی ارائه می‌دهند. اولویت‌بندی خدمات تأمین، مانند استخراج چوب، چوب خمیر و چوب سوخت از جنگل، باعث کاهش توانایی جنگل در تنظیم کربن و آب، حفاظت از خاک و حفظ تنوع زیستی شده است. شواهد حاصل از مطالعات ایرانی نشان می‌دهد که ایجاد تعادل بین تأمین در برابر تنظیم مقررات دشوار است. یک تحلیل مبتنی بر مدل با سناریوهای مختلف تشدید برداشت چوب برای ۲۶ کشور اروپایی نشان داد که تشدید تولید زیست توده منجر به اثرات سرریز منفی بر حفظ تنوع زیستی، ذخیره کربن و فعالیت‌های تفریحی و همچنین منفی بودن اقتصاد مناطق مورد نظر شده است. اصطلاح «اقتصاد چرخشی مبتنی بر اب هوا» با مفهوم گسترده‌تر اقتصاد چرخشی همسو است که هدف آن به حداقل رساندن ضایعات و «بهره‌گیری حداکثری از منابع کمیاب» است. در زمینه آب و هوا، رویکرد اقتصاد چرخشی شامل استفاده از منابع محیطی به روشی است که بازسازی را ترویج می‌دهد، تأثیر زیست‌محیطی را به حداقل می‌رساند و ارزش حاصل از اکوسیستم را به حداکثر می‌رساند. کمیسیون اقتصادی سازمان ملل متحد در اروپا (UNECE) و سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (2022) (FAO)بحث کاملی در مورد تعاریف مختلف «چرخشی بودن»، «اقتصاد زیستی» و «استفاده آبشاری» ارائه می‌دهند، در حالی که اصطلاح «اقتصاد زیستی مبتنی بر جنگل» توسط وینکل (۲۰۱۷) به طور گسترده به عنوان «تمام فعالیت‌های اقتصادی مرتبط با جنگل‌ها و خدمات اکوسیستم » مفهوم‌سازی شد. در بخش اقتصاد و تغییرات آب و

هوا ایران باید گفت که طبق مطالعات متعدد، تغییرات اقلیمی می‌تواند تعادل اقتصادی را مختل کند و منجر به شوک‌های طرف عرضه شود که بر متغیرهای اصلی اقتصادی مانند تولید ناخالص داخلی، نرخ بهره، قیمت‌ها و نرخ ارز تأثیر می‌گذارند. برای مثال، تحقق خطرات مرتبط با آب و هوا می‌تواند منجر به ضرر و زیان تولید از ۷.۲٪ تا ۲۳٪ از تولید جهانی شود(Kahn, 2019).

مطالب عنوان شده در بالا قادر به کیفی و کمی‌سازی فعالیت‌های اقتصادی در سطح کشور هستند، اما برای پاسخ به سوالات مربوط به خدمات اکوسیستم و تاثیرات بر اقتصاد، نیستند. با ترکیب آب و هوا و اقتصاد با مدل‌ها و پایگاه‌های داده ورودی-خروجی چندمنطقه‌ای (MRIO)، ردیابی بخشی از اقتصاد مبتنی بر آب و هوا که فراتر از مرزهای ملی یک کشور امتداد دارد، امکان‌پذیر می‌شود. تجزیه و تحلیل مبتنی بر MRIO با پیوند دادن سیستم‌های حسابداری ملی در اقتصاد جهانی و با ارائه داده‌های زیست‌محیطی مرتبط با استخراج و تولید صنایع یا محصولات، که به عنوان پسوندهای زیست‌محیطی شناخته می‌شوند، از اهداف چارچوب پشتیبانی می‌کند. پایگاه‌های داده MRIO به هر سه روش‌شناسی متصل هستند. می‌توان یک روش خاص را از چندین چارچوب روش‌شناختی موجود برای محاسبه، مثلاً ردپاها در سطح جهانی، ملی و محلی/صنعتی، توسعه داد(نادری، ۱۴۰۴).

نتیجه گیری

امروزه این یک واقعیت آشکار است که تغییرات اقلیمی بخش جدایی‌ناپذیری از سیستم‌های اقتصادی و اجتماعی جوامع بشری است. تغییرات اقلیمی، در صورت عدم مدیریت صحیح، می‌تواند اثرات مخربی بر معیشت مردم داشته باشد. بنابراین، استفاده از راهبردها و راهکارهایی برای مقابله با پدیده تغییرات اقلیمی یک ضرورت انکارناپذیر است. در ایران، از راهبردهای مدیریت بحران برای مقابله با تأثیرات منفی تغییرات اقلیمی استفاده می‌شود. بر طبق مطالب عنوان شده در این مقاله می توان به این نتیجه گرفت که اجماع گسترده‌ای در مورد پیامدهای زیست‌محیطی خطرات فیزیکی و گذار گسترده وجود دارد. با این حال، با توجه به عدم قطعیت در مورد برآوردهای پایه به دلیل پیچیدگی پدیده تغییرات اقلیمی، در مورد تأثیرات اقتصادی خطرات مرتبط با آب و هوا توافق وجود ندارد. در حالی که ارزیابی دقیق اثرات تغییرات اقلیمی بر اقتصاد با توجه به ماهیت غیرخطی و وابسته به سناریوی آن، چالش بزرگی را ایجاد می‌کند، تلاش‌هایی برای تفکیک جهت این اثرات انجام شده است. به طور کلی، ادبیات نشان می‌دهد که تغییرات اقلیمی بر تولید اقتصادی تأثیر منفی خواهد گذاشت و میزان این تأثیر به اجرای سیاست‌های کاهش بستگی دارد. آب و هوای نامساعد می‌تواند به زیرساخت‌ها آسیب برساند، حمل و نقل و ارتباطات را مختل کند و بر عملکرد عادی زنجیره‌های تأمین تأثیر بگذارد و در نتیجه بر تولید صنعتی و زندگی انسان تأثیر بگذارد. تأثیرات نامطلوب تغییرات اقلیمی سالانه منجر به خسارات اقتصادی و اجتماعی هنگفتی شده

است. در ۲۰ سال گذشته، دمای بسیار بالای ناشی از تغییرات اقلیمی منجر به تریلیون‌ها دلار خسارت اقتصادی در سطح جهان شده است(Qi, et al., 2025). مطالعات زیادی وجود دارد که پیامدهای اقتصادی رویدادهای شدید اقلیمی را در سطح ملی یا بین‌المللی بررسی کرده‌اند، با این حال، ارزیابی مستقیم در سطح کشور همچنان محدود بود است. این شواهد برای درک تأثیر عوامل اقلیمی بر تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و رفتارهای سرمایه‌گذاری شرکت‌ها بسیار مهم است. رویدادهای فیزیکی اقلیمی مانند شرایط آب و هوایی شدید می‌تواند به دارایی‌های ثابت، زیرساخت‌ها و تجهیزات شرکت‌ها آسیب برساند. این امر ارزش این دارایی‌ها را کاهش می‌دهد و مانع از پتانسیل آنها برای ایجاد درآمدهای آینده می‌شود و در نهایت بر موفقیت تلاش‌های سرمایه‌گذاری شرکت‌ها تأثیر می‌گذارد. علاوه بر این، تأثیر منفی گسترده‌تر رویدادهای شدید مرتبط با اقلیم بر مشاغل و اقتصادهای منطقه‌ای به خوبی اثبات شده و به طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است که در این تحقیق نیز به صورت مروری بر تحقیقات قبلی، بر آن پرداخته شد.

بررسی مطالب عنوان شده در این مقاله، نشان داد که برای کشور ایران، دما در دوره آینده تحت همه سناریوها افزایش خواهد یافت. در مقابل، بارش بسته به فصول و سناریوهای اقلیمی، افزایش یا کاهش خواهد یافت. ارزیابی تغییرات در طبقه‌بندی اقلیمی بر اساس طبقه‌بندی اقلیمی کوپن-گایگر نشان داد که کلاس‌های خشک-بیابانی (BW) و خشک-استپی (BS) در دوره آینده گسترش خواهند یافت. در عین حال، مناطق خشک تابستانی (DSs) و (Cs) در منطقه مورد مطالعه کاهش خواهند یافت. بر اساس نتایج این مطالعه و یافته‌های مشابه سایر محققان برای منطقه مورد مطالعه، کشور و پارامترهای هواشناسی آن، واضح است که شرایط مطلوب نخواهد بود. این امر می‌تواند بر همه جنبه‌های زندگی در ایران، مانند دسترسی به آب، توسعه کشاورزی و محیط زیست تأثیر بگذارد و در نتیجه بر شرایط اجتماعی-اقتصادی در آینده تأثیر بگذارد. با توجه به اینکه این تحقیق چشم‌اندازی از آب و هوای آینده ایران ارائه می‌دهد، سیاست‌گذاران باید سیاست‌ها و استراتژی‌های کاهش اثرات مناسب را اجرا کنند. گام‌های تحقیقاتی آینده در این راستا شامل موارد زیر است: (۱) یک رویکرد جامع که ریسک‌های حاد و مزمن را ادغام می‌کند، (۲) بررسی شرایط مالی، مالیاتی و اقتصادی دیگری که تحت آنها ریسک‌های اقلیمی می‌توانند به طور مداوم مسیر رشد اقتصاد را مختل کنند، و (۳) ارزیابی نقش اقدامات سازگاری، سیاست‌های مالی در پرداختن به تأثیرات کوتاه‌مدت ریسک فیزیکی مرتبط با اقلیم، ضمن تقویت پایداری بلندمدت. تغییرات اقلیمی، به عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی و اقتصادی ایران، نیازمند توجه ویژه و اقدامات جدی است. با اتخاذ سیاست‌ها و راهبردهای مناسب، می‌توان اثرات منفی این پدیده را کاهش داده و به سمت توسعه پایدار حرکت کرد. همکاری‌های بین‌المللی و بهره‌گیری از تجربیات جهانی نیز می‌تواند به طور قابل توجهی در این فرآیند کمک

کند. با استفاده از منابع موجود و پیشرفت فناوری‌های جدید، ایران می‌تواند نقش مهمی در مبارزه با تغییرات اقلیمی و بهبود کیفیت زندگی مردم خود ضمن حفظ منابع طبیعی ایفا کند.

منابع

برابرحان پور، ص.، قربانی، خ.، سالاری جزی، م.، رضایی قلعه، ل. (۱۴۰۲). تحلیل مکانی و زمانی روند تغییرات سالانه کمینه و بیشینه دما در ایران مبتنی بر روش رگرسیون چندک، نشریه پژوهش های اقلیم شناسی، ۱۴(۵۵)، ۱۶۱-۱۷۵.

بیرجندی، و.، قربانی، س. ع.، کاوسی، ا.(۱۳۹۴). بررسی تغییرات اقلیمی و عوامل موثر بر آن، دومین کنفرانس بین المللی پژوهش در علوم و تکنولوژی، ترکیه استانبول.

جوانشیری، ز.، رحمدل، م، محمدیان، آ. (۱۴۰۰). تشخیص و تحلیل داده های پرت زمانی-مکانی مربوط به پارامترهای سرعت باد و فشار ایستگاه های هواشناسی کشور به منظور مطالعات تغییرات آب و هوایی، نشریه پژوهش های تغییرات آب و هوایی، گلستان، ۲(۷)، ۴۸-۳۳.

جهانبخش، س.، گریکوریان، و.، امام قلیزاده، م. (۱۳۸۸). بررسی شرایط آب و هوایی شمال استان آذربایجان غربی به منظور کشت زیتون و پهنه بندی زراعی، جغرافیا و توسعه، ۱۴، ۵-۲۶.

جوان، خ.(۱۴۰۰). بررسی خشکسالی هواشناسی در ایستگاه ارومیه با استفاده از شاخص SPI تحت سناریوهای تغییر اقلیم(RCP)، نشریه پژوهش های تغییرات آب وهوایی، دانشگاه گلستان، ۲(۵)، ۸۱-۹۴.

داودی، ع.، مرادجانی، ش.(۱۳۹۸). تحلیل فضایی تغییرا آب و هوایی ایران طی دهه های اخیر، مجله علوم جغرافیایی، ۱۴(۲۹)، ۸۲-۹۰.

صادقی نیا، ع.، رفعتی، س.، صداقت، م.(۱۴۰۰). تحلیل فضایی اقلیمی در ایران، نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۸(۴)، ۵۵-۷۰.

صابری فر، ر. (۱۴۰۱). تغییرات آب وهوایی تاثیر بر فجایع طبیعی، سپهر، ۲۱(۸۱)، ۱-۸.

عاشری، ا.، صفر علی زاده، ا.، حسین زاده، ر.(۱۳۹۵). ارزیابی وضعیت اقلیم گردشگری استان اذربایجان غربی، مجله آمایش جغرافیایی فضا، ۶، ۱۴-۱.

عساکره، ح.، لیونلو، پیرو، میرموسیو، سید حسین، صدرافشاری، سحر(۱۴۰۱). شبیه سازی تغییرات دما در نیمه غربی ایران طی دوره(۲۱۰۰-۱۹۶۰) با استفاده از مدل های واکاوی شده و خروجی مدل های RCP8.5، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغررافیایی، ۲۲(۶۶)، ۱-۱۷.

فرجی، م. رضایی بنفشه درق، م، ساری صراف، بهروز، خورشید دوست، ع. م. (۱۴۰۲). شبیه سازی عددی تغییرات آب و هوایی ایران یا استفاده از الگوریتم شبکه های عصبی مصنوعی، نشریه پژوهش های آب و هواییریال فصلنامه دانشگاه گلستان، ۴(۱۴، ۴۳-۶۴.

نادری، م.(۱۴۰۴). پیش‌بینی شاخص‌های اصلی تغییرات اقلیمی در ایران۲۱(۸۱)، از سال ۲۰۲۱ تا ۲۰۸۰، علوم آب و هوایی و بررسی آلودگی، ۲، ۱-۲۳.

Arian, A., Naeem, M. A. (2025). Climate risk and corporate investment behavior in emerging economies, ELSVIER, Emerging Markets Review, 65, 1-21.

Bawa, S., Abdullahi, I. S., & Ibrahim, A. (2016). Analysis of inflation dynamics in Nigeria (1981–2015). CBN J. Appl. Stat., 7(1), 255–276.

Benarano, J., Rodriguez, D. (2025). The effects of climate change on a small and open economy: Economic and monetary perspectives, ELSVIER, Latin American Journal of Central Banking, 6, 1-24.

Cashin, P., Mohaddes, K., & Raissi, M. (2017). Fair weather or foul? The macroeconomic effects of El Ni˜ no. Journal of International Economics, 106(1), 37–54.

CRED (2021). The Human Cost of Disasters - An overview of the last 20 years 2000–2019. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED). United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR), URL: https://www.presentionweb.net/files/74124.

Doruk, O. T. (2025). Climate change exposure and firm value: Evidence from low and middle income economies, ELSVIER, Finance Research Letters, 85, 1-9.

Fried, S., Novan, K., & Peterman, W. B. (2021). The economy’s response to potential climate policy. FRBSF Economic Letter, 2021–16(June 21).

Ghazi, B., Salahi, H., Cheshami, M., Zeydalinejhad, N., Linh, N.T.T. (2025). Projection of climate change impact on main climate variables and assessment of the future of Köppen–Geiger climate classification in Iran, Acta Geophysica, 73, 1-11.

Kemfert, C., Sch¨afer, D., Semmler, W., & Zaklan, A. (2019). Green finance:The macro perspective. Vierteljahrshefte zur Wirtschaftsforschung, 88(2), 6–9.

Mazzocchettia, A., Monasterolob, I., Dunze, N., Hrast Essenfelder, A. (2025). Breaking the economy: How climate tail risk and financial conditions can shape loss persistence and economic recovery, ELSVIER, Ecological Economics, 237, 1-25.

Nord, M., Coleman-Jensen, A., & Gregory, C. (2014). Prevalence of U.S. food insecurity is related to changes in unemployment, inflation, and the price of food. Report Summary.

Qi, CH., Ma, Y., Du, M., Ma, X., Xu, Y., Zhou, X. (2025). Impacts of climate change on inflation: An analysis based on long and short term effects and pass-through mechanisms, ELSVIER, International Review of Economics and Finance, 98, 1-13.

SARB. (2020). Research themes and objectives: February 2020. South African Reserve.

Talaie, A., Rezania, SH. (2024). Climate Change in Iran: Challenge sand Solutions–A Short Communication, Journal of Environmental Treatment Techniques, 12(4), 1-11.

WMO (2024). State of the global climate 2023. URL: https://library.wmo.int/idurl/4/ 68835.

Talha, M., Nejadhashemi, P., Moller, K. (2025). Soft computing paradigm for climate change adaptation and mitigation in Iran, Pakistan, and Turkey: A systematic review, Heliyon, 11, 1-16.

Zhang, Z. (2023). Are climate risks helpful for understanding inflation in BRICS countries? Finance Research Letters, 58(6), 1544–6123.

The Impact of Climate and Ecological Change on the Economy in Iran

Mina Zargarzadeh[1], Ali Hagi Vaiegan

PhD in Financial Economics, University Lecturer (Corresponding Author)
Department of Ecology and Aquatic Resources Management, Artemia and Aquaculture Research Institute, Urmia University.
Corresponding author email: Zargarzadeh.economic@gmail.com

ABSTRACT

The consequences of temperature fluctuations on economic activities in economic enterprises have attracted much attention in recent literature due to their profound implications for estimating the economic impacts of climate change. The relationship between climate variability and economic performance is particularly significant for a country like Iran, which has a rich and strong agriculture and industry and is moving towards major industrialization. Understanding the economic impacts of climate change is crucial for shaping effective policy responses. This paper examines climate change and its impact on the Iranian economy. The results of this research show that climate change can significantly affect the economy in the long run. The results also show that the probability of price levels increasing in countries like Iran due to climate change is higher and that climate risk, in particular, affects the economy. These findings provide policymakers with insights into how to address the future impacts of climate change on the economy and implement some measures now. Effective climate change mitigation in Iran requires comprehensive policies, international cooperation, and sustainable practices to protect the environment, boost economic prosperity, and improve quality of life.

Keywords: Climate change, economic impacts, national economy, policymaki

ردپای تغییر اقلیم بر اساس شاخص‌های حدی بارش و دما: مطالعه موردی شهرستان ارومیه، استان آذربایجان غربی

آزاد توحیدی*[۱]- بهروز ساری صراف[۲]- حامد عباسعلی نژاد[۳]- قدرت موظف[۴]- ناصر نصیری[۵]-امین عربلو مقدم۶

۱ دکتری آب و هواشناسی دانشگاه تبریز،رئیس توسعه هواشناسی کاربردی اداره کل هواشناسی استان آذربایجان غربی ایران azadtohidi@gmail.com

۲ استاد گروه جغرافیای طبیعی دانشگاه تبریز sarisarraf@tabrizu.ac.ir

۳کارشناسی ارشد، آب و هواشناسی کاربردی، مسئول ایستگاه تحقیقات هواشناسی کشاورزی دانشگاه ارومیه، h-alinezhad@irimo.ir

۴دکتری ریاضی، کارشناس مسئول تحقیقات اداره کل هواشناسی استان آذربایجان غربی gmovazaf@gmail.com

۵کارشناسی ارشد آب و هواشناسی، کارشناس مسئول اداره کل هواشناسی استان آذربایجان غربی nasiri.naser82@gmail.com

۶دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مرند، مرند، ایران mailto:aminarablu1365@gmail.com

چکیده:

تغییرات اقلیمی و وقوع پدیده‌های حدی دما و بارش از مهم‌ترین چالش‌های عصر حاضر به شمار می‌روند که پیامدهای گسترده‌ای بر بخش‌های کشاورزی، منابع آب و محیط‌زیست دارند. این پدیده‌ها آثار چشمگیری بر نظام‌های اقتصادی و معیشتی بر جای گذاشته و شناخت آن‌ها در ابعاد شدت، تداوم و فراوانی برای کاهش آسیب‌پذیری و سازگاری با تغییر اقلیم ضروری است. در این پژوهش، روند تغییرات شاخص‌های حدی بارش و دما در ایستگاه سینوپتیک هواشناسی فرودگاهی شهید باکری ارومیه طی دوره آماری ۱۹۶۷ تا ۲۰۲۴ با استفاده از آزمون من–کندال و روش شیب سن بررسی شد. نتایج نشان داد که شاخص‌های دمایی در بیشتر موارد روند افزایشی معنادار دارند؛ به‌گونه‌ای که میانگین حداقل دما سالانه (TNn) با نرخ ۰/۳ درجه سانتی‌گراد و میانگین حداکثر دما سالانه (TXx) با نرخ ۰/۲ درجه سانتی‌گراد در هر دهه افزایش یافته‌اند. همچنین شاخص‌های مرتبط با روزهای گرم (SU25 وTXge35) افزایش و شاخص‌های روزهای یخبندان (FD)و روزهای بسیار سرد (ID) کاهش چشمگیری داشته‌اند. در مقابل، اکثر شاخص‌های بارشی روند مشخص و معناداری را نشان ندادند، هرچند شاخص بارش سالانه (PRCPTOT) و بارش‌های سنگین روزانه (Rx1day) کاهش جزئی داشتند. به طور کلی، نتایج بیانگر افزایش دما و کاهش نسبی بارش در منطقه بوده و لزوم بازنگری در الگوی کشت و مدیریت منابع

آب متناسب با تغییرات اقلیمی را نشان می‌دهد، که می‌تواند مبنایی برای مدیریت ریسک، بازنگری در الگوی کشت و برنامه‌ریزی سازگاری در بخش کشاورزی و منابع آب باشد.

کلمات کلیدی: تغییر اقلیم، شهرستان ارومیه، تحلیل روند، من-کندال، شیب سن

مقدمه:

داده‌های بلندمدت سالانه یا فصلی متغیرهای اقلیمی مانند دما و بارش، به‌عنوان شاخص‌های اصلی در ارزیابی و شناسایی تغییرات اقلیمی مورد استفاده قرار می‌گیرند (حسینی ۱۴۰۰). دما به‌عنوان یکی از متغیرهای کلیدی اقلیمی نقش مهمی در تغییر الگوهای زمانی و مکانی پدیده‌های جوی دارد و می‌تواند منجر به بروز رخدادهایی مانند خشکسالی، سیلاب، طوفان و موج‌های گرما شود. پیامدهای نامطلوب تغییر اقلیم عمدتاً ناشی از افزایش فراوانی و شدت شاخص‌های حدی آب‌وهوایی و رویدادهای شدید اقلیمی است (رحیمیان ایرانشاهی و همکاران ۱۴۰۱). به‌طور کلی، تغییر اقلیم به دگرگونی‌های الگوی رفتاری شرایط جوی یک منطقه نسبت به الگوی مورد انتظار آن در بازه‌های زمانی بلندمدت گفته می‌شود (تبرزد ۱۳۹۷) و می‌تواند شامل تغییر در میانگین شرایط آب‌وهوایی یا توزیع رویدادهای اقلیمی نسبت به شرایط میانگین باشد. این تغییرات معمولاً در بازه‌های چند دهه‌ای رخ می‌دهند و از طریق تحلیل‌های آماری قابل شناسایی هستند (پوترا و همکاران ۲۰۱۹). تغییر اقلیم یک مسئله جهانی است که توجه گسترده سیاست‌گذاران، برنامه‌ریزان و بهره‌برداران منابع طبیعی را به خود جلب کرده و بر جنبه‌های متنوعی از زندگی انسان‌ها تأثیر می‌گذارد، از جمله اقتصاد، انرژی، کشاورزی، منابع آب، زندگی شهری و حمل‌ونقل، بهداشت و سلامت (احمدی و همکاران ۱۳۹۴). افزایش دما، تغییر الگوهای بارش، تغییر سطح آب دریاها و وقوع خشکسالی و سیل به‌عنوان شاخص‌های تغییر اقلیم به رسمیت شناخته شده‌اند و می‌توانند پیامدهای گسترده‌ای از جمله تهدید سلامت انسان، اکوسیستم‌ها و خدمات وابسته به آن‌ها ایجاد کنند (لیل فیلو و همکاران ۲۰۲۲). از آنجا که پارامترهای اقلیمی در طول زمان و مکان‌های مختلف دچار نوسان می‌شوند، لازم است روند این تغییرات بر اساس داده‌های مشاهداتی و با استفاده از روش‌های آماری دقیق ارزیابی شود. پژوهش‌های مرتبط با تغییر اقلیم معمولاً بر میانگین‌های بلندمدت ماهانه یا فصلی مانند دمای جهانی و مجموع بارش‌ها تمرکز دارند، اما این داده‌ها نمی‌توانند به‌طور کامل نشان دهند که چگونه رویدادهای حدی تحت تأثیر تغییرپذیری اقلیمی قرار می‌گیرند (براون و همکاران ۲۰۱۰). مقادیر حدی اقلیمی، شامل حداکثر و حداقل، با توجه به فراوانی، شدت و مدت وقوع، اهمیت بیشتری نسبت به مقادیر میانگین دارند (هرمزی و همکاران ۱۳۹۸). پیشرفت‌های اخیر در دسترسی به داده‌های بلندمدت با وضوح مناسب، امکان تمرکز مطالعات بر رویدادهای حدی اقلیمی را فراهم کرده است (براون و همکاران ۲۰۱۰). به‌تدریج، تمرکز پژوهش‌ها از ارزیابی الگوهای میانگین اقلیمی به تحلیل روندها و پیش‌بینی رویدادهای حدی اقلیمی معطوف شده است،

از جمله گرم‌ترین روزها، امواج گرما و سرما، بارش‌های شدید و دوره‌های خشکی یا رطوبت متوالی (آلیوا – دیاز و همکاران ۲۰۲۰). طبق گزارش‌های بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC) ، رویدادهای حدی اقلیمی به‌عنوان الگوهای شدید آب‌وهوایی تعریف می‌شوند که می‌توانند پیامدهایی شامل اختلال در امنیت غذایی و آب، افزایش بیماری‌ها، خسارات زیست‌محیطی و جانی، و فشارهای روانی ایجاد کنند (لیل فیلو و همکاران ۲۰۲۲). این رویدادها تأثیرات قابل توجهی بر اقتصاد و معیشت جوامع دارند و جامعه انسانی در مواجهه با آن‌ها آسیب‌پذیری بالایی دارد. جمعیت‌ها و زیرساخت‌ها در مناطقی که در معرض خطرات حدی مانند سیل و موج‌های گرما یا سرما قرار دارند، حساس‌تر هستند و تغییرات در بهره‌برداری از منابع طبیعی و زیرساخت‌های اجتماعی می‌تواند اثرات فاجعه‌بار را تشدید کند (استرلینگ و همکاران ۲۰۰۰؛ ماریگی و همکاران ۲۰۱۶). شاخص‌های حدی اقلیمی توسط گروه کاری آشکارسازی تغییر اقلیم، سازمان هواشناسی جهانی و کمیته اقلیم‌شناسی معرفی شده و در برنامه‌های تحقیقاتی مربوط به تغییرپذیری اقلیم به کار گرفته شده‌اند (حسینی ۱۴۰۰). این شاخص‌ها علاوه بر تحلیل رویدادهای اقلیمی در مقیاس منطقه‌ای و جهانی، به تصمیم‌گیران کمک می‌کنند تا اثرات تغییرات اقلیمی را بهتر ارزیابی کنند (میستری ۲۰۱۹). مطالعات نشان داده‌اند که تغییرات کوچک در دما یا بارش می‌تواند منجر به وقوع پدیده‌های حدی مانند سیل، تگرگ، امواج گرما، طوفان‌های حاره‌ای و خشکسالی شود و افزایش دما همراه با کاهش احتمالی بارش شرایط پیچیده اقلیمی ایجاد می‌کند (اکبری و صیاد ۱۴۰۰). بارش و دما از متغیرهای کلیدی تغییر اقلیم محسوب می‌شوند و نقش مهمی در مدیریت کشاورزی، منابع طبیعی، دامداری و آب، به ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند ایران دارند. تغییرات بلندمدت شاخص‌های حدی دما و بارش در مطالعات متعدد و ارزیابی‌های بین‌المللی مورد بررسی قرار گرفته است (سان و همکاران ۲۰۲۱). در ایران، پژوهش‌ها نشان داده‌اند که شاخص‌های حدی بارش و دما روند قابل توجهی دارند؛ به‌عنوان مثال، در ایستگاه سنندج، برخی شاخص‌های بارش روند افزایشی نشان داده‌اند (رضایی بنفشه و همکاران ۱۳۹۴)، و در مناطق خشک ایران، شدت بارش‌های حدی در آینده افزایش ولی بارش سالانه کاهش خواهد یافت (خزاوی و همکاران ۱۳۹۹). برای بررسی روندهای دما و بارش، روش‌های پارامتریک و ناپارامتریک به کار گرفته شده و آزمون من-کندال به‌عنوان روش متداول ناپارامتریک مورد استفاده قرار می‌گیرد. پژوهش‌های ایران نشان داده‌اند که در اکثر ایستگاه‌ها بارش سالانه کاهش یافته و تغییرات بارش‌های شدید عمدتاً در سواحل جنوبی و شمالی کشور مشاهده شده است (محمدی و همکاران ۱۳۹۶). همچنین، حداقل و حداکثر دما در اغلب مناطق ایران روند افزایشی داشته است (علیزاده چوبری و نجفی ۲۰۱۷؛ زرین و همکاران). مطالعات دیگر نیز روند افزایشی در متوسط دمای سالانه و کاهش مجموع بارش سالانه را تأیید کرده‌اند (محمدی و تقوی ۱۳۸۶؛ اسدی و حیدری ۱۳۹۰؛ عساکره ۱۳۹۱). با توجه به اهمیت

تحلیل و مقابله با تغییر اقلیم در مناطق مختلف، این مطالعه از شاخص‌های حدی اقلیمی ETCCDI برای تحلیل روند تغییرات دما و بارش در شهرستان ارومیه، استان آذربایجان غربی، بهره می‌گیرد.

-مواد و روش

۲-۱ منطقه مورد مطالعه

ارومیه، به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین شهرهای ایران، مرکز اداری و سیاسی استان آذربایجان غربی محسوب می‌شود. این شهر با قدمتی بیش از ۳۰۰۰ سال، قدیمی‌ترین شهر در شمال‌غرب ایران به شمار می‌رود. ارومیه در جلگه‌ای به طول تقریبی ۷۰ کیلومتر و عرض ۳۰ کیلومتر، در کنار دریاچه ارومیه و در موقعیت جغرافیایی ۳۷ درجه و ۳۳ دقیقه عرض شمالی و ۴۵ درجه و ۴ دقیقه طول شرقی واقع شده است. ارتفاع این شهر از سطح دریا ۱۳۱۳ متر می‌باشد. (Mohammadrezapour et al., 2024).

۲-۱ روش شناسی مطالعه

تحقیق حاضر از نوع کاربردی – تحلیلی بوده و با هدف بررسی روند و تغییرات شاخص های اقلیمی حدّی در ایستگاه هواشناسی فرودگاهی ارومیه برای دوره ۱۹۶۷ – ۲۰۲۴ انجام گرفته است. رویکرد توصیف – تحلیلی است و با بهره گیری از روش های آماری ناپارامتری، به تحلیل تغییرات زمانی متغیرهای حدی اقلیمی پردازد. جامعه آماری تحقیق شامل ایستگاه هواشناسی فرودگاهی ارومیه است. داده های اقلیمی شامل دمای حداقل، دمای حداکثر و بارش روزانه در بازه زمانی مورد نظر از پایگاه داده سازمان هواشناسی کشور اخذ شد. در این تحقیق ایستگاهی انتخاب شدند که دارای طول دوره مناسب حداقل ۳۰ ساله باشند. برای محاسبه و استخراج شاخص‌های حدّی از نرم افزار RCLIMDEX استفاده شد. این برنامه توسط بخش تحقیقات آب و هوای خدمات هواشناسی کانادا توسعه یافته است. ابزار کاربرپسندی برای محاسبه مجموعه‌ای جامع از ۲۷ شاخص کلیدی دما و بارش و همچنین شاخص‌های مبتنی بر آستانه دلخواه ارائه می‌دهد (Frimpong et al., 2022) .قبل از استفاده از این برنامه، داده‌های خام از نظر صحت بررسی شدند. فرآیند کنترل کیفیت شامل شناسایی داده‌های پرت (مقادیر فراتر از ۴ برابر انحراف معیار میانگین) (Ghanim et al., 2023)، جایگزینی مقادیر منفی با کد '۹۹.۹' و بررسی بارش‌های منفی یا داده‌های از دست رفته بود .(Klein Tank et al., 2009) هدف اصلی این کنترل کیفیت، شناسایی خطاهای محاسباتی ناشی از ورود دستی داده‌ها است. سری داده‌ها بر اساس کامل بودن و طول دوره بررسی شدند، به طوری که حداکثر چهار داده گمشده در سال مجاز بود و داده‌های خارج از این محدوده به صورت دستی بررسی و اصلاح شدند(Frimpong et al., 2022; Klein Tank et al., 2009). نقاط پرت بارش عمدتاً ناشی از دوره‌های طولانی بدون بارش یا داده‌های گمشده است (Dos Santos et al., 2022).که صحت آن‌ها با مقایسه با ایستگاه‌های مجاور بررسی شد. (Klein Tank et al., 2009). ارزیابی یکنواختی فضایی داده‌ها نیز با توجه به جهش‌های مصنوعی ناشی از تغییر مکان ایستگاه، تجهیزات یا روش‌های مشاهده انجام شد .(Liu et al., 2023; Ghanim et al., 2023) در این مطالعه، ۱۳ شاخص اقلیمی شامل ۸ شاخص دما و ۵ شاخص بارش برای تحلیل انتخاب شدند (جدول ۱). پس از کنترل کیفی

داده‌ها، آزمون نرمال بودن انجام شد و به دلیل نرمال نبودن داده‌ها، تحلیل روند شاخص‌ها با استفاده از آزمون ناپارامتری من–کندال در سطح معنی‌داری ۵ درصد انجام گرفت ($0.05p \leq$)(OUFRIGH et al., 2023). این آزمون برای سری‌های زمانی دارای داده‌های گمشده و داده‌های چولگی مناسب است و بر اساس مقایسه داده‌ها با یکدیگر عمل می‌کند (Wang et al., 2020; Kocsis et al., 2020). همچنین برای سنجش شیب روندها از تخمین‌گر شیب سن استفاده شد که شیب میانه تمامی جفت داده‌ها را ارائه می‌دهد و در برابر داده‌های پرت مقاوم است .(Muia et al., 2024). این دو روش برای ارزیابی تغییرات اقلیمی و الگوهای آن در مطالعات متعدد مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Dai et al., 2016).

جدول ۱. شاخص های دما و بارش فرین مورد استفاده در این مطالعه

تعریف	یکا	نام	شاخص
تعداد سالانه زمانی که حداکثر دمای روزانه بیش از ۲۵ درجه سانتیگراد باشد	روز	روزهای تابستانی	SU25
تعداد سالانه زمانی که حداکثر دمای روزانه کمتر از ۰ درجه سانتیگراد باشد	روز	روزهای سرد	ID0
حداکثر مقدار ماهانه حداکثر دمای روزانه	°C	دمای بیشینه	TXx
حداقل مقدار ماهانه حداقل دمای روزانه	°C	کمینه دمای کمینه	TNn
تعداد روزهای با دمای بیشینه مطلق بیش از ۳۵ درجه سلسیوس	°C	روزهای گرم	TXxge35
بیشینه ماهانه بارش ۱ روزه	mm	حداکثر بارندگی ۱ روزه	RX1day
مقدار حداکثر بارش ماهانه ۵ روزه متوالی	mm	حداکثر بارندگی ۵ روزه	RX5day
تعداد سالانه روز های با بارش های بیش از ۱۰ میلی متر	روز	تعداد روزهای(با بارندگی سنگین)	R10mm
حداکثر تعداد روزهای متوالی زمانی که بارندگی کمتر از ۱ میلی متر باشد	روز	روزهای خشک متوالی	CDD
مجموع بارندگی سالانه در روزهایی با بارندگی برابر یا بزرگتر از ۱ میلی متر	mm	کل بارندگی سالانه روز مرطوب	PRCPTOT
تعداد روزهایی از سال که دما فراتر از صدک ۹۰ ام باشد.	روز	تعداد موج گرما	hwn
تعداد روزهایی از سال که دما کمتر از صدک ۱۰ام باشد.	روز	تعداد موج سرما	CWN
شاخص استاندارد شده بارش و تبخیر و تعرق		خشکسالی	SPEI

۱-۲-۳ آزمون من-کندال

آزمون ناپارامتریک من-کندال ابتدا توسط من درسال ۱۹۴۵ ارائه و سپس توسط کندال در سال ۱۹۷۵، بسط و توسعه یافت(Gaddikeri et al. 2023). این روش به طور گسترده‌ای در تحلیل روند سری‌های هیدرولوژیکی و هواشناسی بکار گرفته می‌شود (Ankrah et al. 2023)، که وجود یک روند را در یک سری زمانی با فرض صفر، مبنی بر عدم وجود روند مقایسه می‌کند. مزیت این تحلیل وابسته نبودن آن به توزیع آماری خاص و اثر پذیری ناچیز این روش از مقادیر حدی است.(Gaddikeri et al. 2023). این آزمون با استفاده از دو سری زمانی متوالی (Xj و Xi) از n نقطه داده در یک سری تعیین می‌شود. هر مقدار داده متوالی در یک سری زمانی معین با سایر داده‌های سری مقایسه می‌شود; مقدار آماری Sبا بررسی ترتیب داده‌ها در سری زمانی محاسبه می‌شود. در این روش، هر مقدار داده با مقادیر بعدی مقایسه می‌شود به طوری که اگر مقدار بعدی بزرگ‌تر باشد، S یک واحد افزایش می‌یابد و اگر کوچک‌تر باشد، یک واحد کاهش پیدا می‌کند. در نهایت، مقدارآماری Sبا محاسبه مجموع این افزایش‌ها و کاهش‌ها به‌دست می‌آید. بنابراین، استاتیک آزمون من-کندال با استفاده از رابطه (۱) همانطور که در زیر بیان می‌شود، محاسبه می‌شود.

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} Sign(Xj - Xi) \quad (۱)$$

جایی که: Xj و Xi به ترتیب مقادیر داده ها در سال j ام و i ام هستند. تابع علامت نیز طبق رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$Sign(Xj - Xi) = \begin{bmatrix} +1; if Xj - Xi > 0 \\ 0; if Xj - Xi = 0 \\ -1; if Xj - Xi < 0 \end{bmatrix} \quad (۲)$$

اگر کمتر از ده نقطه داده در سری زمانی وجود داشته باشد، مقدار |S| به طور مستقیم با توزیع S مقایسه می شود. اگر بیش از ده نقطه داده وجود داشته باشد، مقدار آماره S بر اساس میانگین و واریانس همانطور که در معادلات (۳) و (۴) نشان داده شده است، توزیع می‌شود.

$$E(S) = 0 \quad (۳)$$

$$Var(S) = \frac{m(-1)(2m+5) - \sum_{k=1}^{n} k1(k1-1)(2k1+5)}{18} \quad (۴)$$

که در آن k تعداد گروه‌های دارای گره (داده‌های پشت سر هم یک گره ایجاد می‌کنند)، k1 طول k امین گروه گره‌دار می‌باشد. در نهایت آماره Z آزمون ناپارامتری من-کندال با استفاده از رابطه (۵) محاسبه می‌شود.

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{Var(S)}} & if\ S > 0 \\ 0 & if\ S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{Var(S)}} & if\ S < 0 \end{cases} \quad (۵)$$

مقادیر منفی و مثبت Z به ترتیب بیانگر روند کاهشی و روند افزایشی در سری داده‌ها است. با توجه به سطح اطمینان ۹۵ درصد اگر $|Z| >$ ۱/۹۶ باشد، فرض صفر مبنی بر عدم وجود روند در سری زمانی مورد مطالعه، رد می‌شود و وجود روند در سری داده‌ها پذیرفته می‌شود.

۱-۲-۳ آزمون شیب سن

برآوردگر شیب سن یک روش ناپارامتریک برای تعیین مقدار یک روند در یک سری زمانی است. (Sen 1968; Bandyopadhyay et al. 2009; Jain et al. 2013; Gajbhiye et al. 2016; Chandniha et al. 2017) اساس آزمون سن بر محاسبه یک شیب میانه برای سری زمانی و قضاوت نمودن در مورد منحنی‌داری شیب بدست آمده در سطوح مختلف اطمینان می‌باشد. شیب سن دارای مزیتی نسبت به رگرسیون خطی است که ارزیابی، تحت تأثیر وجود ناهنجاری‌ها و عدم دقت در داده‌ها قرار نمی‌گیرد.(Calma .et al. 2025). بزرگی روند Q به صورت زیر محاسبه می‌شود:

الف) محاسبه شیب سن بین هر جفت داده با استفاده از رابطه (۶) محاسبه می‌شود.

$$Q_i = \frac{X_t - X_s}{t - S}, i = 1,2, \dots, N \qquad (۶)$$

که X_t و X_s به ترتیب داده در زمان‌های $t > s$ و $N = \frac{n(n-1)}{2}$ می‌باشد. با اعمال این رابطه برای هر دو جفت داده، یک سری زمانی از شیب‌های محاسبه شده، بدست می‌آید، که از محاسبه میانه این سری زمانی، برآورد شیب سن مربوط به خط روند حاصل می‌شود. مقدار مثبت این شیب حاکی از صعودی بودن روند و مقدار منفی آن نشان دهنده نزولی بودن روند می‌باشد. (Kliengchuay.et al. 2024).

ب) محاسبه پارامتر C_α برای سطح اطمینان مورد نظر، طبق رابطه (۷) محاسبه می‌شود.

$$\sqrt{Var(S)} \qquad (۷)$$

$$C_\alpha = Z_{1-\frac{\alpha}{2}}$$

که در آن Z چندک توزیع نرمال استاندارد می‌باشد.

ج) برای محاسبه حدود اطمینان بالا و پایین با ضریب (1-α)، ابتدا مقادیر M_1 و M_2 به کمک روابط (۸) محاسبه می‌شود.

(۸)

$$\begin{cases} M_1 = \frac{N - C_\alpha}{2} \\ M_2 = \frac{N + C_\alpha}{2} \end{cases}$$

که N تعداد شیب‌های محاسبه شده در بند (الف) می‌باشد.

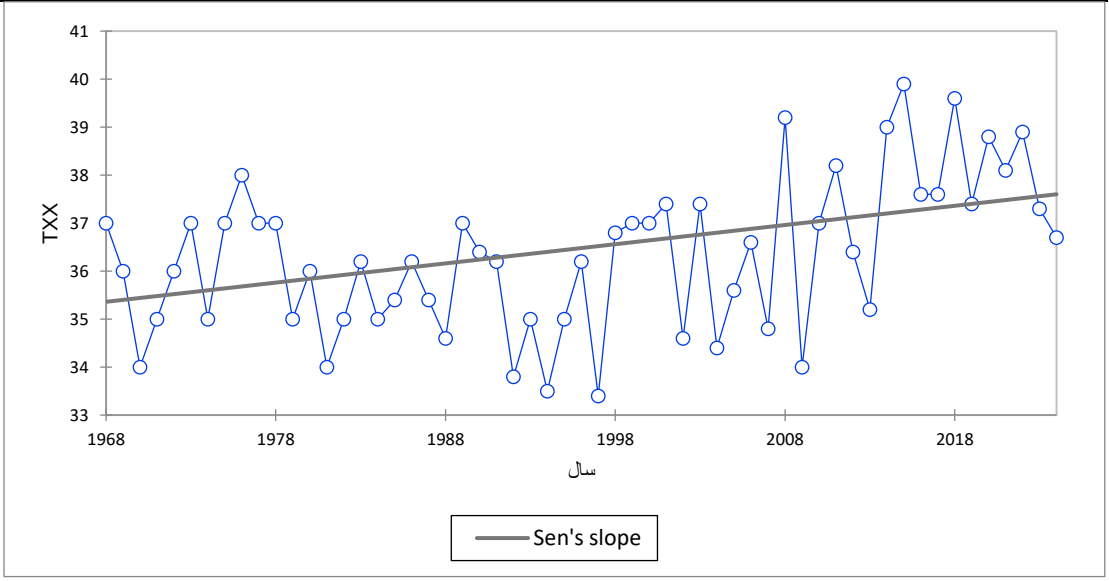
د) برای بررسی حدود اطمینان، از بین شیب‌های محاسبه شده توسط رابطه(۶) که از کوچک به بزرگ مرتب می‌شوند، M_1 امین وM_2 +1 امین شیب استخراج می‌گردند. در صورتی که عدد صفر در دامنه بین دو شیب استخراج شده فوق قرار گیرد، فرض صفر پذیرفته شده و سری زمانی بدون روند است.

نتایج:

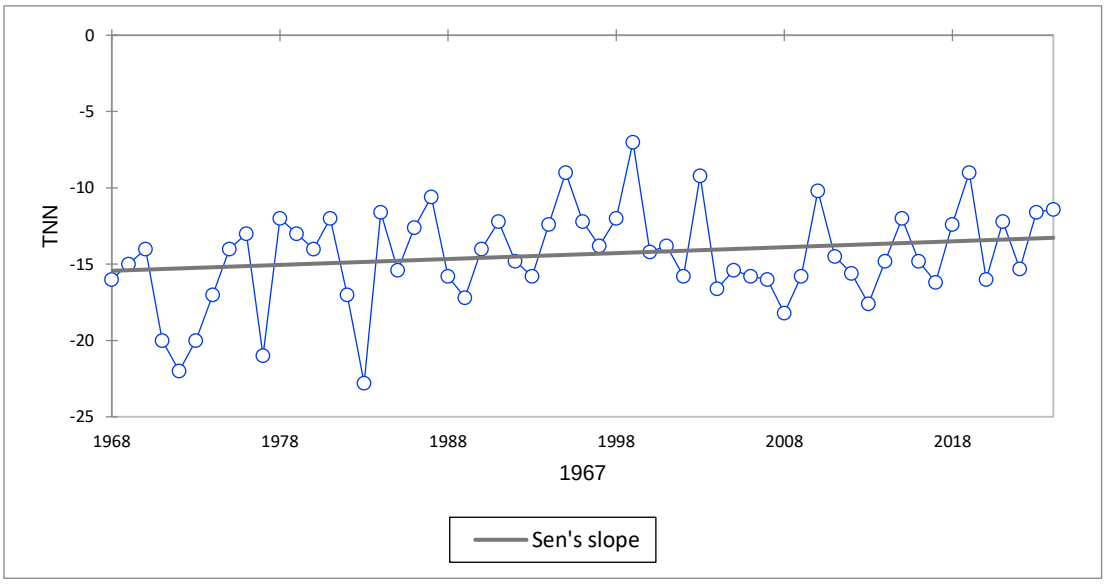
تحلیل شاخص‌های حدی دما و بارش در ایستگاه هواشناسی ارومیه نشان داد که این شاخص‌ها الگوهای متنوعی از نظر شدت، مدت و فراوانی ارائه می‌دهند. نتایج مربوط به شاخص‌های حدی دما و بارش بررسی شده در این پژوهش در جدول (۲) و اشکال (۲ تا ۱۴) نمایش داده شده است. شاخص حداکثر دما روزانه (TXx) روند افزایشی و معنادار در سطح ۹۵ درصد نشان داد. در حالی که حداقل دمای کمینه (TNn) ;کاهش غیر معناداری داشته که بیانگر نوسانات بین‌سالی قابل توجه است. شاخص تعداد روزهای یخبندان (Id0) روند کاهشی و معنادار داشت که نشان‌دهنده کاهش وقوع یخبندان‌هاست. شاخص تعداد موج‌های گرمایی (HWN) به‌طور معنادار افزایشی بود و نشان‌دهنده افزایش شدت و فراوانی موج‌های گرما است، در حالی که تعداد موج‌های سرمایی (CWN) روندی کاهشی و معنادار داشت. شاخص روزهای تابستانی با Tmax بیش از ۲۵ درجه سلسیوس (SU25) و شاخص روزهای با دمای بیشینه مطلق بیش از ۳۵ درجه سلسیوس (TXxge35) هر دو روند افزایشی و معنادار نشان دادند، که حاکی از افزایش گرما در منطقه است. شاخص طولانی‌ترین دوره‌های بدون بارش (CDD) روند افزایشی و معنادار داشت، نشان‌دهنده طولانی‌تر شدن دوره‌های خشک و افزایش فشار بر منابع آب و کشاورزی. مجموع بارش سالانه (PRCPTOT) روند کاهشی غیرمعنادار داشت، در حالی که شدت بارش یک روزه (Rx1day)و پنج روزه (Rx5day) نیز کاهش غیرمعنادار را نشان دادند. با این حال، تعداد روزهای بارش سنگین (R10mm) روند افزایشی و معنادار داشت که نشان‌دهنده افزایش وقوع بارش‌های شدید است. شاخص SPEI که نشان‌دهنده خشکسالی ترکیبی بر اساس بارش و تبخیر-تعرق است، روند کاهشی و معنادار داشت، که افزایش خشکسالی و کاهش رطوبت در منطقه را تأیید می‌کند. به طور خلاصه، تحلیل ۱۳ شاخص اقلیمی نشان داد که منطقه مورد مطالعه در حال تجربه افزایش دما و شدت موج‌های گرما، افزایش خشکسالی و افزایش تعداد روزهای بارش شدید است، در حالی که بارش سالانه و شدت تجمع بارش‌های چندروزه کاهش نسبی داشته‌اند. این روندها با گزارش‌های جهانی و منطقه‌ای تغییر اقلیم مطابقت دارند و اهمیت ارزیابی شاخص‌های حدی در مدیریت منابع آب، کشاورزی و برنامه‌ریزی برای مقابله با اثرات تغییر اقلیم را تأکید می‌کنند.(Frimpong et al., 2022; Dos Santos et al., 2022; Dai et al., 2016)

جدول ۲ – مقادیر شیب و P-Value در سطح معنی داری ۹۵ درصد برای شاخص های حدی دما و بارش در دوره ۵۷ ساله منتهی به ۲۰۲۴.

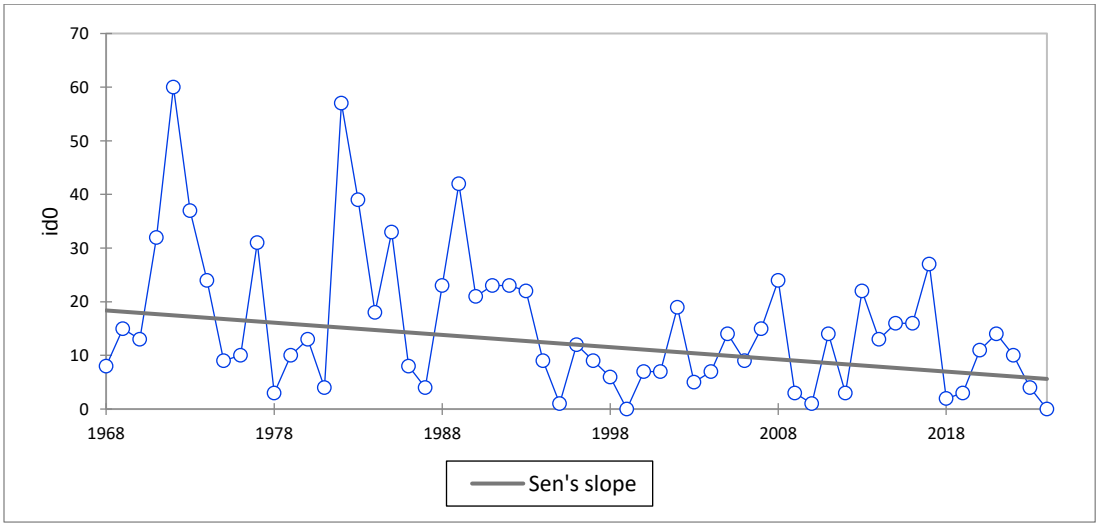
شاخص	Slope	P-Value
TXx	۰/۰۴۴	۰/۰۰۱
TNn	۰/۰۳۹	۰/۱۰۱
Id0	-۰/۲۲۸	۰/۰۰۹
HWN	۰/۰۲۵	۰/۰۱
CWN	-۰/۰۲	۰/۰۱۱
Su25	۰/۶۶۷	۰/۰۰۱
CDD	۰/۴۲۳	۰/۰۰۳
TXxge35	۰/۱۶۷	۰/۰۱۴
PRCPTOT	-۱/۳۸۹	۰/۰۸۲
Rx1day	-۰/۰۰۹	۰/۸۳۶
Rx5day	-۰/۰۵۴	۰/۷۹۱
R10mm	-۰/۰۶۳	۰/۰۰۲
SPEI	-۰/۰۰۳	۰/۰۰۱



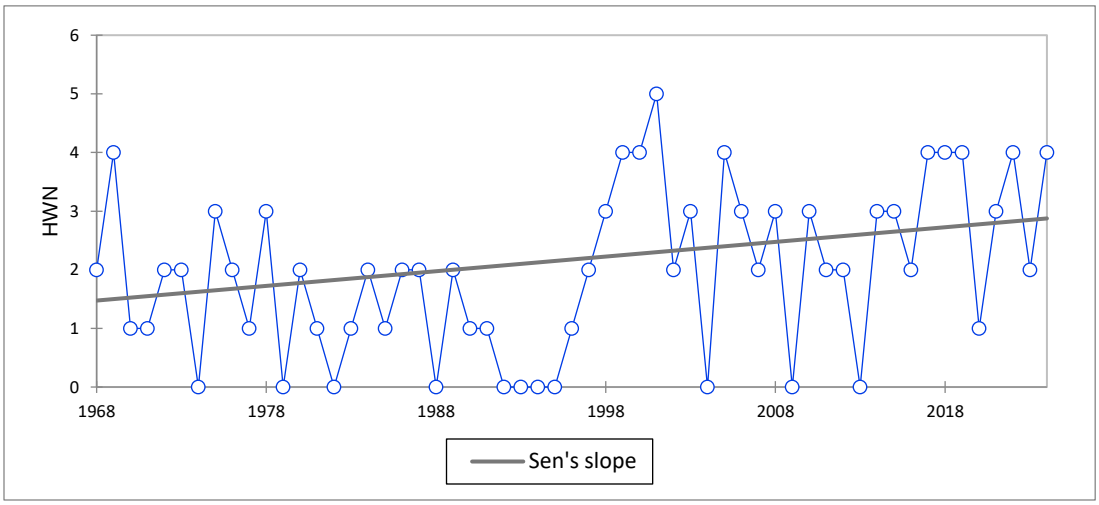
شکل ۲ : نمودار شاخص بیشینه مطلق دما (TXX) در دوره ۵۷ ساله منتهی به ۲۰۲۴ ایستگاه هواشناسی فرودگاه شهید باکری ارومیه



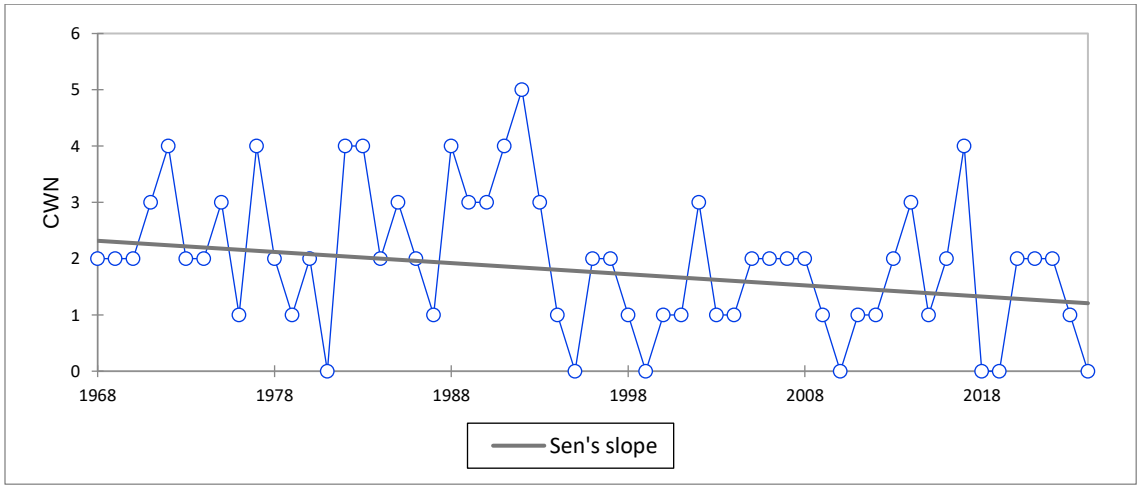
شکل ۳ : نمودار شاخص کمینه مطلق دما (TNN) در دوره ۵۷ ساله منتهی به ۲۰۲۴ ایستگاه هواشناسی فرودگاه شهید باکری ارومیه



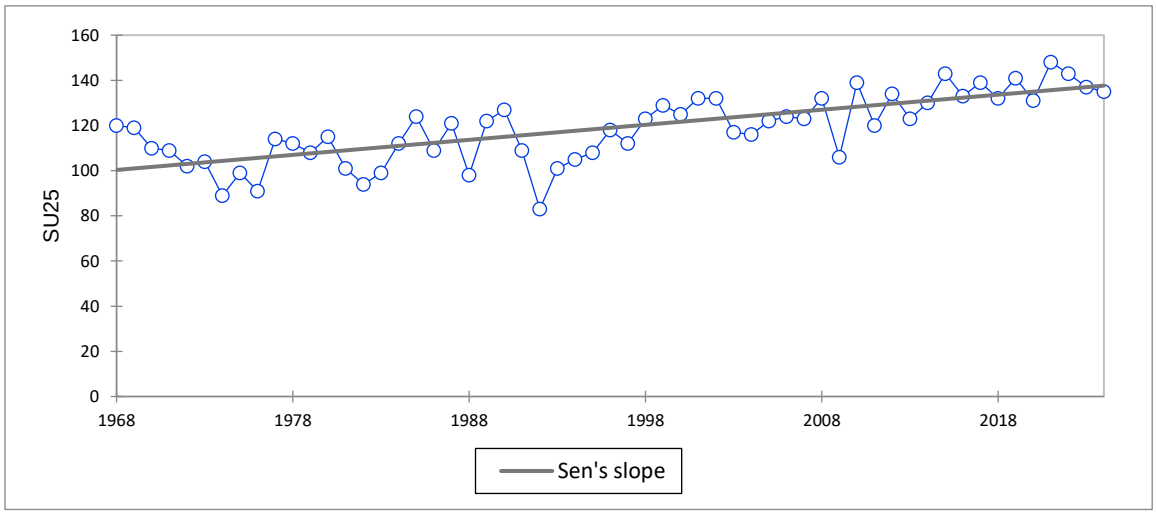
شکل ۴ : نمودار شاخص روزهای سرد (id0) در دوره ۵۷ ساله منتهی به ۲۰۲۴ ایستگاه هواشناسی فرودگاه شهید باکری ارومیه



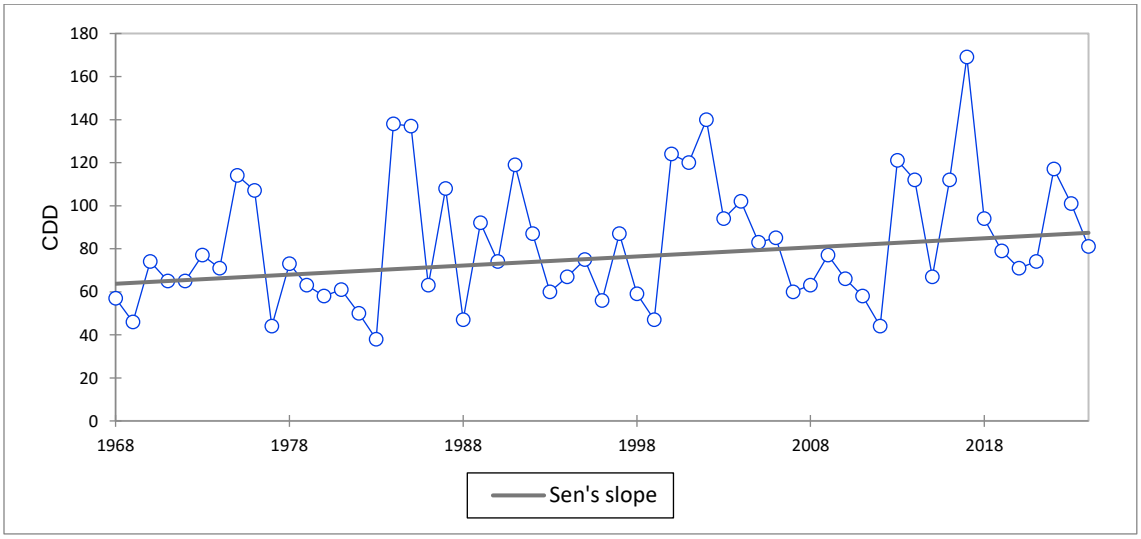
شکل ۵ : نمودار شاخص تعداد امواج گرمایی (HWN) در دوره ۵۷ ساله منتهی به ۲۰۲۴ ایستگاه هواشناسی فرودگاه شهید باکری ارومیه



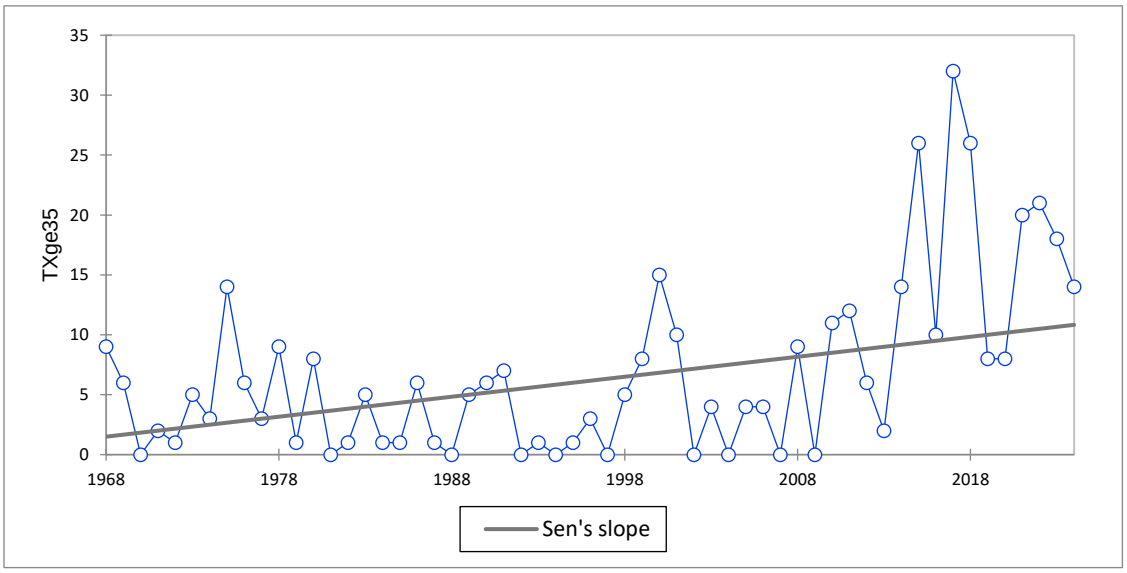
شکل ۶ : نمودار شاخص تعداد امواج سرمایی (CWN) در دوره ۵۷ ساله منتهی به ۲۰۲۴ ایستگاه هواشناسی فرودگاه شهید باکری ارومیه



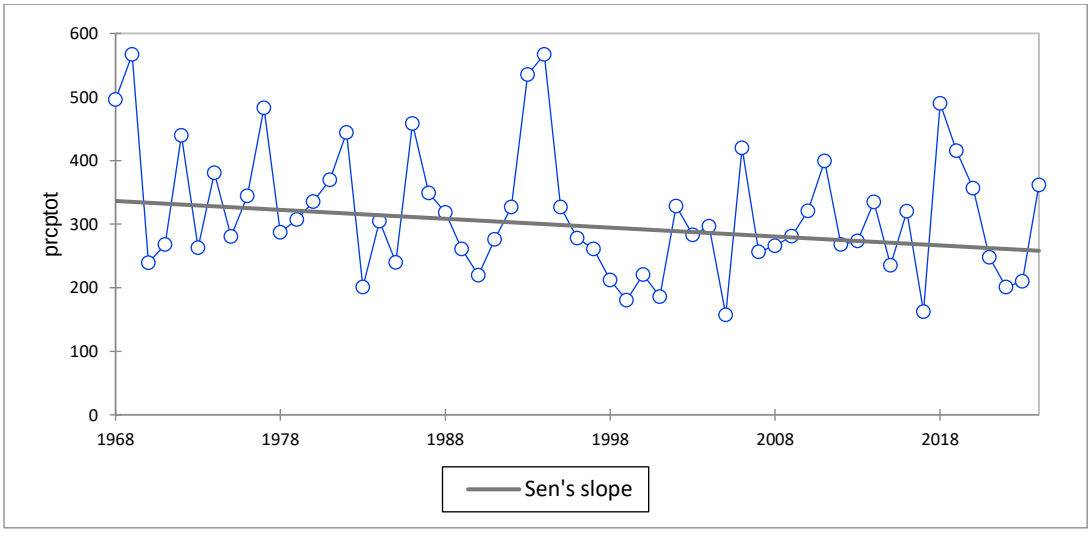
شکل ۷ : نمودار شاخص تعداد روزهای تابستانی (SU25) در دوره ۵۷ ساله منتهی به ۲۰۲۴ ایستگاه هواشناسی فرودگاه شهید باکری ارومیه



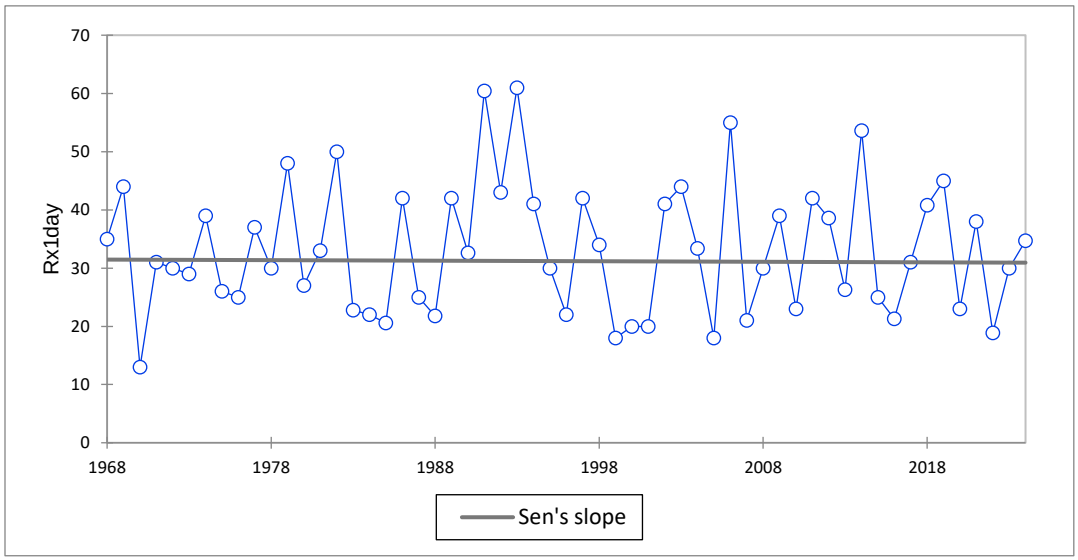
شکل ۸ : نمودار شاخص تعداد روزهای خشک (CDD) در دوره ۵۷ ساله منتهی به ۲۰۲۴ ایستگاه هواشناسی فرودگاه شهید باکری ارومیه



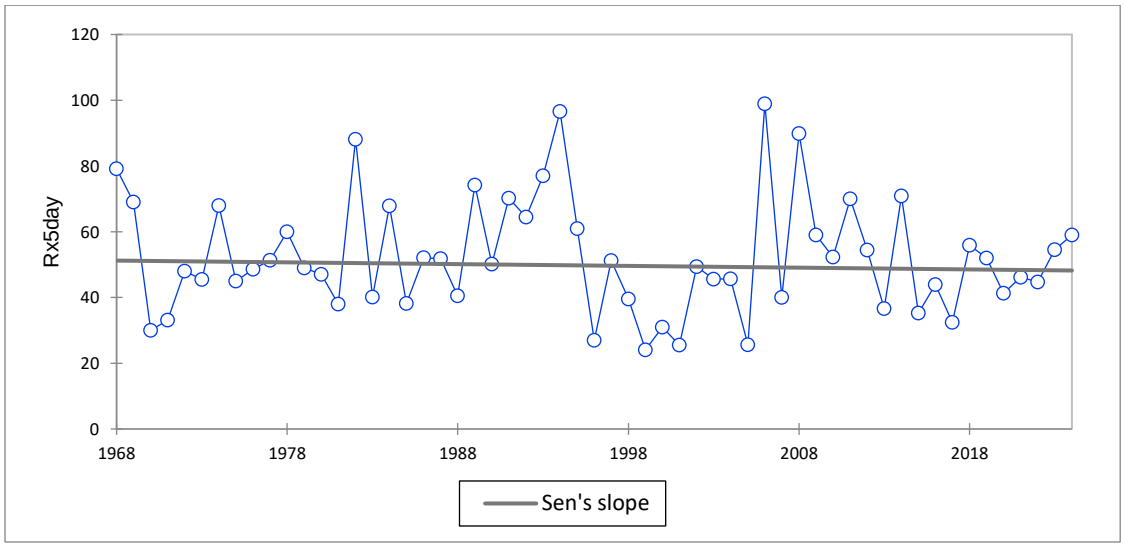
شکل ۹ : نمودار شاخص تعداد روزها با دمای بیشینه مطلق بیش از ۳۵ درجه سلسیوس(TXxge35) در دوره ۵۷ ساله منتهی به ۲۰۲۴ ایستگاه هواشناسی



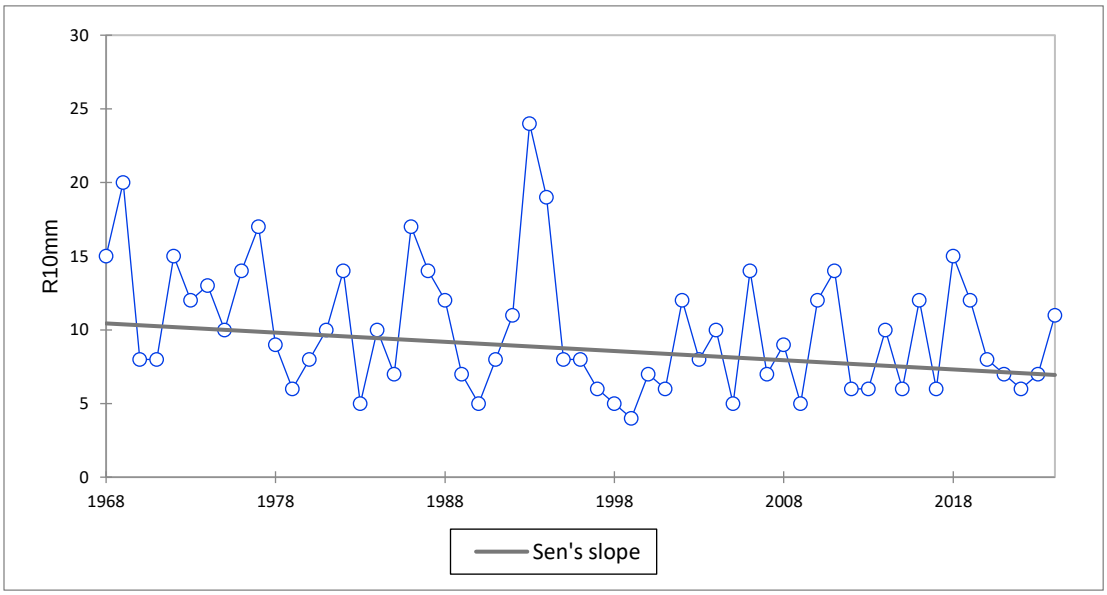
شکل ۱۰ : نمودار شاخص بارش سالانه (prcptot) در دوره ۵۷ ساله منتهی به ۲۰۲۴ ایستگاه هواشناسی فرودگاه شهید باکری ارومیه



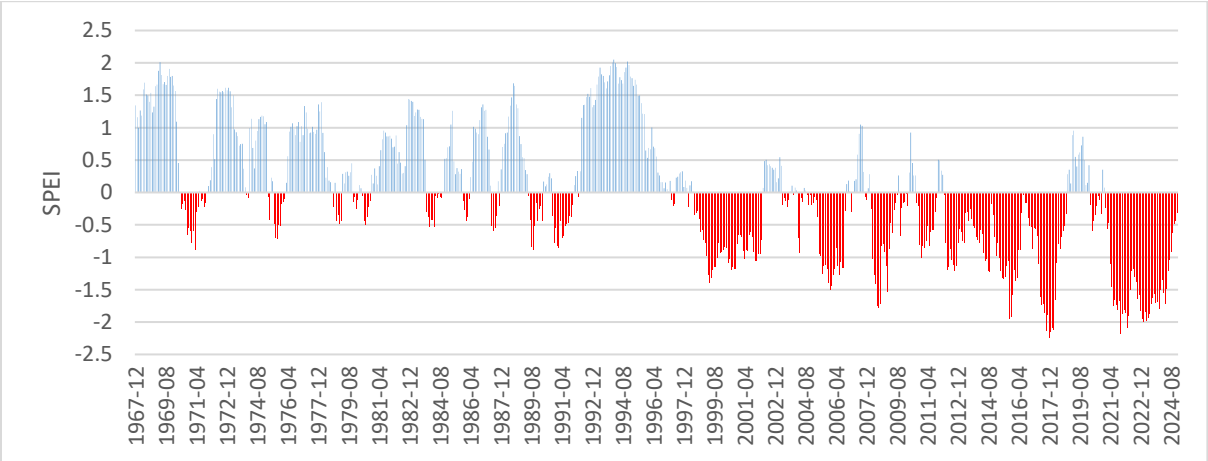
شکل ۱۱ : نمودار شاخص حداکثر بارش یکروزه (Rx1day) در دوره ۵۷ ساله منتهی به ۲۰۲۴ ایستگاه هواشناسی فرودگاه شهید باکری ارومیه



شکل ۱۲ : نمودار شاخص حداکثر بارش پنج روزه (Rx ۵day) در دوره ۵۷ ساله منتهی به ۲۰۲۴ ایستگاه هواشناسی فرودگاه شهید باکری ارومیه



شکل ۱۳ : نمودار شاخص تعداد روزهای با بارش بیش از ۱۰ میلی متر (R10mm) در دوره ۵۷ ساله منتهی به ۲۰۲۴ ایستگاه هواشناسی ارومیه



شکل ۱۴ : نمودار شاخص SPEI در دوره ۵۷ ساله منتهی به ۲۰۲۴ ایستگاه هواشناسی فرودگاه شهید باکری ارومیه

بحث و نتیجه گیری

واکاوی رخدادهای حدی دما و بارش یکی از موضوعات مهم در اقلیم‌شناسی است. مطالعات متعدد در نقاط مختلف جهان نشان می‌دهد که شدت دماهای حدی افزایش یافته و بارش‌ها روندی کاهشی و پیش‌بینی‌شده دارند، به‌طوری که در آینده نیز شدت و فراوانی بارش‌های حدی در بسیاری از مناطق افزایش خواهد یافت .شناسایی و تحلیل تغییرات دما و بارش، بررسی علل این تغییرات و ارزیابی تأثیرات آن‌ها بر ابعاد مختلف محیطی، می‌تواند راهکارهایی برای سازگاری و مقابله با اثرات تغییر اقلیم ارائه دهد. این اقدامات به مدیران و برنامه‌ریزان کمک می‌کند تا در شرایط تغییر اقلیم بر مشکلات مدیریتی غلبه کنند. در این پژوهش، با استفاده از شاخص‌های حدی بارش و دما، روند تغییرات اقلیمی در شهرستان ارومیه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که:

شاخص‌های دمای حدی مانند حداکثر دمای بیشینه (TXX) و تعداد روزهای تابستانه (۲۵SU) دارای روند افزایشی معنی‌دار هستند، که حاکی از گرم‌تر شدن منطقه و افزایش وقوع موج‌های گرمایی در سال‌های اخیر است.

شاخص‌های حداقل دما و روزهای یخبندان (TNN و ID۰) کاهش یافته‌اند، هرچند برخی از تغییرات غیرمعنادار بوده‌اند و نشان‌دهنده نوسانات سالانه دما و کاهش یخبندان‌ها هستند.

شاخص‌های بارش حدی مانند mm۱۰R و day۱Rx به ترتیب روند افزایشی و کاهشی (در سطح غیرمعنادار) داشته‌اند، که بیانگر تغییر در شدت و فراوانی بارش‌های شدید روزانه و تجمعی است.

شاخص SPEI در دوره ۱۲ ماهه روند کاهشی و معنی‌دار داشته، که نشان‌دهنده افزایش خشکسالی و کاهش رطوبت منطقه است.

این یافته‌ها تأکید می‌کنند که منطقه ارومیه در معرض تغییرات اقلیمی قابل توجه، به ویژه افزایش دما و کاهش بارش‌های مؤثر و افزایش خشکسالی قرار دارد. شناسایی این روندها می‌تواند به مدیران و برنامه‌ریزان کمک کند تا راهبردهای مؤثر مدیریت منابع آب، کشاورزی و مقابله با اثرات منفی تغییر اقلیم را تدوین کنند.

منابع:

احمدی م. لشکری ح. آ ادی م و کیصسروی ق. ۱۳۹۴ . آشکارسازی تغییر اقلیم با استفاده از شاخصهای حدی بارش در خراسان بزرگ. پژوهتهای دانت مین. شماره ۲۳ . صاحات ۳۴ – ۵۲ https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20088299.1394.6.3.3.1

تبرزرد فیروز. ۱۳۹۷ . پیش بینی و ارزیابی تغییر اقلیم با تاکید بر سیستم اطلاعات جغرافیایی: مطالعه موردی استان کرمانشاه. مجله جغرافیا و روابط انسانی. دوره اول شماره ۲. صفحات ۲۰۵ – ۲۱۹ https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26453851.1397.1.2.14.7

حسینی سید سلام. ۱۴۰۰ . بررسی اقلیم شناسی سینوپتیک و تغییرات آب و هوایی سوزباد دشت زرینه اوباتو از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ میلادی. مجله جغرافیا و روابط انسانی. دوره چهارم شماره ۲. صفحات ۲۹۸ – ۳۱۸ https://doi.org/10.22034/gahr.2021.289165.1569

رحیمیانی ایرانشاهی، ح.ر.، جلیلی، خ. ۱۴۰۱. روند تغییرات بارش و دما در مقیاس های زمانی مختلف در حوزه آبخیز کرخه. مدل سازی و مدیریت آب و خاک، ۲(۲):۱-۱۲. https://doi.org/10.22098/mmws.2022.9520.1048

اکبری مهری، صیاد وحیده. ۱۴۰۰ . تحلیل مطالعات تغییر اقلیم درایران. پژوهشهای جغرافیای طبیعی، دورهٔ ۳۵ ،شمارهٔ ۱ ، ۳۷ – ۷۴ https://doi.org/10.22059/jphgr.2021.301111.1007528

خزائی محمد رضا، خزائی حدیث، ثقفی بهرام. ۱۳۹۹ . اثر تغییر اقلیم بر بارشهای حدی مناطق خشک ایران. علوم و تکنولوژی محیط زیست. دوره ۲۰ ، شماره ۹ . ۳۱ – ۴۲ https://sid.ir/paper/389167/fa .

اسدی، ا. و ع. حیدری. .۱۳۹۰ تحلیل تغییرات سریهای دما و بارش شیراز طی دوره .۱۹۵۱-۲۰۰۵ مجله جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، سال ،۲۲ شماره ،۱ ص .۱۳۷-۱۵۲ https://sid.ir/paper/362739/fa

تقوی، ف. و ح. محمدی. .۱۳۸۶ بررسی دوره بازگشت رویدادهای اقلیمی حدی به منظور شناخت پیامدهای زیست محیطی . محیط شناسی، سال سی و سوم، شماره ،۴۳ ص .۱۱-۲ https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.10258620.1386.33.43.2.4

رضایی بنفشه مجید، نجفی محمد سعید، تقی زاده حبیبه ، آب خرابات شعیب. ۱۳۹۴ . واکاوی رفتار بارشهای حدی در ارتباط با عوامل مؤثر بر بارش در غرب و شمالغرب. جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره سیزدهم. صفحات ۱۳۳ – ۱۵۳. https://doi.org/10.22067/geo.v4i1.37833

محمدی ح. عزیزی ق. خوش اخلاق ف. و رنجبر ف. ۱۳۹۶ . تحلیل روند شاخص های حدی بارش روزانه در ایران. پژوهشهای جغرافیای طبیعی. دوره ۴۹ . شماره ۱ . صاحات ۲۱ - ۳۷ . https://doi.org/10.22059/jphgr.2017.61577

اقلیم شناسی بارشِ شمال غرب ایران دکتر حسین عساکره ، رباب رزمی," مجله جغرافیا و توسعه, ۹ ۲۵ (۱۳۹۰): ۱۳۷-۱۵۸, doi: ۱۰.۲۲۱۱۱/gdij.۲۰۱۱.۵۱۴

هرمزی هدایت الله، برنا رضا، ظهوریان منیژه. ۱۳۹۸ . بررسی روند تغییرات مقادیر حدی دما در استان خوزستان. فصلنامه علمی تصصصی مهندسی آب. صاحات ۳۱۵ – ۳۳۳. https://sanad.iau.ir/journal/jwe/Article/675785?jid=675785&lang=en

علیزاده چوبری, امید, نجفی, محمد سعید. (۱۳۹۶). روند تغییرات دمای هوا و بارش در مناطق مختلف ایران ,'فیزیک زمین و فضا, 43(3), pp. 569-584. doi: 10.22059/jesphys.2017.60300

Avila-Diaz, A., Abrahão, G., Justino, F., Torres, R., & Wilson, A. (2020). Extreme climate indices in Brazil: evaluation of downscaled earth system models at high horizontal resolution. Climate Dynamics, 54(11), 5065-5088. https://doi.org/10.1007/s00382-020-05272-9

Brown, P. J., Bradley, R. S., & Keimig, F. T. (2010). Changes in extreme climate indices for the northeastern United States, 1870–2005. Journal of Climate, 23(24), 6555-6572. https://doi.org/10.1175/2010JCLI3363.1

Dai S, Shulski MD, Hubbard KG, Takle ES (2016) A spatiotemporal analysis of Midwest US emperature and precipitation trends during the growing season from 1980 to 2013. Int J Climatol 36:517–525.

Dos Santos, C.A.C., Neale, C.M.U., Mekonnen, M.M. et al. Trends of extreme air temperature and precipitation and their impact on corn and soybean yields in Nebraska, USA. Theor Appl Climatol 147, 1379–1399 (2022). https://doi.org/10.1007/s00704-021-03903-7.

Frimpong, B.F., Koranteng, A. & Molkenthin, F. Analysis of temperature variability utilising Mann–Kendall and Sen's slope estimator tests in the Accra and Kumasi Metropolises in Ghana. Environ Syst Res 11, 24 (2022). https://doi.org/10.1186/s40068-022-00269-1.

OUFRIGH, O., ELOUISSI, A., & BENZATER, B. (2023). Trend Assessment by the Mann-Kendall Test and the Innovative Trend Analysis Method (North-West Algeria). GeoScience Engineering, 69(2), 186–233. https://doi.org/10.35180/gse-2023-0099.

Liu, H., Liu, Y., Yang, W., & Sun, X. (2023). "Impact of extreme high temperatures on crop yield and water use efficiency: Evidence from recent studies." Field Crops Research, 278, 108318. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108318.

Klein Tank, A.M.G., Zwiers, F.W. and Zhang, X. (2009) Guidelines on Analysis of Extremes in a Changing Climate in Support of Informed Decisions for Adaptation. Climate Data and Monitoring WCDMP-No. 72, 56.

Ghanim, A. A. J., Anjum, M. N., Rasool, G., Saifullah, Irfan, M., Rahman, S., Mursal, S. N. F., & Niazi, U. M. (2023). Assessing spatiotemporal trends of total and extreme precipitation in a subtropical highland region: A climate perspective. PloS one, 18(8), e0289570. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0289570.

Marigi, S. N., Njogu, A. K., & Githungo, W. N. (2016). Trends of extreme temperature and rainfall indices for arid and semi-arid lands of south eastern Kenya. Journal of Geoscience and Environment Protection, 4(12), 158.

Mistry, M. N. (2019). A high-resolution global gridded historical dataset of climate extreme indices. Data, 4(1), 41.

Muia V. K., Opere A. O., Ndunda E., Amwata D. A. (2024) Rainfall and Temperature Trend Analysis using Mann-Kendall and Sen’s Slope Estimator Test in Makueni County, Kenya, J. Mater. Environ. Sci., 15(3), 349-367.

https://repository.mut.ac.ke/xmlui/bitstream/handle/123456789/6453/Amwata_Rainfall%20and%20Temperature%20Trend%20Analysis%20using%20Mann-Kendall%20and.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Leal Filho, W., Balasubramanian, M., Purcell, W., & Paz, S. (2022). Handling the health impacts of extreme climate events. Environmental Sciences Europe, 34(1), 1-5. https://doi.org/10.1186/s12302-022-00621-3

Sun, Q., Zhang, X., Zwiers, F., Westra, S., & Alexander, L. V. (2021). A global, continental, and regional analysis of changes in extreme precipitation. Journal of Climate, 34(1), 243-258. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0892.1

Putra, I. D. G. A., Rosid, M. S., Sopaheluwakan, A., Ulina, Y. C., Harsa, H., Permana, D. S., & Cho, J. (2019, November). Projected extreme climate indices in the java island using cmip5 models. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 363, No. 1, p. 012022). IOP Publishing. https://doi.org/10.1088/1755-1315/363/1/012022

Mohammadi, N., Hejazizadeh, Z., Zeaiean Firouzabadi, P., & Karbalaee, A. (2024). Detection of the effect of climate change on the mechanism of heat islands in Tehran province. Journal of the Nivar, 48(124-125), 203-224.: https://doi.org/10.30467/nivar.2024.442784.1281

Ankrah, J., Monteiro, A., & Madureira, H. (2023). Spatiotemporal Characteristics of Meteorological Drought and Wetness Events across the Coastal Savannah Agroecological Zone of Ghana. Water, 15(1), 211. https://doi.org/10.3390/w15010211

Calma, J., & Fajardo, S. M. (2025). Climate Trend Analysis Using Mann-Kendall and Sen's Slope Estimator Tests in Central Luzon, Philippines. Interdisciplinary Research Review, 20(1). https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/jtir/article/view/250008

Chandniha, S. K., Meshram, S. G., Adamowski, J. F. & Meshram, C. 2017 Trend analysis of precipitation in Jharkhand State, India. Theoretical and Applied Climatology 130 (1), 261–274. https://doi.org/10.1007/s00704-016-1875-x

Gajbhiye, S., Meshram, C., Singh, S. K., Srivastava, P. K. & Islam, T. 2016 Precipitation trend analysis of Sindh River Basin, India, from 102- year record (1901–2002). Atmospheric Science Letters 17 (1), 71–77. https://doi.org/10.1002/asl.602

Gaddikeri, V., Sarangi, A., Singh, D. K., Jatav, M. S., Rajput, J., & Kushwaha, N. L. (2024). Trend and change-point analyses of meteorological variables using Mann–Kendall family tests and innovative trend assessment techniques in New Bhupania command (India). Journal of Water and Climate Change, 15(5), 2033-2058. https://doi.org/10.2166/wcc.2024.462

Jain, S. K., Kumar, V. & Saharia, M. 2013 Analysis of rainfall and temperature trends in northeast India. International Journal of Climatology 33 (4), 968–978. https://doi.org/ DOI: 10.1002/joc.3483

Kliengchuay, W., Mingkhwan, R., Kiangkoo, N., Suwanmanee, S., Sahanavin, N., Kongpran, J., ... & Tantrakarnapa, K. (2024). Analyzing temperature, humidity, and precipitation trends in six regions of Thailand using innovative trend analysis. Scientific Reports, 14(1), 7800. https://doi.org/10.1038/s41598-024-57980-5

Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. Journal of the American statistical association, 63(324), 1379-1389. http://www.jstor.org Tue Mar 20 18:18:32 200

بررسی عوامل شکل گیری و راهبردهای کاهش پدیده جزیره حرارتی شهری

سعید حسین آبادی[۱]

۱- استادیار جغرافیا و برنامه ریزی شهری، دانشگاه بزرگمهر قائنات
Hosseinaabdi@buqaen.ac.ir

چکیده

پدیده جزیره حرارتی شهری که به بالاتر بودن قابل توجه دمای شهرها نسبت به نواحی پیرامونی اشاره دارد ؛ یکی از چالشهای زندگی مدرن است که پیامدهای مختلفی چون تاثیر منفی بر آسایش حرارتی،تندرستی شهروندان و مصرف انرژی سرمایشی دارد.پژوهش حاضر با رویکردی توصیفی- تحلیلی و با مرور پژوهشهای پیشین در پی شناسایی عوامل موثر بر شکلگیری و تشدید جزایر حرارتی و راهکارهای عملی جهت کاهش آنها در شهرهاست. طبق بررسی مروری انجام شده؛ تغییر کاربری زمینهای دارای پوشش گیاهی و سطوح نفوذپذیر به کاربریهای انسانساخت، بکارگیری مصالح دارای جذب بالا و بازتاب پایین انرژی ، تراکمهای غیراصولی در ساخت و ساز، فعالیتهای انسانی همچون حمل و نقل، فعالیتهای صنعتی، مصرف انرژی در ساختمانها و... از جمله مهمترین عوامل پیدایش جزایر حرارتی در شهرها هستند.

شواهد تجربی از شهرهای گوناگون جهان بیانگر آن است که مجموعه‌ای از راهبردها می‌تواند در کاستن از اثرات جزیره حرارتی کارساز باشد: بام‌ها و دیوارهای سبز ، گسترش فضاهای سبز، بکارگیری مصالح خنک و بازتابنده ،زیرساختهای آبی، برنامه‌ریزی صحیح کاربری زمین و طراحی فرم بهینه شهری می‌تواند بر شدت و گستردگی جزایر دمایی تاثیر گذارد. از بررسی تجربیات موفق شهرهای جهان می توان دریافت که کاهش شدت جزیره حرارتی نیازمند به کارگیری ترکیبی از راهبردهاست.

کلید واژه‌ها : جزیره حرارتی شهری ، خرد اقلیم، شهرنشینی، برنامه ریزی شهری، محیط شهری، راهبردها،

مقدمه

در سال ۲۰۲۰، گزارش ادراک خطرات جهانی مجمع جهانی اقتصاد، تغییرات اقلیمی و مسائل زیست‌محیطی مرتبط با آن را در میان پنج خطر جهانی محتمل برای وقوع در ده سال آینده فهرست کرد. علاوه بر این، پیش‌بینی‌های تغییرات اقلیمی نشان دهنده احتمال قوی افزایش ۱.۵ درجه سانتیگرادی دمای جهانی بین سال‌های ۲۰۳۰ تا ۲۰۵۲ است . با وجود این استرس حرارتی اضافه، شهرها در تابستان‌های گرم و زمانی که آسمان صاف است، بیشتر از حومه شهر مورد تهدید قرار

می‌گیرند زیرا آنها پدیده افزایش دمای هوا در سطح، زیر سطح یا سطح هوا را به میزان بیشتری نسبت به همتایان روستایی توسعه نیافته خود تجربه می‌کنند؛ این پدیده به عنوان جزیره گرمایی شهری شناخته می‌شود(H. Elnabawi et al, 2023) . در واقع شهرنشینی گسترده، و مدرن در کنار نتایج مطلوبی که برای بشر داشته ؛ پیامدهای نامطلوبی را نیز به همراه داشته است؛ که یکی از مهمترین آنها شکل‌گیری جزایر حرارتی شهری است(احمدی و داداشی رودباری، ۱۳۹۶) .این پدیده به تعادل حرارتی مثبت ایجاد شده در محیط شهری به دلیل افزایش دریافت گرما مانند جذب بالای تابش خورشیدی و گرمای انسانی و کاهش تلفات حرارتی مربوط می‌شود. بدون شک، جزیره گرمایی مستندترین پدیده تغییرات اقلیمی است و برای مناطق جغرافیایی مختلف کره زمین به خوبی مستند شده است .در بسیاری از شهرها، شدت جزیره گرمایی ممکن است از چندین درجه فراتر رود، در حالی که تغییرات منطقه‌ای و زمانی مهمی مشاهده می‌شود (Santamouris,2013). همراه با پدیده تغییرات اقلیمی جهانی، دلایل اصلی افزایش قابل توجه دمای شهرها وجود دارد. این پدیده در مناطق خاصی از شهرها با تراکم بالا و کیفیت محیطی پایین مشاهده می‌شود و منجر به کاهش شدید سطح آسایش حرارتی محیط و شرایط حرارتی نامناسب در فضای داخلی می‌شود(Santamouris,2013) .

جزیره گرمایی شهری به عنوان یکی از مشکلات عمده قرن بیست و یکم در نظر گرفته می‌شود که در نتیجه شهرنشینی و صنعتی‌شدن تمدن بشری برای انسان‌ها ایجاد شده است. مقادیر زیاد گرمای تولیدشده از سازه‌های شهری که تشعشعات خورشیدی را جذب و بازتاب می‌دهند و همچنین منابع گرمایی انسان‌ساخت، از دلایل اصلی تشکیل جزیره گرمایی شهری هستند. این دو منبع گرمایی، دمای یک منطقه شهری را در مقایسه با مناطق اطراف آن افزایش می‌دهند که به عنوان شدت جزیره گرمایی شهری شناخته می‌شود. این مشکل در شهرها یا کلان‌شهرهای با جمعیت زیاد و فعالیت‌های اقتصادی گسترده، حتی بدتر نیز هست. برآورد می‌شود که سه میلیارد نفر از ساکنان مناطق شهری در جهان به طور مستقیم در معرض این مشکل قرار دارند که در آینده نزدیک به طور قابل توجهی افزایش خواهد یافت(Rizwan& Denis,2008). اثرات نامطلوب جزیره حراتی شهری به طور گسترده در مقالات علمی مستند شده است. به عنوان مثال، دمای شهرها را افزایش می‌دهد؛ به گرمایش جهانی کمک می‌کند ، باعث وقوع طوفان‌ها/بارش‌ها می‌شود . تقاضای انرژی شهرها را افزایش می‌دهد و به مرگ و میر ناشی از گرما کمک می‌کند. این اثرات مخرب، ابداع راه‌هایی برای کاهش اثرات UHI را ضروری می‌سازد . در نتیجه، بسیار مهم است که بدانیم چه راهبردهایی برای کاهش اثر جزیره حراتی می توان به کاربست (Deilami et al,2018)

انگیزه اصلی این پژوهش، بررسی عوامل موثر بر شکل گیری و تشدید پدیده جزیره حرارتی شهری و گردآوری و تحلیل راهبردهای اجرا شده در شهرهای جهان برای کاهش شدت آن است تا تصویری یکپارچه از مؤثرترین رویکردها در مقیاس جهانی ارائه شود و مبنایی برای تصمیم‌سازی در سیاست‌های توسعه پایدار شهری فراهم گردد.

روش شناسی

رویکرد این پژوهش کیفی و تحلیلی – توصیفی است و با هدف مرور و استخراج تجربیات موفق جهانی در کاهش اثر جزایر حرارتی شهری انجام شده است. نوع تحقیق، کاربردی – توسعه‌ای محسوب می‌شود زیرا نتایج آن می‌تواند در سیاست‌گذاری و طراحی شهری به کار رود.

گردآوری داده‌ها به‌صورت مطالعه اسنادی و کتابخانه‌ای صورت گرفته است. منابع مورد بررسی شامل مقالات علمی – پژوهشی، گزارش‌های سازمان‌های بین‌المللی و طرح‌های شهری در حوزه مدیریت اقلیم شهری است. در این مطالعه، داده‌ها از منابع معتبر بین‌المللی گردآوری و سپس با روش تحلیل محتوای کیفی مورد بررسی قرار گرفت تا الگوهای مشترک و مؤثرترین استراتژی‌ها در کاهش جزایر حرارتی شناسایی و طبقه‌بندی شوند.

جزیره حراتی شهری(Urban Heat Island) و علل شکل گیری آن

جزیره گرمایی شهری (به انگلیسیUrban Heat Island) به پدیده بالا بودنِ چشمگیرِ درجه دمای برخی از شهرها یا مناطق شهری در مقایسه با حومه شهر یا محدوده‌های روستاییِ نزدیکشان گفته می‌شود(Taleghani, 2018). ذخیره حرارتی بالاتر سطوح شهری در مقایسه با مناطق روستایی به تشکیل جزیره حراتی کمک می‌کند . جایی که دمای هوا می‌تواند از حدود ۱ درجه سانتیگراد تا بیش از ۱۰ درجه سانتیگراد بالاتر از مناطق روستایی مجاور باشد . این پدیده یکی از قابل توجه‌ترین تغییرات جوی منتسب به شهرنشینی است که تقریباً ۲۰۰ سال پیش توسط لوک هاوارد شناسایی شد و یکی از بررسی‌شده‌ترین اثرات اقلیمی در شهرهای سراسر جهان را نشان می‌دهد .(Vujovic et al, 2022) . بر اساس مطالعات علمی، علل تشکیل جزایر حرارتی شهری را می‌توان به دو دسته کلی عوامل اقلیمی (غیرقابل کنترل) و عوامل انسانی و طراحی شهری (قابل کنترل) تقسیم‌بندی کر(پورامین و همکاران، ۱۳۹۹). تمرکز اصلی تحقیقات جدید بر روی عوامل دسته دوم است، چرا که این عوامل مستقیماً تحت تأثیر برنامه‌ریزی و مدیریت شهری قرار می‌گیرند. در اینجا به مهمترین هوامل در شکل گیری جزیزره حرارتی در شهرها پرداخته می شود:

آب و هوا و ویژگی های جغرافیای طبیعی شهر. شرایط آب و هوایی آرام و صاف با به حداکثر رساندن میزان انرژی خورشیدی که به سطوح شهری می‌رسد و به حداقل رساندن میزان گرمایی که می‌تواند منتقل شود، منجر به جزایر گرمایی شدیدتری می‌شود. برعکس، بادهای شدید و پوشش ابر مانع تشکیل جزایر گرمایی می‌شوند. ویژگی‌های توپوگرافی نیز می‌توانند بر اثر جزیره گرمایی تأثیر بگذارند. به عنوان مثال، کوه‌های مجاور می‌توانند مانع رسیدن باد به یک شهر شوند یا الگوهای بادی ایجاد کنند که از یک شهر عبور می‌کنند(https://www.epa.gov).شهرهایی که در دره‌ها یا حوضه‌ها قرار گرفته‌اند یا محصور به کوه‌ها هستند، تهویه طبیعی کمتر دارند. همچنین نزدیکی به دریا ممکن است اثر باد نسیم ساحلی را افزایش دهد که کمک به کاهش دما می کند.(Chen ert al,2016)

کاهش چشم اندازهای طبیعی در مناطق شهری: درختان، پوشش گیاهی و آبراه‌ها به ترتیب با ایجاد سایه، تعرق آب از برگ‌های گیاهان و تبخیر آب‌های سطحی، هوا را خنک می‌کنند. سطوح سخت و خشک در مناطق شهری - مانند پشت

بام‌ها، پیاده‌روها، جاده‌ها، ساختمان‌ها و پارکینگ‌ها - سایه و رطوبت کمتری نسبت به مناظر طبیعی ایجاد می‌کنند و بنابراین به افزایش دما کمک می‌کنند**(https://www.epa.gov)**.. وقتی پوشش گیاهی از بین می‌رود، تبخیر و تعرق گیاه کاهش می‌یابد و این فرآیند طبیعی خنک‌کننده کمتر عمل می‌کند. در نتیجه، سطوح شهری به خاطر جذب تابش خورشیدی بیشتر گرم می‌شوند.(Deilami et al., 2018).

ویژگی‌های مصالح شهری: مصالح ساخت بشر(سیمان، بتن، آسفالت و...) که در محیط‌های شهری مانند خیابانها، پیاده‌روها یا سقف‌ها استفاده می‌شوند، در مقایسه با درختان، پوشش گیاهی و سایر سطوح طبیعی، انرژی خورشیدی کمتری را منعکس می‌کنند و گرمای خورشید را بیشتر جذب و منتشر می‌کنند. اغلب، جزایر حرارتی در طول روز ایجاد می‌شوند و پس از غروب آفتاب به دلیل آزاد شدن آهسته گرما از مصالح شهری، برجسته‌تر می‌شوند(https://www.epa.gov).البته رنگ مصالح هم تعیین کننده است؛ مواد با رنگ روشن، به دلیل آلبدوی بالاتر،نور خورشید کمتری نسبت به مواد با رنگ تیره جذب می‌کنند و در نتیجه خنک می‌مانند . سقف‌های سفید و پیاده‌روهای با رنگ روشن تنها ۳۰ تا ۶۵ درصد از نور خورشید را جذب می‌کنند، در حالی که پیاده‌روها و سقف‌های تیره ۸۰ تا ۹۰ درصد از نور خورشید را جذب می‌کنند . این سطوح گرما را جذب کرده و ذخیره می‌کنند و سپس شب هنگام آن را آزاد می‌کنند. همچنین با به کارگیری این مصالح که سطوح سطوح نفوذناپذیر را در شهرها بوجود می آورند مستقیماً بر هیدرولوژی حوزه آبخیز تأثیر می‌گذارند (به عنوان مثال، کاهش ظرفیت نفوذ، افزایش رواناب سطحی، زمان تمرکز کوتاه‌تر، کاهش تغذیه آب‌های زیرزمینی، کاهش نرخ تبخیر و تعرق) و بر مسیر طبیعی انرژی از طریق سیستم‌های جوی، زمینی و آبی تأثیر می‌گذارند. با تخلیه سریع رواناب سطحی، آب کمتری برای تبخیر و تعرق در دسترس است که بر تعادل انرژی سطحی شهری تأثیر می‌گذارد (Vujovic et al, 2022).

شکل شهری: هندسه و تراکم شهری عواملی هستند که به دلیل به دام انداختن تابش خورشیدی ورودی و تابش موج بلند خروجی، کاهش انتقال متلاطم به دلیل بادگیر بودن و آزاد شدن گرمای انسانی، بر خرداقلیم شهری تأثیر می‌گذارند .(Vujovic et al, 2022) .. ابعاد و فاصله ساختمان‌ها در یک شهر بر جریان باد و توانایی مصالح شهری در جذب و آزادسازی انرژی خورشیدی تأثیر می‌گذارد. در مناطق بسیار توسعه‌یافته، سطوح و سازه‌هایی که توسط ساختمان‌های همسایه مسدود شده‌اند، به توده‌های حرارتی بزرگی تبدیل می‌شوند که نمی‌توانند گرمای خود را به راحتی آزاد کنند. شهرهایی با خیابان‌های باریک و ساختمان‌های بلند زیاد، به دره‌های شهری تبدیل می‌شوند که می‌توانند جریان باد طبیعی را که اثرات خنک‌کننده را به همراه دارد، مسدود کنند(https://www.epa.gov).. مطالعات نشان داده‌اند که اگر شکل شهری با پراکندگی یا چندمرکزی بودن مشخص شود، اثر جزیره حرارتی سطح زمین شهری SUHI ضعیف‌تر می‌شود. این یافته‌ها نشان می‌دهد که اگر شهری کمتر فشرده باشد، می‌توان گرمای شهری را کاهش داد. اما مطالعه با تجزیه و تحلیل داده‌های دمای سطح زمین (LST) با وضوح بالا و پوشش زمین برای ۲۹۳ شهر اروپایی، نشان می‌دهد که - برخلاف بسیاری از یافته‌های قبلی - اشکال شهری پراکنده یا چندمرکزی لزوماً منجر به کاهش LST در مناطق شهری نمی‌شوند. در شهرهای جنوب اروپا، پراکندگی حتی می‌تواند منجر به گرم شدن مناطق شهری در طول روزهای خاص شود و اهمیت

در نظر گرفتن زمینه‌های محیطی و منطقه‌ای را هنگام تعیین نقش شکل شهری در کاهش گرما برجسته می‌کند. همچنین در نظر گرفتن نوع غالب پوشش زمین در اطراف یک شهر بسیار مهم است زیرا پراکندگی در مناطق جنگلی می‌تواند تأثیر بسیار متفاوتی نسبت به پراکندگی در مناطق کشاورزی داشته باشد. این نتایج پیچیدگی کاهش گرما مرتبط با شکل شهری را نشان می‌دهد و اینکه سیاست‌گذاران و تصمیم‌گیرندگان باید هنگام هدایت شکل شهری، زمینه‌های محلی و منطقه‌ای را در نظر بگیرند(Schwaab,2022).

کاربری زمین : نوع کاربری زمین نقش مهمی در جزیره حرارتی دارد. برای نمونه طبق تحقیقی که در شهر پورتلند انجام شده نشان داد که به طور خاص، مشخص شد که هوای بالای جاده‌های شریانی اصلی در روزهای هفته گرم‌تر از آخر هفته‌ها است، احتمالاً به دلیل افزایش فعالیت‌های انسانی از بخش وسایل نقلیه در روزهای هفته. به طور کلی، مناطق گرم‌تر شهر با کاربری‌های صنعتی و تجاری مرتبط بودند(Hart& Sailor,2009). همچنین در مطالعه دیگر در «چین»، نشان داده شده است که گسترش مناطق شهری (با کاهش کاربری های دارای پوشش گیاهی و افزایش اراضی ساخته‌شده) افزایش شدت جزیره حرارتی را در پی داشته است.(Yang et al., 2017.) .

گرمای ناشی از فعالیتها و زیرساختهای انسانی : همبستگی معناداری بین انتشار گرمای ناشی از فعالیت‌های انسانی و جزایر حرارتی وجود دارد، به طوری که فعالیت‌های انسانی در درجه اول بر تبخیر سطحی تأثیر می‌گذارند در مناطقی که با تراکم جمعیت بالاتر و توسعه اقتصادی شدید مشخص می‌شوند، فعالیت‌های انسانی و فرآیندهای اقتصادی می‌توانند در گرمایش ناشی از فعالیت‌های انسانی نقش داشته باشند. در نتیجه، اثر جزیره گرمایی در مناطق مرکزی شهری بیشتر مشهود است(Liu et al., 2024) .گرمای انسانی به طور قابل توجهی در تشکیل جزیره حرارتی نقش دارد. گرما می‌تواند از فعالیت‌های مختلف انسانی ناشی شود و با جمع کل انرژی مورد استفاده برای وسایل نقلیه، سیستم‌های گرمایش و سرمایش، لوازم خانگی در حال کار، نیروگاه‌ها و فرآیندهای صنعتی محاسبه می‌شود. تولید گرمای انسانی به زیرساخت‌ها و فعالیت‌های شهری، با ساختمان‌های پرمصرف انرژی و حجم ترافیک بستگی دارد .. حجم ترافیک همچنین با مورفولوژی شهری مرتبط است و وسایل نقلیه تأثیر قابل توجهی در افزایش گرما و همچنین آلودگی هوا در مناطق شهری دارند . سیستم‌های تهویه مطبوع اغلب در سیستم‌های خنک‌کننده در خانه، محل کار، اماکن عمومی و حتی در ماشین برای حفظ آسایش حرارتی انسان در روزهای گرم استفاده می‌شوند. سیستم‌های تهویه مطبوع در طول عملکرد فشرده‌سازی و تراکم خود گرمای قابل توجهی تولید می‌کنند . گرمای ساطع شده از منابع انسانی تأثیر بیشتری بر تشکیل جزیره حرارتی به ویژه در مناطق شهری متراکم‌تر دارد.(Imran,, 2021).

پیامدهای جزیره حرارتی

اثر جزیره گرمایی شهری (UHI) نوعی پدیده انباشت گرما در مناطق شهری به دلیل ساخت و ساز شهری و فعالیت‌های انسانی است. این پدیده به عنوان بارزترین ویژگی آب و هوای شهری شناخته می‌شود. افزایش دمای سطح زمین ناشی از اثر UHI قطعاً بر جریان مواد و جریان انرژی در سیستم‌های اکولوژیکی شهری تأثیر می‌گذارد و همچنین ساختار و عملکرد

آنها را تغییر می‌دهد و مجموعه‌ای از اثرات اکولوژیکی و زیست‌محیطی را بر آب و هوای شهری، شرایط هیدرولوژیکی شهری، خواص خاک، محیط جوی، عادات بیولوژیکی، چرخه‌های مواد، متابولیسم انرژی و سلامت ساکنان اعمال می‌کند.. (Yang et al, 2016). در اینجا به برخی از مهمترین پیامدهای چزیره حراتی پرداخته می شود.

افزایش مصرف انرژی سرمایشی: جزیره گرمایی شهری (UHI) می‌تواند با افزایش تقاضای سرمایش تأثیر قابل توجهی بر مصرف انرژی ساختمان داشته باشدمطالعات قبلی نشان داد که UHI می‌تواند منجر به افزایش متوسط ۱۹.۰ درصدی در مصرف انرژی سرمایشی در فصل گرم می شود. البته در اوقات سرد سال به دلیل گرمتر بودن این مناطق نیاز به انرژی گرمایشی ساختمان کاهش متوسط ۱۸.۷ درصدی را نشان می دهد(Li et al., 2019).

تأثیر بر کیفیت هوا و آلاینده‌ها و گازهای گلخانه‌ای: در مناطق با اثر جزیره حرارتی بیشتر نیاز به مصرف انرژی سرمایش افزایش می یابد که این خود علاوه بر مصرف برق، افزایش انتشار گازهای گلخانه ای را به همراه دارد(Magli et al., 2015). جزیره حرارتی با تغییر گردش محلی و محیط واکنش شیمیایی، مانند دمای هوا و رطوبت نسبی، بر آلودگی هوا تأثیر می‌گذارد. همچنین باعث افزایش انتشار آلاینده‌ها از نیروگاه‌ها و مصرف برق شود. جزایر حراتی می تواند توزیع عمودی ذرات معلق غیرآلی را تحت تأثیر قرار دهد که سرانجام کیفیت هوا را تحت شعاع قرار می دهد (Kang et al., 2022).

تاثیر بر آسایش حرارتی: تشدید اثر جزیره گرمایی شهری (UHI) چالش بزرگی را برای آسایش حرارتی افراد حتی در فضای باز ایجاد می‌کند. اثر جزیره حرارتی در کاهش آسیاش حرارتی در فضاهای باز با فقدان پوشش گیاهی تشدید می شود. به گفته آرام[۱۶۴] و همکاران در پارک‌ها و فضاهای سبز، اثر ترکیبی تعرق گیاهان و مناطق سایه‌دار ایجاد شده توسط سایبان‌های درختان منجر به کاهش قابل توجه دما می‌شود که می‌تواند دمای هوا را ۲.۴ تا ۲.۸ درجه سانتیگراد و PET را حدود ۳.۹ درجه سانتیگراد کاهش دهد و افزایش قابل توجهی در آسایش حرارتی ایجاد کند..(Ren, et al., 2023).

بیماری و مرگ و میر: افزایش خطرات سلامتی ناشی از هوای گرم در مناطق شهری به یک مسئله مهم بهداشت عمومی جهانی تبدیل شده است. پژوهشی نشان می‌دهد افزایش ۱ درجه سانتیگراد دما در مناطق شهری افزایش ٪۲،۱ در مرگ‌ومیر و ٪۱،۱ در بیماری‌ها مرتبط با گرم را به همراه دارد(Yang et al. 2024). طبق مطالعه ای در منطقه کلان‌شهری توکیو ژاپن، از سال ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۹ مطالعه‌ای ۲۲۰۷ مورد مرگ به اثرات جزیره حرارتی شهر مرتبط دانسته شده است (He et al., 2024). در مطالعه ای دیگر نیز دیده شده که قرار گرفتن در معرض گرمای بیش از حد منجر به حدود ۷۴۲۱ مرگ در ایالات متحده شده است. (Santamouris,2013).

راهبردها و تجربیات کاهش شدت جزیره حرارتی شهری

در زیر به مهمترین راهبردهای اجرا شده برای کاهش شدت جزیره حرارتی شهری پرداخته می شود:

[۱۶۴] Aram

افزایش پوشش گیاهی و فضاهای سبز شهری: افزایش پوشش درختی و ایجاد سایه از طریق ویژگی‌هایی مانند تراکم برگ، مساحت برگ، و تبخیر و تعرق، به کاهش اثر جزیره حرارتی شهری (UHI) کمک می‌کند. درختان با کاهش جذب تشعشع خورشیدی و افزایش تبخیر، دمای سطوح و هوا را ، به‌ویژه در تابستان پایین می‌آورندطراحی دقیق منظر شهری، استفاده از بام‌های سبز و سطوح نفوذپذیر، دمای شهر را تعدیل می‌کند(Irfeey et al., 2023). برای نمونه یک مطالعه در سنگاپور حداکثر اختلاف ۴.۰۱ درجه سانتیگراد بین منطقه خوب کاشته شده و منطقه CBD شهر را نشان داد (Wong& Yu,2005).

بام‌های سبز و دیوارهای سبز: دیوارهای سبز که پوشیده از گیاهان هستند ، به عنوان جایگزینی برای ساخت‌وساز سنتی دیوارها می تواند به کاهش اثر جزیره حرارتی شهری (UHI) یاری رساند. این دیوارها، به‌ویژه در ساختمان‌های بلند با سطح دیوار بیشتر، با پوشش گیاهی کامل یا جزئی، به کاهش دمای درون و بیرون ، بهبود کیفیت هوا و افزایش زیبایی محیط کمک می کنند. دیوارهای سبز به دو گونه اصلی تقسیم می‌شوند: دیوارهای زنده (پانل‌های گیاهی متصل به ساختار عمودی) و نمای سبز (گیاهان رونده که با چارچوب کمکی روی دیوار رشد می‌کنند). این سیستم‌ها با جذب دی‌اکسید کربن و کاهش گرما، محیطی خنک‌تر و پایدارتر پدید می آورند؛ هرچند نگرانی‌هایی درباره آسیب ریشه‌ها به دیوارها وجود دارد.(Irfeey et al.,2023).

بام‌های سبز (پوشیده از گیاهان) یکی از راهکارهای پایدار برای تبدیل ساختمان‌ها به سازه‌های سبز است. این بام‌ها شامل عناصری چون گیاهان، بستر رشد، لایه زهکشی، فیلتر، مانع ریشه و عایق هستند که کارکرد آن‌ها بسته به موقعیت جغرافیایی فرق می کند. بام‌های سبز به سه گونه گسترده (لایه نازک، نیاز کم به نگهداری و هزینه پایین)، نیمه‌فشرده (لایه متوسط، گیاهان گوناگونتر) و فشرده (لایه ستبر، نیاز بیشتر به نگهداری و دارای گیاهان متنوع) دسته بندی می‌شوند که از این میان بام‌های گسترده به سبب وزن کم و هزینه پایین بیشتر مورد استفاده قرار می گیرندVijayaraghavan) (2016پژوهشهای کمّی نشان داده‌اند که پوشش گیاهی بر روی پوسته ساختمان‌ها توان چشمگیری برای کاهش دمای شهری دارد. برای نمونه در شهری گرم و خشک همچون ریاض عربستان ، کاهش دمای هوا در سطح بام تا حداکثر ۲۶.۰ درجه سانتیگراد و میانگین روزانه ۱۲.۸ درجه سانتیگراد گزارش شده است. همچنین، در درون فضاهای شهری (دره‌های شهری)، کاهش دما تا حداکثر ۱۱.۳ درجه سلسیوس و میانگین روزانه ۹.۱ درجه سلسیوس دیده شده است. این طبق این یافته ها در آب و هوای گرم‌تر و خشک‌تر، اثر خنک‌کنندگی پوشش گیاهی بیشتر دیده می شود (Alexandri, & Jones, 2008). با وجود مزایای زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی زیرساخت‌های سبز، مانند بام‌های سبز و دیوارهای سبز؛ با این حال، اجرای بام‌های سبز و دیوارهای سبز هنوز محدود است، زیرا این سیستم‌ها اغلب در مقایسه با راه‌حل‌های مرسوم هزینه‌های اضافی دارند(Manso,2021).

مدیریت منابع آب شهری و سطوح نفوذپذیر: استفاده از عنصر آب در ترکیب با دیگر راهبردها یکی از مهمترین راهکارها برای کاهش اثر جزره دامیی است. مطالعه ای که در دوازده شهر ایالات متحده، انجام شده نقش مثبت ترکیب پوشش گیاهی و نزدیکی به آب در ماهش جزیره حرارتی را تایید کرده است نزدیکی به آب، اثر خنک‌کننده قوی را در

فاصله ۴ کیلومتری نشان داد، که فراتر از آن اثر کاهش یافته و در نهایت معکوس شد(**Marquez-Torres** ET AL.,2025) همچنین تجربه شهر ملبورن استراالیا نشان می دهد که با استفاده از روش‌های صرفه‌جویی در آب مانند نصب مخازن جمع‌آوری آب باران می توان امکان آبیاری در طول روز را فراهم نمود که این امر باعث افزایش تبخیر-تعرق روزانه و خنک شدن محیط میشود(Coutts et al., 2007).

در یک مقاله دیگر که به بررسی تاثیر فضاهای آبی بر خنک‌سازی و کارایی فضاهای آبی در منطقه کلان‌شهری دلتای رودخانه مروارید در چین پرداخته نتایج نشان می دهد افزایش ۱۰ درصدی پوشش بدنه آبی که منجر به کاهش شدت جزیره حرارتی سطح به میزان ۱۱.۳۳ درصد می‌شود. البته شکل نامنظم دریاچه‌ها و مخازن ممکن است اثر خنک‌سازی را تضعیف کند، اما تغییر شکل رودخانه‌ها ممکن است این کار را نکند. نتایج نشان‌دهنده سرریز خنک‌سازی خارج از محل بدنه‌های آبی است که به مناطق اطراف در یک پوشش ۱۰۰ متری فاصله خنک‌سازی مؤثر سود خواهد رساند. چنین یافته‌هایی بر اهمیت زیرساخت‌های آبی شهری در کاهش ناراحتی حرارتی تأکید می‌کنند و از فضاهای آبی به عنوان یک جزء اساسی زیرساخت‌های شهری برای به حداقل رساندن اثر جزیره حرارتی حمایت می‌کنند(Lin et al.,2020).

استفاده از مصالح بازتابنده و خنک: روسازی‌های خنک به‌عنوان راه‌حلی برای کاهش اثر جزیره حرارتی شهری (UHI) می‌پردازد. روسازی‌ها دارای آلبدو (بازتابندگی) بالا، دمای سطح زمین و گرمای محسوس منتقل‌شده به اتمسفر را کم می‌کند، روسازی‌های نفوذپذیر و آب‌نگهدار با داشتن رخنه و روزن های اضافی، امکان راهیابی آب به لایه‌های زیرین و ذخیره آن را فراهم می‌سازد، که از طریق تبخیر، دمای سطح را کاهش داده و به کاهش اثر جزیره حرارتی شهری و خطر سیل، یاری می رساند(Santamouris,2013). مصالح بازتابنده خورشیدی که در سطوح سنگفرش به عنوان جایگزین مصالح جاذب سنتی استفاده می‌شوند، می‌توانند ذخیره دمای بالا را در طول روز کاهش داده و در شب ذخیره را آزاد کنند. (Zhu& Mai, 2019). همچنین استفاده از مصالح و پوشش بام با رنگ روشن تر در شهر ملبورن استرالیا استفاده از مصالح ساختمانی و پوشش بام‌ها با رنگ‌های روشن‌تر به کاهش انرژی ذخیره شده در سطح انجامیده است. البته این اقدام در کنار اقدامات دیگر مانند گسترش فضای سبز و مدیریت منابع آب انجام شده است(Coutts et al., 2007).

برنامه ریزی کاربری زمین شهری : برنامه‌ریزان برای کاهش UHI و ترویج توسعه پایدار شهری، به درک بهتری از رابطه بین UHI و الگوهای کاربری زمین نیاز دارندطبقیافته های پژوهشی کیم و همکاران(۲۰۱۴) در منطقه شهری کلمبوس، اوهایو، اثرات کاربری‌های زمین همسایه بر دمای محلی تایید شده است. کاربرد این مدل‌ها برای برنامه‌ریزی کاربری زمین با شبیه‌سازی تغییرات فرضی کاربری زمین و محاسبه اثرات دمایی حاصل نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که کاهش دما در مناطق مسکونی و شهری از طریق مکان‌یابی صحیح مناطق سبز امکان‌پذیر است(Kim et al,2014). تجربه شهر صلاله عمان هم نشان می‌دهد که هنگامی که برنامه‌ریزی کاربری زمین و توزیع فضاهای طبیعی (مانند گیاهان و آب) در شهر تفاوت دمای محیط شهری با مناطق پیرامونی را کاهش می دهد؛ یعنی کاربری زمین مناسب و فضایی برای طبیعت می‌تواند در کاهش اثر جزیره حرارتی موثر باشد.(Ashour et al., 2023)

راهبردهای مرتبط با مورفولوژی شهر(تراکم و ارتفاع مناسب ساختمان و عرض معابر) : چیدمان ساختمان‌ها در یک شهر می‌تواند بر شکل‌گیری اثر جزیره حرارتی شهر (UHI) تأثیر بگذارد. دلیل مهم شکل‌گیری اثر UHI، تراکم ساختمان‌ها در مناطق شهری است، زیرا ساختمان‌ها مقداری از گرما را در طول روز ذخیره می‌کنند و سپس پس از غروب آفتاب به آرامی آن را به محیط بیرون آزاد می‌کنند.ارتفاع ساختمان، جهت‌گیری، هندسه، ارتفاع/عرض خیابان و ضریب دید آسمان (SVF) همگی بر جذب تابش خورشیدی توسط ساختمان‌ها در طول روز تأثیر می‌گذارند و در نتیجه به اثر جزیره حرارتی و آسایش حرارتی فضای بیرونی (OTC) کمک می‌کنند .کریستل و کراینر اثرات ارتفاع و جهت‌گیری ساختمان را با استفاده از روش ایزو-سایه ارزیابی می‌کنند و دریافتند که برای ساختمان‌های کم ارتفاع (ارتفاع = ۶ متر)، جهت‌گیری شمال به جنوب بهترین است. برای ساختمان‌های میان‌رده (ارتفاع = ۱۲ متر) و بلندمرتبه (ارتفاع = ۳۶ متر)، جهت‌گیری عملاً هیچ تأثیری ندارد با این حال، در مناطق جنگل‌های بارانی گرمسیری، مانند سنگاپور، ارتفاع ساختمان‌های بالاتر همراه با اشکال کم‌چگالی می‌تواند تابش خورشید را به طور قابل توجهی کاهش دهد و در نتیجه OTC را بهبود بخشد. در همین حال، در مناطق ساحلی، عملکرد تهویه ورقه‌ای با هدایت نسیم دریا می‌تواند رطوبت نسبی را به طور قابل توجهی افزایش دهد و در نتیجه OTC را به طور قابل توجهی بهبود بخشد. جهت خیابان دیگر عامل کلیدی در UHI و OTC نیست .لین و همکاران نشان دادند که در تایوان، SVF بالا (تقریباً بدون سایه) در تابستان باعث ناراحتی می‌شود، در حالی که SVF پایین (سایه بیشتر) در زمستان باعث ناراحتی می‌شود. با این حال، به دلیل ویژگی‌های آب و هوایی تابستان‌های گرم و زمستان‌های معتدل تایوان، مردم تحمل کمتری در برابر سرما دارند و بنابراین، فضاهای باز نباید شامل مناطق سایه‌دار زیادی باشند. در همین حال، در مناطق بسیار سرد که مردم تحمل کمتری در برابر گرما دارند، نتیجه ممکن است برعکس باشد و مناطق سایه‌دار بیشتری مورد نظر باشد (Ren et al., 2023).

نتیجه گیری

جزیره حرارتی نوعی خرداقلیم بر اثر گسترش شهرنشینی و ایجاد سکونتگاههای شهری است؛ که به بالاتر بودن دمای شهرها نسبت به نواحی پیرامونی اشاره دارد. این پدیده، صرفنظر از عوامل جغرافیای طبیعی مانند توپوگرافی و نوع آب و هوای منطقه، تحت تاثیر عواملی چون تغییر چشم اندازهای طبیعی به انسانساخت، نوع مصالح به کاررفته در ساختمان و خیابانها، کاربری زمین، شکل شهر و فعالیتهای انسانی پدید می آید.

کاهش چشم اندازهای طبیعی در مناطق شهری مانند کاهش درختان، پوشش گیاهی و آبراه‌ها با کاهش سایه اندازی، کاهش تعرق آب از برگ‌های گیاهان و تبخیر آب‌های سطحی، سبب افزایش دما در شهرها نسبت به پیرامون می شود. تغییر کاربری زمین از کاربریهای دارای پوشش گیاهی و آب به کاربریهای انسانساخت به گرمایش بیش از پیش شهرها می انجامد. در درون شهرها معمولا گرمترین نقاط شهر منطبق بر بزرگراهها، کاربری های صنعتی و تجاری است ؛ در حالیکه کاربریهای فضای سبز و پارکها نسبت به اطراف خود خنک تر هستند. همچنین مصالح ساخت بشر(سیمان، بتن، آسفالت و...) نسبت به سطوح طبیعی، کمتر انرژی را باز می تابنند و بیشتر جذب می کنند ضمن آنکه نفوذناپذیر بودن این سطوح

باعث می شود آب کمتری برای تبخیر و خنک سازی محیط در دسترس باشد. شکل شهر از نظر فشردگی و پراکندگی هم می تواند موثر باشد برخی مطالعات شکل پراکنده را در کاهش اثر جزیره حرارتی موثر دانسته اند در حالیکه برخی دیگر از مطالعات آن را رد کرده اند؛ که این امر به پیچیده شدن اثر فرم شهری اشاره دارد. تحلیل اثر شکل شهری در جزیره حرارتی با در نظرگرفتن دیگر متغیرهای محلی و منطقه ای مانند میزان پوشش گیاهی، توپوگرافی منطقه و... قابل بررسی است. در نهایت فعالیتهای انسانی بویژه آنهایی که نیاز به مصرف انرژی فسیلی ، برق و سوخت دارند نقش مهمی در گرمتر شدن شهرها نسبت به پیرامون دارند. بخشهایی از شهر که حجم ترافیک بالاتر، یا مصرف انرژی در ساختمانها فراتر از جاهای دیگر است دمای هوا بیشتر است که نمونه آن در منطقه مرکزی شهرهاست که تمرکز فعالیتهای انسانی بالاست.

بررسی پژوهشها و تجربیات جهانی نشان می‌دهد که جزیره دمایی شهری نه تنها یک پدیده آب و هوایی ناگزیر در شهرهای پر تراکم امروزی است، بلکه پیامدهای آن مستقیما بر کاهش آسایش دمایی، کیفیت محیط‌زیست، به خطر افتادن تندرستی انسان و مصرف انرژی اثر می‌گذارد.

شواهد تجربی از شهرهای گوناگون جهان بیانگر آن است که مجموعه‌ای از راهبردها می‌تواند در کاستن از اثرات جزیره حرارتی کارساز باشد: بام‌ها و دیوارهای سبز به کاهش دمای سطوح و خنک‌سازی موضعی کمک میکنند؛ مدیریت سطوح نفوذناپذیر از طریق مصالح خنک و بازتابنده دمای سطحی را می کاهد ؛ گسترش فضاهای سبز و پارک‌های شهری از طریق تعدیل دمایی و بهبود آسایش دمایی منجر می شود؛ و سرانجام برنامه‌ریزی کاربری زمین با چگونگی جایگیری کاربری‌ها، تراکم ساختمانی و پیوستگی فضاهای باز می‌تواند بر توان و گستردگی جزایر دمایی تاثیر گذارد.

آنچه از بررسی تجربیات موفق شهرهای جهان در مقابله با جزیره حرارتی می توان دریافت این است که با توجه به اینکه جزایر حرارتی تحت تاثیر ترکیبی از علل و عوامل پدید می آیند، موفقیت راهبردها زمانی است که منطبق بر این عوامل باشد و ترکیبی از راهبردهای گوناگون با توجه به شرایط شهر طراحی و اجرا شود بنابراین مدیریت آن تنها با تکیه بر راهکارهای کالبدی محدود یا کارهای مقطعی؛ شدنی نیست و نیازمند رویکردی چندسویه، میان‌رشته‌ای و استوار بر برنامه‌ریزی شهری است.

منابع

۱. احمدی, محمود و داداشی رودباری, عباسعلی . (۱۳۹۶). شناسایی جزایر حرارتی شهری مبتنی بر رویکرد زیست محیطی، مطالعه موردی(کلان شهر اصفهان) .*جغرافیا و برنامه ریزی محیطی* :doi .1-20 ,(3)28 , 10.22108/gep.2017.98318.0

۲. پورامین,کتایون , خاتمی,سید مهدی و شمس‌الدینی,علی . (۱۳۹۹). عوامل موثر بر شکل‌گیری جزایر حرارتی شهری؛ با تاکید بر ویژگی‌ها و چالش‌های طراحی شهری .*گفتمان طراحی شهری؛ مروری بر ادبیات و نظریه‌های معاصر*.83-69 ,(1)1 ,

3. Akbari, H., Cartalis, C., Kolokotsa, D., Muscio, A., Pisello, A. L., Rossi, F., ... & Zinzi, M. (2016). Local climate change and urban heat island mitigation techniques–the state of the art. *Journal of Civil Engineering and Management*, *22*(1), 1-16.
4. Alexandri, E., & Jones, P. (2008). Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. *Building and environment*, *43*(4), 480-493.,
5. Ashour, H., Arab, Y., Hassan, A. S., Nuaklong, P., & Witchayangkoon, B. (2023). Impact of Land Use Planning and Urbanisation on the Urban Heat Island Phenomena, Case Study of Salalah, Sultanate of Oman. *The Arab World Geographer*, *26*(2), 210-226.
6. Chen, Hua, and Kai Wang. "The Study for the Influencing Factors of Urban Heat Island Development." Advanced Materials Research 524–527 (May 2012): 3524–29.
7. Coutts, A. M., Beringer, J., & Tapper, N. J. (2007). Impact of increasing urban density on local climate: Spatial and temporal variations in the surface energy balance in Melbourne, Australia. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, *46*(4), 477-493.
8. Deilami, K., Kamruzzaman, M., & Liu, Y. (2018). Urban heat island effect: A systematic review of spatio-temporal factors, data, methods, and mitigation measures. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, *67*, 30-42.
9. Hart, M. A., & Sailor, D. J. (2009). Quantifying the influence of land-use and surface characteristics on spatial variability in the urban heat island. *Theoretical and applied climatology*, *95*(3), 397-406.
10. He, J., Madaniyazi, L., Chua, P. L., Kim, Y., Milojevic, A., Oka, K., ... & Hashizume, M. (2024). Impact of the urban heat island on heat-related mortality in the Tokyo Metropolitan Area, Japan. *Environmental Research: Health*, *3*(1), 015003.
11. https://www.epa.gov/heatislands/what-are-heat-islands
12. Imran, H. M., Shammas, M. I., Rahman, A., Jacobs, S. J., Ng, A. W. M., & Muthukumaran, S. (2021). Causes, modeling and mitigation of urban heat island: a review. *Earth Sciences*, *10*(6), 244-264.
13. Irfeey, A. M. M., Chau, H.-W., Sumaiya, M. M. F., Wai, C. Y., Muttil, N., & Jamei, E. (2023). Sustainable Mitigation Strategies for Urban Heat Island Effects in Urban Areas. *Sustainability*, *15*(14), 10767. https://doi.org/10.3390/su15141076
14. Kang, H., Zhu, B., de Leeuw, G., Yu, B., van der A, R. J., & Lu, W. (2022). Impact of urban heat island on inorganic aerosol in the lower free troposphere: a case study in Hangzhou, China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *22*(16), 10623-10634.
15. Kim, J. P., & Guldmann, J. M. (2014). Land-use planning and the urban heat island. *Environment and planning B: Planning and design*, *41*(6), 1077-1099.

16. Li, X., Zhou, Y., Yu, S., Jia, G., Li, H., & Li, W. (2019). Urban heat island impacts on building energy consumption: A review of approaches and findings. *Energy*, *174*, 407-419.
17. Lin, Y., Wang, Z., Jim, C. Y., Li, J., Deng, J., & Liu, J. (2020). Water as an urban heat sink: Blue infrastructure alleviates urban heat island effect in mega-city agglomeration. *Journal of Cleaner Production*, *262*, 121411.
18. Liu, C., Lu, S., Tian, J., Yin, L., Wang, L., & Zheng, W. (2024). Research Overview on Urban Heat Islands Driven by Computational Intelligence. *Land*, *13*(12), 2176. https://doi.org/10.3390/land13122176
19. Magli, S., Lodi, C., Lombroso, L., Muscio, A., & Teggi, S. (2015). Analysis of the urban heat island effects on building energy consumption. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, *6*(1), 91-99.
20. Manso, M., Teotónio, I., Silva, C. M., & Cruz, C. O. (2021). Green roof and green wall benefits and costs: A review of the quantitative evidence. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *135*, 110111.
21. Marquez-Torres, A., Kumar, S., Aznarez, C., & Jenerette, G. D. (2025). Assessing the cooling potential of green and blue infrastructure from twelve US cities with contrasting climate conditions. *Urban Forestry & Urban Greening*, *104*, 128660.
22. Phelan, P. E., Kaloush, K., Miner, M., Golden, J., Phelan, B., Silva III, H., & Taylor, R. A. (2015). Urban heat island: mechanisms, implications, and possible remedies. *Annual Review of Environment and Resources*, *40*(1), 285-307.
23. Ren, J., Shi, K., Li, Z., Kong, X., & Zhou, H. (2023). A review on the impacts of urban heat islands on outdoor thermal comfort. *Buildings*, *13*(6), 1368.
24. Rizwan, A. M., & Dennis, L. Y. (2008). A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *Journal of environmental sciences*, *20*(1), 120-128.
25. Santamouris, M. (2013). Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island—A review of the actual developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *26*, 224-240.
26. Santamouris, M. (2013). Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island—A review of the actual developments. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 26, 224-240.
27. Schwaab, J. (2022). Sprawl or compactness? How urban form influences urban surface temperatures in Europe. *City and Environment Interactions*, *16*, 100091.
28. Taleghani, Mohammad (2018-01-01). "Outdoor thermal comfort by different heat mitigation strategies- A review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 81: 2011–2018.
29. Vijayaraghavan, K. (2016). Green roofs: A critical review on the role of components, benefits, limitations and trends. *Renewable and sustainable energy reviews*, *57*, 740-752.
30. Vujovic, S., Haddad, B., Karaky, H., Sebaibi, N., & Boutouil, M. (2021). Urban heat island: Causes, consequences, and mitigation measures with emphasis on reflective and permeable pavements. *CivilEng*, *2*(2), 459-484.
31. Wong, N. H., & Yu, C. (2005). Study of green areas and urban heat island in a tropical city. *Habitat international*, *29*(3), 547-558.
32. Yang, C., He, X., Yan, F., Yu, L., Bu, K., Yang, J., ... & Zhang, S. (2017). Mapping the influence of land use/land cover changes on the urban heat island effect—A case study of Changchun, China. *Sustainability*, *9*(2), 312.
33. Yang, L., Qian, F., Song, D. X., & Zheng, K. J. (2016). Research on urban heat-island effect. *Procedia engineering*, *169*, 11-18.

34. Yang, X., Xu, X., Wang, Y., Yang, J., & Wu, X. (2024). Heat exposure impacts on urban health: A meta-analysis. *Science of The Total Environment, 947*, 174650.
35. Zhu, S., Mai, X. (2019) A review of using reflective pavement materials as mitigation tactics to counter the effects of urban heat island. Adv Compos Hybrid Mater 2, 381–388 (2019). https://doi.org/10.1007/s42114-019-00104-9

Contributing Factors and Mitigation Strategies of the Urban Heat Island

Saeed Hossein Abadi[1]

1- Assistant Professor of Geography and Urban Planning, Bozorgmehr University of Qaenat

* Hosseinabadi@buqaen.ac.ir

ABSTRACT

The urban heat island phenomenon, which refers to the significantly higher temperature of cities than surrounding areas, is one of the challenges of modern life that has various consequences such as negative effects on thermal comfort, health of citizens, and cooling energy consumption. The present study, with a descriptive-analytical approach and by reviewing previous research, seeks to identify the factors affecting the formation and intensification of heat islands and practical solutions to reduce them in cities.According to the review, the change in land use of vegetated lands and permeable surfaces to man-made uses, the use of materials with high absorption and low reflection of energy, unprincipled densities in construction, human activities such as transportation, industrial activities, energy consumption in buildings, etc. are among the most important factors in the emergence of heat islands in cities.

Empirical evidence from various cities around the world indicates that a set of strategies can be effective in reducing heat island effects: green roofs and walls, expanding green spaces, blue infrastructurs , using cool and reflective materials, proper land use planning, and designing optimal urban form can affect the intensity and extent of heat islands. From a review of successful experiences in cities around the world, it can be seen that reducing the intensity of heat islands requires the use of a combination of strategies.

Keywords: Urban heat island, microclimate, urbanization, urban planning, urban environment, Mitigation strategies.

Multivariate Geospatial Analysis of Climate Impacts on Air pollution Using Sentinel-5p and Google Earth Engine

Sajedeh Morady par
Tabriz University, Tabriz, Iran
Sajedeh.Morady@tabrizu.ac.ir

Abstract

The present study was conducted for Urmia county, located in the northwest of Iran. The variables of this study are two groups: 1) Air pollutant variables including: NO2 SO2, O3, CO, HCHO, Aerosol(AI). 2) Climatic variables including: Precipitation, NDVI, Humidity, Air temperature, Eastward wind, Northward wind and Land surface temperature. This research employed non-linear regression (NLR) and Multiple linear regression (MLR), Pearson correlation, scatter plots, methodologies to examine statistically the effects of climatical variables on pollutants concentration by using of Python coding, Google Earth Engine and satellite images. All maps related to pollutants and climate variables are maximum images of the relevant variable during the years 2019-2024. According to the results, the maximum events of different pollutants are correlated and the peak of pollution increases of several pollutants usually occur together. Among the climatic parameters, land surface temperature, humidity, and eastward and northward wind have had a greater impact on pollutants than other parameters. Both linear and nonlinear regressions showed that many climatic parameters had a significant relationship with ozone.

Keywords: Pollution, Climate, GEE, Sentinel-5p

1. Introduction

Air pollution, a form of environmental contamination, is the most crucial issue to address (Xu et al., 2022). Air pollutants are characterized as any substances present in the atmosphere that may pose risks to human health or significantly influence environmental conditions. The World Health Organization (WHO) identifies six primary atmospheric contaminants that threaten both human well-being and ecological systems: particle pollution, ground-level O3, CO, sulfur oxides, nitrogen oxides, and lead (Pb) (Ghorani-Azam et al., 2016). The health consequences of exposure to ambient air pollution have included skin irritation, respiratory problems, and cardiovascular problems (Kavuri et al., 2013). Exposure to airborne pollutants is especially alarming for at-risk individuals, including the elderly, pregnant women, and young children (Birim et al., 2023). Air pollution poses a serious risk to ecosystems in along with human health (Kaviani Rad et al., 2022). It is not typically sudden increases in emissions that lead to greater air pollutant concentrations in urban areas, but rather weather conditions that hinder dispersion or result in higher emissions (Oji and Adamu,2020). The chemical environment and pollutant lifetimes will change due to global and regional climate change, which will also affect the concentrations of pollutants in the source

regions (Doherty et al., 2013). As a result of intensified human activities and adverse meteorological conditions, air quality is worsened, resulting in health problems (Liu et al., 2020). Multiple variables, such as temperature, humidity, wind direction, and speed, influence pollution in the air (Bose and Roy Chowdhury, 2023). Air pollution in urban regions is a significant and increasing environmental issue in developing nations that has a considerable effect on worldwide public health (Kayes et al., 2019).
Urban air pollution exhibits distinct traits due to the fluctuations in meteorological conditions that vary with the geographical and topographical features of a city. To grasp the impact of climate on pollution, it is essential to consider both regional and local climatic factors (Ahmadi et al., 2015). The primary distinction between emissions and meteorological conditions is that emissions can be managed when inmission levels surpass limits, while meteorological conditions remain uncontrollable. Therefore, strategies for controlling air pollution must consider meteorological factors, as these will influence the design of such strategies to some extent (Pérez et al., 2020).

Due to the importance of air pollution, many studies have been conducted on atmospheric pollutants and the climatic and environmental factors affecting them. Previous studies indicated, meteorological conditions
can affect pollutants. Wang and Ogawa (2015), analyzed effects of meteorological conditions on PM2.5 concentrations in Nagasaki, Japan. The findings from the correlation analysis between PM2.5 levels and weather data indicated that temperature exhibited a negative correlation with PM2.5, whereas precipitation showed a positive correlation. According to the results, based on the correlation with wind direction, it can be concluded that the west wind may carry the highest amount of pollutants to Nagasaki. In another research in Mosul city, northern Iraq canonical correlation analysis was conducted to characterize the most important meteorological parameters that determine air pollutants' behavior (Shihab, A. S, 2022).part of results showed that The temperature significantly influenced the air pollution levels in Mosul city, which was evident in the data set concerning ozone gas among air pollutants. Hou and Wu (2016), examined the long-term development of extreme air pollution meteorology on a global scale and its possible repercussions on air quality, particularly during high pollution events. They revealed significant sensitivities of air quality to extreme weather occurrences. For instance, it was discovered that in the United States, the likelihood of severe ozone pollution during heat waves could be as much as seven times higher than the average probability seen in summertime, while winter temperature inversions could increase the chances of severe particulate matter pollution by more than double. A research around evolution of surface O3 and PM2.5 concentrations and their relationships with meteorological conditions over Beijing showed that During winter, the average wind speed (Ws) and relative humidity (RH) showed the strongest correlation with O3 at both stations, while RH and sunlight hours (S) exhibited the highest correlation with PM2.5. Additionally, an increase in rainfall can notably lower PM2.5 levels in both urban and rural regions of Beijing, while slight and light rain more effectively reduces the O3 levels. The levels of PM2.5 (O3) during haze days rose by 114% (3%) and 162% (20%) in comparison to non-haze days at urban and rural stations, respectively (Zhang et al., 2015). Tian et al (2014) assessed characteristics of particulate matter (PM10) and its relationship with meteorological factors during 2001–2012 in Beijing. The results highlighted that Atmospheric pressure was the key meteorological factor affecting PM10, with relative humidity and wind speed following closely. Nonetheless, the prevailing meteorological elements affecting atmospheric pollution varied across the four seasons. Morady and Rezaei Banafsheh (2024) investigated the trend of night temperature changes in Iran with regard to the effect of carbon dioxide. According to the results of

their research, the relationship between the rising trend of night temperature and carbon dioxide in July was confirmed.

Due to the abundance of research on air pollution and the relationship between pollutants and climatic factors and in order to further study by researchers we will conclude this section by simply mentioning some other articles on this topic .Kamińska, J. A. (2018) analyzed the use of random forests in modelling short-term air pollution effects based on traffic and meteorological conditions. Relationship between particulate air pollution and meteorological variables in Utah's Salt Lake Valley was studied by Whiteman et al (2014). Air pollutants concentrations forecasting using back propagation neural network based on wavelet decomposition with meteorological conditions was done by Bai et al (2016). Li et al (2014), studied the spatial and temporal variation of Air Pollution Index (API) and examined the associations between API and meteorological factors during 2001–2011 in Guangzhou, China. Air pollution characteristics and their relation to meteorological conditions during 2014–2015 in major Chinese cities was assessed by He et al., (2017). Zhang et al (2015) , analyzed relationships between meteorological parameters and criteria air pollutants in three megacities in China.

The present study was conducted for Urmia county, located in the northwest of Iran. Other studies have been conducted on air pollution, but there is not enough research on the relationship between atmospheric pollutants and climatic factors in the studied region. Therefore, this study was conducted for this region, considering the importance of the role of climate in the status of pollutants.

2. Material and Methods

The variables of this study are two groups: 1) Air pollutant variables including: NO2 SO2, O3, CO, HCHO, Aerosol(AI). 2) Climatic variables including: precipitation, NDVI, Humidity, Air temperature, Eastward wind, Northward wind and Land surface temperature. More details of the data are provided in Table 1.
In this research, Google Earth Engine (GEE) cloud space and coding in this space have been used to receive satellite images and to extract maximum maps. GEE represents an open-source platform for spatial analysis that allows users to examine and process satellite imagery of Earth through visualization and analytical tools (Kafi et al., 2024). All maps related to pollutants and climate variables are maximum images of the relevant variable during the years 2019-2024 .

In order to retrieve pollutants maps, Sentinel-5p satellite images have been used. The Sentinel-5P mission from Copernicus represents the initial specialized Copernicus program focused on atmospheric observation. This mission's primary objective involves performing high-resolution atmospheric observations across both spatial and temporal dimensions to support climate monitoring and forecasting, air quality, ozone levels, ultraviolet radiation (Velayarce et al., 2022). The Sentinel-5 mission features a high-resolution spectrometer that functions across the ultraviolet through shortwave infrared spectrum, employing seven separate spectral channels: UV-1 (270–300 nm), UV-2 (300–370 nm), VIS (370–500 nm), NIR-1 (685–710 nm), NIR-2 (745–773 nm), SWIR-1 (1590–1675 nm), and SWIR-3 (2305–2385 nm) (Tabunschik et al., 2023). The TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument) sensor, which is a component of Sentinel-5, delivers daily information about atmospheric pollution (Kazemi Garajeh et al., 2023). Concerning the temporal availability, S-5P imagery is accessible through two distinct services, as near-real time (NRT) in 3 h after sensing, and as nontime critical services with offline products (OFF) available with a delay of 12 h for L1B and 5 days for L2 products (Vîrghileanu et al., 2020). In present papar, level3 products of Sentinel-5p have

been called from GEE. The methodology of this article is based on statistical and spatial studies in Google Earth Engine, ArcGIS, and Python. This research employed non-linear regression (NLR) and Multiple linear regression (MLR), Pearson correlation, scatter plots to examine statistically the effects of meteorological variables on pollutant concentrations by using of Python coding and GEE. In order to investigate the spatial distribution of pollutants and climate variables, the relevant maps were analyzed with the TIFF version in ArcGIS. It should be noted that in order to conduct statistical studies, the city's climatological stations were used to obtain point data in ArkGIS In this study, data standardization was used to place all values on a common scale (Tadeusz Griboski et al., 2023).

Table 1. Data used in this work

variable	description	unit
SO2_column_number_density	Sentinel-5P OFFL SO2: Offline Sulfur Dioxide_ L3 Product	Mol/m^2
O3_column_number_density	Sentinel-5P OFFL O3: Offline Ozone_ L3 Product	Mol/m^2
No2_column_number_density	Sentinel-5P OFFL NO2: Offline Nitrogen Dioxide_ L3 Product	Mol/m^2
absorbing_aerosol_index	Sentinel-5P OFFL AER AI: Offline UV Aerosol Index_ OFFL/L3_AER_AI	_
Co_column_number_density	Sentinel-5P OFFL CO: Offline Carbon Monoxide _OFFL/L3_CO	Mol/m^2
Tropospheric_HCHO_column_number_density	Sentinel-5P OFFL HCHO: Offline Formaldehyde_OFFL/L3_HCHO	Mol/m^2
Precipitation	GPM: Global Precipitation Measurement	Mm/hr
Tm10	MERRA-2 M2T1NXSLV: Single-Level Diagnostics _10meter air temperature	Kelvin
Q250	MERRA-2 M2T1NXSLV: Single-Level Diagnostics _ Specific humidity at 250 hPa	Mass fraction
Q500	MERRA-2 M2T1NXSLV: Single-Level Diagnostics _ Specific humidity at 500 hPa	Mass fraction
U250	MERRA-2 M2T1NXSLV: Single-Level Diagnostics _ Eastward wind at 250 hPa	m/s

U500	MERRA-2 M2T1NXSLV: Single-Level Diagnostics _ Eastward wind at 500 hPa	m/s
V250	MERRA-2 M2T1NXSLV: Single-Level Diagnostics _ Northward wind at 250 hPa	m/s
V500	MERRA-2 M2T1NXSLV: Single-Level Diagnostics _ Northward wind at 500 hPa	m/s
NDVI	MOD13Q1.061 Terra Vegetation Indices 16-Day Global 250m_Normalized Difference Vegetation Index	_
LST_Day LST_Night	MOD21C1.061 Terra Land Surface Temperature and 3-Band Emissivity Daily L3 Global 0.05 Deg CMG	kelvin

2.1. Study Area

Urmia County sits in West Azerbaijan Province in northwestern Iran and has 1,040,565 residents. The county is positioned between Lake Urmia on its eastern side and the Turkish border on its western side (Ramzi et al, 2025). The climate within lake basins can be influenced by the water body itself, along with geographic elements including longitude, elevation, and broad climate patterns. These various factors work together to create distinctive natural climatic conditions specific to Lake Basin areas (Dehghanipour et al., 2020). According to Najafi and Alizadeh (2023), northwestern Iran is characterized by a cold and temperate semi-arid climate. The study area is shown in Figure 1.

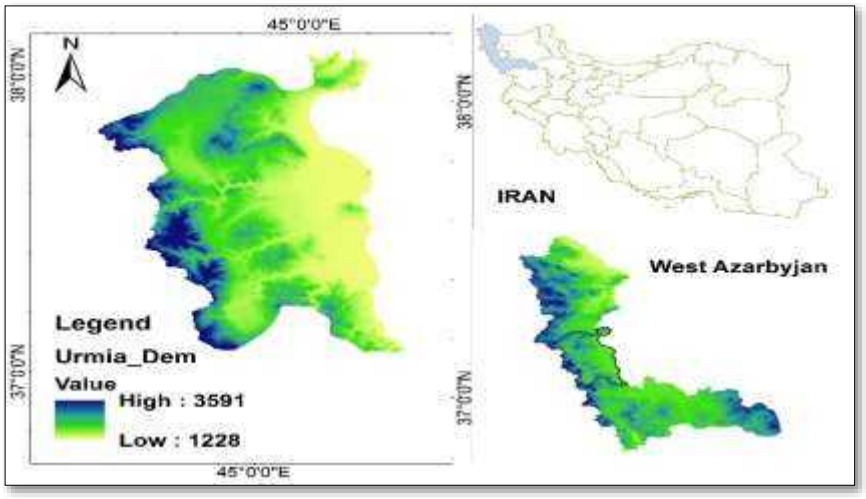


Figure 1- Urmia county displayed using Digital Elevation Model (DEM)

3. Results

3.1. pollutants distribution (2019-2024)

The map of air pollutants, including in the city of Urmia in Figure (2), shows the distribution of maximum pollution between 2019 and 2024. According to this figure, the carbon monoxide pollutant has the greatest spread in the city and is concentrated in the urban area of Urmia. The nitrogen dioxide pollutant, like carbon monoxide, has caused the most pollution in the city of Urmia. The aerosol index has the greatest dispersion in the southwestern border areas of the city. The reason for this situation is probably the location of this city on the border of Iran and Iraq and the proximity of the south of Urmia city to Iraq, which is one of the areas of dust production and emission sources. Indeed, contributions originating from Iraq and northern regions of Saudi Arabia demonstrate the cross-border characteristics of particulate matter pollution (Talaie et al., 2024). Sulfur dioxide has the maximum pollution in limited areas, and ozone has the maximum distribution in the northeastern areas during the studied years.

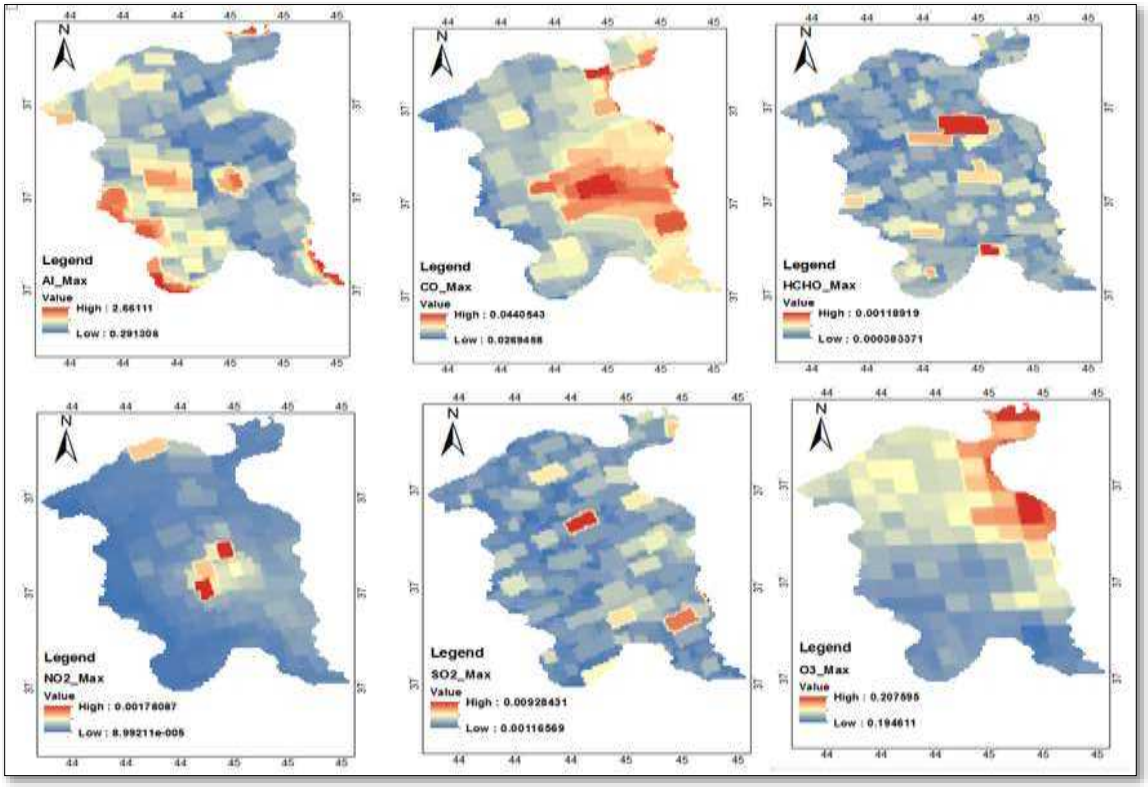


Figure 2- Air pollutants maps (Maximum pollutants distribution between the years 2019-2024)

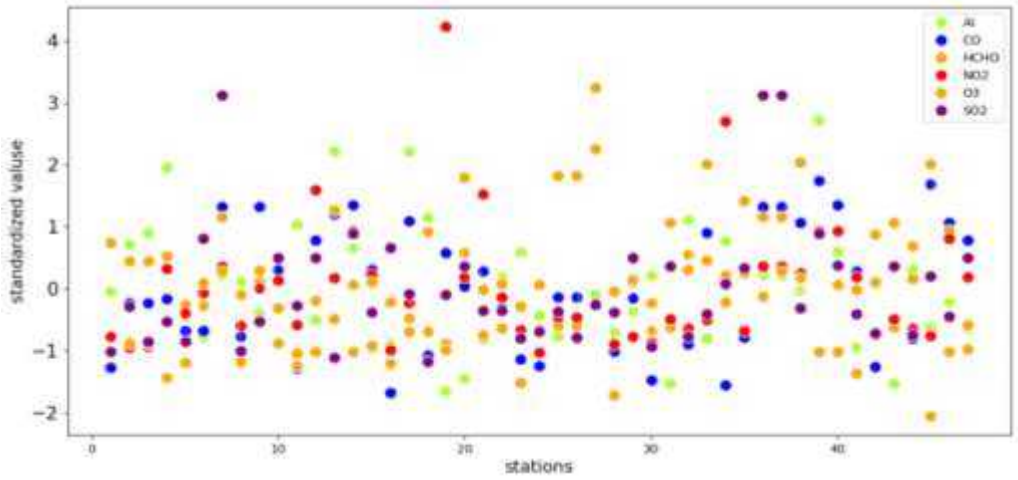


Figure 3- Air pollutants scatter plots using standardized data

Figure 3 shows a scatter plot of pollutants at the county's climatological stations, which, the dispersion of different pollutants at each station is very similar. In other words, if there are lower maximum values at

a station, this situation has occurred for all pollutants, and if higher maximum values are observed at a station, this situation is almost noticeable for all pollutants at that station. According to this diagram, the highest maximum was related to nitrogen dioxide

3.2. relationship beetwean pollutants and climatic parameters

The effect of climatic parameters on the distribution or concentration of atmospheric pollutants has been investigated using the correlation coefficient, multiple linear regression, and nonlinear regression. During the study period, the maximum aerosol index did not show much correlation with any of the climatic parameters examined in this study with the exception of the NDVI index, which shows a negative correlation of about -0.3 with the aerosol index, and although it is not a significant value, it indicates the importance of vegetation in controlling fine dust. However, this pollutant had a negative correlation of -0.46 with the ozone pollutant. CO shows the highest correlation among the climatic parameters with land surface temperature (LST). A negative correlation of -0.4 with daily land surface temperature and a positive correlation of 0.38 with night-time surface temperature. This pollutant shows the highest correlation with the SO2 at 0.46. It shows the highest correlation with the nitrogen dioxide pollutant at 0.4. HCHO shows correlations with the parameters LST_daily, Humidity_500hp, and Northward Wind_500hp of -0.31, 0.39, and -0.3, respectively. This pollutant also has the highest correlation with the aerosol index at 0.34. NO2 only had a negative correlation with land surface temperature (-0.31), and among the pollutants, it showed a positive correlation with CO at a rate of 0.4. O3 pollutant shows correlation with a larger number of climatic parameters, including LST_day, LST_night, Humidity_250hp, EastwardWind_250hp, EastwardWind_500hp, respectively: 0.37, 0.37, -0.35, -0.41 and -0.39. Sulfur dioxide was correlated with CO, LST_day and NorthwardWind_500hp with values of 0.46, -0.44 and -0.38, respectively. These correlations do not show high values, in other words, perhaps the correlation is not significant, but nevertheless it reveals a relationship, albeit moderate, with climatic parameters. Among the climatic parameters, land surface temperature, humidity, and eastward and northward wind have had a greater impact on pollutants than other parameters.



Figure 4- Correlation diagram between climate parameters and pollutants. Explanation of abbreviations for parameter names on the diagram: AI: Aerosol- prec: precipitation-Tm10: Air temperature at 10 meter- Hu: Humidity- Ewind: Eastward Wind- Nwind: Northward Wind

Linear regression operates under the fundamental assumption that a direct, proportional relationship exists between the predictor and response variables. This statistical approach presupposes that modifications in the predictor variable yield corresponding proportionate alterations in the response variable. In contrast, nonlinear regression methodology does not impose the constraint of linearity upon the variable relationships,
thereby accommodating more intricate patterns of association between variables.
Multiple linear regression (MLR) is a statistical method employed to evaluate the relationships between one dependent variable and two or more independent variables. This technique operates by fitting a linear equation to the dataset, with coefficients that indicate the influence of each independent variable on the dependent variable. MLR serves as an essential tool for revealing intricate connections and comprehending the fundamental factors that impact a specific phenomenon (Gulati et al., 2023). The key benefits of nonlinear models include simplicity, clarity, and forecasting ability (Archontoulis and Miguez, 2015).
Based on the results of nonlinear regression, no significant relationship is observed between the maximum aerosol index and the maximum values of climate parameters. As in the previous section, the correlation coefficient of this index with climate parameters is very low and unimportant. In the case of the model implemented for the carbon monoxide pollutant, the daily LST and nighttime LST are determined at a significance level of 0.002 and 0.007, respectively, indicating that these independent variables can be suitable predictors for the dependent variable. In other words, there is a good relationship between these variables. Many climatic parameters show a significant relationship with ozone pollution at a significance level of less than 0.05, including: 10meter air temperature, LST_Day, LST_Night, Northward wind at 500 hPa, Northward wind at 250 hPa, Eastward. At a significance level of 0.03 and 0.04, respectively,

precipitation and daily LST show a significant relationship with NO2 pollutant. SO2 at a significant level of 0.003, 0.00, 0.004, 0.01, 0.03 and 0.02 was affected by the following parameters: 10meter air temperature, LST_Day, Northward wind at 500 hPa, Eastward wind at 500 hPa, Eastward wind at 250 hPa, and humidity at 250 hPa, respectively. Among the climatic factors, only humidity at 500 hPa was effective on the HCHO pollutant behavior at a significance level of 0.02 (Table 2 and Table 3).
The table of linear regression results using the enter method shows that climate parameters had the greatest impact on ozone pollution. R_Square represents the proportion of variance in the dependent variable explained by the independent variables. Adjusted R-squared, providing a more accurate measure of goodness of fit. In relation to O3, R_Square and Adjusted R-squared values of 0.6 and 0.51, respectively, indicate a better fit of the model. Then, carbon monoxide and sulfur dioxide are in the next ranks in terms of the intensity of the relationship between pollutants and climate parameters.

4. conclusion

This study demonstrated that meteorological conditions influence the variations in pollutant levels. Considering that in this study, the maximum values of all climatic parameters in relation to the maximum values of pollutants have been investigated, we conclude that the maximum events of air pollution are affected by climatic parameters. By examining the results obtained, we find that the maximum events of different pollutants are correlated and the peak of pollution increases of several pollutants usually occur together. Among the climatic parameters, land surface temperature, humidity, and eastward and northward wind have had a greater impact on pollutants than other parameters. Both linear and nonlinear regressions showed that many climatic parameters had a significant relationship with ozone. The findings from several articles have demonstrated how climatic variables affect atmospheric pollutants, which supports the conclusions of the current article, including: (Kavuri et al., 2013), (Rahman et al., 2022) and etc. Similar to the results of this article, Arsalan (2023) proved in a study that O3 affected by climatic parameters and had a positive correlation with temperature and solar radiation and a negative correlation with relative humidity.

Table 2. Nonlinear regression model summary

Model Summary _NLR									
Independent variables	AI			CO			O3		
	R Square	F	Sig.	R Square	F	Sig.	R Square	F	Sig.
NDVI	0.098	2.42	0.102	0.004	0.078	0.92	0.099	2.42	0.1
10meter air temperature	0.034	0.76	0.47	0.074	1.75	0.18	0.39	14.16	0.00

Precipitation	0.25	0.56	0.575	0.056	1.29	0.28	0.019	0.41	0.66
LST_Day	0.078	1.86	0.16	0.24	7.108	0.002	0.3	9.66	0.00
LST_Night	0.053	1.23	0.30	0.201	5.53	0.007	0.24	6.89	0.002
Northward wind at 500 hPa	0.015	0.33	0.72	0.1	2.45	0.098	0.26	7.8	0.001
Northward wind at 250 hPa	0.039	0.89	0.417	0.026	0.57	0.56	0.39	13.98	0.00
Eastward wind at 500 hPa	0.012	0.27	0.76	0.026	0.59	0.55	0.15	4.04	0.02
Eastward wind at 250 hPa	0.011	0.25	0.78	0.018	0.41	0.66	0.17	4.58	0.02
humidity at 500 hPa	0.018	0.398	0.67	0.04	0.91	0.409	0.21	5.92	0.005
humidity at 250 hPa	0.001	0.03	096	0.059	1.37	0.26	0.2	5.67	0.006

Table 3. Nonlinear regression model summary

Model Summary _NLR									
Independent variables	NO2			SO2			HCHO		
	R Square	F	Sig.	R Square	F	Sig.	R Square	F	Sig.
NDVI	0.042	0.95	0.39	0.063	1.47	0.24	0.044	1.01	0.37
10meter air temperature	0.017	0.38	0.68	0.23	6.77	0.003	0.067	1.57	0.21
Precipitation	0.14	3.76	0.03	0.045	1.04	0.36	0.049	1.13	0.33
LST_Day	0.12	3.22	0.04	0.52	24.47	0.00	0.11	2.66	0.08
LST_Night	0.053	1.23	0.3	0.059	1.37	0.26	0.073	1.72	0.19
Northward wind at 500 hPa	0.011	0.25	0.77	0.22	6.3	0.004	0.102	2.48	0.09
Northward wind at 250 hPa	0.008	0.17	0.84	0.085	2.03	0.14	0.08	2.06	0.14

Eastward wind at 500 hPa	0.017	0.38	0.68	0.18	4.86	0.01	0.076	1.81	0.17
Eastward wind at 250 hPa	0.015	0.33	0.71	0.15	3.89	0.03	0.073	1.73	0.19
humidity at 500 hPa	0.016	0.36	0.69	0.06	1.5	0.23	0.16	4.38	0.02
humidity at 250 hPa	0.021	0.47	0.62	0.16	4.26	0.02	0.04	0.97	0.38

Table 4. MultiLinear regression model summary

Model Summary _MLR		
Dependent variable	R Square	Adjusted R Square
AI	0.25	0.09
CO	0.39	0.26
HCHO	0.33	0.19
NO2	0.26	0.09
O3	0.60	0.51
SO2	0.38	0.25

References

Ahmadi, H., Ahmadi, T., Shahmoradi, B., Mohammadi, S., & Kohzadi, S. (2015). The effect of climatic parameters on air pollution in Sanandaj, Iran. *Journal of Advances in Environmental Health Research*, *3*(1), 49-61.

Archontoulis, S. V., & Miguez, F. E. (2015). Nonlinear regression models and applications in agricultural research. *Agronomy Journal*, *107*(2), 786-798.

Arslan, H. (2023). Impacts of meteorological parameters on tropospheric ozone concentrations in Çanakkale. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, *35*(1), 10-17.

Bai, Y., Li, Y., Wang, X., Xie, J., & Li, C. (2016). Air pollutants concentrations forecasting using back propagation neural network based on wavelet decomposition with meteorological conditions. *Atmospheric pollution research*, *7*(3), 557-566.

Birim, N. G., Turhan, C., Atalay, A. S., & Gokcen Akkurt, G. (2023). The influence of meteorological parameters on PM10: a statistical analysis of an urban and rural environment in Izmir/Türkiye. *Atmosphere*, *14*(3), 421.

Bose, A., & Roy Chowdhury, I. (2023). Investigating the association between air pollutants' concentration and meteorological parameters in a rapidly growing urban center of West Bengal, India: a statistical modeling-based approach. *Modeling Earth Systems and Environment*, *9*(2), 2877-2892.

Dehghanipour, A. H., Moshir Panahi, D., Mousavi, H., Kalantari, Z., & Tajrishy, M. (2020). Effects of water level decline in Lake Urmia, Iran, on local climate conditions. *Water*, *12*(8), 2153.

Doherty, R. M., Wild, O., Shindell, D. T., Zeng, G., MacKenzie, I. A., Collins, W. J., Fiore, A. M., Stevenson,D. S., Dentener, F.J., Schultz, M.G., Hess, P., Derwent, R.G., & Keating, T. J. (2013). Impacts of climate change on surface ozone and intercontinental ozone pollution: A multi-model study. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *118*(9), 3744-3763.

Ghorani-Azam, A., Riahi-Zanjani, B., & Balali-Mood, M. (2016). Effects of air pollution on human health and practical measures for prevention in Iran. *Journal of research in medical sciences*, *21*(1), 65.

Grzybowski, P. T., Markowicz, K. M., & Musiał, J. P. (2023). Estimations of the Ground-Level NO2 Concentrations Based on the Sentinel-5P NO2 Tropospheric Column Number Density Product. *Remote Sensing*, *15*(2), 378.

Gulati, S., Bansal, A., Pal, A., Mittal, N., Sharma, A., & Gared, F. (2023). Estimating PM2. 5 utilizing multiple linear regression and ANN techniques. *Scientific Reports*, *13*(1),1-12.

He, J., Gong, S., Yu, Y., Yu, L., Wu, L., Mao, H., Song, C., Zhao, S., Liu, H., Li, X., Li, R. (2017). Air pollution characteristics and their relation to meteorological conditions during 2014–2015 in major Chinese cities. *Environmental pollution*, *223*, 484-496.
Hou, P., & Wu, S. (2016). Long-term changes in extreme air pollution meteorology and the implications for air quality. *Scientific reports*, *6*(1), 23792.

Kafi, F., Yousefi, E., Ehteram, M., & Ashrafi, K. (2024). Monitoring air pollution using Sentinel-5 satellite imagery: A case study of Razavi and South Khorasan provinces. *Sustainable Earth Review*, *4*(4).

Kamińska, J. A. (2018). The use of random forests in modelling short-term air pollution effects based on traffic and meteorological conditions: A case study in Wrocław. *Journal of environmental management*, *217*, 164-174.

Kaviani Rad, A., Shamshiri, R. R., Naghipour, A., Razmi, S. O., Shariati, M., Golkar, F., & Balasundram, S. K. (2022). Machine learning for determining interactions between air pollutants and environmental parameters in three cities of Iran. *Sustainability*, *14*(13), 8027.

Kavuri, N. C., Paul, K. K., & Roy, N. (2013). Regression modeling of gaseous air pollutants and meteorological parameters in a steel city, Rourkela.

Kayes, I., Shahriar, S. A., Hasan, K., Akhter, M., Kabir, M. M., & Salam, M. A. (2019). The relationships between meteorological parameters and air pollutants in an urban environment. *Global Journal of Environmental Science and Management*, *5*(3), 265-278.

Kazemi Garajeh, M., Laneve, G., Rezaei, H., Sadeghnejad, M., Mohamadzadeh, N., & Salmani, B. (2023). Monitoring Trends of CO, NO_2, SO_2, and O_3 Pollutants Using Time-Series Sentinel-5 Images Based on Google Earth Engine. *Pollutants*, *3*(2), 255-279. https://doi.org/10.3390/pollutants3020019

Li, L., Qian, J., Ou, C. Q., Zhou, Y. X., Guo, C., & Guo, Y. (2014). Spatial and temporal analysis of Air Pollution Index and its timescale-dependent relationship with meteorological factors in Guangzhou, China, 2001–2011. *Environmental pollution*, *190*, 75-81.

Liu, Y., Zhou, Y., & Lu, J. (2020). Exploring the relationship between air pollution and meteorological conditions in China under environmental governance. *Scientific reports*, *10*(1), 14518.

Morady, S., & Rezaeibanafsheh, M. (2024). Investigating the trend of night temperature changes in Iran and the effect of carbon dioxide. *Iranian Journal of Remote Sensing and GIS*, *16*(3), 105-122.

Najafi, M. S., & Alizadeh, O. (2023). Climate zones in Iran. *Meteorological Applications*, *30*(5), e2147.

Oji, S., & Adamu, H. (2020). Correlation between air pollutants concentration and meteorological factors on seasonal air quality variation. *Journal of air pollution and health*.

Pérez, I. A., García, M. Á., Sánchez, M. L., Pardo, N., & Fernández-Duque, B. (2020). Key points in air pollution meteorology. *International journal of environmental research and public health*, *17*(22), 8349.

Rahman, M. M., Shuo, W., Zhao, W., Xu, X., Zhang, W., & Arshad, A. (2022). Investigating the relationship between air pollutants and meteorological parameters using satellite data over Bangladesh. *Remote Sensing*, *14*(12), 2757.

Ramzi, F., Jafari, R., & Yousefi, E. (2025). Study on the Seroprevalence of Cystic Echinococcosis and Toxocariasis in the Rural Population Referred to Reference Laboratory in Urmia, Northwest Iran. *Journal of Parasitology Research*, *2025*(1), 8850347.

Shihab, A. S. (2022). Investigating the relationship between air pollutants and meteorology: A canonical correlation analysis. *Pol. J. Environ. Stud*, *31*(6), 5841-5849.

Tabunschik, V., Gorbunov, R., & Gorbunova, T. (2023). Unveiling air pollution in crimean mountain rivers: analysis of sentinel-5 satellite images using google earth engine (GEE). *Remote Sensing*, *15*(13), 3364.

Talaie, A., Kamyab, H., Chelliapan, S., & Khalili, E. (2024). Sources and impacts of dust pollution in Iran: A comprehensive overview. *Journal of Environmental Treatment Techniques*, *12*(2), 1-15.

Tian, G., Qiao, Z., & Xu, X. (2014). Characteristics of particulate matter (PM10) and its relationship with meteorological factors during 2001–2012 in Beijing. *Environmental pollution*, *192*, 266-274.

Velayarce, D., Bustos, Q., García, M. P., Timaná, C., Carbajal, R., Salvatierra, N., Horna, D., & Murray, V. (2022). Air quality analysis in Lima, Peru using the NO2 levels during the COVID-19 pandemic lockdown. *Atmosphere*, *13*(3), 373.

Vîrghileanu, M., Săvulescu, I., Mihai, B. A., Nistor, C., & Dobre, R. (2020). Nitrogen Dioxide (NO2) Pollution monitoring with Sentinel-5P satellite imagery over Europe during the coronavirus pandemic outbreak. *Remote Sensing*, *12*(21), 3575.

Wang, J., & Ogawa, S. (2015). Effects of meteorological conditions on PM2. 5 concentrations in Nagasaki, Japan. *International journal of environmental research and public health*, *12*(8), 9089-9101.

Whiteman, C. D., Hoch, S. W., Horel, J. D., & Charland, A. (2014). Relationship between particulate air pollution and meteorological variables in Utah's Salt Lake Valley. *Atmospheric Environment*, *94*, 742-753.

Xu, X., Yang, H., & Li, C. (2022). Theoretical model and actual characteristics of air pollution affecting health cost: a review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *19*(6), 3532.

Zhang, H., Wang, Y., Hu, J., Ying, Q., & Hu, X. M. (2015). Relationships between meteorological parameters and criteria air pollutants in three megacities in China. *Environmental research*, *140*, 242-254.

Zhang, Z., Zhang, X., Gong, D., Quan, W., Zhao, X., Ma, Z., & Kim, S. J. (2015). Evolution of surface O3 and PM2. 5 concentrations and their relationships with meteorological conditions over the last decade in Beijing. *Atmospheric Environment*, *108*, 67-75.

تحلیل روند تغییرات بارش با رویکرد تغییر اقلیم مطالعه مورد: مناطق شهری بلوچستان

چکاوک خواجه امیری خالدی[۱]، محمدرضا سالاری فنودی[۲]

استادیار گروه اقیانوس شناسی،دانشکده علوم دریایی،دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار

۱- رییس اداره هواشناسی سینوپتیک دریایی چابهار

*۲- نویسنده مسئول: c.khajehamiri@cmu.ac.ir

چکیده

هدف از این تحقیق بررسی روند تغییرات بارش چهار دهه گذشته بلوچستان با استفاده از روش‌های ناپارامتریک من کندال و شیب سن می باشد. بدین منظور داده های بارش ماهیانه، فصلی و سالانه ۱۰ شهر منطقه بلوچستان طی بازه زمانی ۲۰۲۳-۱۹۸۴ از پایگاه داده های سنجش از دوری PERSIANN استخراج شد. پس از تشکیل بانک داده ها، محاسبات آماری و شاخص های من کندال و شیب سنس تهیه شد. نتایج این مطالعه نشان داد که در بازه زمانی سالانه برای شهرهای چابهار، کنارک، زرآباد، نگور، سراوان، قصرقند روند مثبت و افزایشی بوده است. در مقابل برای ایرانشهر، نیکشهر، فنوج و سرباز روند کاهشی و منفی بوده و با چالش های کم آبی نیز روبرو کرده است.برای تمامی منطق نیزشاهد جهش های معنی داری در روند بارش های سالانه بوده ایم. این یافته‌ها بر ضرورت پایش مستمر اقلیم و برنامه‌ریزی برای مدیریت منابع آبی تأکید دارند. با توجه به روند کاهشی بارش در برخی شهرها، اجرای طرح‌های مدیریت آب مانند ذخیره‌سازی آب باران، بهینه‌سازی مصرف آب و احیای منابع زیرزمینی ضروری است

واژه گان کلیدی: بلوچستان، ایران, سیل، بارش

مقدمه

اقلیم در گذر زمان همواره دستخوش تغییراتی بوده و عوامل متعددی سبب بروز دوره های گرم و عصرهای یخبندان شده اند. در واقع دوره های گرم همراه با کاهش بارش های جامد، کاهش مجموع بارش (در نتیجه افزایش گنجایش رطوبتی جو) و کاهش پوشش گیاهی و دوره های سرد (یخبندان) همراه با افزایش بارش جامد (افزایش عمومی بارش در نتیجه کاهش گنجایش رطوبتی جو) و افزایش مساحت پوشش های سبز بوده اند (آسیایی و همکاران، ۱۳۹۱). این تغییرات در

ارتباط مستقیم با تغییرات گازهای گلخانه ای جو بویژه دی اکسید کربن بوده است. تغییرات گازهای گلخانه ای جو (افزایش یا کاهش) می تواند منشاء طبیعی یا انسانی داشته باشد. اسوانت آرهینوس در سال ۱۸۹۶ پیش بینی کرد که احتراق سوخت‌های فسیلی بخصوص زغال سنگ باعث دو برابر شدن گاز CO_2 آتمسفر طی ۳۰۰۰ سال آینده خواهد شد، لذا این امر به افزایش میانگین درجه حرارت جهانی در حدود ۵ درجه سلسیوس منجر می شود (Arrhenius, 1896). در حقیقت، غلظت CO_2 جو طی ۱۰۰ سال ۳۰٪ افزایش یافته که حدود ۱۸ برابر سریع تر از پیش بینی آرهینوس است و قبل از پایان این قرن دو برابر خواهد شد. علاوه بر این، این افزایش قبلا از یک افزایش سریع بی سابقه تاریخی در میانگین درجه حرارت جهانی نتیجه شده است (آسیایی و همکاران، ۱۳۹۱). برهم کنش‌های متعدد سامانه اقلیم با آب و یخ موجب پسخورهای مهمی می شود. نخست اینکه بخار آب یک گاز گلخانه‌ای است. غلظت بخار آب در جو در ارتباط با گرمایش اقیانوس‌ها و افزایش تبخیر، افزایش می یابد. این فرایند یک حلقه پسخور مثبت کلاسیک است، یعنی گرمایش گازی را تولید می کند که حتی سبب گرمایش بیشتر می شود (Manabe and Wetherald 1967). امروزه، موضوع تغییرات آب‌وهوایی و اثرات احتمالی آن بر بخش‌های مختلف اقتصادی و محیطی به‌عنوان یکی از چالش‌های پیش روی بشر مطرح است (جفری و همکاران[165]، ۲۰۱۱).

موضوع مطالعه در دو سند ارائه‌شده، بررسی روند تغییرات بارش و اقلیم بارش در شهرهای منطقه بلوچستان ایران با استفاده از روش‌های آماری (مانند میانگین متحرک، آنومالی، من‌کندال و شیب سنس) و داده‌های سنجش از دور پایگاه PERSIANNاست. این مطالعه بر تحلیل دوره‌های خشکسالی و ترسالی، تغییرات اقلیمی و تأثیرات آن بر منابع آبی متمرکز است. در ادامه، پیشینه تحقیق مرتبط با این موضوع با استناد به منابع معتبر ارائه می‌شود. تحلیل روند تغییرات بارش و خشکسالی در ایران، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، موضوع تحقیقات متعددی بوده است. برخی از مطالعات کلیدی داخلی عبارتند از:

احمدی(۱۳۸۸) در مطالعه‌ای با عنوان "تحلیل خشکسالی در شهر ایلام بر اساس شاخص توزیع استاندارد و درصد نرمال"، به بررسی خشکسالی در یک منطقه خشک پرداخت. این مطالعه نشان داد که خشکسالی به‌عنوان یک پدیده اقلیمی مستمر، اثرات قابل توجهی بر منابع آبی دارد (احمدی، ۱۳۸۸). زابل عباسی و همکاران(۱۳۸۶) در پژوهش خود با عنوان "بررسی و مقایسه شاخص‌های خشکسالی در مشهد"، شاخص‌های مختلف خشکسالی را تحلیل کردند و به نقش بارش به‌عنوان متغیر کلیدی در شناسایی دوره‌های خشکسالی تأکید داشتند. زارع ابیانه و همکاران(۱۳۸۶) در مطالعه‌ای در منطقه همدان، روند خشکسالی را با استفاده از شاخص‌های آماری بررسی کردند و به اهمیت تحلیل‌های آماری در شناسایی روندهای

165 -Jeffery et al

اقلیمی اشاره داشتند. لشنی زند(۱۳۸۰) در پژوهش "پهنه‌بندی خشکسالی اقلیمی در استان لرستان"، از شاخص‌های آماری برای شناسایی دوره‌های خشکسالی استفاده کرد و بی‌ثباتی بارش در مناطق خشک و نیمه‌خشک را تأیید نمود. عساکره(۱۳۸۶) در مقاله "تغییرات زمانی-مکانی بارش ایران زمین طی دهه‌های اخیر"، تغییرات بارش در ایران را بررسی کرد و به تأثیر گرمایش جهانی بر الگوهای بارش اشاره داشت. کتیرایی و همکاران(۱۳۸۶) در مطالعه‌ای با عنوان "سهم تغییرات فراوانی و شدت بارش روزانه در روند بارش در ایران طی دوره ۲۰۰۱-۱۹۶۰"، از روش من‌کندال برای شناسایی نقاط جهش و روندهای بارش استفاده کردند. فرجزاده و فیضی(۱۳۹۱) در پژوهش "آشکارسازی تغییرات زمانی-مکانی عناصر دما و بارش در ایران"، به تحلیل تغییرات اقلیمی با تأکید بر مناطق خشک پرداختند و نقش گازهای گلخانه‌ای را بررسی کردند.

ناظری تهرودی و همکاران(۱۳۹۵) در مطالعه "تحلیل روند تغییرات ایستگاهی و منطقه‌ای بارش نیم قرن اخیر کشور ایران"، روندهای کاهشی و افزایشی بارش را در مناطق مختلف ایران بررسی کردند. این مطالعات نشان می‌دهند که ایران، به‌ویژه مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند بلوچستان، به دلیل موقعیت جغرافیایی و تغییرات اقلیمی، با چالش‌های جدی در زمینه بارش و خشکسالی مواجه است.

مطالعات جهانی نیز به بررسی تغییرات بارش و خشکسالی در مناطق خشک و نیمه‌خشک پرداخته‌اند که با موضوع مطالعه حاضر هم‌خوانی دارند. استاینر و همکاران(۲۰۰۳) در مطالعه‌ای به بررسی داده‌های بارش سنجش از دور پرداختند و به عدم قطعیت‌های موجود در تخمین بارش اشاره کردند که در استفاده از پایگاه PERSIANN نیز مورد توجه است. آقاکوچک و همکاران(۲۰۰۹) در مقاله ای به تحلیل عدم قطعیت‌های داده‌های ماهواره‌ای بارش پرداختند که برای پایگاه PERSIANNنیز قابل تعمیم است. چن و همکاران(۲۰۱۴) در مطالعه‌ای ، روندهای بارش و تأثیرات اقلیمی در یک منطقه پربارش را بررسی کردند که می‌تواند با مناطق خشک مانند بلوچستان مقایسه شود. للسات و همکاران(۲۰۲۱) در پژوهشی، به تغییرات بارش‌های همرفتی در یک منطقه مدیترانه‌ای پرداختند و به اهمیت تحلیل روندهای بارش برای مدیریت منابع آبی تأکید کردند یاکوب و تایفور(۲۰۲۰) در تحقیقی، روندهای بارش و خشکسالی در یک منطقه خشک آفریقایی را بررسی کردند که شباهت‌هایی با بلوچستان دارد.

استفاده از روش‌های ناپارامتریک مانند من‌کندال و شیب سنس در مطالعات داخلی و بین‌المللی برای شناسایی روندهای بارش و نقاط جهش اقلیمی رایج است. این روش‌ها به دلیل عدم نیاز به توزیع نرمال داده‌ها، برای تحلیل سری‌های زمانی بارش در مناطق خشک مانند بلوچستان بسیار مناسب هستند. پایگاه PERSIANN که در مطالعه حاضر استفاده شده، در تحقیقات بین‌المللی نیز مورد توجه بوده و به دلیل توان تفکیک بالا، ابزار معتبری برای تحلیل بارش است. مطالعات داخلی و بین‌المللی نشان می‌دهند که تغییرات اقلیمی ناشی از افزایش گازهای گلخانه‌ای، به‌ویژهCO_2 ، بر الگوهای بارش و تشدید

خشکسالی در مناطق خشک تأثیر قابل توجهی دارد. بلوچستان به دلیل موقعیت جغرافیایی در کمربند بیابانی و میانگین بارش پایین، با چالش‌های کم‌آبی و تغییرات اقلیمی مواجه است. این موضوع بر اهمیت مطالعه حاضر تأکید دارد.

بسیاری از مطالعات داخلی بر مناطق خاصی مانند حوضه خزر، همدان یا خوزستان متمرکز بوده‌اند و تحقیقات جامع در مورد بلوچستان کمتر انجام شده است. مطالعه حاضر با تمرکز بر ۱۰ شهر اصلی بلوچستان، اطلاعات ارزشمندی در مورد روندهای بارش و خشکسالی در این منطقه ارائه می‌دهد. استفاده از داده‌های PERSIANN با توان تفکیک بالا و روش‌های ناپارامتریک پیشرفته (مانند من‌کندال و شیب سنس) در این مطالعه، رویکردی نوین برای تحلیل اقلیم منطقه است.شناسایی نقاط جهش اقلیمی و روندهای افزایشی و کاهشی بارش در شهرهای مختلف بلوچستان، اطلاعات جدیدی برای مدیریت منابع آبی و برنامه‌ریزی منطقه‌ای فراهم می‌کند. این پیشینه تحقیق نشان‌دهنده اهمیت موضوع و پشتوانه علمی قوی برای مطالعه حاضر است و به تکمیل دانش موجود در زمینه تغییرات اقلیمی و بارش در مناطق خشک کمک می‌کند.

روش تحقیق

داده های بارش سالیانه از داده های سنجش از دور پایگاه پرشین در بازه زمانی ۲۰۲۲-۱۹۸۳ برای ۱۰ شهر منطقه بلوچستان تهیه شده است. ظهور تکنولوژی‌های ماهواره‌ای و افزایش توان محاسباتی رایانه‌ها (برای انجام محاسبات سنگین مدلسازی جو و اتصال آن به مدل‌های سطح زمین منجر به ارائه محصولات بارشی با توان تفکیک مکانی و زمانی بالا شده است. این محصولات عمدتاً به صورت شبکه‌بندی هستند و اگرچه بر خلاف ایستگاه‌های بارانسنجی زمینی، دارای مشکل عدم پیوستگی مکانی و زمانی نمی‌باشند ولی عدم قطعیت‌هایی در تخمین بارش دارند که از جمله نقاط ضعف این پایگاه های داده محسوب می شوند.(Steiner et al., 2003; Hong et al., 2006; AghaKouchak et al.2009) . در پایگاه بارشی ارزشمند PERSIANN، از الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی و تصاویر بازتابش شده مادون قرمز توسط ماهواره‌های زمین مرجع برای تخمین میزان بارندگی استفاده، می‌شود. الگوریتم PERSIANN ابتدا براساس تصاویر مادون قرمز از ماهواره‌های زمین مرجع بود، سپس به نسخه جدید آن که در حال حاضر استفاده می‌شود، داده‌های مایکروویو نیز اضافه شد که این داده‌های جدید برای کالیبراسیون و تنظیم پارامترهای الگوریتم بکار می‌روند. مطالعات اعتبارسنجی نشان می‌دهند که تخمین های بارش بطور قابل توجهی توسط تنظیم داده‌های بدست آمده از مادون قرمز با اطلاعات مایکروویو، بهبود یافته‌اند. الگوریتم برآورد بارش PERSIANN بطور کاربردی از سال ۱۹۸۳ با پوشش سراسری از ۶۰ درجه شمالی تا ۶۰ درجه جنوبی، در دسترس می‌باشد.

این پایگاه بارشی شامل سه محصول مختلف با جزئیات زیر می باشد:

PERSIAN-CCS: توان تفکیک مکانی ۰٫۰۴؛

PERSIAN-CDR: توان تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه و مقیاس زمانی ۱، ۳ و ۶ ساعته، روزانه و ماهانه برای بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۸۲۵درجه و مقیاس زمانی روزانه و ماهانه برای بازه زمانی ۱۹۸۳ تا ۲۰۱۸؛

PERSIAN: توان تفکیک مکانی ۰٫۲۵درجه و مقیاس زمانی روزانه و ماهانه برای بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸.

دو آزمون من کندال و شیب سنس (Sen's Estimator) جزو متداول‌ترین‌های ناپارامتری تحلیل روند سری‌های زمانی هیدرومتئولوژیکی به شمار می‌روند. مطالعات مختلف انجام شده با استفاده از این دو روش حاکی از اهمیت و کاربرد فراوان آن‌ها در تحلیل روند سری‌های زمانی می‌باشد. روش من-کندال ابتدا توسط مَن (۱۹۴۵) ارائه و سپس توسط کِندال (۱۹۷۰) بسط و توسعه یافت. فرض صفر آزمون من-کندال بر تصادفی بودن و عدم وجود روند در سری داده‌ها دلالت دارد و پذیرش فرض یک (رد فرض صفر) دال بر وجود روند در سری داده ها می‌باشد. در این روش ابتدا اختلاف بین هر یک از مشاهدات با تمام مشاهدات پس از آن محاسبه شده و پارامتر S مطابق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$S=\sum_{k=1}^{n-1}\sum_{j=k+1}^{n}\operatorname{sgn}\left(x_j-x_k\right) \qquad (۱)$$

که n تعداد مشاهدات سری، و Xj و Xk به ترتیب داده‌های j ام و k ام سری می‌باشند. تابع علامت sgn نیز به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\operatorname{sgn}\left(x_j-x_k\right)=+1 \quad \text{for } (xj-xk)>0 \qquad (۲)$$

$$\operatorname{sgn}\left(x_j-x_k\right)=0 \quad \text{for } (xj-xk)=0$$

$$\operatorname{sgn}\left(x_j-x_k\right)=-1 \quad \text{for } (xj-xk)<0$$

در مرحله بعد محاسبه واریانس S توسط یکی از روابط زیر محاسبه شد:

$$Var(S)=\frac{n(n-1)(2n+5)-\sum_{i=1}^{m}t(t-1)(2t+5)}{18} \quad \text{for } n>10 \qquad (۳)$$

$$Var(S)=\frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad \text{for } n<10 \qquad (۴)$$

که n و m معرف تعداد دنباله‌هایی است که در آن‌ها حداقل یک داده تکراری وجود دارد. t نیز بیانگر فراوانی داده‌های با ارزش یکسان در یک دنباله (تعداد گره‌ها) می‌باشد. در نهایت نیز آماره Z به کمک یکی از روابط زیر استخراج می‌شود:

$$z = \frac{S-1}{\sqrt{Var(S)}} \quad \text{for } S>0 \qquad (۵)$$

$$z = 0 \quad \text{for } S=0$$

$$z = \frac{S+1}{\sqrt{Var(S)}} \quad \text{for } S<0$$

با فرض دو دامنه آزمون روند، فرضیه صفر در صورتی پذیرفته می‌شود که شرط زیر برقرار باشد:

$$|Z| < Z_{\alpha/2} \qquad (۶)$$

که α سطح معنی‌داری است که برای آزمون در نظر گرفته می‌شود و Zα آماره توزیع نرمال استاندارد در سطح معنی داری α می‌باشد که با توجه به دو دامنه بودن آزمون، $\alpha/2$ استفاده شده است. در بررسی حاضر این آزمون برای سطوح اعتماد ۹۵ ٪ و ۹۹ ٪ به کار گرفته شده است. در صورتی که آماره Z مثبت باشد روند سری داده‌ها صعودی و در صورت منفی بودن آن روند نزولی در نظر گرفته می‌شود (من، ۱۹۴۵؛ کندال، ۱۹۷۰).

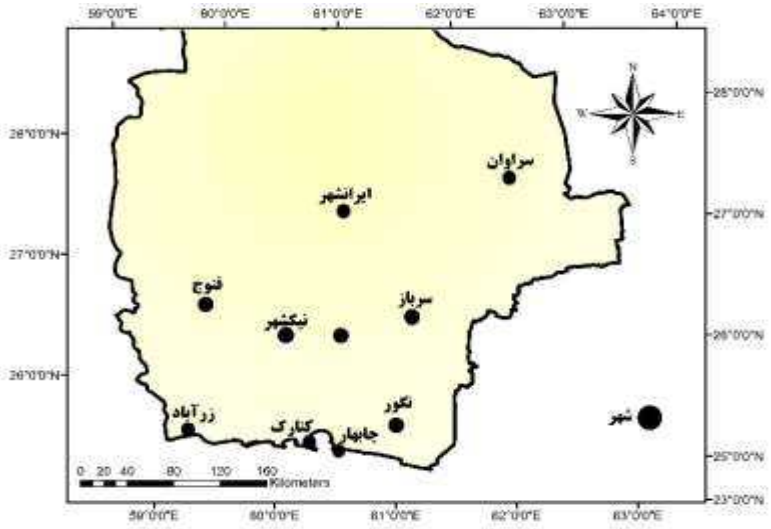
میانگین متحرک

یکی دیگر از روشهای بررسی دوره های ترسالی و خشکسالی استفاده از میانگین متحرک یا لغزان می باشد. چنانچه تغییرات بارش سالانه در طی یک دوره مشترک آماری در نظر گرفته شود؛ به دلیل تغییرات سالانه مقادیر بارش، بررسی روند تغییرات به راحتی انجام پذیر نمی باشد. روش میانگین متحرک با به کارگیری متوسط داده ها در یک دوره معین و تشکیل سری زمانی جدید، این نوسانات را کاهش و یا به عبارتی دیگر، این نوسانات را هموار می کند. بنابراین با حذف و یا کاهش نوسانات سالانه، روند تغییرات دراز مدت بارز میگردد. میانگین متحرک می تواند در پایه های زمانی مختلف محاسبه شود؛ که بستگی به طول آمار مورد بررسی و تغییرپذیری سری داده ها دارد. سازمان هواشناسی جهانی، میانگین متحرک ۵ ساله و ۷ ساله بارش را برای بررسی های مربوط به خشکسالی و ترسالی توصیه می کند. از این رو می توان با ترسیم منحنی میانگین متحرک بارش سالانه، روندهای ترسالی و خشکسالی را بررسی نمود. به طوری که بخش هایی از منحنی که بالاتر از مقدار عددی میانگین بارش سالانه، دوره ترسالی و بخش دیگری که پایین تر از آن باشد، بیانگر دوره

خشکسالی است. در این پژوهش، نمودارهای میانگین های متحرک ۳ ، ۵ و ۷ ساله برای منطقه بلوچستان ترسیم گردید. در این روش ابتدا میانگین بارندگی برای دوره های ۳ ، ۵ و ۷ ساله تعیین شده، سپس نمودار میانگین متحرک این دوره ها همراه با خط مربوط به متوسط میزان بارندگی ترسیم گردید تا دوره های خشک و مرطوب از یکدیگر تفکیک شوند.

محدوده مورد مطالعه

بلوچستان ایران منطقه‌ای است در جنوب شرقی فلات ایران که از کنار کویر کرمان تا مرزهای شرقی کشور سند گسترده شده است. در تحقیق حاضر بارش ده شهر اصلی منطقه بلوچستان مورد مطالعه قرار گرفته است(شکل ۱- جدول۱)



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه

جدول۱- مشخصات شهرهای مورد مطالعه

ردیف	شهر	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا
۱	چابهار	۲۵/۲۸	۶۰/۶۲	۸
۲	کنارک	۲۵/۲۰	۶۰/۲۶	۱۰
۳	نگور	۲۵/۳۹	۶۱/۱۴	۲۰
۴	زرآباد	۲۵/۳۴	۵۹/۲۳	۳۰
۵	نیکشهر	۲۶/۱۴	۶۰/۱۳	۵۱۰
۶	قصرقند	۲۶/۰۸	۶۰/۵۱	۷۸۰
۷	سرباز	۲۶/۱۳	۶۱/۲۴	۵۰۰
۸	فنوج	۲۶/۶	۵۹/۶۵	۱۸۵

۹	ایرانشهر	۲۷/۲۰	۶۰/۷۰	۵۹۹/۱
۱۰	سراوان	۲۷/۳۳	۶۲/۳۳	۱۱۸۲

یافته‌های تحقیق

باتوجه به اینکه اغلب داده های بارش توزیع نرمال نداشته و چولگی و کشیدگی نامتقارن دارند. لذا از روش های ناپارمتریک بهره برد. برای کلیه سری های زمانی مورد مطالعه در ابتدا آماره های دو آزمون من- کندال و شیب سن محاسبه گردیدند سپس معنی داری این آماره ها در سطوح اطمینان ۹۵ ٪ و ۹۹ ٪ مورد آزمون قرار گرفت که نتایج حاصله در جدول (۳) مشاهده می شود. نتایج آماره من کندال و شیب سن برای مناطق مورد مطالعه نشان می دهد که:

چابهار: در بررسی آمار سالیانه روند مثبت محاسبه گردید. بارش سالانه طی سال های گذشته به مقدار حدودی ۰/۶۲۱ میلیمتر و طی چهار دهه گذشته ۲۴ میلیمتر افزایش داشته است.

کنارک: مانند چابهار روند مثبت نشان می دهد. بارش سالانه طی سال های گذشته به مقدار حدودی ۱/۱۸۰میلیمتر و طی چهار دهه گذشته ۴۷ میلیمتر افزایش داشته است. این تغییرات معنی دار بوده است.

نگور: در بررسی آمار سالیانه روند مثبت محاسبه گردید. طی سال های گذشته بارش سالانه به میزان ۱/۱۴۷ میلیمتر و طی چهار دهه گذشته ۴۵ میلیمتر افزایش داشته است. این تغییرات معنی دار بوده است.

زرآباد: همانند دیگر نقاط ساحلی روند مثبت سالانه را نشان می‌دهد. طی چهاردهه گذشته ۱۵ و به میزان ۰/۳۸۳ میلیمتر برای هر سال افزایش ثبت کرده است.

نیکشهر: با دور شدن از سواحل شاهد روند منفی و کاهشی در میزان بارش را نشان داد. برای هر سال ۰/۴۸۴ و طی چهاردهه گذشته ۱۹ میلیمتر کاهش ثبت شده است.

جدول۲- نتایج آماره من کندال و شیب سن

شاخص	چابهار	کنارک	نگور	زرآباد	نیکشهر
Test Z	1.29	1.60	1.71	0.45	0.38
Signific.		+	+		
Q	0.621	1.180	1.147	0.383	-0.484
Qmin99	-1.438	-0.730	-0.899	-2.020	-2.473

Qmax99	3.727	3.650	3.933	2.498	3.276
Qmin95	-0.691	-0.254	-0.166	-1.494	-1.761
Qmax95	3.198	3.117	3.200	2.108	2.483
B	109.4058	94.46093	96.22295	119.13	148.4257
Bmin99	162.7284	145.8459	141.6992	175.3449	213.108
Bmax99	52.78508	60.71408	50.41332	75.36324	87.08376
Bmin95	144.5183	137.0545	127.7194	161.4196	191.0361
Bmax95	66.09492	68.10042	62.79377	83.90647	109.6388

قصرقند: بررسی نشان از روند مثبت و افزایشی سالانه بارش و معنی دار می دهد. این روند برای هر سال ۱/۱۷۲ و برای دوره تحقیق چهل ساله، ۴۶ میلیمتر افزایش داشته است.

سرباز: برخلاف قصرقند و مشابه نیکشهر، روند کاهشی و نزولی و معنی‌دار بارش سالانه را ثبت نموده است. ۲۲ میلیمتر طی چهار دهه و ۰/۵۵ میلیمتر برای هر سال کاهش مشخص شد.

فنوج: همانند سرباز، روند کاهشی و نزولی و معنی‌دار بارش سالانه را نشان می دهد. ۲۶ میلیمتر طی چهار دهه و ۰/۶۶ میلیمتر برای هر سال کاهش را ثبت نموده است.

ایرانشهر: طی چهاردهه دوره تحقیق به میزان ۱۵ و برای هرسال ۰/۳۹ میلیمتر کاهش را نشان داد. روند کاهشی و بدون معنی بوده است.

سراوان: برخلاف ایرانشهر، روند افزایشی و معنی‌دار بارش سالانه را ثبت نموده است. ۳۶ میلیمتر طی چهار دهه و ۰/۹۲ میلیمتر برای هر سال کاهش مشخص شد.

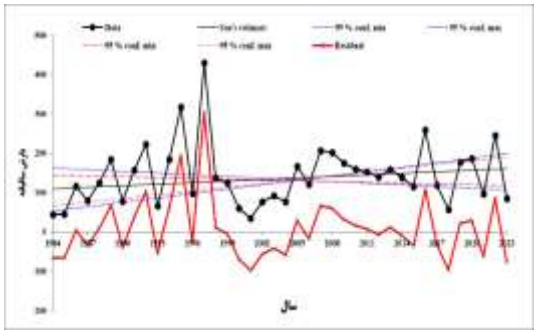
جدول۳- نتایج آماره من کندال و شیب سن

شاخص	قصرقند	سرباز	فنوج	ایرانشهر	سراوان
Test Z	1.11	1.36	0.57	0.87	1.99
Signific.	*	*			*
Q	1.172	-0552	-0.661	-0.390	0.92
Qmin99	-1.347	-0.996	-2.242	-1.621	-0.412
Qmax99	4.067	4.269	3.554	3.464	3.615
Qmin95	-0.827	-0.373	-1.506	-1.130	0.025

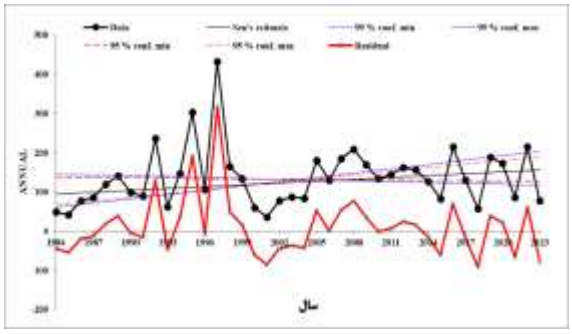
Qmax95	3.433	3.649	2.992	2.790	3.032
B	140.9817	137.435	138.7842	108.6471	90.51612
Bmin99	175.6466	174.2073	198.1526	167.9129	118.2045
Bmax99	82.58092	70.10328	77.40484	74.00421	57.96571
Bmin95	166.5744	156.6704	179.1302	158.9765	110.9814
Bmax95	96.8546	87.87408	92.33449	83.75327	65.53708

نمودارهای ۲ الی ۱۱، داده های بارندگی سالانه را در طول زمان (۱۹۸۴-۲۰۲۳) با تجزیه و تحلیل آماری، از جمله تخمین روند و فواصل اطمینان، نشان می دهد. در این نمودار یک خط روند ناپارامتریک که با استفاده از تخمین‌گر شیب سن محاسبه می‌شود (نسبت به نقاط پرت قوی است و معمولاً برای تشخیص روند در داده‌های محیطی استفاده می‌شود). باقیمانده ها تفاوت بین نقاط داده مشاهده شده و خط روند تخمینی را نشان می دهند. باقیمانده های مثبت مقادیر بالای خط روند را نشان می دهند، در حالی که باقیمانده های منفی زیر آن هستند.

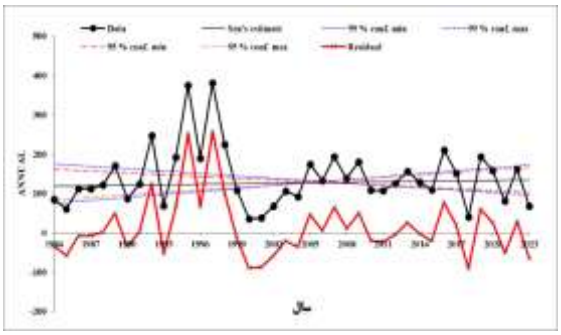
داده‌های بارش تغییرپذیری را در طول سال‌ها، با برخی قله‌های شدید، نشان می‌دهد. خط روند نشان دهنده روند صعودی یا نزولی بارندگی سالانه در طول زمان است. فواصل اطمینان نشان می دهد که این روند در هر دو سطح اطمینان ۹۵٪ و ۹۹٪ از نظر آماری معنی دار یا بی معنی است. باقیمانده ها انحراف از روند تخمینی را برجسته می کنند و دوره هایی با بارندگی بیشتر یا کمتر از حد انتظار را نشان می دهند. این نمودار نمای جامعی از روندهای بارش درازمدت و تنوع آنها ارائه می دهد که برای مطالعات آب و هوا و مدیریت منابع آب مفید است.



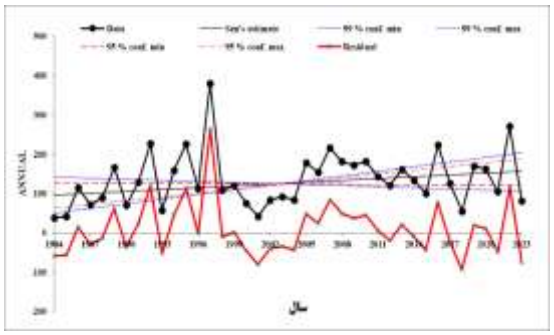
شکل ۲– نمودار تخمین روند و فواصل اطمینان بارش سالانه چابهار



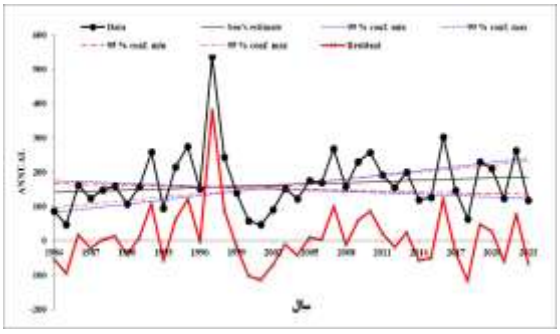
شکل ۳– نمودار تخمین روند و فواصل اطمینان بارش سالانه کنارک



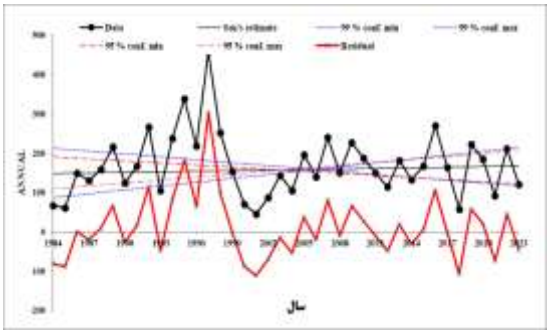
شکل ۵– نمودار تخمین روند و فواصل اطمینان بارش سالانه زرآباد



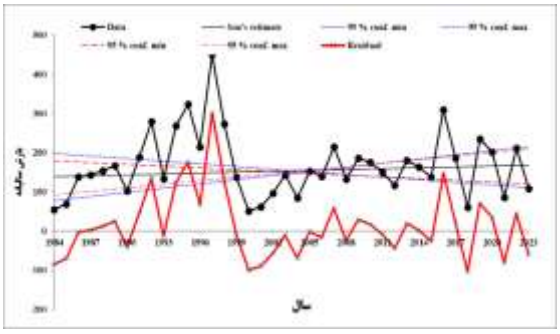
شکل ۴– نمودار تخمین روند و فواصل اطمینان بارش سالانه نگور



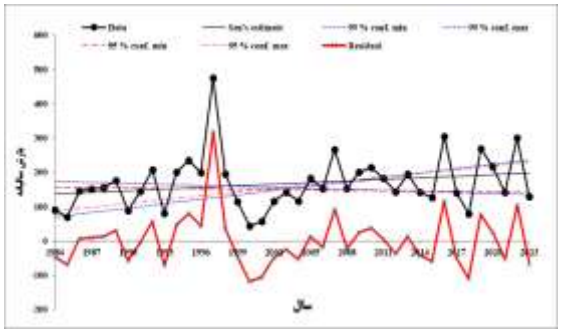
شکل ۷– نمودار تخمین روند و فواصل اطمینان بارش سالانه قصرقند



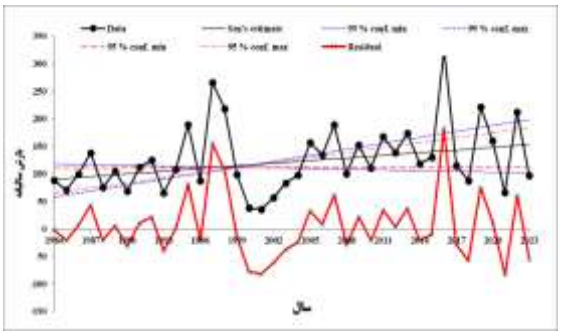
شکل ۶– نمودار تخمین روند و فواصل اطمینان بارش سالانه نیکشهر



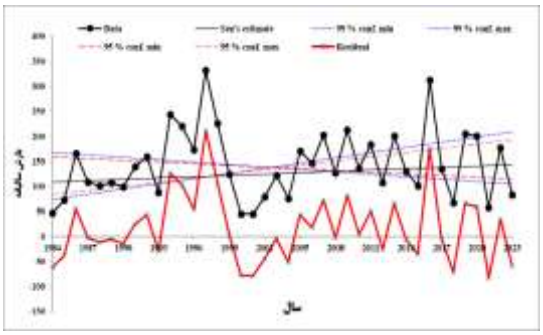
شکل ۹– نمودار تخمین روند و فواصل اطمینان بارش سالانه فنوج



شکل ۸– نمودار تخمین روند و فواصل اطمینان بارش سالانه سرباز



شکل ۱۱– نمودار تخمین روند و فواصل اطمینان بارش سالانه سراوان



شکل ۱۰–نمودار تخمین روند و فواصل اطمینان بارش سالانه ایرانشهر

به طور کلی برازش نمودار خط سن بر داده‌های میانگین بارش ایستگاهی شهرهای منطقه بلوچستان گویای کاهش یا افزایش بارش در طول دوره آماری مورد مطالعه است. به تفکیک برای هر شهر به شرح زیر ارائه می شود:

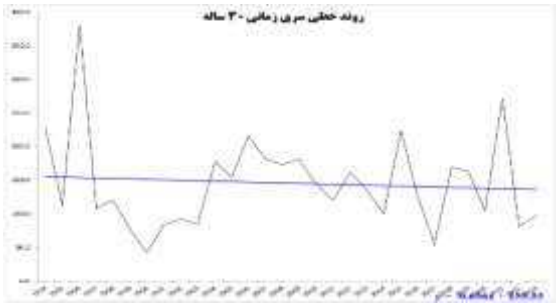


شکل ۱۳. نمودار بارش سالانه و روند آن در کنارک بر اساس روش شیب سن



شکل ۱۲. نمودار بارش سالانه و روند آن در چابهار بر اساس روش شیب سن





شکل ۱۵. نمودار بارش سالانه و روند آن در زرآباد بر اساس روش شیب سن



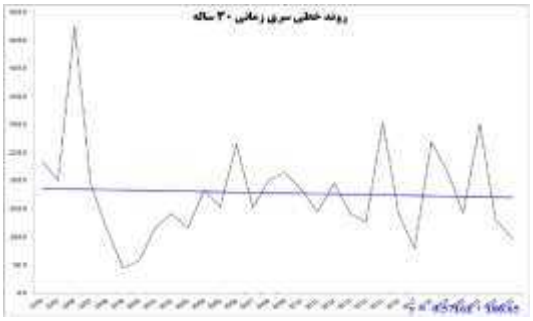
شکل ۱۴. نمودار بارش سالانه و روند آن در نگور بر اساس روش شیب سن



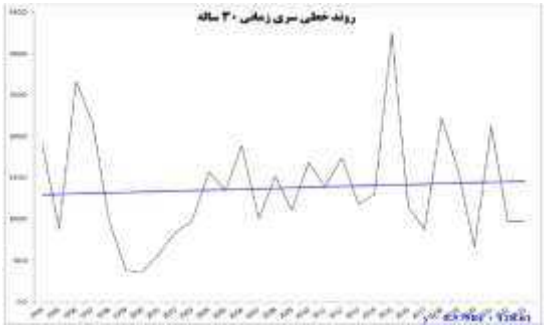
شکل ۱۷. نمودار بارش سالانه و روند آن در قصرقند بر اساس روش شیب سن



شکل ۱۶. نمودار بارش سالانه و روند آن در نیکشهر بر اساس روش شیب سن



شکل ۱۹. نمودار بارش سالانه و روند آن در فنوج بر اساس روش شیب سن



شکل ۱۸. نمودار بارش سالانه و روند آن در سرباز بر اساس روش شیب سن



شکل ۲۱. نمودار بارش سالانه و روند آن در سراوان بر اساس روش شیب سن

شکل ۲۰. نمودار بارش سالانه و روند آن در ایرانشهر بر اساس روش شیب سن

در ادامه آزمون گرافیکی من- کندال برای تعیین نقاط جهش و جزئیات روند بارش به کار گرفته شد. در روش مذکور، علاوه بر تعیین وجود روند، می‌توان زمان شروع آن را با استفاده از روش توالی مشخص کرد. در این روش دو سری مربوط به سنجه های تعریف شده محاسبه و در یک نمودار رسم می شوند منحنیهای U'-U همراه باند اطمینان ۹۵ ٪ نمایان است. اگر منحنی مذکور در محدوده باند اطمینان قرارگرفته و چند بار با یکدیگر نقطه مشترک (برخورد) داشته باشد و یا تقاطعی نداشته باشند این امر نشان دهنده نبود روند است و تقاطع در این موقع، نشان از جهش اقلیمی عنصر بارش دارد اگر منحنی های U'-U بعد از تقاطع خارج از باند اطمینان ۹۵ ٪ قرار گیرند، روند شکل گرفته است. اگر روند معنی دار وجود داشته باشد، دو نمودار فقط یک نقطه برخورد دارند (کتیرایی و همکاران، ۱۳۸۶). در این نمودارها اگر آماره های U(t)و U′(t) بالاتر از ۱/۹۶- همدیگر را قطع کنند بیانگر روند کاهشی، اگر در بازه ۱/۹۶ همدیگر را قطع کنند بیانگر روند افزایشی، اگر در بازه ۱/۹۶- تا صفر همدیگر را قطع کنند بیانگر جهش کاهشی و اگر در بازه ۱/۹۶ تا صفر همدیگر را قطع کنند بیانگر جهش افزایشی می باشد. نتایج برای کشورهای خاورمیانه به صورت زیر تشریح می شود:



شکل ۱۷. نمودار گرافیگی من کندال جهت تعیین روند بارش سالانه کنارک



شکل ۱۸. نمودار گرافیگی من کندال جهت تعیین روند بارش سالانه چابهار



شکل ۱۹. نمودار گرافیگی من کندال جهت تعیین روند بارش سالانه زرآباد



شکل ۲۰. نمودار گرافیگی من کندال جهت تعیین روند بارش سالانه نگور



شکل ۲۱. نمودار گرافیگی من کندال جهت تعیین روند بارش سالانه قصرقند



شکل ۲۲. نمودار گرافیگی من کندال جهت تعیین روند بارش سالانه نیکشهر





شکل ۲۳. نمودار گرافیگی من کندال جهت تعیین روند بارش سالانه فنوج



شکل ۲۴. نمودار گرافیگی من کندال جهت تعیین روند بارش سالانه سرباز



شکل ۲۵. نمودار گرافیگی من کندال جهت تعیین روند بارش سالانه سراوان

شکل ۲۶. نمودار گرافیگی من کندال جهت تعیین روند بارش سالانه ایرانشهر

چابهار: چنانکه درشکل مشاهده می شود به استثنای وجود چند نقطه تغییر در سری های مذکور(سال های ۱۹۹۱، ۲۰۰۳، ۲۰۰۸) هیچگونه تغییر قابل ملاحظه ای دیده نمی شود و عمدتاً در داخل محدوده اطمینان می باشد.

کنارک: یک روند معنادار کاهشی از سال ۱۹۹۳و ۲۰۰۶ در کنارک مشاهده می شود.

نگور: درسال ۱۹۹۹ و۲۰۰۶ به ترتیب یک روند معنادار کاهشی و افزایشی مشاهده می شود.

زرآباد:. در زرآباد یک روند کاهش در سال ۱۹۹۷ و ۲۰۰۸ در محدوده سطح اطمینان ۹۵ درصد مشاهده می شود.

نیکشهر: مشابه زرآباد روند کاهشی در سالهای ۱۹۹۷ و ۲۰۰۸ثبت نموده است.

قصرقند: درسال ۱۹۹۹ و ۲۰۰۶ به ترتیب یک روند معنادار کاهشی و افزایشی مشاهده می شود.

سرباز: در نزدیکی قصرقند و تغییرات مشابه با ان را نشان می دهد.

فنوج: تغییرات بارز و مشخصی دیده نمی شود.

ایرانشهر: درسال ۱۹۹۹ و۲۰۰۶ به ترتیب یک روند معنادار کاهشی و افزایشی مشاهده می شود.

سراوان: درسال ۱۹۹۹ ۲۰۰۴ به ترتیب یک روند معنادار کاهشی و افزایشی ثبت شده است..

نتیجه‌گیری و پیشنهاد

مطالعه حاضر با هدف بررسی روند تغییرات بارش در شهرهای شهری منطقه بلوچستان ایران طی دوره ۴۰ ساله (۱۹۸۴-۲۰۲۳) با استفاده از روش‌های ناپارامتریک من‌کندال و شیب سنس انجام شده است. این پژوهش با بهره‌گیری از داده‌های بارش ماهانه، فصلی و سالانه استخراج‌شده از پایگاه داده PERSIANN و تحلیل‌های آماری، به بررسی روندهای بارش و تأثیرات اقلیمی آن پرداخته است. داده‌های بارش از پایگاه PERSIANN استخراج شده‌اند که با استفاده از فناوری سنجش از دور و الگوریتم‌های شبکه عصبی مصنوعی، تخمین‌های دقیقی از بارش ارائه می‌دهد. این پایگاه با وجود عدم قطعیت‌هایی در تخمین، به دلیل توان تفکیک مکانی و زمانی بالا، برای تحلیل‌های اقلیمی مناسب است.

روش‌های ناپارامتریک من‌کندال و شیب سنس برای شناسایی روندهای بارش و نقاط جهش اقلیمی استفاده شده‌اند. این روش‌ها به دلیل عدم نیاز به توزیع نرمال داده‌ها، برای تحلیل سری‌های زمانی هیدرومتریولوژیکی مناسب هستند. آزمون من‌کندال برای بررسی وجود روند و معناداری آن در سطوح اطمینان ۹۵٪ و ۹۹٪ و تخمین‌گر شیب سنس برای تعیین میزان و جهت تغییرات بارش به کار گرفته شده است.

شهرهای چابهار، کنارک، زرآباد، نگور، سراوان و قصرقند روند افزایشی و معنادار در بارش سالانه نشان داده‌اند. به عنوان مثال، چابهار با افزایش ۲۴ میلی‌متر و کنارک با افزایش ۴۷ میلی‌متر طی چهار دهه، از روندهای مثبت قابل توجهی برخوردار بوده‌اند. شهرهای ایرانشهر، نیکشهر، فنوج و سرباز روند کاهشی و معنادار در بارش سالانه داشته‌اند. به عنوان مثال، نیکشهر با کاهش ۱۹ میلی‌متر و فنوج با کاهش ۲۶ میلی‌متر طی چهار دهه، با چالش‌های کم‌آبی مواجه شده‌اند. تحلیل گرافیکی من‌کندال نشان‌دهنده نقاط جهش معنادار در بارش سالانه در سال‌های خاصی (مانند ۱۹۹۱، ۱۹۹۷، ۱۹۹۹، ۲۰۰۳، ۲۰۰۴، ۲۰۰۶ و ۲۰۰۸) است. این نقاط جهش نشان‌دهنده تغییرات ناگهانی در الگوهای بارش هستند که می‌توانند با پدیده‌های اقلیمی یا تغییرات محیطی مرتبط باشند. داده‌های بارش نشان‌دهنده تغییرپذیری قابل توجهی در طول سال‌ها با قله‌های شدید است. این تغییرپذیری در مناطق ساحلی (مانند چابهار و کنارک) و غیرساحلی (مانند نیکشهر و ایرانشهر) متفاوت بوده و مناطق غیرساحلی بیشتر تحت تأثیر کاهش بارش قرار گرفته‌اند.

بلوچستان به دلیل موقعیت جغرافیایی در کمربند بیابانی و میانگین بارش پایین‌تر از میانگین جهانی، به شدت در برابر تغییرات اقلیمی آسیب‌پذیر است. کاهش بارش در برخی شهرها (مانند نیکشهر و سرباز) به تشدید چالش‌های کم‌آبی منجر شده است. افزایش گازهای گلخانه‌ای و گرمایش جهانی، به‌ویژه افزایش غلظتCO_2 ، به تغییرات سریع‌تر در الگوهای بارش منطقه کمک کرده است. این تغییرات می‌توانند اثرات بلندمدتی بر منابع آبی، کشاورزی و مهاجرت جمعیت داشته باشند.

این مطالعه نشان داد که الگوهای بارش در شهرهای بلوچستان طی چهار دهه گذشته تحت تأثیر تغییرات اقلیمی قرار گرفته و روندهای متفاوتی را نشان داده است. شهرهای ساحلی مانند چابهار، کنارک، زرآباد و نگور و همچنین سراوان و قصرقند شاهد افزایش بارش بوده‌اند، در حالی که شهرهای داخلی مانند ایرانشهر، نیکشهر، فنوج و سرباز با کاهش بارش و چالش‌های کم‌آبی مواجه شده‌اند. نقاط جهش اقلیمی شناسایی‌شده نشان‌دهنده تغییرات ناگهانی در الگوهای بارش است که می‌تواند به عوامل اقلیمی یا انسانی مرتبط باشد. این یافته‌ها بر ضرورت پایش مستمر اقلیم و برنامه‌ریزی برای مدیریت منابع آبی تأکید دارند. با توجه به روند کاهشی بارش در برخی شهرها، اجرای طرح‌های مدیریت آب مانند ذخیره‌سازی آب باران، بهینه‌سازی مصرف آب و احیای منابع زیرزمینی ضروری است. استفاده مستمر از داده‌های سنجش از دور و تحلیل‌های ناپارامتریک برای شناسایی روندها و نقاط جهش اقلیمی توصیه می‌شود. برای کاهش اثرات کم‌آبی در شهرهای با روند کاهشی، برنامه‌ریزی برای توسعه پایدار کشاورزی و زیرساخت‌های آبی لازم است. بررسی تأثیر سایر عوامل اقلیمی (مانند دما، تبخیر و الگوهای جوی) بر تغییرات بارش و تحلیل اثرات اجتماعی-اقتصادی این تغییرات می‌تواند درک جامع‌تری ارائه دهد. این پژوهش با ارائه تحلیل‌های دقیق و استفاده از روش‌های آماری پیشرفته، گامی مهم در راستای شناخت روندهای بارش و تأثیرات اقلیمی در بلوچستان برداشته و اطلاعات ارزشمندی برای سیاست‌گذاری و مدیریت منابع آبی فراهم کرده است.

منابع

ابراهیمی، هدی و پرویز کردوانی (۱۳۹۳)، مطالعه تغییر اقلیم در تالاب بین المللی انزلی به روش من کندال، نشریه اکوبیولوژی تالاب (تالاب)، دوره ۶، شماره ۲۱، صص ۷۱-۵۹.

احمدی، ح. (۱۳۸۸). تحلیل خشکسالی در شهر ایلام بر اساس شاخص توزیع استاندارد و درصد نرمال. اولین همایش ملی بحران آب در کشاورزی و منابع طبیعی.

باقرپور، مهسا؛ سیدیان، سیدمرتضی؛ فتح آبادی، ابوالحسن و امین محمدی (۱۳۹۶)، بررسی کارایی آزمون من کندال در شناسایی روند سری های دارای خودهمبستگی، مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، دوره ۱۱، شماره ۳۶، صص ۲۱-۱۱.

دارند، محمد (۱۳۹۳)، روند تغییرات بارش ایران زمین به کمک داده های شبکه ای مرکز اقلیم شناسی بارش جهانی، همایش ملی تغییرات اقلیم و مهندسی توسعه پایدار کشاورزی و منابع طبیعی، همدان.

دین پژوه، یعقوب و رعنا صدیق پور (۱۳۹۸)، تحلیل روند پنج مشخصه مهم بارش های روزانه در حوضه دریاچه ارومیه، مجله پژوهش آب ایران، دوره ۱۳، شماره ۴ (پیاپی ۳۵)، صص ۷۲-۶۳.

رضیئی، طیب؛ دانش کار آراسته، پیمان و بهرام ثقفیان (۱۳۸۴)، بررسی روند بارندگی سالانه در مناطق خشک و نیمه خشک مرکزی و شرقی ایران، مجله آب و فاضلاب، دوره ۱۶، شماره ۲، صص ۸۱-۷۳.

زابل عباسی، ف. و همکاران (۱۳۸۶). بررسی و مقایسه شاخص‌های خشکسالی در مشهد. اداره کل هواشناسی استان خراسان رضوی.

زارع ابیانه، ح. و همکاران (۱۳۸۳). بررسی وضعیت خشکسالی و روند آن در منطقه همدان بر اساس شاخص‌های آماری خشکسالی. پژوهش و سازندگی در زراعت و باغبانی، شماره ۶۴.

عزیزی، قاسم و محمود روشنی (۱۳۸۷)، مطالعه تغییر اقلیم در سواحل جنوبی دریای خزر به روش من- کندال، پژوهش های جغرافیای طبیعی، شماره پیاپی ۱۰۰۰۲۵۲.

عساکره، حسین (۱۳۸۶)، تغییرات زمانی- مکانی بارش ایران زمین طی دهه‌های اخیر، فصلنامه جغرافیا و توسعه، دوره ۵، شماره ۱۰، صص ۱۶۴-۱۴۵.

عسگری، احمد و فاطمه رحیم زاده (۱۳۸۵)، مطالعه تغییر پذیری بارش دهه‌های اخیر ایران، پژوهش‌های جغرافیایی، شماره ۵۸ ،صص ۸۰-۶۷.

فرج زاده، منوچهر و وحید فیضی (۱۳۹۱)، آشکارسازی تغییرهای زمانی-مکانی عناصر دما و بارش در ایران، برنامه ریزی و آمایش فضا (مدرس علوم انسانی)، دوره ۱۶، شماره ۴ (پیاپی ۷۶)، صص ۶۶-۴۹.

قصاب فیض، مصطفی و حسین اسلامی (۱۳۹۶)، ارزیابی روند تغییرات بارندگی با روش من کندال و رگرسیون خطی در استان خوزستان، فصلنامه مهندسی آب، دوره ۵، شماره ۲، صص ۱۲۱-۱۱۳.

کاویانی، محمدرضا و حسین عساکره (۱۳۸۲)، بررسی آماری روند بلندمدت بارش سالانه اصفهان، سومین کنفرانس منطقه ای تغییر اقلیم، اصفهان.

کتیرایی، پری؛ حجام، سهراب و پرویز ایران نژاد (۱۳۸۶)، سهم تغییرات فراوانی و شدت بارش روزانه در روند بارش در ایران طی دوره ۲۰۰۱-۱۹۶۰، مجله فیزیک زمین و فضا، جلد ۳، شماره ۱، صص ۸۳-۶۷.

لشنیزند، م. (۱۳۸۰). پهنه‌بندی خشکسالی اقلیمی در استان لرستان با به‌کارگیری شاخص‌های آماری. اولین کنفرانس ملی بررسی راهکارهای مقابله با بحران آب، دانشگاه زابل.

مسعودیان، ابولفضل و محمد دارند (۱۳۹۲)، شناسایی و بررسی تغییرات نمایه های بارش فرین ایران طی دهه های اخیر، جغرافیا و توسعه ناحیه ای، شماره 20، صص ۲۵۷-۲۳۹.

منتظری، مجید و حسنعلی غیور (۱۳۸۸)، تحلیل مقایسه ای روند بارش و خشکسالی حوضه خزر، جغرافیا و توسعه، دوره ۷، شماره پیاپی ۱۶، صص ۹۲-۷۱.

میرزایی حسنلو، ایوب؛ عبقری، هیراد و مهدی عرفانیان (۱۳۹۹)، تحلیل روند بارندگی و شاخص تمرکز بارش در ایستگاه های سینوپتیک حوضه دریا چه ارومیه، جغرافیا و توسعه، دوره ۱۸، شماره ۵۹، صص ۴۰-۲۱.

ناظری تهرودی، م؛ خلیلی، ک و ف. احمدی، (۱۳۹۵)، تحلیل روند تغییرات ایستگاهی و منطقه ای بارش نیم قرن اخیر کشور ایران، نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد ۳۰، شماره ۲، صص ۶۵۴-۶۴۳.

هرمزی، هدایت اله؛ برنا، رضا و منیژه ظهوریان پردل (۱۳۹۸)، بررسی روند تغییرات بارش در استان خوزستان و تأثیر آن بر تالاب شادگان، اکوبیولوژی تالاب (تالاب)، دوره ۱۱، شماره ۴۱، صص ۱۱۷-۱۰۳.

AghaKouchak Amir, Nasrin Nasrollahi and Emad Habib (2009), Accounting for Uncertainties of the TRMM Satellite Estimates, Remote Sensing, Vol. 1, Issue 3, pp. 606-619.

Arrhenius S 1896 On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. Philosophical Magazine and Journal of Science. Series 5 41(251): 237-276.

Batlló Juan Torres and BelénMartí-Cardona 2020, Precipitation trends over the southern Andean Altiplano from 1981 to 2018, Journal of Hydrology, Vol. 590, November 2020, 125485.

Chen j., Wub X., Finlayson B., Webber M., Wei T., and Li M. 2014. Variability and trend in the hydrology of the Yangtze River, China: Annual precipitation and runoff. Journal of Hydrology. 513: 403-412.

Duhan D., and Pandy A. 2013. Statistical analysis of long term spatial and temporal trends of precipitation during 1901–2002 at Madhya Pradesh, India. Atmospheric Research. 122: 136-149.

Hong, S.T., Bang, S., Paik, D., Kang, J., Hwang, S., Jeon, K., Chun, B., Hyun, S., Lee, Y., Kim, J. (2006). Histamine and its receptors modulate temperature-preference behaviors in Drosophila. J. Neurosci. 26(27): 7245--7256.

Jain SK., Kumar V., and Saharia M. 2013. Analysis of rainfall and temperature trends in northeast India. International Journal of Climatology. 33: 968-978.

Llasat María Carmen, Annadel Moral, Maria Cortès, Tomeu Rigo 2021, Convective precipitation trends in the Spanish Mediterranean region, Atmospheric Research Vol. 257, 10 August 2021, 105581

Manabe, S., & Wetherald, R. T. (1967). Thermal equilibrium of the atmosphere with a given distribution of relative humidity. Journal of the Atmospheric Sciences, 24(3), 241-259.

Steiner, M.B., Y. Eshet, M.R. Rampino, and D.M. Schwindt, 2003: Fungal abundance spike and the Permian-Triassic boundary in the Karoo Supergroup (South Africa). Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol., 194, 405-414.

Touré Halimatou, Traoré Kalifa and Kyei-Baffour N 2017, Assessment of changing trends of daily precipitation and temperature extremes in Bamako and Ségou in Mali from 1961- 2014, Weather and Climate Extremes Vol. 18, December 2017, pp. 8-16

Yacoub Ely and GokmenTayfur 2020, Spatial and temporal of variation of meteorological drought and precipitation trend analysis over whole Mauritania, Journal of African Earth Sciences Vol. 163, March 2020, 103761

Analyzing the trend of precipitation changes with a climate change approach

Case study: Urban areas of Balochistan

Chakavak Khajehamiri Khaledi1, Mohammad Reza Salari Fanoodi2

Assistant Professor, Department of Oceanography, Faculty of Marine Science, Chabahar Maritime University, Chabahar, Iran

Chabahar Marine Synoptic Meteorology Department, Chabahar, Iran

* Corresponding author: c.khajehamiri@cmu.ac.ir

Abstract

The aim of this research is to investigate the trend of precipitation changes in Balochistan over the past four decades using the non-parametric Mann-Kendall and Sen's Slope methods. For this purpose, monthly, seasonal, and annual precipitation data for 10 cities in the Balochistan region during the 1984-2023 period were extracted from the PERSIANN remote sensing database. After creating the database, statistical calculations and the Mann-Kendall and Sen's Slope indices were prepared. The results of this study showed that for the annual period, the trend was positive and increasing for the cities of Chabahar, Konarak, Zarabad, Negour, Saravan, and Qasr-e Qand. In contrast, for Iranshahr, Nikshahr, Fanuj, and Sarbaz, the trend was decreasing and negative, leading to water scarcity challenges. For all regions, we have also observed significant shifts in the trend of annual precipitation. These findings emphasize the necessity of continuous climate monitoring and planning for water resource management. Given the decreasing precipitation trend in some cities, implementing water management plans such as rainwater harvesting, optimizing water consumption, and rehabilitating underground resources is essential.

Keywords: Balochistan, Iran, Rainfall, Man Kenda

شبیه‌سازی بارش ماهانه ایستگاه سینوپتیک نمین با استفاده از مدل‌های هوشمند

محمدرضا نیک‌پور[1*]

۱- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی
* آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول (m_nikpour@uma.ac.ir)

چکیده

مقادیر بارش ماهانه به عنوان یکی از داده‌های اصلی ورودی به سیستم‌های هیدرولوژیکی محسوب شده و پیش‌بینی دقیق آن در مطالعات رواناب و آب‌های زیرزمینی حائز اهمیت است. در سال‌های اخیر، مدل‌های هوشمند به‌طور گسترده‌ای در شبیه‌سازی پدیده‌های هیدرولوژیکی مورد استفاده قرار گرفته است. در تحقیق حاضر به منظور شبیه‌سازی بارش ماهانه ایستگاه سینوپتیک نمین از مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی (ANN) و سامانه استنتاجی فازی عصبی تطبیقی (ANFIS) استفاده شد. بر اساس داده‌های موجود، مقادیر بارش ماهانه به‌ازای دوره آماری ۲۰۲۴-۲۰۰۸ مورد استفاده قرار گرفت. برای شبیه‌سازی کوتاه مدت بارش ماهانه (یک ماه بعد) سه الگوی مختلف بر اساس تأخیر بارش و پارامترهای دمای میانگین و حداقل تعریف شد. برای ارزیابی نتایج مدل از شاخص‌های ضریب تعیین (R^2)، حداقل ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و شاخص کارایی نش-ساتکلیف (NSE) استفاده شد. نتایج پژوهش حاکی از عمکرد بهتر مدل ANFIS در مقایسه با مدل ANN بود. به‌طوری‌که مقادیر R^2، NSE و RMSE برای مدل ANFIS به‌ازای بهترین الگو در مرحله صحت‌سنجی به‌ترتیب برابر ۰/۸۱۰، ۰/۸۰۳ و ۱۰/۲۰۱ میلی‌متر به‌دست آمد.

کلید واژه‌ها: ایستگاه نمین، بارش ماهانه، سامانه استنتاجی فازی-عصبی تطبیقی، شبکه‌های عصبی مصنوعی.

مقدمه

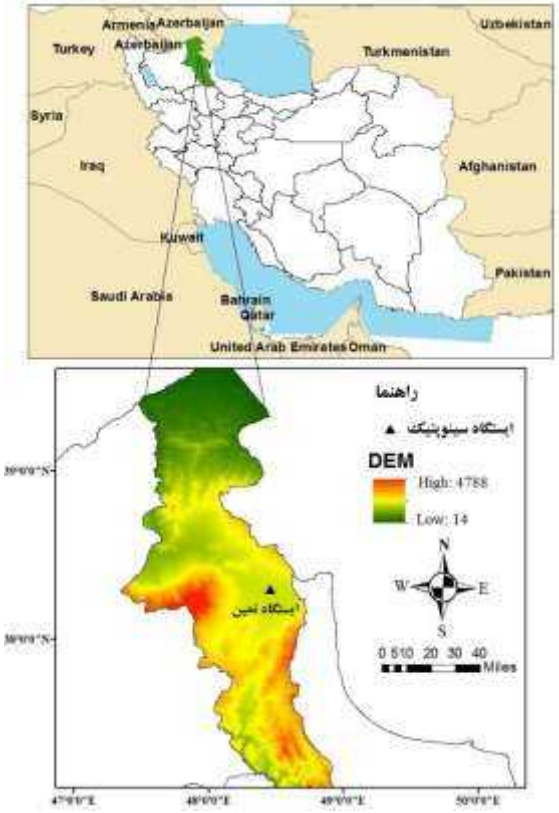
تخمین دقیق بارش ماهانه می‌تواند به عنوان ابزاری کاربردی در مدیریت بهینه منابع آب مورد استفاده قرار گیرد. همچنین برآورد میزان بارندگی نقش کلیدی در مطالعات کیفی آب و مدیریت مسائل محیط زیست ایفا می‌کند که از جمله می‌توان به کاهش آلودگی‌ها، کنترل کیفیت بدنه‌های آبی، حفاظت از آبزیان و حیات وحش اشاره کرد (Lou et al., 2016). امروزه روش‌های یادگیری ماشین به‌طور گسترده‌ای در پیش‌بینی متغیرهای هیدرولوژیکی و از جمله بارش ماهانه به‌کار گرفته می‌شود. معروفی و همکاران (۱۳۹۶) بارش ماهانه در پهنه جنوب شرق کشور، واقع در استان سیستان و بلوچستان را با استفاده از روش‌های سری زمانی ساریما و مدل ANN پیش‌بینی کردند. آن‌ها از مقادیر بارش ماهانه طی دوره آماری ۱۳۸۸-۱۳۵۱ برای ایستگاه‌های منتخب منطقه استفاده کردند. مقایسه نتایج مدل‌ها حاکی از برتری مدل ANN نسبت به سری زمانی ساریما برای گستره مطالعاتی بود. وکیلی (۱۳۹۶) به منظور تخمین داده‌های بارش ماهانه ایستگاه ارومیه از

روش‌های آماری کلاسیک و مدل درختی M5 با استفاده از نرم افزار Weka استفاده کرد. از بین روش‌های کلاسیک، روش تخمین‌گر منفرد، به‌عنوان بهترین روش با بیشترین ضریب همبستگی و کمترین خطا انتخاب شد. علاوه بر آن، مدل درختی M5 در برآورد داده‌ها با (MAE=7.29، RMSE=9.94 وr=0.91) بهترین عملکرد را به دنبال داشت. فرجی و همکاران (۱۴۰۴) به بررسی داده‌های بارش تجمعی ۲۴ ساعته در ایران و پیش‌بینی میزان بارش در دوره‌های زمانی مختلف با استفاده از شبکه‌های عصبی چندلایه (MLP) و درخت تصمیم (DT) پرداختند. در پژوهش آن‌ها، مدل MLP با حداقل-سازی پارامتر MSE به میزان ۰/۰۴ کارایی چشمگیری از خود نشان داد. همچنین بر اساس تحلیل‌های درخت تصمیم، استان‌های ایران بر اساس ویژگی‌های بارش به هفت خوشه تقسیم‌بندی شدند. Lou et al. (2016) و Sofian et al. (2018) برای پیش‌بینی بارش ماهانه از مدل‌های پس انتشار (BP)، تابع پایه شعاعی (RBF) استفاده کردند. در تحقیقات مذکور به‌طور مشابه، مدل RBF عملکرد بهتری را به همراه داشت. Liu and Shi (2019) از مدل برنامه‌ریزی ژنتیک (GP) برای شبیه‌سازی بارش ماهانه در حوضه آبریزی واقع در کشور چین استفاده کردند و توانستند میزان بارش ماهانه تا سال ۲۰۵۰ را پیش‌بینی نمایند. Kumar et al. (2025) از الگوریتم‌های متنوع یادگیری ماشین شامل MLP، RF، XGBoost، CatBoost و LR برای تخمین بارش‌های روزانه و هفتگی استفاده کردند. نتایج حاکی از عملکرد قابل قبول همه مدل‌ها بود و در این میان، مدل XGBoost نتایج نسبتاً بهتری به همراه داشت. با توجه به عملکرد قابل تحسین مدل‌های داده-مبنا در شبیه‌سازی و تخمین میزان بارش، در پژوهش حاضر برای شبیه‌ساری بارش ماهانه ایستگاه سینوپتیک نمین واقع در استان اردبیل، از مدل‌های شبکه‌های عصبی (ANN) و سیستم استنتاجی فازی-عصبی تطبیقی (ANFIS) استفاده شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

ایستگاه سینوپتیک نمین در طول جغرافیایی $48^{o}29'28"$ و عرض جغرافیایی $38^{o}25'13"$ در سال ۱۳۸۶ در استان اردبیل تأسیس شده است. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همچنین خصوصیات آماری مقادیر متغیرهای بارش و دما در ایستگاه سینوپتیک نمین طی دوره آماری ۲۰۲۴-۲۰۰۸ در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

جدول ۱- خصوصیات آماری مقادیر ماهانه بارش و دما در ایستگاه سینوپتیک نمین طی دوره ۲۰۲۴-۲۰۰۸

متغیر	میانگین	بیشینه	کمینه	انحراف معیار	چولگی
بارش	۲۲/۴۸۳	۱۱۴/۹۳	۰	۱۹/۲۲۵	۱/۵۱
دما	۱۰/۵۷	۴۲/۶	۱۹/۲	۷/۰۴۱۲	-۰/۲۰۸

شبکه عصبی مصنوعی (ANN)

در پژوهش حاضر از شبکه پرسپترن چندلایه (MLP) که یکی از انواع رایج شبکه‌های عصبی است، استفاده شد. در مدل MLP، الگوریتم یادگیری و پردازش داده‌ها به سمت جلو از لایه ورودی به طرف لایه خروجی صورت می‌گیرد (فرجی و همکاران، ۱۴۰۴). متغیرهای مؤثر که در مدل‌سازی شبکه‌های عصبی نقش اساسی دارند شامل تعداد تکرار، نوع تابع

آموزش، تعداد لایه‌های شبکه و تعداد نرون‌های لایه میانی می‌باشد. به‌منظور به حداقل رساندن خطای مدل‌سازی پس از انجام تحلیل حساسیت، توابع و مقادیر بهینه در نظر گرفته‌شده برای مدل MLP در تحقیق حاضر به شرح جدول ۲ می‌باشد.

جدول ۲- مقادیر پارامترهای مورد استفاده در مدل شبکه عصبی مصنوعی

پارامتر	بهترین مقدار
نوع شبکه عصبی	Multi-Layer Perceptron
تعداد لایه پنهان	1
الگوریتم آموزش	Levenberg-Marquardt
تعداد نرون	5
تابع انتقالی برای لایه میانی	TANSIG
تابع انتقالی برای لایه خروجی	LOGSIG
تعداد تکرار	1000

سامانه استنتاجی فازی- عصبی تطبیقی (ANFIS)

مدل فازی-عصبی بر اساس قوانین فازی بنا نهاده شده و از ویژگی‌های الگوریتم آموزشی مدل شبکه‌های عصبی مصنوعی برای تطبیق و تعیین پارامترهای مبتنی بر قوانین استفاده می‌کند. یک مدل ANFIS شامل شبکه‌ای شش لایه و متشکل از گره‌ها و کمان‌های اتصال دهنده گره‌ها می‌باشد. (Kisi et al., 2015). لایه اول، شامل متغیرهای ورودی می‌باشد. در لایه دوم بر اساس تابع عضویت انتخاب شده، برای هر یک از ورودی‌ها، درجه عضویت (μ) در نظر گرفته می‌شود (فازی سازی). در لایه سوم، مطابق با قوانین منطق فازی سوگنو، سیگنال‌های ورودی در هم ضرب شده و خروجی آن که بیانگر قوه اشتعال هر قانون فازی می‌باشد، به لایه بعد فرستاده می‌شود. در لایه چهارم، پس از دریافت هر یک از قوانین لایه سوم، مقادیر نرمال شده قوانین محاسبه می‌شود (نرمال‌سازی). در لایه پنجم، میزان مشارکت (وزن) i امین قانون فازی، با حاصل‌ضرب قوه اشتعال نرمال شده (خروجی لایه چهارم) و تابع برآیند محاسبه می‌شود (غیرفازی سازی). در لایه ششم، با جمع مقادیر غیرفازی، خروجی مدل ANFIS تولید می‌شود. لازم به ذکر است که در پژوهش حاضر از تابع عضویت Guassian نوع ۲ برای آموزش شبکه استفاده شد.

داده‌های مورد استفاده و تعریف الگوها

داده‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر شامل مقادیر ماهانه بارش و دما (بیشینه، کمینه و میانگین)، طی دوره زمانی ۲۰۲۴-۲۰۰۸ بود. تعداد داده‌ها در مقیاس ماهانه برابر ۲۰۵ بود که ۷۰٪ آن برای مرحله آموزش و ۳۰٪ برای مرحله صحت‌سنجی (تست) مورد استفاده قرار گرفت. به‌منظور اولویت‌بندی پارامترهای تأثیرگذار بر میزان بارش ماه فعلی (R_t) و تعریف الگوها، از آزمون همبستگی در محیط SPSS استفاده شد. بر اساس نتایج آزمون همبستگی، بارش ماه قبل (R_{t-1}) بیشترین همبستگی را با بارش ماه فعلی (R_t) داشت، بنابراین به عنوان تنها متغیر ورودی در اولین الگو به‌کار گرفته شد.

متغیرهای دمای میانگین (T_{ave}) و دمای کمینه (T_{min}) نیز در الگوهای بعدی به‌کار گرفته شدند. شایان ذکر است که طبق نتایج آزمون همبستگی متغیر دمای بیشینه بر میزان بارش ماه فعلی (R_t) داری تأثیر معنی‌دار نبود، بنابراین در تعریف الگوها مورد استفاده قرار نگرفت. در جدول ۳، الگوهای مورد استفاده در پژوهش حاضر برای شبیه-سازی بارش ماهانه ایستگاه مورد مطالعه، ارائه شده است.

جدول ۳- الگوهای تعریف شده در پژوهش حاضر برای شبیه‌سازی بارش ماهانه ایستگاه سینوپتیک نمین

متغیرهای ورودی			خروجی
R_{t-1}			R_t
R_{t-1}	T_{ave}		R_t
R_{t-1}	T_{ave}	T_{min}	R_t

معیارهای ارزیابی مدل

در تحقیق حاضر، به‌منظور ارزیابی عملکرد مدل‌ها از شاخص آماری ضریب تعیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و شاخص کارایی نش-ساتکلیف (NSE) مطابق با روابط ۱ تا ۳ استفاده شد.

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^{N}(R_O-\bar{R}_O)(R_M-\bar{R}_M)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{N}(R_O-\bar{R}_O)^2 \sum_{i=1}^{N}(R_M-\bar{R}_M)^2}} \right) \quad (۱)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(R_O - R_M)^2} \quad (۲)$$

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^{N}(R_O-R_M)^2}{\sum_{i=1}^{N}(R_O-\bar{R}_O)^2}\right], -\infty \le NSE \le 1 \quad (۳)$$

در روابط فوق، N تعداد داده‌ها، R_O مقدار بارش اندازه‌گیری شده و R_M مقدار بارش شبیه‌سازی شده توسط مدل در گام زمانی i ام می‌باشد. همچنین $\bar{R}_O$ متوسط مقدار بارش اندازه‌گیری شده می‌باشد.

نتایج و بحث

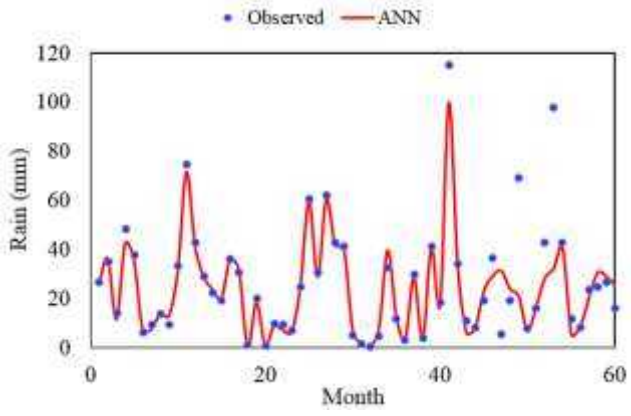
در جدول ۴ عملکرد مدل‌های ANN و ANFIS به‌ازای الگوهای ورودی تعریف شده، مطابق با جدول ۳ در قالب شاخص‌های آماری خطا برای ایستگاه سینوپتیک نمین در دوره تست (صحت‌سنجی) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، عملکرد هر دو مدل به‌ازای الگوی شماره ۱ ضعیف بوده و این موضوع حاکی از آن است که برآورد بارش ماهانه برای ایستگاه مورد مطالعه، صرفاً با استفاده از مقادیر بارش ماه قبل از دقت پایینی برخوردار می‌باشد. از سوی دیگر با اضافه شدن متغیر دما (دمای میانگین و کمینه) به الگوهای ورودی، دقت مدل‌ها بهبود یافته است. ملاحظه می‌گردد که بهترین عملکرد مدل‌های ANN و ANFIS به‌ازای الگوی شماره ۳ (شامل همه متغیرها) می‌باشد. مقادیر R^2، NSE و RMSE برای مدل ANFIS به‌ازای بهترین الگو در مرحله صحت‌سنجی به‌ترتیب برابر ۰/۸۱۰، ۰/۸۰۳ و ۱۰/۲۰۱ میلی‌متر به‌دست آمد.

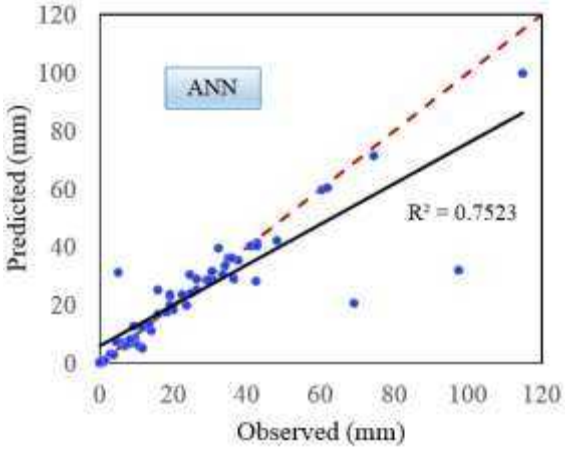
هم‌چنین طبق نتایج، مقادیر مذکور برای مدل ANN به‌ترتیب برابر ۰/۷۵۲، ۰/۷۴۰ و ۱۱/۷۰۷ میلی‌متر به‌دست آمد. با مقایسه نتایج می‌توان دریافت که مدل ANFIS در شبیه‌سازی بارش ماهانه عملکرد نسبتاً بهتری را داشته است. در شکل ۲ نمودارهای پراکندگی حول خط یک‌به‌یک و سری زمانی حاصل از مدل‌های ANN و ANFIS به‌ازای بهترین الگو (الگوی شماره ۳) برای ایستگاه نمین در دوره تست (صحت‌سنجی) نمایش داده شده است. با توجه به شکل مذکور، هرد مدل از لحاظ پراکندگی نقاط حول نیمساز ۴۵ درجه، انطباق مقادیر مشاهداتی و مدل و همچنین تخمین مقادیر پیک، عملکرد قابل قبولی را ارائه داده‌اند. با این حال، مدل ANFIS برتری جزئی نسبت به مدل ANN از خود نشان داده است.

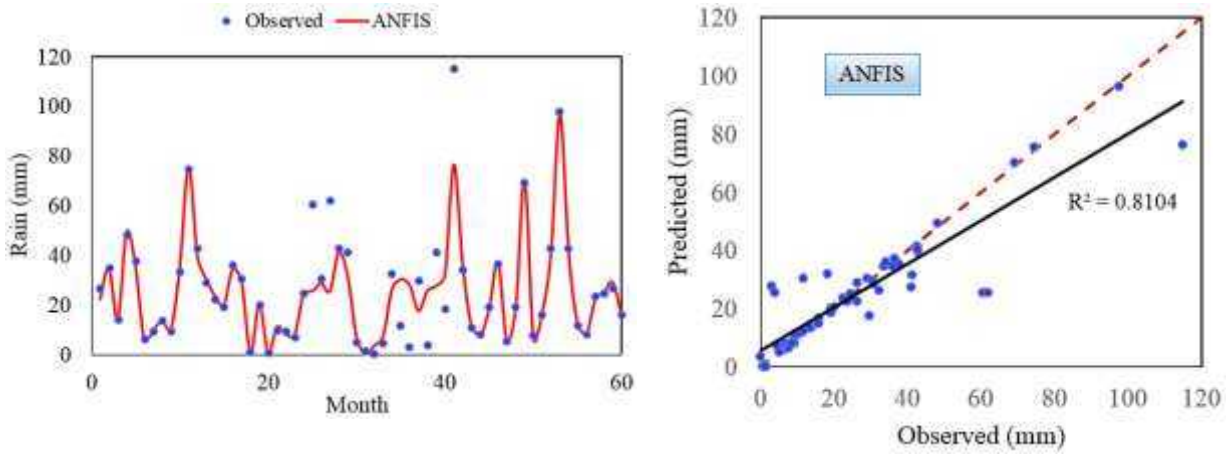
با وجود کارایی قابل قبول مدل‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر، برای بهبود نتایج پیشنهاد می‌شود از تبدیل موجک برای پیش‌پردازش (تجزیه) داده‌ها استفاده شود. ضمناً تأثیر سایر پارامترهای اقلیمی شامل رطوبت نسبی و سرعت باد نیز بر روی آموزش بهتر شبکه بررسی شود.

جدول ۴- نتایج مدل‌های هوشمند مورد استفاده در پژوهش حاضر برای شبیه‌سازی بارش ماهانه ایستگاه نمین به‌ازای الگوهای مختلف

	مدل ANN			مدل ANFIS		
شماره الگو	R^2	RMSE	NSE	R^2	RMSE	NSE
۱	۰/۳۵۱	۱۵/۶۱۸	۰/۳۴۴	۰/۴۰۹	۱۴/۹۰۴	۰/۳۹۸
۲	۰/۶۸۴	۱۳/۰۴۱	۰/۶۷۷	۰/۷۲۸	۱۲/۷۱۳	۰/۷۱۹
۳	۰/۷۵۲	۱۱/۷۰۷	۰/۷۴۰	۰/۸۱۰	۱۰/۲۰۱	۰/۸۰۳







شکل ۲- تغییرات سری زمانی و پراکندگی مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده بارش ماهانه توسط مدل‌های هوشمند به‌ازای دوره تست

فهرست منابع

۱- فرجی، م.، رضایی، م.، ساری صراف، ب.، و خورشیددوست، ع.م. (۱۴۰۴). داده‌کاوی داده‌های بارش تجمعی ۲۴ ساعته ایران با استفاده از یادگیری ماشین شبکه عصبی پرسپترون چندلایه و درخت تصمیم. مجله اکو هیدرولوژی، ۱۲(۲)، ۸۱۰-۷۹۹.

۲- معروفی، ص.، نوروز ولاشدی، ر.، و گلکار، ف. (۱۳۹۶). مدل‌سازی پیش‌یابی بارش ماهانه در حوضه آبریز بلوچستان جنوبی. فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، ۳۲(۱)، ۱۶۲-۱۴۹.

۳- وکیلی، ش. (۱۳۹۶). پیش‌بینی بارش ماهانه با مدل درختی M5 و مقایسه آن با روش‌های کلاسیک آماری (مطالعه موردی: ایستگاه سینوپتیک ارومیه). مجله تحقیقات منابع آب ایران، ۱۳(۴)، ۱۸۲-۱۷۹.

4- Kisi, O., Sanikhani, H., Kermani, Z., & Niazi, F. (2015). Long-term monthly evapotranspiration modeling by several data-driven methods without climatic data. Computer and Electronics in Agriculture, 115, 66-77.

5- Kumar, V., Kedam, N., Kisi, O. et al. (2025). A Comparative Study of Machine Learning Models for Daily and Weekly Rainfall Forecasting. Water Resources Management. 39, 271–290.

6- Liu, S. and H. Shi. 2019. A recursive approach to long-term prediction of monthly precipitation using genetic programming. Water Resources Management, 33(3): 1103-1121.

7- Lou, J., W. Lu, Y. Ji & D. Ye. (2016). A comparison of three prediction models for predicting monthly precipitation in Liaoyuan city, China. Water Science and Technology, 16(3), 845-854.

8- Sofian, I.M., A.K. Afandi, I. Iskandar & Y. Apriani. (2018). Monthly rainfall prediction based on artificial neural networks with backpropagation and radial basis function. International Journal of Advances in Intelligent Informatics, 4(2), 154-166.

سومین کنفرانس ملی آب و هواشناسی ایران (با محوریت تغییر اقلیم)
The 3rd National Conference on Climatology of Iran (Focusing on Climate Change)
ارومیه ۱۶ مهر ۱۴۰۴

Simulation of monthly rainfall of Namin synoptic station using intelligent models

Mohammad Reza Nikpour[1*]

[1*] **Associate Professor, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran**
E-mail: m_nikpour@uma.ac.ir

ABSTRACT

Monthly rainfall values are considered one of the main input data to hydrological systems, and its accurate prediction is important in runoff and groundwater studies. In recent years, intelligent models have been widely used in simulating hydrological phenomena. In the present study, artificial neural network (ANN) and adaptive neural fuzzy inference system (ANFIS) models were used to simulate monthly rainfall at Namin synoptic station. Based on the available data, monthly rainfall values were used for the statistical period of 2008-2024. For short-term simulation of monthly rainfall (one month later), three different models were defined based on the rainfall delay and average and minimum temperature parameters. To evaluate the model results, the statistical indices were used including, the coefficient of determination (R^2), root mean square error (RMSE), and Nash-Sutcliffe efficiency index (NSE). The results of the study indicated a better performance of the ANFIS model compared to the ANN model. So that the R^2, NSE and RMSE values for the ANFIS model for the best model in the validation stage were 0.810, 0.803 and 10.201mm, respectively.

Keywords: ANN, ANFIS, Monthly rainfall, Namin synoptic station.

سومین کنفرانس ملی آب و هواشناسی ایران (با محوریت تغییر اقلیم)
The 3rd National Conference on Climatology of Iran (Focusing on Climate Change)
ارومیه ۱۶ مهر ۱۴۰۴

تحلیل روند تغییرات بارش با رویکرد تغییر اقلیم
مطالعه مورد: مناطق شهری بلوچستان

چکاوک خواجه امیری خالدی[۱]، محمدرضا سالاری فنودی[۲]
۱- استادیار گروه اقیانوس شناسی،دانشکده علوم دریایی،دانشگاه دریانوردی و علوم دریایی چابهار
۲- رییس اداره هواشناسی سینوپتیک دریایی چابهار
*نویسنده مسئول: c.khajehamiri@cmu.ac.ir

چکیده

هدف از این تحقیق بررسی روند تغییرات بارش چهار دهه گذشته بلوچستان با استفاده از روش‌های ناپارامتریک من کندال و شیب سن می باشد. بدین منظور داده های بارش ماهیانه، فصلی و سالانه ۱۰ شهر منطقه بلوچستان طی بازه زمانی ۲۰۲۳-۱۹۸۴ از پایگاه داده های سنجش از دوری PERSIANN استخراج شد. پس از تشکیل بانک داده ها، محاسبات آماری و شاخص های من کندال و شیب سنس تهیه شد. نتایج این مطالعه نشان داد که در بازه زمانی سالانه برای شهرهای چابهار، کنارک، زرآباد، نگور، سراوان، قصرقند روند مثبت و افزایشی بوده است. در مقابل برای ایرانشهر، نیکشهر، فنوج و سرباز روند کاهشی و منفی بوده و با چالش های کم آبی نیز روبرو کرده است.برای تمامی منطق نیزشاهد جهش های معنی داری در روند بارش های سالانه بوده ایم. این یافته‌ها بر ضرورت پایش مستمر اقلیم و برنامه‌ریزی برای مدیریت منابع آبی تأکید دارند. با توجه به روند کاهشی بارش در برخی شهرها، اجرای طرح‌های مدیریت آب مانند ذخیره‌سازی آب باران، بهینه‌سازی مصرف آب و احیای منابع زیرزمینی ضروری است.

واژه گان کلیدی: بلوچستان، ایران, سیل، بارش

مقدمه

اقلیم در گذر زمان همواره دستخوش تغییراتی بوده و عوامل متعددی سبب بروز دوره های گرم و عصرهای یخبندان شده اند. در واقع دوره های گرم همراه با کاهش بارش های جامد، کاهش مجموع بارش (در نتیجه افزایش گنجایش رطوبتی جو) و کاهش پوشش گیاهی و دوره های سرد (یخبندان) همراه با افزایش بارش جامد (افزایش عمومی بارش در نتیجه کاهش گنجایش رطوبتی جو) و افزایش مساحت پوشش های سبز بوده اند (آسیایی و همکاران، ۱۳۹۱). این تغییرات در ارتباط مستقیم با تغییرات گازهای گلخانه ای جو بویژه دی اکسید کربن بوده است. تغییرات گازهای گلخانه ای جو (افزایش یا کاهش) می تواند منشاء طبیعی یا انسانی داشته باشد. اسوانت آرهینوس در سال ۱۸۹۶ پیش بینی کرد که احتراق سوخت‌های فسیلی بخصوص زغال سنگ باعث دو برابر شدن گاز CO_2 آتمسفر طی ۳۰۰۰ سال آینده خواهد شد، لذا این امر به افزایش میانگین درجه حرارت جهانی در حدود ۵ درجه سلسیوس منجر می شود (Arrhenius, 1896). در حقیقت، غلظت CO_2 جو طی ۱۰۰ سال ۳۰٪ افزایش یافته که حدود ۱۸ برابر سریع تر از پیش بینی آرهینوس است و قبل از پایان این قرن دو برابر خواهد شد. علاوه بر این، این افزایش قبلا از یک افزایش سریع بی سابقه تاریخی در میانگین درجه حرارت جهانی نتیجه شده است (آسیایی و همکاران، ۱۳۹۱). برهم کنش‌های متعدد سامانه اقلیم با آب و یخ موجب پسخورهای مهمی می شود. نخست اینکه بخار آب یک گاز گلخانه‌ای است. غلظت بخار آب در جو در ارتباط با گرمایش اقیانوس‌ها و افزایش تبخیر، افزایش می یابد. این فرایند یک حلقه پسخور مثبت کلاسیک است، یعنی گرمایش گازی را تولید می کند که حتی سبب گرمایش بیشتر می شود (Manabe and Wetherald 1967). امروزه، موضوع تغییرات آب‌وهوایی و اثرات احتمالی آن بر بخش‌های مختلف اقتصادی و محیطی به‌عنوان یکی از چالش‌های پیش روی بشر مطرح است (جفری و همکاران[166]، ۲۰۱۱).

موضوع مطالعه در دو سند ارائه‌شده، بررسی روند تغییرات بارش و اقلیم بارش در شهرهای منطقه بلوچستان ایران با استفاده از روش‌های آماری (مانند میانگین متحرک، آنومالی، من‌کندال و شیب سنس) و داده‌های سنجش از دور پایگاه PERSIANNاست. این مطالعه بر تحلیل دوره‌های خشکسالی و ترسالی، تغییرات اقلیمی و تأثیرات آن بر منابع آبی متمرکز است. در ادامه، پیشینه تحقیق مرتبط با این موضوع با استناد به منابع معتبر ارائه می‌شود. تحلیل روند تغییرات بارش و خشکسالی در ایران، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، موضوع تحقیقات متعددی بوده است. برخی از مطالعات کلیدی داخلی عبارتند از:

احمدی(۱۳۸۸) در مطالعه‌ای با عنوان "تحلیل خشکسالی در شهر ایلام بر اساس شاخص توزیع استاندارد و درصد نرمال"، به بررسی خشکسالی در یک منطقه خشک پرداخت. این مطالعه نشان داد که خشکسالی به‌عنوان یک پدیده اقلیمی مستمر، اثرات قابل توجهی بر منابع آبی دارد (احمدی، ۱۳۸۸). زابل عباسی و همکاران(۱۳۸۶) در پژوهش خود با عنوان "بررسی

166 -Jeffery et al

و مقایسه شاخص‌های خشکسالی در مشهد"، شاخص‌های مختلف خشکسالی را تحلیل کردند و به نقش بارش به‌عنوان متغیر کلیدی در شناسایی دوره‌های خشکسالی تأکید داشتند. زارع ابیانه و همکاران(۱۳۸۶) در مطالعه‌ای در منطقه همدان، روند خشکسالی را با استفاده از شاخص‌های آماری بررسی کردند و به اهمیت تحلیل‌های آماری در شناسایی روندهای اقلیمی اشاره داشتند. لشنی زند(۱۳۸۰) در پژوهش "پهنه‌بندی خشکسالی اقلیمی در استان لرستان"، از شاخص‌های آماری برای شناسایی دوره‌های خشکسالی استفاده کرد و بی‌ثباتی بارش در مناطق خشک و نیمه‌خشک را تأیید نمود. عساکره(۱۳۸۶) در مقاله "تغییرات زمانی-مکانی بارش ایران زمین طی دهه‌های اخیر"، تغییرات بارش در ایران را بررسی کرد و به تأثیر گرمایش جهانی بر الگوهای بارش اشاره داشت. کتیرایی و همکاران(۱۳۸۶) در مطالعه‌ای با عنوان "سهم تغییرات فراوانی و شدت بارش روزانه در روند بارش در ایران طی دوره ۲۰۰۱-۱۹۶۰"، از روش من‌کندال برای شناسایی نقاط جهش و روندهای بارش استفاده کردند. فرج‌زاده و فیضی(۱۳۹۱) در پژوهش "آشکارسازی تغییرات زمانی-مکانی عناصر دما و بارش در ایران"، به تحلیل تغییرات اقلیمی با تأکید بر مناطق خشک پرداختند و نقش گازهای گلخانه‌ای را بررسی کردند.

ناظری تهرودی و همکاران(۱۳۹۵) در مطالعه "تحلیل روند تغییرات ایستگاهی و منطقه‌ای بارش نیم قرن اخیر کشور ایران"، روندهای کاهشی و افزایشی بارش را در مناطق مختلف ایران بررسی کردند. این مطالعات نشان می‌دهند که ایران، به‌ویژه مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند بلوچستان، به دلیل موقعیت جغرافیایی و تغییرات اقلیمی، با چالش‌های جدی در زمینه بارش و خشکسالی مواجه است.

مطالعات جهانی نیز به بررسی تغییرات بارش و خشکسالی در مناطق خشک و نیمه‌خشک پرداخته‌اند که با موضوع مطالعه حاضر هم‌خوانی دارند. استاینر و همکاران(۲۰۰۳) در مطالعه‌ای به بررسی داده‌های بارش سنجش از دور پرداختند و به عدم قطعیت‌های موجود در تخمین بارش اشاره کردند که در استفاده از پایگاه PERSIANN نیز مورد توجه است. آقاکوچک و همکاران(۲۰۰۹) در مقاله ای به تحلیل عدم قطعیت‌های داده‌های ماهواره‌ای بارش پرداختند که برای پایگاه PERSIANN نیز قابل تعمیم است. چن و همکاران(۲۰۱۴) در مطالعه‌ای ، روندهای بارش و تأثیرات اقلیمی در یک منطقه پربارش را بررسی کردند که می‌تواند با مناطق خشک مانند بلوچستان مقایسه شود. للسات و همکاران(۲۰۲۱) در پژوهشی، به تغییرات بارش‌های همرفتی در یک منطقه مدیترانه‌ای پرداختند و به اهمیت تحلیل روندهای بارش برای مدیریت منابع آبی تأکید کردند یاکوب و تایفور(۲۰۲۰) در تحقیقی، روندهای بارش و خشکسالی در یک منطقه خشک آفریقایی را بررسی کردند که شباهت‌هایی با بلوچستان دارد.

استفاده از روش‌های ناپارامتریک مانند من‌کندال و شیب سنس در مطالعات داخلی و بین‌المللی برای شناسایی روندهای بارش و نقاط جهش اقلیمی رایج است. این روش‌ها به دلیل عدم نیاز به توزیع نرمال داده‌ها، برای تحلیل سری‌های زمانی بارش در مناطق خشک مانند بلوچستان بسیار مناسب هستند. پایگاه PERSIANN که در مطالعه حاضر استفاده شده، در تحقیقات بین‌المللی نیز مورد توجه بوده و به دلیل توان تفکیک بالا، ابزار معتبری برای تحلیل بارش است. مطالعات داخلی و بین‌المللی نشان می‌دهند که تغییرات اقلیمی ناشی از افزایش گازهای گلخانه‌ای، به‌ویژهCO_2 ، بر الگوهای بارش و تشدید

خشکسالی در مناطق خشک تأثیر قابل توجهی دارد. بلوچستان به دلیل موقعیت جغرافیایی در کمربند بیابانی و میانگین بارش پایین، با چالش‌های کم‌آبی و تغییرات اقلیمی مواجه است. این موضوع بر اهمیت مطالعه حاضر تأکید دارد.

بسیاری از مطالعات داخلی بر مناطق خاصی مانند حوضه خزر، همدان یا خوزستان متمرکز بوده‌اند و تحقیقات جامع در مورد بلوچستان کمتر انجام شده است. مطالعه حاضر با تمرکز بر ۱۰ شهر اصلی بلوچستان، اطلاعات ارزشمندی در مورد روندهای بارش و خشکسالی در این منطقه ارائه می‌دهد. استفاده از داده‌های PERSIANN با توان تفکیک بالا و روش‌های ناپارامتریک پیشرفته (مانند من‌کندال و شیب سنس) در این مطالعه، رویکردی نوین برای تحلیل اقلیم منطقه است.شناسایی نقاط جهش اقلیمی و روندهای افزایشی و کاهشی بارش در شهرهای مختلف بلوچستان، اطلاعات جدیدی برای مدیریت منابع آبی و برنامه‌ریزی منطقه‌ای فراهم می‌کند. این پیشینه تحقیق نشان‌دهنده اهمیت موضوع و پشتوانه علمی قوی برای مطالعه حاضر است و به تکمیل دانش موجود در زمینه تغییرات اقلیمی و بارش در مناطق خشک کمک می‌کند.

روش تحقیق

داده های بارش سالیانه از داده های سنجش از دور پایگاه پرشین در بازه زمانی ۲۰۲۲-۱۹۸۳ برای ۱۰ شهر منطقه بلوچستان تهیه شده است. ظهور تکنولوژی‌های ماهواره‌ای و افزایش توان محاسباتی رایانه‌ها (برای انجام محاسبات سنگین مدلسازی جو و اتصال آن به مدل‌های سطح زمین منجر به ارائه محصولات بارشی با توان تفکیک مکانی و زمانی بالا شده است. این محصولات عمدتاً به صورت شبکه‌بندی هستند و اگرچه بر خلاف ایستگاه‌های بارانسنجی زمینی، دارای مشکل عدم پیوستگی مکانی و زمانی نمی‌باشند ولی عدم قطعیت‌هایی در تخمین بارش دارند که از جمله نقاط ضعف این پایگاه های داده محسوب می شوند.(Steiner et al., 2003; Hong et al., 2006; AghaKouchak et al.2009) . در پایگاه بارشی ارزشمند PERSIANN، از الگوریتم شبکه عصبی مصنوعی و تصاویر بازتابش شده مادون قرمز توسط ماهواره‌های زمین مرجع برای تخمین میزان بارندگی استفاده، می‌شود. الگوریتم PERSIANN ابتدا براساس تصاویر مادون قرمز از ماهواره‌های زمین مرجع بود، سپس به نسخه جدید آن که در حال حاضر استفاده می‌شود، داده‌های مایکروویو نیز اضافه شد که این داده‌های جدید برای کالیبراسیون و تنظیم پارامترهای الگوریتم بکار می‌روند. مطالعات اعتبارسنجی نشان می‌دهند که تخمین های بارش بطور قابل توجهی توسط تنظیم داده‌های بدست آمده از مادون قرمز با اطلاعات مایکروویو، بهبود یافته‌اند. الگوریتم برآورد بارش PERSIANN بطور کاربردی از سال ۱۹۸۳ با پوشش سراسری از ۶۰ درجه شمالی تا ۶۰ درجه جنوبی، در دسترس می‌باشد.

این پایگاه بارشی شامل سه محصول مختلف با جزئیات زیر می باشد:

PERSIAN-CCS: توان تفکیک مکانی ۰/۰۴؛

PERSIAN-CDR: توان تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه و مقیاس زمانی ۱، ۳ و ۶ ساعته، روزانه و ماهانه برای بازه زمانی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۸۲۵درجه و مقیاس زمانی روزانه و ماهانه برای بازه زمانی ۱۹۸۳ تا ۲۰۱۸؛

PERSIAN: توان تفکیک مکانی ۰/۲۵درجه و مقیاس زمانی روزانه و ماهانه برای بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸.

دو آزمون من کندال و شیب سنس (Sen's Estimator) جزو متداول‌ترین‌های ناپارامتری تحلیل روند سری‌های زمانی هیدرومتئولوژیکی به شمار می‌روند. مطالعات مختلف انجام شده با استفاده از این دو روش حاکی از اهمیت و کاربرد فراوان آن‌ها در تحلیل روند سری‌های زمانی می‌باشد. روش من-کندال ابتدا توسط مَن (۱۹۴۵) ارائه و سپس توسط کِندال (۱۹۷۰) بسط و توسعه یافت. فرض صفر آزمون من-کندال بر تصادفی بودن و عدم وجود روند در سری داده‌ها دلالت دارد و پذیرش فرض یک (رد فرض صفر) دال بر وجود روند در سری داده ها می‌باشد. در این روش ابتدا اختلاف بین هر یک از مشاهدات با تمام مشاهدات پس از آن محاسبه شده و پارامتر S مطابق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$S=\sum_{k=1}^{n-1}\sum_{j=k+1}^{n}\mathrm{sgn}\left(x_j-x_k\right) \quad (۱)$$

که n تعداد مشاهدات سری، و Xj و Xk به ترتیب داده‌های j ام و k ام سری می‌باشند. تابع علامت sgn نیز به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\mathrm{sgn}\left(x_j-x_k\right)=+1 \quad \text{for } (xj-xk)>0 \quad (۲)$$

$$\mathrm{sgn}\left(x_j-x_k\right)=0 \quad \text{for } (xj-xk)=0$$

$$\mathrm{sgn}\left(x_j-x_k\right)=-1 \quad \text{for } (xj-xk)<0$$

در مرحله بعد محاسبه واریانس S توسط یکی از روابط زیر محاسبه شد:

$$Var(S)=\frac{n(n-1)(2n+5)-\sum_{i=1}^{m}t(t-1)(2t+5)}{18} \quad \text{for } n>10 \quad (۳)$$

$$Var(S)=\frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad \text{for } n<10 \quad (۴)$$

که n و m معرف تعداد دنباله‌هایی است که در آن‌ها حداقل یک داده تکراری وجود دارد. t نیز بیانگر فراوانی داده‌های با ارزش یکسان در یک دنباله (تعداد گره‌ها) می‌باشد. در نهایت نیز آماره Z به کمک یکی از روابط زیر استخراج می‌شود:

$$z=\frac{S-1}{\sqrt{Var(S)}} \quad \text{for } S>0 \quad (۵)$$

$$z=0 \quad \text{for } S=0$$

$$z=\frac{S+1}{\sqrt{Var(S)}} \quad \text{for } S<0$$

با فرض دو دامنه آزمون روند، فرضیه صفر در صورتی پذیرفته می‌شود که شرط زیر برقرار باشد:

$$|Z|<Z_{\alpha/2} \quad (۶)$$

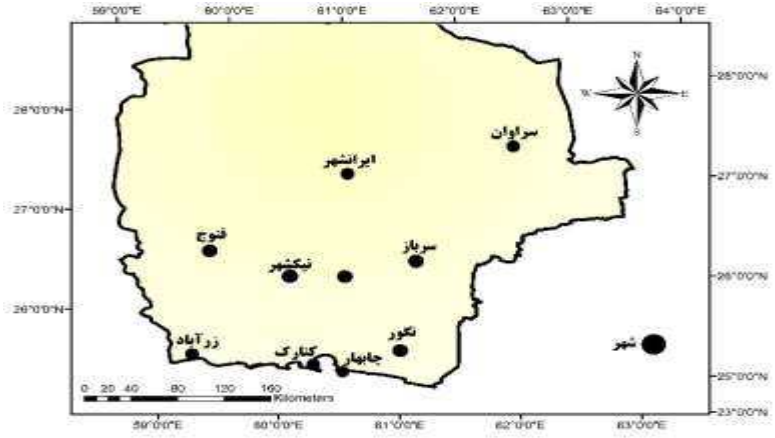
که α سطح معنی‌داری است که برای آزمون در نظر گرفته می‌شود و Zα آماره توزیع نرمال استاندارد در سطح معنی داری α می‌باشد که با توجه به دو دامنه بودن آزمون، $\alpha/2$ استفاده شده است. در بررسی حاضر این آزمون برای سطوح اعتماد ۹۵ ٪ و ۹۹ ٪ به کار گرفته شده است. در صورتی که آماره Z مثبت باشد روند سری داده‌ها صعودی و در صورت منفی بودن آن روند نزولی در نظر گرفته می‌شود (من، ۱۹۴۵؛ کندال، ۱۹۷۰).

میانگین متحرک

یکی دیگر از روشهای بررسی دوره های ترسالی و خشکسالی استفاده از میانگین متحرک یا لغزان می باشد. چنانچه تغییرات بارش سالانه در طی یک دوره مشترک آماری در نظر گرفته شود؛ به دلیل تغییرات سالانه مقادیر بارش، بررسی روند تغییرات به راحتی انجام پذیر نمی باشد. روش میانگین متحرک با به کارگیری متوسط داده ها در یک دوره معین و تشکیل سری زمانی جدید، این نوسانات را کاهش و یا به عبارتی دیگر، این نوسانات را هموار می کند. بنابراین با حذف و یا کاهش نوسانات سالانه، روند تغییرات دراز مدت بارز میگردد. میانگین متحرک می تواند در پایه های زمانی مختلف محاسبه شود؛ که بستگی به طول آمار مورد بررسی و تغییرپذیری سری داده ها دارد. سازمان هواشناسی جهانی، میانگین متحرک ۵ ساله و ۷ ساله بارش را برای بررسی های مربوط به خشکسالی و ترسالی توصیه می کند. از این رو می توان با ترسیم منحنی میانگین متحرک بارش سالانه، روندهای ترسالی و خشکسالی را بررسی نمود. به طوری که بخش هایی از منحنی که بالاتر از مقدار عددی میانگین بارش سالانه، دوره ترسالی و بخش دیگری که پایین تر از آن باشد، بیانگر دوره خشکسالی است. در این پژوهش، نمودارهای میانگین های متحرک ۳ ، ۵ و ۷ ساله برای منطقه بلوچستان ترسیم گردید. در این روش ابتدا میانگین بارندگی برای دوره های ۳ ، ۵ و ۷ ساله تعیین شده، سپس نمودار میانگین متحرک این دوره ها همراه با خط مربوط به متوسط میزان بارندگی ترسیم گردید تا دوره های خشک و مرطوب از یکدیگر تفکیک شوند.

محدوده مورد مطالعه

بلوچستان ایران منطقه‌ای است در جنوب شرقی فلات ایران که از کنار کویر کرمان تا مرزهای شرقی کشور سند گسترده شده است. در تحقیق حاضر بارش ده شهر اصلی منطقه بلوچستان مورد مطالعه قرار گرفته است(شکل ۱- جدول۱)



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه

جدول۱- مشخصات شهرهای مورد مطالعه

ردیف	شهر	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا
۱	چابهار	۲۵/۲۸	۶۰/۶۲	۸
۲	کنارک	۲۵/۲۰	۶۰/۲۶	۱۰
۳	نگور	۲۵/۳۹	۶۱/۱۴	۲۰
۴	زرآباد	۲۵/۳۴	۵۹/۲۳	۳۰
۵	نیکشهر	۲۶/۱۴	۶۰/۱۳	۵۱۰
۶	قصرقند	۲۶/۰۸	۶۰/۵۱	۷۸۰
۷	سرباز	۲۶/۱۳	۶۱/۲۴	۵۰۰
۸	فنوج	۲۶/۶	۵۹/۶۵	۱۸۵
۹	ایرانشهر	۲۷/۲۰	۶۰/۷۰	۵۹۹/۱
۱۰	سراوان	۲۷/۳۳	۶۲/۳۳	۱۱۸۲

یافته‌های تحقیق

باتوجه به اینکه اغلب داده های بارش توزیع نرمال نداشته و چولگی و کشیدگی نامتقارن دارند. لذا از روش های ناپارمتریک بهره برد. برای کلیه سری های زمانی مورد مطالعه در ابتدا آماره های دو آزمون من- کندال و شیب سن محاسبه گردیدند سپس معنی داری این آماره ها در سطوح اطمینان ۹۵ ٪ و ۹۹ ٪ مورد آزمون قرار گرفت که نتایج حاصله در جدول (۳) مشاهده می شود. نتایج آماره من کندال و شیب سن برای مناطق مورد مطالعه نشان می دهد که:

چابهار: در بررسی آمار سالیانه روند مثبت محاسبه گردید. بارش سالانه طی سال های گذشته به مقدار حدودی ۰/۶۲۱ میلیمتر و طی چهار دهه گذشته ۲۴ میلیمتر افزایش داشته است.

کنارک: مانند چابهار روند مثبت نشان می دهد. بارش سالانه طی سال های گذشته به مقدار حدودی ۱/۱۸۰میلیمتر و طی چهار دهه گذشته ۴۷ میلیمتر افزایش داشته است. این تغییرات معنی دار بوده است.

نگور: در بررسی آمار سالیانه روند مثبت محاسبه گردید. طی سال های گذشته بارش سالانه به میزان ۱/۱۴۷ میلیمتر و طی چهار دهه گذشته ۴۵ میلیمتر افزایش داشته است. این تغییرات معنی دار بوده است.

زرآباد: همانند دیگر نقاط ساحلی روند مثبت سالانه را نشان می‌دهد. طی چهاردهه گذشته ۱۵ و به میزان ۰/۳۸۳ میلیمتر برای هر سال افزایش ثبت کرده است.

نیکشهر: با دور شدن از سواحل شاهد روند منفی و کاهشی در میزان بارش را نشان داد. برای هر سال ۰/۴۸۴ و طی چهاردهه گذشته ۱۹ میلیمتر کاهش ثبت شده است.

جدول۲- نتایج آماره من کندال و شیب سن

شاخص	چابهار	کنارک	نگور	زرآباد	نیکشهر
Test Z	1.29	1.60	1.71	0.45	0.38
Signific.		+	+		
Q	0.621	1.180	1.147	0.383	-0.484
Qmin99	-1.438	-0.730	-0.899	-2.020	-2.473
Qmax99	3.727	3.650	3.933	2.498	3.276
Qmin95	-0.691	-0.254	-0.166	-1.494	-1.761
Qmax95	3.198	3.117	3.200	2.108	2.483
B	109.4058	94.46093	96.22295	119.13	148.4257
Bmin99	162.7284	145.8459	141.6992	175.3449	213.108
Bmax99	52.78508	60.71408	50.41332	75.36324	87.08376
Bmin95	144.5183	137.0545	127.7194	161.4196	191.0361
Bmax95	66.09492	68.10042	62.79377	83.90647	109.6388

قصرقند: بررسی نشان از روند مثبت و افزایشی سالانه بارش و معنی دار می دهد. این روند برای هر سال ۱/۱۷۲ و برای دوره تحقیق چهل ساله، ۴۶ میلیمتر افزایش داشته است.

سرباز: برخلاف قصرقند و مشابه نیکشهر، روند کاهشی و نزولی و معنی‌دار بارش سالانه را ثبت نموده است. ۲۲ میلیمتر طی چهار دهه و ۰/۵۵ میلیمتر برای هر سال کاهش مشخص شد.

فنوج: همانند سرباز، روند کاهشی و نزولی و معنی‌دار بارش سالانه را نشان می دهد. ۲۶ میلیمتر طی چهار دهه و ۰/۶۶ میلیمتر برای هر سال کاهش را ثبت نموده است.

ایرانشهر: طی چهاردهه دوره تحقیق به میزان ۱۵ و برای هرسال ۰/۳۹ میلیمتر کاهش را نشان داد. روند کاهشی و بدون معنی بوده است.

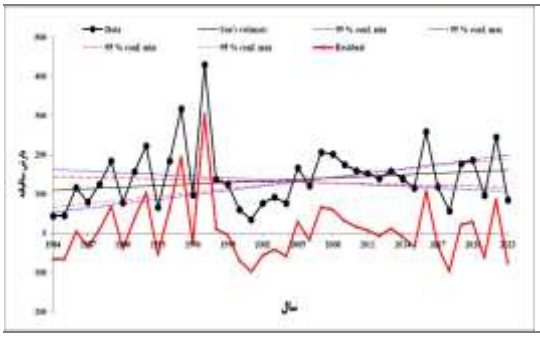
سراوان: برخلاف ایرانشهر، روند افزایشی و معنی‌دار بارش سالانه را ثبت نموده است. ۳۶ میلیمتر طی چهار دهه و ۰/۹۲ میلیمتر برای هر سال کاهش مشخص شد.

جدول۳- نتایج آماره من کندال و شیب سن

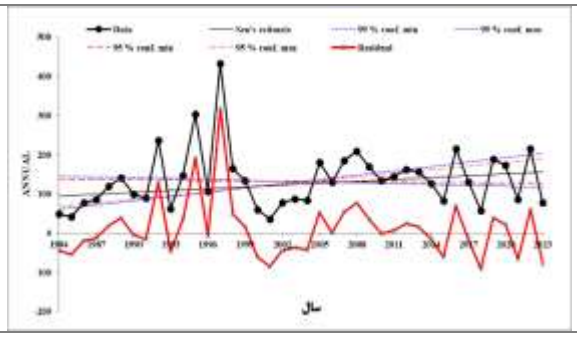
شاخص	قصرقند	سرباز	فنوج	ایرانشهر	سراوان
Test Z	1.11	1.36	0.57	0.87	1.99
Signific.	*	*			*
Q	1.172	-0552	-0.661	-0.390	0.92
Qmin99	-1.347	-0.996	-2.242	-1.621	-0.412
Qmax99	4.067	4.269	3.554	3.464	3.615
Qmin95	-0.827	-0.373	-1.506	-1.130	0.025
Qmax95	3.433	3.649	2.992	2.790	3.032
B	140.9817	137.435	138.7842	108.6471	90.51612
Bmin99	175.6466	174.2073	198.1526	167.9129	118.2045
Bmax99	82.58092	70.10328	77.40484	74.00421	57.96571
Bmin95	166.5744	156.6704	179.1302	158.9765	110.9814
Bmax95	96.8546	87.87408	92.33449	83.75327	65.53708

نمودارهای ۲ الی ۱۱، داده های بارندگی سالانه را در طول زمان (۱۹۸۴-۲۰۲۳) با تجزیه و تحلیل آماری، از جمله تخمین روند و فواصل اطمینان، نشان می دهد. در این نمودار یک خط روند ناپارامتریک که با استفاده از تخمین‌گر شیب سن محاسبه می‌شود (نسبت به نقاط پرت قوی است و معمولاً برای تشخیص روند در داده‌های محیطی استفاده می‌شود). باقیمانده ها تفاوت بین نقاط داده مشاهده شده و خط روند تخمینی را نشان می دهند. باقیمانده های مثبت مقادیر بالای خط روند را نشان می دهند، در حالی که باقیمانده های منفی زیر آن هستند.

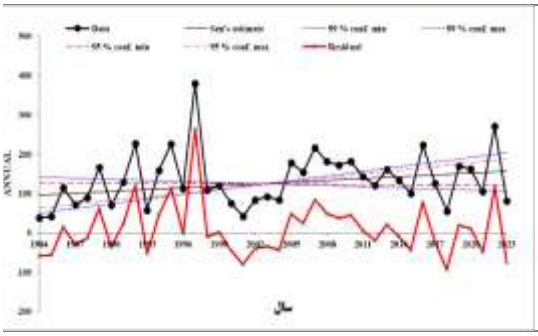
داده‌های بارش تغییرپذیری را در طول سال‌ها، با برخی قله‌های شدید، نشان می‌دهد. خط روند نشان دهنده روند صعودی یا نزولی بارندگی سالانه در طول زمان است. فواصل اطمینان نشان می دهد که این روند در هر دو سطح اطمینان ۹۵٪ و ۹۹٪ از نظر آماری معنی دار یا بی معنی است. باقیمانده ها انحراف از روند تخمینی را برجسته می کنند و دوره هایی با بارندگی بیشتر یا کمتر از حد انتظار را نشان می دهند. این نمودار نمای جامعی از روندهای بارش درازمدت و تنوع آنها ارائه می دهد که برای مطالعات آب و هوا و مدیریت منابع آب مفید است.



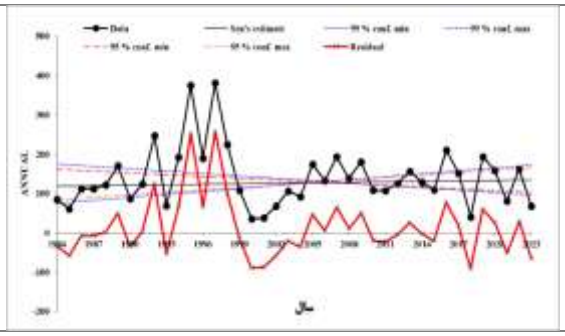
شکل ۲– نمودار تخمین روند و فواصل اطمینان بارش سالانه چابهار



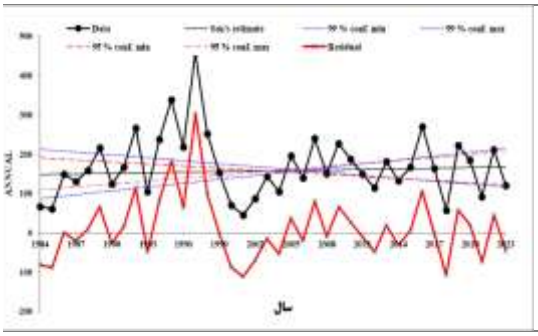
شکل ۳– نمودار تخمین روند و فواصل اطمینان بارش سالانه کنارک



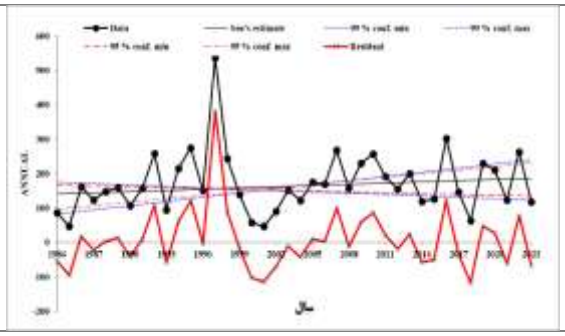
شکل ۴– نمودار تخمین روند و فواصل اطمینان بارش سالانه نگور



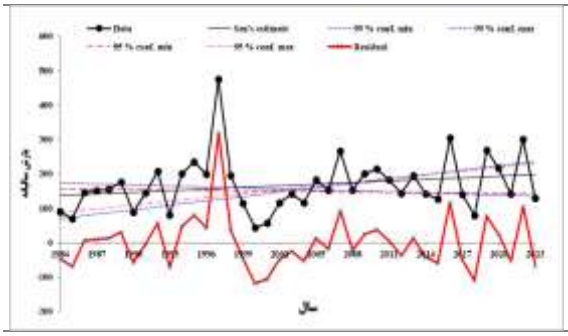
شکل ۵– نمودار تخمین روند و فواصل اطمینان بارش سالانه زرآباد



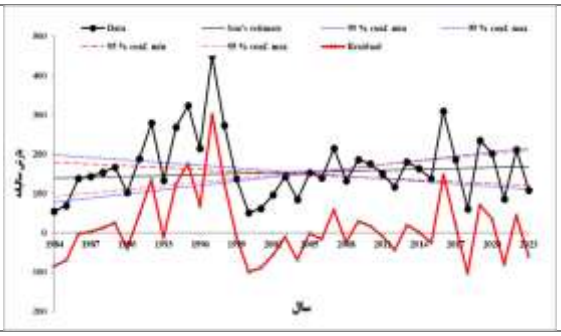
شکل ۶– نمودار تخمین روند و فواصل اطمینان بارش سالانه نیکشهر



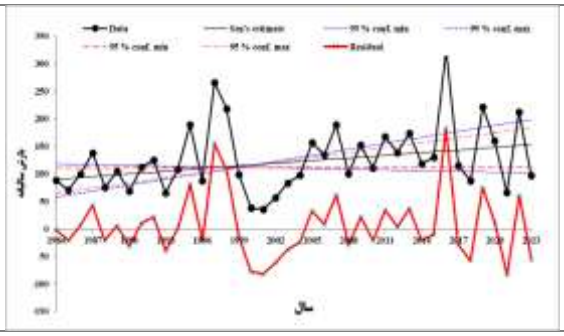
شکل ۷– نمودار تخمین روند و فواصل اطمینان بارش سالانه قصرقند



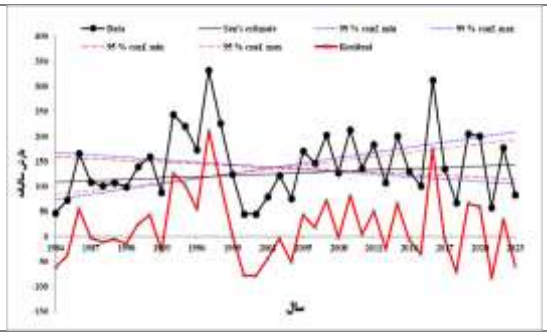
شکل ۸– نمودار تخمین روند و فواصل اطمینان بارش سالانه سرباز



شکل ۹– نمودار تخمین روند و فواصل اطمینان بارش سالانه فنوج



شکل ۱۱– نمودار تخمین روند و فواصل اطمینان بارش سالانه سراوان



شکل ۱۰– نمودار تخمین روند و فواصل اطمینان بارش سالانه ایرانشهر

به طور کلی برازش نمودار خط سن بر داده‌های میانگین بارش ایستگاهی شهرهای منطقه بلوچستان گویای کاهش یا افزایش بارش در طول دوره آماری مورد مطالعه است. به تفکیک برای هر شهر به شرح زیر ارائه می شود:



شکل ۱۳. نمودار بارش سالانه و روند آن در کنارک بر اساس روش شیب سن



شکل ۱۲. نمودار بارش سالانه و روند آن در چابهار بر اساس روش شیب سن



شکل ۱۵. نمودار بارش سالانه و روند آن در زرآباد بر اساس روش شیب سن



شکل ۱۴. نمودار بارش سالانه و روند آن در نگور بر اساس روش شیب سن



شکل ۱۷. نمودار بارش سالانه و روند آن در قصرقند بر اساس روش شیب سن



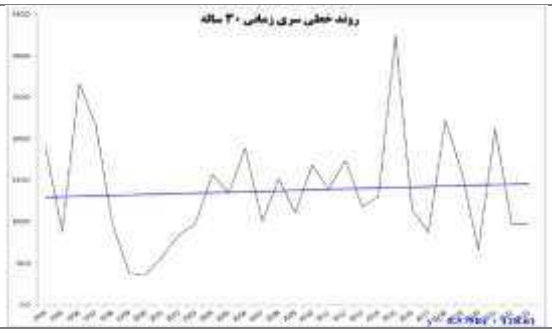
شکل ۱۶. نمودار بارش سالانه و روند آن در نیکشهر بر اساس روش شیب سن



شکل ۱۹. نمودار بارش سالانه و روند آن در فنوج بر اساس روش شیب سن



شکل ۱۸. نمودار بارش سالانه و روند آن در سرباز بر اساس روش شیب سن



شکل ۲۱. نمودار بارش سالانه و روند آن در سراوان بر اساس روش شیب سن



شکل ۲۰. نمودار بارش سالانه و روند آن در ایرانشهر بر اساس روش شیب سن

در ادامه آزمون گرافیکی من- کندال برای تعیین نقاط جهش و جزئیات روند بارش به کار گرفته شد. در روش مذکور، علاوه بر تعیین وجود روند، می‌توان زمان شروع آن را با استفاده از روش توالی مشخص کرد. در این روش دو سری مربوط به سنجه های تعریف شده محاسبه و در یک نمودار رسم می شوند منحنیهای U'-U همراه باند اطمینان ۹۵ ٪ نمایان است.

اگر منحنی مذکور در محدوده باند اطمینان قرارگرفته و چند بار با یکدیگر نقطه مشترک (برخورد) داشته باشد و یا تقاطعی نداشته باشند این امر نشان دهنده نبود روند است و تقاطع در این موقع، نشان از جهش اقلیمی عنصر بارش دارد اگر منحنی های U'-U بعد از تقاطع خارج از باند اطمینان ۹۵ ٪ قرار گیرند، روند شکل گرفته است. اگر روند معنی دار وجود داشته باشد، دو نمودار فقط یک نقطه برخورد دارند (کتیرایی و همکاران، ۱۳۸۶). در این نمودارها اگر آماره های U(t) و U′(t) بالاتر از ۱/۹۶- همدیگر را قطع کنند بیانگر روند کاهشی، اگر در بازه ۱/۹۶ همدیگر را قطع کنند بیانگر روند افزایشی، اگر در بازه ۱/۹۶- تا صفر همدیگر را قطع کنند بیانگر جهش کاهشی و اگر در بازه ۱/۹۶ تا صفر همدیگر را قطع کنند بیانگر جهش افزایشی می باشد. نتایج برای کشورهای خاورمیانه به صورت زیر تشریح می شود:



شکل ۱۷. نمودار گرافیگی من کندال جهت تعیین روند بارش سالانه کنارک



شکل ۱۸. نمودار گرافیگی من کندال جهت تعیین روند بارش سالانه چابهار



شکل ۱۹. نمودار گرافیگی من کندال جهت تعیین روند بارش سالانه زرآباد



شکل ۲۰. نمودار گرافیگی من کندال جهت تعیین روند بارش سالانه نگور



شکل ۲۱. نمودار گرافیگی من کندال جهت تعیین روند بارش سالانه قصرقند



شکل ۲۲. نمودار گرافیگی من کندال جهت تعیین روند بارش سالانه نیکشهر



شکل ۲۳. نمودار گرافیگی من کندال جهت تعیین روند بارش سالانه فنوج



شکل ۲۴. نمودار گرافیگی من کندال جهت تعیین روند بارش سالانه سرباز



شکل ۲۵. نمودار گرافیگی من کندال جهت تعیین روند بارش سالانه سراوان



شکل ۲۶. نمودار گرافیگی من کندال جهت تعیین روند بارش سالانه ایرانشهر

چابهار: چنانکه درشکل مشاهده می شود به استثنای وجود چند نقطه تغییر در سری های مذکور(سال های ۱۹۹۱، ۲۰۰۳، ۲۰۰۸) هیچگونه تغییر قابل ملاحظه ای دیده نمی شود و عمدتاً در داخل محدوده اطمینان می باشد.
کنارک: یک روند معنادار کاهشی از سال ۱۹۹۳و ۲۰۰۶ در کنارک مشاهده می شود.
نگور: درسال ۱۹۹۹ و۲۰۰۶ به ترتیب یک روند معنادار کاهشی و افزایشی مشاهده می شود.
زرآباد:. در زرآباد یک روند کاهش در سال ۱۹۹۷ و ۲۰۰۸ در محدوده سطح اطمینان ۹۵ درصد مشاهده می شود.
نیکشهر: مشابه زرآباد روند کاهشی در سالهای ۱۹۹۷ و ۲۰۰۸ثبت نموده است.
قصرقند: درسال ۱۹۹۹ و ۲۰۰۶ به ترتیب یک روند معنادار کاهشی و افزایشی مشاهده می شود.
سرباز: در نزدیکی قصرقند و تغییرات مشابه با ان را نشان می دهد.
فنوج: تغییرات بارز و مشخصی دیده نمی شود.
ایرانشهر: درسال ۱۹۹۹ و۲۰۰۶ به ترتیب یک روند معنادار کاهشی و افزایشی مشاهده می شود.
سراوان: درسال ۱۹۹۹ ۲۰۰۴ به ترتیب یک روند معنادار کاهشی و افزایشی ثبت شده است..

نتیجه‌گیری و پیشنهاد

مطالعه حاضر با هدف بررسی روند تغییرات بارش در شهرهای شهری منطقه بلوچستان ایران طی دوره ۴۰ ساله (۱۹۸۴-۲۰۲۳) با استفاده از روش‌های ناپارامتریک من‌کندال و شیب سنس انجام شده است. این پژوهش با بهره‌گیری از داده‌های بارش ماهانه، فصلی و سالانه استخراج‌شده از پایگاه داده PERSIANN و تحلیل‌های آماری، به بررسی روندهای بارش و تأثیرات اقلیمی آن پرداخته است. داده‌های بارش از پایگاه PERSIANN استخراج شده‌اند که با استفاده از فناوری سنجش از دور و الگوریتم‌های شبکه عصبی مصنوعی، تخمین‌های دقیقی از بارش ارائه می‌دهد. این پایگاه با وجود عدم قطعیت‌هایی در تخمین، به دلیل توان تفکیک مکانی و زمانی بالا، برای تحلیل‌های اقلیمی مناسب است.

روش‌های ناپارامتریک من‌کندال و شیب سنس برای شناسایی روندهای بارش و نقاط جهش اقلیمی استفاده شده‌اند. این روش‌ها به دلیل عدم نیاز به توزیع نرمال داده‌ها، برای تحلیل سری‌های زمانی هیدرومتریولوژیکی مناسب هستند. آزمون من‌کندال برای بررسی وجود روند و معناداری آن در سطوح اطمینان ۹۵٪ و ۹۹٪ و تخمین‌گر شیب سنس برای تعیین میزان و جهت تغییرات بارش به کار گرفته شده است.

شهرهای چابهار، کنارک، زرآباد، نگور، سراوان و قصرقند روند افزایشی و معنادار در بارش سالانه نشان داده‌اند. به عنوان مثال، چابهار با افزایش ۲۴ میلی‌متر و کنارک با افزایش ۴۷ میلی‌متر طی چهار دهه، از روندهای مثبت قابل توجهی برخوردار بوده‌اند. شهرهای ایرانشهر، نیکشهر، فنوج و سرباز روند کاهشی و معنادار در بارش سالانه داشته‌اند. به عنوان مثال، نیکشهر با کاهش ۱۹ میلی‌متر و فنوج با کاهش ۲۶ میلی‌متر طی چهار دهه، با چالش‌های کم‌آبی مواجه شده‌اند. تحلیل گرافیکی من‌کندال نشان‌دهنده نقاط جهش معنادار در بارش سالانه در سال‌های خاصی (مانند ۱۹۹۱، ۱۹۹۷، ۱۹۹۹، ۲۰۰۳، ۲۰۰۴،

۲۰۰۶ و ۲۰۰۸) است. این نقاط جهش نشان‌دهنده تغییرات ناگهانی در الگوهای بارش هستند که می‌توانند با پدیده‌های اقلیمی یا تغییرات محیطی مرتبط باشند. داده‌های بارش نشان‌دهنده تغییرپذیری قابل توجهی در طول سال‌ها با قله‌های شدید است. این تغییرپذیری در مناطق ساحلی (مانند چابهار و کنارک) و غیرساحلی (مانند نیکشهر و ایرانشهر) متفاوت بوده و مناطق غیرساحلی بیشتر تحت تأثیر کاهش بارش قرار گرفته‌اند.

بلوچستان به دلیل موقعیت جغرافیایی در کمربند بیابانی و میانگین بارش پایین‌تر از میانگین جهانی، به شدت در برابر تغییرات اقلیمی آسیب‌پذیر است. کاهش بارش در برخی شهرها (مانند نیکشهر و سرباز) به تشدید چالش‌های کم‌آبی منجر شده است. افزایش گازهای گلخانه‌ای و گرمایش جهانی، به‌ویژه افزایش غلظتCO_2 ، به تغییرات سریع‌تر در الگوهای بارش منطقه کمک کرده است. این تغییرات می‌توانند اثرات بلندمدتی بر منابع آبی، کشاورزی و مهاجرت جمعیت داشته باشند.

این مطالعه نشان داد که الگوهای بارش در شهرهای بلوچستان طی چهار دهه گذشته تحت تأثیر تغییرات اقلیمی قرار گرفته و روندهای متفاوتی را نشان داده است. شهرهای ساحلی مانند چابهار، کنارک، زرآباد و نگور و همچنین سراوان و قصرقند شاهد افزایش بارش بوده‌اند، در حالی که شهرهای داخلی مانند ایرانشهر، نیکشهر، فنوج و سرباز با کاهش بارش و چالش‌های کم‌آبی مواجه شده‌اند. نقاط جهش اقلیمی شناسایی‌شده نشان‌دهنده تغییرات ناگهانی در الگوهای بارش است که می‌تواند به عوامل اقلیمی یا انسانی مرتبط باشد. این یافته‌ها بر ضرورت پایش مستمر اقلیم و برنامه‌ریزی برای مدیریت منابع آبی تأکید دارند. با توجه به روند کاهشی بارش در برخی شهرها، اجرای طرح‌های مدیریت آب مانند ذخیره‌سازی آب باران، بهینه‌سازی مصرف آب و احیای منابع زیرزمینی ضروری است. استفاده مستمر از داده‌های سنجش از دور و تحلیل‌های ناپارامتریک برای شناسایی روندها و نقاط جهش اقلیمی توصیه می‌شود. برای کاهش اثرات کم‌آبی در شهرهای با روند کاهشی، برنامه‌ریزی برای توسعه پایدار کشاورزی و زیرساخت‌های آبی لازم است. بررسی تأثیر سایر عوامل اقلیمی (مانند دما، تبخیر و الگوهای جوی) بر تغییرات بارش و تحلیل اثرات اجتماعی-اقتصادی این تغییرات می‌تواند درک جامع‌تری ارائه دهد. این پژوهش با ارائه تحلیل‌های دقیق و استفاده از روش‌های آماری پیشرفته، گامی مهم در راستای شناخت روندهای بارش و تأثیرات اقلیمی در بلوچستان برداشته و اطلاعات ارزشمندی برای سیاست‌گذاری و مدیریت منابع آبی فراهم کرده است.

منابع

۱- ابراهیمی، هدی و پرویز کردوانی (۱۳۹۳)، مطالعه تغییر اقلیم در تالاب بین المللی انزلی به روش من کندال، نشریه اکوبیولوژی تالاب (تالاب)، دوره ۶، شماره ۲۱، صص ۷۱-۵۹.

۲- احمدی، ح. (۱۳۸۸). تحلیل خشکسالی در شهر ایلام بر اساس شاخص توزیع استاندارد و درصد نرمال. اولین همایش ملی بحران آب در کشاورزی و منابع طبیعی.

۳- باقرپور، مهسا؛ سیدیان، سیدمرتضی؛ فتح آبادی، ابوالحسن و امین محمدی (۱۳۹۶)، بررسی کارایی آزمون من کندال در شناسایی روند سری های دارای خودهمبستگی، مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، دوره ۱۱، شماره ۳۶، صص ۲۱-۱۱.

٤- دارند، محمد (۱۳۹۳)، روند تغییرات بارش ایران زمین به کمک داده های شبکه ای مرکز اقلیم شناسی بارش جهانی، همایش ملی تغییرات اقلیم و مهندسی توسعه پایدار کشاورزی و منابع طبیعی، همدان.

٥- دین پژوه، یعقوب و رعنا صدیق پور (۱۳۹۸)، تحلیل روند پنج مشخصه مهم بارش های روزانه در حوضه دریاچه ارومیه، مجله پژوهش آب ایران، دوره ۱۳، شماره ۴ (پیاپی ۳۵)، صص ۷۲-۶۳.

٦- رضیئی، طیب؛ دانش کار آراسته، پیمان و بهرام ثقفیان (۱۳۸۴)، بررسی روند بارندگی سالانه در مناطق خشک و نیمه خشک مرکزی و شرقی ایران، مجله آب و فاضلاب، دوره ۱۶، شماره ۲، صص ۸۱-۷۳.

۷- زابل عباسی، ف. و همکاران (۱۳۸۶). بررسی و مقایسه شاخص‌های خشکسالی در مشهد. اداره کل هواشناسی استان خراسان رضوی.

۸- زارع ابیانه، ح. و همکاران (۱۳۸۳). بررسی وضعیت خشکسالی و روند آن در منطقه همدان بر اساس شاخص‌های آماری خشکسالی. پژوهش و سازندگی در زراعت و باغبانی، شماره ۶۴.

۹- عزیزی، قاسم و محمود روشنی (۱۳۸۷)، مطالعه تغییر اقلیم در سواحل جنوبی دریای خزر به روش من- کندال، پژوهش های جغرافیای طبیعی، شماره پیاپی ۱۰۰۰۲۵۲.

۱۰-عساکره، حسین (۱۳۸۶)، تغییرات زمانی- مکانی بارش ایران زمین طی دهه‌های اخیر، فصلنامه جغرافیا و توسعه، دوره ۵، شماره ۱۰، صص ۱۶۴-۱۴۵.

۱۱-عسگری، احمد و فاطمه رحیم زاده (۱۳۸۵)، مطالعه تغییر پذیری بارش دهه‌های اخیر ایران، پژوهش‌های جغرافیایی، شماره ۵۸ ،صص ۸۰-۶۷.

۱۲-فرج زاده، منوچهر و وحید فیضی (۱۳۹۱)، آشکارسازی تغییرهای زمانی-مکانی عناصر دما و بارش در ایران، برنامه ریزی و آمایش فضا (مدرس علوم انسانی)، دوره ۱۶، شماره ۴ (پیاپی ۷۶)، صص ۶۶-۴۹.

۱۳-قصاب فیض، مصطفی و حسین اسلامی (۱۳۹۶)، ارزیابی روند تغییرات بارندگی با روش من کندال و رگرسیون خطی در استان خوزستان، فصلنامه مهندسی آب، دوره ۵، شماره ۲، صص ۱۲۱-۱۱۳.

۱٤-کاویانی، محمدرضا و حسین عساکره (۱۳۸۲)، بررسی آماری روند بلندمدت بارش سالانه اصفهان، سومین کنفرانس منطقه ای تغییر اقلیم، اصفهان.

۱٥-کتیرایی، پری؛ حجام، سهراب و پرویز ایران نژاد (۱۳۸۶)، سهم تغییرات فراوانی و شدت بارش روزانه در روند بارش در ایران طی دوره ۲۰۰۱-۱۹۶۰، مجله فیزیک زمین و فضا، جلد ۳، شماره ۱، صص ۸۳-۶۷.

۱۶- لشنیزند، م. (۱۳۸۰). پهنه‌بندی خشکسالی اقلیمی در استان لرستان با به‌کارگیری شاخص‌های آماری. اولین کنفرانس ملی بررسی راهکارهای مقابله با بحران آب، دانشگاه زابل.

۱۷-مسعودیان، ابولفضل و محمد دارند (۱۳۹۲)، شناسایی و بررسی تغییرات نمایه های بارش فرین ایران طی دهه های اخیر، جغرافیا و توسعه ناحیه ای، شماره 20، صص ۲۵۷-۲۳۹.
۱۸-منتظری، مجید و حسنعلی غیور (۱۳۸۸)، تحلیل مقایسه ای روند بارش و خشکسالی حوضه خزر، جغرافیا و توسعه، دوره ۷، شماره پیاپی ۱۶، صص ۹۲-۷۱.
۱۹-میرزایی حسنلو، ایوب؛ عبقری، هیراد و مهدی عرفانیان (۱۳۹۹)، تحلیل روند بارندگی و شاخص تمرکز بارش در ایستگاه های سینوپتیک حوضه دریا چه ارومیه، جغرافیا و توسعه، دوره ۱۸، شماره ۵۹، صص ۴۰-۲۱.
۲۰-ناظری تهرودی، م؛ خلیلی، ک و ف. احمدی، (۱۳۹۵)، تحلیل روند تغییرات ایستگاهی و منطقه ای بارش نیم قرن اخیر کشور ایران، نشریه آب و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، جلد ۳۰، شماره ۲، صص ۶۵۴-۶۴۳.
۲۱-هرمزی، هدایت اله؛ برنا، رضا و منیژه ظهوریان پردل (۱۳۹۸)، بررسی روند تغییرات بارش در استان خوزستان و تأثیر آن بر تالاب شادگان، اکوبیولوژی تالاب (تالاب)، دوره ۱۱، شماره ۴۱، صص ۱۱۷-۱۰۳.
22- AghaKouchak Amir, Nasrin Nasrollahi and Emad Habib (2009), Accounting for Uncertainties of the TRMM Satellite Estimates, Remote Sensing, Vol. 1, Issue 3, pp. 606-619.
23- Arrhenius S 1896 On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. Philosophical Magazine and Journal of Science. Series 5 41(251): 237-276.
24- Batlló Juan Torres and BelénMartí-Cardona 2020, Precipitation trends over the southern Andean Altiplano from 1981 to 2018, Journal of Hydrology, Vol. 590, November 2020, 125485.
25- Chen j., Wub X., Finlayson B., Webber M., Wei T., and Li M. 2014. Variability and trend in the hydrology of the Yangtze River, China: Annual precipitation and runoff. Journal of Hydrology. 513: 403-412.
26- Duhan D., and Pandy A. 2013. Statistical analysis of long term spatial and temporal trends of precipitation during 1901–2002 at Madhya Pradesh, India. Atmospheric Research. 122: 136-149.
27- Hong, S.T., Bang, S., Paik, D., Kang, J., Hwang, S., Jeon, K., Chun, B., Hyun, S., Lee, Y., Kim, J. (2006). Histamine and its receptors modulate temperature-preference behaviors in Drosophila. J. Neurosci. 26(27): 7245--7256.
28- Jain SK., Kumar V., and Saharia M. 2013. Analysis of rainfall and temperature trends in northeast India. International Journal of Climatology. 33: 968-978.
29- Llasat María Carmen, Annadel Moral, Maria Cortès, Tomeu Rigo 2021, Convective precipitation trends in the Spanish Mediterranean region, Atmospheric Research Vol. 257, 10 August 2021, 105581
30- Manabe, S., & Wetherald, R. T. (1967). Thermal equilibrium of the atmosphere with a given distribution of relative humidity. Journal of the Atmospheric Sciences, 24(3), 241-259.
31- Steiner, M.B., Y. Eshet, M.R. Rampino, and D.M. Schwindt, 2003: Fungal abundance spike and the Permian-Triassic boundary in the Karoo Supergroup (South Africa). Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol., 194, 405-414.
32- Touré Halimatou, Traoré Kalifa and Kyei-Baffour N 2017, Assessment of changing trends of daily precipitation and temperature extremes in Bamako and Ségou in Mali from 1961- 2014, Weather and Climate Extremes Vol. 18, December 2017, pp. 8-16
33- Yacoub Ely and GokmenTayfur 2020, Spatial and temporal of variation of meteorological drought and precipitation trend analysis over whole Mauritania, Journal of African Earth Sciences Vol. 163, March 2020, 103761

Analyzing the trend of precipitation changes with a climate change approach Case study: Urban areas of Balochistan

Chakavak Khajehamiri Khaledi[1], Mohammad Reza Salari Fanoodi[2]
2- Assistant Professor, Department of Oceanography, Faculty of Marine Science, Chabahar Maritime University, Chabahar, Iran
3- Chabahar Marine Synoptic Meteorology Department, Chabahar, Iran
* Corresponding author: c.khajehamiri@cmu.ac.ir

ABSTRACT

The aim of this research is to investigate the trend of precipitation changes in Balochistan over the past four decades using the non-parametric Mann-Kendall and Sen's Slope methods. For this purpose, monthly, seasonal, and annual precipitation data for 10 cities in the Balochistan region during the 1984-2023 period were extracted from the PERSIANN remote sensing database. After creating the database, statistical calculations and the Mann-Kendall and Sen's Slope indices were prepared. The results of this study showed that for the annual period, the trend was positive and increasing for the cities of Chabahar, Konarak, Zarabad, Negour, Saravan, and Qasr-e Qand. In contrast, for Iranshahr, Nikshahr, Fanuj, and Sarbaz, the trend was decreasing and negative, leading to water scarcity challenges. For all regions, we have also observed significant shifts in the trend of annual precipitation. These findings emphasize the necessity of continuous climate monitoring and planning for water resource management. Given the decreasing precipitation trend in some cities, implementing water management plans such as rainwater harvesting, optimizing water consumption, and rehabilitating underground resources is essential.

Keywords: Balochistan, Iran, Rainfall, Man Kend

تأثیر پارامترهای اقلیمی بر طراحی واحدهای آموزشی

محترم محمدیاریان[1]
۱-گروه آموزشی جغرافیا، دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران
Mohtaram.meteo65@gmail.com

چکیده

پارامترهایی اقلیمی مانند دما، رطوبت، تابش خورشید و باد، تأثیر مستقیم و مهمی بر طراحی ساختمان‌های آموزشی و شرایط یادگیری دانش‌آموزان دارد. این عوامل بر آسایش حرارتی، کیفیت هوای داخل کلاس‌ها، بهره‌وری انرژی و سلامت جسمی و روانی دانش‌آموزان مؤثر هستند. طراحی بهینه فضاهای آموزشی باید با تحلیل دقیق داده‌های اقلیمی و توجه به ویژگی‌های خاص هر اقلیم انجام شود تا محیطی سالم، راحت و انرژی پسند فراهم شود.

مطالعات پیشین نشان داده‌اند که شرایط دما و رطوبت در محدوده مناسب (دمای ۲۰ تا ۲۴ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۴۰ تا ۶۰ درصد) باعث بهبود تمرکز و عملکرد شناختی دانش‌آموزان می‌شود. در اقلیم‌های گرم و خشک، استفاده از سایه‌بان‌ها، مصالح با ظرفیت حرارتی بالا و تهویه طبیعی ضروری است، در اقلیم‌های سرد عایق‌بندی و جذب گرمای خورشید اهمیت دارد و در اقلیم‌های مرطوب سیستم‌های تهویه مؤثر و کنترل رطوبت ضروری است.

همچنین، جهت‌گیری ساختمان، طراحی بازشوها، نور طبیعی، ارتفاع سقف، مصالح ساختمانی و تهویه نقش کلیدی در بهبود شرایط محیطی دارند. استفاده از فناوری‌های نوین مانند پنجره‌های دو یا سه جداره و سیستم‌های تهویه هوشمند نیز به بهینه‌سازی مصرف انرژی کمک می‌کند.

نتیجه‌گیری مقاله بر این است که توجه به ویژگی‌های اقلیمی در طراحی واحدهای آموزشی، نه‌تنها آسایش حرارتی و سلامت دانش‌آموزان را تضمین می‌کند بلکه باعث افزایش کیفیت یادگیری و توسعه پایدار می‌شود. بنابراین، طراحی اقلیمی دقیق و علمی باید در اولویت ساخت فضاهای آموزشی قرار گیرد.

کلیدواژه‌ها: پارامترهای اقلیمی ، واحدهای آموزشی ، آسایش حرارتی، دما و رطوبت، معماری

مقدمه

طراحی واحدهای آموزشی به عنوان یکی از مؤلفه‌های کلیدی در بهبود فرآیند یاددهی-یادگیری و ارتقاء رفاه دانش‌آموزان و معلمان شناخته می‌شود. یکی از پارامترهای محیطی بسیار تأثیرگذار بر کیفیت فضاهای آموزشی، شرایط اقلیمی هر منطقه است که شامل عوامل متنوعی از قبیل دما، رطوبت، تابش خورشید، جهت و شدت باد و میزان بارش می‌شود (اسمیت

و همکاران، ۲۰۱۸) این پارامترها نقش بسزایی در ایجاد آسایش حرارتی، تأمین نور طبیعی کافی، تهویه مطلوب و مدیریت مصرف انرژی ساختمان‌های آموزشی ایفا می‌کنند. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که عدم تطابق طراحی فضاهای آموزشی با ویژگی‌های اقلیمی می‌تواند به کاهش کیفیت محیط یادگیری و افزایش هزینه‌های عملیاتی منجر شود (جانسون و همکاران، ۲۰۲۰)

در شرایط فعلی، با توجه به تغییرات اقلیمی و نوسانات شدید دمایی، لزوم توجه ویژه به طراحی مبتنی بر اقلیم در واحدهای آموزشی بیش از پیش احساس می‌شود .(IPCC, 2021) طراحی‌های اقلیمی نه‌تنها موجب بهبود آسایش حرارتی و محیطی می‌شوند، بلکه می‌توانند نقش مهمی در کاهش مصرف انرژی و اثرات زیست‌محیطی ساختمان‌ها داشته باشند (چن و همکاران، ۲۰۲۳). بهره‌گیری از نور طبیعی کافی و طراحی سیستم‌های تهویه طبیعی، علاوه بر کاهش هزینه‌های انرژی، به بهبود سلامت روانی و فیزیکی دانش‌آموزان و معلمان کمک می‌کند.

با این حال، در بسیاری از مطالعات موجود، تمرکز عمدتاً بر ابعاد کلی اقلیم و انرژی ساختمان بوده و تأثیر دقیق هر یک از پارامترهای اقلیمی بر طراحی واحدهای آموزشی کمتر موردبررسی قرارگرفته است (کومار و شارما، ۲۰۲۱). همچنین، در کشورهای درحال‌توسعه، اجرای پروژه‌های آموزشی اغلب بدون توجه کافی به شرایط اقلیمی انجام می‌شود که این امر نیاز به پژوهش‌های کاربردی در این حوزه را برجسته می‌کند. این مطالعه باهدف تحلیل جامع تأثیر پارامترهای اقلیمی بر طراحی بهینه واحدهای آموزشی انجام‌شده است تا چارچوبی علمی و عملی برای بهبود طراحی فضاهای آموزشی فراهم آورد.

اهمیت اجتماعی این موضوع از آن جهت است که مدارس به عنوان مراکز تربیت نسل‌های آینده باید محیطی سالم، امن و راحت فراهم کنند تا رشد و شکوفایی علمی و روانی دانش‌آموزان تسهیل شود. درنهایت، نتایج این پژوهش می‌تواند به معماران، برنامه‌ریزان و سیاست‌گذاران آموزشی کمک کند تا با رویکردی اقلیمی، ضمن ارتقاء کیفیت محیط آموزشی، نقش مؤثری در تحقق اهداف توسعه پایدار ایفا کنند.

پیشینه پژوهش

موضوع تأثیر اقلیم بر طراحی معماری و به ویژه واحدهای آموزشی، از دیرباز موردتوجه محققان و معماران قرارگرفته است. بسیاری از مطالعات نشان داده‌اند که شرایط اقلیمی منطقه، اعم از دما، رطوبت، تابش خورشیدی و باد، نقشی کلیدی در تعیین کیفیت محیط داخلی ساختمان‌ها و درنتیجه سلامت و عملکرد کاربران آن‌ها دارد.

در دهه‌های اخیر، تحقیقات متعددی به بررسی رابطه بین اقلیم و طراحی ساختمان‌های آموزشی پرداخته‌اند. مطالعات رشته آسایش حرارتی برای کلاس‌های آموزشی برای اولین بار توسط آولیسیم (Auliciems) و وستلی (Vastly) صورت گرفته است، مطالعات تجربی نشان می‌دهد که آسایش حرارتی به عنوان یکی از عوامل کیفیت درونی محیطی بر عملکرد دانشجویان و مصرف انرژی ساختمان تأثیر می‌گذارد، از سال ۱۹۷۰با توسعه تئوری مدل فنگر (Fanger) رشد قابل‌توجهی در مدل آسایش حرارتی در دهه‌های گذشته به ویژه در ساختمان‌های آموزشی صورت گرفته است. علی بیکی (۱۳۹۸) در پایان‌نامه

خود تحت عنوان ارزیابی وضعیت آسایش حرارتی در ساختمان‌های آموزشی به بررسی و ارزیابی شرایط آسایش حرارتی در این کلاس‌های شمالی (کلاس هیجده) و جنوبی (چهارده) دانشکده مهندسی معماری و شهرسازی دانشگاه صنعتی شاهرود به عنوان نمونه موردی جهت پژوهش انتخاب گردید و برای ارزیابی شرایط آسایش حرارتی از دو مدل اشری و سازگاری استفاده‌شده است. نتایج حاصل از این برداشت به ترتیب؛ در فصل گرم، برای کلاس شمالی دمای خنثی، دمای ترجیحی و محدود دمای آسایش به ترتیب؛ ۲۳.۳۳، ۲۴.۵۰ و ۲۷.۱۷ درجه سانتی‌گراد است و برای کلاس جنوبی نیز به ترتیب؛ ۲۴.۰۷ ،۲۲.۵۰ و ۲۸.۵۰ – ۱۸.۵۰ درجه سانتی‌گراد است. در فصل سرد، نیز برای کلاس شمالی دمای خنثی، دمای ترجیحی و محدوده دمای آسایش به ترتیب؛ ۲۲.۵۰ ، ۲۳.۵۵و ۳۰- ۲۳.۵۰ برای کلاس جنوبی نیز به همین ترتیب؛ ۲۴.۰۷ ۲۲.۵۰ و ۳۰ – ۵۰/۲۳ درجه سانتی‌گراد است. بررسی همبستگی‌ها و روابط بین متغیرهای آسایش حرارتی در این پژوهش و در داخل کلاس‌های موردبررسی نشان از این بود که می‌توان به ترتیب اهمیت؛دمای عملکردی که حاصل دمای تشعشعی و دمای هوای داخل است به عنوان مهم‌ترین عامل در نظر گرفت، سایر عوامل آسایش به ترتیب اهمیت؛ رطوبت نسبی، سرعت هوا و پوشش است تأثیر کمتری برتامین شرایط آسایش حرارتی در داخل کلاس‌های آموزشی در اقلیم گرم و خشک شهرستان شاهرود رادارند و در انتها با مقایسه جامعه آماری خانم‌ها و آقایان و همچنین مقایسه دو کلاس شمالی و جنوبی باید ذکر کرد تفاوت معناداری بین دو جامعه دانشجویان خانم و آقا و همچنین بین دو کلاس مشاهده نگردید. همچنین مثال، سانتاموریس (۲۰۱۳) در مطالعات خود به اهمیت بهره‌گیری از تکنولوژی‌های خنک‌کننده و مصالح مناسب در اقلیم‌های گرم و خشک برای بهبود آسایش حرارتی تأکید کرده است. وی نشان داد که استفاده از پوشش‌های بازتابنده و سقف‌های سبز می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی دمای داخل فضاهای آموزشی را کاهش دهد و محیط یادگیری مطلوب‌تری ایجاد کند. زمردیان و همکاران (۱۳۹۵) به ارزیابی آسایش حرارتی در کلاس درس در اقلیم گرم و خشک مطالعات میدانی: دبستان دخترانه در شهر کاشان پرداختند. مطابق نتایج به‌دست‌آمده احساس حرارتی دانش‌آموزان متفاوت از بزرگ‌سالان بوده و با استانداردهای متداول قابل ارزیابی نیست. شرایط حرارتی کلاس‌های درس در تمامی ساعت‌های موردمطالعه قابل‌قبول نبوده و با هیچ‌کدام از استانداردها مطابقت ندارد. همچنین در مدارس با توجه به محدودیت‌های رفتاری دانش‌آموزان در تطبیق خود با شرایط محیطی لازم است بر روی تمهیدات معماری و تأسیساتی برای تأمین شرایط آسایش در کلاس تمرکز کرد. زهیری و همکاران (۲۰۱۴) در مدارس راهنمایی تهران وضعیت آسایش حرارتی دانش‌آموزان دختر را ارزیابی کرده و با دمای آسایش پیشنهادی حیدری (۱۳۸۸) مقایسه کرده و راهکارهای طراحی برای بهبود وضعیت را ارائه نموده‌اند. همچنین حداد و همکاران(۲۰۱۴) مطالعات گسترده‌ای در کلاس‌های درس پایه ابتدایی شهر شیراز انجام داده‌اند. ازجمله نتایج انتشاریافته آن مطالعه بر روی سطح فعالیت دانش آموزان به عنوان یکی از پارامترهای اصلی در ارزیابی آسایش حرارتی بوده است. مطالعات نشان داده است که ارتباط مستقیم پارامترهای اقلیمی، فیزیولوژیکی و فرهنگی کاربران با آسایش حرارتی، استفاده از نتایج تحقیقات پیشین برای نتیجه‌گیری در ارتباط بااحساس حرارتی کاربران از دقت کافی برخوردار نیست و انجام تحقیقات میدانی را در ساختمان‌ها با کاربری و گروه‌های سنی و اقلیم‌های مختلف ضروری می‌سازد. از سوی دیگر، گیونی (۱۹۹۸) با ارائه چارچوبی علمی برای طراحی اقلیمی ساختمان‌ها، بر ضرورت انطباق استراتژی‌های

طراحی با اقلیم محلی تأکید دارد. او در تحقیقات خود به بررسی تفاوت‌های رویکردهای طراحی در اقلیم‌های سردسیر و گرمسیر پرداخته و راهکارهای کاربردی برای هر یک پیشنهاد کرده است .مطالعات روانشناسی محیط نیز نشان داده‌اند که شرایط محیطی نامطلوب، به ویژه دما و رطوبت خارج از محدوده آسایش، می‌تواند موجب کاهش تمرکز و عملکرد شناختی دانش‌آموزان شود آلهور و همکاران (۲۰۱۶) .این یافته‌ها اهمیت تنظیم دقیق شرایط حرارتی و رطوبتی را در فضاهای آموزشی برجسته می‌سازد. گزارش‌های سازمان‌هایی مانند یونسکو (UNESCO, 2020) نیز بر نقش طراحی اقلیمی در ارتقاء کیفیت آموزش و سلامت دانش‌آموزان تأکید دارند. این سازمان با ارائه راهنمایی‌هایی برای طراحی مدارس با توجه به شرایط اقلیمی منطقه، به بهبود فضای یادگیری و افزایش بهره‌وری آموزشی کمک کرده است. علاوه بر این، پیشرفت‌های فناوری در زمینه مصالح ساختمانی و سیستم‌های تهویه هوشمند نیز موضوعی است که در پژوهش‌های اخیر به آن پرداخته‌شده است. استفاده از پنجره‌های دوجداره، عایق‌های حرارتی پیشرفته و سیستم‌های بازیافت انرژی، به عنوان راهکارهای مؤثر در بهینه‌سازی عملکرد حرارتی و مصرف انرژی در واحدهای آموزشی مطرح‌شده‌اند.(ASHRAE Handbook, 2020)

با توجه به اهمیت این موضوع و تأثیر مستقیم آن بر سلامت و یادگیری دانش‌آموزان، پژوهش‌های متعددی در سطح جهانی در حال انجام است تا با بهره‌گیری از داده‌های اقلیمی دقیق و تحلیل‌های پیشرفته، راهکارهای طراحی بهینه‌تری برای فضاهای آموزشی ارائه دهند. در این راستا، مطالعات اقلیمی بومی و بررسی اثرات مستقیم اقلیم منطقه بر طراحی و عملکرد ساختمان‌های آموزشی، یکی از موضوعات مهم و کاربردی در حوزه معماری پایدار و آموزش محسوب می‌شود.

شناخت اقلیم و اهمیت آن در طراحی

اقلیم هر منطقه به واسطه شرایط جوی و جغرافیایی منحصربه‌فرد خود، الگوهای مشخصی از تغییرات دما، رطوبت، تابش خورشید، بارش و باد را ایجاد می‌کند. این الگوها تعیین‌کننده ویژگی‌های محیط داخلی ساختمان‌ها هستند که تأثیر مستقیم بر آسایش حرارتی و کیفیت هوای داخل دارند. شناخت اقلیم، به عنوان نقطه شروع طراحی معماری اقلیمی، مستلزم استفاده از داده‌های آماری بلندمدت و مدل‌های پیشرفته تحلیل اقلیمی است که شامل اطلاعات ماهیانه و سالیانه دماهای حداقل، حداکثر، میانگین، رطوبت نسبی، شدت و جهت باد غالب و تابش خورشیدی می‌شود. این اطلاعات پایه‌ای، معماران و مهندسان را قادر می‌سازد تا استراتژی‌های طراحی مناسب برای کنترل انرژی حرارتی، نور و تهویه را تدوین کنند. بعلاوه، تقسیم‌بندی‌های اقلیمی مختلف نظیر اقلیم گرم و خشک، سردسیر، معتدل، مرطوب و مناطق کوهستانی، هر کدام نیازمند رویکردهای متفاوتی در طراحی فضاهای آموزشی هستند. به‌عنوان‌مثال، در اقلیم‌های گرم و خشک تمرکز بر جلوگیری از ورود حرارت اضافی و تهویه طبیعی مناسب است، درحالی‌که در اقلیم‌های سردسیر حفظ گرما و استفاده از سیستم‌های گرمایشی کارآمد اهمیت دارد.

تأثیر دما و رطوبت بر طراحی

دما و رطوبت از عوامل کلیدی محیطی هستند که تأثیر قابل‌توجهی بر سلامت، رفاه و عملکرد شناختی دانش‌آموزان دارند. مطالعات روان‌شناسی محیطی و علوم زیستی نشان داده‌اند که شرایط نامناسب حرارتی و رطوبتی می‌توانند منجر به کاهش

تمرکز، خستگی زودرس، افت بازدهی یادگیری و حتی مشکلات جسمانی شوند. دمای محیطی که برای فضاهای آموزشی مناسب در نظر گرفته می‌شود معمولاً بین ۲۰ تا ۲۴ درجه سانتی‌گراد است. دماهای بالاتر از این محدوده باعث افزایش خستگی و کاهش توجه می‌شوند، زیرا بدن انرژی بیشتری برای حفظ تعادل حرارتی مصرف می‌کند. از طرف دیگر، دمای بسیار پایین نیز می‌تواند موجب حواس‌پرتی، کاهش حرکات دست و کاهش واکنش‌های سریع شود. تحقیقات نشان می‌دهد که دمای مطلوب نه‌تنها موجب آسایش جسمی می‌شود بلکه عملکرد شناختی را نیز بهبود می‌بخشد و توانایی دانش‌آموزان در پردازش اطلاعات، حل مسئله و حفظ اطلاعات را افزایش می‌دهد. رطوبت نسبی هوای داخل کلاس‌ها نیز نقش مهمی در حفظ آسایش حرارتی و کیفیت هوا دارد. رطوبت بسیار پایین (کمتر از ۳۰ درصد) می‌تواند باعث خشکی مخاط‌های تنفسی، تحریک چشم‌ها و پوست، و درنتیجه ناراحتی‌های جسمانی شود که تمرکز را کاهش می‌دهد. رطوبت بالا (بیش از ۶۰ درصد) نیز زمینه رشد قارچ‌ها و باکتری‌ها را فراهم کرده و ممکن است به بروز حساسیت‌ها و بیماری‌های تنفسی منجر شود. میزان رطوبت نسبی بهینه برای محیط‌های آموزشی معمولاً بین ۴۰ تا ۶۰ درصد توصیه می‌شود. (لئو و همکاران،۲۰۲۱). تحقیقات صورت گرفته در این زمینه که بازه‌های مناسب رطوبت را برای شرایط آسایش تعریف کرده‌اند؛ می‌توان به استاندارد انگلیس که بازه ۴۰ تا ۷۰ درصد، استاندارد اشری ۳۰ تا ۶۰ درصد برای مناطقی با دمای خشک ۲۰ تا ۲۷ درجه سانتی‌گراد در با فعالیت کم، استاندارد ایزو ۳۰ تا ۷۰ درصد اشاره کرد و دکتر حیدری (۱۳۹۳) برای اقلیم گرم ایران را ۲۰ تا ۷۰ درصد در نظر گرفته است، هنسل معتقد است که رطوبت تأثیر خیلی کمی برآسایش دارد و یا گوانزالز (Gonzalez) و گاج (Gagge) یا دونینی (Doninni) معتقدند رطوبت بین ۲۰ تا ۶۰ درصد نیز تأثیری ندارد ولی دی دیر (De dear) به این مسئله اشاره دارد که محققین به اثر رطوبت گذرا توجهی نکرده‌اند و تأثیر مهمی بر آسایش دارد. پارامترهای دما و رطوبت نقش محوری در تعیین شرایط آسایش حرارتی در فضاهای آموزشی ایفا می‌کنند. بر اساس مدل‌های آسایش حرارتی مانند مدل PMV و PPD ، شرایط مطلوب حرارتی برای فضاهای آموزشی باید در محدوده‌ای قرار گیرد که بیش‌ترین میزان رضایت حرارتی را برای کاربران فراهم کند.

اقلیم گرم و خشک:: دمای بالا همراه با رطوبت پایین در این مناطق، موجب ایجاد شرایط نامطلوبی همچون گرمای محسوس زیاد و خشکی هوا می‌شود. طراحی باید با استفاده از روش‌های کاهش بار حرارتی، ازجمله سایه‌بان‌های خارجی، ایوان‌ها و پنجره‌های کوچک و دارای پوشش محافظت‌شده، موجب کاهش تابش مستقیم خورشید شود. استفاده از مصالح با ظرفیت حرارتی بالا مانند آجر، بتن و سنگ می‌تواند حرارت را در طول شب جذب و در طول روز دفع کند، که به تعدیل دمای داخلی کمک می‌کند. علاوه بر این، تهویه طبیعی و استفاده از بادهای غالب به عنوان خنک‌کننده، به کاهش نیاز به سیستم‌های تهویه مکانیکی کمک می‌کند.

اقلیم سرد: در این اقلیم‌ها، حفظ گرمای داخل ساختمان اهمیت فراوانی دارد. عایق‌بندی مناسب دیوارها، سقف و کف، استفاده از پنجره‌های با شیشه دوجداره یا سه جداره و سیستم‌های گرمایشی باراندمان بالا، از عوامل کلیدی در طراحی هستند. علاوه بر این، جهت‌گیری ساختمان به سمت دریافت حداکثری تابش خورشید در فصول سرد، ضمن افزایش گرمای طبیعی، موجب کاهش مصرف انرژی برای گرمایش می‌شود.

اقلیم مرطوب و گرم: رطوبت بالا باعث افزایش میزان رطوبت نسبی داخل فضاها و ایجاد شرایط نامناسبی از نظر آسایش حرارتی و رشد میکروارگانیسم‌ها می‌شود. در چنین شرایطی، سیستم‌های تهویه مؤثر به همراه مصالح مقاوم در برابر رطوبت و استفاده از تکنولوژی‌های خشک‌کننده هوا، به حفظ کیفیت هوای داخل کمک می‌کنند. طراحی بازشوها باید به‌گونه‌ای باشد که تهویه مؤثر بدون نفوذ رطوبت بیش از حد ممکن گردد.

توصیه‌های طراحی ساختمان‌های آموزشی

برای ایجاد محیطی مناسب جهت یادگیری، ساختمان‌های آموزشی باید به‌گونه‌ای طراحی شوند که شرایط دما و رطوبت در محدوده مطلوب حفظ شود. مهم‌ترین اصول طراحی شامل موارد زیر است:

- عایق‌بندی حرارتی مناسب :استفاده از مصالح با ضریب انتقال حرارت پایین برای حفظ دمای مطلوب و جلوگیری از نفوذ سرمای زیاد یا گرمای بیش از حد به داخل ساختمان.
- سیستم‌های تهویه و کنترل رطوبت: به‌کارگیری سیستم‌های تهویه مکانیکی یا طبیعی با امکان کنترل میزان رطوبت و تأمین هوای تازه، به ویژه در مناطقی با اقلیم مرطوب یا گرم.
- تهویه طبیعی و جهت‌گیری بهینه: طراحی بازشوها و مسیرهای جریان هوا به‌گونه‌ای که تهویه طبیعی مؤثر صورت گیرد و هوای داخل تازه و باکیفیت باقی بماند.
- کنترل تابش خورشید و استفاده از سایه‌بان‌ها: برای جلوگیری از افزایش دمای داخل کلاس‌ها به ویژه در تابستان و حفظ آسایش حرارتی.
- استفاده از فناوری‌های هوشمند: مانند حسگرهای دما و رطوبت که امکان تنظیم خودکار سیستم‌های تهویه و گرمایش/سرمایش را فراهم می‌کنند.
- فضاهای سبز و محوطه‌سازی: حضور گیاهان و فضاهای سبز پیرامون ساختمان که می‌توانند تأثیر مثبتی بر کاهش دمای محیط و بهبود کیفیت هوا داشته باشند.

ایجاد محیطی با دما و رطوبت کنترل شده و در محدوده بهینه، نه‌تنها به بهبود آسایش حرارتی کمک می‌کند بلکه مستقیماً بر کیفیت فرآیند یادگیری و سلامت روانی و جسمی دانش‌آموزان تأثیرگذار است. طراحی معماری و استفاده از فناوری‌های مناسب برای تنظیم شرایط محیطی از عوامل حیاتی در توسعه فضاهای آموزشی باکیفیت به شمار می‌روند.

جهت‌گیری ساختمان و بازشوها

جهت‌گیری ساختمان یکی از عوامل کلیدی در معماری اقلیمی است که تأثیر مستقیم بر بهره‌وری انرژی و آسایش حرارتی دارد.

در اقلیم‌های گرم و خشک، جهت‌گیری ساختمان معمولاً به‌گونه‌ای انتخاب می‌شود که حداقل تابش مستقیم خورشید به بازشوها وارد شود. به‌طورمعمول، پنجره‌ها در جهت شمال یا شرق طراحی می‌شوند تا از تابش شدید ظهر جلوگیری کنند و از بادهای خنک بهره‌مند شوند. در این مناطق، طراحی سایه‌بان‌ها، ایوان‌ها و دیوارهای ضخیم نیز برای کاهش بار حرارتی کاربردی است. در اقلیم‌های سرد، جهت‌گیری ساختمان به سمت جنوب است تا حداکثر نور و گرمای خورشید در طول روز جذب شود. بازشوهای بزرگ و پنجره‌های نورگیر، علاوه بر تأمین نور طبیعی، به گرمایش طبیعی کمک کرده و مصرف انرژی سیستم‌های گرمایشی را کاهش می‌دهند. همچنین طراحی مناسب بازشوها با توجه به جهت بادهای غالب، به تهویه مؤثر و کنترل کیفیت هوای داخل فضا کمک می‌کند.

نور طبیعی و کیفیت محیط آموزشی

نور طبیعی یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر عملکرد روانی و جسمی دانش‌آموزان است. مطالعات متعددی نشان داده‌اند که میزان کافی نور طبیعی، علاوه بر کاهش مصرف انرژی در روشنایی مصنوعی، موجب بهبود تمرکز، خلق‌وخو و کاهش خستگی بین دانش‌آموزان می‌شود. طراحی بازشوها، پنجره‌ها و نورگیرها باید به‌گونه‌ای باشد که نور ملایم و یکنواخت وارد فضای کلاس شود. جلوگیری از تابش مستقیم و شدید خورشید از طریق استفاده از پرده‌ها، سایه‌بان‌ها و طراحی مناسب جهت بازشوها، باعث کاهش خیرگی و افزایش آسایش بصری می‌شود. استفاده از فناوری‌های نوین همچون شیشه‌های هوشمند (Smart Glass) و سیستم‌های کنترل نور نیز می‌تواند بهره‌وری نور طبیعی را به حداکثر برساند.

ارتفاع ، پوشش سقف و جهت نورگیری

یکی از مهم‌ترین تأثیرهای اقلیم در معماری ساختمان‌های آموزشی انتخاب نوع و شکل سقف است. همان‌طور که می‌دانیم، سقف یکی از مهم‌ترین بخش‌های هر ساختمان است که مسئولیت تحمل نیمی از بارهای ساختمان را به عهده دارد. همچنین با توجه به اقلیم هر منطقه، باید ارتفاع سقف را متناسب با همان شرایط طراحی کرد. مثلاً در مناطق کوهستانی نباید ارتفاع سقف‌ها خیلی زیاد و بلند باشد به این دلیل که گرم کردن فضاهای آن خانه بسیار دشوار می‌شود و هرچه که ارتفاع سقف کمتر باشد انرژی کمتری مصرف می‌شود و گرم کردن فضای داخلی خانه راحت‌تر می‌شود. همچنین در اقلیم‌هایی که بارندگی زیاد است، باید سقف‌ها به صورت شیب‌دار طراحی و در نظر گرفته شود و یا باید در پوشش سقف از مصالحی استفاده شود که مقاومت آن‌ها در برابر رطوبت زیاد باشد و از ورود آب به خانه جلوگیری کند و مانع از نفوذ آب به داخل مصالح شود و کمترین خرابی را برای مصالح به بار آورد.

تهویه و کیفیت هوای داخل ساختمان

کیفیت هوای داخل ساختمان ارتباط مستقیمی با سلامت و عملکرد کاربران دارد. در محیط‌های آموزشی که تراکم جمعیتی بالاست، تهویه مؤثر برای تأمین هوای تازه و حذف آلاینده‌ها ضروری است. در اقلیم‌های گرم و مرطوب، استفاده از سیستم‌های تهویه مکانیکی با قابلیت کنترل رطوبت، فن‌های خروج هوا و طراحی پنجره‌های قابل باز شدن، به کنترل شرایط محیطی کمک می‌کند. در اقلیم سرد، سیستم‌های تهویه باید به‌گونه‌ای طراحی شوند که تبادل هوای تازه با حداقل اتلاف گرما انجام شود، برای مثال با استفاده از سیستم‌های بازیافت انرژی .(ERV/HRV) طراحی مسیرهای عبور هوا در ساختمان و استفاده از سیستم‌های تهویه طبیعی با بهره‌گیری از بادهای غالب نیز از استراتژی‌های مؤثر در مدیریت کیفیت هوا هستند.

مصالح و تکنولوژی‌های ساختمانی مناسب اقلیم

انتخاب مصالح ساختمانی تأثیر عمیقی بر عملکرد حرارتی و انرژی ساختمان دارد. مصالح با ظرفیت حرارتی بالا مانند آجر، سنگ و بتن، قادر به ذخیره‌سازی انرژی حرارتی و کاهش نوسانات دمای داخلی هستند. در اقلیم‌های گرم و خشک، استفاده از این مصالح به تعدیل دمای داخل کمک می‌کند، درحالی‌که در اقلیم‌های سرد، ترکیب این مصالح با عایق‌های حرارتی پیشرفته، می‌تواند اتلاف گرما را به حداقل برساند. علاوه بر این، استفاده از فناوری‌های نوین مانند پنجره‌های دوجداره یا سه جداره، عایق‌های حرارتی پیشرفته، سیستم‌های تهویه مکانیکی هوشمند و انرژی‌های تجدید پذیر (مثلاً پنل‌های خورشیدی) می‌تواند عملکرد انرژی و زیست‌محیطی واحدهای آموزشی را به طرز چشمگیری بهبود بخشد.

طراحی فضای باز و محوطه‌سازی

فضاهای باز اطراف واحدهای آموزشی از اهمیت بالایی برخوردارند و باید با توجه به اقلیم طراحی شوند تا محیطی مناسب برای فعالیت‌های غیر کلاسی و استراحت فراهم کنند. در اقلیم‌های گرم و خشک، ایجاد فضاهای سبز، کاشت درختان سایه‌دار و استفاده از پوشش‌های گیاهی مقاوم به خشکی، به کاهش دمای محیط پیرامونی کمک می‌کند و به ایجاد سایه و خنکی طبیعی منجر می‌شود. در اقلیم‌های سرد، طراحی دیوارهای محافظ باد و فضاهای نیمه‌باز محافظت‌شده می‌تواند از هدر رفت گرما جلوگیری کند و شرایط مناسبی برای حضور دانش‌آموزان در فضاهای بیرونی فراهم آورد.

نتیجه‌گیری

تحلیل جامع اثرگذاری پارامترهای اقلیمی بر طراحی واحدهای آموزشی، نشان می‌دهد که نادیده انگاشتن ویژگی‌های اقلیمی خاص هر منطقه، نه‌تنها منجر به ایجاد فضاهایی ناکارآمد از منظر حرارتی و انرژی می‌شود، بلکه کیفیت فرآیند یادگیری و رفاه روانی و جسمی کاربران این فضاها را نیز به‌شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. یافته‌های حاصل از تلفیق مطالعات نظری، داده‌های اقلیمی و تجربیات طراحی، حاکی از آن است که پاسخ معمارانه به شرایط اقلیمی، باید فراتر از استفاده صرف از تجهیزات کنترل‌کننده محیطی باشد و در سطح ساختار فضایی، مصالح، فرم، جهت‌گیری و حتی سازمان‌دهی عملکردی فضاها نهادینه گردد.درک دقیق روابط میان دما، رطوبت، تابش و جریان هوا با پارامترهای انسانی نظیر آسایش حرارتی، بهره‌وری ذهنی و سلامت روان، ضرورت بازنگری در روش‌های مرسوم طراحی واحدهای آموزشی را برجسته می‌سازد. چنین بازنگری باید مبتنی بر داده محوری، اقلیم‌پذیری و بهره‌گیری از فناوری‌های نوین کنترل محیطی باشد تا بتواند به طراحی فضایی منجر شود که با کمترین مصرف انرژی، حداکثر سطح آسایش و کارایی آموزشی را فراهم آورد. این پژوهش، از خلال تجزیه و تحلیل اقلیم‌محور، چارچوبی مفهومی برای تلفیق اصول اقلیم‌شناسی با طراحی معماری ارائه می‌دهد که می‌تواند به عنوان مبنایی برای تدوین دستورالعمل‌های طراحی بومی‌شده در مناطق مختلف اقلیمی مورداستفاده قرار گیرد. همچنین، با شناسایی شکاف‌های موجود در مطالعات پیشین و تأکید بر لزوم بومی‌سازی شاخص‌های آسایش حرارتی برای گروه‌های سنی خاص در محیط‌های آموزشی، زمینه را برای انجام پژوهش‌های آتی در سطوح میان‌رشته‌ای فراهم می‌سازد. درنهایت، بهره‌گیری از رویکرد طراحی اقلیمی در واحدهای آموزشی، تنها یک ضرورت عملکردی و زیست‌محیطی نیست، بلکه اقدامی استراتژیک در راستای تحقق آموزش پایدار، سلامت محور و منطبق بر شرایط واقعی بوم‌شناختی؛ که می‌تواند سهمی معنادار در توسعه متوازن اجتماعی و انسانی ایفا کند.

منابع

۱- حیدری, د.ش,. (۱۳۹۳). سازگاری حرارتی در معماری. نخستین قدم در صرفه‌جویی مصرف انرژی. تهران: انتشارات دانشگاه تهران

۲- زمردیان،ز.، امینیان، س.، طاهباز، م. (۱۳۹۵). ارزیابی آسایش حرارتی در کلاس درس در اقلیم گرم و خشک مطالعات میدانی: دبستان دخترانه در شهر کاشان. مجله هنرهای زیبا. معماری و شهرسازی. (۴) ۲۱. ۲۸-۱۷

3- Al horr, Y., Arif, M,. Katafygiotou, M,. Mazroei, A,. Kaushik, A,. (2016). Esam Elsarrag, Impact of indoor environmental quality on occupant well-being and comfort: A review of the literature, International Journal of Sustainable Built Environment. 5(1). 1-11.

4- Auliciems, A. & S.V. Szokolay. 1997, Thermal comfort. PLEA.

5- Chao, L., Yalin Z., Limei S., Weijun G., Xiaotong J., & Weirui Y.(2021) Influence of indoor air

temperature and relative humidity on learning performance of undergraduates, Case Studies in Thermal Engineering, 28.
6- Chen. Z., Song,. Y. (2023) A new structural analysis framework of energy consumption in China, Journal of Cleaner Production, 486. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.144464.
7- DeDear, R., G. Brager, and D. Cooper,.(1997). Developing an adaptive model of thermal comfort and preference: final report [on] ASHRAE RP-884. Macquarie Research Limited
8- Donnini, G., (1997). Field study of occupant comfort and office thermal environments in a cold climate. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
9- Fanger, P.O.(1970). Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering. Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering.
10- Gagge, A.P.(1971). An effective temperature scale based on a simple model of human physiological regulatory response. Ashrae Trans. 77: 247-262.
11- Givoni, B. (1998). Climate Considerations in Building and Urban Design. Van Nostrand Reinhold, the USA. Open Journal of Energy Efficiency, 5 (3). 14
12- Gonzalez, R.R .(1973). Magnitude Estimate of Thermal Discomfort during Transients of Humidity and Operative Temperature and their Relation to the New ASHRAE Effective Temperature (ET^*). ASHRAE Transactions. 79. 88-96
13- Haddad, S,. Osmond, P & King, S.(2014). Metabolic Rate Estimation in the Calculation of the PMV for Children, In Cutting Edge: 47th International Conference of the Architectural Science Association . 241-250
14- Johnson, L & Lee, H. (2020) Comprehensive Analytical Strategies in Drug Development. American Journal of Pharmaceutical Education, 84, 758-769.
15- kumar, P., Sharma, A. (2021). Assessing The Thermal Comfort Conditions In Open Spaces: A Transversal Field Survey On The University Campus In India. International Journal of Built Environment and Sustainability 8(3)
16- Santamouris,. M. Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island.A review of the actual developments, Renewable and Sustainable Energy Reviews. 26. 224-240.
17- Parsons, K.(2014). Human thermal environments: the effects of hot, moderate, and cold environments on human health, comfort, and performance. CRC press.
18- Sherri Simmons, 2020 ASHRAE Handbook Focuses on Systems and Equipment, he newly published 2020 ASHRAE Handbook, 404-446
19- Smith, W.K., Germino, M.J., Johnson, D.M., & Reinhardt K. (2018). The Altitude of Alpine Treeline: A Bellwether of Climate Change Effects. Botanical Review, 75,163–190.
20- Zahiri, S .(2011). Developing Sustainable School Design in Iran Thermal Comfort Survey of A Secondary School in Tehran, In Proceedings of: Passive Low Energy Architecture. 523-538
21- Zomorodian, Z.S. (2016). Thermal comfort in educational buildings: A review article. 59: p. 895-906

Mohtaram Mohammadyarian[1]
[1]Department of Geography Education, Farhangian University, Tehran, Iran
Mohtaram.meteo65@gmail.com

Abstract
Climatic parameters such as temperature, humidity, solar radiation, and wind have a direct and significant impact on the design of educational buildings and the learning conditions of students. These factors influence thermal comfort, indoor air quality, energy efficiency, and both the physical and mental health of students. Optimizing the design of educational spaces requires precise analysis of climatic data and careful consideration of the specific features of each climate zone to create a healthy, comfortable, and energy-efficient environment. Previous studies have shown that maintaining temperature and humidity within an optimal range (typically 20–24°C and 40–60% relative humidity) improves students' concentration and cognitive performance. In hot and dry climates, incorporating shading devices, high thermal mass materials, and natural ventilation is essential. In cold regions, insulation and passive solar heating are critical, while in humid climates, effective ventilation systems and moisture control are necessary. Moreover, building orientation, window design, access to natural light, ceiling height, construction materials, and ventilation systems play a key role in enhancing environmental quality. The use of modern technologies such as double- or triple-glazed windows and intelligent ventilation systems also contributes to energy optimization. The article concludes that considering climatic characteristics in the design of educational facilities not only ensures thermal comfort and student well-being but also enhances learning outcomes and promotes sustainable development. Therefore, climate-responsive design must be prioritized in the planning and construction of educational environments.

Keywords:
Climatic parameters; Educational facilities; Thermal comfort; Temperature and humidity; Architecture

پیش‌بینی تغییر اقلیم در شمال ایران تحت سناریوهای CMIP6

نازیلا مختاریان

چکیده

تغییرات اقلیمی یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی در دهه‌های اخیر است که تأثیرات آن در بسیاری از مناطق جهان از جمله ایران، به‌ویژه در نواحی شمالی، مشاهده می‌شود. این مطالعه به بررسی پیش‌بینی‌های تغییرات دما و بارش در شمال ایران با استفاده از داده‌های مدل‌سازی اقلیمی CMIP6 و سناریوهای مختلف(SSP1-2.6) ، SSP2-4.5، SSP3-7.0و (SSP5-8.5 می‌پردازد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش دما و تغییرات در الگوی بارش می‌تواند تأثیرات قابل‌توجهی بر منابع آبی، کشاورزی و اکوسیستم‌های منطقه داشته باشد. در نهایت، این تحقیق بر اهمیت اتخاذ سیاست‌های مدیریت منابع طبیعی و برنامه‌ریزی اقلیمی تأکید دارد.

کلیدواژه‌ها: تغییر اقلیم، مدل‌سازی اقلیمی، CMIP6، شمال ایران، پیش‌بینی دما و بارش

۱- مقدمه

تغییر اقلیم یکی از چالش‌های مهم زیست‌محیطی در قرن ۲۱ است که تأثیرات گسترده‌ای بر منابع آب، کشاورزی، اکوسیستم‌ها و زندگی انسان‌ها دارد. ایران به دلیل موقعیت جغرافیایی و اقلیم خشک و نیمه‌خشک به‌شدت در معرض تغییرات اقلیمی قرار دارد .ابزارهای مهمی برای درک روند تغییرات اقلیمی در آینده هستند CMIP6 مدل‌های جهانی تغییر اقلیم مانند

تحقیقات پیشین نشان داده‌اند که تغییرات اقلیمی در ایران ممکن است به تغییرات قابل‌توجهی در الگوهای بارش و دما منجر شود. برخی پژوهش‌ها تأکید کرده‌اند که افزایش دما و تغییر در میزان بارش می‌تواند تأثیر زیادی بر منابع آبی، کشاورزی و زیست‌محیطی منطقه داشته باشد (نادری و همکاران، ۲۰۲۰؛ حسینی و همکاران، ۲۰۱۹).

منطقه مورد مطالعه

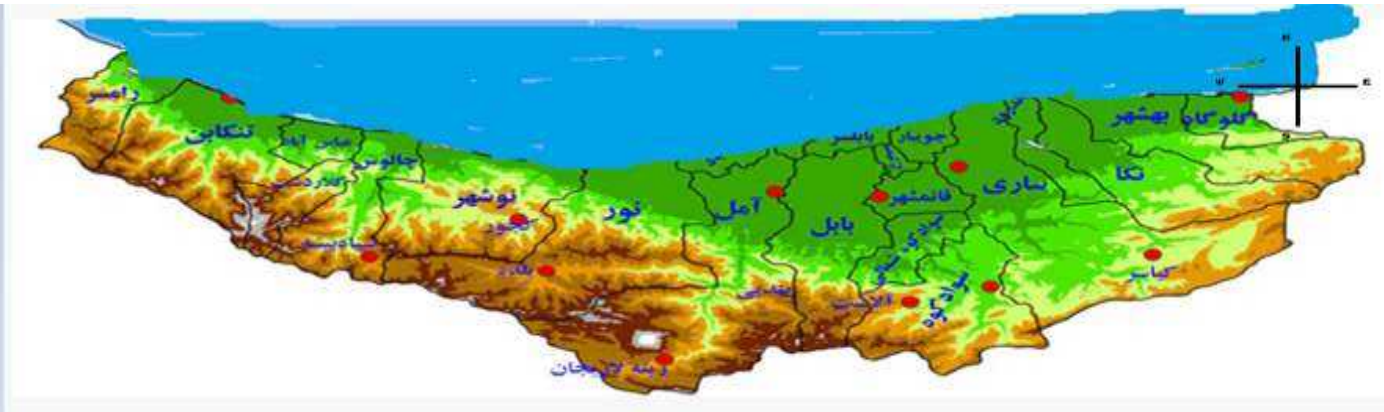
منطقه شمال ایران که شامل استان‌های گیلان، مازندران و گلستان است، به دلیل قرارگیری در کنار دریای خزر و وجود رشته‌کوه‌های البرز، اقلیم منحصربه‌فردی داردشمال ایران دارای آب‌وهوای معتدل و مرطوب با بارندگی بالا، زمستان‌های معتدل و تابستان‌های گرم و شرجی است. این ویژگی‌ها آن را به منطقه‌ای سرسبز و حاصلخیز با تنوع زیستی بالا تبدیل کرده است و تغییر اقلیم دراین منطقهدرطی چندین ساله بسیار تاثیرگذار است.

طبق جدول شماره یک موقعیت شهر و منطقه و ایستگاه های هواشناسی درشمال ایران مشخص شده است

جدول شماره ۱-موقعیت ایستگاه های هواشناسی درشمال ایران

شهر	نوع ایستگاه	طول جغرافیایی (شرقی)	عرض جغرافیایی (شمالی)	ارتفاع از سطح دریا (متر)
رشت	سینوپتیک	"۳۵.۸ '۳۷ ۴۹°	"۱۹.۶ '۱۲ ۳۷°	۸.۶-
انزلی	سینوپتیک	"۳۷.۱۷ '۲۷ ۴۹°	"۴۶.۸۵ '۲۸ ۳۷°	۲۳.۶-
رامسر	سینوپتیک	"۵.۵ '۴۰ ۵۰°	"۳۲.۵ '۵۴ ۳۶°	۲.۴
گرگان	سینوپتیک	"۴۴ '۲۶ ۵۴°	"۲۲ '۵۰ ۳۶°	۱۶۰

شکل شماره ۱- نقشه موقعیت منطقه مورد بررسی شده درشمال ایران



۲- مواد و روش‌ها

داده های مدل cmip6 وروش تحلیل آنها

در این تحقیق برای نیل به اهداف مراحل ذیل دنبال گردید:

الف) برای محاسبه وبررسی تغییر اقلیم ازدماوبارش ودمای کمینه وبیشینه دریکدوره تاریخی۳۵ ساله و دوره‌های زمانی (۲۰۱۵-۱۹۸۰)استفاده شده است.

ب) برای بررسی روند تحلیل داده‌ها با استفاده از روش‌های آماری و آزمون‌های من-کندال و همبستگی پیرسون انجام شده است

ج) دراین روش با کمک سناریوهای

ssp5-8/5,ssp3-7/5,ssp2-4/5,Ssp1-2/۵ برای دوره (۲۱۰۰-۲۰۱۵)مواردموردبررسی قرار گرفت .

د) برای تحلیل فصلی ازدمای بیشینه وکمینه تحت سناریوهای مختلف دربازه زمانی (۲۰۱۵-۲۱۰۰)انجام گرفت

درانتها به کمک نرم افزار SIGتحلیل مکانی منطقه مورد نظر انجام شد.

۳- نتایج و بحث

در سد ه ها ی اخیر روند اقلیم در مقایسه با مسیری که در گذشته طی کرده است، متفاوت میباشد که سبب ایجاد مبحث ها ی تغییر اقلیمی شده است مطالعات مبتنی بر مدلهای اقلیمی در ایران نشان داده اند

که سناریوهای مختلف انتشار گازهای گلخانه ای تأثیر زیادی بر آینده تغییرات دمایی وبارش داشته اند.

مطالعات نشان میدهند افزایش میانگین دما در ایران حدود ۲. تا۴. درجه سانتیگراد در هر دهه است.

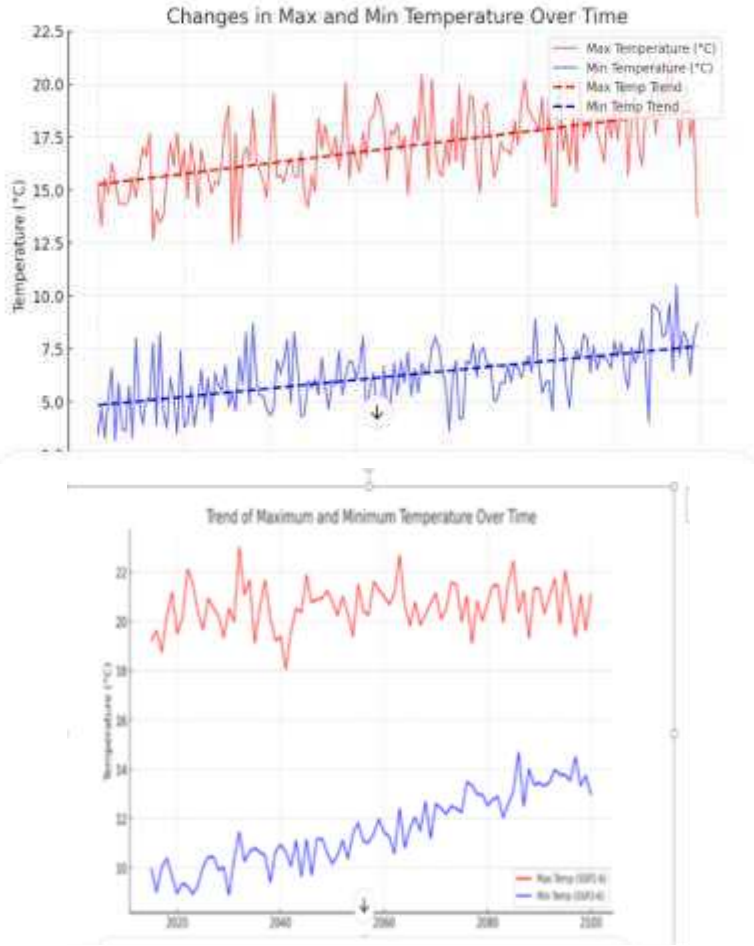
پیش بینی Cmip6 نشان میدهندکه افزایش دمای کمینه وبیشینه تا پایان قرن ۲۱ بین۳تا۶درجه افزایش یافته است.

مدلهای

میزان بارش در بسیاری از نقاط کشور، به‌ویژه در نواحی مرکزی و شرقی، روند کاهشی داشته است -

مدل‌های اقلیمی پیش‌بینی می‌کنند که نوسانات بارشی افزایش می یابد، که می‌تواند منجر به بارش‌های ناگهانی و دوره‌های خشکسالی شود دما در طول زمان به طور معناداری۰.۱۶درجه افزایش یافته است و بارش در طول زمان حدود ۰.۰۵کاهش معناداری داشته است

نمودار شماره ۱و۲ -میانگین دما بررسی شده وبیشترین و کمترین دما درشمال ایران



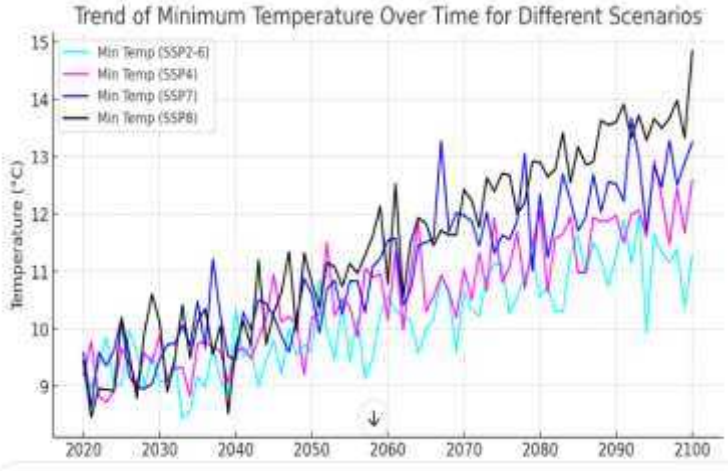
طبق نمودار۱و۲ نرخ بارش و تغییرات دما درشمال ایران رابطه بین دما ومیزان بارش ودمای کمینه وبیشینه نتایج نشان میدهند

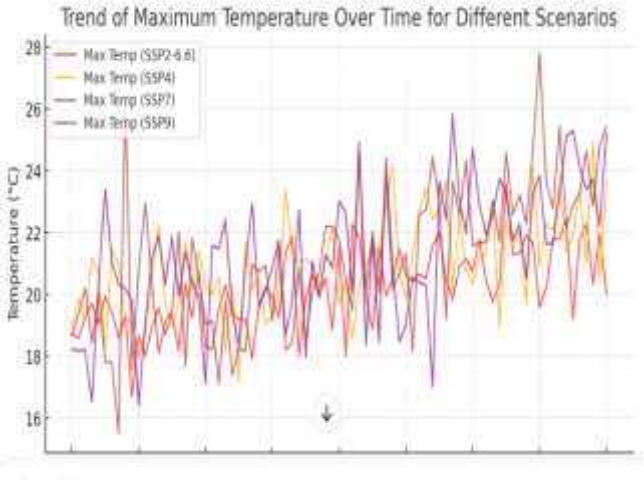
که با افزایش دما، بارش کاهش می یابد وبارش در دوره های گرمتر، کمتر است

ازطرفی دمای بیشینه و کمینه هر دو در طول زمان افزایش یافته اند روند افزایش دما کم است، اما ثابت و مشخص است به طوری که این میزان برای دمای بیشینه حدود۰.۱۲ درجه سانتیگراد وبرای دمای کمینه ۰.۱۳درجه سانتیگراد می باشد.

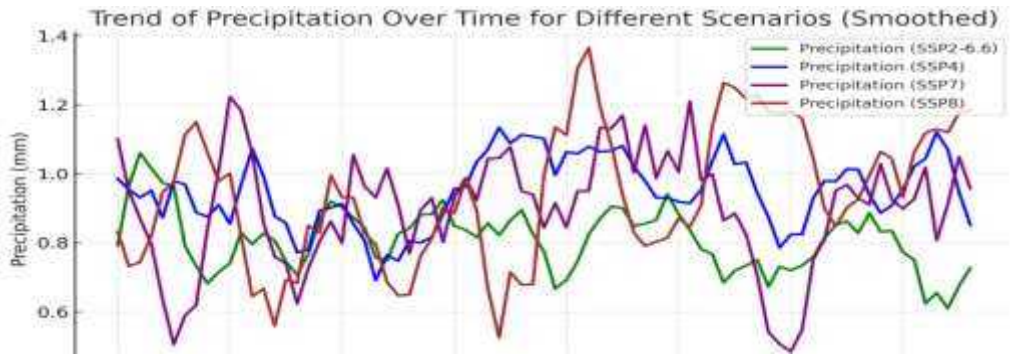
نمودار شماره ۳و۴ نرخ تغییر سالانه دما (حداکثر و حداقل) و بارش در شمال ایران تحت سناریوهای CMIP6 (SSP1- مختلف

SSP5-8.5) و SSP3-7.0، SSP2-4.5، 2.6).





نمودار شماره۵ بررسی میزان بارش تحت سناریو های مختلف

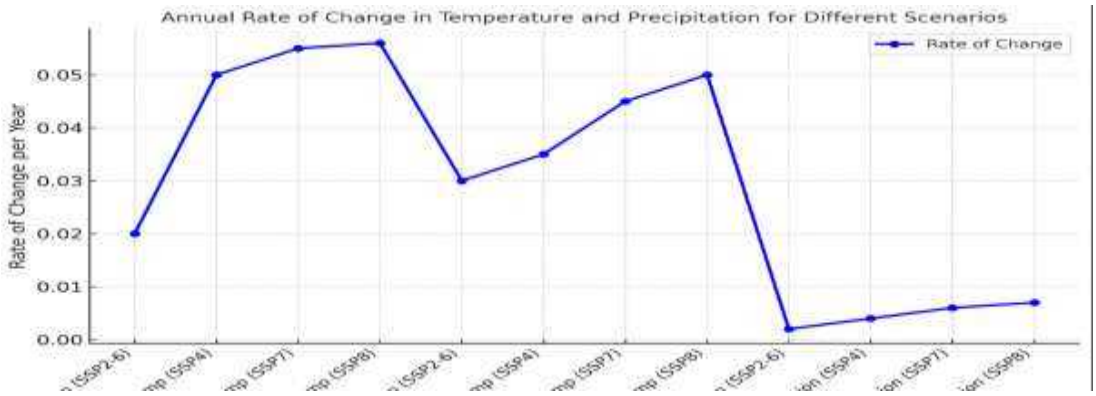


تحت سناریوهایSSP1-2.6افزایش دمادرشمال ایران حدود ۱.۵ تا۲ درجه خواهد بود.

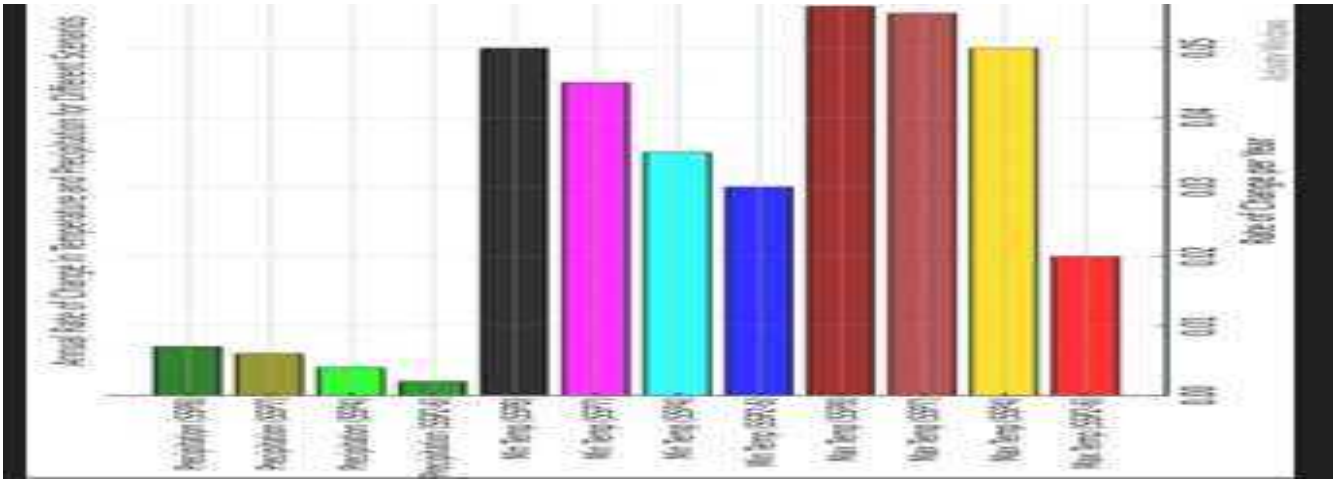
تحت SSP3-4.5 دمای بیشینه ۲.۵ درجه ودمای کمینه بین۲.۵تا۳.۵ درجه افزایش بیشتری داشته که نشان دهنده سناریوی

کاهش موج سرمایی است.

نمودار شماره۶- روند دما و بارش سالانه با توجه به تغییرات تحت سناریو های مختلف



نمودار شماره ۷-نرخ تغییر سالانه دما (حداقل و حداکثر) و بارش تحت سناریوهای SSP



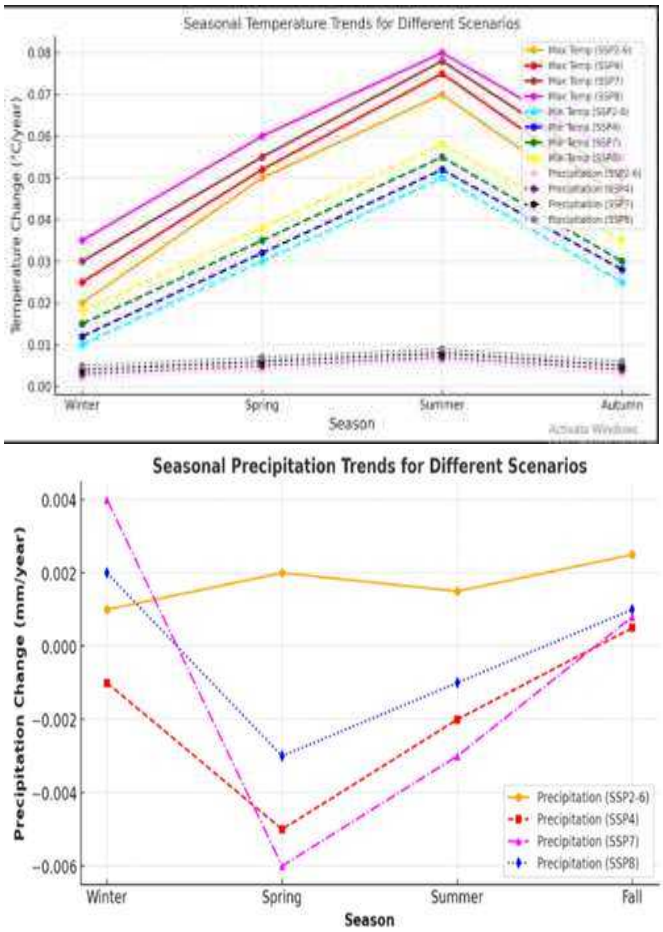
با توجه به نمودار شماره۷ میزان دما در سناریوهای مختلف بررسی شده است.

تحت سناریوی SSP5-8.5دمای میانگین تا۵ درجه افزایش می یابد وزمستان های سرد تقریبا ازبین خواهندرفت

کاهش بارندگی سالانه ممکن است به ۳۰ درصد برسد که تأثیرات منفی بر منابع آبی خواهد داشت.

سیاست‌های مدیریت منابع آبی و برنامه‌ریزی اقلیمی برای کاهش اثرات تغییر اقلیم در شمال ایران ضروری است

نمودار شماره۸و۹ تغییرات فصلی دما و بارش با توجه به سناریوهای مختلف



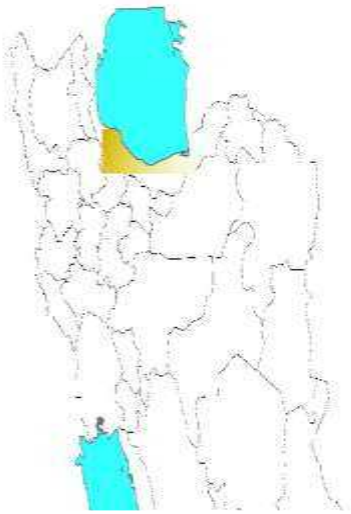
.طبق نمودار شماره ۸و۹ موارد دما و بارش درفصول مختلف سالیانه در شمال ایران بررسی شده است.

تحت سناریوی SSP1-2.6 دمای حداکثر و حداقل به ترتیب در تابستان به اوج میرسند و در زمستان

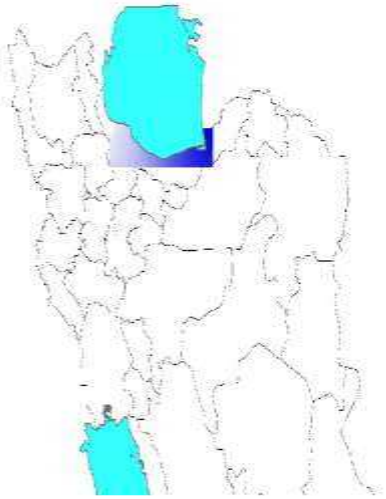
کمترین مقدار خود میرسند، که روندی طبیعی برای یک چرخه فصلی است به طوری که درفصل بهار افزایش دما (اسفند تاخرداد)ودرفصل تابستان بیشترین دما(تیر ومرداد)ودرفصل پاییزکاهش دما(شهریور تاآذر) ودرزمستان کمترین دما(دی –بهمن) اتفاق میافتد

به طورکلی درسناریوی SSP5-8.5 بیشترین رشد دما راداریم دمای کمینه درحال افزایش خواهد بود وبه معنی افزایش شبهای گرمتر است

تصاویر شماره ۱-دما و بارش تحت سناریو SSP-8.5



TEMPERATURE8.5



Precipitation8.5

تصاویر شماره ۲-دما و بارش تحت سناریو SSP-۲.۶

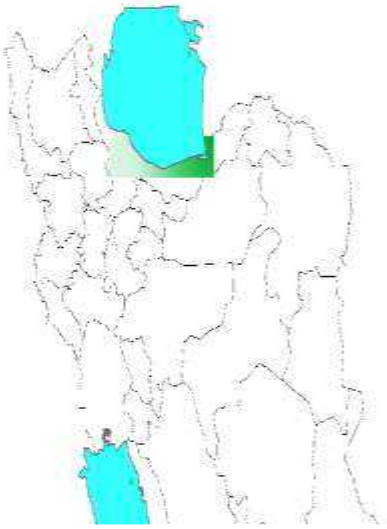


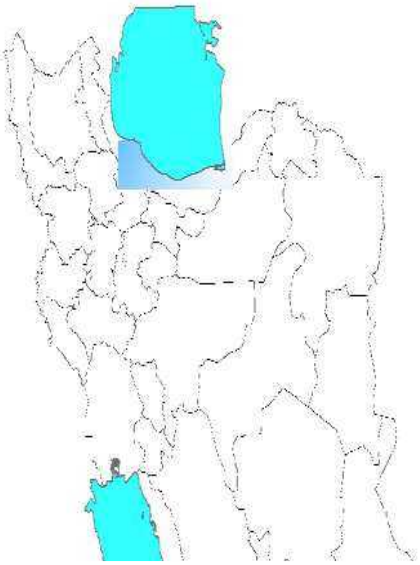
Precipitation2.6

TEMPERATURE2.6



تصاویر شماره ۳-دما و بارش تحت سناریو SSP-۴.۵

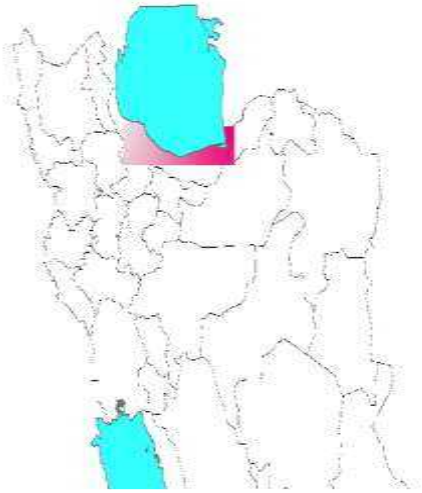


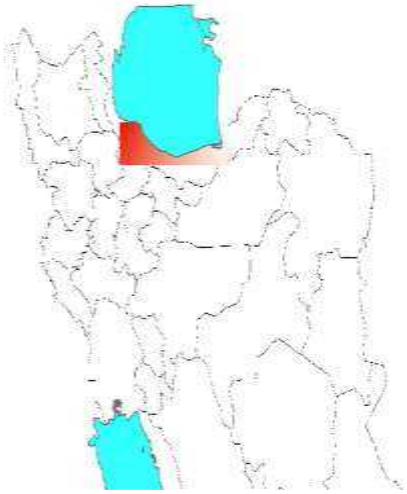


Precipitation4.5

TEMPERATU4.5

تصاویر شماره ۴-دما و بارش تحت سناریو SSP-۷.۶





TEMPERATURE7.6

Precipitation7.6

نتیجه گیری:

شمال ایران در برابر تغییر اقلیم آسیبپذیر است و بسته به شدت انتشار گازهای گلخانهای، تغییرات چشمگیری در الگوی دما و بارش تا پایان قرن بیستویکم رخ خواهد داد. تحت سناریوهای خوشبینانه، تغییرات نسبتاً محدود بوده و امکان

سازگاری با آن وجود دارد. اما در سناریوهای بدبینانه، افزایش دما و کاهش بارش میتواند منجر به بحران آب، تهدید کشاورزی، افزایش رخدادهای حدی (سیلاب، خشکسالی، طوفان) و تهدید اکوسیستمهای طبیعی شود. بنابراین، اتخاذ سیاستهای سازگاری، مدیریت منابع آب، اصلاح الگوی کشت و توسعه راهبردهای کاهش انتشار گازهای گلخانهای برای کاهش پیامدهای تغییر اقلیم در شمال ایران ضروری است

باتوجه به تحلیل های انجام شده درمحدوده شمال ایران تحت سناریوی خوش بینانه انتشار گازهای گلخانه ای

وگرمایش جهانی تاسال ۲۱۰۰کمترازدو درجه باقی می ماند و میزان بارندگی کاهش جزئی دارد، اما الگوی بارش تغییر میکندوبارشها منظمتر از سناریوهای دیگر خواهد بود.

وتحت سناریو میانه دما حدود ۰.۲ تا ۳ درجه افزایش مییابد روزهای بسیار گرم بالای ۳۲ درجه بیشتر خواهد شد ومیزان بارش سالانه ۱۰تا۲۰ درصدکاهش یافته وافزایش خطر خشکسالی در تابستانها وجود دارد.

تحت سناریوی بدبینانه انتشار گازهای گلخانه ای شدید است و گرمایش جهانی به۴تا۵ درجه می رسد وکاهش ۳۰ درصدی

بارش, بارش های ناگهانی و طوفان های شدید افزایش مییابند، اما خشکسالی های طولانی تر بیشتر میشودمنابع آبی زیرزمینی کاهش مییابد، که باعث افت کیفیت آب و بحران آب خواهد شد.

منابع

نادری، الف.، و همکاران. (۲۰۲۰). تأثیر تغییرات اقلیمی بر منابع آب در ایران. مجله اقلیم‌شناسی ایران، ۱۲(۲)، ۱۱۰-۱۲۵.۱

۲.حسینی، ب.، و همکاران. (۲۰۱۹). تحلیل روند دمایی ایران بر اساس مدل‌های اقلیمی. نشریه پژوهش‌های جغرافیایی، ۱۵(۱)، ۹۰-۷۵.

۳- IPCC (2021). Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge University Press.

۴- Collins, M., et al. (2019). CMIP6 Climate Models and Their Projections. Journal of Climate Science, 32(4), 765-790.

سومین کنفرانس ملی آب و هواشناسی ایران (با محوریت تغییر اقلیم)
The 3rd National Conference on Climatology of Iran (Focusing on Climate Change)
ارومیه ۱۶ مهر ۱۴۰۴

ترازمندی آب و هواشناختی حوضه اورمیه

ابوالفضل مسعودیان

استاد دانشگاه اصفهان

اگر از دیدگاه یک آب و هواشناس به پدیده خشکیدن یا خشکاندن دریاچه اورمیه نگاه کنیم شاید بتوانیم تا اندازه‌ای به این پرسش پاسخ دهیم که آیا دریاچه اورمیه خشکید یا خشکانده شد؟ به بیان دیگر آیا عوامل طبیعی نقش برجسته‌تری در ناپدید شدن دریاچه اورمیه داشته‌اند یا دخالت‌های انسان در چرخه آب به ناپدید شدن دریاچه انجامید؟ برای پاسخگویی به این پرسش باید عناصر اصلی ترازمندی آب دریاچه را در حوضه آبی اورمیه بررسی کرد. اگر دریاچه را انباره‌ای آبی در نظر بگیریم که بارش حوضه منبع اصلی تأمین آب دریاچه و دمای حوضه به دلیل نقشی که در تبخیر دارد منبع اصلی پـرتِ آب دریاچه است آنگاه ترازمندی بین بارش و تبخیر به عنوان درونداد و برونداد این انباره باید بتواند تغییرات حجم آب این انباره را تبیین کند. گرچه مداخله های انسانی در جریان آب رودخانه های حوضه با اهمیت است اما این بررسی نشان داد که تغییرات دما و بارش نقش بسیار برجسته ای در ترازمندی آب حوضه داشته اند و در نتیجه خشکیدن یا خشکاندن دریاچه اورمیه را باید از این منظر نیز نگریست. چنان که در طی چند سده گذشته چندین دریاچه در جای جای ایران خشکیده اند و کفه های نمکی به جا مانده از آنها شاهد جغرافیایی این تغییرات محیطی است.

کلمات کلیدی: ترازمندی آب، حوضه اورمیه، بارش

ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی با مدل سازی و تحلیل پارامترهایEC و pH

زهرا ابوالحسینی[۱]، سعید علیزاده[۲]

۱- دانشجوی کارشناسی رشته علوم و مهندسی محیط زیست، بخش منابع طبیعی و محیط زیست، دانشکده کشاورزی دانشگاه شیراز، شیراز، ایران،
۲- دانشجوی دکتری آبخیزداری، گروه منابع طبعی و آبخیزداری، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران،
za.abolhosseini@gmail.com

چکیده

مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی و کاهش مخاطرات زیست‌محیطی، مستلزم پایش و تحلیل دقیق کیفیت آب است. در این پژوهش، هدایت الکتریکی (EC) و اسیدیته (pH) به‌عنوان شاخص‌های کلیدی کیفیت آب زیرزمینی در منطقه مورد مطالعه بررسی شدند. داده‌های حاصل از نمونه‌برداری چاه‌های زیرزمینی با بهره‌گیری از دو روش درونیابی وزن‌دهی معکوس فاصله (IDW) و کریجینگ معمولی تحلیل شدند تا توزیع مکانی این پارامترها مدل‌سازی شود. هدف اصلی، ارزیابی و مقایسه دقت این دو روش درونیابی در پیش‌بینی الگوهای فضایی پارامترهای کیفی بود. برای سنجش عملکرد مدل‌ها، از معیارهای ریشه میانگین مربع خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE) و ضریب تعیین (R^2) استفاده شد. یافته‌ها حاکی از برتری روش کریجینگ، به‌ویژه در مدل‌سازی EC، در ارائه تخمین‌های دقیق‌تر و الگوهای فضایی معتبرتر نسبت به روش IDW بود. نقشه‌های پهنه‌بندی حاصل از این پژوهش، ابزار مؤثری برای تصمیم‌گیری در راستای بهینه‌سازی شبکه‌های پایش و مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی ارائه می‌دهند.

کلید واژه ها: آب زیرزمینی، زمین آمار، کیفیت آب، میزان اسیدیته، هدایت الکتریکی.

مقدمه

منابع آب زیرزمینی منبع اصلی تأمین آب شرب بسیاری از مردم در سرتاسر جهان میباشند. منابع آب زیرزمینی، سهم به سزایی در تامین آب مورد نیاز بخش کشاورزی، شرب و صنعت در ایران دارد (Majdabady Pahlevani et al. 2019, Ahmadi et al. 2015, Ahmadi et al. 2012, Rasoulzadeh and Moosavi 2007). بر همین اساس کاهش کیفی و کمی منابع آب زیرزمینی در اثر ورود آالاینده ها و برداشت غیرمجاز، موجب اثرات مخربی مانند افزایش شوری منابع آب زیرزمینی و اراضی کشاورزی مجاور آن، فرونشست سطح زمین و ... شده است که عمدتاً برای جبران آن ممکن است به ده ها سال وقت نیاز باشد. (رهنمای رهسپار همکاران، ۱۳۹۴؛ زارعی و همکاران، ۱۳۹۹؛ غفاری و همکاران، ۱۳۹۷). همچنین به دلیل غیرقابل مشاهده بودن آبهای زیرزمینی، بسیاری از افراد جامعه در رابطه با اهمیت آب زیرزمینی و پیامد مضر آلودگی آنها اطلاعات کافی ندارند (Davis et al, 1994.).بنابراین از آنجایی که سهم منابع آب زیرزمینی شیرین از کل آب موجود در

جهان اندک است، نگهداری از این منابع از لحاظ کمی و کیفی مهم و ضروری میباشد. در صورت آلودگی این منابع، بایستی منبع آلودگی شناسایی و جلوی گسترش عوامل آلوده کننده گرفته شود. علیرغم اینکه با وجود پیشرفت تکنولوژی و افزایش تخصص منابع انسانی، آب و منابع آبی همچنان برای بشر به طور کامل شناخته نشده است، اما خوشبختانه در سال های اخیر مطالعات علمی_پژوهشی بسیاری در رابطه با منابع آب زیرزمینی صورت گرفته که نقش بسزایی در بهبود نحوه عملکرد و همچنین بهبود روند مدیریت این منابع ارزشمند ایفا میکنند. پژوهشگران در سرتاسر جهان برای بررسی و ارزیابی کیفیت آب زیرزمینی از روش های مختلف استفاده کرده اند. برخی از این روش ها شامل استفاده از انواع مدل ها و نرم افزارها، روش های آماری، انواع نمودارها و طبقه بندی ها می باشند.

استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی(GIS) و مدل های زمین آماری آن سابقه زیادی در بررسی و پهنه بندی پارامترهای شیمیایی آب زیرزمینی دارند(Hassany pak, 2010; Rajaei, 2011; Arsalan, 2012). این روش ها امکان درک بهتر از تغییرات مکانی پارامترهای کیفی آب را فراهم می کنند و می توانند به عنوان ابزاری موثر در مدیریت بهینه منابع آب مورد استفاده قرار گیرند. از بین روش های مختلف زمین آمار، دو روش کریجینگ و وزن معکوس فاصله(IDW)، از جمله روش های رایج و همچنین کاربردی در بحث بررسی، پهنه بندی و بهینه سازی کیفیت منابع آب زیرزمینی هستند.

روشهای مختلف کریجینگ و وزن معکوس فاصله(IDW) با توانهای مختلف دو مدل از روشهای مختلف زمین آمار هستند که توسط برخی از محققان در بررسی ساختار مکانی و نحوه پراکندگی پارامترهای شیمیایی موجود در آبهای سطحی و زیرزمینی استفاده شده اند.

شهرستان کازرون یکی از شهرستان‌های مهم استان فارس در جنوب غربی ایران است. این شهرستان به دلیل موقعیت جغرافیایی و شرایط اقلیمی خاص خود، دارای آب و هوای متنوع و منحصر به فردی است که بررسی و تحلیل آن می‌تواند اطلاعات ارزشمندی را برای ساکنین، کشاورزان و محققان ارائه دهد. شهرستان کازرون از شمال با شهرستان ممسنی، از شرق با شهرستان شیراز هم‌مرز است. موقعیت جغرافیایی کازرون باعث شده است تا این شهرستان در منطقه‌ای با توپوگرافی متنوع قرار گیرد که شامل دشت‌ها، تپه‌ها و کوهستان‌ها می‌شود. بر اساس مطالعات انجام شده، اقلیم کازرون به طور کلی نیمه‌خشک تا خشک طبقه‌بندی می‌شود.تغییرات اقلیمی جهانی نیز تاثیرات خود را بر شهرستان کازرون گذاشته است. افزایش دمای زمین و تغییرات الگوهای بارندگی می‌تواند تاثیرات منفی بر کشاورزی و منابع آبی این شهرستان داشته باشد. کاهش بارندگی‌ها و افزایش دما می‌تواند منجر به کاهش منابع آبی و خشکسالی در مناطق مختلف کازرون شود که این امر، اهمیت بررسی و بهینه سازی مدیریت منابع آب به ویژه آب های زیرزمینی را افزایش میدهد.

مواد و روش ها:

روش‌های زمین‌آماری به‌عنوان ابزارهایی قدرتمند برای تحلیل داده‌های مکانی و پیش‌بینی مقادیر متغیرهای محیطی در نقاط فاقد اندازه‌گیری، می باشند. در پژوهش حاضر، به‌منظور بررسی پایش کیفیت آب زیرزمینی، از دو تکنیک رایج

درون‌یابی فضایی شامل وزن‌دهی معکوس فاصله و کریجینگ معمولی استفاده گردید. روشIDW یک درون‌یابی قطعی است که با فرض تأثیر نقاط نمونه‌برداری بر مقادیر ناشناخته، که با افزایش فاصله کاهش می‌یابد استوار است؛ بنابراین، مقادیر در نقاط فاقد نمونه‌برداری بر اساس میانگین وزنی نقاط نزدیک‌تر، با وزنی معکوس فاصله، تخمین زده می‌شوند. در مقابل، کریجینگ معمولی یک روش زمین‌آماری بهینه می باشد که با بهره‌گیری از ساختار خودهمبستگی فضایی داده‌ها به پیش‌بینی مقادیر در نقاط ناشناخته می‌پردازد؛ به طریقی که واریانس خطای پیش‌بینی به حداقل کاهش یابد. این نگرش، به دلیل قابلیت مدل‌سازی آماری و ارائه برآوردهای بی‌طرفانه با حداقل واریانس، می تواند یکی از دقیق‌ترین و پرکاربردترین روش‌های زمین‌آماری در تحلیل‌های مکانی و مدل‌سازی محیطی شناخته شود.

پژوهش پیش رو با هدف ارزیابی وضعیت کیفی آب‌های زیرزمینی، بر دو شاخص مهم هدایت الکتریکی و اسیدیته متمرکز شده است. منطقه مطالعاتی دشت کازرون می باشد که در آن، با استفاده از داده های نمونه‌برداری شده از ۱۲۷ حلقه چاه صورت گرفته است. موقعیت مکانی دقیق هر نقطه نمونه‌برداری با استفاده از دستگاه GPS ثبت شده است. پس از جمع‌آوری داده‌ها، تحلیل‌های آماری توصیفی برای بررسی پراکندگی، نرمالیته و روابط احتمالی بین متغیرها انجام شده است. به‌منظور تحلیل فضایی توزیع این پارامترها، از سیستم اطلاعات جغرافیایی بهره‌برداری گردید. داده‌ها پس از ورود به محیط نرم‌افزار ArcGIS، با به‌کارگیری روش زمین آمار، کریجینگ عادی، به نقشه‌های توزیع مکانی EC و pH تبدیل شدند. انتخاب بهینه مدل برازش بر اساس بررسی واریوگرام‌ها و معیارهایی چون ریشه میانگین مربعات خطا انجام گردید.

در نهایت، با تلفیق یافته‌های آماری و نقشه‌های فضایی، مناطق با کیفیت بحرانی آب زیرزمینی شناسایی و پیشنهاداتی برای بهبود سیستم پایش کیفیت آب در منطقه ارائه شدند. برای بررسی و بهینه سازی شبکه پایش کیفی آب زیرزمینی به روش زمین آمار، در این مطالعه دو روش کلی کریجینگ و وزن دهی عکس فاصله مد نظر قرار گرفته است.

روش IDW (Inverse distance weighting) یا همان "درون‌یابی با وزن‌دهی معکوس فاصله"، یک روش درون‌یابی است که برای تخمین مقادیر یک سطح پیوسته در مکان‌های نمونه‌برداری نشده، با استفاده از مقادیر نقاط نمونه اطراف استفاده می‌شود. اساس این روش بر این اصل استوار است که تأثیر نقاط نزدیک‌تر در تخمین مقدار یک نقطه ناشناخته بیشتر است.

همچنین روش Kriging Oridinary عمومی ترین و پرکاربردترین روش مورد استفاده در بین انواع روشهای موجود این مدل دورن یابی است. این روش از داده‌های موجود در نقاط نمونه‌برداری شده برای پیش‌بینی مقدار در نقاط دیگر استفاده می‌کند، با این فرض که تغییرات فضایی مقادیر از یک مدل آماری پیروی می‌کنند. در این روش خطای مقادیر پیش بینی شده را با توجه به توزیع فضایی داده های پیش بینی شده کمینه می کنند .

گردآوری داده‌ها

داده‌های مورد استفاده شامل اندازه‌گیری هدایت الکتریکی (EC) و pH نمونه‌های آب زیرزمینی برداشت‌شده از چاه‌های موجود در شهرستان کازرون در دوره زمانی مشخص می‌باشد. داده‌ها پس از کنترل کیفیت اولیه و حذف داده‌های پرت (Outliers)، به منظور تحلیل مکانی وارد محیط نرم‌افزار GIS گردیدند.

تحلیل زمین‌آماری

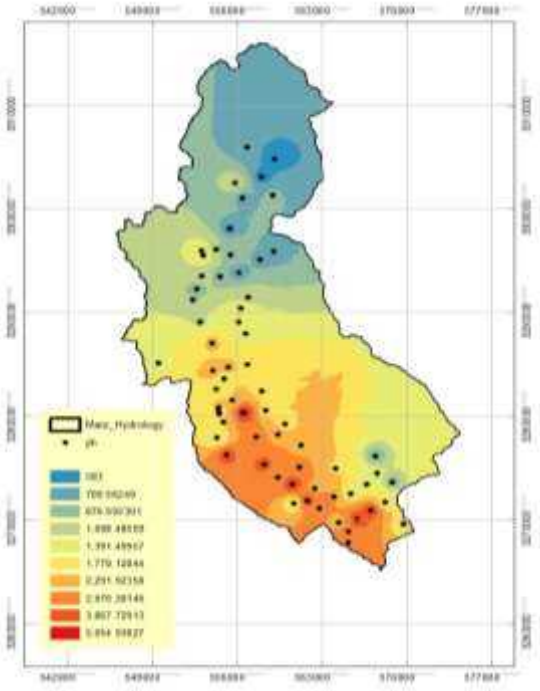
ابتدا با تحلیل واریوگرام، ساختار مکانی داده‌ها بررسی و بهترین مدل برازش داده شد (مدل‌های کروی، نمایی یا گوسی بسته به نتایج تحلیل). سپس با استفاده از روش‌های درونیابی انتخاب‌شده IDW و Ordinary Kriging، نقشه‌های پراکنش مکانی EC و pH تهیه گردید.

اعتبار سنجی مدل ها

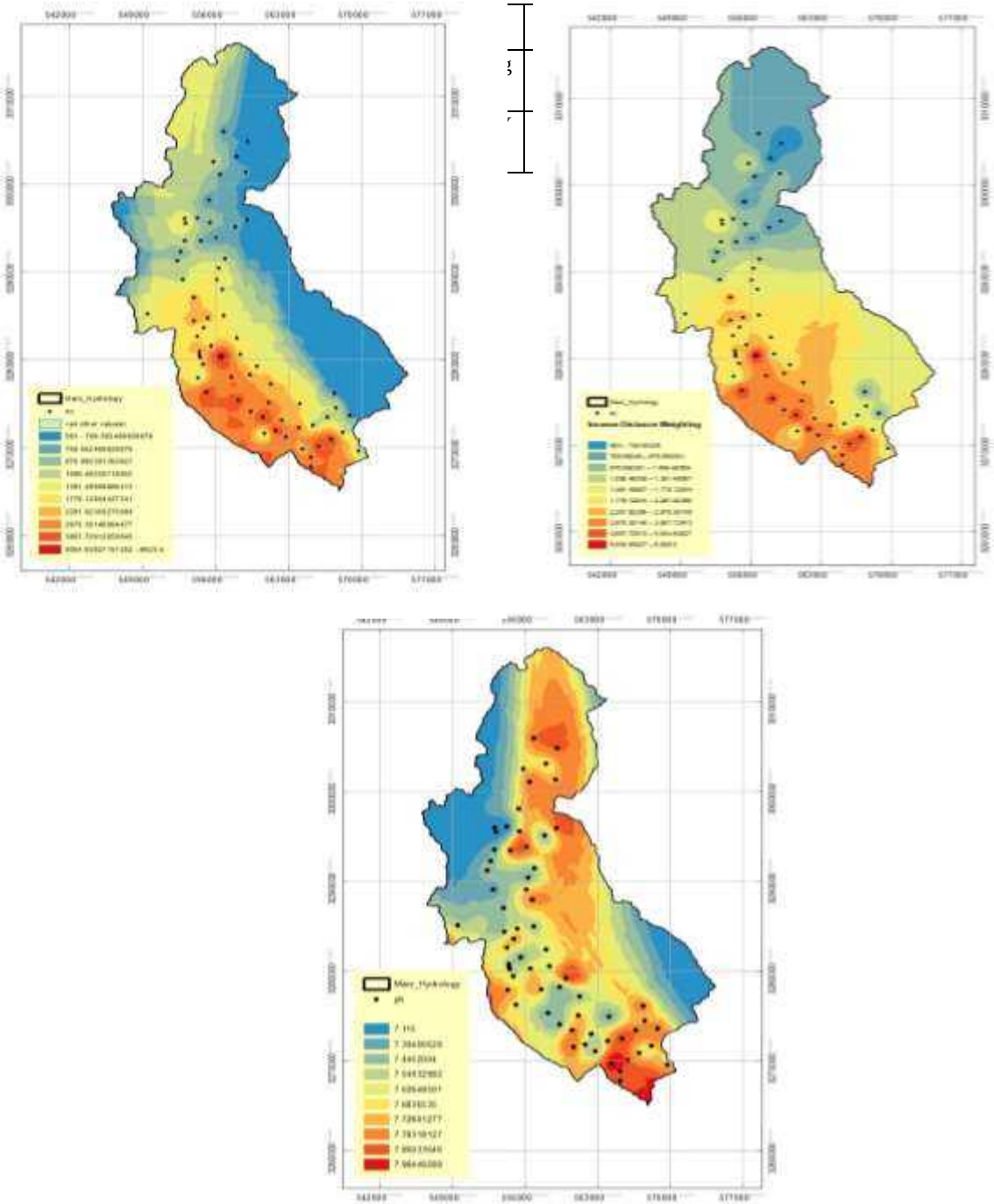
به منظور ارزیابی دقت روش‌های درونیابی، از روش اعتبارسنجی متقابل (Cross-validation) استفاده شد (Kingsbury et al., 2021). معیارهای آماری نظیر میانگین خطای مطلق (MAE) (Webster & Oliver, 2007) ، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) (Babak & Deutsch, 2009)و ضریب تعیین (R^2) (Li & Heap, 2014) برای مقایسه کارایی روش‌های مختلف محاسبه گردید.

تهیه نقشه ها به دو روش آماری

در ادامه و به منظور انتخاب بهترین روش در تعیین کیفیت آب، هر دو پارامتر EC و PH به دو روش آماری و همانطور که پیش از این توضیح داده شد، ابتدا نقشه های مربوط به پارامتر PH (شکل ۱و۲) و سپس نقشه های مربوط به پارامتر EC (شکل ۳و۴) تهیه شد و مقایسه اماری بین هر دو روش برای پارامتر های مذکور تهیه و تحلیل شد. (جدول ۱و۲)



- نقشه پارامتر PH به روش KRIGING ORDINARY



شکل ۳ و ٤- نقشه پارامتر EC به روش IDW (سمت راست) – نقشه پارامتر EC به روش KRIGING ORDINARY

نتیجه گیری

نتایج حاصل از پژوهش حاکی از آن است که پارامترهای ذکر شده میتوانند شاخص موثری در تحلیل کیفی آب زیزمینی در منطاق مختلف باشند (Hammouri et al., 2014). نقشه برآوردی از تغییرات هدایت الکتریکی بیان کننده اثرات فعالیت های کشاورزی است که شوری رو به افزایش است. در نقطه مقابل تغییرات اسیدیته عمدتا در بازه نرمال را نشان می دهد هر چند نوسانات محلی به شکل قلیایی و اسیدی قابل رویت است. نقشه های حاصله الگوی توزیع مکانی این پارمترها را به خوبی نشان می دهند و شناسایی مناطق با ریسک بالاتر مهیا می شود. لذا بهینه سازی تعداد چاهها و مدیریت اراضی کشاورزی می بایست بر مناطق بحرانی انجام شود.در پایان تحقیق پیش رو بر اهمیت پایش مداوم کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از تحلیل های مکان محور تاکید دارد

منابع

۱- امیری، و.، (۱۳۹۹). بهینه سازی شبکه پایش کیفی آب با استفاده از روش زمین آماری. نشریه علمی خشک بوم. جلد ۱۰. (۲). ۵۲-۳۷

۲- رهنمای رهسپار، ص.، ع. شاهنظری، م. خالدیان و الف. فرقانی. ۱۳۹۴. بررسی میزان آلودگی آبهای زیرزمینی به عناصر سنگین و پهنهبندی آن در منطقه گیالن مرکزی به کمک زمینآمار. نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۹)۱(: ۲۱-۱۳)

۳- صادقیان، م.، رضایی، ح.، بهمنش، ج.، خان محمدی، ن.، (۱۳۹۷). ارزیابی کیفی پارامتر های آب زیرزمینی با استفاده از GIS و زمین آمار (مطالعه موردی: دشت ارومیه)، تحقیقات منابع آب ایران، جلد چهاردهم.(۲). ۲۹۰-۲۹۳

۴- فضابخش، ش.، رسول زاده، ع.، رمضانی مقدم، ج.، اسماعیلیان، م.، (۱۴۰۰). بررسی کیفیت آب زیرزمینی با استفاده از روش های آماری چند متغیره در آبخوان دشت اردبیل، نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، جلد ۱۳.(۵۰). ۳۳۳-۳۵۳

1- Ahmadi, T., A.N. Ziaei, A. Rasoulzadeh, K. Davary, K. Esmaili, A. Izady. 2015. Mapping groundwater recharge areas using CRD and RIB methods in the semi-arid Neishaboor Plain, Iran. Arabian Journal of Geosciences, 8 (5): 2921-2935.

2- Babak, O., & Deutsch, C. V. (2009). Statistical approach to inverse distance interpolation. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 23(5), 543-553.

3- Li, J., & Heap, A. D. (2014). Spatial interpolation methods applied in the environmental sciences: A review. Environmental Modelling & Software, 53, 173-189.

4- Davis, A., J.H. Kempton and A. Nicholson. 1994. Groundwater transport of arsenic and chromium at a historical tannery, Applied Geochemistry, 9, 569-582.

5- Hammouri, N., Al-Amoush, H., Al-Raggad, M., & Harahsheh, S. (2014). Groundwater recharge zones mapping using GIS: a case study in Southern part of Jordan Valley, Jordan. Arabian Journal of Geosciences, 7(7), 2815-2829.

6- Kingsbury, J. A., Bexfield, L. M., Arnold, T., Musgrove, M., Erickson, M. L., Degnan, J. R., & Belitz, K. (2021). Groundwater-quality and select quality-control data from the National Water-Quality Assessment Project, January 2017 through December 2019 (No. 1136). US Geological Survey.
7- Pahlevani Majdabady, M., A. Rasoulzadeh, A. Kanooni, G. Ahmadzadeh. 2020. Estimation of Groundwater Recharge Originating from Agricultural Irrigation and Rainfall in Shyramyn Plain, Iran. Irrigation and Drainage, 69(1): 107-120.
8- Rajaei Q, Mehdinejad M H, Hesari Motlagh S (2011) A survey of chemical quality of rural drinking water of Birjand and Qaen plains, Iran. Journal of Health Systems Research 6:737-745 (In Persian)
9- Webster, R., & Oliver, M. A. (2007). Geostatistics for environmental scientists. John Wiley & Sons.

Implementing climate risk management and water saving strategy to optimize maize yields potential in a changing climate

Babak Mirshekarnezhad[1*], Kamran Hghiabi[2], Toraj Jadidi Dourbash[3], Shahryar Moazedi[4]

1. PhD graduated in Agronomy, Department of Agronomy, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran.

2. PhD student in Agrotechnology, Department of Production Engineering and Plant Genetics, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.

3. Master of Science in Agrometeorology, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran.

4. Master of Science in Climatology Orientation and Environmental Planning, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

* Corresponding author. E-mail address: bob_mirshekar@yahoo.com

Abstract

In this research, Cropping System Model (CSM)-CERES-Maize as a smart system was employed to simulate grain maize components (*Zea mays* L.). The climatic negative impacts showed gradual increase up to 3°C in temperatures and a substantial increase up to nearly 17% in precipitations by the year 2080 compared with the baseline period 2023. The results indicated that 60% decrease in water application caused a reduction about 28% in grain yield by a delay from early to late planting date in current condition. The period 2080 of SRES-A2 under effect of HadCM3 model prediction represented the least amount of grain yield and total biomass in full-stress irrigation treatment (I_{40}) at mid and late planting date. The evaporation rate followed a sigmoidal curve with a slow increase of ETc about 1.54mm then picked at around 16mm after 87 days of planting which specified grain filling period. It lateralized planting corn in early or late May will be more at risk than in late April due to reproductive growth achievement under situations of stress combinations associated with climate change. Overall, planting date variation and proper irrigation pattern as potential moderators of climate change can help optimizing maize productivity under future climate of the Karaj region.

Key words: Crop models, Climate change, Evapotranspiration, Maize productivity, Simulation, Water application

Introduction

Climate change effects will mean that fresh water is falling on a global scale. For Iran with arid climate this tragedy would seriously jeopardize its water reservoirs in some suburban areas. It is therefore important to consider adaptation options that can provide greater resilience to these impacts. The water and agriculture sectors are likely to be most sensitive and hence vulnerable to climate change-induced impacts in arid and semi-arid tropical Asia (Salinger et al., 2005). The predicted global warming along with increasing human

food requirements can be expected to alter the amount of irrigation needed worldwide to ensure food security, probably increasing it by 30% (Doll, 2002). Without improved efficiencies, agricultural water consumption is expected to increase globally by about 20% by 2050 (Bates et al. 2008). Under moderate to medium estimates of rising global temperatures (1 - 3°C), crop climate models predict a small impact on global agricultural production. Unfortunately, there is considerable disagreement over the degree of temperature increase and rainfall variation projected by GCMs. For this reason, some researchers prefer to simply change historical weather data to create future climate data (Ludwig and Asseng, 2006). Changes in climate will interact with adaptations to increase agricultural production affecting crop yields and productivity in different ways depending on the hybrids and cropping systems in a region. Crop simulation models are mathematical representations of plant growth processes

as influenced by interactions among genotype, environment, and crop management. They have become an indispensable tool for supporting scientific research, (Fischer et al., 2000; Hammer *et al.*, 2002). The CERES-Maize model has efficient capability to estimate the adaptation of water scarcity management and planting date variation under different climatic scenarios (Ventrella et al., 2012). Xiong et al. (2007) modeled the potential corn production in China under two climate change scenarios using CERES-Maize. DSSAT model can play a major role in helping to understand the interaction between genotype, environment, and management and to provide alternative management options that increase crop yield and quality, optimize resource use, and minimize environmental impact for long term sustainable production of yields (Abayechaw, 2021). Numerous studies applied the CSM to evaluate different planting dates of canola in Western Australia (Farre et al., 2002) and rice in Cuba (Rivero Vega et al., 2005).

With climate change the weather is proposed to be more variable, hence LARS-WG is a stochastic weather generator which can be used for the simulation of weather data at a single site (Racsko et al, 1991; Semenov et al, 1998; Semenov and Brooks, 1999), under both current and future climate conditions. Farzanmanesh at al. (2012) applied LARS-WG for future time series 2010-2039 based on A1 scenario at 13 synoptic stations and revealed that LARS-WG had a reasonable capability for simulating the minimum and maximum temperatures and precipitation.

The impacts of water stress in crop plants can reduce productivity by 50% in various parts of the world (Lisar et al., 2012). Implementing adaptation strategies that provide multiple benefits can be integrated into current asset management, emergency response planning, capacity development, and other decision-making processes at utilities.

The effective management of Iran water resources has important implications not only for conservation to ensure that the people have enough supply but for the usage of agriculture and energy sectors. Rising temperatures pose to increase open water and soil/plant evaporation. It is essential to apply the simulation models to a spatial unit defined according to use (simulation unit) and then aggregate the results (yield, quantity of water consumed by the crop, etc.) on the desired regional scale (Salinger et al., 2005).

The primary aim of this research is to achieve successful validation of CERES-Maize model for certain growth stages of maize and the second is to protect a course of administrative and regulatory control of water application and planting date variation as agronomic countermeasure against future environmental changes of the Karaj region in Alborz province, Iran.

Materials and Methods

Scan the research area

The state of Karaj with the geographical coordinates of 35° 48' N, 50° 57' E, has been located in around 20km (12mi) west of Tehran, Iran in Alborz province. Based on the meteorological benchmark report this site with 247.3 mm of the mean annual precipitation, 14.4 °C of the mean annual air temperature and 2184 mm of the mean evaporation per annum is classified as an arid and semiarid region.

Field system treatments

Corn growth phenological sampling included seven to eight-leaf stage (Vn), 50% silking (R1), blister (R2), milky (R3), physiological maturity (R6) and harvest stage (R7). The experiment took place at the site of College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, located in Karaj, Iran, from 2022 to 2023. The experimental treatments in split plot format consist of three planting dates in main plots scheduled on (PD_1: 22 April, PD_2:12 May and PD_3: 01 June), and four irrigation regimes of the estimated evapotranspiration (I_{100}: 100%, I_{80}: 80%, I_{60}: 60% and I_{40}: 40%) allocated to the sub plots. At each stage, Soil nutrients data containing total N (0.08%), available P (7.0 mg kg^{-1}) and exchangeable K (203 and 207 mg kg^{-1}) with an EC value of 1.83 dcm^{-1} and pH at a rate of 8.5 measured at a depth of 0-30 cm of the territory soil layer.

Irrigation volume and water productivity assessment

The amount of crop water need was estimated by the Equation 1, (FAO, 1977).

$$\mathbf{ETc = Kc \times ETo} \quad (1)$$

Where, ET_c is crop evapotranspiration (mm d^{-1}), ET_0 is reference evapotranspiration (mm d^{-1}) and K_c is crop coefficient. The amount of water that evaporated during a period corresponds with the decrease in water depth of the pan in that period. On the basis of the FAO Penman-Monteith Method, K_c values (0.3, 1.2 and 0.6) for three maize growth stages were defined as $K_{c\text{-}ini}$, $K_{c\text{-}mid}$, and $K_{c\text{-}end}$ under the given condition (Allen et al., 1998). Water requirements for individual plots measured in gallon weekly then converted to cubic meter (m^3) per week using the Equation 2:

$$\mathbf{In} = \frac{\mathbf{0.623 \times A \times Kc \times ET0}}{\mathbf{IE}} \quad (2)$$

Where, I_n: denotes the volume of irrigation water in gallons per week, 0.623: is the equation constant, A: stands for plot area (sq. ft.), K_c: represents crop coefficient, ET_0: is the reference evapotranspiration in (mm d^{-1}) per day and IE: is the indicator of irrigation efficiency, (Howell, 2003). The irrigation stress treatments started when the plants were at the six-leaf growth stage using counter meter. The total of irrigation volumes computed based on recording weekly evaporation data obtained from auto weather station of Karaj that are presented in Table (1).

Table 1- Total reference evapotranspiration (ETo) and the whole volume of water applied per irrigation regime for the validation year

Year	Total ET_0 (mm)	Total water volume applied for irrigation regimes (m^3/ha)			
		100%ET_c	80%ET_c	60%ET_c	40%ET_c
2023	1013	9217	7828	6446	4994

Climatic parameters and Scenarios

To make weather file data, daily reports of auto weather station of Karaj in the immediate vicinity of the experiment site containing of minimum and maximum temperatures (°C), rainfall (mm), solar radiation (MJ m^{-2} d^{-1}) saved as database tables to simulate current climate. To simulate future climate conditions, data collection representing climatic variables from 1995 to 2023 as the baseline period fed into the model to generate daily climate data using stochastic weather generator LARS-WG. The climatic scenarios A2 and B1 from the subset of the $HadCM_3$ model in LARS-WG application employed to generate for simulating future climate variables in three time series, 2030, 2050 and 2080. The SRES (Special Report on Emissions Scenarios)-A2 designates very heterogeneous world conditions with high population growth rate, slight economic development and slow technological change (Prudhomme et al. 2010). The SRES-B1 defines a convergent world with a global population that peaks in mid-century besides the rapid changes in economic structures towards a service and information economy (Wetterhall et al. 2009).

Crop model calibration

The crop-simulation performance is an equipped process of the daily development of a specific variety of a crop from planting to harvest time. It requires daily weather data, including maximum and minimum temperature, solar radiation, and precipitation, physical and chemical characteristics of the field. Multistage assessments for model calibration verified based on historical data collection of monitored variables such as leaf area index (LAI), grain yield (GY) and total biomass (TB). In order to amplify accuracy level for crop yield simulation, the genetic coefficients for each cultivar should be fitted for the best estimation of phenological characteristics. Activating genotype coefficient calculator option (GEN-CALC) in DSSAT, genetic coefficients for grain maize (SC 704) projected based on the Table (2).

Table 2- Genetic coefficients of hybrid (S.C. 704) for using into the model CSM-CERES-Maize

P1 (°C day)	P2 (days)	P5 (°C day)	G2 (Nr)	G3 (mg day-1)	PHINT (°C day)
250	1.7	998	850	10.5	42

P1: Thermal time from seedling emergence to the end of the juvenile phase (expressed in degree days, °C day, above a base temperature of 8 °C) during which the plant is not responsive to changes in photoperiod. P2: Extent to which development (expressed as days) is delayed for each hour increase in photoperiod above the longest photoperiod at which development proceeds at a maximum rate (which is considered to be 12.5 h). P5: Thermal time from silking to physiological maturity (expressed in degree days above a base temperature of 8 °C). G2: Maximum possible number of kernels per plant. G3: Kernel filling rate during the linear grain filling stage and under optimum conditions (mg day^{-1}). PHINT: Phyllochron interval; the interval in thermal time (degree days) between successive leaf tip appearances (5), Soler et al. (2007).

Standardized analyses

In order to validate model, standardized analyses were applied to test generated data against interpolated observatory inputs. For this to be achieved, the root mean square error (RMSE) as a frequent measure of the model evaluation, and the normalized root mean square error (NRMSE) in percentage as a safety measure were computed by the following Equations:

$$\mathbf{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{\mathbf{i=1}}^{\mathbf{n}}\left(\mathbf{X_{obs,i} - X_{sim,i}}\right)^2}{\mathbf{n}}} \quad (3)$$

$$\mathbf{NRMSE} = \frac{\mathbf{RMSE}}{\bar{\mathbf{X}}_{\mathbf{obs}}} \times \mathbf{100} \quad (4)$$

where, X_{obs} and X_{sim} are observed and simulated data, N is the number of observations and $\bar{X}_{obs}$ denotes the mean values of observed data. A simulation can be considered excellent if NRMSE is smaller than 10%, good if between 10 and 20%, fair if between 20 and 30% and poor if larger than 30% (Saad et al., 2014).

Regarding the same cultivar and steady-state conditions relevant to model calibration in both years, cultivar coefficients determined only for the first year. The Willmott index (d-s) was computed by Equations 1 (Jamieson et al. 1998; Willmott, 1982).

$$(5)\boldsymbol{d} = \mathbf{1} - \frac{\sum_{\boldsymbol{i=1}}^{\boldsymbol{N}}(\boldsymbol{P_i - O_i})^{\mathbf{2}}}{\sum_{\boldsymbol{i=1}}^{\boldsymbol{N}}(|\boldsymbol{pi} - \bar{\boldsymbol{O}}| + |\boldsymbol{Oi'} - \bar{\boldsymbol{O}}|)^{\mathbf{2}}}$$

Where, Q_i and P_i are observed and simulated data respectively and N is the number of observations respectively. The other criteria to describe the accuracy of the model outputs included mean absolute error (MAE) and the Nash-Sutcliffe (NS) model efficiency coefficient as follows:

$$(6)\ MAE = \frac{\sum_{i=1}^{n} | X_{obs,i} - X_{model} |}{N}$$

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(X_{obs,i} - X_{model})^2}{\sum_{i=1}^{n}(X_{obs,i} - \overline{X_{obs}})^2} \quad (7)$$

Where X_{obs} is observed values and X_{model} is modelled values at time/place *i*. Nash-Sutcliffe efficiency can range from -∞ to 1, so that an efficiency of equal to 1 (NS = 1) corresponds to a perfect match between model and observation, in other words the closer the model efficiency is to 1, the more accurate the model is. Where, $\bar{x}$ denotes the average value of observed data. Therewith, model capability in simulation of quantifiable data verified by linear relationship between the values predicted by a model and the values actually collected from the observation records. Additionally, due to compare the slope and intercept parameters against the 1:1 line (y = x), R-Squared coefficient (R^2) assessed to explain how much of the variance between the two variables is justified by the linear fit. Ultimately, the fitted regression equation between predicted values vs. observed values i.e. (Simulated= a + b × observed) with the 1:1 line was evaluated by the t-test computation.

State the Hypotheses

The null hypothesis states that the slope is equal to zero (H_o: $\beta 1 = 0$), and the alternative hypothesis states that the slope is not equal to zero (H_1: $\beta 1 \neq 0$) at $\alpha_{0.05}$. The hypotheses are tested using two-tailed tests by comparing the computed t-stat with the critical t-values ($\pm t_{1-a/2, n-2} = \pm t_{0.975, 10}$), so if the computed (t) is in the critical region, H_o rejected. In order to quantify the evidence of the test, the p-value statistic was compared with computed t, i.e. p-value = 2p (t > |computed t|). Hence, if the p-value is smaller than $\alpha_{0.05}$, H_o rejected that means the difference between simulated and observed data is significant and if not the difference between simulated and observed data is not significant.

Assumptions

In high tropic regions, adaptation strategies for annual crops to cope with climate vulnerability and change include changes in crop varieties, agronomic practices, timely application of irrigation and planting date. Predictions must increasingly rely on crop simulation models that could effectively combine the effects of environmental stresses and other abiotic factors to minimize physiological responses at corn critical growth stages. For instance, water use efficiency as a function of deficit irrigation can be improved if corn stressed below the optimum ET demand. In a water scarce situation, growers may accept that applying water below the normal irrigation amount, all that could achive desirable amount of crop for the least amount of water.

Results

Weather parameters assessment

New interest in local stochastic weather simulation has been remarked in conjunction with climate change studies. At present, outputs from global climate models (GCMs) suffer from enough spatial and temporal resolution and reliability to be used directly in practical models (Semenov and Barrow, 1997). The statistical measurements are thus urgent to alleviate the uncertainties and biases. At the present study weather parameters holding high values of NS and low values of RMSE resembled the reliable efficiency of LARS-WG in weather data generation for the baseline period, 1995 to 2023, Table (3).

Table 3- Statistical test for actual data against generated data in baseline period (1995-2023).

Statistical Indices	Precipitation (mm)	T-MIN (°C)	T-MAX (°C)	S-Rad (MJ m^{-2} d^{-1})
MAE	3.77	0.34	0.28	0.1
NS	0.96	0.99	0.99	0.96
RMSE	4.58	0.46	0.37	0.23
T-test	-1.55	0.38	0.49	-1.54
P-value	0.07	0.38	0.31	0.08
Correlation	0.98	0.99	0.99	0.99

Based on the (Figure 1:), there were minor differences between the observed data and simulated data of the minimum and maximum temperatures. Notwithstanding, observed precipitation in months October, November and December was higher than simulated precipitation while in January, February, March, April and May the reverse was true. From a statistical point of view there was no meaningful difference between observed and simulated data of sunshine.

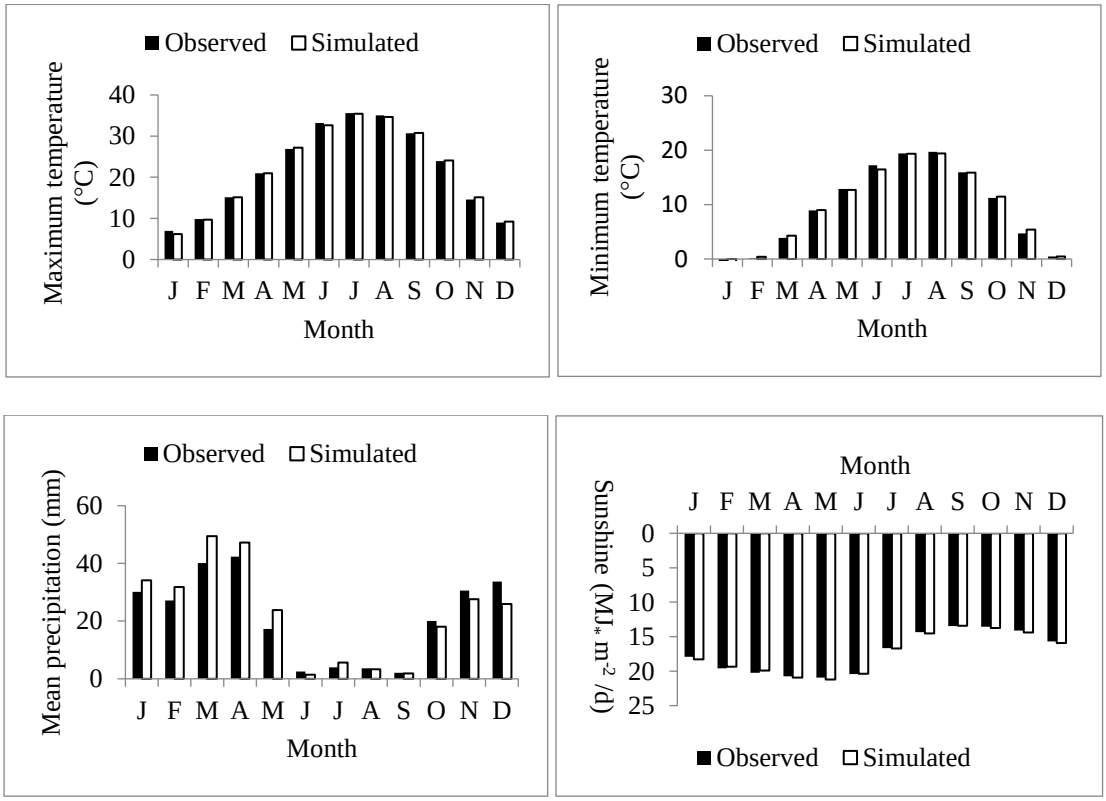


Figure 1- The observed and simulated data of weather parameters for the baseline period 1995-2023

Based on the premised information, all climatic variables holding t-value between critical range -2.228 < t < 2.228 as well as p-value > 0.05 were the indicative of good accuracy of LARS-WG for downscaling general circulation data. However, the precipitation variable rating MAE (3.77) and RMSE (4.58) was less efficient than other variables. Thereafter, A2 and B1 scenarios of GCM-HadCM3 employed to generate daily weather parameters for the periods 2030, 2050 and 2080. Based on a range of plausible emission of carbon dioxide and socio-economic conditions of predefined scenarios,

Considering plausible emission of carbon dioxide and socio-economic conditions of climatic scenarios, the increment of maximum temperature was predicted by 3 °C for SRES–A2 in 2030 compared with the year 2023. Also because of negative impacts of climate change, the precipitations increase was approximated by 17% for SRES–B1 in 2080 scenario compared to the baseline, Table (4). The nearest and the farthest simulation of minimum temperature (10.5 and 13.2) were predicted in 2050 and 2030 of SRES–A2 in comparison with the baseline period (1995–2023). While the closest amount relate to precipitation changes

was simulated in 2080 of SRES–A2 in comparison with the baseline period. The end assessment of volatile sunshine pin pointed negligible changes in amount under both scenarios. The founded results are in agreement with previous results by (Babaian et al., 2009; Abbasi et al., 2010).

Table 4- Average of rainfall (%), minimum and maximum temperatures (T-MIN and T-MAX) under different scenarios in the baseline period and three time series.

Variables	Baseline (1995-2023)	A2 (2030)	A2 (2050)	A2 (2080)	B1 (2030)	B1 (2050)	B1 (2080)
Rainfall	58	42	72	66	42	70	75
T-Min	10	13.2	10.5	12.6	13	10.6	11.4
T-Max	23	26.7	23	25.4	26	23.4	24.2

Validation of agronomic traits

The simulation of the future climate change impacts on the variables such as grain yield (GY), total biomass (TB) and maximum leaf area index (LAI) retaining maximum R^2 and holding t-critical < 2.22 and p-value > 0.05 strengthened the null hypothesis retaining for the fitted regression bias, Table (5). These results implied that there is no significant difference between 1:1 line (y = x) and fitted regression for observed and simulated data of the measured variables. Further the Std-error was computed due to minimize any arbitrary assumption.

Table 5- The t-test for comparing the 1:1 line and the fitted regression equation between observed and simulated data (y = a + bx)

	b		t	p-value	R2
Variables	**Value**	**Std.Error**	t_b		
Grain yield	1.06	0.23	0.95	0.46	0.92
Total biomass	0.95	0.21	1.38	0.49	0.97
Maximum LAI	1.00	0.02	0.85	0.48	0.76

Grain yield, Total biomass and LAI responses

The accuracy of LAI estimation is strongly dependent on the accurate concept of LAI definition. Tacitly, from the stand point of crop yield physiology the optimum level of LAI is the key factor that controls the final yield potential. According to the results it can be found that the irrigation had more effect on LAI rather than planting date for which the maximum amount of LAI (4.01) recorded at I_{100} and PD_1 treatments of SRES-A2 in 2080 year. Nevertheless in the case of carbon dioxide reckoning, the eco-physiological interactions between crop and environmental factors might have resultant effects on the photosynthesis rate and leaves extension in response to the late season drought stresses and planting date variations, Table (6).

Table 6. Simulation of grain yield, total biomass and LAI of maize for three periods under two scenarios (A2 and B1) of GCM model (HadCM3) in three planting dates and for irrigation levels based on 100, 80, 60 and 40% of estimated crop evapotranspiration.

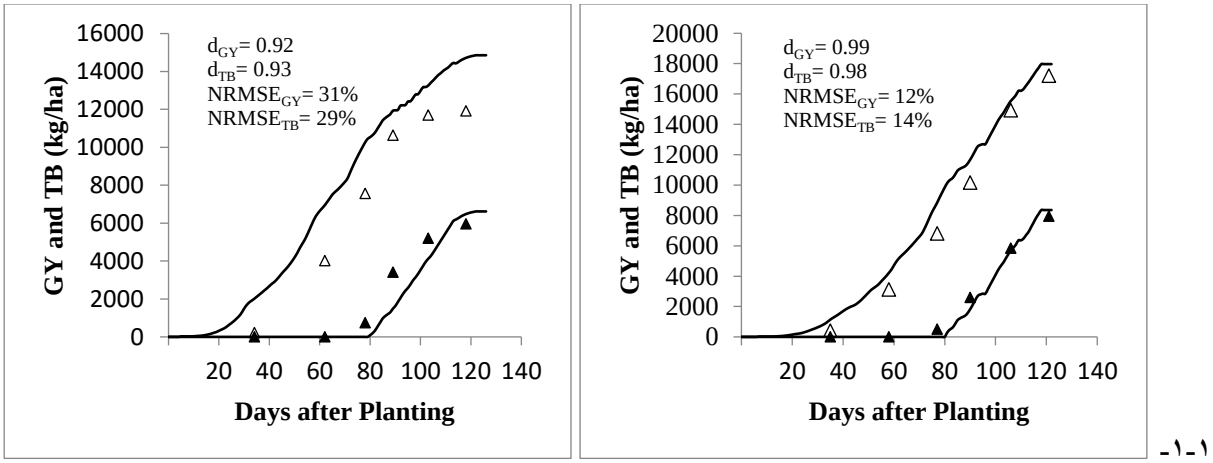
Scenario	Period		Grain yield (kg/ha)			Total Biomass (kg/ha)			Max - LAI		
		Irrigation levels	PD_1	PD_2	PD_3	PD_1	PD_2	PD_3	PD_1	PD_2	PD_3

	Baseline (1995-2023)	I_{40}	6156	5607	5762	14958	14891	14624	3.25	3.16	3.19
		I_{60}	7302	6847	6372	16521	16020	15314	3.26	3.19	3.18
		I_{80}	7865	7558	6582	17404	16762	15580	3.29	3.19	3.12
		I_{100}	8037	7801	6807	17629	16902	15833	3.29	3.14	3.03
A2	**2030**	I_{40}	8715	7891	7413	17097	16633	15228	3.28	3.41	3.25
		I_{60}	8891	7978	7476	17384	16923	15337	3.34	3.39	3.21
		I_{80}	9110	8038	7662	17668	16969	15693	3.43	3.32	3.15
		I_{100}	9120	8114	7724	17713	17309	15727	3.46	3.23	3.02
	2050	I_{40}	5625	5355	4225	14237	14155	12788	3.34	3.39	3.29
		I_{60}	5681	5464	4405	14418	14403	13173	3.44	3.37	3.25
		I_{80}	5720	5356	4235	14574	14388	13119	3.51	3.3	3.18
		I_{100}	5746	5597	4405	14604	14657	13160	3.53	3.23	3.07
	2080	I_{40}	3065	2778	2412	11395	11525	11326	3.09	3.55	3.37
		I_{60}	3081	2880	2539	11503	11570	11372	3.54	4.00	3.34
		I_{80}	3103	2938	2553	11444	11656	11490	3.57	3.53	3.29
		I_{100}	3111	2951	2593	11516	11645	11513	4.01	3.46	3.19
B1	**2030**	I_{40}	9155	8132	7669	17260	16786	15392	3.22	3.35	3.25
		I_{60}	9342	8221	7751	17546	17064	15506	3.33	3.33	3.21
		I_{80}	9541	8282	7938	17859	17111	15865	3.42	3.26	3.15
		I_{100}	9553	8361	8012	17862	17425	15898	3.45	3.17	3.02
	2050	I_{40}	6134	6210	4685	16148	15077	13331	3.32	3.41	3.29
		I_{60}	6191	6342	4801	16365	15344	13748	3.39	3.39	3.25
		I_{80}	6255	6275	4708	16547	15371	13731	3.46	3.29	3.17
		I_{100}	6266	6544	4898	16606	15665	13677	3.49	3.25	3.06
	2080	I_{40}	6047	4343	4698	15497	13513	13701	3.30	3.43	3.34
		I_{60}	6107	4427	4833	15677	13733	13811	3.45	3.43	3.31
		I_{80}	6079	4445	4911	15660	13518	13936	3.48	3.37	3.24
		I_{100}	6167	4497	4839	15826	13833	13938	3.51	3.29	3.15

The lowest and the highest amount of GY (2412 and 9553 kg/ha) were illustrated under I_{40} at PD_3 and I_{100} at PD_1 treatments in 2080 of SRES-A2 and 2030 of SRES-B1, respectively. Also, the lowest and the highest amount of TB with the values (11326 and 17862 kg/ha) were obtained in I_{40} at PD_3 and in I_{100} at PD_1 under 2080 and 2030yr of the SRES-A2 and SRES-B1, respectively. Based on a period of 85 years of investigation

the reduction of GY ranged between +18.8% and -69.9% under environmental changes of future climate in both scenarios related to different irrigation levels and planting dates (Figure 4:). The overall changes of the predicted GY calculated by +7.2% to -64.3% for maize in response to common planting date (PD_2). Hence, the period 2030 of both scenarios were less affected by climatic events compared to the current situation.

According to CERES-Maize simulation, the magnificent values of NRMSE for GY and TH (12% and 14%) were culminated in PD_1 and I_{100} factors. While, the poor values of NRMSE (31% and 29%) based on GY and TB were recorded at PD_3 and I_{40} factors in the validation year 2023. According to the results, GY and TB holding the largest value of *d* index (0.99 and 0.98) represented the high accuracy of the CERES-Maize model for the baseline in PD_1 and I_{100} factors (Figure. 2). As a result of remarkable R^2 linear (0.97 and 0.98) the evaluations implied that there was no significant difference between the 1:1 line and the fitted regression for observed and simulated data of GY and TB (Figure 3:).



-۱-۱

Figure 2- Observed and simulated data for grain yield (GY) and total biomass (TB) in response to planting dates (PDs) and irrigation factors (IFs) in the validation year (2023), using DSSAT application.

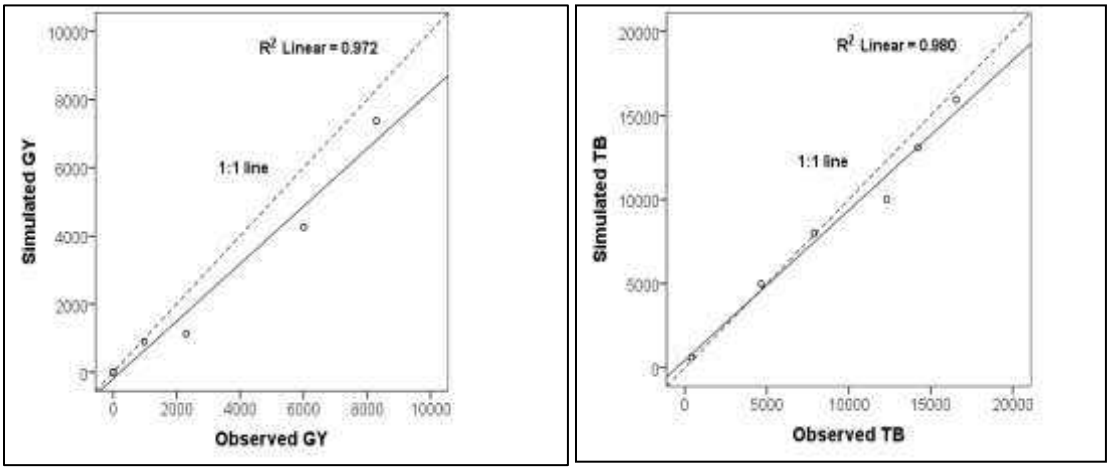


Figure 3- The observed (Obs) and simulated (Sim) data of grain yield (GY) and total biomass (TB) for comparing 1:1 line and the best-fitted regression equation between variables at a 95% confidence level using SPSS application.

Crop-ET demand

Thermal time, radiation, rainfall and reference evapotranspiration (ET_0) have a central role to determine corn growth development. The values of ET_0 and crop evapotranspiration (ET_c) were quite low at the initial period of corn life cycle due to less evaporation from the canopy surface as a result of ET_c below the optimum ET-demand (Figure 4:). The evaporation rate followed a sigmoidal curve with a slow increase of ET_c around 1.54mm then picked at around 16mm after 87 days of planting. At this time as crop characteristics change over the growing season (stages of growth) and leaf area expands, the ratio of ET_c surpasses ET_0 which reflected in higher level of ET-demand. At this damaging time which is generally coincided with grain filling process any abiotic stress prematurely will spoil maize yield potential. Since, the intense terms of heat waves and erratic rainfalls of the Karaj region have already become highly volatile, common planting date (PD_2) particularly in low lying areas could be deleterious for high-season hybrids such as S.C. 704.

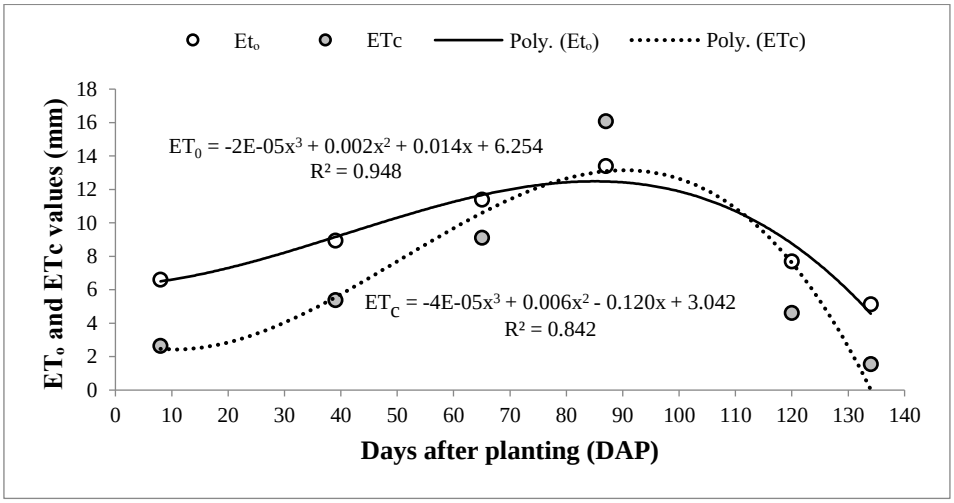


Figure 4- Reference and crop evapotranspiration (ET_0 and ET_c) as a function of days to corn maturation.

Discussion

In conformity with the basic premise of predefined assumption CERES-Maize capability in simulation maize traits grain yield (GY) and total biomass (TB) holding the largest value of *d* index (0.99 and 0.98) and the magnificent values of NRMSE (12% and 14%) respectively, the obtained results represented the high accuracy of the CERES-Maize model for the baseline period in the PD_1 and I_{100} factors. In addressing the predefined conditions of SRES-A2 including higher levels of temperature and CO2, the LAI at this experiment mostly be affected by deficit irrigation rather than planting date. Reasons for this may refer to physiological acclimation by maize in response to late season stresses. However, from yield physiology point of view the optimum level of LAI is the main factor that control final yield potential. In maize with kranz anatomy, leaf area index is controlled more with other environmental factors than CO2 concentration due to being under magnitude level of CO2 present (Rosenzweig and Hill, 1993). The results are comparable with ex-reports by Pace et al. (1999) in cotton and (Cakir, 2004; Jia et al., 2017) in maize. The period 2080 of SRES-A2 under effect of HadCM3 model prediction represented the least amount of GY and TB in full-stress irrigation (I_{40}) at mid and late planting date. If corns planted later in the season and seedlings be stressed prematurely it may induce lower leaves senescence as a result of reducing biomass and final yield potential. As shorter physiological maturity duration met unusual levels of temperature and radiation, the reduction of grain yield in response to water application revved up. The reduction of maize yield under different climate scenarios reported in the literatures (Jones and Thornton, 2003; Wang et al. 2011). It seems this issue is associated with increases in air temperature and decreases in precipitation that is projected in the future condition (Mall et al. 2004). However, Alexandrov and Hoogenboom (2000) using CERES-Maize model for periods 2020, 2050 and 2080 from a regional climate model and showed that the maximum of maize yield by 5300, 6200 and 7000 kg ha-1 achieved in each period, respectively. They also reported that the period 2080 was less affected by climatic events. Based on common planting date, the pollination stage is started when temperature and ET levels surpassed from the optimum range. This may desiccate silk and/or pollen grains which could reduce kernel set. For this reason shifting planting date from common-planting date (PD_2) to an earlier date can prevent the coincidence of pollination with heat stresses.

In situations where mid-season drought is likely to occur, late planting can also expose crops to water deficits during flowering (Tsimba et al., 2013).

Conclusion

Droughts are expected to involve most part of Iran by 2030. According to the final simulation results, the lowest values of LAI, grain yield and total biomass in response to the negative impacts of climate change recorded at mid or late planting date (PD_2/PD_3) of each scenario. In regard to simulated results of maize yields we estimated a remarkable decline by +18.8% and –69.9% over a period of 85 years under SRES-A2 and SRES-B1 respectively. When planting occurs in common date (PD_2), temperature and ET-demand become increasingly critical for pollination which can reduce grain quality and final yield potential. In particular under conditions of stress combinations such as those associated with climate change, planting corn in early or late May (PD_2/PD_3) will be more at the risk than in April (PD_1). As the economic optimum planting and irrigation rates for maize is relevant to yield level, in a water-limited situation planting a long season hybrid early in the growing season can be a water-saving strategy. Overall, selecting hybrids with superior drought-tolerance characteristics, planting variation and integral demarcated irrigation would be advisable for Karaj climate and the regions with similar climate pattern.

References

1- Abayechaw, D., (2021). Review on Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT) Model. Int. J. Intel. Inf. Syst. 10, 117-124. https://doi.org/10.11648/j.ijiis.20211006.13.
2- Abbasi, F., Malbosi, Sh., Babaian, I., Asmari, M., & Borhani, R. (2010). Prediction of climate chang in southern khorasan in 2010-2039 using downscaling data GCM (ECHO-G), Geograph. and Dev. J, 24, 218-233. (In Persian).
3- Alexandrov, V.A., & Hoogenboom, G. (2000). The impact of climate variability and change crop yield in Bulgaria. Agric Forest Meteorol, 104, 315–327.
4- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop Evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, FAO, Rome.
5- Babaian, A., Najafi Nik, Z., Zabol Abbasi, F., Nowkhandan, M., & Malbosi, Sh. (2009). Assessment of climate changing in 2010-2039 using downscaling data GCM (ECHO-G), Geograph. and Dev. J, 16, 34-41. (In Persian).
6- Bates, B.C., Z.W. Kundzewicz, S. Wu., & J.P. Palutikof, Eds. (2008). Climate Change and Water. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva, 210 pp.
7- Cakir, R. **(**2004). Effect of water stress at different development stages on vegetative and reproductive growth of corn. Field Crops Research, 89, 1-16.
8- Doll P. (2002). Impact of climate change and variability on irrigation requirements: a global perspective. Journal of climate change, 54, 269-293.
9- FAO. (1977). Crop water requirement. Irrigation and Drainage, Paper 24. FAO, Rome.
10- Farre, I., Robertson, M.J., Walton, G.H., & Asseng, S. (2002). Simulating phenology and yield response of canola to sowing date in Western Australia using the APSIM model. Aust. J. Agric. Res, 53, 1155-1164.
11- Farzanmanesh, R., Abdullah, A., Makmom S., Ali, R., & Amanollahi, J. (2012). Impact assessment of climate change in Iran using LARS-WG model. Pertanika Journal of Science & Technology, 20 (2), pp. 299-311. ISSN 0128-7680; ESSN: 2231-8526.

12- Fischer, A.J., Messersmith, C.G., Nalewaja, J.D., & Duysen, M.E. (2000). Interference between spring cereals and Kochia scoparia related to environment and photosynthetic pathway. Agronomy Journal, 92, 137-181.
13- Hammer G.L., Kropff M.J., Sinclair T.R., & Porter J.R. (2002). Future contributions of crop modeling-from heuristics and supporting decision making to understanding genetic regulation and aiding crop improvement. Europian Journal of Agronomy, 18, 15-31.
14- Howell, T.A. (2003). Irrigation efficiency, B.A. Stewart, T.A. Howell, Encyclopedia of water science. Marcel Dekker. New York, 467- 472.
15- Jamieson, P.D., M.A. Semenov, I.R. Brooking & G.S. Francis. (1998). Sirius: a mechanistic model of wheat response to environmental, variation. European Journal of Agronomy, 8, 161-179.
16- Jia, Q., Sun, L., Ali, S., Liu, D., Zhang, Y., Ren, X., & Jia, Z. (2017). Deficit irrigation and planting patterns strategies to improve maize yield and water productivity at different plant densities in semi-arid regions. Scientific Reports, 7, 13881. http://doi.org/10.1038/s41598-017-14133-1.
17- Jones, G.P., & Thornton, P.K. (2003). The potential impacts of climate change on maize production in Africa andLatin America in 2055. Glob Environ Chang, 13, 51–59.
18- Lisar, S.Y.S., Motafakkerazad, R., Hossain, M. M. & Rahman, I. M. M. (2012). Water Stress in Plants: Causes, Effects and Responses. In:Rahman, I. M. M. & Hasegawa, H. Water Stress, InTech, Croatia, p. 01-14.
19- Ludwig, F., & Asseng, S. (2006). Climate change impacts on wheat production in a Mediterranean environment in Western Australia. Agricultural Systems, 90, 159–179.
20- Mall, R.K., Lal, M., & Bhatia, VS et al. (2004). Mitigating climate change impact on soybean productivity in India: a simulation study. Agric For Meteorol, 121,113-125.
21- Pace, P.F., Cralle, H.T., El-Halawany, S.H.M., Cothren, J.T., & Sensaman, S.A. (1999). Drought-induced changes in shoot and root growth of young cotton plants. J. Cotton Sci, 3, 183–187.
22- Prudhomme, C., Wilby, R.L., & Crooks, S et al. (2010). Scenario-neutral approach to climate change impact studies: application to flood risk. J Hydrol, 390,198–209.
23- Racsko, P., Szeidl, L., & Semenov, M. (1991). A serial approach to local stochastic weather models. Ecological Modelling, 57, 27-41.
24- Rivero Vega, R.E., Rivero Jaspe, Z.I., & Limia de la Rosa, J. (2005). Fechas de siembra optima para el arroz de secano. In: 3er Congreso Internacional del Arroz y 3er Congreso Nacional del Arroz, La Habana, Cuba. June 6-10, 2005 (in Spanish).
25- Rosenzweig, C., & Hillel, D. (1993). Agriculture in a greenhouse world. Natl. Geograph. Res. Explor, 9, 201–221.
26- Saad, A.M., Mohamed, M.G., & EL-Sanat, G.A. (2014). Evaluation AquaCrop model to improve crop water productivity at North Delta Soils, Egypt. Advances in Applied Science Research, 5 (5), 293–304.
27- Salinger, M. J., Sivakumar, M.V.K. & Motha. R. (2005). Reducing vulnerability of agriculture and forestry to climate variability and change: Workshop summary and recommendation. Climatic Change, 70, 341–362.
28- Semenov, M.A. & Barrow, E.M. (1997). Use of a stochastic weather generator in the development of climate change scenarios. Climatic Change, 35, 397-414.
29- Semenov, M.A., Brooks, R.J., Barrow, E.M. & Richardson C.W. (1998). Comparison of the WGEN and LARS-WG stochastic weather generators in diverse climates. Climate Research, 10, 95-107.
30- Semenov, M.A., & Brooks, R.J. (1999). Spatial interpolation of the LARS-WG stochastic weather generator in Great Britain. Climate Research 11, 137-148.

31- Soler, C.M.T, Sentelhas, P.C., & Hoogenboom. G. (2007). Application of the CSM-CERES-Maize model for planting date evaluation and yield forecasting for maize grown off-season in a subtropical environment. Europ J Agronomy, 27,165-177.
32- Tsimba, R., Edmeades, G.O., Millner, J.P. & Kemp, P.D. (2013). The effect of planting date on maize: Phenology, thermal time durations and growth rates in a cool temperate climate. Field Crops Res, 150, 145-155.
33- Ventrella, D., Charfeddine, M., Giglio, L., & Castellini, M. (2012). Application of DSSAT models for an agronomic adaptation strategy under climate change in southern Italy: optimum sowing and transplanting time for winter durum wheat and tomato. (CRA-SCA), Bari, Italy. Vol 7.
34- Wang, M., Li, Y., Ye, & W et al. (2011). Effects of climate change on maize production, and potential adaptation measures: a case study in Jilin Province, China. Clim Res, 46, 223–242.
35- Wetterhall, F., Bardossy, A., Chen, D., Halldin, S., & Ch, X.U. (2009). Statistical downscaling of daily precipitation over Sweden using GCM output. Theor Appl Climatol, 96, 95–103.
36- Willmott, C.J. (1982). Some comments on the evaluation of model performance. Bulletin American Meteorological Society, 63, 1309–1313.
37- Xiong, A.S., Peng, R.H., Cheng, Z.M., Li, Y., Liu, J.G., Zhuang, J., Gao, F., Xu, F., Qiao, Y.S., Zhang, Z., Chen, J.M., & Yao, Q.H. (2007). Concurrent mutations in six amino acids in β-glucuronidase improves its thermostability. Protein Eng Des Sel. 20, pp.319–325. , No 1.

Implementing climate risk management and water saving strategy to optimize maize yields potential in a changing climate

Babak Mirshekarnezhad[1*], Kamran Hghiabi[2], Toraj Jadidi Dourbash[3], Shahryar Moazedi[4]

1. PhD graduated in Agronomy, Department of Agronomy, Karaj Branch, Islamic Azad University, Karaj, Iran.

2. PhD student in Agrotechnology, Department of Production Engineering and Plant Genetics, Faculty of Agriculture, Shahid Chamran University of Ahvaz, Iran.

3. Master of Science in Agrometeorology, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran.

4. Master of Science in Climatology Orientation and Environmental Planning, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

* Corresponding author. E-mail address: bob_mirshekar@yahoo.com

Abstract

In this research, Cropping System Model (CSM)-CERES-Maize as a smart system was employed to simulate grain maize components (*Zea mays* L.). The climatic negative impacts showed gradual increase up to 3°C in temperatures and a substantial increase up to nearly 17% in precipitations by the year 2080 compared with the baseline period 2023. The results indicated that 60% decrease in water application caused a reduction about 28% in grain yield by a delay from early to late planting date in current condition. The period 2080 of SRES-A2 under effect of HadCM3 model prediction represented the least amount of GY

and BY in full-stress irrigation treatment (I_{40}) at mid and late planting date. The evaporation rate followed a sigmoidal curve with a slow increase of ETc about 1.54mm then picked at around 16mm after 87 days of planting which specified grain filling period. It lateralized planting corn in early or late May will be more at risk than in late April due to reproductive growth achievement under situations of stress combinations associated with climate change. Overall, planting date variation and proper irrigation pattern as potential moderators of climate change can help optimizing maize productivity under future climate of the Karaj region.

Key words: Crop models, Climate change, Evapotranspiration, Maize productivity, Simulation, Water applicati