

## کارایی مدل MPI-ESM-LR در ارزیابی بی‌هنجاری فصلی دمای ایران تحت سناریوهای واداشت تابشی (RCPs)

فاطمه تقوی نیا<sup>۱</sup>، بتول زینالی<sup>۲\*</sup>، عباسعلی داداشی رودباری<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل.

۲- استاد اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل.

۳- پژوهشگر پسادکتری اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد.

### چکیده

دما از پارامترهای مهم آب و هوایی است که تغییرات آن منشاء بسیاری از تغییرات زیست محیطی می‌شود. در اختیار داشتن اطلاعات اقلیمی از تغییرات پارامتر دمای نقاط مختلف به یافتن علل این تغییرات و اتخاذ سیاست‌ها و برنامه‌های لازم کمک می‌کند. تغییر در میانگین دما تا حد زیادی بر شدت رویدادهای فرین آب و هوایی و وقوع تغییر اقلیم تأثیر می‌گذارد به گونه‌ای که افزایش دما با افزایش فرکانس امواج گرما در قطب شمال، افزایش رطوبت جو، تسریع چرخه هیدرولوژیکی، یعنی تشدید بارش شدید در مناطق مرطوب و خشکی شدید در مناطق خشک، مرتبط است. در این پژوهش سعی شده است که به بررسی کارایی مدل MPI-ESM-LR (از سری مدل‌های CMIP5) در ارزیابی بی‌هنجاری فصلی دمای ایران تحت سناریوهای واداشت تابشی (RCPs) طی دوره‌های مشاهداتی (۱۹۸۰-۲۰۰۵)، آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۵۰)، میانه (۲۰۵۱-۲۰۷۵)، دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) بر اساس تکنیک ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی CORDEX-WAS پرداخته شود. جهت درستی سنجی، آماره‌های  $MBE$ ،  $RMSE$  مورد استفاده قرار گرفت. برای برآورد شیب روند داده‌ها در سری زمانی، از روش ناپارامتریک سنس استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل مذکور با متوسط ضریب همبستگی ۰/۹۹ و متوسط شاخص  $RMSE$  با ۰/۵۵ درجه سلسیوس و  $MBE$  با ۰/۳- درجه سلسیوس توانایی بهتری را در پیش‌بینی فراسنج دمای فصلی ایران دارد. بیشترین اختلاف دما در فصول زمستان، بهار و تابستان در ارتفاعات شمال‌غرب و ارتفاعات زاگرس و نوار غربی کشور و در فصل پاییز در نیمه شرقی و جنوب‌شرق کشور و دشت لوت مشاهده شده است. کمترین اختلاف دما در فصل زمستان در مناطق کم‌ارتفاع داخلی، در فصل بهار در نواحی ساحلی خزر و شرق کشور، در فصل تابستان در جنوب‌شرق کشور و در فصل پاییز در سواحل غربی خزر در ارتفاعات تالش و سبلان و دامنه غربی زاگرس نمایانگر است.

کلید واژه‌ها: ایران، بی‌هنجاری دما، CMIP5، CORDEX، MPI-ESM-LR.

## مقدمه

به معنی هر گونه تغییر واضح و مشخص در الگوهای مورد انتظار برای وضعیت آب و هوایی، که در طولانی مدت در یک منطقه خاص یا برای کل اقلیم جهانی، رخ بدهد می‌باشد. این تغییرات به دلیل اتفاقات رخ داده غیرعادی در آب و هوای زمین است (Zhai et al, 2018).

گرمایش در مقیاس جهانی بر انواع مختلف جنبه‌های تغییر اقلیم از اوایل دهه ۱۹۰۰ غالب شده است (IPCC, 2021). انتشار فزاینده گازهای گلخانه‌ای به‌طور قابل توجهی به وقوع گرمایش جهانی کمک می‌کند و منجر به تشدید اثرات تغییر اقلیم بر جامعه و محیط زیست می‌شود (Salah et al, 2023). تغییر اقلیم یکی از بحرانی‌ترین چالش‌ها برای اکوسیستم و جمعیت انسانی است که در صورت عدم برنامه‌ریزی مناسب و بموقع می‌تواند کمبود غذا و آب را به دنبال داشته باشد و بخش‌های مختلف اجتماعی-اقتصادی را تحت تأثیر قرار دهد و تأثیرات ویرانگری بر جوامع بگذارد (IPCC, 2013). چارچوب کنوانسیون سازمان ملل متحد در مورد تغییرات آب و هوایی موافقتنامه پاریس در دسامبر ۲۰۱۵ با هدف کاهش سطح گرمایش جهانی به کمتر از ۲ درجه سانتی‌گراد در مقایسه با دوره پیش صنعتی و پیگیری تلاش‌ها برای محدود کردن آن به سطح ۱/۵ درجه سانتی‌گراد تنظیم شد (Polong et al, 2019). با این حال، با توجه به اینرسی و بازخوردهای پیچیده‌ی کربن، دیدگاه‌های متفاوتی در مورد موفقیت محدود کردن گرمایش جهانی به زیر ۲ درجه سانتی‌گراد وجود دارد و امضاکنندگان این توافقنامه برنامه‌های عملی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، برای جلوگیری از تغییر اقلیم انسانی غیرقابل برگشت ارائه کردند (Raftery et al, 2017). هم چنین دستیابی به هدف گرمایش کمتر از ۱/۵ درجه سانتی‌گراد مستلزم کاهش شدت انتشار کربن بسیار سریعتر از گذشته است.

آب و هوای منطقه‌ای به گرمایش جهانی پاسخ یکنواختی نمی‌دهد. وضوح مکانی GCM ها در انعکاس تأثیرات دقیق توپوگرافی یا انواع کاربری زمین از مدلی به مدل دیگر متفاوت است و با عدم قطعیت همراه است (Dosio & Fischer, 2018). پروژه‌های ارزیابی تغییر اقلیم برای انتخاب مجموعه داده‌های اقلیمی به راهنمایی نیاز دارند (Vautard et al, 2021). پروژه مقایسه‌ای مدل جفت شده (CMIP) پیش‌بینی‌های اقلیمی را که توسط گروهی از مدل‌های آب و

تغییر اقلیم یکی از مسائل مهم زیست محیطی و مهمترین چالش قرن حاضر می‌باشد که در سال‌های اخیر افکار بسیاری از محققان علوم مختلف را مشغول و مطالعات زیادی را به خود اختصاص داده است. دما از پارامترهای مهم آب و هوایی است که تغییرات آن منشاء بسیاری از تغییرات زیست محیطی می‌شود. در اختیار داشتن اطلاعات اقلیمی از تغییرات پارامترهای اقلیمی نقاط مختلف به یافتن علل این تغییرات و اتخاذ سیاست‌ها و برنامه‌های لازم کمک می‌کند. تغییر در میانگین دما تا حد زیادی بر شدت رویدادهای فرین آب و هوایی تأثیر می‌گذارد. به عنوان مثال، افزایش دما با افزایش فرکانس امواج گرما در قطب شمال در دهه‌های گذشته همراه بوده است. بالا بودن میانگین دما با افزایش رطوبت جو مرتبط است. رطوبت بیشتر به تسریع چرخه هیدرولوژیکی، یعنی تشدید بارش شدید در مناطق مرطوب و خشکی شدید در مناطق خشک کمک می‌کند. به نظر می‌رسد که در پاسخ به افزایش میانگین دما، موج‌های گرما و رویدادهای با دمای بالا در آب و هوای آینده بیشتر اتفاق می‌افتد (Gao et al, 2021). تغییرات در فرکانس بارش شدید کوتاه مدت (روزانه) نیز تا حد زیادی به تغییرات در میانگین دما مرتبط است. به دنبال افزایش دما حتی در شرایط خوش بینانه، کشور نیازمند برنامه مدیریت یکپارچه منابع آب و چشم‌انداز بلندمدت مدیران و مسئولان مربوطه است. چراکه افزایش دما مشکلاتی را در زمینه‌های مختلف از جمله محیط زیست، کشاورزی، امنیت غذایی، اجتماعی، اقتصادی، فرهنگی، سیاسی، بین‌المللی و غیره ایجاد می‌کند. افزایش وقوع فرین‌های آب و هوایی خطرات زیادی را برای جوامع و اکوسیستم طبیعی ایجاد می‌کند (Zhang et al, 2020). بنابراین، بررسی تغییرات میانگین دما اهمیت بسزایی دارد.

شواهد روشنی برای تغییر اقلیم و اثرات آن در سطح کره زمین موجود است. هر چقدر که این تغییرات اقلیمی بیشتر شوند، اثرات آن نیز شدت می‌یابند. چالش بزرگ برای سیاستمداران و مسئولین این است که بدانند در چه زمان، به چه اندازه و در چه مقیاسی اثرات تغییر اقلیم رخ می‌دهند. با این وجود هنوز روش اصولی برای شناخت آسیب پذیری عواملی که باعث تشدید اثرات تغییرات اقلیمی می‌شوند وجود ندارد. تغییر اقلیم

(2013)، اما عموماً در شبیه‌سازی دمای هوای سطحی نسبت به بارش مهارت بیشتری دارند (Zhu et al, 2020). در حال حاضر تلاش‌های مختلفی برای کاهش مقیاس داده‌های CMIP6 در حال انجام هستند و گسترده‌ترین مجموعه داده‌های ریزمقیاس شده‌ی در دسترس بر اساس CMIP5 هستند.

IPCC نسخه‌های متفاوتی از مدل‌های تغییر اقلیم ارائه کرده است که مدل‌های اولین گزارش با نام FAR، دومین گزارش با نام SAR، سومین گزارش با نام TAR، چهارمین گزارش با نام AR4 و پنجمین گزارش با نام AR5 (CMIP) نامگذاری شده است. مدل‌های نسخه پنجم بر خلاف نسخه‌های قبلی، بیشتر به جنبه‌های اجتماعی - اقتصادی تغییر اقلیم و تاثیر آن در توسعه پایدار و مدیریت مخاطره پرداخته است و به‌طور کلی بر کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و روش‌های سازگاری با تغییر اقلیم متمرکز است. CMIP5 شامل سه گزارش کارگروه و یک گزارش خلاصه شده است که در سال ۲۰۱۳ اولین گزارش گروه کاری منتشر شده است و مابقی گزارش‌ها در سال ۲۰۱۴ منتشر شده‌اند (IPCC, 2014). در تنظیم پنجمین گزارش ارزیابی تغییر اقلیم از برون‌داد مدل‌های سری CMIP5 استفاده شده است که این مدل‌ها از سناریوهای جدید انتشار با عنوان نماینده خط سیر غلظت گازهای گلخانه‌ای (RCP) استفاده می‌کنند. این سناریوها شامل RCP ۲/۶ (یک سناریوی کاهشی سختگیرانه)، RCP ۴/۵ و RCP ۶ (دو سناریوی حد واسط) و RCP ۸/۵ (یک سناریوی بدبینانه) با تولید گازهای گلخانه‌ای بسیار بالا می‌باشند که اثر گازهای گلخانه‌ای بر واداشت تابشی را در سال ۲۱۰۰ به ترتیب تا ۲/۶، ۴/۵، ۶ و ۸/۵ وات بر متر مربع تخمین زده‌اند (کثیری و همکاران، ۱۴۰۰).

در حالی که لزوم آشکارسازی و یا ارزیابی مقایسه‌ای اثرات گرمایش جهانی و تغییر اقلیم بر پارامتر دما، بخاطر تنوع اقلیمی در هر منطقه‌ای و از جمله کشور ایران ضروری است، با توجه به اهمیت موضوع گرمایش جهانی و فقدان مطالعات جامع در زمینه مدلسازی و پیش‌نگری اثرات آن بر رخدادهای دمایی در محدوده کشور ایران در مقیاس فصلی، در این پژوهش سعی شده است که به بررسی کارایی مدل MPI-ESM-LR (از سری مدل‌های پروژه مقایسه‌ای مدل‌های جفت شده فاز پنجم) در ارزیابی بی‌هنجاری فصلی دمای ایران تحت سناریوهای

هوای جهانی تولید شده است، منتشر می‌کند. وضوح فضایی GCMها، از ۱ تا ۳ درجه، هستند که به طور کلی برای کاربردهای محلی و منطقه‌ای بیش از حد بزرگ مقیاس هستند و فرآیندهای الگوهای آب و هوایی در مقیاس دقیق‌تر را نشان نمی‌دهند (Wang et al, 2023). بنابراین، متخصصین آب و هوا، خروجی‌های GCM را به مقیاس‌های فضایی ظریف‌تر، از ۳۰ دقیقه تا ۰/۴۴ مقیاس کاهی کرده‌اند. مجموعه داده‌های ریزمقیاس شده، تغییرات فرآیندهای هواشناسی سطح مشاهده شده را بهتر منعکس می‌کنند (Zhai et al, 2018).

در مقیاس منطقه‌ای، پیش‌بینی مخاطرات آب و هوایی اهمیت بسزایی دارد. از جمله روش‌های امروزی در شبیه‌سازی اقلیم آینده، استفاده از مدل‌های دینامیکی می‌باشد. مدل آب و هوای جهانی (GCM) و مدل آب و هوای منطقه‌ای (RCM) می‌تواند برای انجام پیش‌بینی استفاده شود، اما ابتدا باید عملکرد مدل ارزیابی شود. هر دو مدل فضایی تفاوت زیادی در وضوح مکانی دارند. وضوح مدل آب و هوای جهانی که صدها کیلومتر است نمی‌تواند ویژگی‌های توپوگرافی آب و هوای منطقه‌ای و متوسط مقیاس را نشان دهد. در حالی که مدل آب و هوای منطقه‌ای دارای تکنیک‌های ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی است که می‌تواند وضوح مکانی افقی مطابق با مدل آب و هوای جهانی را با مشاهده فرآیندهای فیزیکی و دینامیکی جو بهبود بخشد (Yu et al, 2023). پیش‌بینی‌های اقلیمی به بهبود درک ما از تغییرات آینده کمک می‌کند و اجازه می‌دهد تا برنامه‌ریزی بهتری برای کاهش اثرات در مقیاس منطقه‌ای داشته باشیم. با این حال، در حالی که مدل‌های آب و هوای جهانی بسیاری از جنبه‌های آب و هوا در مقیاس بزرگ را به تصویر می‌کشند اما با عدم قطعیت همراه هستند همانطور که خروجی‌های مدل آب و هوای منطقه‌ای نیز ممکن است ارزیابی سیستماتیک قابل توجهی ایجاد کند. از این‌رو استفاده مستقیم آن‌ها به عنوان ورودی مدل‌ها توصیه نمی‌شود زیرا ممکن است منجر به نتیجه‌گیری نادرست شود (Yang et al, 2018). در نتیجه به‌کارگیری روش ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی CORDEX پیش‌بینی‌های دقیق‌تری از تغییرات فضایی دما در مقیاس فصلی در آینده ارائه می‌دهد (Ekstrom et al, 2015). طبق پنجمین گزارش ارزیابی IPCC، مدل‌های CMIP5 در مقایسه با فازهای قبلی CMIP بهبودهایی را در شبیه‌سازی دمای سطح و بارش در مقیاس بزرگ نشان می‌دهند (IPCC,

2022). در نیجریه (Hassan et al, 2020)، و در مقیاس جهانی (Teichmann et al, 2021) انجام شده است. همچنین نتایج مطالعات (Girma et al, 2022) در اتیوپی، (Yu et al, 2023) در چین، (Ge et al, 2021) در شرق آسیا عملکرد بهتر مدل MPI-ESM-LR در پیش‌بینی فراسنج دما را نشان می‌دهد. در مطالعات صورت گرفته بر روی کشور ایران نیز اکثر محققان بر افزایش عمومی پارامترهای دمایی در اکثر مناطق طی دهه‌های اخیر تاکید داشته‌اند همچون (جهانگیر و قره داغی، ۱۴۰۰) در آذربایجان شرقی، (Fathian et al, 2022) و (تقوی‌نیا و همکاران، ۱۴۰۲؛ زرین و داداشی رودباری، ۱۴۰۰) در پهنه کل ایران، (حیدرزاده و همکاران، ۱۳۹۹) در بندرعباس، (عسگری و همکاران، ۱۳۹۹) در حوضه آبخیز دز، (Hasheminasab et al, 2022) (Rahimi et al, 2020) در حوضه رودخانه کارون، (عبدلی و همکاران، ۱۴۰۰) در نیمه غربی ایران، (شهبازی کیا و همکاران، ۱۴۰۱) در تبریز اشاره کرد که همگی به وقوع گرمایش در دوره‌های آتی در ایران اشاره کرده‌اند. بطورکلی در تمامی مطالعات انجام شده، به بررسی وضع موجود پارامترهای دمایی پرداخته شده است، در حالی که بررسی اثرات تغییر اقلیم بر چگونگی وقایع دمایی در مقیاس فصلی در دهه‌های آینده، باتوجه به اهمیت مخاطرات دمایی در برنامه‌ریزی‌های ملی و منطقه‌ای مرتبط با پیشگیری و سازگاری در برابر آنها، نیاز به مطالعات بیشتری دارد. تاکنون با استفاده از روش‌های مختلفی، آب و هوای ایران در شرایط فعلی و آینده مورد بررسی قرار گرفته است؛ با این حال، تحقیقاتی که با استفاده از روش دینامیکی CORDEX باشد در مورد کل ایران نسبتاً معدود است. در حال حاضر، فقط چند مطالعه آن هم با تمرکز بر یک منطقه خاص و یا نتایج صرفاً یک مدل بدون حذف ارزیابی انجام شده است. تحقیقات مرتبط دیگر در مورد ایران فقط روی حوضه‌های آبخیز یا مناطق کوچک متمرکز شده است؛ مانند پژوهش (کامیار و همکاران، ۱۳۹۶) در ارزیابی دما در استان اصفهان؛ یا روی حوضه‌های آبخیز همچون پژوهش (عسگری و همکاران، ۱۳۹۹) در ارزیابی تغییرات دما و بارش در حوضه آبخیز دز؛ پژوهش (احمدی و عزیززاده، ۲۰۲۰؛ احمدی و همکاران، ۲۰۲۰) در مطالعه تغییرات اقلیمی در حوضه کرخه؛ مطالعات (هاشمی نسب و همکاران، ۲۰۲۲؛ رحیمی و همکاران، ۲۰۲۰) در شبیه‌سازی دما و بارش حوضه رودخانه

واداشت تابشی (RCPs) با در نظر گرفتن میزان عدم قطعیت‌ها طی دوره‌های آینده (۲۰۲۱-۲۱۰۰) و آن هم بر اساس تکنیک ریزمقیاس نمایی دینامیکی CORDEX-WAS در مقیاس ایستگاهی پرداخته شود و به دنبال یافتن پاسخ این سوال است که آیا مدل مذکور براساس ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی کوردکس می‌تواند تغییرات دمای فصلی ایران را با کمترین خطا پیش‌نگری کند؟ و آیا شرایط دمای هوا در مقیاس فصلی در دوره‌های آینده افزایشی خواهد بود؟ در این پژوهش قصد داریم که برونداد مستقیم پروژه CORDEX-WAS را بر روی ایران بررسی کنیم. بنابراین نتایج این پژوهش دستاوردهای زیادی در زمینه تغییر اقلیم به ویژه در محدوده CORDEX-WAS خواهد داشت. بر اساس یافته‌های این پژوهش می‌توان با داشتن پیش‌آگاهی در زمینه سازگاری، پیشگیری و یا آماده‌سازی در برابر اثرات افزایش دمای فصلی و تغییر اقلیم در مقیاس ملی یا محلی در ایران برنامه‌ریزی نمود.

در حال حاضر اطلاعات بشر نمی‌تواند از وقوع تغییر اقلیم جلوگیری نماید؛ اما با مطالعه و شناخت ویژگی‌های آن می‌توان از پیامدهای وقوع آن در مناطق مختلف بخصوص در مقیاس محلی جلوگیری کرد یا اثرات مخرب آن راکاهش داد (فرزانه و همکاران، ۱۴۰۰). تاکنون در زمینه تغییر اقلیم مطالعات گسترده‌ای بر روی تحلیل وضع موجود افزایش دما براساس مدل‌های CMIP5 و CMIP6 تحت ریزمقیاس‌نمایی آماری و دینامیکی در کشورهای مختلف صورت گرفته است که می‌توان از مطالعات انجام شده در چین (Zhang et al, 2020)، در آسیا (Chen et al, 2022)، در اتیوپی (Demissie, 2023)، در فلات تبت (Lee et al, 2023)، در مدیترانه (Seker and Gumus, 2022) نام برد که به گرمایش هوا از ۱/۶ درجه سلسیوس تا ۲/۵ درجه سلسیوس اشاره کرده‌اند. در خصوص بررسی توانایی مدل‌های CMIP5 در بازتولید آب و هوا و همچنین نتیجه‌گیری با عملکرد بهتر مدل‌های CMIP5 در مقایسه با نسل قبلی، می‌توان به پژوهش‌هایی در کنیا (Tan et al, 2020)، آسیا (Hamed et al, 2022)، در چین توسط (Wang et al, 2023, Dai et al, 2022)، همچنین در اروپا (Carvalho et al, 2020) اشاره کرد. در زمینه به‌کارگیری روش ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی کوردکس در پیش‌نگری دمای آینده پژوهش‌هایی در اروپا (Tran Anh et al, 2023)، در چین (BanoMedina et al,

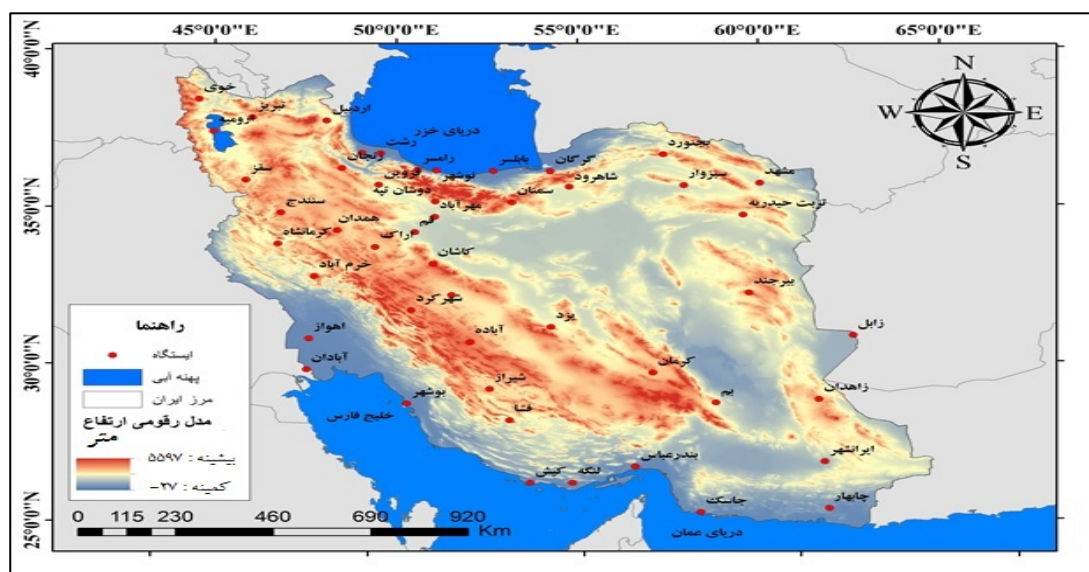
داده‌هایی با تفکیک افقی بالا می‌توانند ویژگی‌های دقیق تغییرات آب و هوایی را در سراسر ایران بهتر نشان دهند.

## مواد و روش‌ها

### محدوده مورد مطالعه

کشور ایران در مختصات جغرافیایی ۲۵ تا ۳۹ درجه عرض شمالی و ۴۴ تا ۶۳ درجه طول شرقی قرار گرفته است که در شکل ۱ نشان داده شده است.

کارون؛ یا مناطق کوچک مانند بررسی‌های (غلام‌پور شمایی و همکاران، ۱۳۹۸) در ارزیابی بارش و تبخیر-تعرق پتانسیل گیاه مرجع در شرایط تغییر اقلیم در نواحی عمده تولید محصولات دیم در استان کردستان، انجام شده است. در عین حال، ایران به دلیل موقعیت جغرافیایی بی‌نظیر و آب و هوای متنوعی که دارد یکی از مناطقی است که بیش‌ترین تغییرپذیری آب و هوا را در جهان دارد. بر این اساس لزوم انجام پژوهشی در کل کشور با داده‌هایی با تفکیک افقی مناسب، ضروری است و



شکل ۱. ایستگاه‌های سینوپتیک منتخب ایران

در تحقیق حاضر جهت ریزگردانی دینامیکی از داده‌های محدوده CORDEX-WAS با قدرت تفکیک مکانی ۰/۴۴ درجه قوسی، مدل RCA4 برای RCM و گروه (Ensemble) r1i1p1 استفاده می‌شود. پروژه کوردکس به صورت دینامیکی ریزمقیاس شده است و خروجی پروژه‌های ریزمقیاس شده ضرورتی به انجام تصحیح اریبی ندارند. کشور ایران از نظر جغرافیایی در منطقه ۶ به نام جنوب آسیا CORDEX-WAS قرار دارد.

این پژوهش به بررسی کارایی مدل MPI-ESM-LR که از سری مدل‌های CMIP5 است، در ارزیابی دمای هوای فصلی در گستره کشور ایران بر اساس سه سناریو RCP۲/۶ (خوش بینانه)، RCP۴/۵ (میانه) و RCP۸/۵ (بدبینانه) برای سه دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۵۰)، آینده میانه (۲۰۵۱-۲۰۷۵) و آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) پرداخته است و بی‌هنجاری فصلی دمای هوا را در ایران مورد مطالعه قرار داده است. شایان ذکر

### مدل‌ها و داده‌های مشاهداتی

برای انتخاب مدل به‌منظور پیش‌نگری دمای فصلی ایران ۸ مدل شامل CanESM2، CSIRO-Mk3-6-0، GFDL-ESM2M، IPSL-CM5A، ICHEC-EC-EARTH، MIROC-ESM، MR و MPI-ESM-LR و NorESM1 مورد بررسی قرار گرفت. نتایج درستی سنجی مدل‌های مذکور نشان داد که مدل MPI-ESM-LR با کمترین اریبی بهترین مدل برای پیش‌نگری دمای فصلی ایران در دوره‌های آینده است. برای درستی سنجی داده‌های دمای هوا که از مدل MPI-ESM-LR استخراج شده بود، ۴۹ ایستگاه سینوپتیک در سطح کشور طی دوره آماری ۱۹۸۰-۲۰۰۵ (مطابق داده‌های تاریخی پروژه کوردکس) انتخاب شد که معیارهای طول و عرض جغرافیایی و ارتفاع از سطح دریا هر ایستگاه برای انتخاب ایستگاه‌ها با پراکندگی مناسب در تمام مناطق کشور مدنظر قرار گرفت.

می‌باشد (زرین و داداشی رودباری، ۱۴۰۲؛ Ge et al, 2021؛ Zhu et al, 2021؛ Gao et al, 2021؛ Aihaiti et al, 2021؛ Yu et al, 2023؛ Ukkola et al, 2020؛ 2020). به دلیل اینکه در زمان انجام این پژوهش روش ریزگردانی CORDEX-WAS مورد استفاده در این پژوهش، برای مدل‌های CMIP6 هنوز به‌طور کامل بسط داده نشده بود، بنابراین از مدل‌های CMIP5 استفاده شده است.

## نتایج و بحث

### درستی سنجی مدل MPI-ESM-LR تحت روش

#### ریزگردانی دینامیکی کوردکس در ایران

جهت درستی سنجی، داده‌های تاریخی مدل MPI-ESM-LR تحت روش ریزگردانی دینامیکی کوردکس با داده‌های ایستگاهی دما در ۴۹ ایستگاه طی دوره آماری ۱۹۸۰-۲۰۰۵ براساس سه شاخص آماری ضریب همبستگی پیرسون، مجذور میانگین مربعات خطا و میانگین انحراف خطا مورد بررسی قرار گرفت. برای کل کشور ایران متوسط ضریب همبستگی معادل ۰/۹۹ برآورد شده است که وجود همبستگی بسیار بالای داده‌های مشاهداتی مدل و داده‌های ایستگاهی را نشان می‌دهد. همچنان که متوسط شاخص RMSE با ۰/۵۵ درجه سلسیوس و MBE با ۰/۳- درجه سلسیوس نیز کارایی بهتر این مدل را در پیش‌بینی فراسنج دمای فصلی در ایران نشان می‌دهد. همانطور که شکل ۲ نشان می‌دهد برای کل کشور ایران در طول سال متوسط دمای مدل MPI-ESM-LR معادل ۱۷/۵ درجه سلسیوس و متوسط دمای ایستگاه‌های سینوپتیک معادل ۱۷/۹ درجه سلسیوس می‌باشد که وجود همبستگی بالا را تأیید می‌کند و در هر دو مورد بیشینه دما در سواحل جنوب کشور و کمینه دما در شمال غرب کشور نشان داده شده است. همچنان که مقادیر خطا در شاخص مجذور میانگین مربعات خطا در اکثریت ایستگاه‌ها کمتر از ۱ درجه سلسیوس نشان داده شده است و فقط در ایستگاه‌های بندرلنگه، جاسک، جزیره کیش، چابهار و بندرعباس میانگین مربعات خطا به میزان ۱ درجه سلسیوس ثبت شده است که بالاترین خطا در بندرلنگه با ۱/۶ درجه سلسیوس و کمترین

است که داده‌های اقلیمی در اجرای مدل‌های پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده فاز پنجم تا پایان سال ۲۰۰۵ میلادی به عنوان دوره تاریخی و از اول ژانویه ۲۰۲۱ تا ۳۱ دسامبر ۲۱۰۰ میلادی برای سناریوهای آینده در نظر گرفته شده است. بنابراین دوره آماری ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۵ به عنوان دوره تاریخی جهت مقایسه مشاهدات ایستگاه‌های سینوپتیک با شبیه‌سازی‌های مدل‌های CMIP5 در نظر گرفته شد.

### درستی سنجی داده‌ها

درستی سنجی داده‌های مشاهداتی و مدل‌سازی شده (۱۹۸۰-۲۰۰۵) با استفاده از آماره‌های میانگین انحراف خطا (MBE)، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب همبستگی پیرسون ( $r$ ) که معادلات آنها به ترتیب در روابط (۱) تا (۳) مشخص شده‌اند، ارزیابی شده است. ارزیابی بهتر خطا و ارزیابی مدل‌ها و متداول بودن این روش‌ها دلیلی برای انتخاب این آماره‌ها بوده است.

رابطه (۱)

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - Y_i)}{n}$$

رابطه (۲)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n}}$$

رابطه (۳)

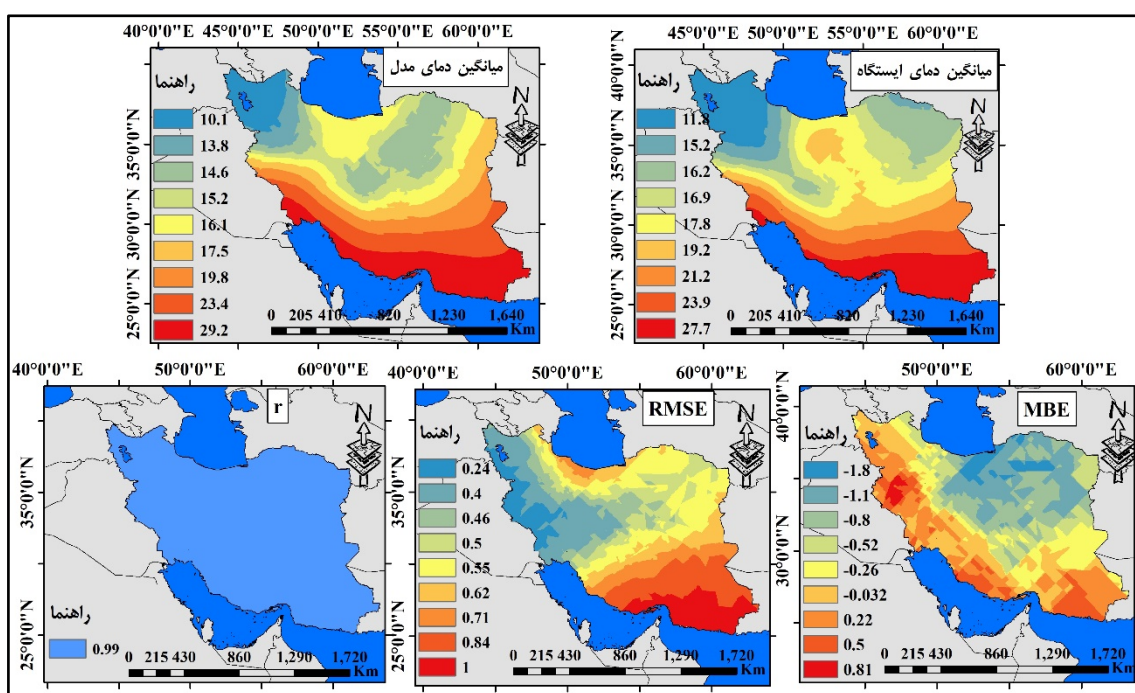
$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

در این روابط  $X_i$  و  $Y_i$  به ترتیب  $i$  امین داده مشاهداتی و داده باز تحلیل/ماهواره و  $n$  تعداد کل نمونه‌های مورد ارزیابی می‌باشند.

برای برآورد شیب روند داده‌ها در سری زمانی، از روش ناپارامتریک سنس استفاده می‌شود. این روش ابتدا توسط تیل در سال (۱۹۵۰) ارائه و سپس توسط سن (۱۹۶۸) بسط داده شد. این روش بر ارزیابی تفاوت بین مشاهدات سری زمانی استوار است (داداشی رودباری، ۱۳۹۹). شایان ذکر است که IPCC مدل‌های CMIP6 را در گزارش ششم خود در سال ۲۰۲۰ و ۲۰۲۱ منتشر کرده است و این مدل‌ها توسط بسیاری از محققین در حال ارزیابی و مقایسه با مدل‌های CMIP5

(بیشتر از مقدار واقعی) حاصل شده است. اختلاف ارتفاع بین مدل و واقعیت یکی از موارد عدم قطعیت مدل‌هاست که در مدل‌های اقلیمی به اریبی منفی منجر می‌شود (زرین و داداشی رودباری، ۱۴۰۰). همچنین چهار عامل تغییر خرد آب و هواشناسی محل، افزایش هواویزهای هوا سپهری، بخار آب قابل بارش و ابرها و دامنه دگرگونی دما می‌تواند به اریبی بالا منجر شود (تقوی‌نیا و همکاران، ۱۴۰۲). با توجه به مطالب مذکور، در هر سه آماری مورد سنجش، مدل منتخب از توانایی خوبی در پیش‌نگری دمای فصلی آینده ایران برخوردار است که مطالعات (Girma et al, 2022) در اتیوپی نیز به عملکرد بهتر مدل مذکور در پیش‌نگری دما اشاره کرده‌اند.

خطا در سندج به میزان ۰/۰۶ درجه سلسیوس نمایانگر است. در این راستا افزایش جزئی آماره مجذور میانگین مربعات خطا در برخی از ایستگاه‌های جنوب‌شرق کشور به معنای ضعف مدل در شبیه‌سازی نیست بلکه به دلیل فاصله ایستگاه تا نزدیکترین یاخته و عرض جغرافیایی پایین و دوری یا نزدیکی به منابع رطوبتی و توپوگرافی می‌باشد که در کارایی GCMها تأثیر می‌گذارد (Pathak et al, 2019). در شاخص میانگین انحراف خطا پیشینه اریبی مثبت در خرم‌آباد به میزان ۰/۸۱ درجه و پیشینه اریبی منفی در دوشان تپه به میزان ۱/۸- درجه سلسیوس مشاهده می‌شود. از ۴۹ ایستگاه مورد بررسی برای درستی سنجی، مدل MPI-ESM-LR در ۵۱/۱ درصد از ایستگاه‌ها اریبی منفی یا کم‌برآوردی (کمتر از مقدار واقعی) و در ۴۸/۹ درصد از ایستگاه‌ها اریبی مثبت یا بیش برآوردی



شکل ۲. کارایی مدل MPI-ESM-LR براساس درستی سنجی داده‌های دمای مدل و داده‌های ایستگاهی طی دوره آماری ۲۰۰۵-۱۹۸۰ با استفاده از سنج‌های آماری

سطح شده است (Dai et al, 2022). در این راستا بررسی توزیع زمانی متوسط دمای فصلی ایران بر اساس مدل MPI-ESM-LR برای سه دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۵۰)، آینده میانه (۲۰۵۱-۲۰۷۵) و آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) تحت سه سناریو خوش بینانه RCP۲/۶، میانه

توزیع زمانی متوسط بی‌هنجاری دمای فصلی ایران بر اساس مدل MPI-ESM-LR در دوره مشاهداتی و آینده از زمان انقلاب صنعتی، افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای به دلیل فعالیت‌های انسانی باعث نگرانی‌های قابل توجهی درخصوص گرم شدن کره زمین با افزایش میانگین دمای

دوره آینده دور در فصل زمستان، اختلاف ۵/۴ درجه تحت RCP۸/۵ و RCP۲/۶ درجه سلسیوس تحت RCP۲/۶ در دوره آینده دور در فصل بهار، اختلاف ۵/۵ درجه تحت RCP۸/۵ و ۰/۹ درجه سلسیوس تحت RCP۲/۶ در دوره آینده دور در فصل تابستان و اختلاف ۵ درجه سلسیوس تحت RCP۸/۵ و ۰/۹ درجه سلسیوس تحت RCP۲/۶ در دوره آینده دور در فصل پاییز را نشان می‌دهد. همچنان که اختلاف RCP۴/۵ نسبت به دوره تاریخی نیز مابین مقادیر اختلافی RCP۲/۶ و RCP۸/۵ است. توسعه شهرها و افزایش استفاده از وسایل نقلیه و افزایش آلاینده‌ها به دنبال صنعتی شدن هرچه بیشتر فعالیت‌ها به گرمایش هرچه بیشتر هوا در دوره‌های پیش‌رو دامن خواهد زد (تقوی‌نیا و همکاران، ۱۴۰۲).

RCP۴/۵ و بدینانه RCP۸/۵ (جدول ۱) نشان می‌دهد که در همه دوره‌های آینده و تحت هر سه سناریو، افزایش دمای هوا در هر چهار فصل سال پیش‌نگری شده است به طوری که در تمام فصول سال کمینه گرمایش هوا تحت سناریو RCP۲/۶ در دوره آینده دور به میزان ۷/۱، ۲۱/۵، ۲۵/۷، ۱۰/۸ درجه سلسیوس و بیشینه افزایش دما تحت سناریو بدینانه RCP۸/۵ در دوره آینده دور به میزان ۱۰/۵، ۲۵/۷، ۳۰/۳، ۱۴/۹ درجه سلسیوس به ترتیب در فصول زمستان، بهار، تابستان و پاییز پیش‌نگری شده است. در حالی که در دوره تاریخی متوسط دمای هوا در فصول زمستان، بهار، تابستان و پاییز به ترتیب ۶/۳، ۲۰/۳، ۲۴/۸ و ۹/۹ درجه سلسیوس می‌باشد و به وضوح افزایش دما در دوره‌های آتی نسبت به دوره تاریخی یا مشاهداتی با اختلاف ۴/۲ درجه سلسیوس تحت RCP۸/۵ و ۰/۸ درجه سلسیوس تحت RCP۲/۶ در

جدول ۱. متوسط دمای هوای فصلی در دوره تاریخی (۲۰۰۵-۱۹۸۰) و آینده (۲۱۰۰-۲۰۲۱) براساس مدل MPI-ESM-LR تحت سناریوهای واداشت تابشی RCPs

RCP ۸/۵			RCP ۴/۵			RCP ۲/۶			دوره تاریخی	
۲۰۷۶- ۲۱۰۰	۲۰۵۱- ۲۰۷۵	۲۰۲۱- ۲۰۵۰	۲۰۷۶- ۲۱۰۰	۲۰۵۱- ۲۰۷۵	۲۰۲۱- ۲۰۵۰	۲۰۷۶- ۲۱۰۰	۲۰۵۱- ۲۰۷۵	۲۰۲۱- ۲۰۵۰	۱۹۸۰- ۲۰۰۵	دوره آماری
۱۰/۵	۹/۲	۷/۷	۸/۵	۸/۱	۷/۶	۷/۱	۷/۵	۷/۲	۶/۳	میانگین زمستان
۲۵/۷	۲۴/۱	۲۲/۳	۲۳/۱	۲۲/۷	۲۱/۸	۲۱/۵	۲۱/۷	۲۱/۷	۲۰/۳	میانگین بهار
۳۰/۳	۲۸/۳	۲۶/۶	۲۷/۴	۲۶/۸	۲۶/۱	۲۵/۷	۲۵/۸	۲۶/۱	۲۴/۸	میانگین تابستان
۱۴/۹	۱۳/۲	۱۱/۳	۱۲	۱۱/۶	۱۱/۲	۱۰/۸	۱۱	۱۱	۹/۹	میانگین پاییز

۰/۰۳۷، -۰/۰۷۵ و -۰/۰۳۷ درجه سلسیوس به ازای هردهه نشان می‌دهند، در سایر دوره‌ها و سناریوها و همچنین در دوره تاریخی مدل و داده‌های ایستگاهی شیب روند افزایشی دما در همه فصول سال نشان داده شده است که در داده‌های ایستگاهی بیشینه شیب روند افزایشی در فصل زمستان به میزان ۰/۶۹ و کمینه شیب روند افزایشی دما در فصل بهار معادل ۰/۲۵۵ درجه سلسیوس به ازای هر دهه مشاهده شده است. در داده‌های تاریخی مدل، بیشینه شیب روند افزایشی

شیب روند دمای فصلی ایران براساس داده‌های تاریخی و آینده مدل MPI-ESM-LR و داده‌های ایستگاهی

در سال‌های اخیر در زمینه گرمایش جهانی، وقوع رویدادهای شدید آب و هوایی، از جمله بارندگی شدید، امواج گرما، سیل و خشکسالی در سرتاسر جهان مکرر و شدیدتر شده است (Gao et al, 2021). همانطور که شکل ۳ و جدول ۲ نیز نشان می‌دهند به استثنای فصول بهار، تابستان و پاییز در RCP۲/۶ که به ترتیب شیب روند کاهش دما را به میزان

برای سه دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۵۰)، آینده میانه (۲۰۵۱-۲۰۷۵) و آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) تحت سه سناریو خوش بینانه RCP۲/۶، میانه RCP۴/۵ و بدبینانه RCP۸/۵ نشان می‌دهد که در دوره تاریخی در فصول زمستان، بهار، تابستان و پاییز بیشینه دما در سواحل جنوب کشور به میزان ۱۸، ۳۰/۷، ۳۶/۵ و ۲۳ درجه سلسیوس و کمینه دما در ارتفاعات شمال غرب کشور همچون سیلان و سهند و ارتفاعات شمال شرق همچون بینالود و آلا داغ به میزان ۱/۹-، ۷/۹، ۱۵ و ۱/۹ درجه سلسیوس مشاهده شده است. همچنان که بخش‌هایی از ارتفاعات زاگرس در غرب کشور نیز کمینه دما را نشان می‌دهند. همانطور که نتایج نشان می‌دهد، ناهمواری‌ها نقش بسیار مهمی در توزیع ناهمگون دما در کشور ایفا می‌کنند. به طور کلی در دوره تاریخی متوسط دمای هوای سالانه برای کل کشور معادل ۱۵/۳ درجه سلسیوس ثبت شده است.

در فصل زمستان در تمامی دوره‌ها و سناریوها بیشترین اختلاف دما در ایستگاه شهرکرد در ارتفاعات زاگرس و در ارتفاعات سیلان و سهند و ایستگاه سقز در شمال غرب کشور و کمترین اختلاف دما در مناطق کم ارتفاع داخلی در دشت کویر و دامنه‌های شرقی شیرکوه نمایانگر است که به استثنای دوره‌ی آینده نزدیک تحت RCP۸/۵ که مناطق جنوب کشور شامل بندرعباس، جاسک و ایرانشهر به پهنه بیشترین اختلاف دما با بی‌هنجاری ۱/۸ درجه سلسیوس اضافه شده‌اند و نیز ارتفاعات شمال غرب کشور کمترین اختلاف دما را به میزان ۰/۷ درجه سلسیوس نشان می‌دهند. این در حالیست که بیشترین بی‌هنجاری دما در دوره آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) تحت RCP۸/۵ به میزان ۵/۴ درجه سلسیوس و کمترین بی‌هنجاری دما در دوره آینده نزدیک تحت RCP۲/۶ به میزان ۰/۵ درجه سلسیوس به وقوع خواهد پیوست (شکل ۴).

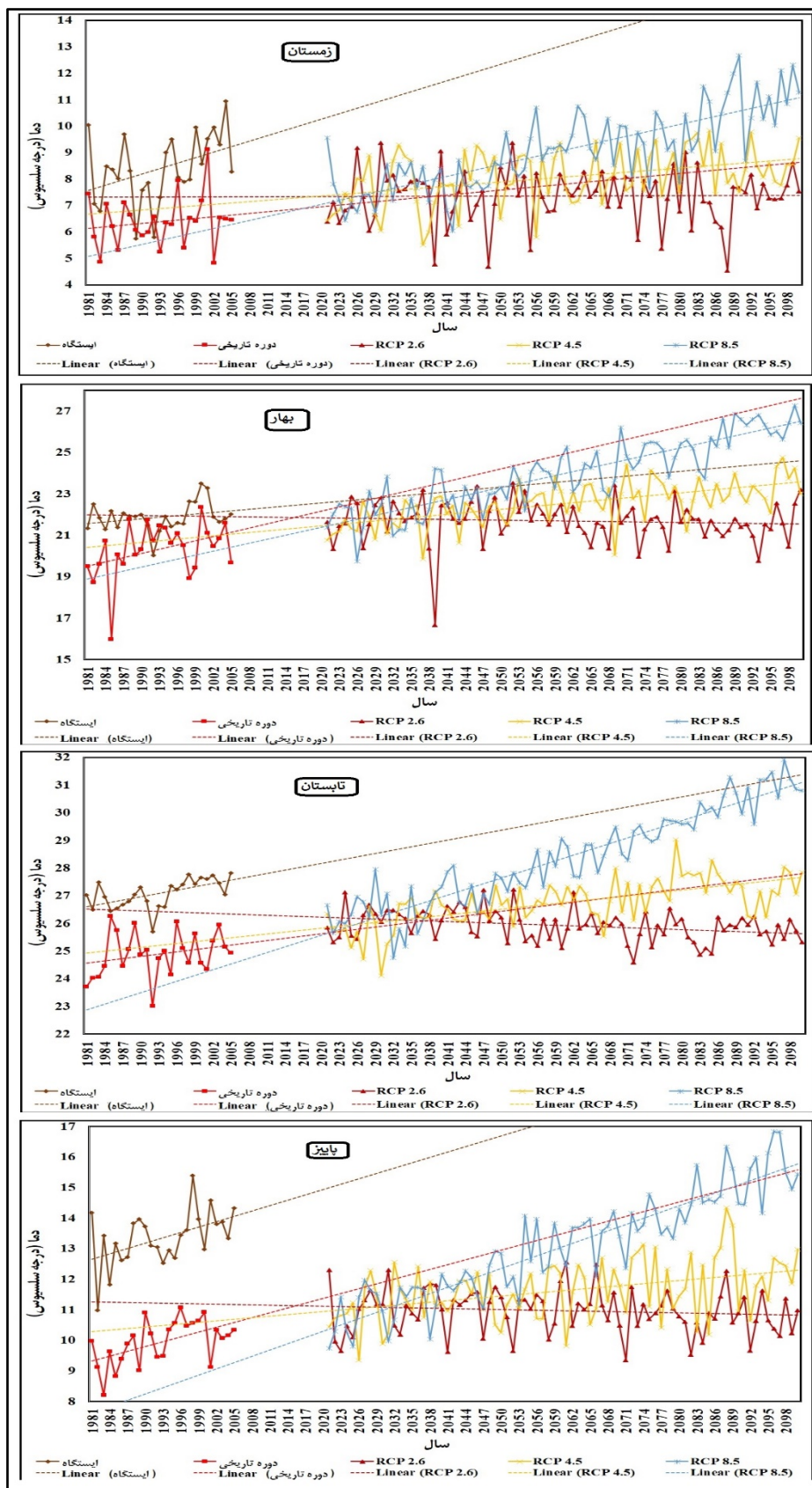
در فصل بهار به میزان ۰/۶۸ درجه سلسیوس و کمینه شیب روند افزایشی ۰/۲۰۹ درجه سلسیوس به ازای هر دهه ثبت شده است. در سناریو خوش بینانه RCP۲/۶ شیب روند افزایشی دما به میزان ۰/۰۰۶ درجه سلسیوس به ازای هر دهه محاسبه شده است. همچنان که بیشینه شیب روند افزایشی تحت RCP۴/۵ به میزان ۰/۲۶۵ درجه در فصل بهار و کمینه شیب افزایشی در فصل پاییز معادل ۰/۱۶۹ درجه سلسیوس محاسبه شده است. در سناریو بدبینانه RCP۸/۵ ماکزیمم شیب روند افزایشی دما به میزان ۰/۶۹ درجه سلسیوس و مینیمم شیب روند گرمایشی هوا ۰/۵۰۴ درجه سلسیوس در هر دهه ثبت شده است. عواملی همچون افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای، تخریب زمین، کمبود قابل ملاحظه و جدی بارش که سبب کاهش رطوبت و خشک‌تر شدن سطح زمین و ضعیف‌تر شدن رویش و پوشش گیاهی می‌شود، پتانسیل افزایش دما را در دوره‌های آینده بالاتر می‌برد (زرین و داداشی رودباری، ۱۴۰۲). بدین جهت پیش‌بینی تغییرات احتمالی در پارامترهای اقلیمی از جمله دما برای برنامه‌ریزی جهت سازگاری با تغییر اقلیم و کاهش اثرات مخرب تغییر اقلیم بسیار مهم است.

#### بی‌هنجاری زمانی و مکانی دمای هوای فصلی ایران براساس مدل MPI-ESM-LR در دوره مشاهداتی و آینده

گزارش IPCC در سال ۲۰۲۱ نشان داد که دمای جهان از سال ۱۹۷۰ با سرعت بیشتری افزایش یافته است. دما در آخرین دهه گذشته (۲۰۱۱-۲۰۲۰) از دمای هوای آخرین دوره گرم چند قرن، حدود ۶۵۰۰ سال پیش، ۰/۲ تا ۱ درجه سلسیوس نسبت به ۱۸۵۰-۱۹۰۰ پیشی گرفته است (Demissie, 2023). در این خصوص، بررسی بی‌هنجاری دمای هوای فصلی ایران بر اساس مدل MPI-ESM-LR

جدول ۲. شیب روند دمای فصلی ایران براساس داده‌های مدل MPI-ESM-LR و داده‌های ایستگاهی

فصل	داده ایستگاهی	داده تاریخی	RCP۲/۶	RCP۴/۵	RCP۸/۵
زمستان	۰/۶۹	۰/۲۰۹	۰/۰۰۶	۰/۱۷۶	۰/۵۰۴
بهار	۰/۲۵۵	۰/۶۸	-۰/۰۳۷	۰/۲۶۵	۰/۶۴۱
تابستان	۰/۴	۰/۲۷۲	-۰/۰۷۵	۰/۲۳	۰/۶۹
پاییز	۰/۵۸۴	۰/۵۲۵	-۰/۰۳۷	۰/۱۶۹	۰/۶۸۴

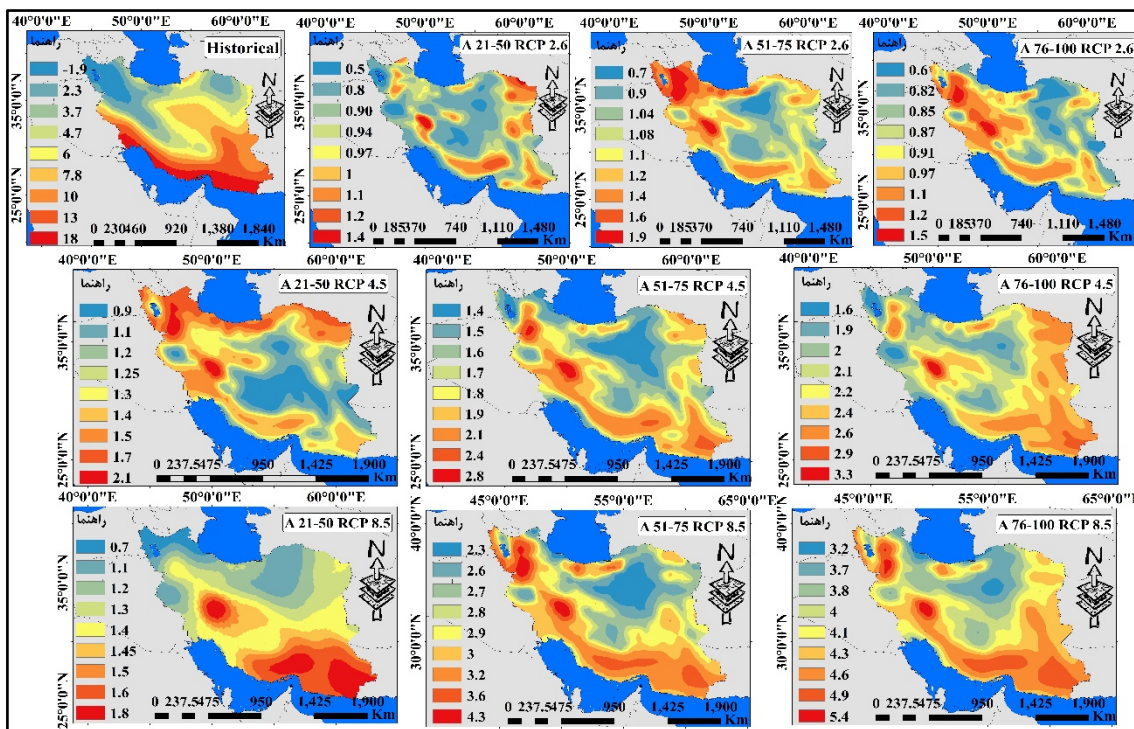


شکل ۳. شیب روند دمای هوای فصلی ایران طی دوره مشاهداتی (۲۰۰۵-۱۹۸۰) و آینده (۲۰۲۱-۲۱۰۰) براساس داده‌های ایستگاهی و

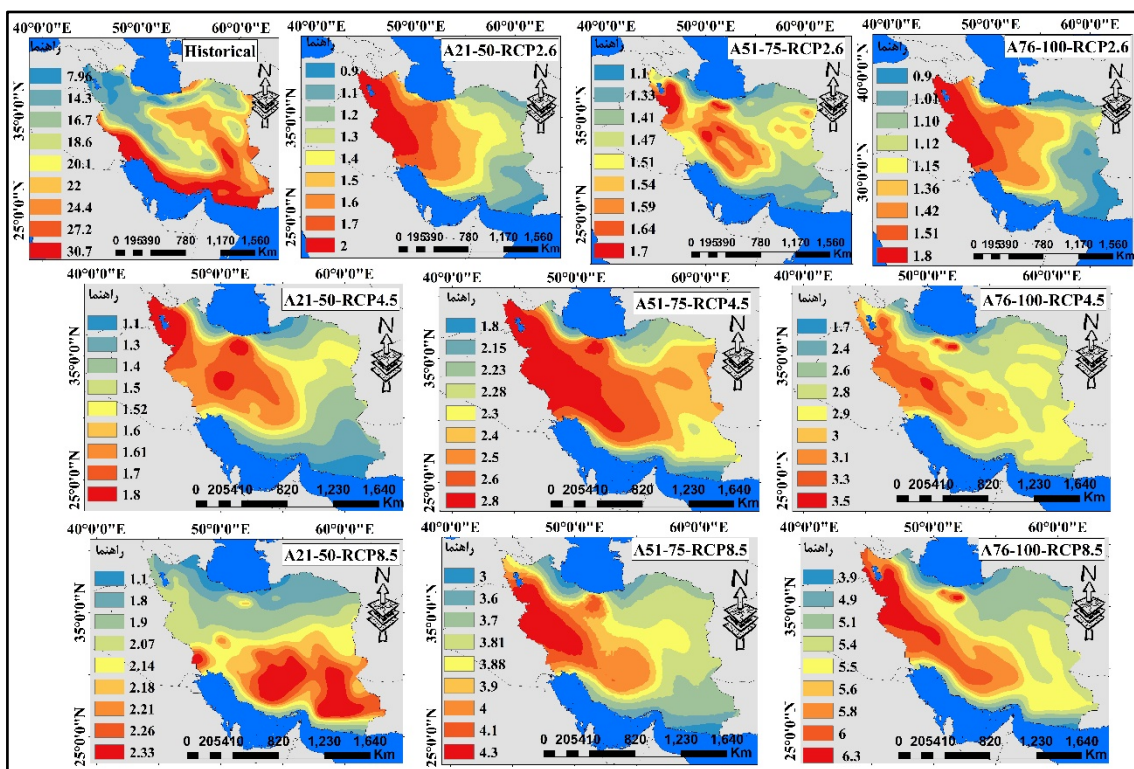
داده‌های مدل MPI-ESM-LR تحت سناریوهای واداشت تابشی RCP

در این فصل کمترین اختلاف دما در جنوب‌شرق کشور در جاسک و چابهار نشان داده شده است. به جز دوره آینده میانه تحت سناریو RCP۲/۶ که کمترین اختلاف دما در جلگه خوزستان و در دوره آینده دور در همین سناریو در ارتفاعات بینالود، آلاداغ، هزار مسجد و الله اکبر در شمال‌شرق کشور به میزان ۰/۵ درجه سلسیوس نمایانگر است. به صورت اجمالی، ماکزیمم بی‌هنجاری دما در این فصل به میزان ۶/۲ درجه سلسیوس در دوره آینده دور تحت RCP۸/۵ و مینیمم بی‌هنجاری دما در دوره‌های آینده میانه و دور تحت سناریو RCP۲/۶ به میزان ۰/۵ درجه سلسیوس پیش‌نگری شده است (شکل ۶). نتایج مطالعات (Miri et al, 2021) نیز بیانگر بیشترین تغییرپذیری دما در مناطق کوهستانی ایران در دوره‌های آینده است. در فصل پاییز نیمه شرقی و بخصوص جنوب‌شرق کشور و دشت لوت بیشترین اختلاف دما را نشان می‌دهد با این اختلاف که در RCP۴/۵ در دوره آینده میانه (۲۰۵۱-۲۰۷۵) شاهد کاهش گستره نواحی بیشترین اختلاف و در آینده نزدیک در سناریوهای RCP۲/۶ و RCP۴/۵ شاهد گسترش نواحی بیشترین اختلاف در دامنه شمالی البرز و ارتفاعات سبلان و سهند در شمال‌غرب کشور هستیم. در حالی که کمترین اختلاف دما در تمام دوره‌های آینده سناریو RCP۸/۵ و دوره آینده دور در سناریو RCP۴/۵ در سواحل غربی خزر در ارتفاعات تالش و سبلان پیش‌بینی شده است. در مابقی سناریوها و دوره‌ها کمترین اختلاف دما فقط در دامنه غربی زاگرس نمایانگر است. سرانجام، بیشترین اختلاف دما در این فصل در دوره آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) تحت RCP۸/۵ به میزان ۵/۶ درجه سلسیوس و کمترین اختلاف دما در دوره آینده دور تحت RCP۲/۶ به میزان ۰/۵ درجه سلسیوس پیش‌نگری شده است (شکل ۷). بالا بودن بی‌هنجاری مثبت دما در نواحی داخلی و شرق و جنوب‌شرق ایران که اقلیم خشک و نیمه خشک دارند، منجر به افزایش خشکسالی و بیابان‌زایی و افزایش شوری خاک از طریق افزایش تبخیر آب سطحی، افزایش وقوع توفان‌های شن، آلودگی هوا، مهاجرت مردم خواهد شد (Fathian et al, 2022).

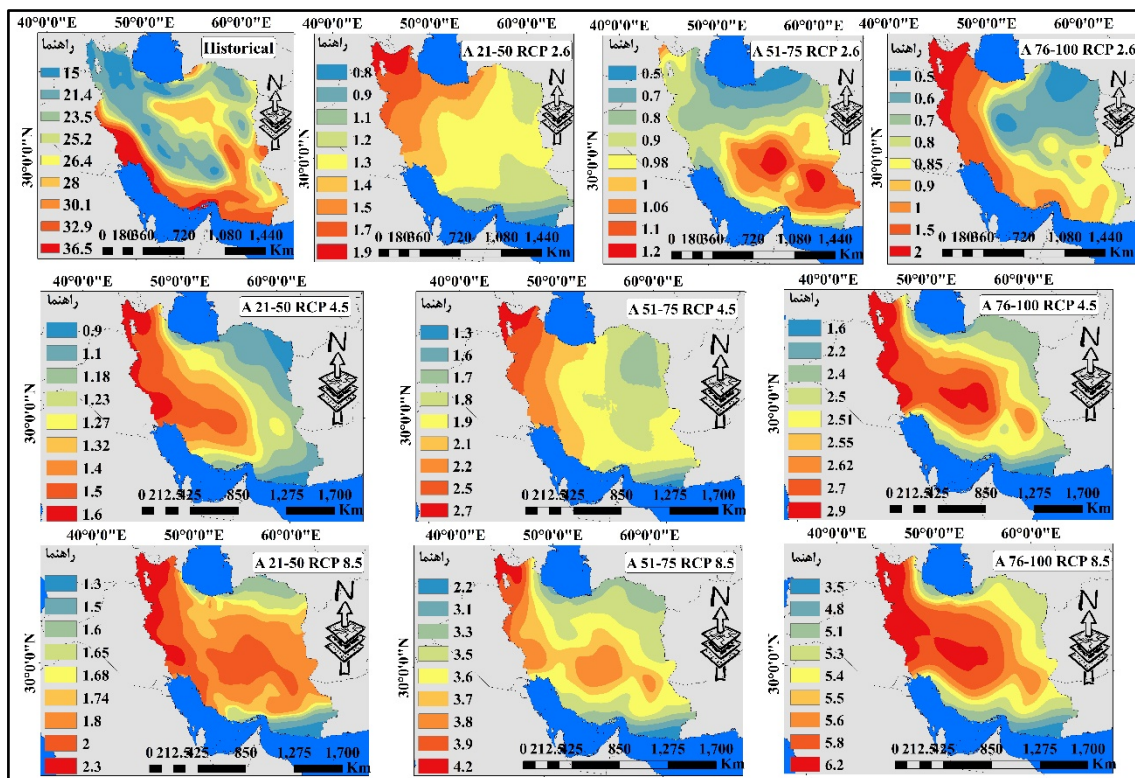
همچنان که گرمایش ۳/۳ درجه‌ای تحت سناریو RCP۸/۵ در پژوهش (Rahimi et al, 2020) نیز قابل توجه است. افزایش دمای هوا در مناطق مرتفع و برف‌گیر کوهستانی شمال‌غرب و غرب کشور منجر به ذوب یخ‌ها، کاهش تعداد روزهای یخبندان، تغییر شکل بارش، افزایش تبخیر، کاهش منابع آبی و پوشش گیاهی و در نهایت مهاجرت انسان‌ها و انقراض حیوانات و گیاهان در این مناطق خواهد شد. در فصل بهار در همه دوره‌ها و سناریوها بیشترین اختلاف دما در ارتفاعات شمال‌غرب و ارتفاعات زاگرس و کمترین اختلاف در نواحی ساحلی خزر و شرق کشور مشاهده می‌شود. به استثنای دوره آینده نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۱) تحت RCP۸/۵ که بیشترین اختلاف دما در مناطق کم‌ارتفاع جنوب کشور شامل ایستگاه‌های اهواز، فسا، بم، کرمان، یزد، ایرانشهر به میزان ۲/۳ درجه سلسیوس و کمترین اختلاف دما صرفاً در نیمه شمالی کشور با بی‌هنجاری ۱/۱ درجه سلسیوس متمرکز شده است. همچنین در دوره آینده میانه (۲۰۷۵-۲۰۵۱) تحت RCP۴/۵ دامنه گسترش بیشترین اختلاف دما تا دامنه شرقی زاگرس و تاحدودی به سمت مناطق مرکزی کشیده شده است. به طور کلی در این فصل بیشترین بی‌هنجاری دما در دوره آینده دور تحت RCP۸/۵ به میزان ۶/۳ درجه سلسیوس و کمترین بی‌هنجاری در دوره‌های آینده نزدیک و دور تحت RCP۲/۶ به میزان ۰/۹ درجه سلسیوس ثبت شده است (شکل ۵). ضخامت کمتر جو و افزایش ارتفاع در مناطق مرتفع کوهستانی دلیلی بر تغییرپذیری دما در این مناطق است. همچنان که نتایج مطالعات (Lee et al, 2023) نیز به افزایش دما در دوره‌های آتی در کوهستان‌های فلات تبت اشاره کرده است. در فصل تابستان بیشترین اختلاف دما در اکثر دوره‌ها و سناریوها در شمال‌غرب و نوار غربی کشور متمرکز شده است با این تفاوت که در آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) تحت RCP۸/۵ و RCP۴/۵ مناطق مرکزی از جمله ایستگاه‌های آباء، اصفهان، شهرکرد و یزد نیز به پهنه مناطق بیشترین اختلاف دما اضافه شده است. همچنین در دوره آینده میانه تحت RCP۲/۶ بیشترین اختلاف دما به میزان ۱/۲ درجه سلسیوس صرفاً در نواحی محدود در مناطق مرکزی (ارتفاعات شیرکوه در یزد) و جنوب‌شرقی مشاهده شده است.



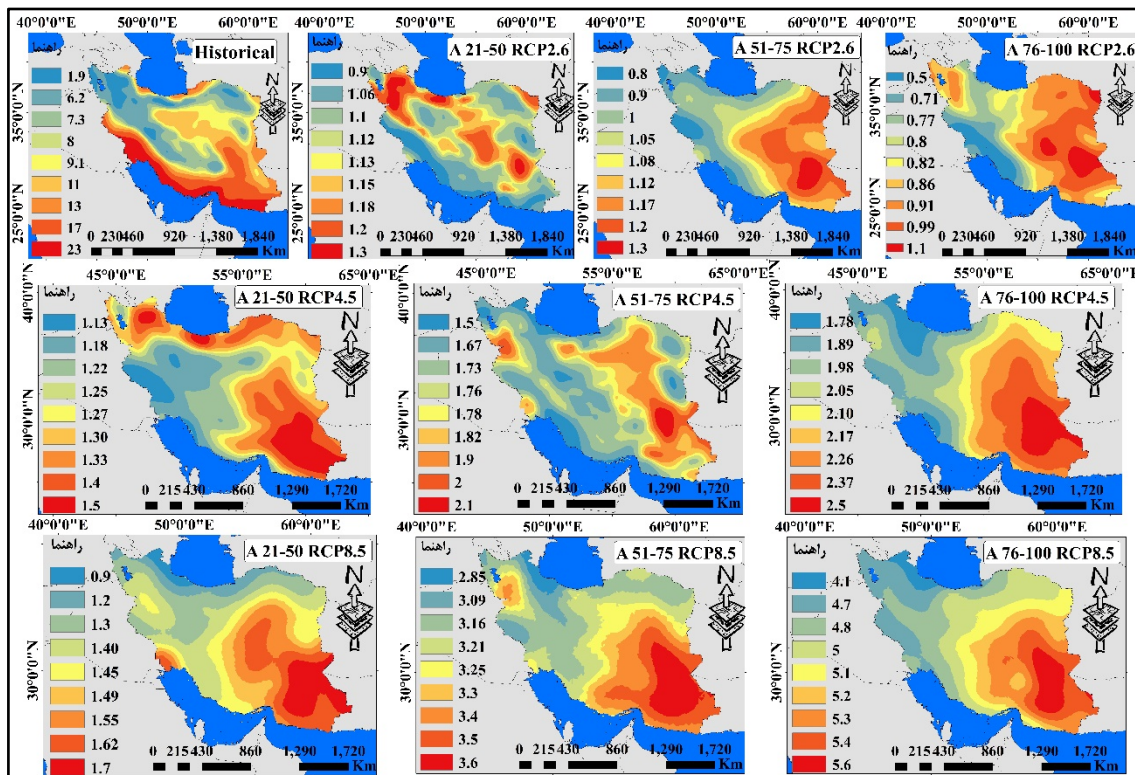
شکل ۴. بی‌هنجاری دمای فصل زمستان طی دوره تاریخی (۱۹۸۰-۲۰۰۵)، آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۵۰)، آینده میانه (۲۰۵۱-۲۰۷۵) و آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) براساس مدل MPI-ESM-LR تحت سناریوهای واداشت تابشی (RCPs)



شکل ۵. بی‌هنجاری دمای فصل بهار طی دوره تاریخی (۱۹۸۰-۲۰۰۵)، آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۵۰)، آینده میانه (۲۰۵۱-۲۰۷۵) و آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) براساس مدل MPI-ESM-LR تحت سناریوهای واداشت تابشی (RCPs)



شکل ۶. بی‌هنجاری دمای فصل تابستان طی دوره تاریخی (۱۹۸۰-۲۰۰۵)، آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۵۰)، آینده میانه (۲۰۵۱-۲۰۷۵) و آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) براساس مدل MPI-ESM-LR تحت سناریوهای واداشت تابشی (RCPs)



شکل ۷. بی‌هنجاری دمای فصل پاییز طی دوره تاریخی (۱۹۸۰-۲۰۰۵)، آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۵۰)، آینده میانه (۲۰۵۱-۲۰۷۵) و آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) براساس مدل MPI-ESM-LR تحت سناریوهای واداشت تابشی (RCPs)

(تقوی‌نیا و همکاران، ۱۴۰۲) و (زرین و داداشی رودباری، ۱۴۰۰) همسو می‌باشد که همگی بیانگر افزایش دمای هوا در آینده با مدل‌های پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده در مناطق مختلف ایران هستند. یافته‌های این پژوهش در مورد وقوع بیشترین اختلاف دما در دوره‌های آینده در شمال‌غرب با مطالعات (جهانگیر و قره‌داغی، ۱۴۰۰) در آذربایجان شرقی، در جنوب کشور با مطالعات (حیدرزاده و همکاران، ۱۳۹۹) در بندرعباس، در نیمه غربی ایران با نتایج پژوهش (عبدلی و همکاران، ۱۴۰۰) مطابقت دارد. از جمله اثرات تغییرات دمایی را می‌توان افزایش تقاضا برای خنک‌کنندگی، کاهش کیفیت هوای شهرها، کمبود انرژی، اثرات جزایر گرمایی، افزایش تقاضای آب و مسائل مرتبط با کیفیت آب، اثر بر سلامت انسان‌ها و افزایش خطر مرگ‌ومیر بر اثر گرما دانست. باتوجه به پدید گرمایش هوا در دهه‌های آتی و باتوجه به مسئله تنش آب، پیشنهاد می‌شود برای برنامه‌ریزی آب موردنیاز آینده به‌خصوص در مناطق خشک و نیمه خشک، علاوه بر توجه به توسعه بخش‌های جمعیتی، صنعتی و کشاورزی، تأثیر تغییرات اقلیمی بر آب مورد نیاز و منابع آبی نیز در نظر گرفته شود.

#### منابع

- 1- Abdoli, S., Azizi, G., & Borna, R. (2021). Evaluation of air temperature and precipitation changes in the rainy region of western Iran under climate change conditions. *Physical Geography Quarterly*, 14(53), 1-18.
- 2- Ahmadi, H., Fallah Ghalhari, G. A., & Baaghideh, M. (2019). Projection of Climate Change Impacts on Seasonal Precipitation in Iranian Cold Regions Based on Radiative Forcing Scenarios (RCP). *Journal of the Earth and Space Physics*, 45(1), 177-196.
- 3- Aihaiti, A., Jiang, Z. H., Zhu, L. H., Li, W & You, Q. L. (2021). Risk changes of compound temperature and precipitation extremes in China under 1.5 °C and 2 °C. *global warming. Atmos Res*, 264, 2-8.
- 4- Asgari, E., Baaghideh, M., Kamyar, A., Entezari, A., & Hosseini, M. (2020). An Overview of Climate Changes of Temperature and Precipitation in the CORDEX Range of South Asia (Case Study: Dez Watershed). *Journal of Geography and Regional Development*, 18(1), 252-225.

در این پژوهش جهت بررسی تغییرات پارامتر اقلیمی دما از ۸ مدل از مدل‌های گزارش پنجم تحت ریزمقیاس نمایی دینامیکی کوردکس در دوره تاریخی (۱۹۸۰-۲۰۰۵) و دوره‌های آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۵۰)، میانه (۲۰۷۵-۲۰۵۱) و آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۷۶) تحت سه سناریو خوش بینانه و آینده نزدیک RCP۲/۶، سناریو میانه RCP۴/۵ و سناریو بدبینانه RCP۸/۵ با سه سنجه آماری  $r$ ، RMSE، MBE استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل MPI-ESM-LR با متوسط ضریب همبستگی ۰/۹۹ و متوسط شاخص RMSE با ۰/۵۵ درجه سلسیوس و MBE با ۰/۳- درجه سلسیوس توانایی بهتری را در پیش‌بینی فراسنج دمای فصلی در ایران دارد. به استثنای فصول بهار، تابستان و پاییز در RCP۲/۶ که شیب روند کاهش دما را نشان می‌دهند، در سایر دوره‌ها و سناریوها و همچنین در دوره تاریخی مدل و داده‌های ایستگاهی شیب روند افزایشی دما در همه فصول سال نشان داده شده است. در فصل زمستان در تمامی دوره‌ها و سناریوها بیشترین اختلاف دما در ارتفاعات زاگرس و سبلان و سه‌سند در غرب و شمال‌غرب کشور و کمترین اختلاف دما در مناطق کم‌ارتفاع داخلی در دشت کویر و دامنه‌های شرقی شیرکوه نمایانگر است. در فصل بهار در همه دوره‌ها و سناریوها بیشترین اختلاف دما در ارتفاعات شمال‌غرب و ارتفاعات زاگرس و کمترین اختلاف در نواحی ساحلی خزر و شرق کشور مشاهده می‌شود. در فصل تابستان بیشترین اختلاف دما در اکثر دوره‌ها و سناریوها در شمال‌غرب و نوار غربی کشور و کمترین اختلاف دما در جنوب‌شرق کشور در جاسک و چابهار نشان داده شده است. در فصل پاییز نیمه شرقی و بخصوص جنوب‌شرق کشور و دشت لوت بیشترین اختلاف دما را نشان می‌دهد. در حالی که کمترین اختلاف دما در سواحل غربی خزر در ارتفاعات تالش و سبلان و گاهی فقط در دامنه غربی زاگرس نمایانگر است. یافته‌های این پژوهش در خصوص توانایی بهتر مدل MPI-ESM-LR در پیش‌بینی فراسنج دما با نتایج مطالعات (Girma et al, 2022) در اتیوبی، (Yu et al, 2023) در چین، (Ge et al, 2021) در شرق آسیا همخوانی دارد. همچنین نتایج این پژوهش در خصوص افزایش دما در پهنه کل کشور ایران طی دوره‌های آتی با نتایج مطالعات (Fathian et al, 2022) و

- al. (2014). IPCC. White LL (eds) Climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Part a: global and sectoral aspects. Contribution of working group II to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge, 1581 PP.
- 16- 16. Gao, Q. J., Li, Y., & Han, T. X. (2021). Intra-seasonal features of an extreme high temperature event in 2011 in eastern China and its atmospheric circulation. *Trop. Meteorol*, 27, 437–446.
- 17- 17. Ge, F., Zhu, S. P., Luo, H. L., Zhi, X. F., & Wang, H. (2021). Future changes in precipitation extremes over Southeast Asia: insights from CMIP6 multi-model ensemble. *Environ. Res. Lett.*, 16, 1-11.
- 18- 18. Girma, R., Furst, C., & Moges, A. (2022). Performance evaluation of CORDEX-Africa regional climate models in simulating climate variables over Ethiopian main rift valley: Evidence from Gidabo river basin for impact modeling studies. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 99, 286-298.
- 19- 19. Hamed, M. M., Nashwan, M. S., & Shahid, S. (2022). Inconsistency in historical simulations and future projections of temperature and rainfall: A comparison of CMIP5 and CMIP6 models over Southeast Asia. *Atmospheric Research*, 265, 1-14.
- 20- 20. Hasheminasab, F. S., Rahimi, D., Zakerinejad, R. & Kropáček, J. (2022). Assessment of climate change impact on surface water: a case study—Karoun River Basin, Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(904), 1866-1875.
- 21- 21. Hassan, I., Kalin, R. M., White, C. J., & Aladejana, J. A. (2020). Selection of CMIP5 GCM Ensemble for the Projection of Spatio-Temporal Changes in Precipitation and Temperature over the Niger Delta, Nigeria. *Water*, 12(2), 1-33.
- 22- 22. Heydarzadeh, M., Nohagar, A., Malekian, A., & Khurani, A. (2018). Evaluation of the effects of future climate change on meteorological parameters of precipitation and temperature (case study: Bandar Abbas city). 6th Regional Conference on Climate Change, November, Tehran, 1-11.
- 23- 23. IPCC. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, 1535 pp.
- 24- 24. IPCC. (2021). *Summary for policymakers Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change
- 5- 5. Bano Medina, J., Manzanar, R., Cimadevilla, E., Fernández, J., González-Abad, J., Cofino, A. S. & Gutiérrez, J. M. (2022). Downscaling multi-model climate projection ensembles with deep learning (DeepESD): contribution to CORDEX EUR-44 Geosci. Model Dev, 15, 6747–6758.
- 6- 6. Carvalho, D., Cardoso Pereira, S., & Rocha, A. (2020). Future surface temperature changes for the Iberian Peninsula according to EUROCORDEX climate projections. *Clim. Dyn.*, 56(1–2), 123–138.
- 7- 7. Chen, J., Yang, Y., & Tang, J. (2022). Bias correction of surface air temperature and precipitation in CORDEX East Asia simulation: What should we do when applying bias correction? *Atmospheric Research*, 280, 1-16.
- 8- 8. Dadashi-Roudbari, A. (2020). Time-spatial verdaic analysis of vertical and horizontal patterns of fine dust and evaluation of its climate feedbacks in Iran. Ph.D. thesis in meteorology, Supervisor: Mahmoud Ahmadi, Tehran: Shahid Beheshti University, Faculty of Earth Sciences.
- 9- 9. Dai, c., Qin, X. S., Zhang, X. L., & Liu, B. J. (2022). Study of climate change impact on hydro-climatic extremes in the Hanjiang River basin, China, using CORDEX-EAS data. *Weather and Climate Extremes*, 38, 1-14.
- 10- 10. Demissie, T. A. (2023). Impact of climate change on hydrologic components using CORDEX Africa climate model in Gilgel Gibe 1 watershed Ethiopia. *Heliyon*, 9, 1-13.
- 11- 11. Dosio, A., & Fischer, E. M. (2018). Will half a degree make a difference? Robust projections of indices of mean and extreme climate in Europe under 1.5°C, 2°C, and 3°C global warming. *Geophysical Research Letters*, 45(2), 935–944.
- 12- 12. Ekstrom, M., Grose, M. R., & Whetton, P. H. (2015). An appraisal of downscaling methods used in climate change research *Wiley Interdiscip. Rev: Clim. Change*, 6, 301–319.
- 13- 13. Farzaneh, M., Arbabi Sabzevari, A., Daryabari, S. J., & Asadian, F. (2021). Perspectives on Climatic Conditions of the Next Decades in the Southeast of the Country. *Journal of Climate Research*, 46, 147-160.
- 14- 14. Fathian, F., Ghadami, M., & Dehgan, Z. (2022). Observed and projected changes in temperature and precipitation extremes based on CORDEX data over Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 149, 569-592.
- 15- 15. Field, C. B., Barros, V. R., Dokken, D. J., Mach K. J., Mastrandrea M. D., Bilir T. E, et

- 35- 35. Seker, M., & Gumus, V. (2022). Projection of temperature and precipitation in the Mediterranean region through multi-model ensemble from CMIP6. *Atmospheric Research*, 280, 1-15.
- 36- 36. Shahbazikia, S., gorbani dashtaki, S., Yarahmadi, J., Ostevary, Y., & mirzaei, S. (2023). Predicting changes in precipitation and temperature of Tabriz synoptic station during the period 2100-2020. *Journal of Climate Research*, 52, 125-142.
- 37- 37. Taghavinia, F., Zeinali, B., & Dadashi-Roudbari, A. (2023). Validation of temperature and precipitation variables of CMIP5 models in Iran under CORDEX-WAS and NEX-GDDP projects. *Physical Geography Research Quarterly*, 55(2), 111-132.
- 38- 38. Tan, G., Ayugi, B., Ngoma, H., & Ongoma, V. (2020). Projections of future meteorological drought events under representative concentration pathways (RCPs) of CMIP5 over Kenya, East Africa. *Atmos. Res*, 246, 1-13.
- 39- 39. Teichmann, C. et al. (2021). Assessing mean climate change signals in the global CORDEX-CORE ensemble. *Climate Dynamics*, 57, 1269-1292.
- 40- 40. Tran-Anh, q., Ngo-Duc, T., Espagne, E., & Trinh-Tuan, L. (2023). A 10-km CMIP6 downscaled dataset of temperature and precipitation for historical and future Vietnam climate. *Scientific Data*, 10(257), 1-12.
- 41- 41. Ukkola, A. M., De Kauwe, M. G., Roderick, M. L., Abramowitz, G., & Pitman, A. J. (2020). Robust future changes in meteorological drought in CMIP6 projections despite uncertainty in precipitation. *Geophys. Res. Lett*, 47, 1-9.
- 42- 42. Vautard R et al. (2021). Evaluation of the large EURO-CORDEX regional climate model ensemble. *Geophys. Res*, 126, 1-28.
- 43- 43. Wang, Z. Q., Luo, H. L. & Yang, S. (2023). Different mechanisms for the extremely hot central-eastern China in July–August 2022 from a Eurasian large-scale circulation perspective. *Environ. Res. Lett*, 18, 1-10.
- 44- 44. Yang, X., Wood, E. F., Sheffield, 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*, 19(3), 609-623.
- 45- 45. Yu, E., Liu, D., Yang, J., Sun, J., Yu, L., King, M. P. (2023). Future climate change for major agricultural zones in China as projected by CORDEX-EA-II, CMIP5 and ed V Masson-Delmotte (Cambridge: Cambridge University Press) pp 3–32.
- 25- 25. Jahangir, M. H., & Gharadaghi, L. (2022). Assessing the Performance of SDSM Models in Downscaling Annual Precipitation and Temperature Values Simulated Via CANESM2 Model: A Case Study of East Azerbaijan Province. *Desert Ecosystem Engineering*, 10(32), 45-60.
- 26- 26. Kaseri, M., Goudarzi, M., Janbazghobadi, G., & Motevalli, S. (2021). Projection of Precipitation Changes in Southern Coast of Caspian Sea at the End of 21st Century using Different RCPs. *Geographical Planning of Space*, 11(40), 103-118.
- 27- 27. Lee et al. (2023). Uncertainty analysis of future summer monsoon duration and area over East Asia using a multi-GCM/multi-RCM ensemble. *Environ. Res. Lett*, 18, 1-11.
- 28- 28. Miri, M., Masoompour Samakosh, J., Raziei, T., Jalilian, A., & Mahmodi, M. (2021). Spatial and Temporal Variability of Temperature in Iran for the Twenty-First Century Foreseen by the CMIP5 GCM Models. *Pure and Applied Geophysics*, 178, 169-184.
- 29- 29. Pathak, R., Sahany, S., Mishra, S. K., & Dash, S.K. (2019). Precipitation biases in CMIP5 models over the South Asian Region. *Scientific Reports*, 9(1), 1-13.
- 30- 30. Polong, F., Chen, H., Sun, S., & Ongoma V. (2019). Temporal and spatial evolution of the standard precipitation evapotranspiration index (SPEI) in the Tana River basin, Kenya. *Theor. Appl. Climatol*, 138 (1-2), 777-792.
- 31- 31. Raftery, A. E., Zimmer, A., Frierson, D. M. W., Startz, R., & Liu, P. (2017). Less than 2 °C warming by 2100 unlikely. *Nature Climate Change*, 7(9), 637–641.
- 32- 32. Rahimi, J., Laux, P., & Khalili, A. (2020). Assessment of climate change over Iran: CMIP5 results and their presentation in terms of Koppen–Geiger climate zones. *Theor Appl Climatol*, 141, 183–199.
- 33- 33. Rashidi Ghane, M., Motevalli, S., janbaz Ghobadi, G. R., & Kouhi, M. (2023). Evaluation of the ability of three statistical methods to downscale the output of temperature and precipitation of CMIP6 models in the Kashfrud basin. *Journal of Climate Research*, 53, 117-132.
- 34- 34. Salah, M., Moursy, F., Soliman, E., & GAMAL, G. (2023). Assessing the potential impacts of climate change on droughts in East Africa using CORDEX-CORE regional climate models simulations: A focus on Tanzania. *Contributions to Geophysics and Geodesy*, 53 (3), 271-300.

- 51- Yan, J. W. (2021). Rapid rises in the magnitude and risk of extreme regional heat wave events in China. *Weather and Climate Extremes*, 34, 100379.
- 52- Yan, Y. et. al. (2017), Characterizing spatial-temporal changes of heat waves in China using center of gravity analysis, *Physical Geography*, 38, 4, 379-391.
- 53- Yazdanpanah, H., & Alizadeh, T. (2011). estimating the probability of different duration heat waves occurrence in kerman, province using markov chain. *Geographical research*, 26(3 (102)), 51-71. SID. <https://sid.ir/paper/29715/en>.
- CMIP6 ensembles. *Atmospheric Research*, 288, 156-169.
- 46- zarrin, A., & Dadashi-Roudbari, A. (2021). Projected changes in temperature over Iran by 2040 based on CMIP6 multi-model ensemble. *Physical Geography Research Quarterly*, 53(1), 75-90.
- 47- Zarrin, A., & Dadashi-Roudbari, A. (2023). Investigating the Impacts of Climate Change on Water Security in Iran. *Journal of Water and Sustainable Development*, 10(1), 37-44.
- 48- Zhai, P. M, Zhou, B. Q. & Chen, Y. (2018). A review of climate change attribution studies. *Meteorol. Res*, 32, 671–692.
- 49- Zhang, G. W., Zeng, G., Yang, X. Y. & Jiang, Z. H. (2020). Future changes in extreme high temperature over China at 1.5°C–5°C global warming based on CMIP6 simulations *Adv. Atmos. Sci*, 38, 253–267.
- 50- Zhu, H. H., Jiang, Z. H., Li, J., Li, W., Sun, C. X. & Li, L. (2020). Does CMIP6 inspire more confidence in simulating climate extremes over China. *Adv. Atmos. Sci*, 37, 1119–1132.