

## بررسی مدل‌های CMIP6 در برآورد دمای ایران با تأکید بر حساسیت اقلیم ترازمند (ECS) و پاسخ اقلیم گذرا (TCR)

آذر زرین<sup>۱\*</sup> و عباسعلی داداشی رودباری<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشیار اقلیم شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران  
<sup>۲</sup> پژوهشگر پساکتری اقلیم شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

(دریافت: ۱۴۰۱/۰۳/۰۹، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۰۹)

### چکیده

این پژوهش با هدف بررسی کارایی مدل‌های اقلیمی در برآورد دمای ایران انجام شده است. برای این منظور، با در نظر گرفتن حساسیت اقلیم ترازمند (ECS) و پاسخ اقلیم گذرا (TCR) تعداد سی مدل از مدل‌های فاز ششم پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده (CMIP6) گزینش و با تمرکز بر پراکنش فضایی داده‌ها و روند سالانه دما ارزیابی و درستی این مدل‌ها با داده‌های پنجاه و یک ایستگاه هواشناسی همدید برای دوره تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۸۰) با استفاده از دو روش نمودار تیلور و نمودار جبهه‌ای بررسی شد. نتایج نشان داد بیشتر مدل‌های CMIP6 در بازتولید پراکنش فضایی دما کارایی مناسبی دارند؛ با این حال در متوسط پهنه‌ای کشور، ۷۳ درصد از مدل‌های مورد بررسی دمای کشور را کمتر از داده‌های ایستگاهی برآورد کرده‌اند. به‌طور کلی بیش از ۵۶ درصد از مدل‌های مورد بررسی، همبستگی بیشتر از ۰/۵ را در مقایسه با داده‌های ایستگاهی در متوسط پهنه‌ای دمای ایران نشان دادند. چهار مدل CanESM5، INM-CM5-0، TaiESM1 و UKESM1-0-LL بیشترین کارایی را در برآورد دمای ایران داشتند. روند سالانه دما در متوسط پهنه‌ای کشور که با آزمون من-کندال تصحیح‌شده بررسی شد، نشان داد روند دمای مدل‌های CMIP6 همگام با داده‌های مشاهداتی برای تمامی مدل‌ها افزایشی است. بیشتر مدل‌های CMIP6 در دوره تاریخی آهنگ گرمایش بیشتری را شبیه‌سازی کرده‌اند که با داده‌های ایستگاهی تفاوت دارد. این تفاوت‌ها را نمی‌توان با وردایی درونی اقلیم (ICV) توضیح داد. مدل‌هایی با حساسیت اقلیم ترازمند بیشتر، آهنگ بیشتری از گرمایش را ایجاد کرده‌اند؛ برای نمونه مدل‌هایی همانند CanESM5 و UKESM1-0-LL که بیشینه روند را نشان داده‌اند، بیشترین ECS و TCR را در بین مدل‌ها داشته‌اند.

**واژه‌های کلیدی:** دما، مدل‌های CMIP6، حساسیت اقلیم ترازمند، پاسخ اقلیم گذرا، وردایی درونی اقلیم

## ۱ مقدمه

گرمایش جهانی واقعی‌تری انکارناپذیر است که در دهه‌های اخیر توجه گسترده مردم، دولت‌ها و جوامع دانشگاهی را به خود جلب کرده است (گو و همکاران، ۲۰۲۱). گرمایش جهانی پیامدهای چشمگیری در زندگی انسان داشته است، به گونه‌ای که تولیدات کشاورزی (لی و همکاران، ۲۰۲۱)، بوم‌سازگان‌های (اکوسیستم) طبیعی (ژنگ و همکاران، ۲۰۲۱) و منابع آب (مارتینز و همکاران، ۲۰۲۲) را به شکل درخور توجهی تحت تأثیر قرار داده است. فعالیت‌های انسانی از آغاز انقلاب صنعتی در قرن نوزدهم، غلظت دی‌اکسید کربن ( $CO_2$ ) را در جو تا حدود ۵۰ درصد افزایش داده است. افزایش میانگین دمای جهانی آشکارترین پیامد افزایش  $CO_2$  در سطح جهان است (آی‌پی‌سی‌سی، ۲۰۱۳). هیات بین‌دولتی تغییر اقلیم (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) در ششمین گزارش ارزیابی (AR6) خود افزایش میانگین دمای جهانی مشاهده‌شده در دهه ۲۰۱۰ را نسبت به آغاز انقلاب صنعتی (۱۹۰۰-۱۸۵۰)، ۱/۰۹ درجه سلسیوس برآورد کرده است (آی‌پی‌سی‌سی، ۲۰۲۱).

سامانه اقلیم زمین با تغییر دما به پربیشدگی (perturbation) در توازن تابشی در بالای جو (top of atmosphere) پاسخ می‌دهد. هر نوع نبود توازن، یک واداشت تابشی در سامانه اقلیم به‌شمار می‌رود. بزرگی پاسخ سامانه اقلیم با شدت واداشت و بازخورد تابش خالص تعیین می‌شود (هوسکو و همکاران، ۲۰۲۱). تغییر اقلیمی که از دهه ۱۹۷۰ میلادی به دنبال گرمایش جهانی اتفاق افتاده است، ناشی از افزایش غلظت دی‌اکسید کربن در جو است. تغییر دمای متوسط جهانی ناشی از یک واداشت معین را حساسیت اقلیم (climate sensitivity) می‌گویند. حساسیت اقلیم اهمیتی محوری در پیش‌نگری اقلیم آینده دارد و تعیین و محاسبه آن با چالش‌های

بسیاری همراه است. حساسیت اقلیم به مقیاس زمانی، عامل واداشت و حالت سامانه اقلیم بستگی دارد که سبب می‌شود بررسی آن مشکلات زیادی داشته باشد (کالینز و همکاران، ۲۰۱۳ و روگنشتاین و همکاران، ۲۰۲۰).

معیارهای حساسیت اقلیم، حساسیت اقلیم ترازمند (Equilibrium Climate Sensitivity, ECS) و پاسخ اقلیم گذرا (Transient Climate Response, TCR) هستند. حساسیت اقلیم ترازمند (ECS) حالتی پایدار از سامانه اقلیم در زمان دو برابر شدن گاز دی‌اکسید کربن است که آن را می‌توان برآوردی از گرمایش جهانی فرض کرد. حساسیت اقلیم ترازمند یکی از مهم‌ترین معیارها برای پیش‌نگری اقلیم آینده و طراحی سیاست‌های کاهش اثر و برنامه‌های سازگاری با تغییر اقلیم است. پژوهش‌های بسیاری از دهه ۱۹۶۰ میلادی با استفاده از مدل‌های اقلیمی سعی کرده‌اند با روش‌های علمی به بررسی و محاسبه حساسیت اقلیم ترازمند بپردازند. علی‌رغم این تلاش‌ها، مقدار حساسیت اقلیم ترازمند در نظر گرفته‌شده در مدل‌های اقلیمی مرحله پنجم پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده (CMIP5) بسیار متغیر است و دامنه وسیعی بین ۱/۲ تا ۴/۷ درجه سلسیوس را در بر گرفته است (فلاتو و همکاران، ۲۰۱۴). در مدل‌های CMIP6، حساسیت اقلیم ترازمند بین ۲/۷ تا ۵/۷ درجه سلسیوس متغیر است و بیش از شانزده مدل مقادیری بزرگ‌تر از ۴/۷ درجه سلسیوس دارند (زلینکا و همکاران، ۲۰۲۰). تعیین میزان واقعی بودن برآوردهای مبتنی بر حساسیت زیاد اقلیم ترازمند، برای درک تأثیر تغییر اقلیم آینده بر سامانه‌های انسانی و طبیعی بسیار مهم است (ژو و همکاران، ۲۰۲۱).

منظور از پاسخ اقلیم گذرا (TCR)، میانگین گرمایش جهانی پیش‌نگری‌شده در حوالی زمان دو برابر شدن  $CO_2$  است؛ به این معنا که TCR غلظت  $CO_2$  جو را در شرایط افزایش یک درصدی  $CO_2$  در سال در نظرمی‌گیرد

پیشن‌نگری آن ارائه دهد. مدل‌های کنونی که با عنوان پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده فاز ششم (CMIP6) در دسترس هستند، می‌توانند الگوهای اقلیمی در مقیاس کلان را مانند متغیرهای اصلی اقلیم (دما و بارش) بازتولید کنند (فلاتو و همکاران، ۲۰۱۴). با این حال مدل‌ها به دلیل درک محدود ما از سامانه اقلیم زمین، مشکلات ناشی از رفتار غیرخطی برای نمایش سامانه‌های پیچیده زمین و استفاده از پارامترهای ناکافی برای شبیه‌سازی فرایندهای فیزیکی ناقص هستند (ژانگ و همکاران، ۲۰۲۲) و لازم است قبل از به‌کارگیری برون‌داد مدل‌های اقلیمی در مطالعات علمی، کارایی آن‌ها از نظر معیارهای حساسیت اقلیم بررسی شود.

در حال حاضر، مطالعات متعددی درباره وردایی تاریخی و پیش‌نگری آینده اقلیم با مدل‌های CMIP6 انجام شده است. این مطالعات مدل‌های اقلیمی را به جهت حساسیت اقلیم (میهل و همکاران، ۲۰۲۰؛ نیسه و همکاران، ۲۰۲۰؛ توکارسکا و همکاران، ۲۰۲۰ و هوسکو و همکاران، ۲۰۲۱)، عدم قطعیت (لنر و همکاران، ۲۰۲۰ و بیوباید-آرسواگا و همکاران، ۲۰۲۱) و درستی (گراس و همکاران، ۲۰۲۰؛ شیرو و چانگ، ۲۰۲۱؛ لی و همکاران، ۲۰۲۱؛ کوی و همکاران، ۲۰۲۱ و باتاچاریا و همکاران، ۲۰۲۲) بررسی و کارایی آن‌ها را تأیید کرده‌اند. برای نمونه فان و همکاران (۲۰۲۰) وردایی تاریخی و تغییرات آینده دما در مقیاس جهانی را بر اساس GCM های CMIP6 بررسی کرده و نشان داده‌اند بیشتر این مدل‌ها کارایی مناسبی برای برآورد دما دارند. آیوگی و همکاران (۲۰۲۱) کارایی مدل‌های CMIP6 را در برآورد میانگین دما در آفریقای شرقی بررسی کردند و دریافتند که مدل‌های CMIP6 تغییرات زمانی-مکانی دما را در مقایسه با داده‌های مشاهداتی به‌خوبی برآورد می‌کنند. به همین ترتیب، یانگ و همکاران (۲۰۲۱) مدل‌های CMIP6 را برای برآورد دما و بارش در چین بررسی کردند و دریافتند

(هوسکو و همکاران، ۲۰۲۱). در واقع پاسخ اقلیم گذرا بیشتر با شیوه تغییر غلظت CO<sub>2</sub> در گذشته مطابقت دارد. این معیار با حساسیت اقلیم ترازمند متفاوت است؛ زیرا مدت زمانی طول می‌کشد تا توزیع گرما بین جو و اقیانوس‌ها به ترازمندی برسد.

برآورد حساسیت اقلیم در مدل‌های جفت‌شده متفاوت است؛ برای مثال مرحله فعلی مدل‌های CMIP6 (CMIP6) حساسیت بیشتری نسبت به مرحله قبلی دارد. در مرحله فعلی (CMIP6) و همچنین مرحله قبلی (CMIP5)، ECS، TCR و با یکدیگر همبستگی مثبت دارند. به‌طوری‌که یک مدل با حساسیت زیاد در مقیاس زمانی کوتاه (TCR زیاد) اغلب در مقیاس زمانی طولانی (ECS زیاد) حساسیت زیادی دارد (میهل و همکاران، ۲۰۲۰). بررسی دقیق دما و تغییرات آن با استفاده از برون‌داد تعداد زیادی از مدل‌ها ضمن شناخت صحیح عدم قطعیت مدل‌ها می‌تواند نقش مؤثری در گزینش بهترین مدل‌ها (Best models) برای تولید مدل همادی (Ensemble) و همچنین تعیین حساسیت هر مدل در اقلیم‌های مختلف داشته باشد.

مدل‌های گردش کلی (General Circulation Model, GCM) به‌طور گسترده‌ای برای شبیه‌سازی اقلیم گذشته، حال و آینده استفاده می‌شوند. این مدل‌ها که بر اساس قوانین بنیادی فیزیک، دینامیک شاره‌ها، شیمی و غیره ساخته شده‌اند، امروزه به ابزاری مهم و حیاتی برای پیش‌نگری تغییرات آتی در اقلیم تبدیل شده‌اند. اطمینان‌پذیری این مدل‌ها به کارایی آن‌ها در بازتولید ویژگی‌های اقلیم در دوره تاریخی بستگی دارد. برای این منظور، برنامه تحقیقات جهانی اقلیم (World Climate Research Program, WCRP) از دهه ۱۹۹۰ مجموعه‌ای از آزمایش‌ها، معروف به پروژه مقایسه مدل‌های جفت-شده (Coupled Model Intercomparison Project, CMIP) را معرفی کرده که شبیه‌سازی‌های سامانمند و با دقت زیاد را برای درک بهتر تغییرات گذشته اقلیم و

از مدل‌ها، هنوز پژوهش مستقلی ارائه نشده است که به بررسی جامع مدل‌های اقلیمی در دوره تاریخی بپردازد. البته دوره تاریخی از نظر حساسیت اقلیم مدل‌ها و نقش آن در برون‌داد متغیرهای اصلی اقلیم نیز بررسی نشده است. پژوهش حاضر با هدف بررسی کارایی سی مدل CMIP6 در دوره تاریخی با در نظر گرفتن حساسیت اقلیم ترازمند (ECS) و پاسخ اقلیم گذرا (TCR) برای متغیر دما انجام شده است. نتایج این مطالعه می‌تواند کمک شایان توجهی به انتخاب صحیح مدل‌های اقلیمی و گزینش مدل‌های کارا برای تولید مدل همادی کند.

## ۲ روش تحقیق و داده‌ها

### ۲-۱ داده‌های مشاهداتی (ایستگاه‌های هواشناسی همدید)

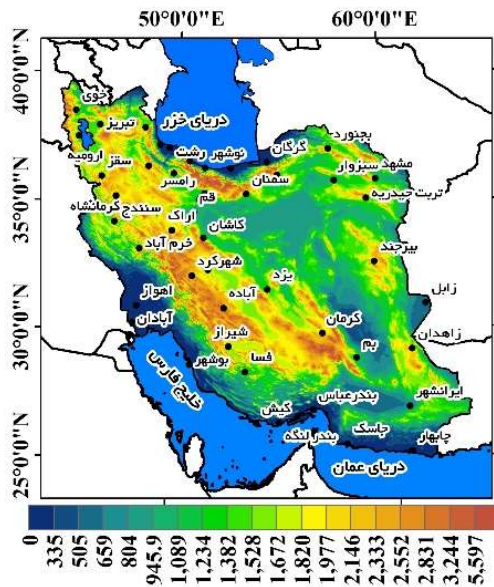
در این پژوهش برای درستی‌سنجی مدل‌های CMIP6 و بررسی روند دما، از دمای پنجاه و یک ایستگاه هواشناسی همدید در دوره آماری ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۴ استفاده شده است (شکل ۱-الف). برای انتخاب این ایستگاه‌ها افزون بر پراکنش مناسب ایستگاه‌ها، کامل بودن سری زمانی آن‌ها نیز بررسی شد و ایستگاه‌هایی که داده گمشده آن‌ها از کل سری زمانی ایستگاه بیش از ۱۰ درصد بود، کنار گذاشته شدند (زولینا و همکاران، ۲۰۰۵). پس از گزینش ایستگاه‌ها و کنترل کیفی متغیر دمای میانگین آن‌ها، متوسط دمای این پنجاه و یک ایستگاه به‌عنوان نماینده پهنه‌ای دمای ایران محاسبه و برای مقایسه برون‌داد دمای مدل‌های مورد بررسی استفاده شد.

میانگین دمای سالانه برای دوره تاریخی (۱۹۸۰-۲۰۱۴) با داده‌های پنجاه و یک ایستگاه هواشناسی همدید در شکل ۱-ب ارائه شده است. بر اساس داده‌های ایستگاهی، پراکنش دما در ایران منطبق بر ارتفاعات است. دما از شمال به جنوب در ایران روند افزایشی دارد و ارتفاع و عرض جغرافیایی، نقش تعیین‌کننده‌ای در تعدیل

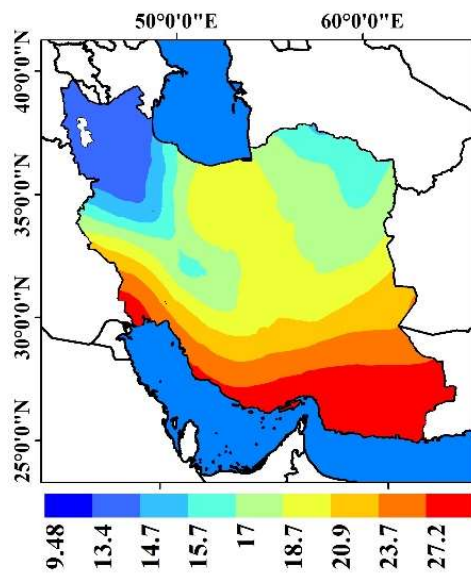
که مدل‌های CMIP6 در بازتولید توزیع فضایی دما و بارش به‌خوبی عمل می‌کنند و دما برآورد بهتری را از بارش نشان می‌دهد.

در ایران نیز پژوهشگران بسیاری مدل‌های CMIP6 را بررسی کرده‌اند. بررسی مطالعات انجام‌شده در ایران نشان می‌دهد این مطالعات را می‌توان در سه دسته درستی‌سنجی مدل‌های CMIP6 (زرین و داداشی رودباری، ۱۳۹۹؛ زرین و همکاران، ۱۴۰۰ و یزدان دوست و همکاران، ۲۰۲۱)، تغییرات زمانی-مکانی متغیرهای اصلی همچون بارش و دما (زرین و داداشی رودباری، ۱۴۰۰ الف، ب) و پیش‌نگری فرین‌های اقلیمی (زرین و داداشی رودباری، ۲۰۲۱ و زرین و همکاران، ۲۰۲۱) تقسیم‌بندی کرد. مطالعاتی که مدل‌های CMIP6 را با دو رویکرد تصحیح‌اریبی و تولید مدل همادی بررسی کرده‌اند نشان می‌دهند مدل‌های CMIP6 کارایی درخور توجهی در برآورد متغیرهای اقلیمی دما و بارش دارند. همچنین نتایج این مطالعات نشان می‌دهد دما در ایران طی دهه‌های آتی روند افزایشی خواهد داشت و این افزایش در مناطق شمال غرب و غرب بیش از سایر مناطق کشور است.

پیش از ارائه پیش‌نگری‌های اقلیمی برای دهه‌های آینده، بررسی کارایی مدل‌های مورد استفاده (CMIP6) با توجه به داده‌های مشاهداتی در مقیاس‌های منطقه‌ای در تمامی این مطالعات ضروری است، اما با وجود این، هنوز ارزیابی جامعی از برآورد مدل‌های CMIP6 در دوره تاریخی برای ایران انجام نشده است و محدود مطالعاتی که در سال‌های قبل انجام شده‌اند (زرین و داداشی رودباری، ۱۳۹۹؛ زرین و همکاران، ۱۴۰۰ و یزدان دوست و همکاران، ۲۰۲۱) تنها دوره تاریخی را با به‌کارگیری تعداد محدودی از مدل‌ها به‌منظور درستی‌سنجی مدل‌های CMIP6 بررسی کرده‌اند. مطالعات اخیر توانسته‌اند به درک بهتری از شرایط اقلیم ایران در دهه‌های آتی کمک کنند، اما با در دسترس قرار گرفتن طیف درخور توجهی



(الف)



(ب)

شکل ۱. (الف) موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی همدید بررسی شده (ب) میانگین دمای سالانه بر اساس داده‌های پنجاه و یک ایستگاه هواشناسی همدید طی دوره ۲۰۱۴-۱۹۸۰.

دمای کشور دارند. پیشینه دمای ایران ۲۷ درجه سلسیوس و کمینه آن ۹/۴۸ درجه سلسیوس است. میانگین دمای پهنه‌ای کشور بر اساس داده‌های ایستگاهی ۱۷/۸۰ درجه سلسیوس و نمره Z آزمون MM-K برای دمای سالانه ایران ۳/۸۹ محاسبه شده است که نشان‌دهنده روند افزایشی معنی‌دار در سطح ۰/۰۱ است. شیب روند میانگین دما نیز ۰/۳۷ به ازای هر دهه محاسبه شد.

## ۲-۲ پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده فاز ششم (CMIP6)

پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده (CMIP) با هماهنگی بین مراکز مختلف برای استانداردسازی GCM ها به‌عنوان یک داده مبنا در مطالعات مربوط به تغییر اقلیم در سطح جهانی توسعه داده شده است. برای پاسخگویی به نیازهای علمی و برنامه‌ریزی برای جامعه در حال رشد و غلبه بر اشکالات موجود در مرحله پنجم (CMIP5)، مرحله جدید پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده در قالب مرحله ششم (CMIP6) معرفی شده است (زرین و داداشی رودباری، ۲۰۲۱). مدل‌های مرحله ششم (CMIP6) نسبت به مرحله پیشین (CMIP5)، ضمن بهبود سازوکار فرایندهای فیزیکی و همرفت، طرح‌واره‌های جدیدی را نیز در بخش‌های اقیانوس، بیوژئوشیمی اقیانوس و یخ-دریا اضافه کرده‌اند (آیرینگ و دیگران، ۲۰۱۶). در این پژوهش مجموعه‌ای از سی مدل CMIP6 برای دوره تاریخی (۱۹۸۰-۲۰۱۴) با در نظر گرفتن حساسیت اقلیم ترازمند (ECS) و پاسخ اقلیم گذرا (TCR) (میهل و همکاران، ۲۰۲۰) برای بررسی کارایی مدل‌ها استفاده شده است (جدول ۱). مقادیر ECS و TCR مدل‌های CMIP6 در میهل و همکاران (۲۰۲۰) آمده است که به دلیل کاهش حجم مقاله در اینجا ارائه نشده‌اند.

جدول ۱. مشخصات مدل‌های CMIP6 مورد استفاده در پژوهش (ردیف مدل‌ها بر اساس شماره موجود در شکل ۵ ارائه شده است).

ردیف	نام مدل	کشور سازنده	تفکیک افقی (km)	ردیف	نام مدل	کشور سازنده	تفکیک افقی (km)
۱	ACCESS-CM2	استرالیا	۲۵۰	۱۶	FGOALS-f3-L	چین	۱۰۰
۲	ACCESS-ESM1-5			۱۷	HadGEM3-GC31-LL	بریتانیا	۲۵۰
۳	BCC-CSM2-MR			۱۸	INM-CM5-0	روسیه	۱۰۰
۴	BCC-ESM1	چین	۲۵۰	۱۹	IPSL-CM5A2-INCA	فرانسه	۵۰۰
۵	CAMS-CSM1-0			۲۰	IPSL-CM6A-LR		۲۵۰
۶	CanESM5	کانادا	۵۰۰	۲۱	KACE-1-0-G	کره جنوبی	۲۵۰
۷	CanESM5-CanOE			۲۲	KIOST-ESM		
۸	CESM2	آمریکا	۱۰۰	۲۳	MCM-UA-1-0	آمریکا	۲۵۰
۹	CIESM			۲۴	MIROC6		۲۵۰
۱۰	CMCC-CM2-HR4			۲۵	MIROC-ES2L	ژاپن	۵۰۰
۱۱	CMCC-CM2-SR5	ایتالیا	۱۰۰	۲۶	MRI-ESM2-0		۱۰۰
۱۲	CMCC-ESM2			۲۷	NESM3	چین	۲۵۰
۱۳	CNRM-CM6-1			۲۸	NorCPM1	نروژ	۲۵۰
۱۴	CNRM-CM6-1-HR	فرانسه	۵۰	۲۹	TaiESM1	تایوان	۱۰۰
۱۵	CNRM-ESM2-1			۳۰	UKESM1-0-LL	بریتانیا	۲۵۰

## ۳-۲ محاسبه روند و شیب روند متوسط پهنه‌ای دمای کشور

از آنجایی که متغیرهای اقلیمی رفتاری غیرخطی دارند و از توزیع نرمال پیروی نمی‌کنند، یکی از بهترین روش‌های موجود برای سنجش تغییرات آنها در سری زمانی، آزمون‌های ناپارامتریک است. از بین روش‌های موجود، آزمون ناپارامتریک من-کندال (M-K) یکی از بهترین و پرکاربردترین روش‌های موجود است. فرض اصلی در بیشتر آزمون‌های مرتبط با تحلیل روند از جمله M-K، استفاده از داده‌های مستقل و تصادفی است؛ با وجود این مشخص است که در شرایط واقعی برخی از سری‌های زمانی خود همبستگی دارند (حامد و راثو، ۱۹۹۸). طبیعی است که خودهمبستگی بر پراش آزمون M-K تأثیر

بگذارد (حامد، ۲۰۰۸)؛ لذا به منظور حذف اثر خودهمبستگی در سری زمانی داده‌ها در این پژوهش از روش من-کندال تصحیح شده Modified Mann-Kendall Test (MM-K) یو و ونگ (۲۰۰۴) استفاده شد. در آزمون MM-K اگر نمره Z مثبت باشد، نشان‌دهنده روند افزایشی و اگر منفی باشد، بیانگر روند کاهشی است. معنی‌داری روند نیز در سطوح ۰/۱، ۰/۰۵ و ۰/۰۱ آزمایش شده است. جهت برآورد شیب واقعی روند در سری زمانی، از روش ناپارامتریک سنس استفاده شد. این روش که یکی از روش‌های بهینه برای بررسی تغییرات خطی متغیر مربوطه است، بر ارزیابی تفاوت بین مشاهدات سری زمانی استوار است (طبری و معروفی، ۲۰۱۱). برای کاهش حجم مقاله روابط ارائه نشده است.

## ۳ نتایج و بحث

## ۳-۱ کارایی مدل‌های CMIP6 در برآورد دمای متوسط پهنه‌ای ایران

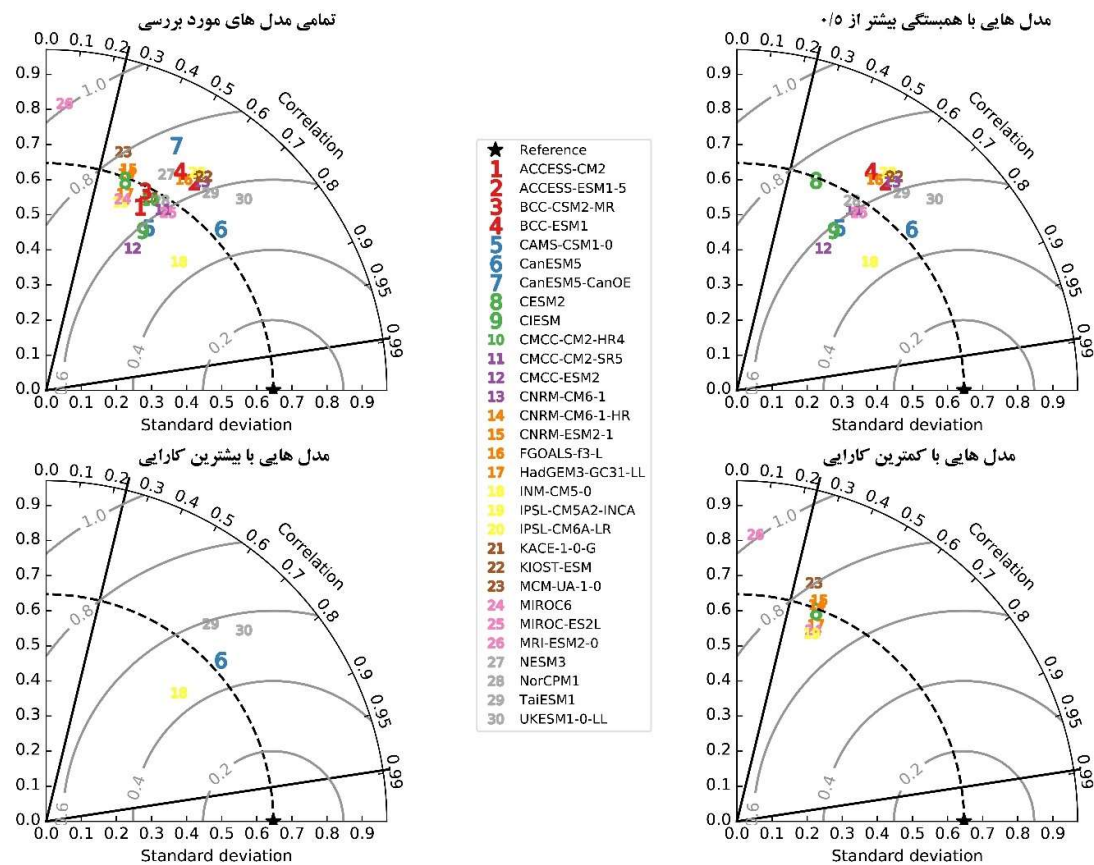
برای درستی سنجی مدل‌های اقلیمی از نمودار تیلور (شکل ۲) و برای بررسی عدم قطعیت آن‌ها از نمودار جعبه‌ای (شکل ۳) استفاده شده است. با توجه به تعداد زیاد مدل‌های اقلیمی برای سهولت در مقایسه مدل‌ها، نمودار تیلور در چهار بخش شامل تمامی مدل‌های مورد بررسی، مدل‌هایی با همبستگی بیش از ۰/۵، مدل‌هایی با بیشترین کارایی (همبستگی بیشتر از ۰/۶) و مدل‌هایی با کمترین کارایی (همبستگی کمتر از ۰/۵) ارائه و سری زمانی بلندمدت سالانه دمای میانگین سی مدل در برابر داده‌های ایستگاهی بررسی شده است.

بر اساس نتایج، ۵۶/۶۶ درصد از مدل‌ها که هفده مدل را شامل می‌شود، همبستگی بیشتر از ۰/۵ در متوسط پهنه‌ای ایران با داده‌های ایستگاهی نشان دادند. از بین سی مدل مورد بررسی، چهار مدل CanESM5، INM-CM5-0، TaiESM1 و UKESM1-0-LL بیشترین کارایی و مدل‌های CESM2، CNRM-CM6-1-HR، CNRM، ESM2-1، HadGEM3-GC31-LL، IPSL-CM5A2، MRI-ESM2-0، INCA، MIROC6 و MCM-UA-1-0، کمترین کارایی را نشان داده‌اند (شکل ۲). این نتیجه بیانگر اهمیت استفاده از مدل‌های بیشتر و اکتفا نکردن به تفکیک افقی مدل‌ها برای گزینش آن‌ها و همچنین در نظر گرفتن مقیاس زمانی مورد بررسی است. برای مثال در پژوهش زرین و داداشی رودباری (۱۳۹۹)، با مقایسه سه مدل BCC-CSM2-MR، CAMS-CSM1-0 و MRI-ESM2-0 از مجموعه مدل‌های در دسترس با تفکیک افقی ۱۰۰ کیلومتر، مدل MRI-ESM2-0 در مقیاس زمانی ماهانه پس از تصحیح اریبی به روش تغییر عامل دلنا (DCF) بیشترین کارایی را داشته است. این نتیجه بیانگر آن است که مدل MRI-ESM2-0 در مقایسه با دو مدل

دیگر بیشترین کارایی را داشته در حالی که در بین سی مدل بررسی شده در این پژوهش در حالت برونداد مستقیم مدل (DMO)، کارایی ضعیفی را نشان داده است.

میانگین سالانه متوسط پهنه‌ای دمای ایران برای کاراترین مدل‌های مورد بررسی از ۱۶/۸۰ درجه سلسیوس در مدل UKESM1-0-LL تا ۱۸/۴۹ درجه سلسیوس در مدل TaiESM1 در تغییر است. با وجود این در مقایسه با دمای متوسط پهنه‌ای کشور بر اساس داده‌های ایستگاهی، کاراترین مدل‌های CMIP6 بررسی شده همانند مدل UKESM1-0-LL با یک درجه سلسیوس کم‌برآوردی و مدل TaiESM1 با ۰/۶۹ درجه سلسیوس بیش‌برآوردی، کماکان اریبی دارند.

خطاها و عدم قطعیت مدل‌های اقلیمی در برآورد دما در ایران، می‌تواند در نتیجه عوامل بسیاری همچون کمبود داده‌های مشاهداتی به‌عنوان ورودی مدل‌ها، پارامترسازی ضعیف مدل‌ها یا تفکیک افقی آن‌ها باشد. کارایی ضعیف مدل‌های CMIP6 در برخی از مدل‌ها همچون MCM-UA-1-0، MRI-ESM2-0 و IPSL-CM5A2-INCA و برخی دیگر از مدل‌ها که در نمودار تیلور ارائه شده‌اند (شکل ۲)، نشان می‌دهد عدم قطعیت زیاد یک مدل می‌تواند ناشی از مؤلفه‌های بسیاری باشد. همان‌طور که در جدول ۱ نیز نشان داده شده است، تفکیک افقی این سه مدل به ترتیب ۲۵۰، ۱۰۰ و ۵۰۰ کیلومتر است. بر این اساس، تفکیک افقی کمتر یک مدل نمی‌تواند به‌تنهایی سبب عدم قطعیت بالای آن مدل شود. برای مثال دو مدل MIROC6 و UKESM1-0-LL هر دو تفکیک افقی ۲۵۰ کیلومتری دارند، اما همان‌طور که در نمودار جعبه‌ای (شکل ۳) و نمودار تیلور (شکل ۲) نشان داده شده است، کارایی مدل UKESM1-0-LL برای برآورد دما در دوره تاریخی حدود دو برابر مدل MIROC6 است. لذا روشن است که در انتخاب مدل‌ها و به‌خصوص مدل‌های CMIP6 تفکیک افقی به‌تنهایی نمی‌تواند معیار مناسبی



شکل ۲. نمودار تیلور متوسط پهنه‌ای دمای ایران (۲۰۱۴-۱۹۸۰) برای مدل‌های CMIP6 مورد بررسی.

### ۲-۳ پراکنش فضایی و روند دمای سالانه در ایران

برای بررسی دقیق‌تر کارایی مدل‌های CMIP6 طی دوره تاریخی، میانگین، روند و شیب روند پهنه‌ای دما در ایران بررسی شد (جدول ۲). در این تحقیق برونداد مستقیم مدل‌ها (DMO) بررسی شده است؛ زیرا مقیاس گاهی و تصحیح اریبی، وردایی درونی اقلیم (ICV) را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. تفسیر برونداد مستقیم مدل‌ها در بسیاری از موارد از جمله کارایی مدل در مناطق مختلف جغرافیایی، از اهمیت زیادی برخوردار است (زرین و

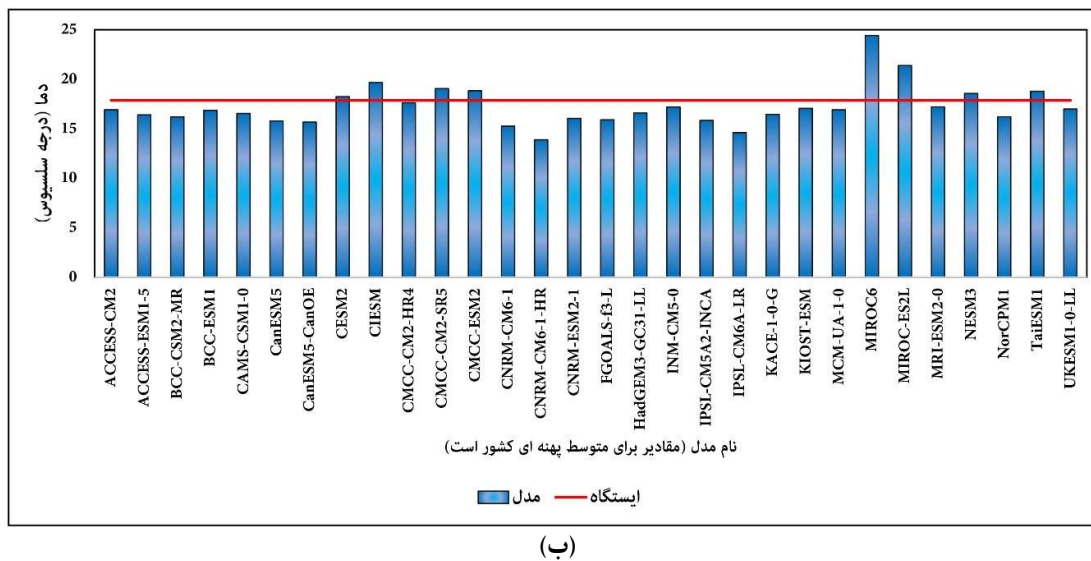
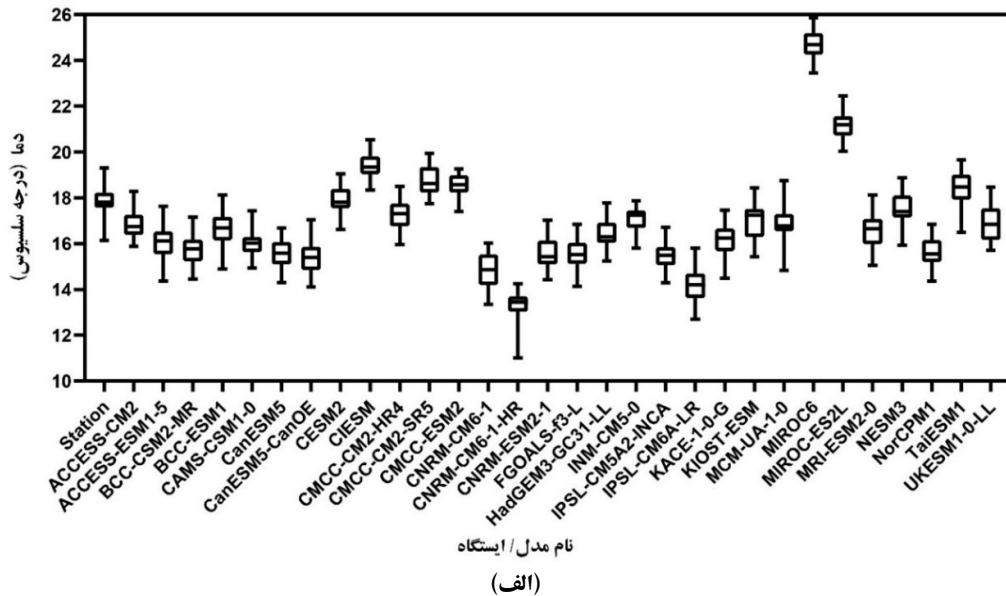
قلمداد شود.

نمودار جعبه‌ای (شکل ۳-الف) و متوسط پهنه‌ای دمای مدل‌های بررسی شده در مقایسه با داده‌های ایستگاهی (شکل ۳-ب) نشان می‌دهد بیشتر مدل‌های CMIP6 مورد بررسی اریبی سرد سامانمند (کم‌برآوردی) دارند. بررسی توزیع فضایی دمای سی مدل یادشده نشان داد بیشتر مدل‌های CMIP6 می‌توانند الگوی فضایی دما را در مقیاس سالانه برآورد کنند. با این حال همان‌طور که گفته شد، بیشتر مدل‌های CMIP6 برای دما در متوسط کشور کم‌برآوردی داشته‌اند.



بررسی‌ها نشان داد میانگین پهنه‌ای دما در ۷۳/۳۳ درصد از مدل‌های مورد بررسی کمتر از متوسط پهنه‌ای ایستگاهی در کشور است. از نظر آماری، کمینه دمای پهنه‌ای ایران ۱۳/۳۲ درجه سلسیوس در مدل CNRM-CM6-1-HR و بیشینه دما با ۲۴/۶۸ درجه سلسیوس در مدل MIROC6 دیده می‌شود.

همکاران، (۱۴۰۱). همان‌طور که در مقدمه و هدف تحقیق نیز آمده است، این پژوهش با تأکید بر ECS و TCR مدل‌های اقلیمی انجام شده است و از آنجایی که تصحیح اریبی و مقیاس‌گامی مدل‌ها، مزیت ذاتی مدل‌ها را تغییر می‌دهند، استفاده از برون‌داد مستقیم مدل‌ها در این تحقیق ضروری است.



شکل ۳. (الف) دامنه عدم قطعیت مدل‌های CMIP6 مورد بررسی در برآورد دمای متوسط پهنه‌ای ایران در مقایسه با داده‌های ایستگاهی (ب) میانگین پهنه‌ای دمای مدل‌های مورد بررسی و مقایسه آن با دمای ایستگاه‌های هواشناسی همدید.

متوسط پهنه‌ای روند و شیب روند دما با دو آزمون من‌کنندال تصحیح شده (MM-K) و برآوردگر شیب سن (SSE) برای کشور محاسبه شد (جدول ۲). تمامی مدل‌های CMIP6 روند افزایشی دما را طی دوره تاریخی برای کشور نشان داده‌اند که با داده‌های مشاهداتی همخوانی دارد. متوسط پهنه‌ای روند دمای میانگین در ایران بر اساس داده‌های پنجاه و یک ایستگاه هواشناسی طی دوره تاریخی افزایشی است. نمره Z آزمون MM-K، ۳/۸۹ است که در سطح  $\alpha=0/01$  معنی‌دار است. نتایج نشان می‌دهد هدفه مدل مورد بررسی، بزرگی روند یا همان شیب روند را بیشتر از متوسط پهنه‌ای داده‌های ایستگاهی نشان می‌دهند. این آهنگ گرمایشی بیشتر در مدل‌های CMIP6 در مطالعه توکارسکا و همکاران (۲۰۲۰) نیز نشان داده شده است. در مطالعه یادشده مدل‌های CMIP6 گرمایش شدیدتری را شبیه‌سازی می‌کنند که با ارزیابی‌های گذشته ناسازگار است. علت این اختلاف را چندین عامل از جمله معیارهای حساسیت اقلیم TCR و ECS و در نظرنگرفتن بازخورد خنک‌کنندگی هواویزها در برخی از مدل‌ها عنوان کرده‌اند؛ لذا مدل‌هایی که حساسیت اقلیم یا پاسخ اقلیم گذرای آن‌ها زیاد است، روند گرمایش دوره تاریخی را در ایران بیش از حد برآورد می‌کنند. برای نمونه مدل ACCESS-CM2 با نمره  $Z=4/26$ ، مدل CanESM5 با نمره  $Z=5/6$  و مدل UKESM1-0-LL با نمره  $Z=5/57$  که بیشترین روند و شیب روند افزایشی دما را طی دوره تاریخی (۱۹۸۰-۲۰۱۴) بین مدل‌های مورد بررسی دارند، به همین ترتیب بیشترین حساسیت اقلیم تراژمند (ECS) ۴/۷، ۵/۶ و ۵/۳ درجه سلسیوس و پاسخ اقلیم گذرای (TCR) ۲/۱، ۲/۷ و ۲/۸ درجه سلسیوس را نیز دارند (میهل و همکاران، ۲۰۲۰). بر این اساس بدون درنظر-گرفتن وردایی درونی اقلیم (Internal Climate)

(Variability, ICV) دو معیار حساسیت اقلیم ECS و TCR نقش تعیین‌کننده‌ای در آهنگ گرمایش دارند. شیب روند دما به ازای هر دهه، ۰/۳۷ درجه سلسیوس به دست آمده است. نمره Z آزمون من-کنندال تصحیح‌شده مدل‌های CMIP6 بین حداقل ۰/۸۸ در مدل MIROC6 و حداکثر ۵/۵۷ در مدل UKESM1-0-LL در تغییر است. شیب روند دما نیز به ترتیب برای همین دو مدل ۰/۱۲ و ۰/۶۴ درجه سلسیوس/دهه است. این آهنگ گرمایش در مدل‌های اقلیمی در نتیجه مقدار ECS و TCR در این مدل‌ها است. نتیجه مهمی که از بررسی روند دمای سی مدل مورد بررسی طی دوره تاریخی به دست آمده - است نشان می‌دهد مدل UKESM1-0-LL در برآورد میانگین دما در ایران از کارایی مناسبی برخوردار است، اما این مدل روند گرمایش را تقریباً نزدیک به دو برابر داده-های ایستگاهی و چند برابر مدلی همانند MIROC6 برآورد کرده است. معیارهای حساسیت اقلیم ECS و TCR در مدل UKESM1-0-LL به ترتیب ۵/۳ و ۲/۸ درجه سلسیوس است و در مقابل، همین دو معیار برای مدل MIROC6 به ترتیب ۲/۶ و ۱/۶ درجه سلسیوس است (میهل و همکاران، ۲۰۲۰). لذا روشن است به دلیل ECS و TCR بیشتر مدل UKESM1-0-L، آهنگ گرمایش این مدل نیز بیشتر از مدل MIROC6 است. ضرورت دارد در به‌کارگیری مدل‌های منفرد، به ECS و TCR توجه کرد تا آهنگ گرمایش و روند افزایشی دما به شکل غیرواقعی افزایشی/کاهشی نباشد.

توزیع جغرافیایی دمای سالانه در ایران برای بیشتر مدل‌ها به‌خصوص مدل‌های با تفکیک افقی زیاد (سری مدل‌های با پسوند HR) و مدل‌های سامانه زمین (سری مدل‌های با پسوند ESM) با توپوگرافی مطابقت دارد (شکل ۴).

جدول ۲. میانگین، روند، شیب روند و سطح معنی‌داری روند برای متوسط پهنه‌ای دمای ایران.

نام مدل	میانگین دما	روند - MM-K	شیب روند/دهه	نوع روند
ACCESS-CM2	16/83	4/26	0/41	افزایشی $\alpha=0/01$
ACCESS-ESM1-5	16/09	4/43	0/49	افزایشی $\alpha=0/01$
BCC-CSM2-MR	15/68	2/50	0/30	افزایشی $\alpha=0/05$
BCC-ESM1	16/64	4/54	0/46	افزایشی $\alpha=0/01$
CAMS-CSM1-0	16/01	3/89	0/35	افزایشی $\alpha=0/01$
CanESM5	15/60	5/51	0/52	افزایشی $\alpha=0/01$
CanESM5-CanOE	15/47	4/40	0/49	افزایشی $\alpha=0/01$
CESM2	17/92	4/35	0/47	افزایشی $\alpha=0/01$
CIESM	19/38	3/15	0/28	افزایشی $\alpha=0/01$
CMCC-CM2-HR4	17/29	3/49	0/38	افزایشی $\alpha=0/01$
CMCC-CM2-SR5	18/77	4/00	0/41	افزایشی $\alpha=0/01$
CMCC-ESM2	18/55	3/01	0/22	افزایشی $\alpha=0/01$
CNRM-CM6-1	14/82	3/52	0/45	افزایشی $\alpha=0/01$
CNRM-CM6-1-HR	13/32	2/87	0/27	افزایشی $\alpha=0/01$
CNRM-ESM2-1	15/61	2/24	0/27	افزایشی $\alpha=0/05$
FGOALS-f3-L	15/53	4/15	0/49	افزایشی $\alpha=0/01$
HadGEM3-GC31-LL	16/44	4/09	0/38	افزایشی $\alpha=0/01$
INM-CM5-0	17/06	4/29	0/35	افزایشی $\alpha=0/01$
IPSL-CM5A2-INCA	15/47	2/64	0/29	افزایشی $\alpha=0/01$
IPSL-CM6A-LR	14/18	3/58	0/46	افزایشی $\alpha=0/01$
KACE-1-0-G	16/18	3/75	0/39	افزایشی $\alpha=0/01$
KIOST-ESM	17/03	4/20	0/51	افزایشی $\alpha=0/01$
MCM-UA-1-0	16/91	2/64	0/29	افزایشی $\alpha=0/01$
MIROC6	24/68	0/88	0/12	فاقد روند معنی‌دار
MIROC-ES2L	21/12	4/35	0/44	افزایشی $\alpha=0/01$
MRI-ESM2-0	16/59	1/76	0/29	افزایشی $\alpha=0/1$
NESM3	17/58	4/00	0/44	افزایشی $\alpha=0/01$
NorCPM1	15/58	2/76	0/28	افزایشی $\alpha=0/01$
TaiESM1	18/49	5/06	0/54	افزایشی $\alpha=0/01$
UKESM1-0-LL	۱۶/۸۵	5/57	0/64	افزایشی $\alpha=0/01$

الگوی مناسبی از پراکنش فضایی دما را در ایران نشان دهند. همچنین این چهار مدل در برآورد دمای متوسط پهنه‌ای کشور، بیشینه بیش‌برآوردی را دارند (شکل ۵). تفکیک افقی این چهار مدل به ترتیب ۱۰۰، ۲۵۰، ۲۵۰ و

از بین مدل‌های مورد بررسی، چهار مدل CAMS- CSM1-0 (شماره ۵ در شکل ۵)، MCM-UA-1-0 (شماره ۲۳ در شکل ۵)، MIROC6 (شماره ۲۴ در شکل ۵) و MIROC-ES2L (شماره ۲۵ در شکل ۵) نتوانسته‌اند

است، در این مناطق داده ایستگاهی وجود ندارد و اختلاف درخور توجه به دست آمده در درجه نخست، به دلیل نبود ایستگاه اندازه گیری است. در نقطه مقابل، بیشینه بیش برآوردی مدل‌ها در کویرهای داخلی ایران دیده می‌شود. روشن است که این اختلاف نیز به دلیل نبود ایستگاه اندازه گیری در این مناطق است؛ برای مثال مدل CNRM-CM6-1-HR (شماره ۱۴ در شکل ۵) با تفکیک افقی ۵۰ کیلومتر و مدل CMCC-CM2-HR4 (شماره ۱۰ در شکل ۵) با تفکیک افقی ۱۰۰ کیلومتر به ترتیب ۷۱۲ و ۱۵۱ نقطه شبکه در ایران دارند. این در حالی است که تنها پنجاه و یک ایستگاه یا به عبارتی، پنجاه و یک نقطه در ایران در دوره مورد بررسی وجود دارد که این پنجاه و یک ایستگاه نیز بیشتر در مناطق غربی و شمالی ایران دیده می‌شوند.

شبکه بندی مجدد داده‌های ایستگاهی با درون‌یابی برای بررسی اختلاف مدل و ایستگاه به دلیل نبود ایستگاه اندازه گیری در کویرهای داخلی و مناطق کوهستانی باعث ایجاد اختلاف زیاد بین مدل و ایستگاه می‌شود (شکل ۵). همان‌طور که در شکل ۵ نیز دیده می‌شود، برای بیشتر مدل‌ها بخش‌های بزرگی از ایران اختلاف بین صفر تا ۳- درجه سلسیوس دارند. این نتیجه تأیید می‌کند بیشتر مدل‌های مورد بررسی برای دمای سالانه ایران کم‌برآوردی دارند که بیشتر در نمودار جعبه‌ای (شکل ۳- الف) و نمودار میله‌ای (شکل ۳- ب) نیز برای متوسط پهنه‌ای ایران نشان داده شد. با وجود کم‌برآوردی غالب مدل‌ها برای دمای سالانه ایران و همچنین بیش برآوردی بیشتر مدل‌ها در مناطق خشک داخلی و سواحل جنوبی ایران در حالت DMO، کارایی مدل‌های CMIP6 برای دمای سالانه ایران پذیرفتنی است. با این حال ضرورت دارد در تحقیقات آتی ضمن انتخاب صحیح مدل‌ها بر اساس مؤلفه‌های مختلف از جمله حساسیت اقلیمی همچون TCR و ECS، نسبت به مقیاس‌کاهی و تصحیح اریبی

۵۰۰ کیلومتر است و با این حال نتوانسته‌اند نقش رشته کوه‌های زاگرس و البرز را در وردایی فضایی دمای ایران نشان دهند. همان‌طور که گفته شد، مدل‌های CMIP6 در برآورد دمای ایران، اریبی سرد سامانمند (کم‌برآوردی) دارند به گونه‌ای که بیست و دو مدل از سی مدل مورد بررسی در متوسط پهنه‌ای کشور کم‌برآوردی دما دارند (شکل ۵ و نمودار جعبه‌ای شکل ۳). در مقایسه با داده‌های مشاهداتی ایستگاهی، بیشینه کم‌برآوردی مدل‌های CMIP6 در شمال غرب، شمال شرق و رشته کوه‌های زاگرس دیده می‌شود. در برآورد متوسط پهنه‌ای دمای کشور نیز بیشینه کم‌برآوردی در مدل CNRM-CM6-1-HR با مقدار ۳/۹۹- درجه سلسیوس مشاهده می‌شود. اگر فقط پراکنش فضایی دما مدنظر باشد، از بین سی مدل مورد بررسی، مدل CNRM-CM6-1-HR بهترین کارایی را نشان می‌دهد. به نظر می‌رسد در صورت تصحیح اریبی برون‌داد مستقیم مدل (DMO)، این مدل می‌تواند یکی از کاراترین مدل‌های CMIP6 برای برآورد دما در کشور باشد.

برای درک بهتر برون‌داد مستقیم مدل‌ها اختلاف سی مدل بررسی شده با داده‌های ایستگاهی به شکل پهنه‌ای ارائه شده است. از بین مدل‌ها به ترتیب مدل‌های MIROC6، MIROC-ES2L، CIESM، TaiESM1 و NESM3 بیشترین بیش برآوردی را در پهنه ایران نشان داده‌اند. از بین سی مدل بررسی شده، تنها مدل MIROC6 برای کل ایران بیش برآوردی داشته است و بیست و نه مدل دیگر دست کم در پهنه‌های کوچکی از ایران کم‌برآوردی را برای دما نشان داده‌اند. کم‌برآوردی دما در بیشتر مدل‌های مورد بررسی در رشته کوه البرز و کوه‌های هزار و لاله‌زار کرمان دیده می‌شود. این کم‌برآوردی درخور توجه که تا ۸- درجه سلسیوس نیز برآورد شده است، به دلیل نبود ایستگاه اندازه گیری در این مناطق است؛ زیرا همان‌طور که در شکل ۱ نیز نشان داده شده

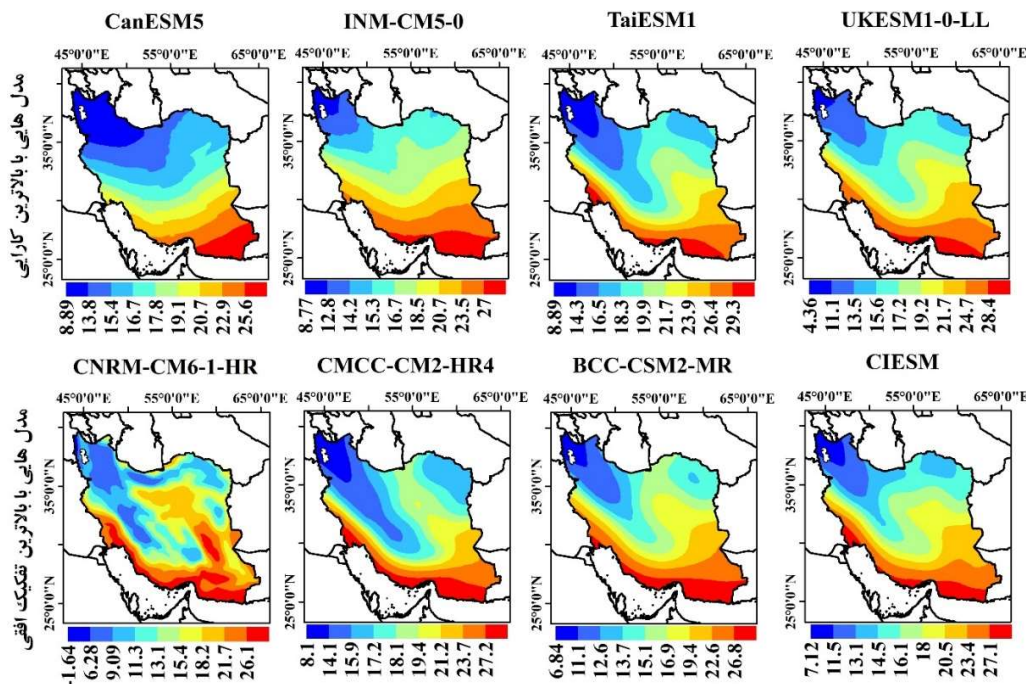
در نظر گرفتن مؤلفه‌های حساسیت اقلیمی با به‌کارگیری پرونداد مدل‌های اقلیمی می‌تواند نقش مؤثری در اتخاذ سیاست‌های سازگاری و تهیه برنامه‌های اقدام تغییر اقلیم ایفا کند.

بررسی حساسیت اقلیمی در مطالعات تغییر اقلیم و اینکه آیا این نسل از مدل‌ها (CMIP6) احتمالاً سامانه اقلیم را بهتر از مدل‌های نسل قبلی (CMIP5) خود نشان می‌دهند، بسیار مهم است. بررسی حساسیت اقلیمی و مؤلفه‌های آن به ارائه تصویر واقعی‌تری از گرمایش جهانی به‌خصوص در آینده منجر می‌شود. شدت تغییر اقلیم ارتباط نزدیکی با میزان گرمایش جهانی در واکنش به افزایش گازهای گلخانه‌ای دارد. واکنش دما به چهار برابر شدن ناگهانی دی‌اکسید کربن جو<sup>۴</sup> (abrupt-4xCO<sub>2</sub>) در آخرین نسل از مدل‌های گردش کلی (GCMs) به‌طور چشمگیری افزایش یافته است.

مدل‌های کارا و تولید مدل همادی نیز اقدام کرد. زرین و داداشی رودباری (۱۳۹۹) در پژوهشی با روش تغییر عامل دلتا (DCF) به بررسی مقیاس‌گامی و تصحیح اریبی مدل‌های CMIP6 برای دمای ایران پرداختند. این پژوهشگران نشان دادند مقیاس‌گامی به مقدار زیادی از مقدار خطا و اریبی مدل‌ها می‌کاهد. همچنین زرین و داداشی رودباری (۱۴۰۰) در پژوهشی دیگر با تولید چند مدلی همادی (MME) از مدل‌های CMIP6 تأیید کرده‌اند که مدل همادی نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش اریبی متغیر دما در ایران دارد.

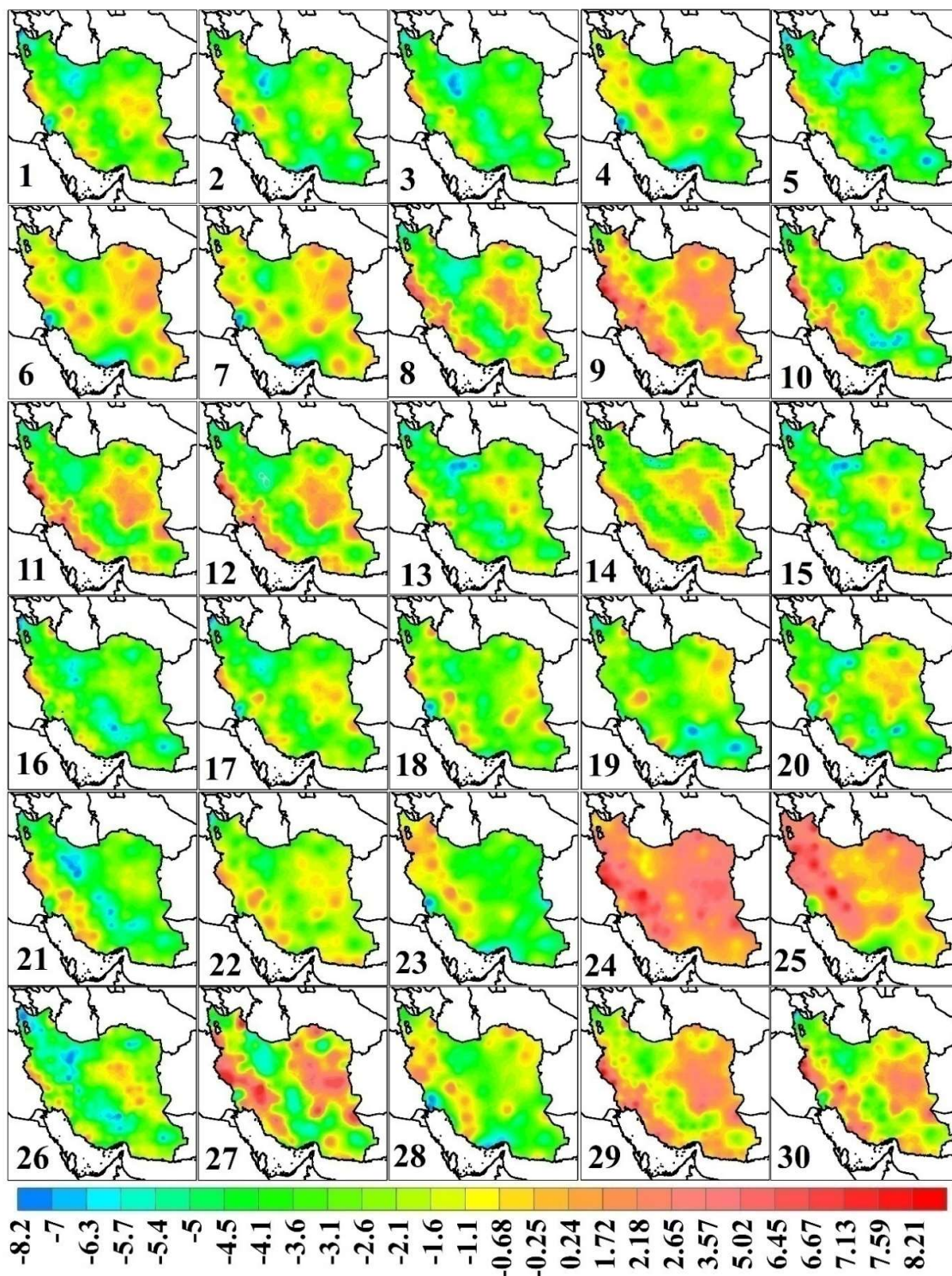
#### ۴ نتیجه‌گیری

افزایش دما به دلیل پیامدهای جبران‌ناپذیر آن بر بوم‌سازگان‌های زمین، رفاه انسان را در معرض خطر قرار داده است. بر این اساس پیش‌نگری دقیق و همه‌جانبه با



شکل ۴. پراکنش فضایی دمای سالانه طی دوره تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۸۰) برای مدل‌هایی با بیشترین کارایی و تفکیک اقلیمی.





شکل ۵. اختلاف دمای سالانه طی دوره تاریخی (۱۹۸۰-۲۰۱۴) برای سی مدل CMIP6 مورد بررسی با داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی همدید (شماره هر شکل معرف یک مدل است که در ردیف جدول ۱ به همراه مشخصات کامل آن مدل آمده است).

دمای ایران نشان می‌دهند. البته شایان ذکر است مدل CNRM-CM6-1-HR به دلیل تفکیک افقی بیشتر به‌خوبی توانسته است نقش توپوگرافی را در تغییرات دمای سالانه کشور نشان دهد. در مقابل، مدل MIROC6 نتوانسته است الگوهای فضایی دمای کشور را نشان دهد که از این نظر در این تحقیق یکی از ضعیف‌ترین مدل‌های مورد بررسی برای دمای کشور بوده است.

چندین دلیل احتمالی برای کم‌برآوردی مدل‌های CMIP6 در ایران وجود دارد. اولین دلیل ممکن است مربوط به پوشش پراکنده ایستگاه‌ها همراه با توپوگرافی پیچیده رشته‌کوه‌های مرتفع البرز و زاگرس باشد که بر این اساس، ایستگاه‌ها طیف کاملی از شرایط اقلیمی را به‌ویژه در مناطق مرتفع کوهستانی و مناطق خشک داخلی (دشت کویر و دشت لوت) ندارند؛ به این معنا که لزوماً مدل‌ها کم‌برآوردی نداشته‌اند، بلکه پراکنش ناکافی ایستگاه‌های هواشناسی دلیل این اختلاف بوده است. به‌طور کلی بین سپیدایی و کم‌برآوردی مدل‌های CMIP ارتباط وجود دارد (چن و همکاران، ۲۰۱۷). در اکثر GCM ها، سپیدایی با پارامترسازی پوشش برف همراه است. بنابراین کم‌برآوردی مدل حاکی از آن است که مدل‌ها نتوانسته‌اند بازخوردهای برف-سپیدایی را به‌خوبی نشان دهند. به‌طور کلی به تحقیقات بیشتر برای پیشبرد درک علمی درباره منشأ اریبی سامانمند مدل‌های CMIP6 در ایران نیاز است.

نتایج پهنه‌ای روند با دو آزمون من-کندال تصحیح‌شده (MM-K) و برآوردگر شیب سن (SSE) نشان داد که بیشتر مدل‌ها با حساسیت ترازمند زیاد یا با پاسخ اقلیم گذرای زیاد همراه هستند و بنابراین روند گرمایش دمای میانگین متوسط پهنه‌ای ایران را بیش از مقدار واقعی برآورد کرده‌اند. از جمله این مدل‌ها می‌توان به مدل‌های ACCESS-CM2، CanESM5، UKESM1-0-LL، IPSL-CM6A-LR و KACE-1-0-G اشاره کرد

افزایش دما در درجه نخست به این دلیل است که محتوای رطوبتی جو و پوشش ابر با گرم شدن کره زمین به‌شدت کاهش می‌یابد و باعث افزایش جذب سیاره‌ای نور خورشید می‌شود. این شرایط یک بازخورد تقویت‌کننده (amplifying feedback) را ایجاد می‌کند که در نهایت، به گرمایش بیشتر منجر می‌شود (زلینکا و همکاران، ۲۰۲۰). با درنظرگرفتن این اصل مهم در مطالعات تغییر اقلیم، این پژوهش به مطالعه نقش حساسیت اقلیمی در تغییرات دمای ایران طی دوره تاریخی پرداخته است.

در این پژوهش برونداد سی مدل اقلیمی با درنظرگرفتن حساسیت اقلیم ترازمند (ECS) و پاسخ اقلیم گذرا (TCR) از پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده فاز ششم (CMIP6) بررسی شده است. درستی مدل‌ها با استفاده از پنجاه و یک ایستگاه هواشناسی همدید برای دوره تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۸۰) با استفاده از نمودار تیلور و نمودار جعبه‌ای بررسی شد.

نتایج توزیع فضایی سی مدل نشان داد بیشتر مدل‌های CMIP6 می‌توانند الگوی فضایی کلی دما را در مقیاس سالانه به‌خوبی برآورد کنند؛ با این حال بیشتر مدل‌های CMIP6 در برآورد دما در متوسط کشور کم‌برآوردی دارند. در متوسط پهنه‌ای کشور ۷۳/۳۳ درصد از مدل‌های مورد بررسی دما را کمتر از داده‌های ایستگاهی برآورد کرده‌اند. کم‌برآوردی‌های مدل‌های CMIP5 و CMIP6 در برخی مناطق مانند شرق آسیا برای مدل‌های CMIP5 (یان و همکاران، ۲۰۱۳) و فلات تبت برای مدل‌های CMIP6 (ژو و یانگ، ۲۰۲۰) نیز گزارش شده است. بررسی کارایی مدل‌ها نشان داد ۵۶/۶۶ درصد از مدل‌ها همبستگی بیشتر از ۰/۵ با داده‌های ایستگاهی دارند. چهار مدل CanESM5، INM-CM5-0، TaiESM1 و UKESM1-0-LL بیشترین کارایی را در بین سی مدل دارند. به‌طور کلی مدل CNRM-CM6-1-HR بیشینه کم-برآوردی و مدل MIROC6 بیشینه بیش‌برآوردی را برای

رودباری، ع.، حسنی، س.، ۱۴۰۱، پیش‌بینی دمای ماهانه ایران با استفاده از پروژه پیش‌بینی اقلیمی دهه‌ای (DCPP) در دهه آینده (۲۰۲۸-۲۰۲۱): مجله فیزیک زمین و فضا، ۴۸(۱)، ۱۸۹-۲۱۱.

زرین، آ.، داداشی رودباری، ع.، صالح‌آبادی، ن.، ۱۴۰۰، بررسی بی‌هنجاری و روند دمای ایران در پهنه‌های مختلف اقلیمی با استفاده از مدل‌های جفت‌شده پروژه مقایسه متقابل مرحله ششم (CMIP6): مجله ژئوفیزیک ایران، ۱۵(۱)، ۳۵-۵۴.

Ayugi, B., Ngoma, H., Babaousmail, H., Karim, R., Iyakaremye, V., Sian, K. T. L. K., and Ongoma, V., 2021, Evaluation and projection of mean surface temperature using CMIP6 models over East Africa: Journal of African Earth Sciences, **181**, 104226.

Beobide-Arsuaga, G., Bayr, T., Reintges, A., and Latif, M., 2021, Uncertainty of ENSO-amplitude projections in CMIP5 and CMIP6 models: Climate Dynamics, **56**(11), 3875-3888.

Bhattacharya, B., Mohanty, S., and Singh, C., 2022, Assessment of the potential of CMIP6 models in simulating the sea surface temperature variability over the tropical Indian Ocean: Theoretical and Applied Climatology, **148**(1), 585-602.

Chen, X., Liu, Y., and Wu, G., 2017, Understanding the surface temperature cold bias in CMIP5 AGCMs over the Tibetan Plateau: Advances in Atmospheric Sciences, **34**(12), 1447-1460.

Collins, W. J., Fry, M. M., Yu, H., Fuglestedt, J. S., Shindell, D. T., and West, J. J., 2013, Global and regional temperature-change potentials for near-term climate forcings: Atmospheric Chemistry and Physics, **13**(5), 2471-2485.

Cui, T., Li, C., and Tian, F., 2021, Evaluation of temperature and precipitation simulations in CMIP6 models over the Tibetan Plateau: Earth and Space Science, **8**(7), e2020EA001620.

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

Fan, X., Duan, Q., Shen, C., Wu, Y., and Xing,

که مقدار ECS آنها به ترتیب ۴/۷، ۵/۶، ۵/۳، ۴/۶ و ۴/۵ درجه سلسیوس و مقدار TCR آنها به ترتیب ۲/۱، ۲/۷، ۲/۸، ۲/۳ و ۱/۴ درجه سلسیوس است. این تفاوت‌ها ناشی از نقش حساسیت اقلیم ترازمند (ECS) و پاسخ اقلیم گذرا (TCR) است و نمی‌توان آن را با واردایی درونی اقلیم (ICV) توضیح داد. بر این اساس مقدار زیاد ECS و TCR احتمالاً به افزایش بیشتر آهنگ گرمایش در پیش‌نگری‌های آینده منجر خواهد شد (توکارسکا و همکاران، ۲۰۲۰ و میهل و همکاران، ۲۰۲۰). بنابراین روند افزایشی دما برای برونداد مدل‌های CMIP6 یا به‌طور کلی مدل‌های پیشین CMIP (CMIP5) حتی اگر به مقدار داده‌های مشاهداتی نیز بسیار نزدیک باشند، در دوره تاریخی نمی‌تواند به‌طور قطعی نماینده آهنگ گرمایش طبیعی سامانه اقلیم باشد. ضرورت دارد در پیش‌نگری‌های اقلیمی حتماً از برونداد تصحیح‌شده اریبی مدل‌ها و تولید مدل همادی وزنی (بدون به‌کارگیری میانگین حسابی) استفاده شود تا عدم قطعیت در پیش‌نگری‌ها تا سطحی پذیرفتنی کاهش یابد.

## منابع

زرین، آ.، داداشی رودباری، ع.، ۱۳۹۹، پیش‌نگری چشم‌انداز بلندمدت دمای آینده ایران مبتنی بر برونداد پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده فاز ششم (CMIP6): مجله فیزیک زمین و فضا، ۴۶(۳)، ۵۸۳-۶۰۲.

زرین، آ.، داداشی رودباری، ع.، ۱۴۰۰ الف، پیش‌نگری دوره‌های خشک و مرطوب متوالی در ایران مبتنی بر برونداد همادی مدل‌های تصحیح‌شده اریبی CMIP6: مجله فیزیک زمین و فضا، ۴۷(۳)، ۵۶۱-۵۷۸.

زرین، آ.، داداشی رودباری، ع.، ۱۴۰۰ ب، پیش‌نگری دمای ایران در آینده نزدیک (۲۰۴۰-۲۰۲۱) بر اساس رویکرد همادی چند مدلی CMIP6: پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۵۳(۱)، ۷۵-۹۰. زرین، آ.، داداشی



- C., 2020, Global surface air temperatures in CMIP6: historical performance and future changes: *Environmental Research Letters*, **15**(10), 104056.
- Flato, G., Marotzke, J., Abiodun, B., et al., 2014, Evaluation of climate models: in *Climate change 2013: the physical science basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 741-866): Cambridge University Press.
- Gou, J., Miao, C., Samaniego, L., Xiao, M., Wu, J., and Guo, X., 2021, CNRD v1.0: a high-quality natural runoff dataset for hydrological and climate studies in China: *Bulletin of the American Meteorological Society*, **102**(5), E929-E947.
- Grose, M. R., Narsey, S., Delage, F. P., et al., 2020, Insights from CMIP6 for Australia's future climate: *Earth's Future*, **8**(5), e2019EF001469.
- Hamed, K. H., 2008, Trend detection in hydrologic data: the Mann-Kendall trend test under the scaling hypothesis: *Journal of Hydrology*, **349**(3-4), 350-363.
- Hamed, K. H., and Rao, A. R., 1998, A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data: *Journal of Hydrology*, **204**(1-4), 182-196.
- Huusko, L. L., Bender, F. A., Ekman, A. M., and Storelvmo, T., 2021, Climate sensitivity indices and their relation with projected temperature change in CMIP6 models: *Environmental Research Letters*, **16**(6), 064095.
- IPCC, 2013, *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*: Cambridge University Press, Cambridge and New York.
- 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*: Cambridge University Press.
- Lehner, F., Deser, C., Maher, N., et al., 2020, Partitioning climate projection uncertainty with multiple large ensembles and CMIP5/6: *Earth System Dynamics*, **11**(2), 491-508.
- Li, J., Miao, C., Wei, W., Zhang, G., Hua, L., Chen, Y., and Wang, X., 2021, Evaluation of CMIP6 global climate models for simulating land surface energy and water fluxes during 1979–2014: *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, **13**(6), e2021MS002515.
- Martins, F. B., Benassi, R. B., Torres, R. R., and de Brito Neto, F. A., 2022, Impacts of 1.5°C and 2°C global warming on Eucalyptus plantations in South America: *Science of The Total Environment*, **825**, 153820.
- Meehl, G. A., Senior, C. A., Eyring, V., et al., 2020, Context for interpreting equilibrium climate sensitivity and transient climate response from the CMIP6 Earth system models: *Science Advances*, **6**(26), eaba1981.
- Nijse, F. J., Cox, P. M., and Williamson, M. S., 2020, Emergent constraints on transient climate response (TCR) and equilibrium climate sensitivity (ECS) from historical warming in CMIP5 and CMIP6 models: *Earth System Dynamics*, **11**(3), 737-750.
- Rugenstein, M., Bloch-Johnson, J., Gregory, J., et al., 2020, Equilibrium climate sensitivity estimated by equilibrating climate models: *Geophysical Research Letters*, **47**(4), e2019GL083898.
- Shiru, M. S., and Chung, E. S., 2021, Performance evaluation of CMIP6 global climate models for selecting models for climate projection over Nigeria: *Theoretical and Applied Climatology*, **146**(1), 599-615.
- Tabari, H., and Marofi, S., 2011, Changes of pan evaporation in the west of Iran: *Water Resources Management*, **25**(1), 97-111.
- Tokarska, K. B., Stolpe, M. B., Sippel, S., Fischer, E. M., Smith, C. J., Lehner, F., and Knutti, R., 2020, Past warming trend constrains future warming in CMIP6 models: *Science Advances*, **6**(12), eaaz9549.
- Yan, G., Wen-Jie, D., Fu-Min, R., Zong-Ci, Z., and Jian-Bin, H., 2013, Surface air temperature simulations over China with CMIP5 and CMIP3: *Advances in Climate Change Research*, **4**(3), 145-152.
- Yang, X., Zhou, B., Xu, Y., and Han, Z., 2021, CMIP6 evaluation and projection of temperature and precipitation over China: *Advances in Atmospheric Sciences*, **38**(5), 817-830.
- Yazdandoost, F., Moradian, S., Izadi, A., and Aghakouchak, A., 2021, Evaluation of CMIP6 precipitation simulations across different climatic zones: Uncertainty and model intercomparison: *Atmospheric Research*, **250**, 105369.
- Yue, S., & Wang, C. 2004, The Mann-Kendall test modified by effective sample size to detect trend in serially correlated hydrological

- series: *Water resources management*, **18**(3), 201-218.
- Zarrin, A., and Dadashi-Roudbari, A., 2021, Projection of future extreme precipitation in Iran based on CMIP6 multi-model ensemble: *Theoretical and Applied Climatology*, **144**(1), 643-660.
- Zarrin, A., Dadashi-Roudbari, A., and Hassani, S., 2021, Future Changes in Precipitation Extremes Over Iran: Insight from a CMIP6 Bias-Corrected Multi-Model Ensemble: *Pure and Applied Geophysics*, 1-24.
- Zelinka, M. D., Myers, T. A., McCoy, D. T., et al., 2020, Causes of higher climate sensitivity in CMIP6 models: *Geophysical Research Letters*, **47**(1), e2019GL085782.
- Zhang, X., Hua, L., and Jiang, D., 2022, Assessment of CMIP6 model performance for temperature and precipitation in Xinjiang, China: *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, **15**(2), 100128.
- Zheng, H., Miao, C., Jiao, J., and Borthwick, A. G., 2021, Complex relationships between water discharge and sediment concentration across the Loess Plateau, China: *Journal of Hydrology*, **596**, 126078.
- Zhu, J., Otto-Bliesner, B. L., Brady, E. C., et al., 2021, Assessment of equilibrium climate sensitivity of the Community Earth System Model version 2 through simulation of the Last Glacial Maximum: *Geophysical Research Letters*, **48**(3), e2020GL091220.
- Zhu, Y. Y., and Yang, S., 2020, Evaluation of CMIP6 for historical temperature and precipitation over the Tibetan Plateau and its comparison with CMIP5: *Advances in Climate Change Research*, **11**(3), 239-251.
- Zolina, O., Simmer, C., Kapala, A., and Gulev, S., 2005, On the robustness of the estimates of centennial-scale variability in heavy precipitation from station data over Europe: *Geophysical Research Letters*, **32**(14).

## Evaluation of CMIP6 models in estimating temperature in Iran with emphasis on equilibrium climate sensitivity (ECS) and transient climate response (TCR)

Azar Zarrin<sup>1\*</sup> and Abbasali Dadashi-Roudbari<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Associate Professor of Climatology, Department of Geography, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

<sup>2</sup>Postdoctoral Researcher of Climatology, Department of Geography, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

(Received: 30 May 2022, Accepted: 31 July 2022)

### Summary

Global warming is a gradual increase in the Earth's temperature generally due to the greenhouse effect caused by increased levels of carbon dioxide. Global warming has had significant consequences for human life, significantly affecting agricultural production, ecosystems, and water resources. The climate system of the Earth responds to a perturbation to the top of the atmosphere radiative balance through a change in temperature. This imbalance constitutes a radiative forcing of the climate system, and the magnitude of the response is determined by the strength of the forcing and the net radiative feedback. Equilibrium Climate Sensitivity (ECS) is an estimate of the eventual steady-state global warming at double CO<sub>2</sub> and Transient Climate Response (TCR) is the mean global warming predicted to occur around the time of doubling CO<sub>2</sub> in GCM and ESM runs for which atmospheric CO<sub>2</sub> concentration is prescribed to increase at 1% per year.

This study aimed to evaluate the performance of Climate Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) models by selecting 30 models considering TCR and ECS and to investigate temperature spatial distribution and annual trends in Iran. The performance of these models has been investigated with data from Iran's fifty-one synoptic stations for the historical period (1980-2014) using the Taylor diagram and box plot. The results showed that most CMIP6 models have good performance in simulating spatial temperature patterns. However, in the area-averaged, 73% of the selected models have estimated the temperature of the country as less than the station data. In general, more than 56% of the models showed a correlation higher than 0.5 compared to station data in the area-averaged temperature of Iran. Four models including CanESM5, INM-CM5-0, TaiESM1, and UKESM1-0-LL have shown the highest performance in estimating the temperature in Iran. The area-averaged annual temperature trend, which was examined by the modified Mann-Kendall test, showed that the temperature trend of CMIP6 models is increasing along with the observational data for all models. Most CMIP6 models, however, have simulated higher warming rates in the historical period, which differs from station data. These differences cannot be explained by internal climate variability (ICV), and the equilibrium climate sensitivity of most CMIP6 models has created a greater rate of warming in the models. For example, models such as CanESM5 and UKESM1-0-LL, which showed the highest trend, had the highest ECS and TCR among all.

**Keywords:** Temperature, CMIP6, equilibrium climate sensitivity, transient climate response, internal climate variability