مجله محیط زیست و توسعه فرابخشی ۱۰ (۸۸) تابستان ۱۴۰۴: ۳۳-۱۹
(ویژه‌نامه تغییر اقلیم)

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

بررسی شرایط اقلیمی ۲۰ سال آتی در مناطق مختلف ایران

بهزاد رایگانی*[۱]، سوسن براتی[۲]، فرهاد حسینی طایفه[۳]

۱- گروه پژوهشی ارزیابی و مخارات محیط‌زیست، پژوهشکده محیط زیست و توسعه پایدار، سازمان حفاظت محیط زیست، تهران، ایران*
۲- پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران
۳- گروه پژوهشی تنوع‌زیستی و ایمنی‌زیستی، پژوهشکده محیط زیست و توسعه پایدار، سازمان حفاظت محیط زیست، تهران، ایران

نوع مقاله:
پژوهشی

تاریخچه مقاله:
دریافت:
۱۴۰۳/۱۱/۲۶
پذیرش:
۱۴۰۳/۱۲/۲۶

کلمات کلیدی:
تغییر اقلیم، ایران، ریزمقیاس‌نمایی، CMIP6، دمای کمینه و بیشینه، بارش، عامل تغییر، تراکلایمت، روش ترکیب وزنی خطی

چکیده

مقدمه: تغییر اقلیم یکی از جدی‌ترین چالش‌های محیط‌زیستی دوران معاصر است که از طریق افزایش دمای هوا، تغییر در الگوی بارش و بروز رخدادهای حدی نظیر خشکسالی و سیل، بر منابع طبیعی و معیشت انسان تأثیر می‌گذارد. ایران به دلیل اقلیم عمدتاً خشک و نیمه‌خشک، در برابر این پدیده به‌ویژه آسیب‌پذیر است. شواهد نشان می‌دهد که در برخی مناطق ازجمله شمال‌غرب و زاگرس، همزمان با افزایش دما، کاهش بارش رخ داده و این روند در آینده نزدیک نیز تشدید خواهد شد. پژوهش حاضر با هدف بررسی و تصویرسازی وضعیت اقلیمی ۲۰ سال آینده ایران و شناخت شدت و گستردگی تغییرات، به ارائه داده‌های کمی در راستای برنامه‌ریزی‌های ملی و منطقه‌ای می‌پردازد.

مواد و روش‌ها: این مطالعه از داده‌های اقلیمی مدل‌های نسل ششم گردش عمومی (CMIP6) در چهار سناریوی انتشار گازهای گلخانه‌ای (SSP1-2.6، SSP2-4.5، SSP3-7.0 و SSP5-8.5) برای دوره ۲۰۲۱–۲۰۴۰ استفاده کرده و آن‌ها را با دوره مرجع ۱۹۹۵–۲۰۱۴ مقایسه نموده است. در گام نخست، داده‌های خام مدل‌های جهانی بر مبنای روش عامل تغییر (Change Factor) ریزمقیاس‌سازی شدند. برای این منظور، ابتدا میانگین دما (کمینه و بیشینه) و بارش در دوره مرجع و دوره آتی از خروجی مدل‌ها استخراج و سپس مقدار دلتا برای هر متغیر به دست آمد. در ادامه، داده‌های مشاهداتی پایگاه تراکلایمت (TerraClimate) با وضوح حدود ۵ کیلومتر به‌عنوان مبنای تصحیح اریبی به‌کار گرفته شد تا نوسان‌های محلی بهتر منعکس گردد. در مرحله بعد، نقشه‌های پیش‌بینی دمای کمینه، دمای بیشینه و بارش برای ۲۰ سال آینده تهیه شد. به‌منظور یکپارچه‌سازی این متغیرها، با تعریف توابع عضویت فازی خطی و اختصاص وزن بیشتر به پارامتر بارش، از روش ترکیب وزنی خطی (Weighted Linear Combination) استفاده شد و شاخصی جامع برای سنجش شدت تغییر اقلیم در سطح کشور به‌دست آمد. در پایان، برای مقایسه روند گذشته با آینده، نقشه شدت تغییرات اقلیمی در ۶۴ سال گذشته با نقشه دو دهه آینده در یک رویکرد WLC هم‌وزن ادغام و تحلیل شد.

نتایج: نتایج نشان می‌دهد که در دو دهه آینده، افزایش دمای کمینه و بیشینه در بیشتر نقاط کشور قطعی است، این افزایش گاهی می‌تواند بیش از ۲ درجه سانتی‌گراد در دمای کمینه و بیش از ۱/۵ درجه در دمای بیشینه باشد. افزون بر این، خروجی مدل‌ها حاکی از کاهش محسوس بارش در بخش‌هایی از زاگرس، شمال‌غربی و حوضه‌های حساس نظیر دریاچه ارومیه است و این کاهش ممکن است به تشدید خشکی خاک، کاهش ذخایر برفی و افت منابع آب زیرزمینی منجر شود. با استفاده از مدل چندمعیاره ترکیبی، مشخص شد نواحی غربی و شمال‌غربی در معرض بیشترین شدت تغییر اقلیم قرار دارند؛ زیرا هم افزایش دما و هم کاهش بارش در آن‌ها

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

چشمگیر است. این یافته‌ها با بررسی روند تاریخی ۶۴ سال گذشته نیز سازگاری دارد و تأیید می‌کند که گرمایش و کاهش بارش در این مناطق الگوی پیوسته‌ای داشته و رو به بدترشدن است. نتایج حاضر با مطالعات مشابه داخلی و گزارش‌های بین‌المللی IPCC همخوانی دارد و بر لزوم اتخاذ رویکردهای سازگاری و مدیریت مؤثر منابع آب تأکید می‌کند.

بحث: پژوهش حاضر نشان می‌دهد که در دو دهه آینده، اقلیم ایران با چالش‌های جدی‌تری از نظر افزایش دما و کاهش بارش روبه‌رو خواهد بود. روند گرمایش و افت بارندگی به‌ویژه در مناطق زاگرس و شمال‌غرب می‌تواند پیامدهای جبران‌ناپذیری بر اکوسیستم‌های کوهستانی، منابع آب، کشاورزی و معیشت ساکنان این نواحی داشته باشد. پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی از مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی برای تحلیل جامع‌تر رخدادهای حدی و از شبکه پایش ایستگاهی گسترده‌تر برای بهبود صحت داده‌ها استفاده شود. افزون بر این، برنامه‌ریزی‌های ملی و منطقه‌ای برای مدیریت آب و زمین، آگاهی‌بخشی عمومی و تقویت سیاست‌های کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای باید به‌طور جدی مورد توجه قرار گیرند تا آثار منفی تغییر اقلیم در سال‌های آتی کنترل شود.

مقدمه

تغییر اقلیم به‌عنوان یکی از برجسته‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی عصر حاضر، توجه گسترده پژوهشگران، تصمیم‌گیران و جوامع علمی را به خود جلب کرده است. در دو دهه اخیر، افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای به‌ویژه دی‌اکسیدکربن و دیگر گازهای هم‌خانواده، گرمایش جهانی و ناپایداری اقلیم را به سطوح نگران‌کننده‌ای رسانده است (IPCC, 2021). نتایج مطالعات نشان می‌دهد که افزایش دمای سطح زمین و اقیانوس‌ها، تغییرات در رژیم بارش، تغییر در فراوانی رویدادهای حدی مثل سیل و خشکسالی، وقوع امواج گرمایی و سرماهای ناگهانی، ذوب شدن یخچال‌ها و افزایش سطح آب دریاها تنها بخشی از پیامدهای این پدیده جهانی است (Aven & Renn, 2015; Füssel, 2009; IPCC, 2021). گزارش ششم هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم (AR6) با بررسی دقیق‌تر مسیرهای احتمالی انتشار گازهای گلخانه‌ای بر پایه سناریوهای جدید (نظیر SSPها) تأکید می‌کند که حتی در صورت اعمال سیاست‌های کاهشی شدید، بخشی از تغییرات اقلیمی در چند دهه آینده اجتناب‌ناپذیر خواهد بود (IPCC, 2023). از این رو، شناخت بهتر شرایط اقلیمی آینده در مقیاس‌های منطقه‌ای و محلی برای مدیریت منابع آب، کشاورزی، امنیت غذایی، سلامت و توسعه پایدار ضروری است (Suppiah *et al.*, 2007; Minx *et al.*, 2017).

ایران به‌عنوان کشوری با اقلیم عمدتاً خشک و نیمه‌خشک، به‌ویژه در زمینه تغییرات آب و هوایی آسیب‌پذیر است. بر اساس گزارش‌های سازمان هواشناسی کشور و شواهد میدانی، افزایش دما، کاهش بارندگی به‌خصوص در فصول سرد و به‌تبع آن کاهش پوشش برفی در مناطق کوهستانی، کاهش ذخایر آب زیرزمینی، گسترش بیابان‌ها و بروز رویدادهای حدی نظیر سیلاب‌های ناگهانی و خشکسالی‌های مکرر، در سال‌های اخیر شدت گرفته است (Rayegani *et al.*, 2019; Ghavam Saeedi Noqabi *et al.*, 2020). همچنین، دخالت‌های انسانی مانند تغییر کاربری اراضی، توسعه کشاورزی بدون برنامه، برداشت بی‌رویه از منابع آبی و تخریب پوشش گیاهی محلی، اثرات تغییر اقلیم را تشدید کرده و فشار مضاعفی بر اکوسیستم‌های حساس کشور وارد ساخته است (Bagherzadeh *et al.*, 2020; Oryan *et al.*, 2017).

گزارش ششم هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم[1] (AR6) در آخرین ارزیابی خود، علاوه بر تبیین روندهای بلندمدت جهانی، بر ضرورت مطالعات ریزمقیاس‌نمایی منطقه‌ای تأکید ویژه‌ای دارد تا تصمیم‌سازان بتوانند با استناد به شواهد محلی و مدل‌های بومی‌سازی‌شده، راهکارهای سازگاری و کاهش انتشار را بهتر برنامه‌ریزی کنند (Masson-Delmotte *et al.*, 2021; O'Neill *et al.*, 2017). چراکه داده‌های خام مدل‌های گردش عمومی جو[2] (GCM) اغلب وضوح مکانی و زمانی کافی برای مطالعات ملی و محلی را ندارند و جهت ارزیابی دقیق تأثیر تغییرات اقلیمی بر مناطق خاص، نیازمند روش‌های

[1] IPCC — Intergovernmental Panel on Climate Change
[2] General Circulation Model

ریزمقیاس‌نمایی آماری یا دینامیکی هستیم (Thrasher *et al.*, 2012; Dosio, 2016). در این میان، روش "عامل تغییر" (Change Factor) یا آنچه در برخی منابع داخلی "روز عامل تغییر" نامیده می‌شود، یکی از روش‌های کارآمد برای اصلاح اریبی و همسان‌سازی داده‌های خروجی مدل‌های جهانی و ریزمقیاس‌نمایی آن‌ها است. با استفاده از این روش، مقادیر دما، بارش و دیگر متغیرهای اقلیمی در دوره‌های آتی، متناسب با اختلافات مشاهده شده در دوره پایه اصلاح شده و سناریویی منطبق‌تر با شرایط محلی ارائه می‌شود (Thrasher *et al.*, 2012).

به‌منظور اعتبارسنجی و پایش صحت داده‌های اصلاح‌شده، بهره‌گیری از داده‌های مشاهداتی با پوشش مکانی مناسب و دوره زمانی بلندمدت، اهمیت فراوانی دارد. داده‌های تراکلایمت (TerraClimate) یا پایگاه‌های مشابه جهانی، به‌عنوان یکی از معتبرترین منابع مشاهداتی، امکان دسترسی به اطلاعات متنوع اقلیمی نظیر دمای حداقل و حداکثر، بارش، تبخیر و تعرق بالقوه و رطوبت خاک را با قدرت تفکیک قابل‌قبول فراهم می‌کنند (Aloysius *et al.*, 2016; Ahmadalipour *et al.*, 2017; Hanchane *et al.*, 2023; Arias & Barriga, 2022). این داده‌ها در کنار اطلاعات ایستگاهی و منطقه‌ای، می‌توانند به‌عنوان مرجع اصلی در تحلیل عدم قطعیت‌ها و مقایسه خروجی مدل‌های ریزمقیاس‌شده با مقادیر واقعی به کار روند (Hosseinabadi *et al.*, 2020; Ghavam Saeedi Noqabi *et al.*, 2020).

تحقیقات پیشین پیرامون اثرات تغییر اقلیم در ایران عموماً مؤید آن است که حوضه‌های آبخیز کشور طی دو دهه آینده با افزایش دمای متوسط سالانه و کاهش بارش در فصل زمستان مواجه خواهند شد (Mohamadlo *et al.*, 2017; Soltani Mohammadi *et al.*, 2019). این روند می‌تواند به کاهش رواناب سطحی، تشدید تبخیر و تعرق، افزایش نیاز آبی گیاهان و در نهایت به چالش‌های جدی در زمینه تأمین پایدار آب شرب، کشاورزی و صنعت منجر شود (Salehi Tabas *et al.*, 2019). از طرفی، الگوهای بارش آینده در بسیاری مناطق تغییر زمان‌بندی و شدت آن را نشان می‌دهند؛ به‌طوری‌که بارش‌های سنگین و کوتاه‌مدت، خطر وقوع سیلاب را افزایش می‌دهد و در دیگر فصول با تداوم شرایط خشکی، زمینه برای تخریب اراضی و بیابان‌زایی فراهم می‌شود (Rayegani *et al.*, 2019; Smith *et al.*, 2009).

بنابراین، مطالعه حاضر با هدف بررسی شرایط اقلیمی ۲۰ سال آتی در مناطق مختلف ایران و تبیین پیامدهای احتمالی بر منابع آب، کشاورزی و محیط‌زیست شکل گرفته است. برای دستیابی به این هدف، ضمن بهره‌گیری از خروجی سناریوهای مختلف انتشار گازهای گلخانه‌ای ارائه شده در گزارش ششم IPCC، روش ریزمقیاس‌نمایی "عامل تغییر" برای اصلاح داده‌های خام مدل‌های جهانی مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین به‌منظور اطمینان از دقت و صحت داده‌ها، از مجموعه داده‌های تراکلایمت به‌عنوان مرجع مشاهداتی بهره برده شده و فرایند ارزیابی عدم قطعیت در حدفاصل مدل‌سازی تا انطباق با مشاهدات واقعی، با دقت پیگیری گردیده است. یافته‌های این پژوهش، ضمن ارائه درکی عمیق‌تر از رفتار اقلیمی ایران در دو دهه آینده، می‌تواند زمینه تدوین راهبردهای سازگاری و کاهش آثار منفی تغییر اقلیم بر جنبه‌های مختلف اکولوژیک و اقتصادی-اجتماعی را فراهم آورد. افزون بر این، به‌روزرسانی اطلاعات و تحلیل تغییرات اقلیمی در چارچوب جدیدترین ارزیابی‌های بین‌المللی نظیر IPCC AR6، ابزار ارزشمندی برای تصمیم‌گیری مدیران و برنامه‌ریزان در سطح ملی و منطقه‌ای خواهد بود (IPCC, 2023; Minx *et al.*, 2017).

در مجموع، با وجود پیشرفت‌های چشمگیر در درک فرآیندهای پیچیده جوی و مدل‌سازی سناریوهای انتشار، همچنان عدم قطعیت‌های قابل‌ملاحظه‌ای پیرامون برآورد پیامدهای ریزمقیاس وجود دارد (Aven & Renn, 2015). از این رو ادامه پژوهش‌های میان‌رشته‌ای و گسترش همکاری‌های ملی و بین‌المللی در زمینه کمی‌سازی ریسک‌های اقلیمی، ارتقای نظام پایش و به‌کارگیری مدل‌های پیشرفته، ضرورت بالایی دارد. با توجه به شرایط خاص اقلیمی، منابع محدود آب شیرین و وابستگی شدید زیربخش‌های مختلف به آب در ایران، مواجهه موفق با تغییر اقلیم به‌ویژه در ۲۰ سال پیش‌رو نیازمند ارائه تصویری دقیق از روند و شدت تغییرات اقلیمی و اتخاذ سیاست‌های سازگارانه و کاهش‌محور است؛ امری که این پژوهش در نظر دارد بخشی از بستر علمی آن را فراهم سازد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش با هدف پیش‌بینی و ارزیابی تغییرات اقلیمی ایران در دو دهه آینده (۲۰۲۱–۲۰۴۰) بر اساس سناریوهای جدید گزارش ششم هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC, 2021; IPCC, 2023) انجام گرفته است. در این بخش، ابتدا داده‌های مورد استفاده شامل خروجی مدل‌های گردش عمومی (GCM) و داده‌های مشاهداتی معرفی می‌شوند. سپس فرایند ریزمقیاس‌نمایی با استفاده از روش "عامل تغییر" تشریح شده و در ادامه، مراحل استانداردسازی و ترکیب لایه‌ها به‌منظور استخراج شاخص جامع تغییر اقلیم توضیح داده خواهد شد.

داده‌های مورد استفاده

۱- داده‌های مدل‌های گردش عمومی (CMIP6)

در این پژوهش از خروجی مدل‌های نسل ششم مقایسه مدل‌های جفت‌شده اقیانوس–جو (CMIP6) بهره گرفته شده است که بنا به گزارش IPCC (۲۰۲۱؛ ۲۰۲۳) با بهبودهایی در مقایسه با نسخه‌های پیشین (CMIP5) همراه هستند.

محدوده زمانی دوره آتی ۲۰۲۱–۲۰۴۰ در نظر گرفته شده و برای مقایسه، دوره ۱۹۹۵–۲۰۱۴ به‌عنوان دوره مرجع (Baseline) تعریف شده است.

سناریوهای منتخب انتشار گازهای گلخانه‌ای شامل SSP1-2.6، SSP2-4.5، SSP3-7.0 و SSP5-8.5 می‌باشند تا طیفی از مسیرهای کربن با شدت کم تا زیاد پوشش داده شود (O'Neill *et al.*, 2017)

۲- داده‌های مشاهداتی (TerraClimate)

به‌منظور ریزمقیاس‌سازی و اصلاح اریبی (Bias Correction) داده‌های خام مدل‌های جهانی، از پایگاه داده‌های TerraClimate استفاده شده است. این پایگاه که از سال ۱۹۵۸ تاکنون را پوشش می‌دهد، با قدرت تفکیک مکانی حدود ۴ تا ۵ کیلومتر، پارامترهای کلیدی اقلیمی نظیر دمای کمینه، دمای بیشینه، بارش، تبخیر و تعرق بالقوه، رطوبت خاک و غیره را ارائه می‌کند (Ahmadalipour *et al.*, 2017; Dumont *et al.*, 2022).

پوشش زمانی بلندمدت و تفکیک مکانی نسبتاً بالا در TerraClimate، این پایگاه را به یکی از منابع معتبر برای ریزمقیاس‌سازی سناریوهای اقلیمی در مناطق خشک و نیمه‌خشک نظیر ایران تبدیل کرده است (Ghavam Saeedi Noqabi *et al.*, 2020).

مراحل اجرایی

پیش‌پردازش داده‌های مدل‌های گردش عمومی

۱- استخراج پارامترهای اقلیمی کلیدی

از بین متغیرهای ارائه‌شده در CMIP6، سه پارامتر دمای کمینه، دمای بیشینه و بارش به‌عنوان ورودی اصلی در مدل‌سازی انتخاب شده‌اند. این متغیرها تأثیر مستقیم بر روند گرمایش و تغییر الگوی بارش دارند و در مطالعات تغییر اقلیم بیشترین کاربرد را دارند (Mohamadlo *et al.*, 2017).

۲- همسان‌سازی سیستم مختصات و محدوده جغرافیایی

داده‌های CMIP6 از دیدگاه وضوح مکانی (حدود ۱ تا ۲/۵ درجه) و سیستم مختصات ممکن است با TerraClimate متفاوت باشند. بنابراین در این مرحله، داده‌ها با استفاده از ابزارهای سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و نرم‌افزارهای تخصصی پردازش اقلیمی نظیر CDO یا (NCO) به سیستم مختصات و محدوده جغرافیایی مشترک تبدیل می‌شوند (Colman, 2003).

۳- استخراج دوره‌های زمانی هدف

داده‌های دوره مرجع (۱۹۹۵–۲۰۱۴): برای محاسبه واریانس خطاها و تعیین مبنای مقایسه با دوره آینده.

داده‌های دوره آتی (۲۰۲۱–۲۰۴۰): برای سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5، SSP3-7.0 و SSP5-8.5.

محاسبه عامل تغییر Change Factor

۱- مفهوم عامل تغییر

عامل تغییر (یا دلتا) برای هر پیکسل و هر متغیر اقلیمی از اختلاف میانگین (یا درصد تفاوت) دوره آتی نسبت به دوره مرجع به‌دست می‌آید (Thrasher *et al.*, 2012). این عامل بیانگر میزان تغییر نسبی مورد انتظار است.

$$\Delta = \bar{X}_{\text{آتی}} - \bar{X}_{\text{مرجع}}$$

برای بارش معمولاً به‌جای دلتا از نسبت استفاده می شود که در این مطالعه نیز نسبت مطابق معادله زیر به‌کار رفته است:

$$\bar{X}_{\text{آتی}} / \bar{X}_{\text{مرجع}}$$

۲- تفکیک مکانی و زمانی

در هر پیکسل (با وضوح اولیه مدل جهانی) و در بازه‌های زمانی تعریف‌شده (روزانه، ماهانه یا فصلی)، مقدار دلتا یا ضریب تغییر محاسبه می‌شود تا بتوان این تغییرات را به داده‌های مبنا (TerraClimate) اعمال کرد (Dosio, 2016).

ریزمقیاس‌نمایی با استفاده از روش عامل تغییر

۱- اعمال عامل تغییر به داده‌های مشاهداتی TerraClimate

در این مرحله، داده‌های مشاهداتی دوره مرجع (TerraClimate) در هر پیکسل و هر بازه زمانی با مقادیر دلتا یا نسبت به دست آمده تصحیح می‌شوند تا سناریوهای ریزمقیاس‌شده (Downscaled) برای دوره آتی تولید شوند.

۲- مدیریت اریبی (Bias) و تصحیح مقادیر منفی یا غیرواقعی

در اعمال عامل تغییر به بارش، در صورتی که خروجی منفی یا صفر به‌دست آید، بر اساس سناریوی منطقی (نظیر جایگزینی با حداقل بارش صفر) تصحیح می‌شود.

برای دما نیز می‌توان در صورت لزوم، اریبی را از طریق روش‌های آماری (نظیر تصحیح بر پایه انحراف معیار) بهبود داد (Thrasher *et al.*, 2012).

۳- کنترل کیفیت و اعتبارسنجی

مقایسه‌ی میانگین‌ها و توزیع داده‌های تصحیح شده با داده‌های مشاهداتی دوره مرجع برای اطمینان از همسانی (dosio, 2016).

اگر در برخی مناطق انحراف چشمگیری مشاهده شود، می‌توان از روش‌های پیشرفته‌تر ریزمقیاس‌نمایی آماری (نظیر رگرسیون چندمتغیره یا شبکه‌های عصبی مصنوعی) برای بهبود نتایج استفاده کرد.

استانداردسازی و تلفیق داده‌ها (ترکیب وزنی خطی)

۱- تعریف توابع عضویت فازی برای هر متغیر

برای دمای کمینه و بیشینه، تابع عضویت به‌گونه‌ای تعریف می‌شود که مقادیر بالاتر بیانگر شدت بیشتر تغییر اقلیم باشد (Rayegani *et al.*, 2019).

برای بارش، تابع عضویت معکوس تعریف می‌گردد؛ یعنی با کاهش بارش، شدت تغییر اقلیم افزایش می‌یابد.

استانداردسازی مقادیر

مقادیر هر متغیر (مثلاً دما و بارش) در بازه [صفر و یک] نرمال‌سازی می‌شوند تا در یک مقیاس واحد قابلیت مقایسه داشته باشند (Smith *et al.*, 2009).

۲- روش ترکیب وزنی خطی (WLC)

پس از استانداردسازی، لایه‌های دمای کمینه، دمای بیشینه و بارش بر اساس وزن‌دهی مشخص (مثلاً وزن‌های برابر یا مبتنی بر تکنیک تحلیل سلسله‌مراتبی AHP) با یکدیگر تلفیق می‌شوند

$$I = w_1 \cdot \widetilde{T_{\min}} + w_2 \cdot \widetilde{T_{\max}} + w_3 \cdot \tilde{P}$$

که در آن پارامتر w وزن متغیرهای دمای کمینه، بیشنه و بارش می باشند.

خروجی نهایی یک شاخص جامع تغییر اقلیم است که می‌تواند در محدوده ۰ تا ۱ تفسیر شود؛ مقادیر نزدیک به یک به‌منزله شدت بالای تغییر اقلیم و مقادیر نزدیک به صفر بیانگر شدت پایین است (Salehi Tabas *et al.*, 2019).

جمع‌بندی روش کار

۱- دریافت خروجی مدل‌های گردش عمومی

گردآوری داده‌های CMIP6 در دوره مرجع (۱۹۹۵–۲۰۱۴) و دوره آتی (۲۰۲۱–۲۰۴۰) تحت سناریوهای مختلف SSP.

۲- پیش‌پردازش و محاسبه عامل تغییر

محاسبه دلتا و نسبت برای دمای کمینه، دمای بیشینه و بارش در هر سلول مکانی، با تفکیک زمانی مناسب (ماهانه یا سالیانه).

۳- ریزمقیاس‌نمایی به کمک داده‌های TerraClimate

اعمال مقادیر دلتابرای دما و نسبت برای بارش به داده‌های مشاهداتی TerraClimate (دوره ۱۹۹۵–۲۰۱۴) برای تولید سناریوهای ریزمقیاس‌شده دوره ۲۰۲۱–۲۰۴۰ در سطح ایران.

بررسی و تعدیل اریبی احتمالی به‌روش‌های آماری مناسب.

۴- استانداردسازی و ترکیب داده‌ها برای شاخص تغییر اقلیم

استفاده از توابع عضویت فازی برای تعیین شدت تغییر در هر متغیر.

تلفیق لایه‌های استانداردشده در قالب روش WLC و محاسبه شاخص نهایی.

به‌طور کلی، ترکیب روش "عامل تغییر" با داده‌های با وضوح بالای TerraClimate، امکان بهبود تفکیک مکانی و کاهش اریبی را در پیش‌بینی‌های اقلیمی فراهم می‌سازد (Dosio, 2016; Thrasher *et al.*, 2012). به‌علاوه، تعریف توابع عضویت فازی و استفاده از روش WLC برای سنجش همزمان دما و بارش، تصویری جامع‌تر از شدت تغییرات اقلیمی ارائه می‌کند.

نتایج

در این بخش ابتدا نتایج حاصل از تحلیل سناریوهای مختلف انتشار گازهای گلخانه‌ای SSP1-2.6، SSP2-4.5، SSP3-7.0 و SSP5-8.5 بر دمای کمینه، دمای بیشینه و بارش سالیانه ایران طی دو دهه آینده (۲۰۲۱–۲۰۴۰) ارائه می‌شود. سپس با ادغام این سه پارامتر در یک رویکرد چندمعیاره، نقشه شدت و گستردگی تغییرات اقلیمی در سطح کشور نمایش داده خواهد شد. در نهایت جمع‌بندی و مقایسه کلی میان روند تاریخی و چشم‌انداز دو دهه آتی ارائه می‌گردد.

تغییرات دمای کمینه سالیانه

شکل ۱، تصویرسازی میزان تغییر دمای کمینه را در سناریوهای مختلف نشان می‌دهد[۳].

مطابق نتایج، در تمامی سناریوها دمای کمینه در اغلب نقاط کشور افزایش خواهد یافت. این افزایش در برخی مناطق، به‌ویژه در نوار کوهستانی زاگرس و استان‌های غرب و شمال‌غرب، می‌تواند بیش از ۲ درجه سانتی‌گراد باشد.

با وجود افزایش میانگین دمای کمینه، بسیاری از مناطق مرتفع غربی و شمال‌غربی کشور همچنان دماهای زیر صفر را در دوره سرد سال تجربه خواهند کرد؛ اما روند افزایشی یادشده نشان می‌دهد که در بلندمدت احتمال حذف شدن دماهای کمینه زیر صفر در برخی از این مناطق وجود دارد.

در سناریوهای انتشار شدیدتر نظیر SSP3-7.0 و SSP5-8.5، الگوی افزایش دمای کمینه در سراسر کشور یکنواخت‌تر بوده و به‌طور بالقوه می‌تواند به تغییر رژیم دمایی مناطق مرتفع و کوهستانی منجر شود.

افزایش دمای کمینه علاوه بر پیامدهای آشکاری مانند کاهش دوره یخبندان و نیاز سرمایی محصولات کشاورزی، می‌تواند بر ذخایر برفی کوهستان‌ها و تغذیه آب‌های زیرزمینی نیز تأثیر منفی بگذارد. این موضوع در نواحی زاگرس و شمال‌غرب کشور که به آب برف متکی هستند، می‌تواند به کاهش ذخیره برفی و در نتیجه کاهش رواناب و جریان‌های پایه رودخانه منجر شود. به‌علاوه، افزایش دمای حداقل در زمستان، پتانسیل ظهور و گسترش آفات و بیماری‌های گیاهی را نیز بالا می‌برد.

تغییرات دمای بیشینه سالیانه

شکل ۲ مقدار تغییر دمای بیشینه سالیانه در سناریوهای مختلف انتشار را ارائه می‌کند.

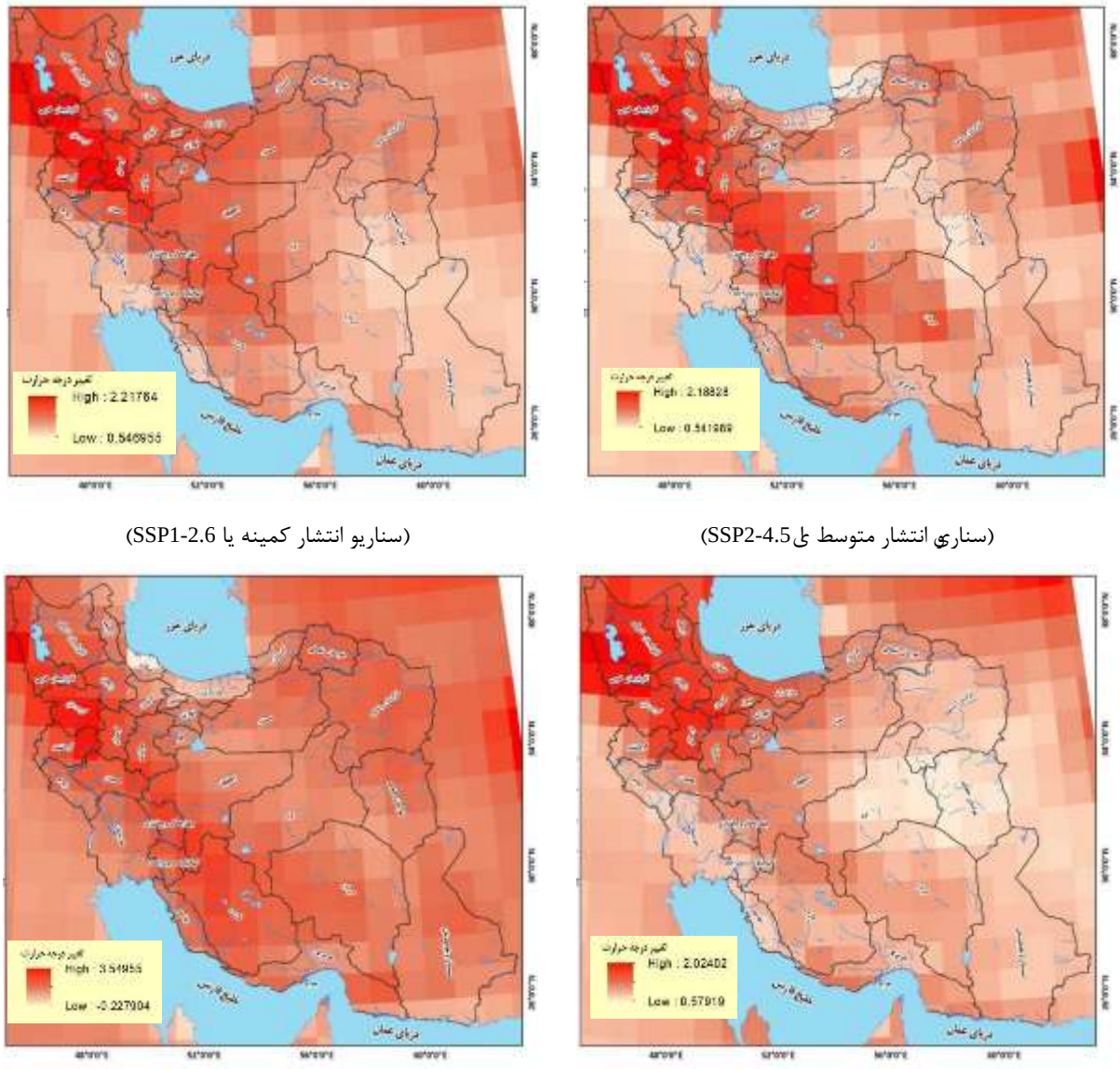
بررسی این نقشه‌ها نشان می‌دهد که در بیشتر سناریوها دمای بیشینه در سراسر کشور افزایش حداقل یک درجه سانتی‌گراد را تجربه خواهد کرد.

سناریو انتشار متوسط (SSP2-4.5) در شکل ۲ تا حدی روندی متفاوت یا کم‌دامنه‌تر نسبت به سایر سناریوها را نشان داده است؛ این موضوع می‌تواند ناشی از خطاها و اریبی مدل یا برآوردهای احتیاطی در این سناریو باشد.

بیشترین افزایش دمای بیشینه نیز همانند دمای کمینه در نواحی زاگرس و شمال‌غرب کشور مشاهده می‌شود. بر اساس سناریو انتشار بسیار زیاد (SSP5-8.5)، مقادیر دمای بیشینه در بیشتر نقاط کشور می‌تواند بیش از ۱/۵درجه افزایش یابد.

افزایش دمای بیشینه با پیامدهای اقتصادی و محیط زیستی قابل‌توجه همراه است. ازجمله می‌توان به کاهش تولید محصولات کشاورزی ناشی از تنش گرمایی، افزایش تبخیر و تعرق گیاهان و منابع آب سطحی و تشدید پدیده جزیره گرمایی شهری اشاره کرد. همچنین، در مناطقی که به‌صورت سنتی با دمای بالا مواجه‌اند (مانند جنوب و حاشیه‌های کویری)، این افزایش می‌تواند هزینه‌های خنک‌سازی، مصرف انرژی و تقاضای آب شرب را به شکل قابل‌ملاحظه‌ای بالا ببرد.

[۳] به دلیل اهمیت تغییر در تحلیل‌ها و محدودیت صفحات نگارش و تعداد نقشه‌ها، در این مقاله فقط تغییرات نشان داده شده و ریزمقیاس نمایی ارائه نشده.



شکل ۱- تصویرسازی مقدار تغییر درجه حرارت کمینه سالیانه در ۲۰ سال آتی در سناریوهای مختلف انتشار

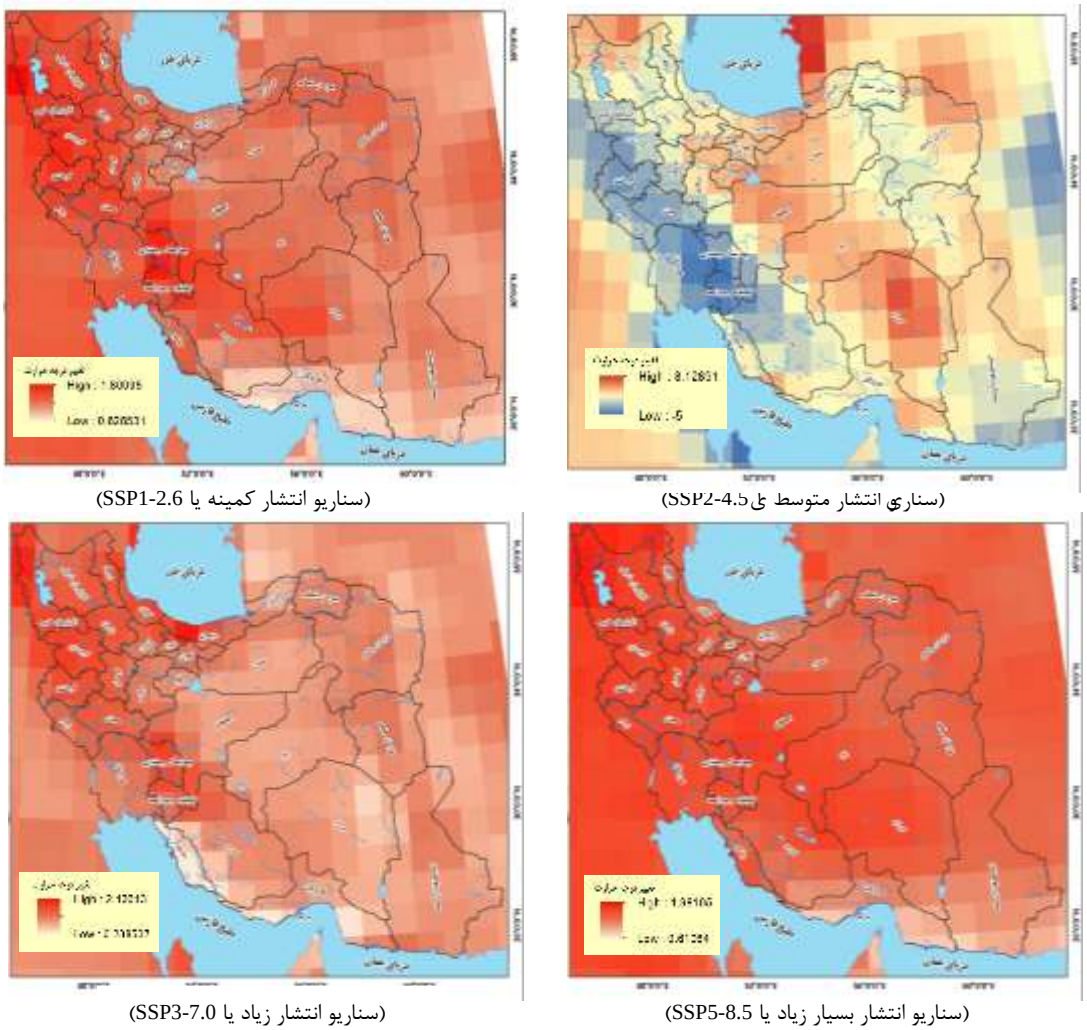
تغییرات بارش سالیانه

نتایج مربوط به تغییرات بارش طی دو دهه آینده در شکل ۳ نشان داده شده است.

در اکثر سناریوها، الگوی بارش ایران همچنان کاهشی پیش‌بینی شده است. نواحی زاگرس و شمال‌غربی کشور بیشترین میزان کاهش بارش (بیش از ۱۰ میلی‌متر به‌طور میانگین) را در بازه ۲۰۲۱–۲۰۴۰ تجربه خواهند کرد.

لازم به ذکر است که در برخی سناریوهای انتشار پایین‌تر، مقدار کاهش بارش کمتر به‌چشم می‌خورد، اما به‌دلیل عدم قطعیت مدل‌ها و به‌ویژه حساسیت زیاد اقلیم ایران نسبت به تغییر بارش، نمی‌توان تأثیرات احتمالی را نادیده گرفت.

کاهش بارش سالیانه خصوصاً در استان‌های غربی و شمال‌غربی، ضمن تهدید منابع آب سطحی و زیرزمینی، می‌تواند خشکی خاک و خطر بیابان‌زایی را افزایش دهد. در حوضه‌های حیاتی نظیر دریاچه ارومیه، کاهش بارش در کنار افزایش دما، احتمال تشدید خشک‌سالی و افت تراز آب را بالاتر برده و پایداری اکوسیستم‌های حساس منطقه را بیش از پیش در معرض خطر قرار می‌دهد.



(سناریو انتشار کمینه یا SSP1-2.6) (سناریو انتشار متوسط یا SSP2-4.5)

(سناریو انتشار زیاد یا SSP3-7.0) (سناریو انتشار بسیار زیاد یا SSP5-8.5)

شکل ۲- تصویرسازی مقدار تغییر درجه حرارت بیشینه سالیانه در ۲۰ سال آتی در سناریوهای مختلف انتشار

ترکیب چندمعیاره و تصویرسازی شدت تغییر اقلیم

به‌منظور ارائه یک دید کلی از وضعیت آتی اقلیم ایران، سه پارامتر دمای کمینه، دمای بیشینه و بارش در یک چارچوب تصمیم‌گیری چندمعیاره ترکیب شدند. در این مرحله:

۱- استانداردسازی فازی با توجه به میزان تغییر هر پارامتر در بازه [۰ ، ۱] صورت گرفت؛ به‌طوری‌که افزایش دماها با مقدار فازی بزرگ‌تر و کاهش بارش نیز با مقدار فازی بزرگ‌تر نشان‌دهنده شدت بیشتر تغییر اقلیم باشد.

۲- وزن‌دهی به پارامترها انجام شد. با توجه به اهمیت کلیدی آب در اقلیم خشک و نیمه‌خشک ایران، وزن بیشتری برای بارش در نظر گرفته شد.

۳- از روش ترکیب وزنی خطی (WLC) برای به‌دست آوردن شاخص نهایی شدت تغییر اقلیم در سناریوهای منتخب استفاده گردید.

نتایج حاصل در شکل ۴ نشان داده شده است و بیانگر آن است که:

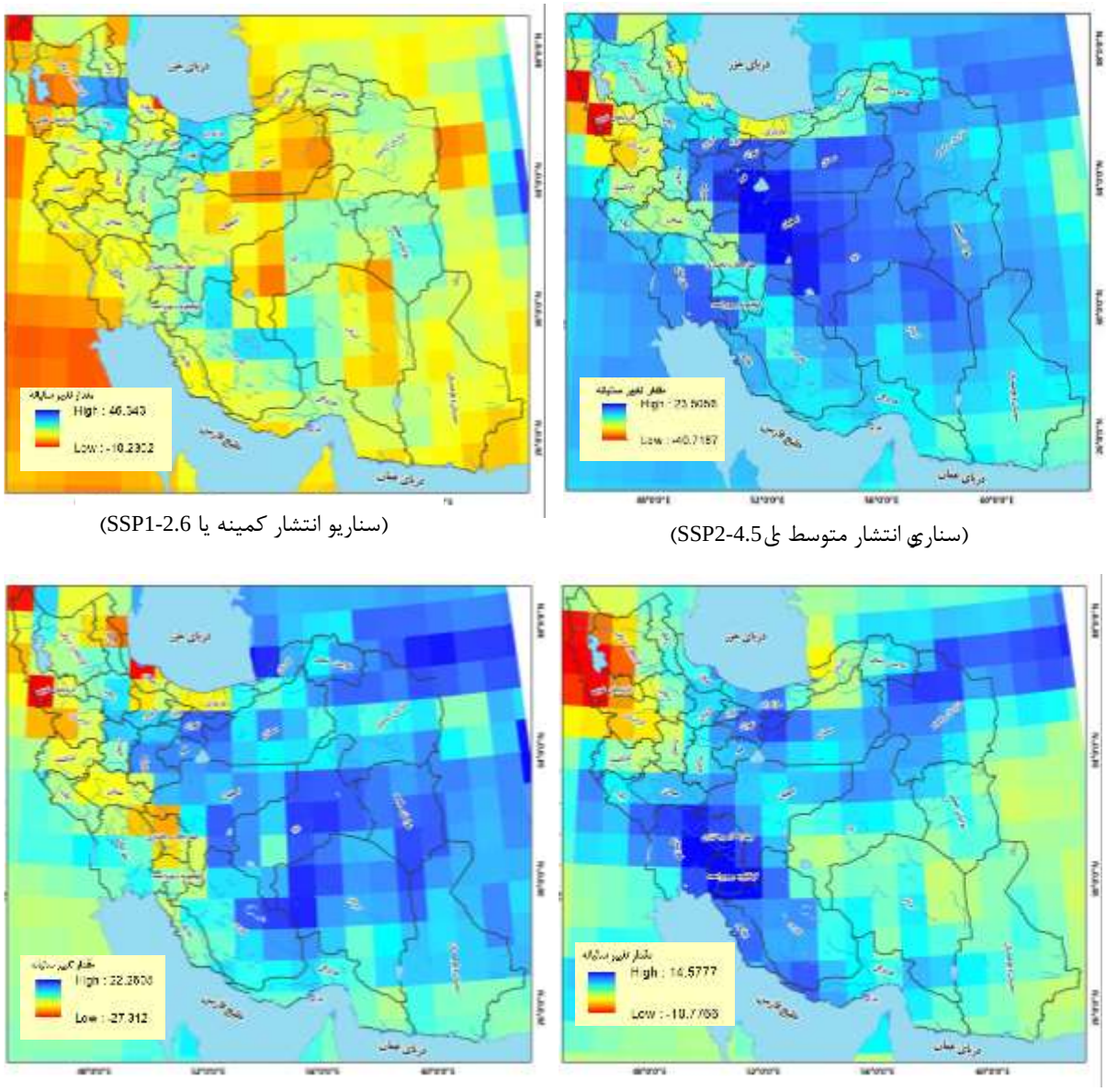
نوار زاگرس، استان‌های غربی و شمال‌غربی کشور به دلیل ترکیب همزمان افزایش قابل‌توجه دما (کمینه و بیشینه) و کاهش چشمگیر بارش، در معرض بیشترین شدت تغییرات اقلیمی قرار دارند.

استان‌های شمالی نیز تأثیر متوسط تا شدید را تجربه خواهند کرد. در عین حال، نقاط مرکزی و شرقی، باوجود افزایش دما، تغییر بارش کمتری را نشان می‌دهند و در نتیجه، میزان شدت تغییر اقلیم در آن‌ها اندکی پایین‌تر

برآورد می‌شود (اگرچه همچنان از پیامدهای گرمایش و کاهش بارش مصون نخواهند بود).

کاربرد رویکرد چند معیاره برای ادغام دما و بارش، درک جامع‌تری از شدت تغییرات اقلیمی ارائه می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که بخش‌های کوهستانی و نیمه‌خشک کشور (به‌ویژه شمال‌غرب) در دوره آتی ممکن است با هم‌افزایی آثار گرمایش و کاهش بارش مواجه شوند.

در گام بعدی، با توجه به احتمال بالای محقق نشدن اهداف کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و نزدیک بودن روند کنونی به سناریوهای با انتشار متوسط یا زیاد، می‌توان انتظار داشت وضعیت اقلیمی استان‌های زاگرس و شمال‌غرب حتی وخیم‌تر از ارقام پیش‌بینی‌شده باشد.



(سناریو انتشار کمینه یا SSP1-2.6)

(سناریو انتشار متوسط یا SSP2-4.5)

(سناریو انتشار زیاد یا SSP3-7.0)

(سناریو انتشار بسیار زیاد یا SSP5-8.5)

شکل ۳- تصویرسازی مقدار تغییر بارش تجمعی سالیانه در ۲۰ سال آتی در سناریوهای مختلف انتشار

مقایسه با روند تاریخی و جمع‌بندی

جهت مقایسه وضعیت آتی با روند ۶۴ سال گذشته، نقشه شدت تغییرات اقلیمی دوره تاریخی با نقشه شدت تغییر اقلیم ۲۰ سال آینده (شکل ۴) در یک رویکرد WLC هم‌وزن ادغام شده‌اند (شکل ۵). نتایج این ادغام:

تأیید می‌کند که ناحیه شمال‌غربی و غربی کشور هم در ۶۴ سال گذشته و هم در آینده نزدیک، بیشترین آسیب‌پذیری را نشان می‌دهد.

روند افزایشی دما و کاهشی بارش در این مناطق از الگویی پیوسته پیروی می‌کند و ممکن است در صورت عدم مدیریت صحیح منابع آب و کاستن از انتشار گازهای گلخانه‌ای، پیامدهای بازگشت‌ناپذیری به همراه داشته باشد.

این مقایسه تاریخی- آینده بر استمرار گرمایش و کاهش بارش در نواحی بحرانی تأکید دارد و به برنامه‌ریزان و مدیران منابع آب نشان می‌دهد که الگوی کلی تغییر اقلیم پیش‌رو تفاوت چندانی با روند چند دهه گذشته ندارد؛ بلکه سرعت و شدت آن در بسیاری از مناطق در حال فزونی گرفتن است. از این‌رو، ضرورت تدوین راهبردهای سازگاری برای نواحی حساس، به‌ویژه شمال‌غرب و زاگرس، بیش‌ازپیش نمایان می‌شود.

به طور کلی می‌توان گفت:

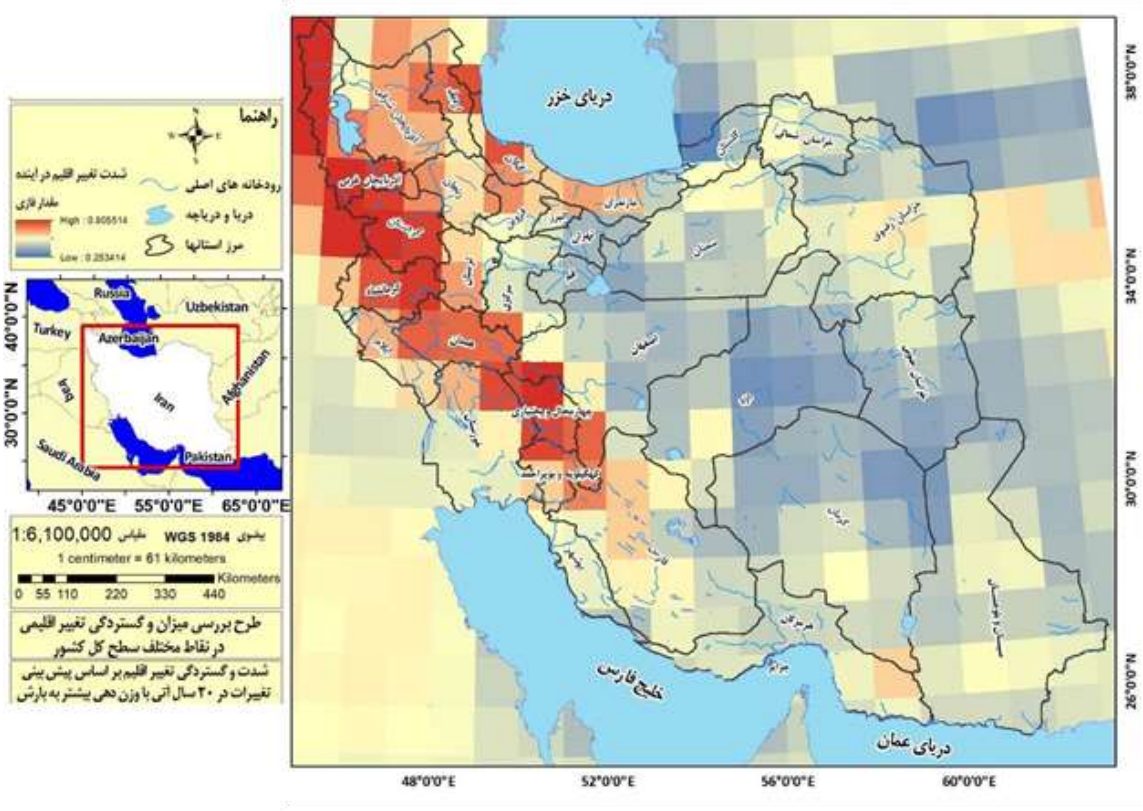
۱- دمای کمینه و بیشینه در تمامی سناریوهای اصلی انتشار روند افزایشی دارند؛ شدت این افزایش در نواحی مرتفع غرب و شمال‌غرب بیشتر است.

۲- بارش در اکثر مناطق به‌ویژه زاگرس و شمال‌غرب کاهش نشان می‌دهد و ممکن است ضمن تشدید خشکسالی، ظرفیت ذخایر برفی و رواناب سطحی را کاهش دهد.

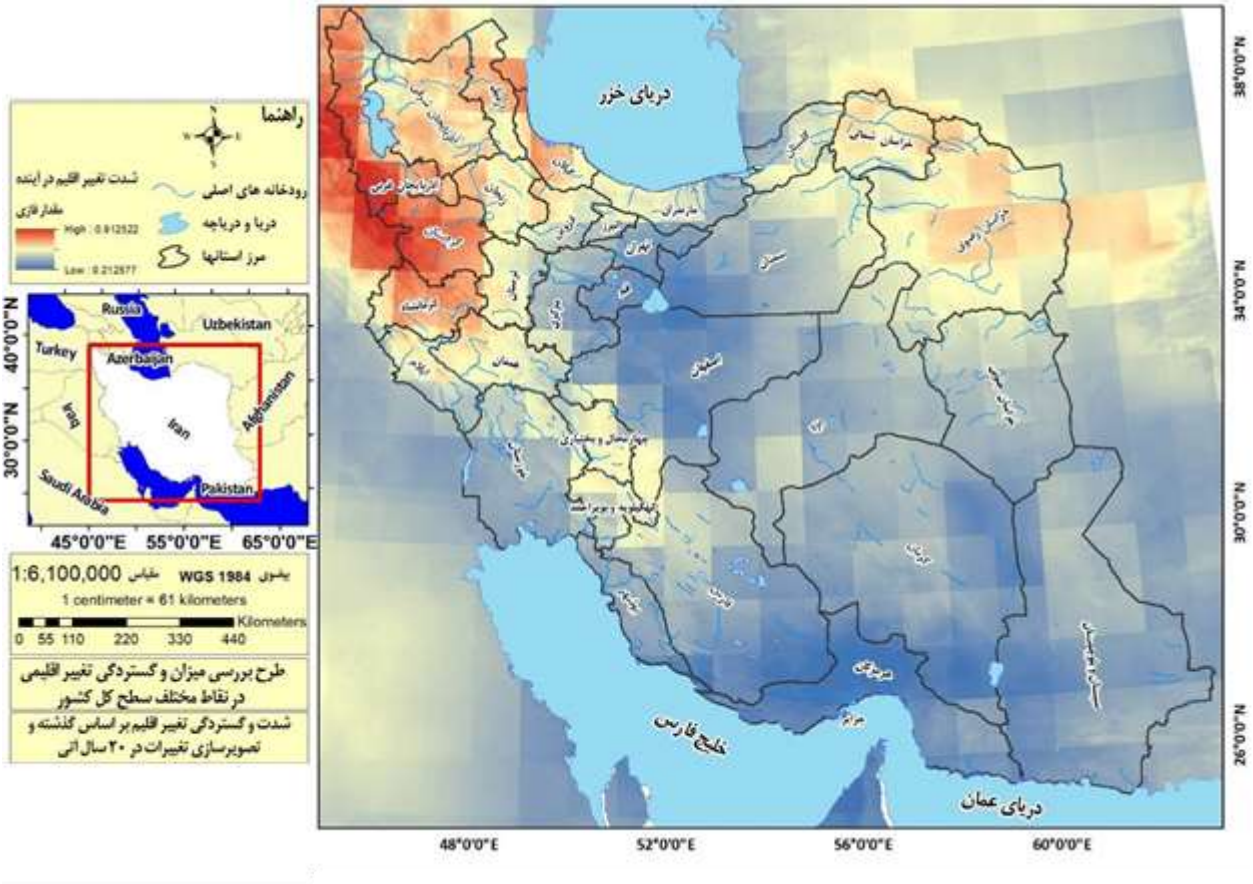
۳- در یک ارزیابی چندمعیاره، استان‌های غربی، شمال‌غربی و زاگرس به‌عنوان مناطق با شدیدترین تغییر اقلیم در ۲۰ سال آتی شناسایی شدند.

۴- مقایسه روند تاریخی و آینده، بر تداوم الگوی افزایشی دما و کاهشی بارش در ایران دلالت دارد؛ بنابراین، عدم مداخله مؤثر در حوزه سازگاری و کاهش انتشار، می‌تواند پیامدهای نامطلوب و برگشت‌ناپذیری برای اکوسیستم‌های حساس و حوضه‌های آبی کشور رقم بزند.

در مجموع، یافته‌های این بخش ضرورت برنامه‌ریزی اقلیمی در سطوح منطقه‌ای و ملی را برجسته می‌کند. به‌ویژه در حوزه مدیریت منابع آب، کشاورزی، شهری و زیست‌بوم‌های حساس، پایش دقیق و برنامه‌های سازگاری از جمله اصلاح الگوهای کشت، بهینه‌سازی مصرف آب، توسعه فناوری‌های نوین آبیاری و مدیریت جامع حوضه‌های آبخیز باید در دستور کار تصمیم‌گیران و سیاست‌گذاران قرار گیرد.



شکل ۴- شدت و گستردگی تغییر اقلیم بر اساس پیش‌بینی تغییرات پارامترهای اقلیمی در ۲۰ سال آتی (سناریو انتشار SSP3)



شکل ۵- شدت و گستردگی تغییر اقلیم بر اساس روند تغییرات ۶۴ سال گذشته و پیش‌بینی تغییرات پارامترهای اقلیمی در ۲۰ سال آتی (سناریو انتشار SSP3)

بحث

این پژوهش، با استفاده از داده‌های مدل‌های گردش عمومی CMIP6 در سناریوهای جدید انتشار (SSP1-2.6، SSP2-4.5، SSP3-7.0 و SSP5-8.5) و همچنین داده‌های پایگاه تراکلایمت با وضوح مکانی بالاتر و به‌کارگیری روش عامل تغییر برای ریزمقیاس‌نمایی، تصویری جامع از وضعیت اقلیم ایران در دو دهه آینده (۲۰۲۱–۲۰۴۰) و مقایسه آن با دوره مرجع (۱۹۹۵–۲۰۱۴) ارائه می‌دهد. یافته‌ها نشان می‌دهد در اغلب سناریوها، دمای کمینه و بیشینه در سراسر کشور روندی افزایشی خواهد داشت و در مناطق مرتفع غرب و شمال‌غرب، این افزایش ممکن است بیش از ۲ درجه سانتی‌گراد برای دمای کمینه و بالاتر از ۱/۵ درجه برای دمای بیشینه باشد. نتایج همچنین از کاهش محسوس بارش در برخی مناطق حساس به‌ویژه نواحی زاگرس و شمال‌غرب حکایت دارد و این کاهش می‌تواند تا چندین میلی‌متر در سال نیز برسد.

در حوضه‌های حیاتی نظیر دریاچه ارومیه، این امر احتمال خشک‌سالی، افت آب‌های زیرزمینی و سطحی و تخریب اکوسیستم‌های نیمه‌خشک را بیش از پیش افزایش می‌دهد. به‌منظور ادغام همزمان اثرات دمای کمینه، دمای بیشینه و بارش، از رویکرد چندمعیاره فازی با روش ترکیب وزنی خطی استفاده شد و مشخص گردید مناطق غرب، شمال‌غرب و رشته‌کوه زاگرس از حیث شدت تغییر اقلیم در وضعیت بحرانی‌تری قرار می‌گیرند و احتمالاً بیشترین آسیب‌ها را متحمل خواهند شد. مقایسه با روند ۶۴ سال اخیر نیز نشان می‌دهد که گرمایش و کاهش بارش در این پهنه‌های کشور الگویی پیوسته دارد و با سرعت بیشتری در حال رخ دادن است. این نتایج با گزارش‌های بین‌المللی و ملی همچون IPCC (۲۰۲۱ و ۲۰۲۳) و برخی تحقیقات داخلی (نظیر Rayegani *et al.*, 2019 و Ghavam Saeedi Noqabi *et al.*, 2020) همسو

است و بر آسیب‌پذیری قابل‌توجه اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک تأکید می‌کند.

از نقاط قوت این مطالعه می‌توان به استفاده از جدیدترین سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای، داده‌های با وضوح مناسب پایگاه تراکلایمت و همچنین ترکیب روش‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری (عامل تغییر) با رویکرد چندمعیاره اشاره کرد که همخوانی مناسبی را بین نتایج و شواهد میدانی نشان می‌دهد. بااین‌حال، وجود عدم قطعیت‌های متأثر از سناریوهای انتشار و تکیه بر روش‌های آماری باعث می‌شود برخی رخدادهای حدی نظیر سیلاب یا موج گرما به‌طور دقیق مدلسازی نشوند و نیاز به مدل‌های دینامیکی پیشرفته‌تر احساس می‌شود. محدودیت بعدی کمبود داده‌های ایستگاهی با پراکنش مناسب است که ممکن است در برخی مناطق، دقت ریزمقیاس‌سازی را کاهش دهد. به‌رغم این نقاط ضعف، این پژوهش به‌خوبی نشان داد که مناطق مرتفع غرب، شمال‌غرب و زاگرس هم در روند تاریخی و هم در چشم‌انداز آینده، گرمایش و کاهش بارش مستمری را تجربه کرده و خواهند کرد و لذا نیازمند توجه ویژه در مدیریت پایدار آب و زمین هستند. مقایسه با مطالعاتی چون Mohamadlo. و همکاران (۲۰۱۷) و Bagherzadeh. و همکاران (۲۰۲۰) گویای هماهنگی نتایج حاضر با اغلب پژوهش‌های پیشین است؛ به‌ویژه در مورد افزایش دمای کمینه و کاهش نزولات جوی در حوضه‌های کوهستانی.

برای بهبود دقت و کاربردپذیری این نوع مطالعات، گام‌های آتی شامل استفاده از مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی و گسترش شبکه‌های پایش اقلیمی در نقاط مختلف کشور پیشنهاد می‌شود تا رخدادهای حدی اقلیمی نیز با جزئیات بیشتر شناسایی و شبیه‌سازی گردند. لازم است در نواحی کلیدی مانند زاگرس و شمال‌غرب که به علت تغییر اقلیم و افزایش مصرف منابع آبی بیشترین خطر را تجربه خواهند کرد، مداخلاتی همچون مدیریت یکپارچه حوضه‌های آبخیز، بهینه‌سازی الگوهای کشت، اصلاح نظام آبیاری و ارتقای آگاهی‌های عمومی و مشارکت ذی‌نفعان در دستور کار قرار گیرد. این رویکرد می‌تواند تا حدی از شدت و سرعت آسیب‌های ناشی از گرمایش و خشکسالی بکاهد. بدین ترتیب، با توجه به استمرار روندهای پیش‌گفته در گزارش‌های معتبر جهانی و یافته‌های این پژوهش، ضرورت اتخاذ راهبردهای چندجانبه در سطح ملی و منطقه‌ای برای مقابله و سازگاری با تغییر اقلیم بیش از پیش خودنمایی می‌کند و در صورت سهل‌انگاری، تبعات برگشت‌ناپذیری در بخش‌های حیاتی نظیر آب، کشاورزی و اکوسیستم‌های طبیعی ایران پدیدار خواهد شد.

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 گل‌علیزاده 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. **Ahmadalipour, A., Moradkhani, H. and Demirel, M.C., 2017.** A comparative assessment of projected meteorological and hydrological droughts: Elucidating the role of temperature. Journal of Hydrology, 553, 785-797.
2. **Aloysius, N.R., Sheffield, J., Saiers, J.E., Li, H. and Wood, E.F., 2016.** Evaluation of historical and future simulations of precipitation and temperature in central Africa from CMIP5 climate models. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 121(12), 5973-5995.
3. **Arian, M., Feizi, F. and Pourkermani, M., 2017.** Tectonic geomorphology of Iran's salt structures. Geosciences, 26(102), 211-218.
4. **Arias, E.C. and Barriga, J.C., 2022.** Performance of high-resolution precipitation datasets CHIRPS and TerraClimate in a Colombian high Andean Basin. Geocarto International, 37, 17382-17402. https://doi.org/10.1080/10106049.2022.2129816
5. **Aven, T. and Renn, O., 2015.** An evaluation of the treatment of risk and uncertainties in the IPCC reports on climate change. Risk Analysis, 35(4), 701-712.
6. **Bagherzadeh, A., Gholami, H. and Bahrami, H.A., 2020.** Land use change and its effects on soil properties in Northern Iran. Arabian Journal of Geosciences, 13(12), 1-12.

7. **Colman, R., 2003.** A comparison of climate feedbacks in general circulation models. *Climate Dynamics*, *20*(7–8), 865–873.
8. **Dosio, A., 2016.** Projections of climate change indices of temperature and precipitation from an ensemble of bias-adjusted high-resolution EURO-CORDEX regional climate models. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 121(10), 5488-5511.
9. **Dumont, M., et al., 2022.** Assessing rainfall global products reliability for water resource management in a tropical volcanic mountainous catchment. Journal of Hydrology: Regional Studies, 40, 101037.
10. **Filgueiras, R., Venancio, L.P., Aleman, C.C. and da Cunha, F.F., 2022.** Comparison and calibration of TerraClimate climatological variables over the Brazilian territory. *Journal of South American Earth Sciences*, *117*, 103882.
11. **Füssel, H.M., 2009.** An updated assessment of the risks from climate change based on research published since the IPCC Fourth Assessment Report. Climatic Change, 97(3), 469-482.
12. **Ghavam Saeedi Noqabi, M., Zareie, S. and Gholami, H., 2020.** Assessment of climate change impacts on groundwater resources using SWAT and MODFLOW models (Case study: Aleshtar plain, Iran). Environmental Earth Sciences, 79(23), 1-15.
13. **Hanchane, M., Kessabi, R., Krakauer, N., Sadiki, A., Kassioui, J.E. and Aboubi, I., 2023.** Performance Evaluation of TerraClimate Monthly Rainfall Data after Bias Correction in the Fes-Meknes Region (Morocco). Climate. https://doi.org/10.3390/cli11060120
14. **Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2023.** Climate Change 2023: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
15. **IPCC. 2021.** Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009157896
16. **Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S., ... and Zhou, B., (Eds.). 2021.** 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. Cambridge University Press.
17. **Minx, J.C., Lamb, W.F., Callaghan, M.W., Bornmann, L. and Fuss, S., 2017.** Fast growing research on negative emissions. Environmental Research Letters, 12(3), 035007.
18. **Mohamadlo, H., Eslamian, S. and Ostad-Ali-Askari, K., 2017.** Climate change impact on water resources management in arid regions. International Journal of Hydrology Science and Technology, 7(3), 271-285.
19. **O'Neill, B.C., Kriegler, E., Ebi, K.L., Kemp-Benedict, E., Riahi, K., Rothman, D.S., ... and Solecki, W., 2017.** The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. Global Environmental Change, 42, 169-180.
20. **Oryan, S., Shobeiri, S. and Farajollahi, M., 2017.** Analytical Investigation of the Role of National Strategic Plan on Climate Change on Knowledge, Attitude and Practices of the Society for Mitigation and Adaptation to Climate Change in Iran. Journals of Environmental Education and Sustainable Development, 6(1), 115-129.
21. **Rayegani, B., Arzani, H., Heydari Alamdarloo, H. and Moghadami, M.M., 2019.** Application of remote sensing to assess climate change effects on plant productivity and phenology (Case study area: Tehran Province). Rangeland, 13(3), 450-460.
22. **Salehi Tabas, M., Yaghoobzadeh, M., Hashemi, S.R., Mansori, H. and Ghavam Saeedi Noghabi, S., 2019.** estimating of future agricultural d use of the smdi index and data of the fifth report on climate change. iranian journal of water research in agriculture (formerly soil and water sciences), 33(3), 479-491. sid. https://sid.ir/paper/196810/en
23. **Smith, K. and Petley, D.N., 2009.** Environmental hazards: Assessing risk and reducing disaster. Routledge.
24. **Soltani Mohammadi, A., Mollaeinia, M.R. and Ajamzadeh, A., 2019.** Assessment of Climate Change Effect on Temperature and Precipitation Based on Fourth and Fifth IPCC reports (Case study: Isfahan Province). Irrigation Sciences and Engineering (Jise) (Scientific Journal of Agriculture), 42(2), 1-16. SID. https://sid.ir/paper/217073/en
25. **Suppiah, R., Whetton, P.H., McInnes, K.L., Hennessy, K.J., Page, C.M. and Pittock, A.B., 2007.** Australian climate change projections derived from simulations performed for the IPCC 4th Assessment Report. *Australian Meteorological Magazine*, *56*(3), 131–152.
26. **Thrasher, B., Maurer, E.P., McKellar, C. and Duffy, P.B., 2012.** Technical Note: Bias correcting climate model simulated daily temperature extremes with quantile mapping. Hydrology and Earth System Sciences, 16(9), 3309-3314.

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 Intensity and Extent of Climate Change in Various Regions of Iran over the Next Two Decades

Behzad Rayegani[*1], Susan Barti[2], Farhad Hosseini Tayefeh[3]

1[*]- Research Group of Environmental Assessment and Risk, Research Center for Environment and Sustainable Development (RCESD), Department of Environment, Tehran, Iran
2- Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI), Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran
3- Research Group of Biodiversity and Biosafety, Research Center for Environment and Sustainable Development (RCESD), Department of Environment, Tehran, Iran

Original Article

Received: 2025.02.14

Accepted: 2025.03.16

Keywords: Climate Change, Iran, Downscaling, CMIP6, Minimum and Maximum Temperature, Precipitation, Change Factor, Terraclimate, Weighted Linear Combination

Abstract

Introduction: Climate change is one of the most pressing environmental challenges of the modern era, impacting natural resources and human livelihoods through rising temperatures, altered precipitation patterns, and increased frequency of extreme events such as droughts and floods. Due to its predominantly arid and semi-arid climate, Iran is particularly vulnerable to these changes. Evidence suggests that regions such as the northwest and the Zagros Mountains have experienced concurrent temperature increases and precipitation declines, a trend that is projected to intensify in the near future. This study aims to assess and visualize Iran's climatic conditions over the next 20 years, quantifying the magnitude and extent of projected changes to inform national and regional planning efforts.

Materials and Methods: This research utilizes climate projections from the sixth generation of Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6) under four greenhouse gas emission scenarios (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, and SSP5-8.5) for the period 2021–2040, comparing them with the historical baseline (1995–2014). In the first step, raw global climate model outputs were downscaled using the Change Factor (CF) method. Minimum and maximum temperature and precipitation data were extracted for both the baseline and future periods, and delta values were calculated for each variable. To correct biases and better capture local variability, observational data from the TerraClimate database (with a spatial resolution of approximately 5 km) were employed. Subsequently, predictive maps for minimum temperature, maximum temperature, and precipitation over the next 20 years were generated. To integrate these variables into a single metric, Weighted Linear Combination (WLC) was applied, where precipitation was assigned a higher weight through linear fuzzy membership functions. This approach yielded a composite index for assessing climate change intensity across the country. Finally, to compare historical and future trends, the climate change intensity map for the past 64 years was integrated with the projected two-decade map using an equal-weighted WLC framework.

Results: Findings indicate that in the next two decades, a significant increase in both minimum and maximum temperatures is inevitable across most parts of Iran. The projected rise may exceed 2°C for minimum temperature and 1.5°C for maximum temperature in some areas. Additionally, model outputs suggest a considerable decline in precipitation over parts of the Zagros region, the northwest, and critical

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

watersheds such as Lake Urmia. This reduction may exacerbate soil dryness, decrease snowpack reserves, and deplete groundwater resources. The multi-criteria combined model identified the western and northwestern regions as the most severely affected by climate change, as they experience both significant warming and precipitation decline. This pattern is consistent with historical trends observed over the past 64 years, reinforcing the notion that warming and precipitation loss in these areas are part of a persistent, worsening trajectory. These results align with previous national studies and IPCC reports, emphasizing the urgent need for adaptation strategies and effective water resource management.

Discussion: This study highlights that in the coming decades, Iran will face heightened challenges related to increasing temperatures and declining precipitation. The warming trend and decreasing rainfall, particularly in the Zagros and northwestern regions, could have irreversible consequences for mountainous ecosystems, water resources, agriculture, and local livelihoods. Future research should incorporate dynamic downscaling models to provide a more detailed analysis of extreme climatic events and expand the station-based monitoring network to enhance data accuracy. Additionally, national and regional water and land management policies, public awareness campaigns, and greenhouse gas emission reduction strategies must be prioritized to mitigate the negative impacts of climate change in the years ahead.