مجله محیط زیست و توسعه فرابخشی
Journal homepage: https://www.envjournal.ir

بررسی میزان و گستردگی تغییرات اقلیمی در مناطق مختلف ایران

بهزاد رایگانی*[۱]، سوسن براتی[۲]، محمدرضا فرزانه[۳]، فرهاد حسینی طایفه[۴]، عابد ترابی‌نیا[۵]

۱- گروه ارزیابی مخاطرات، پژوهشکده محیط زیست و توسعه پایدار، سازمان حفاظت محیط زیست، تهران، ایران*
۲-گروه مدیریت حوزه‌های آبخیز، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران
۳- گروه مهندسی محیط زیست و پالایش آلاینده‌ها، پژوهشکده محیط زیست و توسعه پایدار، سازمان حفاظت محیط زیست، تهران، ایران
۴- گروه تنوع زیستی و ایمنی زیستی، پژوهشکده محیط زیست و توسعه پایدار، سازمان حفاظت محیط زیست، تهران، ایران
۵- گروه محیط زیست، دانشکده محیط زیست، سازمان حفاظت محیط زیست، کرج، ایران

نوع مقاله:
پژوهشی

تاریخچه مقاله:
دریافت:
۱۴۰۳/۱۰/۲۹
پذیرش:
۱۴۰۳/۱۲/۱۹

کلمات کلیدی:
تراکلایمت،
درجه حرارت کمینه،
درجه حرارت بیشینه،
بارش تجمعی سالیانه،
شاخص خشکسالی پالمر

چکیده

مقدمه: تغییر اقلیم به‌عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های محیط‌زیستی در قرن ۲۱ شناخته می‌شود که اثرات گسترده‌ای بر اکوسیستم‌ها، منابع طبیعی و زندگی انسان‌ها دارد. افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای، به‌ویژه دی‌اکسیدکربن، باعث تغییراتی نظیر افزایش دما، تغییر الگوهای بارش، کاهش منابع آبی و افزایش شدت خشکسالی‌ها شده است. ایران، به دلیل اقلیم خشک و نیمه‌خشک خود، بیش از بسیاری از کشورها در معرض این تغییرات قرار دارد. تحلیل دقیق شدت و گستردگی تغییرات اقلیمی و اثرات آن بر منابع طبیعی، به‌ویژه پوشش گیاهی، برای برنامه‌ریزی و مدیریت پایدار منابع ضروری است. هدف این مطالعه، ارزیابی تغییرات اقلیمی ایران طی سال‌های ۱۹۵۸ تا ۲۰۲۱ و بررسی ارتباط آن با تغییرات پوشش گیاهی طبیعی کشور است.

مواد و روش‌ها: این پژوهش در دو فاز اصلی انجام شد. در فاز نخست، داده‌های پایگاه تراکلایمت برای تحلیل تغییرات اقلیمی ایران مورد استفاده قرار گرفت. این داده‌ها شامل پارامترهایی نظیر دمای کمینه، دمای بیشینه، بارش تجمعی، رواناب، تبخیر و تعرق واقعی، تبخیر و تعرق مرجع، کمبود آب اقلیمی و شاخص خشکسالی پالمر بودند که برای کل کشور به‌صورت سالیانه تحلیل شدند. به‌منظور شناسایی روندهای آماری معنی‌دار، از تحلیل‌های همبستگی و رگرسیون خطی استفاده شد و نقشه‌های تغییرات اقلیمی تهیه گردید. سپس، با استفاده از روش ترکیب وزنی خطی (WLC) مبتنی بر منطق فازی، شدت تغییر اقلیم در کشور بر اساس سه پارامتر اصلی (دمای کمینه، دمای بیشینه و بارش) محاسبه و نقشه‌سازی شد. در فاز دوم، تغییرات پوشش گیاهی طبیعی کشور با استفاده از شاخص NDVI و تصاویر ماهواره‌ای سنجنده مودیس تحلیل شد. ابتدا مناطق دارای پوشش گیاهی طبیعی مشخص گردید و سپس روند تغییرات سالیانه پوشش گیاهی به‌صورت معنی‌دار و غیرمعنی‌دار بررسی شد. ارتباط میان تغییرات اقلیمی و تخریب پوشش گیاهی نیز با تحلیل همبستگی پیرسون ارزیابی و نقشه‌های مرتبط تهیه شد.

نتایج: نتایج این پژوهش نشان داد که تغییرات اقلیمی در کشور به وضوح مشهود است، اما شدت و گستردگی این تغییرات در مناطق مختلف یکنواخت نیست. مناطق شمال غرب، غرب، زاگرس و شمال شرق بیشترین شدت تغییرات را تجربه کرده‌اند. در این مناطق، دمای کمینه و بیشینه سالیانه به ترتیب بیش از ۲ تا ۳ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته و بارش تجمعی سالیانه در برخی نواحی بیش از ۱۰۰ میلی‌متر کاهش نشان داده است. همچنین، کمبود آب اقلیمی در مناطق مرکزی و شرقی کشور به‌طور معنی‌داری افزایش یافته و موجب کاهش

* پست الکترونیکی نویسنده مسؤول: bhz.ray@gmail.com

شدید پوشش گیاهی در این مناطق شده است. استان‌های گیلان، اردبیل و گلستان، علاوه بر کاهش بارش، شاهد تهدید جدی تالاب‌های دائمی خود هستند. بررسی تغییرات پوشش گیاهی نشان داد که کاهش بارش و افزایش دما، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، نقش مهمی در روند نزولی پوشش گیاهی داشته است. این تأثیرات در زمین‌های بایر و بوته‌زارهای نیمه‌خشک کشور مشهودتر است.

بحث: این مطالعه تأیید می‌کند که ایران با تغییرات اقلیمی قابل‌توجهی در دهه‌های اخیر مواجه بوده که اثرات مخرب آن بر منابع طبیعی و اکوسیستم‌های کشور مشهود است. افزایش دما، کاهش بارش، و تشدید کمبود آب اقلیمی، چالش‌های بزرگی برای پایداری منابع طبیعی ایجاد کرده‌اند. نتایج این پژوهش بر ضرورت تدوین سیاست‌های جامع و اجرای برنامه‌های ملی برای کاهش اثرات تغییر اقلیم، مدیریت منابع آب، و حفاظت از اکوسیستم‌های آسیب‌پذیر تأکید دارد. علاوه بر این، پایش مستمر تغییرات اقلیمی و تحلیل اثرات آن بر منابع طبیعی برای اتخاذ تصمیمات مؤثر ضروری است.

مقدمه

تغییرات اقلیمی یکی از چالش‌های اساسی در دهه‌های اخیر محسوب می‌شود که تأثیرات گسترده‌ای بر اکوسیستم‌ها، منابع آبی، کشاورزی، جوامع انسانی و تنوع زیستی دارد (Weiskopf *et al.*, 2020). اکوسیستم‌های ایران، که عمدتاً در مناطق خشک و نیمه‌خشک قرار دارند، به‌شدت تحت تأثیر این تغییرات قرار گرفته و نشانه‌هایی از افزایش دما، تغییر الگوهای بارندگی، افزایش خشکسالی‌ها، وقوع سیل‌های با شدت بالا، گرما و سرمای ناگهانی، طوفان‌های شدید و کاهش ضخامت لایه ازن در مناطق مختلف کشور مشاهده می‌شود (Bagherzadeh *et al.*, 2020). افزایش بارش‌های ناگهانی و نامنظم، کاهش ذخایر برفی در مناطق کوهستانی، گسترش بیابان‌ها و افزایش سطح آب دریاها از جمله دیگر پیامدهای تغییرات اقلیمی در ایران هستند که به‌طور همزمان وقوع یافته و بر پایداری زیست‌محیطی و منابع طبیعی اثرگذار بوده‌اند (Asakereh *et al.*, 2021).

تحلیل اثرات تغییرات اقلیمی بر خشکسالی از طریق مدل‌سازی‌های مختلف صورت گرفته است. مطالعات نشان می‌دهند که استفاده از مدل‌های جهانی کوچک‌شده نظیر NEX-GDDP ناسا و رویکردهای آماری امکان ارزیابی دقیق‌تری از شدت و گستردگی خشکسالی‌های آتی را فراهم می‌کند (Ahmadalipour *et al.*, 2017). این مدل‌ها تأکید دارند که افزایش دما و تغییر الگوی بارش، تشدید خشکسالی را به دنبال داشته و مناطق نیمه‌خشک بیشترین آسیب را متحمل خواهند شد. علاوه بر این، اثرات گرمایش ناشی از شهرنشینی نیز مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. بررسی‌های علمی حاکی از آن است که گسترش شهرها و افزایش تراکم ساخت‌وساز موجب تشدید اثر جزیره گرمایی شهری (UHI) شده و در برخی مناطق، گرمایش اضافی ناشی از توسعه شهری می‌تواند حتی بیش از گرمایش ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای باشد (Huang *et al.*, 2019). این موضوع نه‌تنها موجب افزایش دمای هوای مناطق شهری خواهد شد، بلکه به‌دلیل کاهش تعرق و افزایش مصرف انرژی، پیامدهای محیط‌زیستی و اقتصادی گسترده‌ای به همراه دارد.

مطالعات مربوط به تأثیر تغییرات اقلیمی بر سلامت انسان نیز اهمیت ویژه‌ای یافته است. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که در صورت ادامه روند افزایش دما و عدم کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، تعداد و شدت دوره‌های تنش گرمایی به‌شدت افزایش خواهد یافت که این مسأله، بر سلامت انسان تأثیر مستقیمی خواهد داشت (Casanueva *et al.*, 2023). در مناطق آسیب‌پذیر، افزایش گرمای شدید موجب افزایش نرخ مرگ‌ومیر ناشی از بیماری‌های قلبی و تنفسی خواهد شد. همچنین، تغییرات اقلیمی می‌تواند موجب افزایش بیشتر بیماری‌های عفونی، شیوع آفات و کاهش بهره‌وری کشاورزی گردد. علاوه بر این، بررسی تغییرات کاربری زمین در کنار تغییرات اقلیمی نشان می‌دهد که تأثیرات مثبت احتمالی تغییر اقلیم بر برخی خدمات اکوسیستمی اغلب تحت تأثیر تغییرات کاربری زمین قرار گرفته و اثرات منفی این تغییرات بر منابع طبیعی غالب می‌شود. پژوهش‌ها تأکید دارند که استفاده از ابزارهای اقتصادی مانند قیمت‌گذاری کربن و سیاست‌های کاهش انتشار می‌تواند به کاهش این اثرات منفی کمک کند (Lungarska & Chakir, 2024).

در ایران، بررسی خشکسالی‌های اخیر با استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو و سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای نشان داده است که شدت خشکسالی در مناطق مختلف افزایش یافته است. تحلیل داده‌های اقلیمی نشان می‌دهد که مناطق خشک مانند زابل و شیراز، تحت سناریوهای مختلف، با کاهش بارندگی و افزایش شدت خشکسالی مواجه خواهند شد (Hosseinabadi *et al.*, 2020). همچنین، مطالعات بر تغییرات دما و بارش در استان اصفهان نشان می‌دهند که تا پایان قرن ۲۱، دما به‌طور متوسط افزایش یافته و میزان بارش کاهش خواهد یافت که می‌تواند منابع آبی را تهدید کرده و تنش‌های محیطی را افزایش دهد (Soltani Mohammadi *et al.*, 2019).

تحلیل روند تغییرات بارندگی و دمای سطح زمین در مناطق کوهستانی و یخچالی کشور نیز حاکی از کاهش پوشش برفی، تغییر الگوی بارش و افزایش تبخیر است که این مسئله می‌تواند پیامدهای جدی برای منابع آبی و اکوسیستم‌های وابسته داشته باشد (Heydari Alamdarloo *et al.*, 2019). همچنین، تأثیر تغییرات اقلیمی بر زیستگاه‌های جانوری در مناطق مختلف مورد مطالعه قرار گرفته است. به‌عنوان نمونه، مدلسازی زیستگاه یوزپلنگ آسیایی در استان یزد نشان داد که افزایش دما و کاهش بارش تأثیر مستقیمی بر زیستگاه‌های این گونه ارزشمند نداشته، اما فعالیت‌های انسانی همچون تغییرات کاربری زمین و توسعه شهری به‌عنوان عوامل اصلی کاهش زیستگاه‌های مناسب یوز شناخته شده‌اند (Shams *et al.*, 2019).

در مجموع، مطالعات گسترده‌ای در سطح جهانی و محلی برای بررسی اثرات تغییرات اقلیمی انجام شده است. پژوهش‌های بین‌المللی نشان داده‌اند که تغییرات در پارامترهای اقلیمی مانند دمای جهانی، سطح دریاها و ذوب شدن یخ‌های قطبی، همگی تأثیرات چشمگیری بر الگوهای زیست‌محیطی و توسعه انسانی دارند (Suppiah *et al.*, 2007; Thrasher *et al.*, 2012). در ایران نیز، تحقیقات متعدد بر افزایش شدت و فراوانی خشکسالی‌ها، تغییرات شدید دما و تأثیر آن بر منابع آبی، پوشش گیاهی و زیستگاه‌های طبیعی تأکید دارند. این تغییرات، لزوم بررسی دقیق روندهای اقلیمی و تدوین سیاست‌های مدیریت پایدار را بیش‌ازپیش آشکار می‌سازد.

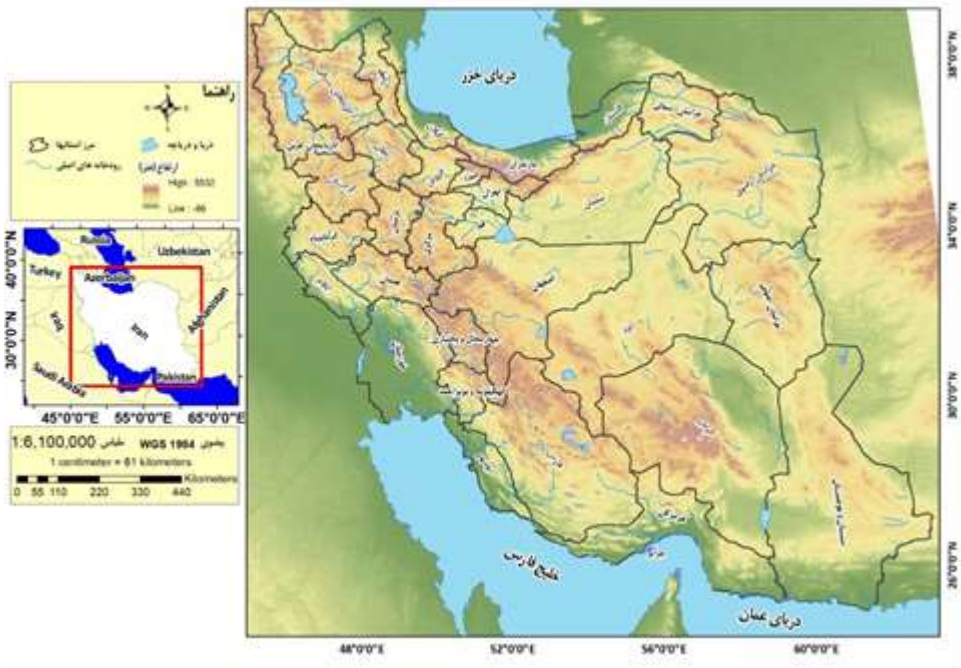
هدف این پژوهش بررسی تغییرات اقلیمی کل مساحت ایران در بازه زمانی ۱۹۵۸ تا ۲۰۲۱ و تحلیل اثرات آن بر پوشش گیاهی طبیعی کشور است. با استفاده از داده‌های اقلیمی پروژه تراکلایمت و شاخص‌های پوشش گیاهی حاصل از تصاویر ماهواره‌ای، تلاش شده است تا روندهای اقلیمی، شدت و گستردگی تغییرات و تأثیرات آن‌ها بر اکوسیستم‌های طبیعی مورد بررسی قرار گیرد. نتایج این مطالعه می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های کلان برای مدیریت منابع آب، حفاظت از اکوسیستم‌های آسیب‌پذیر، و تدوین سیاست‌های سازگار با تغییرات اقلیمی مؤثر واقع شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی

وضعیت توپوگرافی و اقلیمی ایران: ایران در جنوب غرب آسیا به لحاظ موقعیت جغرافیایی خاص خود نسبت به گردش عمومی جو در کمربند اقلیمی خشک جهان قرار گرفته است(Akbary & Sayad 2021, Borzou, *et al.*, 2021). بر همین اساس به دلیل مجاورت کشور ایران با پرفشار جنب حاره‌ای بیشتر مناطق کشور، اقلیم خشک و نیمه خشک دارند (Akbary & Sayad, 2021). در کل بیش از دو سوم از مساحت کشور خشک و نیمه خشک است. متوسط مکانی بارش سالیانه در کل کشور از ۱۳۴۹ تا ۱۳۹۴ نزدیک به ۲۵۰ میلی‌متر برآورد شده است و بررسی سوابق تاریخی نشان داده است در چهار دهه گذشته بارش از ۲۶۸ میلی‌متر به ۲۲۰ میلی‌متر کاهش یافته است (Asakereh *et al.*, 2021). اقلیم خشک و بارش کل ناچیز در کشور، آب‌های سطحی محدودی ایجاد نموده است که اغلب در اثر خشکسالی‌های اخیر و نوسانات اقلیمی، انواع پایدارتر آنها همچون تالاب‌ها، در حال خشک شدن هستند (Rostam Afshar *et al.*, 2022). خوشبختانه ایران تحت تأثیر حرکت همگرایی صفحه عربستان و صفحه اوراسیا می‌باشد (Gheitanchi & Nouri Delouei, 2021) که دو رشته کوه البرز و زاگرس و چین‌خوردگی‌های متعدد را تشکیل داده‌اند. بنابراین در داخل کشور خصوصیات توپوگرافی منحصر به فردی ایجاد شده است (شکل ۱) و اثر کمبود آب در سطح کشور را تا اندازه‌ای کمرنگ نموده است. هرچندکه با توجه به تنوع خصوصیات توپوگرافی و تغییرات فصلی مکان‌گزینی

سامانه‌های گردش عمومی جو، خشکسالی و ترسالی‌های هواشناسی متناوبی رخ می‌دهد، ولی معضل کمبود منابع آب در کشور همواره وجود داشته و امنیت اقتصادی و غذایی را تهدید می‌کند (Akbary & Sayad, 2021).

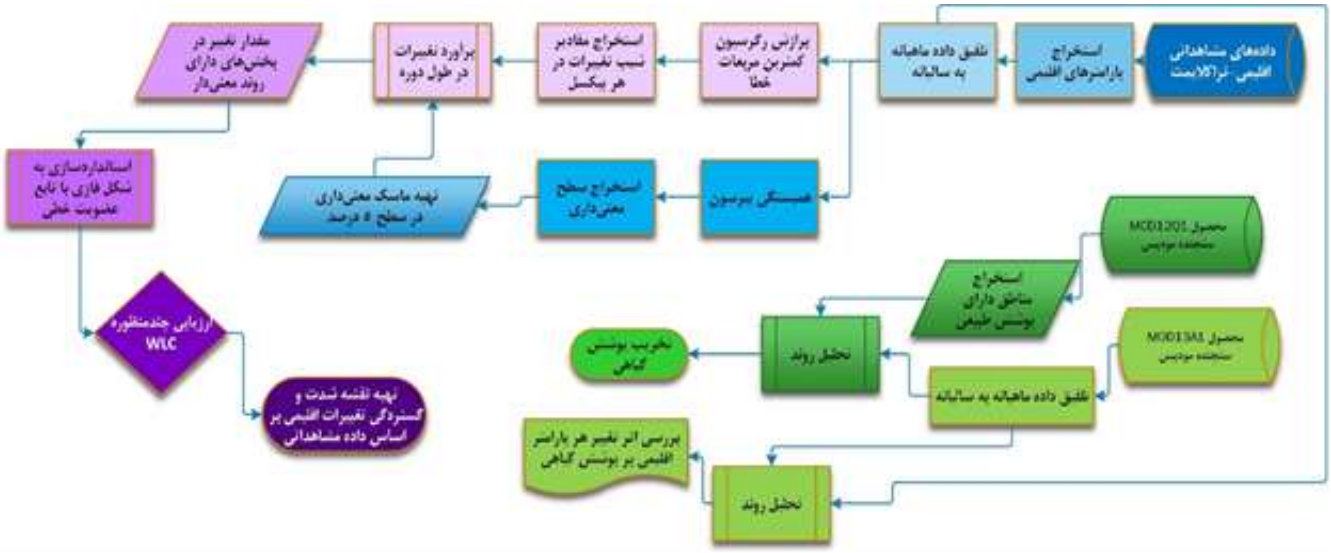


شکل ۱- وضعیت پستی و بلندی و هیدرولوژیکی ایران

روش کار

شکل ۲ خلاصه‌ی مراحل انجام این مطالعه را نشان می‌دهد و در ادامه جزییات روش کار و داده های مورد استفاده تشریح می گردد.

داده‌های مورد استفاده: این پژوهش مبتنی بر داده‌های بلندمدت اقلیمی و پوشش گیاهی است که برای تحلیل روند تغییرات اقلیمی ایران و بررسی تأثیرات آن بر پوشش گیاهی کشور از آن‌ها استفاده شده است.



شکل ۲- طرح شماتیک روش مطالعه

داده‌های اقلیمی: داده‌های اقلیمی این پژوهش از پایگاه داده‌ی تراکلایمت (TerraClimate) استخراج شده است که توسط دانشگاه کالیفرنیا توسعه یافته و شامل داده‌های با تفکیک مکانی ۵ کیلومتر برای کل خشکی‌های زمین است(Abatzoglou *et al.*, 2018) . این داده‌ها از ترکیب پایگاه داده‌ی WorldClim، پایگاه داده‌ی CRU و بازتحلیل داده‌های JRAS55 ایجاد شده است. داده‌های اقلیمی مورد استفاده در این پژوهش که از پایگاه تراکلایمت استخراج شده‌اند، شامل موارد زیر است:

- دمای کمینه و بیشینه ماهیانه (°C)
- بارش (mm)
- شاخص خشکسالی پالمر (PDSI)

شاخص خشکسالی پالمر (The Palmer Drought Severity Index (PDSI)، پرکاربردترین شاخص خشکسالی در سراسر زمین است که شدت، شروع و پایان خشکسالی را نشان می‌دهد. این شاخص بر پایه یک معادله ساده توازن آب به کمک دما و بارش، خشکی نسبی را برآورد می‌کند (Alley, 1984). در این مطالعه مقدار شاخص پالمر به صورت ماهیانه با مقیاس ۰/۰۱ در دسترس بود. پس از اعمال مقیاس، به دلیل اینکه شاخص پالمر آستانه عددی دارد، مقدار متوسط برای بررسی روند سالیانه بدست آمد.

کمبود آب اقلیمی (Climatic Water Deficit, CWD): کمبود آب اقلیمی شاخصی است که رابطه بین بارش (آب) و دما (انرژی) را نشان می‌دهد و از تفاضل تبخیر و تعرق پتانسیل (potential evapotranspiration) از تبخیر و تعرق واقعی (actual evapotranspiration) بدست می‌آید (Stephenson, 1998) .این پارامتر نیز از مدل تک بعدی توازن آب-خاک بدست آمده و به صورت ماهیانه با مقیاس ۰/۱ گزارش شده است.

آب معادل برف (SWE): به طور کلی تغییرات اقلیمی به طور محسوس شکل بارش در بیشتر خشکی‌های زمین را تغییر داده و از بارش برفی به سمت بارش بارانی سوق داده است. بنابراین بررسی تغییرات پارامترهای مرتبط با برف یکی از مهمترین فاکتورهای شناسایی تغییرات اقلیمی به شمار می‌رود. در پایگاه تراکلایمت، اساس مدل تک بعدی توازن آب- خاک، مقدار آبی که می‌تواند از ذوب برف بدست آید، تخمین زده شده است (آب معادل برف). این پارامتر بر حسب میلی‌متر و به صورت ماهیانه گزارش شده است و در این مطالعه به صورت تجمعی سالیانه مورد بررسی قرار گرفته است.

تبخیر و تعرق مرجع و واقعی (mm): تبخیر و تعرق مرجع به صورت تئوریک، تبخیر و تعرقی است که یک سطح پوشیده از گندمیان که به خوبی مرطوب شده است، می‌تواند داشته باشد و مقدار آن از تبخیر و تعرق پتانسیل که مربوط به یک منبع بی‌پایان آب است (مثلاً دریاچه) متفاوت می‌باشد. این پارامتر هم به طور ماهیانه با مقیاس ۰/۱ تخمین زده شده است. پس از اعمال مقیاس، مقدار تجمعی این پارامتر برای هر سال، بدست آمد و در تحلیل روند به‌کار رفت.

این متغیرها به‌عنوان شاخص‌های کلیدی تغییرات اقلیمی مورد تجزیه‌وتحلیل قرار گرفتند تا روند تغییرات دمایی، بارشی، و شاخص‌های مرتبط با خشکسالی در سطح کشور شناسایی شود.

داده‌های پوشش گیاهی: برای بررسی روند تغییرات پوشش گیاهی، از داده‌های شاخص NDVI که توسط سنجنده MODIS تولید شده است، استفاده شد. محصول‌های MCD12Q1 و MOD13A1 این سنجنده برای مطالعه‌ی تغییرات پوشش گیاهی در بازه ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۱ به کار گرفته شدند.

- MCD12Q1 برای استخراج نقشه‌ی پوشش گیاهی طبیعی و حذف سایر کاربری‌های زمین استفاده شد.
- MOD13A1 برای استخراج مقادیر سالانه‌ی شاخص NDVI در هر پیکسل مورد استفاده قرار گرفت (Bagherzadeh *et al.*, 2020).

این داده‌ها با تفکیک زمانی سالانه پردازش شدند تا روند تغییرات پوشش گیاهی و ارتباط آن با تغییرات اقلیمی مورد بررسی قرار گیرد.

روش تحلیل داده‌ها

پردازش و تحلیل داده‌های اقلیمی: در مرحله‌ی اول، داده‌های ماهانه تراکلایمت از سال ۱۹۵۸ تا ۲۰۲۱ دریافت و پردازش شدند. برای ایجاد داده‌های سالانه، روش‌های زیر اعمال شد:

- مقادیر کمینه و بیشینه‌ی سالیانه دما از حداقل و حداکثر ماهانه استخراج شد.
- مقدار بارش، آب معادل برف، تبخیر و تعرق و کمبود آب اقلیمی به‌صورت تجمیع سالیانه از مقادیر ماهیانه محاسبه شد.
- شاخص‌های اقلیمی ماهیانه مانند خشکسالی پالمر به‌صورت سالانه میانگین‌گیری شدند.

پس از تهیه داده‌های سالانه، تحلیل روند تغییرات هر متغیر در سطح کشور انجام شد.

- برای شناسایی روندهای معنی‌دار در متغیرهای اقلیمی از آزمون همبستگی پیرسون در سطح معنی‌داری ۵ درصد استفاده شد.
- پس از تعیین مناطق دارای تغییرات معنی‌دار، رگرسیون حداقل مربعات خطا (OLS) برای هر پیکسل اجرا شد تا میزان شیب تغییرات در بازه‌ی زمانی ۶۴ ساله مشخص شود.
- در نهایت بر اساس شیب بدست آمده، اول ماسک مناطق دارای روند معنی‌دار اعمال گردید و سپس بر اساس طول دوره مورد بررسی و شیب هر پیکسل نقشه‌های تغییرات اقلیمی مربوط به هر پارامتر ترسیم شدند.

تحلیل شدت و گستردگی تغییر اقلیم: به منظور برآورد شدت تغییر اقلیم در کشور، سه پارامتر کلیدی دمای کمینه، دمای بیشینه، و بارش تجمعی انتخاب و استاندارد شدند.

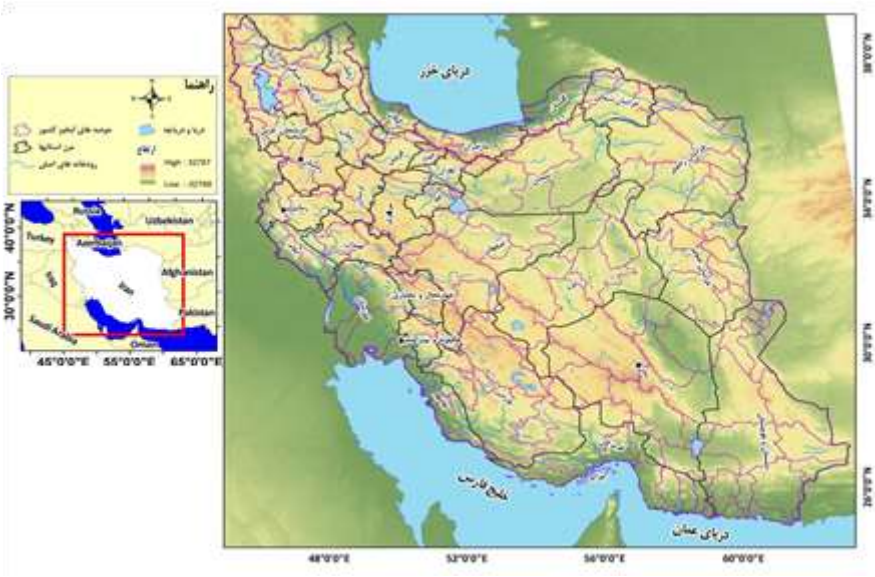
- این پارامترها در محیط فازی با تابع عضویت خطی نرمال‌سازی شدند.
- در روش اول، هر پارامتر وزن مساوی دریافت کرد.
- در روش دوم، با استفاده از نظر متخصصان، بارش ۵۰ درصد، دمای کمینه ۳۳ درصد و دمای بیشینه ۱۶ درصد وزن‌دهی شدند (Rayegani *et al.*, 2020).
- نتایج این تحلیل منجر به تولید نقشه‌ی شدت و گستردگی تغییرات اقلیمی در کشور شد.

پردازش داده‌های پوشش گیاهی و تحلیل همبستگی با تغییرات اقلیمی: داده‌های سنجنده MODIS در بازه‌ی زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۱ دریافت و پردازش شدند.

- در مرحله‌ی نخست، مقدار میانه‌ی سالانه‌ی NDVI برای هر پیکسل استخراج شد.
- رگرسیون OLS و آزمون همبستگی پیرسون برای بررسی روند تغییرات NDVI اجرا شد.
- مناطقی که کاهش معنی‌دار در پوشش گیاهی نشان دادند، جدا شده و ارتباط آن با تغییرات اقلیمی تحلیل شد.
- برای این منظور، داده‌های اقلیمی و پوشش گیاهی در یک بازه‌ی زمانی مشترک (۲۰۲۱-۲۰۰۰) مقایسه شدند و تأثیر تغییرات دما و بارش بر کاهش پوشش گیاهی بررسی شد.
- مناطقی که افزایش دما یا کاهش بارش موجب کاهش معنی‌دار پوشش گیاهی شده بود، استخراج و تحلیل گردیدند.

نتایج

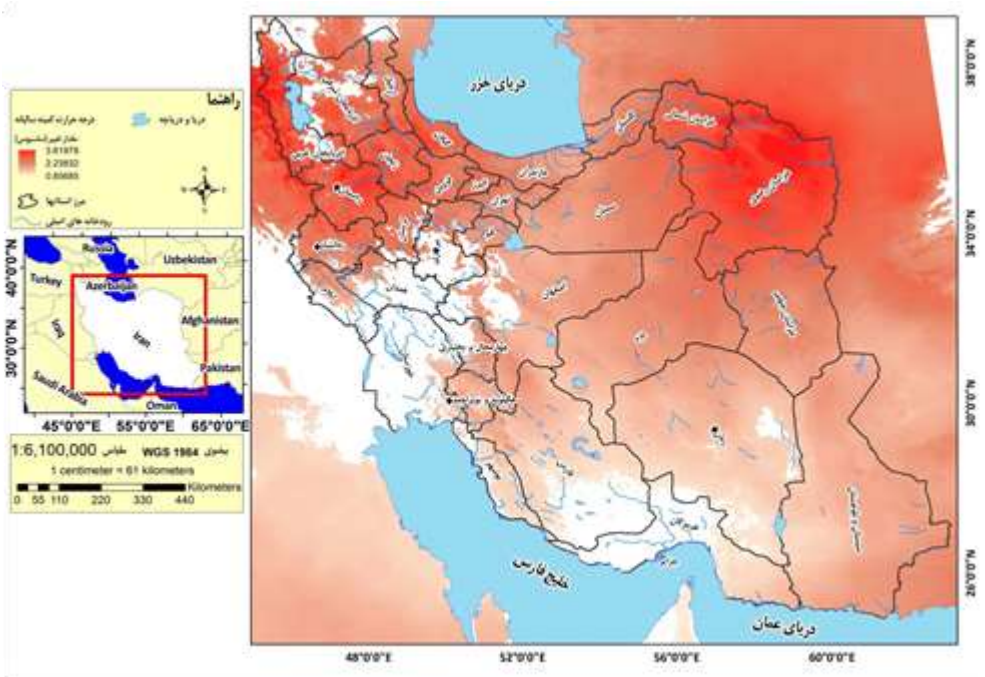
بررسی هیدرولوژیکی و انتخاب حوزه‌های آبخیز: مشخص نمودن وضعیت توپوگرافی، موقعیت حوزه‌های آبخیز و پیکره‌های آبی اصلی کشور به صورت نقشه می‌تواند در تفسیرها و بهره‌برداری‌های آتی از دستاوردهای این مطالعه کمک ویژه‌ای نماید. در شکل ۳ وضعیت رودخانه‌های اصلی کشور، تالابها و حوزه‌های آبخیز هر یک به همراه وضعیت پستی و بلندی مشاهده می‌شود. برای نمایش حوزه‌های آبخیز از تقسیم‌بندی درجه سوم تهیه شده توسط سازمان تحقیقات منابع آب (تماب) استفاده شده است که مبتنی بر حوزه‌های اساسی رودخانه‌های اصلی کشور می‌باشد.



شکل ۳- وضعیت هیدرولوژیکی و زیرحوزه‌های آبخیز ایران

بررسی وضعیت تغییر پارامترهای اقلیمی بر اساس پایگاه تراکلایمت: شکل‌های ۴ تا ۱۰ تغییرات هر پارامتر اقلیمی در بخش‌های دارای روند معنی‌دار در سطح پنج درصد را نشان می‌دهند.

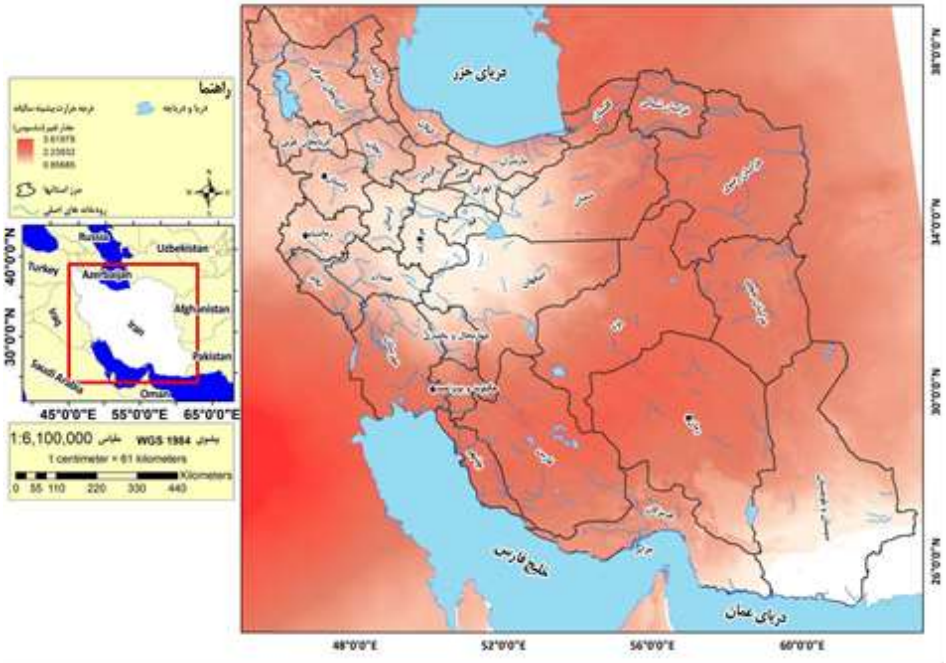
درجه حرارت کمینه سالیانه: شکل ۴ تغییرات معنی‌دار درجه حرارت کمینه در طول دوره مورد بررسی را نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل ۴ قابل مشاهده است، سطوح بدون روند معنی‌دار دمای کمینه سالیانه به صورت لکه‌ای در بخش جنوب، جنوب غربی، و شمال غربی مشاهده می‌شوند. در سایر مناطق کشور، به طور متوسط دمای کمینه سالیانه بیش از دو درجه در طول ۶۴ سال (۱۹۵۸ تا پایان ۲۰۲۱) افزایش معنی‌دار داشته است. بخش شمال‌غربی و شمال شرقی بیشترین اثر را از تغییر این پارامتر اقلیمی نشان می‌دهند به طوری‌که در برخی مناطق، افزایش درجه حرارت کمینه سالیانه بیش از ۳ درجه نشان داده است.



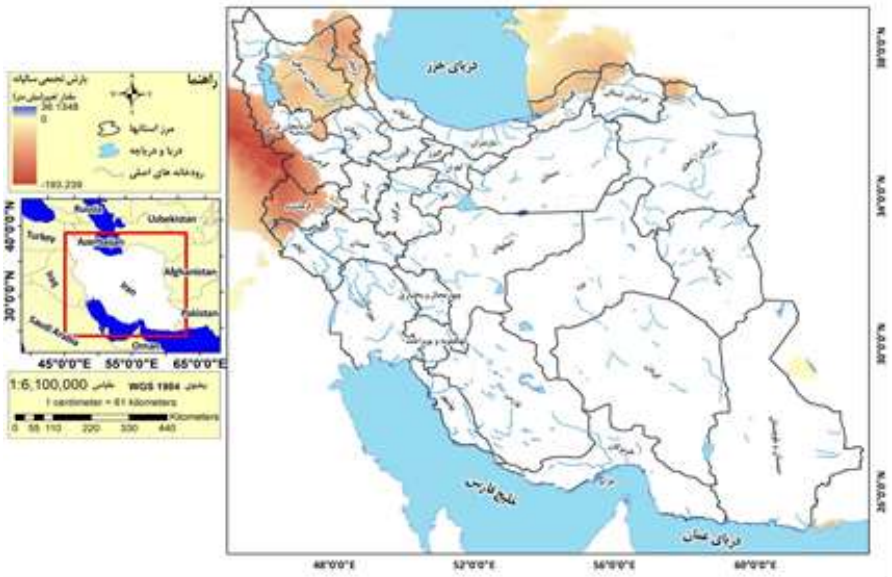
شکل ۴- تغییرات معنی‌دار درجه حرارت کمینه سالیانه (سطح معنی‌داری ۵ درصد)

درجه حرارت بیشینه سالیانه: بجز مرکز و جنوب شرقی کشور، به طور متوسط درجه حرارت بیشینه سالیانه نیز در حدود ۲ درجه سلسیوس بین ۱۹۵۸ تا پایان ۲۰۲۱ افزایش داشته است (شکل ۵).

بارش تجمعی سالیانه: مطابق شکل ۶ فقط بخش‌هایی از شمال و شمال غربی کشور کاهش معنی‌دار بارش تجمعی سالیانه را نشان داده‌اند. متاسفانه بیشتر تغییرات در بخش شمال غربی کشور و در حوزه دریاچه ارومیه اتفاق افتاده و در برخی مناطق در طول ۶۴ سال، بارش بیش از ۱۰۰ میلی‌متر کاهش نشان داده است و در برخی مناطق، این رقم از ۱۹۰ میلی‌متر تجاوز می‌کند.



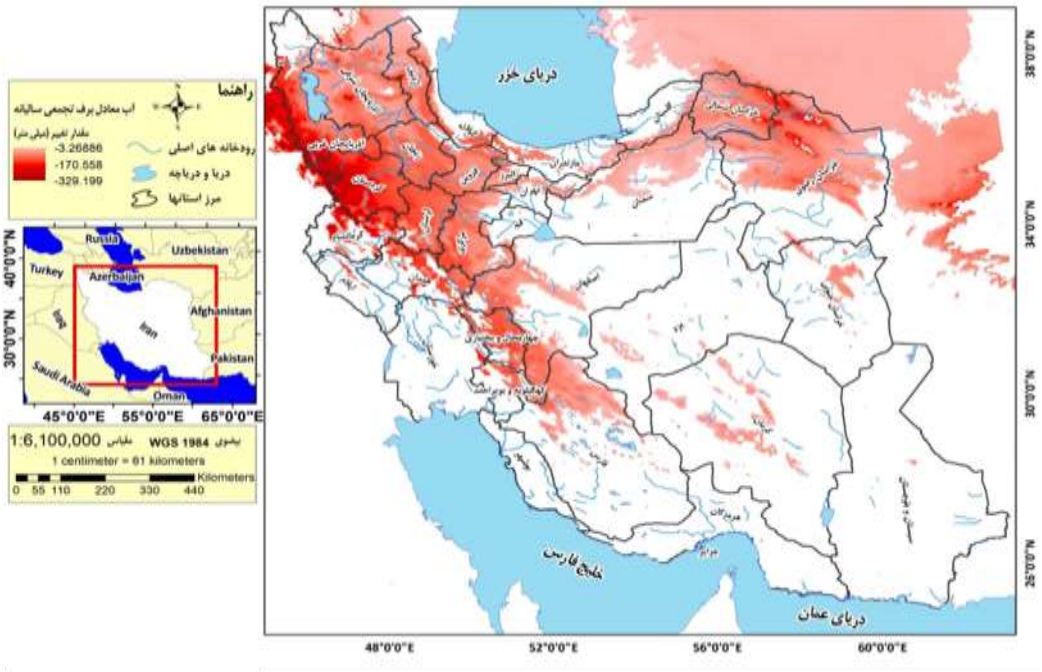
شکل ۵- تغییرات معنی‌دار درجه حرارت بیشینه سالیانه (سطح معنی‌داری ۵ درصد)



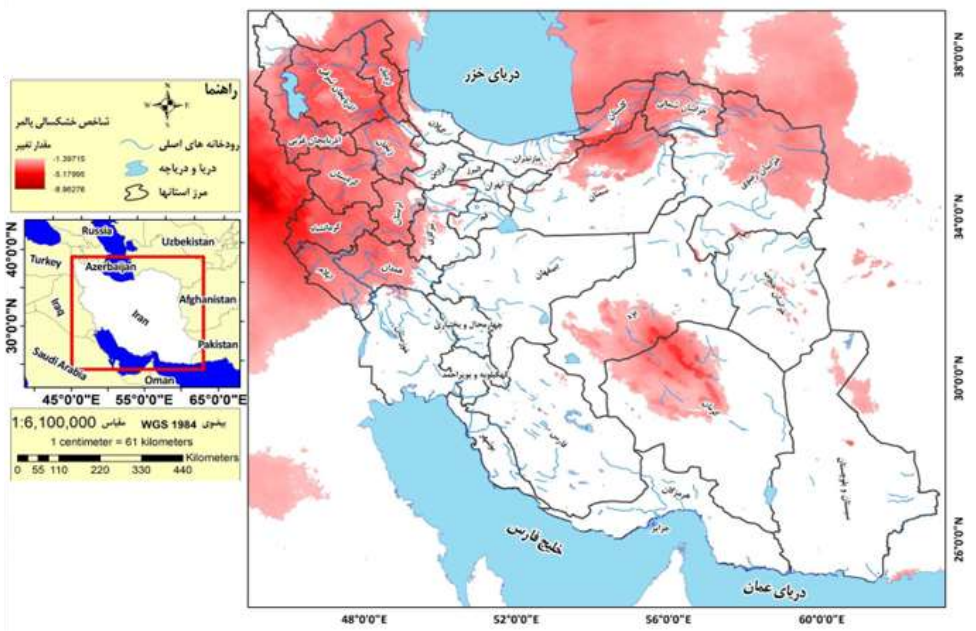
شکل ۶- تغییر معنی‌دار بارش تجمعی در کل کشور (سطح معنی‌داری ۵ درصد)

آب معادل برف: مطابق شکل ۷ رشته کوه‌های البرز و زاگرس، شمال غرب و شمال شرق کشور تغییرات معنی‌دار کاهشی در آب معادل برف نشان می‌دهند که بسیار قابل تامل است. متأسفانه در مورد این پارامتر نیز حوزه‌های دریاچه ارومیه وضعیت مناسبی ندارد و تغییرات کاهشی این پارامتر در آن‌ها بسیار شدید است.

شاخص خشکسالی پالمر: مطابق شکل ۸ مقدار این شاخص در بخش شمال غربی و شمال شرقی با شیب زیادی به سمت بدتر شدن و خشک‌تر شدن حرکت نموده است.



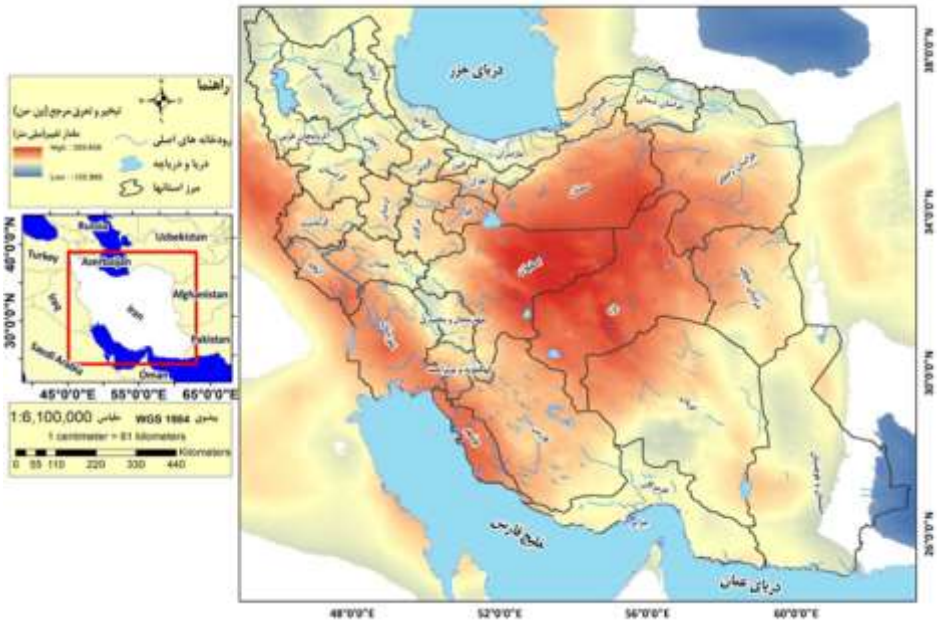
شکل ۷- تغییر معنی‌دار آب معادل برف تجمعی سالیانه (سطح معنی‌داری ۵ درصد)



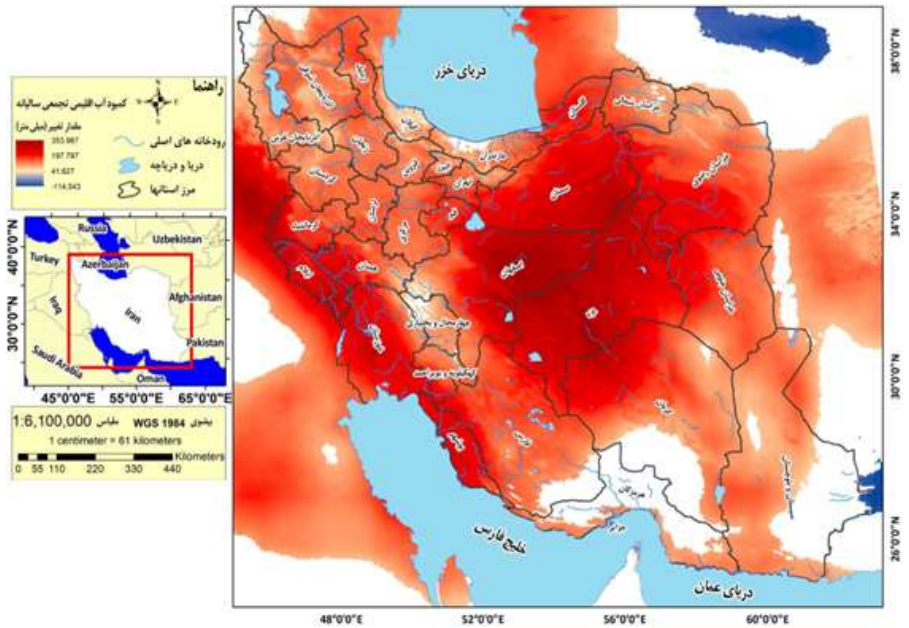
شکل ۸- تغییرات شاخص خشکسالی پالمر (سطح معنی‌داری ۵ درصد)

تبخیر و تعرق مرجع (پن-من): مطابق شکل ۹، مناطق مرکزی ایران روند معنی‌دار افزایش شدید تبخیر و تعرق مرجع نشان داده که برای پوشش گیاهی استپی و بسیار پراکنده این مناطق می‌تواند تهدید تلقی شود.

کمبود آب اقلیمی: شکل ۱۰ به خوبی نشان می‌دهد بیشتر مناطق کشور با روند شدید کمبود آب اقلیمی مواجه هستند، به بیان دیگر تبخیر و تعرق پتانسیل نسبت به مقادیر واقعی آن به دلیل افزایش دمای هوا و خشک‌تر شدن به شدت در حال افزایش است.

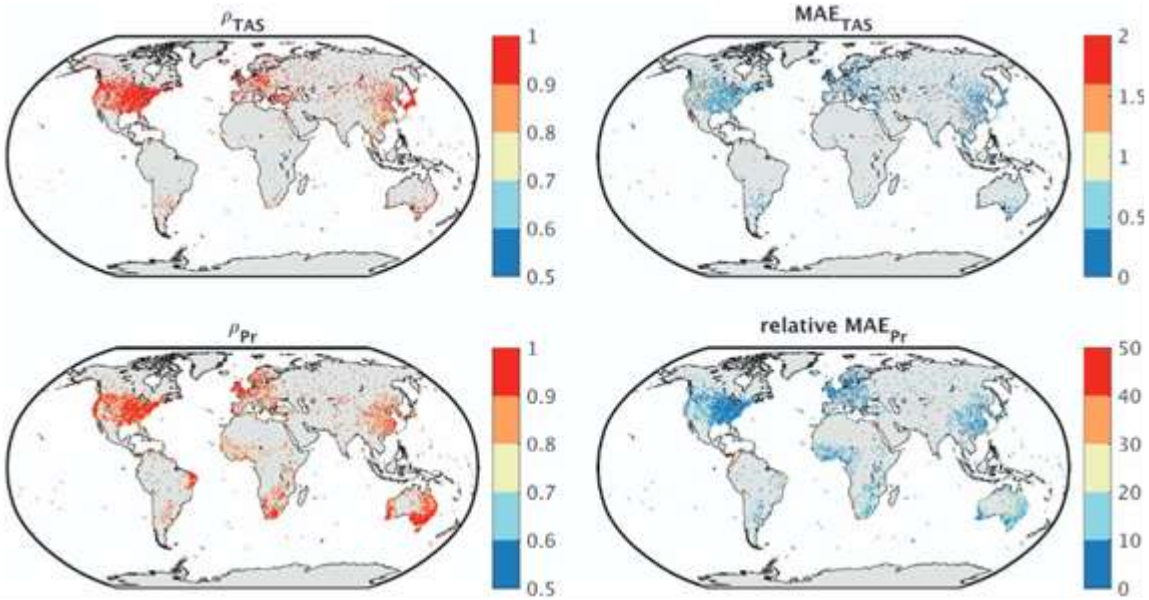


شکل ۹- تغییر تبخیر و تعرق مرجع (پن-من) تجمعی سالیانه (سطح معنی‌داری ۵ درصد)



شکل ۱۰- تغییر کمبود آب اقلیمی تجمعی سالیانه (سطح معنی‌داری ۵ درصد)

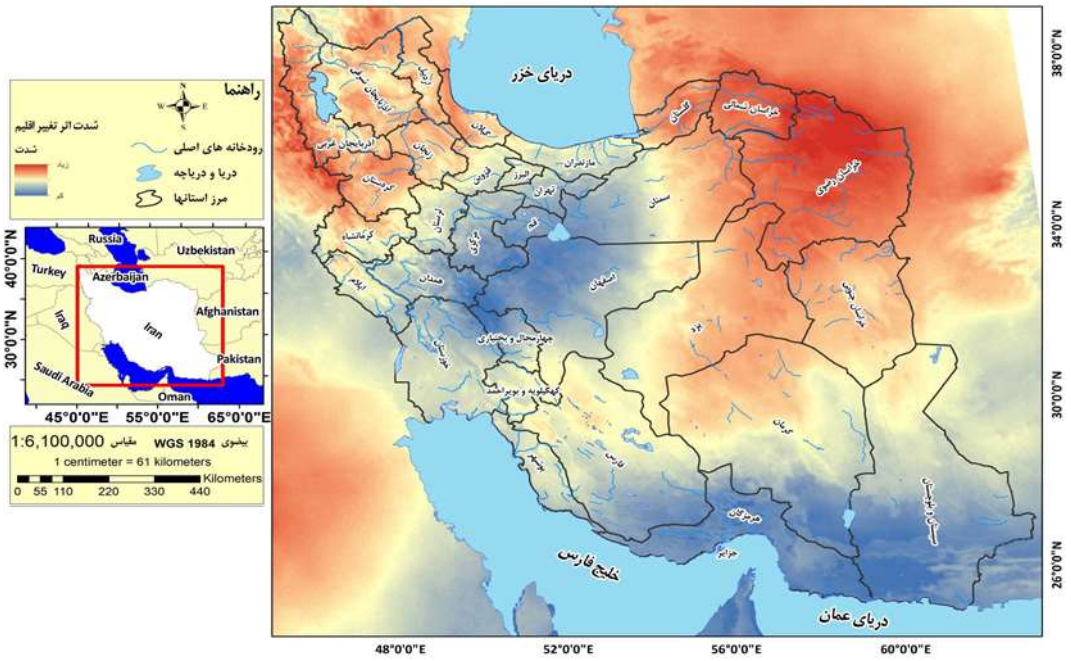
صحت‌سنجی داده‌های TerraClimate: داده‌های تراکلایمت با داده‌های مبتنی بر آماره ایستگاه‌های هواشناسی شبکه‌های جهانی شامل (Global Historical Climate Network, SNOTEL, RAWS) واسنجی شده‌اند و همبستگی قدرتمندی با این اطلاعات نشان داده‌اند (شکل ۱۱). همچنین منابع اشاره می‌کنند که از منظر آماری، اعتبار آن‌ها کمی بهتر از داده‌ی مادر خود یعنی CRU Ts 4.0 می‌باشد، به‌خصوص در مورد اندازه خطا به سبب قدرت تفکیک مکانی بهتر این داده. به علاوه داده‌های تبخیر و تعرق آن به شبکه ایستگاه‌های اندازه‌گیری مرجع تبخیر و تعرق FLUXNET متصل و کاملاً معتبر است (Abatzoglou *et al.*, 2018). با این وجود پیشنهاد می‌شود در مطالعات محلی این داده‌های پیش از استفاده با داده‌های معتبر ایستگاه‌های هواشناسی اعتبارسنجی شوند.



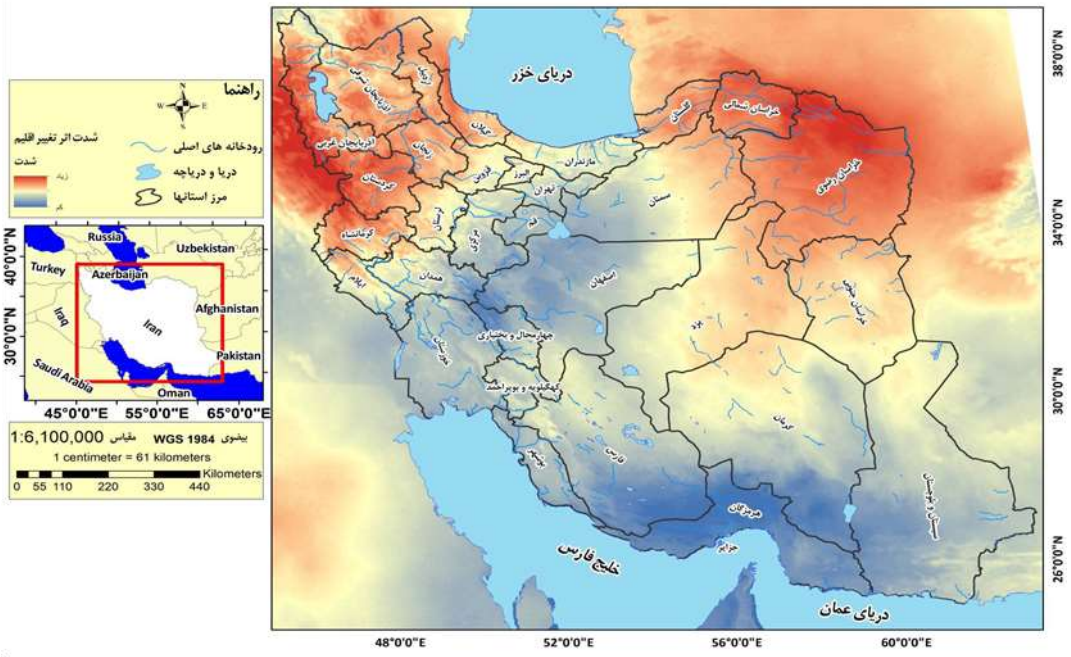
شکل ۱۱- رابطه همبستگی پیرسون بین اطلاعات ایستگاه‌های هواشناسی و داده‌های تراکلایمت (بالاسمت راست: درجه حرارت متوسط سالیانه، بالا سمت چپ: خطای مطلق میانگین دمای ایستگاه و داده تراکلایمت؛ پایین همین ارزیابی برای پارامتر بارش)

تخمین شدت و گستردگی تغییر اقلیم در ایران بر اساس سابقه تاریخی: سه پارامتر دمای کمینه، دمای بیشینه و بارش به دلیل برآورد شدن از مقادیر مشاهداتی و پذیرش جهانی برای تلفیق در نقشه شدت تغییر اقلیم به‌کار گرفته شدند. در این مطالعه این سه لایه بر اساس میزان تغییر به صورت فازی با تابع عضویت خطی (رابطه مستقیم برای دما و معکوس برای بارش) استاندارد شدند. برای تلفیق آن‌ها در یک رویکرد، وزن مساوی بر هر لایه در روش ارزیابی چند معیاره لحاظ شد (شکل ۱۲) و در رویکرد دیگر با مشورت و نظرات کارشناسی متخصصین (Rayegani *et al.*, 2020) برای بارش وزن ۰/۵، برای درجه حرارت کمینه به دلیل نقش مؤثر در برف، وزن ۰/۳۳ و برای درجه حرارت بیشینه، وزن ۰/۱۶ از وزن مجموع یک لحاظ شد (شکل ۱۳).

درست است که اعداد شدت تغییرات اقلیمی برای دو رویکرد بر اساس منطق فازی کمی با یکدیگر متفاوت هستند ولی مناطق تحت تأثیر شرایط متوسط و شدید تغییر اقلیم در هر دو به یکدیگر شبیه است. به طور کلی جنوب کشور و بخش مرکزی کمترین آسیب را از تغییر اقلیم داشته‌اند ولی در بخش شمال غربی و شمال شرقی آسیب تغییر اقلیم شدیدتر است. با توجه به قرارگیری بزرگترین دریاچه داخلی کشور (ارومیه) در بخش شمال غربی با بیشترین آسیب از تغییر اقلیم وضعیت آینده این دریاچه کاملاً نگران کننده خواهد بود.



شکل ۱۲- شدت و گستردگی تغییرات اقلیمی بر اساس سابقه تاریخی مبتنی بر منطق فازی و روش ترکیب وزنی خطی (وزن یکسان)

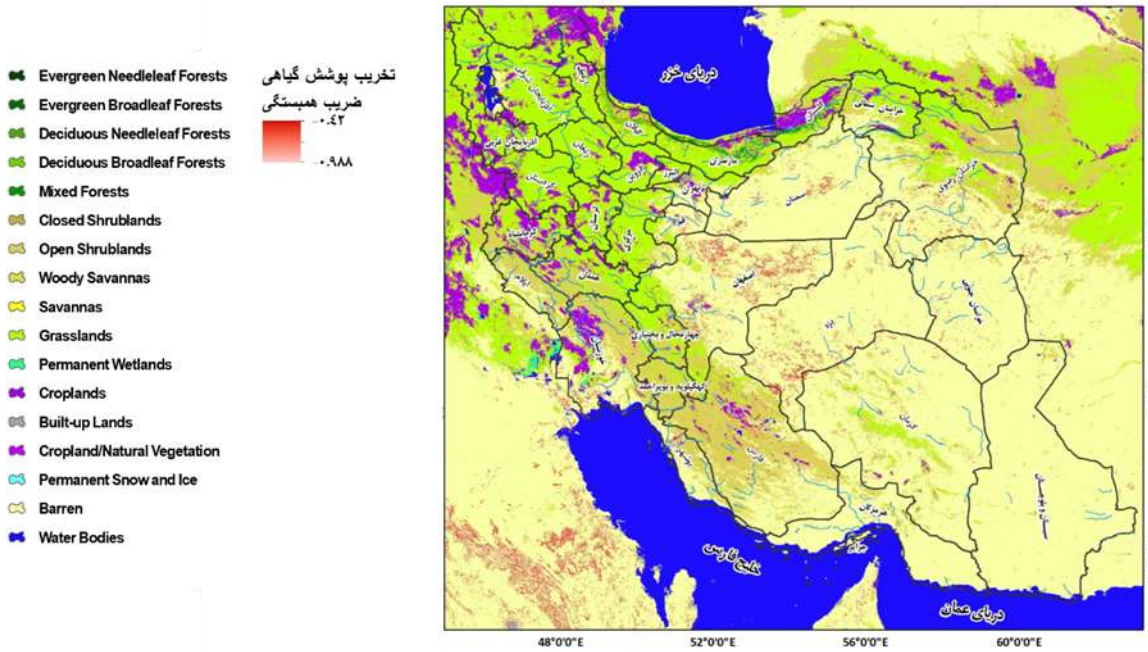


شکل ۱۳- شدت و گستردگی تغییرات اقلیمی بر اساس سابقه تاریخی مبتنی بر منطق فازی و روش ترکیب وزنی خطی (وزن‌دهی شده)

تغییرات منفی پوشش گیاهی در بیست سال گذشته: سنجنده‌های ماهواره‌ای بی‌نقص عمل نمی‌کنند و در ثبت اطلاعات زمین دچار خطای سیستماتیک هستند. از سوی دیگر به دلیل قرارگیری کشور در بخش خشک و نیمه خشک جهان، نوسانات بارش و درجه‌حرارت بر شاخص‌های پوشش گیاهی سال به سال اثر متفاوتی دارند. به منظور کاهش خطای سنجنده و حذف داده‌های پرت، برای هر سال ابتدا مقدار میانه سالیانه شاخص NDVI بدست آمد، سپس در یک فرآیند رگرسیونی رابطه میانه این شاخص با تغییر زمانی سالیانه به کمک همبستگی پیرسون بررسی شد. در نهایت مناطقی که مقدار ارزش پی کمتر از ۰/۰۵ داشتند و ضریب همبستگی آن‌ها منفی

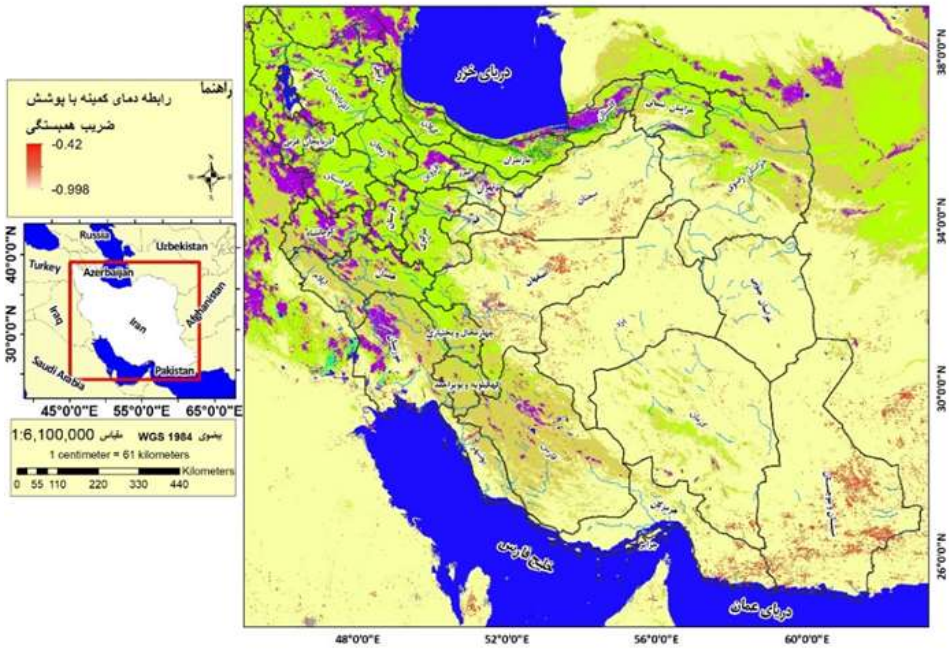
بود به عنوان بخش‌های دارای روند کاهشی پوشش گیاهی علامت زده شدند (شکل ۱۴). در شکل ۱۴ به وضوح مشخص است که بیشتر تخریب پوشش گیاهی در ۲۰ سال گذشته در مناطق دارای پوشش گیاهی پراکنده (زمین‌های بایر) به وقع پیوسته است و در رتبه دوم بوته‌زارها، بیشترین آسیب پوشش گیاهی را نشان می‌دهند. استان‌های اصفهان، یزد، سمنان، خراسان رضوی و فارس بیشترین روند منفی پوشش گیاهی را نشان می‌دهند. نکته‌ای که در اینجا حائز اهمیت است، اثر تغییر پارامترهای اقلیمی بر پوشش گیاهی می‌باشد که در بخش‌های بعدی مورد ارزیابی قرار گرفت.

بررسی اثر افزایش دمای کمینه سالیانه بر پوشش گیاهی: دو نکته در اینجا و ارزیابی‌های اثر تغییر پارامترهای اقلیمی بر پوشش گیاهی باید مدنظر قرار داشته باشد: اول دوره زمانی این ارزیابی ۲۱ سال است (از ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۱) که نتایج آن می‌تواند از ارزیابی اصلی روند تغییرات پارامترهای اقلیمی (از ۱۹۵۸ تا ۲۰۲۱) که در بخش‌های قبلی بیان شد، متفاوت باشد. دوم تنها بخش‌هایی در این ارزیابی علامت زده شده است که بر اثر تغییر پارامتر اقلیمی پوشش گیاهی واکنش منفی نشان داده است، اما این واکنش می‌تواند هنوز قابل رصد نباشد و اثر آن هنوز به لحاظ آماری قابل ملاحظه نباشد.



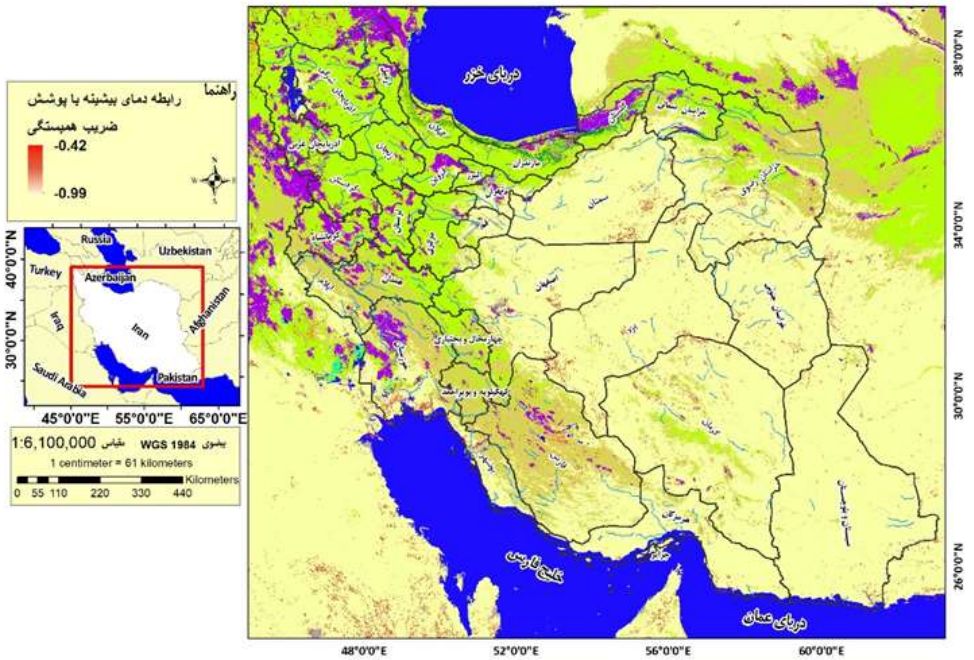
شکل ۱۴- تغییرات منفی پوشش گیاهی از سال ۲۰۰۰ بر اساس میانه NDVI سالیانه

برای این ارزیابی، داده‌های تراکلایمت که به صورت سالیانه استخراج شده بود با میانه شاخص NDVI سالیانه در یک دوره مشترک از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۱ ترکیب شدند. سپس برای هر پیکسل در داده تراکلایمت، تغییر شاخص NDVI میانه به صورت سالیانه وارد همبستگی پیرسون شد. سپس با اعمال ارزش پی و مثبت یا منفی بودن ضریب همبستگی، بخش‌هایی علامت زده شد که به لحاظ آمار تغییر پارامتر اقلیمی، باعث واکنش منفی پوشش گیاهی شده بود. برای مثال همانگونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، در اغلب بخش‌های کشور دمای کمینه سالیانه افزایش معنی‌دار داشت، برای این پارامتر، مناطقی که این افزایش دما، باعث کاهش معنی‌دار پوشش گیاهی شده بود، به کمک ارزش پی و جهت ضریب همبستگی علامت زده شد (شکل ۱۵). همانگونه که در شکل ۱۵ قابل مشاهده است، مناطق دارای پوشش گیاهی کمتر از ۱۰ درصد (زمین‌های بایر) بیشترین آسیب را از تغییر دمای کمینه سالیانه متحمل شده‌اند. در این میان استان‌های سیستان و بلوچستان، اصفهان، سمنان و شرق استان هرمزگان بیشترین تغییرات منفی پوشش گیاهی در اثر افزایش دمای کمینه را نشان داده‌اند.



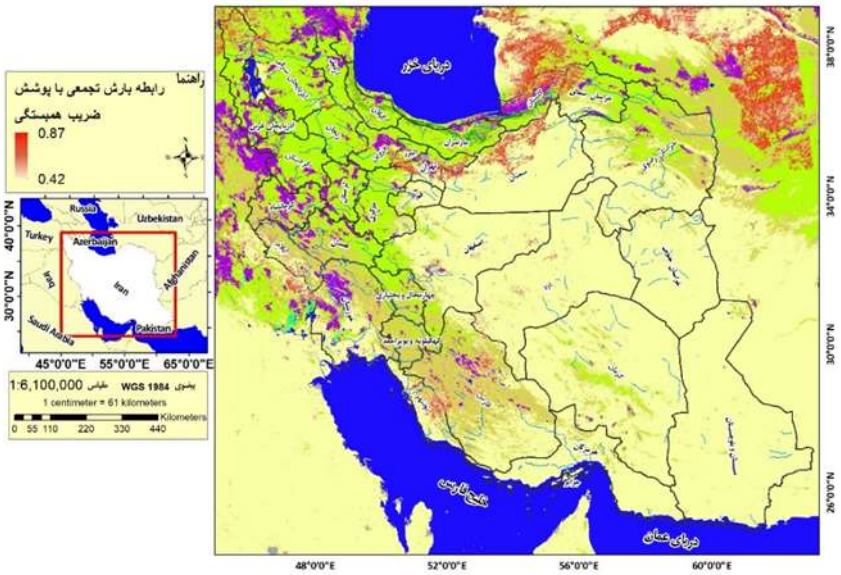
شکل ۱۵- رابطه همبستگی میان افزایش دمای کمینه سالیانه با کاهش معنی‌داری پوشش گیاهی بر اساس میانه NDVI سالیانه

بررسی اثر افزایش دمای بیشینه سالیانه بر پوشش گیاهی: در اینجا نیز مطابق آن‌چه در مورد دمای کمینه سالیانه بیان شد، بر اساس همبستگی پیرسون مناطقی مشخص شده‌اند که افزایش دمای بیشینه سالیانه باعث کاهش معنی‌دار پوشش گیاهی شده بود. همانگونه که در شکل ۱۶ قابل مشاهده است، مجدد در مرکز ایران بخش پوشش گیاهی پراکنده بیشترین آسیب را از افزایش دمای بیشینه داشته است. همچنین استان خوزستان در نوع پوشش گیاهی پراکنده و استان فارس در بخش بوته‌زارها از افزایش دمای بیشینه سالیانه آسیب دیده‌اند.



شکل ۱۶- رابطه همبستگی میان افزایش دمای بیشینه سالیانه با کاهش معنی‌داری پوشش گیاهی بر اساس میانه NDVI سالیانه

بررسی اثر کاهش بارش تجمعی بر پوشش گیاهی: برای این ارزیابی ابتدا مناطقی علامت زده شدند که رابطه همبستگی زمانی آن‌ها روند کاهشی نشان می‌داد. سپس در این مناطق اثر نوسان بارش بر پوشش گیاهی به کمک همبستگی پیرسون بررسی شد (شکل ۱۷). همان‌گونه که در شکل ۱۷ قابل مشاهده است، در استانهای گلستان، سمنان، تهران، البرز، آذربایجان غربی، فارس و بوشهر، نوسان کاهش بارش تجمعی در ۲۰ سال گذشته، باعث کاهش معنی‌دار پوشش گیاهی شده است.



شکل ۱۷- رابطه همبستگی میان کاهش بارش تجمعی با کاهش معنی‌داری پوشش گیاهی بر اساس میانه NDVI سالیانه

بحث

نتایج این مطالعه نشان داد که طی ۶۴ سال گذشته، تغییرات اقلیمی در ایران روندی کاملاً مشهود و معنی‌دار داشته است. دمای کمینه و بیشینه سالیانه به‌طور متوسط بیش از دو درجه سلسیوس افزایش یافته که تأثیرات گسترده‌ای بر منابع طبیعی و اکوسیستم‌های کشور داشته است. کاهش بارش تجمعی در برخی مناطق، به‌ویژه در شمال غرب و نواحی فلات مرکزی، همراه با افزایش کمبود آب اقلیمی، تشدید خشکسالی‌ها را به دنبال داشته است. علاوه بر این، تحلیل داده‌های مربوط به آب معادل برف (SWE) کاهش چشمگیری را در ارتفاعات البرز و زاگرس نشان می‌دهد که پیامدهای قابل توجهی بر منابع آب شیرین و تغذیه آبخوان‌های کشور خواهد داشت. شدت تغییرات در بخش‌های شمال غرب، غرب و شمال شرق کشور به‌طور چشمگیری بیشتر از سایر مناطق بوده و اثرات آن در کاهش پوشش گیاهی و بیابان‌زایی نمود یافته است.

مقایسه نتایج این پژوهش با مطالعات پیشین، همخوانی بالایی را در مورد روند افزایشی دما و کاهش منابع آبی در ایران نشان می‌دهد. به عنوان مثال، پژوهش Hosseinabadi و همکاران (۲۰۲۰) نیز تأکید کرده است که ایران با افزایش دما و کاهش بارش طی دهه‌های اخیر مواجه بوده و این تغییرات در برخی مناطق منجر به خشکسالی‌های شدیدتر شده است. همچنین، مطالعه Ahmadalipour و همکاران (۲۰۱۷) در سطح جهانی نشان داده است که شدت خشکسالی‌های آینده در مناطق خشک و نیمه‌خشک، از جمله خاورمیانه، با افزایش دما و کاهش بارش تشدید خواهد شد. نتایج پژوهش حاضر از نظر تغییرات دما و تأثیرات آن بر منابع آب و پوشش گیاهی، با این مطالعات همخوانی دارد. با این حال، یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد که شدت و گستردگی تغییرات اقلیمی در ایران بیشتر از آن چیزی است که برخی از مطالعات پیش‌بینی کرده‌اند.

نتایج این مطالعه همچنین نشان داد که تغییرات اقلیمی اثرات قابل‌توجهی بر پوشش گیاهی ایران داشته است.

کاهش بارش سالانه در بسیاری از نقاط کشور، همراه با افزایش تبخیر و تعرق، منجر به کاهش شاخص NDVI شده است. این کاهش در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران، به‌ویژه در استان‌های اصفهان، یزد، خراسان رضوی و فارس، مشهودتر است. مطالعه Bagherzadeh و همکاران (۲۰۲۰) نیز کاهش پوشش گیاهی را در نتیجه تغییرات دما و بارش در نواحی خشک ایران تأیید کرده است. پژوهش‌های دیگر مانند Shams و همکاران (۲۰۱۹) نیز تأثیرات تغییرات اقلیمی بر زیستگاه‌های طبیعی را مورد بررسی قرار داده و نشان داده‌اند که تغییرات دما و کاهش منابع آبی، موجب کاهش تنوع زیستی و تخریب زیستگاه‌های طبیعی شده است. این یافته‌ها، در کنار نتایج تحقیق حاضر، تأکیدی بر اثرات مخرب تغییر اقلیم بر پوشش گیاهی و زیست‌بوم‌های کشور دارد.

با توجه به نتایج این پژوهش، اتخاذ راهبردهای حفاظتی و مدیریتی برای مقابله با اثرات تغییر اقلیم ضروری به نظر می‌رسد. مدیریت منابع آب باید به‌عنوان اولویتی راهبردی در برنامه‌های ملی و منطقه‌ای مورد توجه قرار گیرد. توسعه سامانه‌های پایش خشکسالی و منابع آب، استفاده از تکنیک‌های مدیریت تلفیقی آب و کشاورزی سازگار با تغییرات اقلیمی و گسترش روش‌های نوین آبیاری در مناطق خشک از جمله راهکارهای پیشنهادی برای کاهش تأثیرات تغییر اقلیم بر منابع آبی کشور هستند. علاوه بر این، افزایش پوشش گیاهی در مناطق حساس به فرسایش و بیابان‌زایی، احیای جنگل‌ها و مراتع و استفاده از گونه‌های مقاوم به خشکی می‌تواند به حفظ تنوع زیستی و کاهش روند بیابان‌زایی کمک کند. توسعه سیاست‌های کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، بهبود مدیریت پسماندهای کشاورزی، و تغییر الگوی مصرف انرژی نیز در سطح کلان می‌تواند نقش مؤثری در کاهش اثرات تغییر اقلیم داشته باشد.

در نهایت، با توجه به تغییرات سریع اقلیمی، لازم است که پایش‌های دوره‌ای و مدل‌سازی‌های پیشرفته برای پیش‌بینی روندهای آینده تغییرات اقلیمی و اثرات آن بر منابع طبیعی کشور انجام شود. نتایج این پژوهش می‌تواند به‌عنوان مرجعی برای سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان در جهت تدوین برنامه‌های سازگاری با تغییر اقلیم و حفاظت از منابع طبیعی کشور مورد استفاده قرار گیرد.

تشکر و قدردانی

این مقاله مستخرج از طرح تحقیقاتی "طرح بررسی میزان و گستردگی تغییر اقلیمی در نقاط مختلف سطح کل کشور" با حمایت مالی معاونت محیط زیست انسانی و مرکز ملی هوا و تغییر اقلیم سازمان محیط زیست می‌باشد. نگارندگان بر خود واجب می‌دانند بدین وسیله مراتب قدردانی خود را از تمامی عزیزانی که در اجرا آن طرح همکاری نمودند علی الخصوص جناب آقای دکتر گل علیزاده ریاست محترم مرکز ملی هوا و تغییر اقلیم، سرکار خانم مهندس عزیزی رییس گروه محترم تغییر اقلیم مرکز مذکور و سرکار خانم دکتر حسنی ابراز دارند.

منابع

1. **Abatzoglou, J.T., Dobrowski, S.Z., Parks, S.A. and Hegewisch, K.C., 2018.** Terraclimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958-2015, Scientific Data.
2. **Ahmadalipour, A., Moradkhani, H. and Svoboda, M., 2017.** Centennial drought outlook over the CONUS using NASA-NEX downscaled climate ensemble. International Journal of Climatology 37, 2477-2491.
3. **Akbary, M. and Sayad, V., 2021.** Analysis of climate change studies in Iran. Physical Geography Research 53, 37-74 (In Persian With English abstract).
4. **Alley, W.M., 1984.** The Palmer drought severity index: limitations and assumptions. Journal of Applied Meteorology and Climatology 23, 1100-1109.
5. **Asakereh, H., Masoodian, S.A. and Fatemeh, T., 2021.** Variation in the Spatial Factors Affecting Precipitation in Relation to the Decadal Changes of Annual Precipitation in Iran. Geography and Environmental Planning 32, 129-146 (In Persian With English abstract).
6. **Bagherzadeh, A., Hoseini, A.V. and Totmaj, L.H., 2020.** The effects of climate change on normalized difference vegetation index (NDVI) in the Northeast of Iran. Modeling Earth Systems and Environment 6(2): 671-683.
7. **Borzou, F., Zolfaghari, H., Masoompour Samakosh, J. and Sahraei, J., 2021.** Spatial Analysis of Dust Storms in Iran based on Climatic and Vegetation Characteristics. Geography

and Environmental Sustainability 11(1): 1-23 (In Persian With English abstract).

8. **Casanueva, A., Kotlarski, S., Liniger, M.A., Schwierz, C. and Fischer A.M., 2023.** Climate change scenarios in use: Heat stress in Switzerland. Climate Services 30: 100372.
9. **Gheitanchi, M. and Nouri Delouei M., 2021.** Fault mechanisms and their frequencies during destructive earthquakes in Iran. Journal of Tectonics 5(18): 91-102.
10. **Heydari Alamdarloo, E., Zehtabian, G., Khosravi, H., Raygani, B., Khalighi, S. and Taghizadeh, R., 2019.** Investigation on the Climatic Parameters Fluctuation Using Data from the The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (Case study: Shirkouh Region - Yazd Province). Iranian Jornal of Watershed Management Science&Engineering 13(46): 22-31.
11. **Hosseinabadi, S., Yaghoobzadeh, M., Amirabadizadeh, M. and Foroozanmehr, M., 2020.** Meteorological Drought Assessment in Future Periods by Using of the Data of the Fifth Report of Climate Change (Case Study: Zabol and Shiraz Cities). Arid Regions Geographic Studies 10(40): 78-87.
12. **Huang, K., Li, X., Liu, X. and Seto, K.C., 2019.** Projecting global urban land expansion and heat island intensification through 2050. Environmental Research Letters 14(11): 114037.
13. **Lungarska, A. and Chakir, R., 2024.** Projections of climate change impacts on ecosystem services and the role of land use adaptation in France. Environmental and Sustainability Indicators 22: 100369.
14. **Rayegani, B., Barati, S., Goshtasb, H., Gachpaz, S., Ramezani, J. and Sarkheil, H., 2020.** Sand and dust storm sources identification: A remote sensing approach. Ecological Indicators, 112, 106099.
15. **Rostam Afshar, S., Rahmati, S.H. and Fahmi, H., 2022.** Impacts of droughts on environment flow (Case study: Minab River, Hormozgan, Iran). Journal of Environmental Science and Technology 23(12) (In Persian With English abstract).
16. **Salehi Tabas, M., Yaghoubzadeh, M., Hashemi, R., Mansori, H. and Ghavamsaeed, S., 2019.** Estimating of Future Agricultural Drought by Use of the SMDI Index and Data of the Fifth Report on Climate Change. Journal of Water Research in Agriculture 33(3): 479-491(In Persian With English abstract).
17. **Shams, A., Nezami, B., Raygani, B. and Shams Esfand Abad, B., 2019.** Climate change and its effects on Asiatic Cheetah suitable habitats in Center of Iran (Case study: Yazd Province). Journal of Animal Environment 11(3): 1-12(In Persian With English abstract).
18. **Soltani Mohammadi, A., Mollaienia, M.R. and Ajam Zadeh, A., 2019.** Assesment of Climate Change Effect on Temperature and Precipitation Based on Fourth and Fifth IPCC reports (Case study: Isfahan Province). Journal of Irrigation Sciences and Engineering (JISE) 42(2): 1-16(In Persian With English abstract).
19. **Stephenson, N., 1998.** Actual evapotranspiration and deficit: biologically meaningful correlates of vegetation distribution across spatial scales. Journal of biogeography 25(5): 855-870.
20. **Suppiah, R., Hennessy, K., Whetton, P., McInnes, K., Macadam, I., Bathols, J., Ricketts, J. and Page, C., 2007.** Australian climate change projections derived from simulations performed for the IPCC 4th Assessment Report. Australian Meteorological Magazine 56(3): 131-152.
21. **Thrasher, B., Maurer, E.P., McKellar, C. and Duffy, P.B. 2012.** Bias correcting climate model simulated daily temperature extremes with quantile mapping. Hydrology and Earth System Sciences, 16(9), 3309-3314.
22. **Weiskopf, S.R., Rubenstein, M.A., Crozier, L.G., Gaichas, S., Griffis, R., Halofsky, J.E., Hyde, K.J.W., Morelli, T.L., Morisette, J.T., Muñoz, R.C., Pershing, A.J., Peterson, D.L., Poudel, R., Staudinger, M.D., Sutton-Grier, A.E., Thompson, L., Vose, J., Weltzin, J.F. and Whyte, K.P., 2020.** Climate change effects on biodiversity, ecosystems, ecosystem services, and natural resource management in the United States. Science of The Total Environment 733: 137782.

2025, The Author(s). Research Center for Environment and Sustainable Development (RCESD). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

Environment & Interdisciplinary Development
Journal homepage: https://www.envjournal.ir

Assessment of the Magnitude and Extent of Climate Change in Different Regions of Iran

Behzad Rayegani[*1], Susan Barati[2], Mohammad Reza Farzaneh[3], Farhad Hosseini Tayefeh[4], Abed. Torabinia[5]

1[*]- Research Group of Assessment and Environment Risks, Research Center for Environment and Sustainable Development, (RCESD), Department of Environment, Tehran, Iran
2- Watershed Management Research Group, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization, Tehran, Iran
3- Research Group of Environmental Engineering and Pollution Monitoring, Research Center for Environment and Sustainable Development, (RCESD), Department of Environment, Tehran, Iran
4- Research Group of Biodiversity and Biosafety, Research Center for Environment and Sustainable Development (RCESD), Department of the Environment, Tehran, Iran
5- College of Environment, Department of Environment, Karaj, Iran

Original Article

Received: 2025.01.18

Accepted: 2025.03.09

Keywords: Terraclimate, Minimum Temperature, Maximum Temperature, Cumulative Annual Precipitation, Palmer Drought

Abstract

Introduction: Climate change is recognized as one of the most critical environmental challenges of the 21st century, significantly impacting ecosystems, natural resources, and human livelihoods. The increasing concentration of greenhouse gases, particularly carbon dioxide, has resulted in profound alterations in temperature, precipitation patterns, water availability, and the frequency of extreme weather events. Iran, characterized by its predominantly arid and semi-arid climate, is highly susceptible to these changes. A comprehensive analysis of the intensity and extent of climate change and its effects on natural resources, particularly vegetation, is essential for sustainable resource management. This study aims to assess climate change impacts in Iran from 1958 to 2021 and evaluate its relationship with changes in natural vegetation cover.

Materials and Methods: This research was conducted in two main phases. In the first phase, TerraClimate data were used to analyze climatic changes across Iran. Parameters such as minimum and maximum temperatures, cumulative precipitation, runoff, actual evapotranspiration, reference evapotranspiration, climatic water deficit, and the Palmer Drought Severity Index were analyzed annually. Statistically significant trends were identified using correlation and linear regression analyses, and climatic change maps were generated. A comprehensive map depicting the intensity of climate change was developed using the Weighted Linear Combination (WLC) method based on fuzzy logic, focusing on three key parameters: minimum temperature, maximum temperature, and precipitation. In the second phase, changes in natural vegetation cover were analyzed using the NDVI index and MODIS satellite imagery. Natural vegetation areas were identified, and the annual trends in vegetation cover changes were evaluated for statistical significance. The relationship between climatic changes and vegetation degradation was assessed through Pearson correlation analysis, and relevant maps were created.

Results: The findings indicated that climate change impacts are evident across Iran

* Corresponding Author's email: bhz.ray@gmail.com

but are not uniformly distributed. The northwest, west, the Zagros region, and the northeast experienced the most intense changes. In these areas, annual minimum and maximum temperatures increased by more than 2 to 3°C, while cumulative precipitation decreased by over 100 mm in some regions. Central and eastern Iran faced significant increases in climatic water deficits, leading to substantial vegetation degradation. Northern provinces such as Gilan, Ardabil, and Golestan are severely threatened, with permanent wetlands at significant risk. Vegetation analysis revealed that declining precipitation and rising temperatures, particularly in arid and semi-arid regions, have played a crucial role in vegetation decline, most notably in barren lands and shrublands.

Discussion: This study confirms that Iran has faced significant climate change impacts in recent decades, with detrimental effects on its natural resources and ecosystems. Rising temperatures, declining precipitation, and intensifying water deficits pose substantial challenges to resource sustainability. The results underscore the urgency of formulating comprehensive policies and implementing national strategies to mitigate climate change effects, manage water resources, and protect vulnerable ecosystems. Continuous monitoring of climate change and its effects on natural resources is imperative for informed decision-making and effective planning.