

# پیش‌نگری چشم‌انداز بلندمدت دمای آینده ایران مبتنی بر برونداد پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده فاز ششم (CMIP6)

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

۱. استادیار، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۲. پژوهشگر پسا دکتری، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(دریافت: ۹۹/۴/۸، پذیرش نهایی: ۹۹/۷/۸)

## چکیده

در این پژوهش برونداد سه مدل از مدل‌های فاز ششم (Coupled Model Intercomparison Project phase 6) CMIP6 برای درستی‌سنجی انتخاب و چشم‌انداز بلندمدت دمای آینده کشور پیش‌نگری شد. بنابراین از دو دسته داده شامل دمای ۴۳ ایستگاه همدید و برونداد سه مدل BCC-CSM2-MR، CAMS-CSM1-0 و MRI-ESM2-0 از مجموعه مدل‌های CMIP6 برای دو دوره (۲۰۰۹-۱۹۹۰ و ۲۱۰۰-۲۰۲۰) با تفکیک افقی ۱۰۰ کیلومتر و سنجه‌های متداول آماری شامل MAE (Mean Absolute Error)، MBE (Mean Bias Error)، RMSE (Root Mean Square Error)، t-Jacovids برای اختلاف دمای ایستگاه و مدل‌ها استفاده شد. مقایسه سنجه‌های آماری محاسبه شده نشان‌دهنده عملکرد بهتر مدل MRI-ESM2-0 در بین سه مدل یادشده می‌باشد. بنابراین مدل MRI-ESM2-0 به‌عنوان مدل منتخب جهت پیش‌نگری دمای آتی کشور تحت دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 انتخاب شد. برای حذف اربیبی مدل MRI-ESM2-0 از روش تغییر عامل دلتا DCF (Delta Change Factor) و برای مطالعه روند و شیب روند از آزمون‌های من-کندال و سنس استفاده شد. به‌طورکلی نتایج بیانگر بی‌هنجاری مثبت دما (متوسط سالانه کل کشور برای سناریو SSP2-4.5، ۲/۱۵ و SSP5-8.5، ۳/۳۴ °C) در تمام ماه‌های سال تا پایان قرن بیست‌ویکم است. شدت بی‌هنجاری در ماه‌های گرم سال بیشتر از ماه‌های سرد سال است. متوسط روند دما در تمامی ماه‌ها و سناریوها افزایشی و این مقدار از نظر آماری در سطح ۰/۱ معنی‌دار است. متوسط شیب روند بین سالانه در سناریوی SSP2-4.5، ۰/۰۲ year<sup>-1</sup> و بر اساس سناریوی SSP5-8.5، ۰/۰۵ year<sup>-1</sup> درجه سلسیوس محاسبه شد. پیش‌نگری دما در چشم‌انداز بلندمدت نشان داد بیشینه بی‌هنجاری دمای ایران در مناطق مرتفع و کمینه بی‌هنجاری در سواحل شمالی، شمال شرق و سواحلی جنوبی خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: دما، مدل‌های CMIP6، سناریوهای SSP، روند دما، ایران.

## ۱. مقدمه

وجود نوع روند آن ضروری است (روحبخش سیگارودی و همکاران، ۱۳۹۷).

مدیریت منابع آب ایران در شرایط تغییر اقلیم یک چالش اساسی است و به دلیل عدم قطعیت در مورد سناریوهای انتشار (ام‌پو و همکاران، ۲۰۱۶) ارائه چشم‌انداز مناسب برای شرایط اقلیمی آینده می‌تواند راهگشای الگوهای مدیریتی بسیاری باشد. شناسایی تأثیر پدیده‌های اقلیمی فرین بر روی سامانه‌های محیطی بسیار مهم است؛ اهمیت مسئله از یک طرف و عدم اطمینان از تغییراتی را که در آینده از آن حاصل می‌شود، ایجاب می‌کند که دانسته شود، چرا و چگونه شرایط اقلیمی نسبت به گذشته تغییر کرده است (روحبخش سیگارودی و همکاران، ۱۳۹۷).

گرمایش کره زمین در نتیجه افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای (تحت تأثیر فعالیت‌های انسانی) با تغییرات اقلیمی در سراسر جهان همراه شده است (هاگمن و همکاران، ۲۰۰۹). گرمایش جو و ادامه انتشار گازهای گلخانه‌ای باعث گرم شدن همه اجزای سامانه اقلیم می‌شود (IPCC، ۲۰۱۳). دمای بالاتر نگهداشت رطوبت جو را افزایش داده و این امر به نوبه خود می‌تواند منجر به افزایش بارش‌های فرین شود (یانگ و همکاران، ۲۰۱۸). علاوه بر این افزایش دما به همراه تغییرات آتی در الگوهای بارش در مقیاس محلی تا منطقه‌ای بسیار متغیر خواهد بود (مندز و همکاران، ۲۰۲۰). بنابراین ارزیابی‌های منطقه‌ای تغییر فراسنج دما در مناطق مختلف اقلیمی برای درک

۲۰۱۲) و به‌طور گسترده‌ای برای حذف اریبی مدل‌های اقلیمی مورد استفاده قرار گرفتند (هاردینگ و همکاران، ۲۰۱۴).

بررسی محدودیت‌های حذف اریبی مدل‌ها برای مطالعات اثرات تغییرات اقلیمی پژوهشی است که چن و همکاران (۲۰۱۵) به مطالعه آن در ایالات متحده آمریکا و کانادا با استفاده ۱۰ مدل پرداختند. نتایج پژوهش نشان از عدم ثبات اریبی بارش در آمریکا و کانادا است؛ این در حالی است که اریبی دما برای هر دو کشور مقدار ثابتی را نشان داده است. مارون (۲۰۱۶) حذف اریبی را در شبیه‌سازی‌های تغییرات اقلیمی با یک رویکرد انتقادی مورد بررسی قرار داد. وی معتقد است روش‌های فعلی حذف اریبی به‌طور ساختارمند نمی‌توانند روند تغییرات اقلیمی را اصلاح کنند و توانایی محدودی دارند. گائو و همکاران (۲۰۱۹) از یک روش جدید چند متغیره دو مرحله‌ای برای حذف اریبی مدل‌های اقلیمی استفاده کردند و دریافتند که روش چند متغیره دو مرحله‌ای قادر به تصحیح آماری متغیرها و ایجاد ارتباط بین آنها است و همچنین نسبت به سایر روش‌های موجود دارای عملکرد بهتری است. حذف اریبی مدل‌های اقلیمی با رویکرد همادی پژوهشی است که چن و همکاران (۲۰۱۹) به مطالعه آن در یک حوزه آبخیز نیمه‌گرمسیری در چین پرداختند. نتایج آنها نشان داد تمام روش‌های حذف اریبی باعث کاهش بارش می‌شوند. مندز و همکاران (۲۰۲۰) به بررسی درستی‌سنجی روش‌های حذف اریبی برای پیش‌بینی‌های ماهانه در کاستاریکا پرداختند؛ نامبردگان از شش روش حذف اریبی برای هفت مدل مختلف استفاده کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد حذف اریبی مدل در عملکرد آن نقش مستقیم دارد و روند بارش در کاستاریکا برای دوره آینده در فصل خشک کاهش می‌یابد.

از برونداد پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده (CMIP) برای پیش‌نگری متغیرهای مختلف هواشناسی در تحقیقات گوناگونی استفاده شده است. بررسی برونداد مدل‌های فاز سوم (CMIP3) و به‌ویژه فاز پنجم (CMIP5) نشان داد که

مطالعاتی که شرایط اقلیمی ایران را بررسی کرده‌اند به این نتیجه رسیده که بارش روندی کاهشی و دما روندی افزایشی خواهد داشت. اقلیم ایران با چالش‌هایی از جمله خشکسالی‌های شدید (شرافتی و همکاران، ۲۰۲۰) تأثیر طوفان‌های گردوغباری (داداشی رودباری و احمدی، ۲۰۲۰) و افزایش روند دما (فلاح‌قاله‌ری و همکاران، ۲۰۱۹) مواجه است و انتظار می‌رود که در شرایط آینده این روند شدیدتر شود.

بررسی اثرات تغییر اقلیم به‌طور ویژه به خروجی مدل‌های اقلیمی وابسته است (چن و همکاران، ۲۰۱۵). با این حال خروجی‌های مدل‌های اقلیمی با اریبی همراه هستند و پیش از کاربست مستقیم آنها برای یک منطقه باید اریبی آنها را حذف کرد (مارون و همکاران، ۲۰۱۰). برای این منظور، روش‌های گوناگونی برای حذف اریبی توسعه داده شدند (توتسچین و سیرت، ۲۰۱۲). با این وجود اختلاف‌نظرهای بسیاری درباره استفاده از خروجی‌های تصحیح‌شده برای مطالعات مربوط به اثرات تغییر اقلیم وجود دارد (اهرت و همکاران، ۲۰۱۲؛ مارون، ۲۰۱۶). بیشتر روش‌های حذف اریبی به دلیل آسیب رساندن به مزیت‌های ذاتی مدل‌ها با تغییر ساختار تغییرات زمانی-مکانی متغیر و روابط بین متغیرها مورد انتقاد قرار می‌گیرند (اهرت و همکاران، ۲۰۱۲). علاوه بر این تمام رویکردهای حذف اریبی از مقیاس‌بندی ساده تا روش‌های پیچیده‌تر بر اساس این فرض هستند که اریبی برونداد مدل‌های اقلیمی به‌مرور زمان ثابت است (مورر و همکاران، ۲۰۱۳). باید توجه داشت حتی اگر حذف اریبی قادر به کاهش خطا از خروجی مدل‌های اقلیمی باشد. هیچ روش حذف اریبی نمی‌تواند اریبی را طی یک دوره آماری به‌طور کامل حذف کند؛ این امر به‌ویژه برای دوره‌های آماری بلندمدت بیشتر نمود خواهد داشت (چن و همکاران، ۲۰۱۳؛ ۲۰۱۵). بنابراین در هر صورت، حذف اریبی برونداد مستقیم مدل‌ها (Direct Model Output) DMO؛ امری اجتناب‌ناپذیر و ضروری است. بر همین اساس روش‌های مختلفی توسعه یافتند (توتسچین و سیرت،

ارایی برونداد مدلی با کمترین مقدار خطا می‌باشد. نتایج این مطالعه می‌تواند به انتخاب مدل مناسب جهت پژوهش‌های مرتبط با پیش‌نگری دما در مناطق مختلف کشور کمک کرده و همچنین نتایج پیش‌نگری دمای مناطق مختلف کشور می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های مرتبط با تغییرات اقلیمی آینده و منابع آب کشور مورد استفاده قرار گیرد.

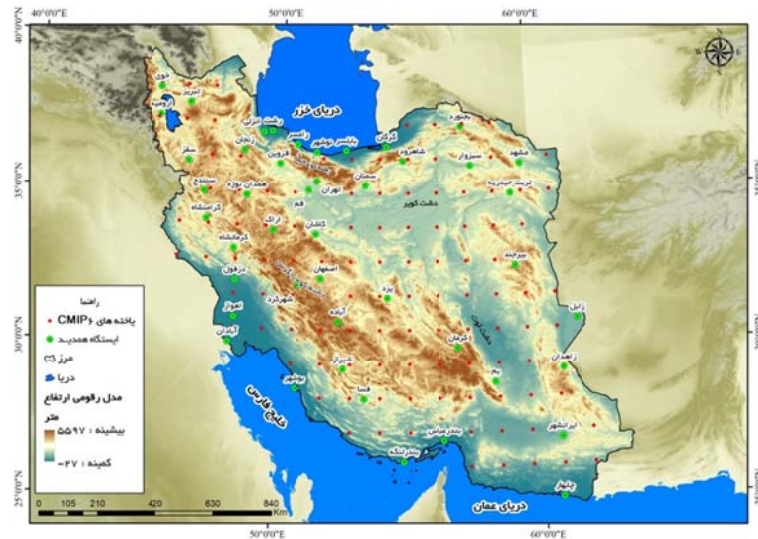
## ۲. داده و روش تحقیق

### ۲-۱. داده‌های مورد استفاده

در این پژوهش از داده‌های میانگین دمای سالانه ۴۳ ایستگاه همدید طی دوره آماری ۲۰۰۹-۱۹۹۰ برای مطالعه توزیع زمانی-مکانی دمای ماهانه و درستی‌سنجی و حذف اریبی مدل‌های منتخب CMIP6 استفاده شد. شکل ۱ موقعیت مکانی ایستگاه‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. برای بررسی چشم‌انداز دمای ماهانه ایران تا پایان قرن حاضر، مدل‌های BCC-CSM2-MR، CAMS-CSM1-0 و MRI-ESM2-0 از مجموعه مدل‌های CMIP6 انتخاب شدند. علت انتخاب این سه مدل از بین مدل‌های در دسترس، تفکیک افقی مناسب آنهاست. تا زمان نگارش این پژوهش برونداد سه مدل با تفکیک افقی ۱۰۰ کیلومتر و یک مدل با تفکیک افقی ۵۰ کیلومتر در دسترس قرار داشت که به جهت فراهم آمدن امکان درستی‌سنجی مدل‌ها، سه مدل یادشده که تفکیک افقی ۱۰۰ کیلومتر دارند؛ انتخاب شد تا امکان مقایسه بین آنها فراهم شود. در مدل‌های اقلیمی فاز ششم (CMIP6) از تلفیق خط سیرهای اجتماعی-اقتصادی مشترک در کنار خط سیرهای نماینده غلظت گازهای گلخانه‌ای برای تحلیل پس‌خورهای بین تغییرات اقلیمی و فاکتورهای اجتماعی-اقتصادی نظیر رشد جهانی جمعیت، توسعه اقتصادی و پیشرفت‌های فناوری استفاده شد (ریاحی و همکاران، ۲۰۱۷). سناریوهای موجود شامل هشت سناریوی SSP3-7.0، SSP2-4.5، SSP1-2.6، SSP1-1.9، SSP5-3.5، SSP4-6.0، SSP4-3.4، SSP5-8.5 است.

این مدل‌ها به‌طور پیاپی موضوع مطالعات تغییرات اقلیمی در مناطق مختلف کشور بوده‌اند. در این بین بیشتر این مطالعات با استفاده از داده‌های صرفاً یک مدل (GCM) و ریزمقیاس‌نمایی آماری داده‌های آن با روش‌های گوناگون آماری به بررسی متغیرهای هواشناسی مهم از جمله بارش، دما و تبخیر و تعرق پرداخته‌اند (خورانی و جمالی، ۱۳۹۵). دامنه مکانی این مطالعات از بررسی خروجی‌های مدل‌ها برای یک ایستگاه هواشناسی (انصاری و همکاران، ۱۳۹۳؛ بختیاری و همکاران، ۱۳۹۳؛ عساکره و اکبرزاده، ۱۳۹۶؛ عسکری‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷) تا یک حوضه آبریز (بحری و همکاران، ۱۳۹۴؛ پورمحمدی و همکاران، ۱۳۹۶؛ جهانبخش‌اصل و همکاران، ۱۳۹۵) و یا یک محدوده اقلیمی یا جغرافیایی (احمدی و همکاران، ۱۳۹۸؛ حمیدیان‌پور و همکاران، ۱۳۹۵؛ کریمی احمدآباد و همکاران، ۱۳۹۷) را در بر می‌گیرد. مطالعات بسیار محدودی شامل استفاده و ارزیابی برونداد بیش از یک مدل اقلیمی (تابان و همکاران، ۱۳۹۷ و احمدی و همکاران، ۱۳۹۸) یا بررسی آنها در پهنه کشور (بابائیان و همکاران، ۱۳۸۷؛ بابائیان و همکاران، ۱۳۹۱) است. از معدود مطالعاتی که با استفاده از برونداد فاز ششم (CMIP6) بر روی ایران انجام شده است، می‌توان از پیش‌آگاهی مخاطره خشکسالی در تهران بر اساس برونداد مدل‌های CMIP6 نام برد (زرین و صالح‌آبادی، ۱۳۹۸).

جمع‌بندی پیشینه نشان داد که بیشتر مطالعات انجام شده در ایران نقطه‌ای یا منطقه‌ای هستند و یا با استفاده از یک مدل از برونداد فاز سوم (CMIP3) و یا پنجم (CMIP5) به بررسی تغییرات اقلیمی آینده پرداخته‌اند. بر این اساس این مطالعه با دو هدف اصلی انجام شده است. گام نخست درستی‌سنجی مدل‌های فاز ششم در دسترس با تفکیک مکانی مناسب برای کشور ایران است که با استفاده از متداولترین سنجه‌های آماری عملکرد آنها برای بررسی دمای ایران سنجیده شود. گام دوم پیش‌نگری چشم‌انداز تغییرات زمانی-مکانی دمای ماهانه ایران بر اساس حذف



شکل ۱. ایستگاه‌های هم‌دید منتخب به همراه شبکه ۱۰۰ کیلومتری مدل‌های CMIP6 در ایران.

وسعت و ضخامت یخ دریا و گردش (AMOC)؛ و ۶) شبیه‌سازی بهتر تغییرات اقلیمی در بازه‌های زمانی مختلف، مانند روند گرمایش کره زمین، نوسانات شبه دوسالانه (QBO)، نوسان مددن-جولیان (MJO) و چرخه روزانه بارش (وو و همکاران، ۲۰۱۹) اشاره کرد. مدل آکادمی علوم هواشناسی چین (CAMS) نسخه CSM1-0 یکی از سه مدل منتخب این پژوهش و از مجموعه مدل‌های CMIP6 است. مزیت این مدل نسبت به سایر نسخه‌های موجود، تفکیک افقی ۱۰۰ کیلومتری آن برای جو، زمین و اقیانوس است (ژو و همکاران، ۲۰۲۰). سومین و آخرین مدل منتخب در این پژوهش، مدل مؤسسه تحقیقات هواشناسی ژاپن (MRI) است که در این پژوهش از آخرین نسخه آن تحت عنوان ESM2-0 استفاده شد. تفکیک افقی این مدل برای ذرات معلق و شیمی جو ۲۵۰ کیلومتر و برای جو، زمین، اقیانوس ۱۰۰ کیلومتر است. تفکیک قائم مدل در جدیدترین نسخه آن ۸۰ لایه است که ۴۸ لایه آن تقویت شد. همچنین پیشرفت‌های مختلف در مورد طرح‌واره ابرها، مانند ارائه یک طرح‌واره جدید برای ابرهای استراتوکومولوس، منجر به کاهش قابل توجه خطا در طول موج کوتاه و بلند و همچنین تابش خالص در بالای جو شد. در مجموع MRI-ESM2.0 بازتولید واقع‌بینانه‌تری از میانگین اقلیم و تغییرپذیری بین سالانه را نشان می‌دهد (یوکی‌موتو و همکاران، ۲۰۱۹).

سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 از بین سناریوهای موجود به دو دلیل برای بررسی در این پژوهش انتخاب شدند: ۱- سناریوهای حد واسط و بدینانه در زمینه آسیب‌پذیری‌های ناشی از تغییرات اقلیمی و پاسخ‌های بعدی آن مورد استفاده قرار می‌گیرند (وارناتشچ و رئی، ۲۰۱۹) و ۲- واداشت‌های سناریو SSP2-4.5 به RCP4.5 و سناریو SSP5-8.5 به RCP8.5 بسیار نزدیک است که بر این اساس قابلیت مقایسه با پژوهش‌های انجام‌شده (مقایسه CMIP5 با CMIP6) در کشور بر اساس نتایج این مدل‌ها امکان پذیر است. در ادامه شرح مختصری از مدل‌ها و سناریوهای منتخب ارائه می‌شود.

مدل مرکز اقلیمی پکن (BCC) نسخه CSM2-MR از مجموعه مدل‌های فاز ششم است. این مدل در گزارش CMIP5 با دو نسخه CSM1.1 و CSM1.1m ارائه شد. در حالی که در CMIP6 این مدل با سه نسخه CSM2-MR، CSM2-HR و ESM1.0 پیکربندی شد. دوره تاریخی مدل همانند سایر مدل‌های CMIP6 از ۱۸۵۰ تا ۲۰۱۴ است. از مهم‌ترین مشخصه‌های این مدل که نسبت به نسخه‌های قبلی از عملکرد بالاتری برخوردار است، می‌توان به: (۱) شبیه‌سازی بهتر بودجه انرژی در جو بالا؛ (۲) دمای سطح زمین؛ (۳) بهبود طرح‌واره بارش و GCM در سطح جهانی و آسیای شرقی؛ (۴) دمای سطح دریا در اقیانوس آرام واقع در مناطق گرمسیری؛ (۵) بهبود

همکاران، ۲۰۲۰).

## ۲-۲. روش‌های آماری

### ۲-۲-۱. روش تغییر عامل دلتا (DCF)

روش تغییر دلتا (DCF) (شابلوا و همکاران، ۲۰۰۳؛ روتی و همکاران، ۲۰۱۴) سناریوهای اقلیمی را با اضافه کردن سیگنال‌های بی‌هنجاری از شبیه‌سازی‌های GCM برای ایجاد پیش‌بینی در مجموعه داده‌های مشاهداتی به‌جای برونداد مستقیم مدل (DMO) در شرایط آینده استفاده می‌کند (رابطه ۱).

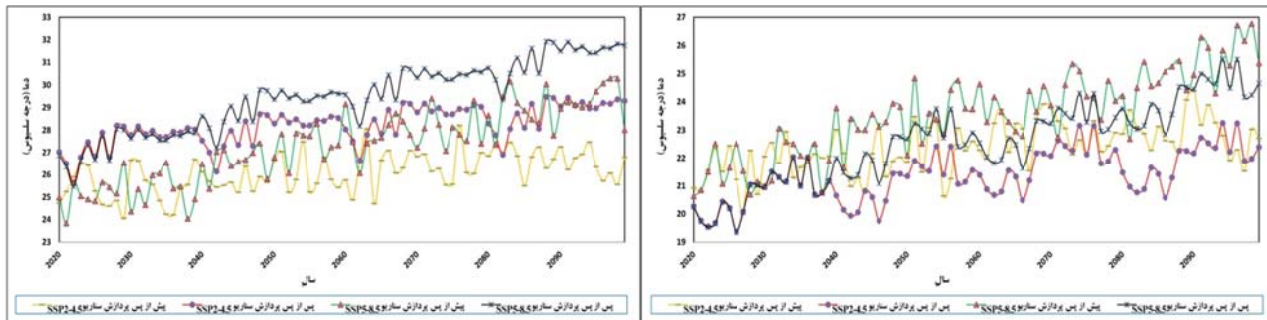
$$T_{contr}^{BC}(t) = P_{obs}(t) \quad (1)$$

$$T_{frc}^{BC}(t) = P_{obs}(t) \cdot \left[ \frac{\mu_m P_{frc}(t)}{\mu_m P_{contr}(t)} \right], \quad (2)$$

در روابط بالا، T دما است؛ contr تعداد سری‌های شبیه‌سازی‌شده GCM در طول دوره کنترل، obs دوره زمانی مشاهداتی و frc سری زمانی پیش‌نگری‌شده آینده است که باید اریبی آن حذف شود؛ BC سری زمانی پیش‌نگری‌شده آینده است که اریبی آن حذف شده است، t گام زمانی و  $\mu_m$  میانگین بلند مدت ماهانه است (مندز و همکاران، ۲۰۲۰).

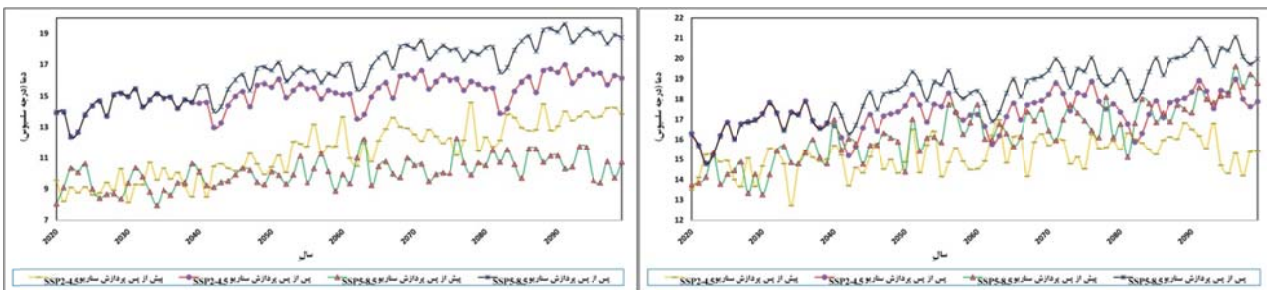
همان‌طور که گفته شد اریبی حذف‌شده داده‌ها با استفاده از روش DCF در ۴۳ ایستگاه همدید ایران انجام شد؛ شکل ۲ چشم‌انداز بلند مدت میانگین سالانه (۲۱۰۰-۲۰۲۰) هشت ایستگاه نماینده را برای DMO و DCF دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5 مبتنی بر برونداد مدل MRI-ESM2-0 نشان می‌دهد. همان‌طور که شکل نیز پیداست کاربست DMO برای ارزیابی اثرات تغییرات اقلیمی بر بی‌هنجاری دمای ایران تا پایان قرن حاضر دارای عدم قطعیت زیادی است؛ این عدم قطعیت در ایستگاه‌هایی با عرض جغرافیایی بالا همان تبریز نمود بیشتری دارد. لذا اعمال حذف اریبی بر روی داده‌های شبیه‌سازی‌شده توانسته است به مقدار زیادی عملکرد مدل را در شبیه‌سازی چشم‌انداز بلندمدت فراسنج دما افزایش دهد.

سناریوهای SSP باهدف مستندسازی پیش‌آگاهی‌های کمی از مسیرهای به‌اصطلاح مشترک اجتماعی-اقتصادی (The Shared Socioeconomic Pathways) SSPs هستند؛ این سناریوها بخشی از چارچوب جدید تغییرات جهانی هستند تا بر اساس آن تجزیه و تحلیل‌های یکپارچه‌ای از تأثیرات اقلیمی، آسیب‌پذیری‌ها، سیاست‌های مرتبط با سازگاری و تعدیل را ارائه دهند (فریم و همکاران، ۲۰۱۸). این سناریوها امکان اکتشاف سازمان‌یافته از چالش‌های مرتبط با سیاست‌های سازگاری و تعدیل احتمالی آینده را فراهم می‌آورند (ریاحی و همکاران، ۲۰۱۷). سناریوهای SSP بر اساس پنج رویکرد بنیادین توسعه پایدار، رقابت منطقه‌ای، نابرابری، توسعه سوخت‌های فسیلی و توسعه مبتنی بر سیاست‌های بینابین توصیف شده‌اند. این سناریوها در ۵ دسته قرار گرفتند که با عنوان SSP1 تا SSP5 شناخته می‌شوند؛ مفروضات SSP1 شامل مصرف پایدار، رشد پایین جمعیت، افزایش راندمان انرژی، جایگزینی سریع‌تر انرژی‌های تجدیدپذیر و همکاری بیشتر جهانی است. مفروضات SSP2 بیانگر شرایط حد واسط است؛ در این شرایط توسعه اجتماعی-اقتصادی همگام با شرایط معمول است. مفروضات SSP3 دنیایی را با چالش‌های زیاد برای سیاست‌های مرتبط با تعدیل، از جمله رشد بالای جمعیت که منجر به تقاضای بالای مواد غذایی و انرژی و رقابت منطقه‌ای می‌شود را در نظر می‌گیرد؛ چنین شرایطی مانع توسعه اجتماعی و فناوری می‌شود. مفروضات SSP4 دنیای بسیار نابرابر را با نابرابری در قدرت اقتصادی و سیاسی منعکس می‌کند که منجر به افزایش نابرابری در داخل و خارج کشورها در طول قرن بیست و یکم می‌شود. همچنین فرض می‌شود که درگیری و ناآرامی به‌طور فزاینده‌ای افزایش یابد. همچنین توسعه فناوری پیشرفته در بخش‌های مختلف زیاد است و سیستم انرژی متنوع خواهد بود. در نهایت دنیای SSP5، دنیایی پیشرفته و در عین حال با سوخت فسیلی است که در آن شیوه‌های زندگی پرانرژی به کار گرفته می‌شود (اونیل و همکاران، ۲۰۱۷؛ روزل و همکاران، ۲۰۱۸؛ استوک و



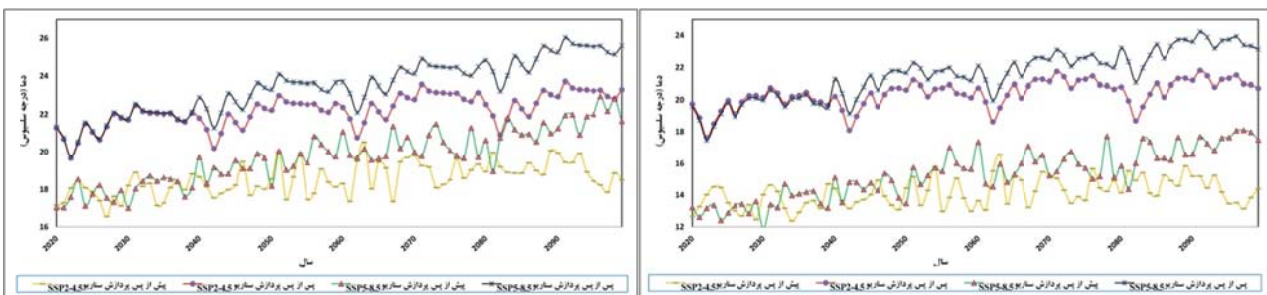
(ب)

(الف)



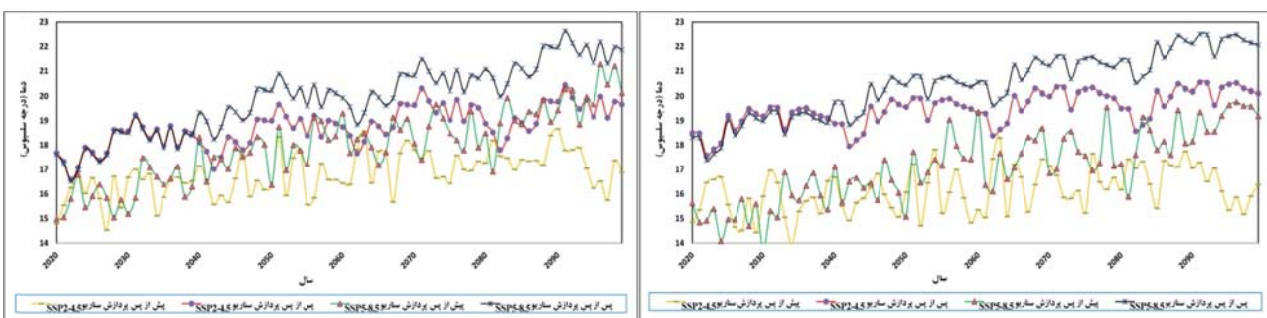
(د)

(ج)



(و)

(ه)



(ح)

(ز)

شکل ۲. چشم‌انداز بلندمدت (۲۰۲۰-۲۱۰۰) دمای ایران بر اساس خروجی DMO و DCF مبتنی بر برونداد مدل MRI-ESM2-0 تحت سناریوهای منتخب (الف) زاهدان؛ (ب) اهواز؛ (ج) مشهد؛ (د) تبریز؛ (ه) تهران؛ (و) یزد؛ (ز) بابلسر؛ ح) بیرجند.

از آزمون نا پارامتریک من-کندال (MK) استفاده شد. در این آزمون  $H_0$  نشان‌دهنده عدم وجود روند و  $H_1$  وجود روند را در سری زمانی داده‌ها نشان می‌دهد. آماره

۲-۲-۲. پایش روند و شیب روند دما با استفاده از آزمون‌های نا پارامتریک من-کندال و سنس برای بررسی تحلیل روند در سری زمانی بلندمدت داده‌ها

نسبت  $R^2$  به  $t$  می‌باشد ( $R^2/t$ ) نیز استفاده شد (احمدی و همکاران، ۱۳۹۸). با توجه به محدودیت تعداد صفحات مقاله شرح محاسباتی سنج‌های آماری ارائه نشد و علاقه‌مندان می‌توانند به منابع جاکوویدز (۱۹۹۸) و یا احمدی و همکاران (۱۳۹۸) مراجعه کنند.

### ۳. نتایج و بحث

#### ۳-۱. درستی‌سنجی مدل‌های منتخب CMIP6 برای

##### تغییرات دمای ایران

برای بررسی چشم‌انداز بلندمدت دمای ماهانه ایران تا پایان قرن حاضر از سه مدل با تفکیک افقی مناسب (۱۰۰ کیلومتر) BCC-CSM2-MR، CAMS-CSM1-0 و MRI-ESM2-0 استفاده شد. با توجه به تعداد زیاد ایستگاه‌های هم‌دید مورد مطالعه (۴۳ ایستگاه) از ارائه نتایج برای تمام ایستگاه‌ها خودداری و برای هر پهنه اقلیمی مبتنی بر روش دمارتن یک ایستگاه نماینده انتخاب و نتایج آن برای سه سنج RMSE، MBE و  $R^2$  در جدول ۲ ارائه شد. نتایج نشان داد که کمینه‌آرایی برای ایستگاه‌های نماینده اقلیمی خشک (چابهار)، نیمه‌خشک (قزوین) و خیلی مرطوب (بابلسر) به ترتیب ۰/۸۸۹، ۰/۲۶۰ و ۳/۳۴۷ درجه سلسیوس برای مدل MRI-ESM2-0 می‌باشد. همین نتیجه برای سنج RMSE نیز به دست آمده است. به‌طور کلی هر سه مدل منتخب فراسنج دما را در اقلیم نیمه‌خشک بهتر شبیه‌سازی کردند. ضریب تعیین برای ایستگاه‌های نماینده اقلیم نیمه‌خشک و خیلی مرطوب بر اساس مدل MRI-ESM2-0، ۰/۹۹۳ و ۰/۹۷۵ به دست آمده که نسبت به دو مدل دیگر مورد بررسی نتایج بهتری را ارائه داده است. تنها استثنا برای سنج  $R^2$  در مقایسه با دو سنج دیگر برای نماینده اقلیم خشک (چابهار) است که با مقدار ۰/۹۵۳ کمتر از دو مدل BCC-CSM2-MR و CAMS-CSM1-0 است. بر این اساس صلاحیت کلی مدل MRI-ESM2-0 برای ارزیابی ساختار دمای ماهانه ایران مورد تأیید قرار گرفته است.

استاندارد Z در آزمون من-کنندال از توزیع نرمال استاندارد با میانگین صفر و واریانس یک پیروی می‌کند و برای اندازه‌گیری روند استفاده می‌شود. در آزمون MK مقدار مثبت Z نشان‌دهنده روند صعودی است، در حالی که مقدار منفی آن نشان‌دهنده روند نزولی در سری زمانی است (لیو و همکاران، ۲۰۱۴). همچنین باید توجه داشت که در این آزمون عدم‌پذیرش  $H_0$  به این معنا نیست که روند در سری زمانی وجود ندارد در حقیقت نشان می‌دهد که شواهد موجود برای نتیجه‌گیری عدم‌وجود روند در سری زمانی کافی نیست (مغربی و آلتوایی، ۲۰۱۸). جهت برآورد شیب واقعی روند در سری زمانی، از روش نا پارامتریک سنس SSE (Sen's Slope Estimator) استفاده شد؛ این روش یکی از روش‌های بهینه در این زمینه می‌باشد (یو و هاشیو، ۲۰۰۳).

#### ۳-۲-۲. سنج‌های آماری درستی‌سنجی مدل‌های منتخب CMIP6

برای درستی‌سنجی مدل‌های منتخب CMIP6 در این پژوهش از سنج‌های آماری، ضریب تعیین ( $R^2$ )، میانگین خطای مطلق (MAE)، میانگین آریبی خطا (MBE) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شد. به این منظور دو دسته داده شامل دمای ۴۳ ایستگاه هم‌دید برونداد سه مدل BCC-CSM2-MR، CAMS-CSM1-0 و MRI-ESM2-0 از مجموعه مدل‌های CMIP6 برای دوره تاریخی (۲۰۰۹-۱۹۹۰) با تفکیک افقی ۱۰۰ کیلومتر مورد بررسی قرار گرفتند. سنج‌های RMSE و MBE به‌تنهایی برای انتخاب مدل بهینه کافی نمی‌باشند (جاکوویدز، ۱۹۹۸). بنابراین علاوه بر دو روش متداول RMSE و MBE که برای مقایسه و اختلاف نتایج مدل‌ها از آنها استفاده می‌شود، کاربست سنج سوم به نام  $t$  که ترکیبی از دو سنج فوق است، می‌تواند برای تصمیم‌گیری مدلی با بالاترین عملکرد مورد استفاده قرار گیرد؛ همچنین از سنج ترکیبی جدید ( $t$ ) که حاصل

جدول ۲. درستی سنجی مدل‌های منتخب CMIP6 در ارزیابی ساختار دمای ماهانه ایران (بر حسب درجه سلسیوس).

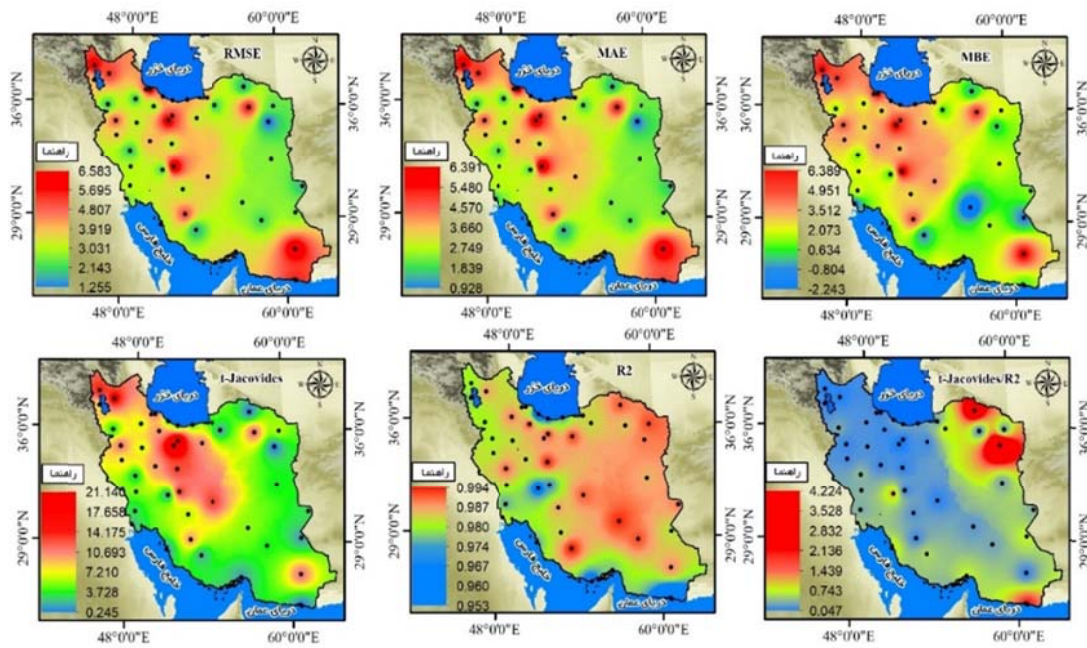
مدل	ایستگاه	نوع اقلیم	RMSE	MBE	R <sup>2</sup>
BCC-CSM2-MR	چابهار	خشک	۵/۵۴۳	۱/۹۴۳	۰/۹۷۵
	قزوین	نیمه‌خشک	۲/۹۷۶	۲/۸۱۵	۰/۹۸۸
	بابلسر	خیلی مرطوب	۴/۶۰	۳/۷۷	۰/۹۴۹
CAMS-CSM1-0	چابهار	خشک	۵/۴۹۶	۰/۹۳۲	۰/۹۶۰
	قزوین	نیمه‌خشک	۲/۷۵۸	۲/۴۱۱	۰/۹۸۵
	بابلسر	خیلی مرطوب	۵/۸۳۵	۵/۳۸۷	۰/۹۴۲
MRI-ESM2-0	چابهار	خشک	۵/۳۷۲	۰/۸۸۹	۰/۹۵۳
	قزوین	نیمه‌خشک	۲/۳۷۹	۲/۲۶۰	۰/۹۹۳
	بابلسر	خیلی مرطوب	۴/۲۱۲	۳/۳۴۷	۰/۹۷۵

### ۲-۳. درستی سنجی مدل MRI-ESM2-0 در ایران

شکل ۳ نتایج درستی سنجی MRI-ESM2-0 را برای ۴۳ ایستگاه همدید در ایران نشان می‌دهد. سنجه RMSE، بیشینه خطای مدل MRI-ESM2-0 را در پهنه‌های اقلیمی خیلی مرطوب (سواحل خزری) و بلندی‌های ایران (شمال غرب و ارتفاعات غربی ایران) به همراه کوهپایه‌های البرز و زاگرس با بیش از ۵ درجه سلسیوس نشان داده است که با توجه به مقدار بالای ضریب تعیین (R<sup>2</sup>) می‌توان اذعان داشت که بزرگی مقدار RMSE در مناطق اشاره شده دلیلی بر پایین بودن دقت مدل در پیش‌نگری دما نیست. در ناحیه خزری تراکم فضایی مناسبی از ایستگاه وجود ندارد و بیشتر ایستگاه‌های این پهنه از ایران با داده‌های طولانی مدت در سواحل قرار دارند. از طرف دیگر بارش زیاد و توپوگرافی پیچیده نیز مهم‌ترین دلایل افزایش خطا در این پهنه اقلیمی ایران است. پهنه‌های اقلیمی خشک و نیمه‌خشک ایران به خصوص مناطق شرقی و داخلی کمترین مقدار RMSE را نشان دادند. بر این اساس می‌توان اذعان داشت مدل MRI-ESM2-0 در پهنه‌های اقلیمی خشک و نیمه‌خشک عملکرد بهتری را برای دما دارد. سنجه‌های میانگین مطلق خطا و میانگین

اریبی خطا به ترتیب بین ۰/۹۲۸ و ۶/۳۹۱ و ۲/۲۴۳- تا ۶/۳۸۹ محاسبه شد. هر دو سنجه MAE و MBE بهترین عملکرد را در مناطق خشک و نیمه‌خشک داخلی و شرقی ارائه دادند. همچنین بیشینه اریبی مدل در شمال غرب، سواحل خزری و مناطق کوهستانی ایران مشاهده شد. مقدار اریبی مدل در ایستگاه‌های زاهدان، کرمان، فسا و آبادان منفی محاسبه شد که این مقدار منفی نشانگر کم برآورد دما توسط مدل در این ایستگاه‌هاست. مقدار اریبی مدل در دزفول، بوشهر، خرم‌آباد، اهواز، چابهار، بندرانزلی، بندرعباس، همدان، بندرلنگه، ارومیه، فسا و زابل کمتر از ۲ درجه سلسیوس به دست آمده است که نشان دهنده عملکرد بالاتر مدل و همچنین دقت خوب مدل در پیش‌نگری مقدار واقعی دما در ایستگاه‌ها را دارد. تبریز، شهرکرد، سبزوار، یزد، ایرانشهر، کاشان و دوشان تپه مقدار اریبی بیش از ۶ درجه سلسیوس را نشان دادند که به غیر از سه ایستگاه ایرانشهر و کاشان که در مناطق داخلی ایران قرار گرفتند سایر ایستگاه‌ها در عرض‌های جغرافیایی بالا و مناطق کوهستانی ایران هستند که علت آن تغییرپذیری بالای دما در مناطق کوهستانی است.





شکل ۳. درستی‌سنجی مدل MRI-ESM2-0 از سری مدل‌های CMIP6 مبتنی بر سنج‌های آماری منتخب در ۴۳ ایستگاه هم‌دید ایران.

در ۲۰۲۰) در جدول ۳ ارائه شد. کمیته دمای ماهانه ایران در دوره مشاهداتی ۵/۶۴ درجه سلسیوس در ماه ژانویه و بیشینه دما ۲۹/۲۱ درجه سلسیوس در ماه جولای برآورد شد. همچنین کمیته دمای ماهانه ایران طی دوره پیش‌نگری‌شده آینده (۲۰۲۰-۲۱۰۰) تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به ترتیب ۷/۱۴ و ۸/۳۳ به دست آمده است. بیشینه دما نیز همانند دوره مشاهداتی در دوره پیش‌نگری‌شده آینده در ماه جولای به ترتیب برای سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 ۳۱/۵۸ و ۳۲/۷۶ درجه سلسیوس محاسبه شد. متوسط بی‌هنجاری دما بر اساس سناریو SSP2-4.5 در ۹ ماه از سال بیشتر از ۲ درجه سلسیوس و در سه ماه ژانویه، نوامبر و دسامبر که جزو ماه‌های سرد سال محسوب می‌شوند کمتر از ۲ درجه سلسیوس است. کمیته بی‌هنجاری تحت سناریو SSP2-4.5 ۱/۴۹ درجه سلسیوس در ماه ژانویه و بیشینه بی‌هنجاری تحت همین سناریو با ۲/۷۲ درجه سلسیوس در ماه ژوئن محاسبه شد. متوسط بی‌هنجاری برای سناریو SSP5-8.5 در ۱۰ ماه از سال بیش از ۳ درجه سلسیوس و در دو ماه ژانویه و مارس از فصل زمستان به ترتیب ۲/۶۷ و ۲/۱۹ درجه سلسیوس محاسبه شد. بر اساس نتایج سناریو

بررسی مقادیر ضریب تعیین ( $R^2$ ) بین دمای مدل MRI-ESM2-0 و داده‌های مشاهداتی در ایستگاه‌ها بیانگر دقت مناسب مدل در مناطق مختلف ایران است. مقدار  $R^2$  در تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه بالای ۰/۹ است به طوری که مقدار آن بین ۰/۹۵۳ تا ۰/۹۹۴ در تغییر است. مناطق ساحلی شمال و جنوب ایران کمیته ضریب تعیین با کمتر از ۰/۹۶ را برای مدل MRI-ESM2-0 نشان دادند. ۲۴ ایستگاه که بیشتر آنها در مناطق داخلی ایران قرار دارند ضریب تعیین بالای ۰/۹۹ دارند. کمیته  $R^2$  در ایستگاه بوشهر با ۰/۹۳۷ و بیشینه  $R^2$  در ایستگاه اراک با ۰/۹۹۸ محاسبه شد. T-Jacovides نیز همانند سنج‌های پیشین در مناطق داخلی، شرقی و غرب ایران بالاترین عملکرد را دارد. مناطق مرتفع کوهستانی و شمال‌غرب ایران بالاترین خطا را بر اساس سنج  $\epsilon$  نشان دادند.

### ۳-۳. اطلاعات آماری دمای ماهانه ایران مبتنی بر داده‌های مشاهداتی و آینده

میانگین تغییرات آماری دمای ماهانه ایران همراه با روند (در جدول Z) و شیب روند (Q) و بی‌هنجاری دمای هر ماه در دوره مشاهداتی (۱۹۹۰-۲۰۰۹) و آینده (۲۰۱۰-۲۱۰۰)

ایران با ۲/۳۶- درجه سلسیوس در ماه ژانویه و بیشینه دما در ۲۳/۶۶ درجه سلسیوس در ماه مارس در جنوب شرق ایران به دست آمده است. کمینه دمای ایران بر پایه داده-های ایستگاهی تنها در ماه ژانویه و فوریه منفی است و در سایر ماه‌های سال این مقدار بالای صفر به دست آمده است. الگوی فضایی دما در فصل زمستان نقش مؤثر مؤلفه‌های جغرافیایی را به تصویر کشیده؛ به طوری که با نگاه به اولیه به توزیع مکانی دما نقش ارتفاع و سپس عرض جغرافیایی مشخص می‌شود.

در فصل بهار و تابستان (شکل ۴) الگوی مکانی دما مشابه فصل زمستان است؛ در این فصل شیب تغییرات مکانی دما در ایران از جنوب به شمال و غرب به شرق افزایشی است. در فصل بهار کمینه دما به ترتیب در ماه‌های آوریل تا ژوئن ۱۰/۴۴، ۱۴/۵۲ و ۱۹/۳۸ درجه سلسیوس و بیشینه دما نیز ۲۷/۸۳، ۳۳/۳۶ و ۳۶/۸۴ درجه سلسیوس به دست آمده است. بر عکس فصل بهار در تابستان کمینه و بیشینه دما از جولای تا سپتامبر به ترتیب ۲۳/۳۱، ۲۲/۳۰، ۱۸/۰۰ و ۳۸/۱۶، ۳۳/۳۷، ۷۱/۵۴ درجه سلسیوس محاسبه شد. بیشینه دما در فصل تابستان در استان خوزستان مشاهده می‌شود.

بدینانه SSP5-8.5 بیشینه بی‌هنجاری با ۳/۹۰ درجه سلسیوس در ماه ژوئن به دست آمده است. روند کلی دمای ایران برای دوره پیش‌نگری شده آینده در سطح ۹۹ درصد معنی‌دار است. متوسط شیب روند دما بر اساس نتایج آزمون نا پارامتریک سنس (SSE) به ترتیب برای سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در ایران ۰/۰۲ و ۰/۰۵ درجه سلسیوس (year<sup>-1</sup>) است. همچنین بیشینه شدت روند بر اساس نتایج آزمون نا پارامتریک من-کندال (Mann-Kendall) M-K در هر دو سناریو مورد مطالعه در ماه جولای به دست آمده است.

### ۳-۴. توزیع زمانی-مکانی دمای ماهانه بر پایه داده‌های ایستگاه‌های همدید (۱۹۹۰-۲۰۰۹)

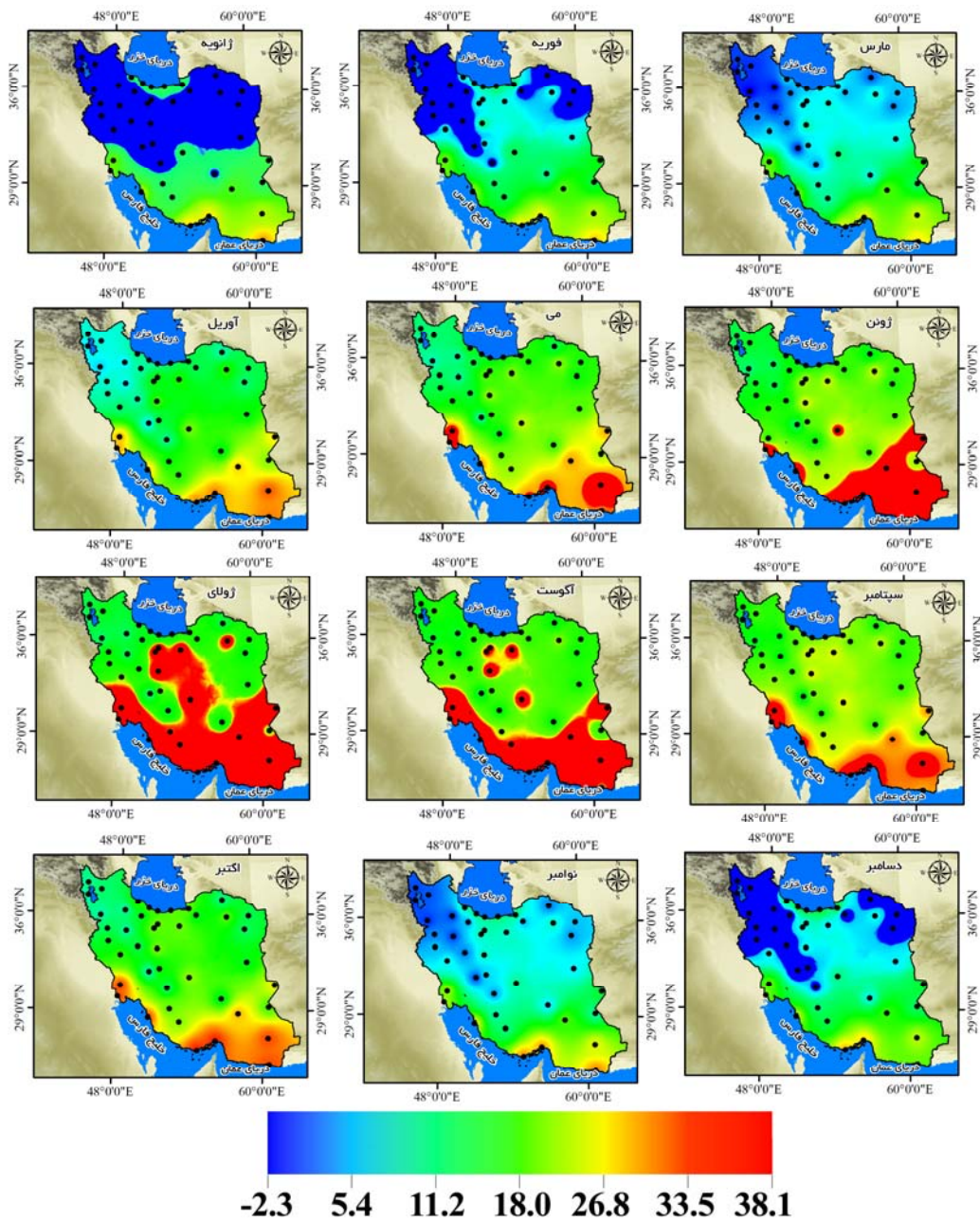
توزیع زمانی-مکانی دمای ماهانه ایران طی دوره مشاهداتی (۱۹۹۰-۲۰۰۹) در شکل ۴ نشان داده شد. دمای ایران تحت تأثیر مستقیم توپوگرافی است به طوری که در تمامی ماه‌های مورد مطالعه کمینه دما در مناطق مرتفع شمال‌غرب، شمال‌شرق، رشته‌کوه‌های البرز و زاگرس محاسبه شد. در فصل زمستان کمینه دما در شمال‌غرب

جدول ۳. میانگین اطلاعات آماری طی دوره مشاهداتی (۱۹۸۰-۲۰۱۸) و پیش‌نگری‌شده (۲۰۲۰-۲۱۰۰) تحت سناریوهای SSP. (دماها و بی‌هنجاری‌ها برحسب درجه سانتیگراد و روندها درجه سانتیگراد بر سال است).

ماه	مشاهداتی	سناریو SSP2-4.5				سناریو SSP5-8.5			
		دما	بی‌هنجاری	Z	Q	دما	بی‌هنجاری	Z	Q
ژانویه	۵/۶۵	۷/۱۴	۱/۴۹	۲/۴۸	۰/۲۰	۸/۳۳	۲/۶۷	۵/۴۰	۰/۰۵
فوریه	۷/۵۰	۹/۶۷	۲/۱۷	۳/۵۵	۰/۲۰	۱۰/۸۶	۳/۳۶	۶/۵۱	۰/۰۶
مارس	۱۱/۸۹	۱۳/۹۰	۲/۰۰	۳/۸۹	۰/۳۰	۱۵/۰۸	۲/۱۹	۶/۶۸	۰/۰۶
آوریل	۱۷/۴۱	۱۹/۴۶	۲/۰۵	۳/۱۹	۰/۰۲	۲۰/۶۵	۳/۲۴	۶/۳۱	۰/۰۵
می	۲۲/۳۲	۲۴/۵۷	۲/۲۴	۳/۹۰	۰/۰۳	۲۵/۷۶	۳/۴۳	۷/۱۸	۰/۰۵
ژوئن	۲۶/۵۷	۲۹/۲۹	۲/۷۲	۴/۴۲	۰/۰۲	۳۰/۴۸	۳/۹۰	۸/۰۰	۰/۰۵
جولای	۲۹/۲۱	۳۱/۵۸	۲/۳۶	۴/۶۴	۰/۰۲	۳۲/۷۶	۳/۵۵	۸/۳۳	۰/۰۵
اوت	۲۸/۳۲	۳۰/۸۸	۲/۵۶	۴/۴۷	۰/۰۲	۳۲/۰۷	۳/۷۴	۸/۰۲	۰/۰۵
سپتامبر	۲۴/۵۴	۲۶/۸۱	۲/۲۶	۴/۵۴	۰/۰۲	۲۷/۹۹	۳/۴۴	۸/۰۸	۰/۰۵
اکتبر	۱۹/۰۰	۲۱/۱۸	۲/۱۸	۴/۳۱	۰/۰۲	۲۲/۳۷	۳/۳۷	۷/۷۷	۰/۰۶
نوامبر	۱۲/۶۸	۱۴/۵۸	۱/۹۰	۳/۴۹	۰/۰۱	۱۵/۷۷	۳/۰۹	۶/۹۲	۰/۰۵
دسامبر	۷/۶۷	۹/۵۷	۱/۹۰	۲/۵۰	۰/۰۲	۱۰/۷۶	۳/۰۹	۵/۴۵	۰/۰۵

مکانی دما کمتر است و تباین دما در پهنه‌های مختلف اقلیمی نسبت به یکدیگر افزایشی است؛ اما در دوره گرم سال به دلیل استقرار پرفشار جنب حاره و تابش شدید خورشید، تباین حرارتی به شدت کاهش می‌یابد (احمدی و همکاران، ۱۳۹۷). بیشینه دما در فصل پاییز در سواحل جنوبی ایران مشاهده می‌شود که در تمامی ماه‌های سال این مقدار بیش از ۲۰ درجه سلسیوس است.

در فصل پاییز (شکل ۴) تغییرپذیری دما در ایران الگویی زمستانه ارائه داده است. کمینه دما از ۱۲/۵۶ درجه سلسیوس در ماه اکتبر به ۰/۵۵ درجه سلسیوس در ماه دسامبر می‌رسد. مقدار بیشینه دما نیز به ترتیب برای ماه‌های فصل پاییز از اکتبر تا دسامبر به ترتیب ۲۹/۱۶، ۲۴/۷۵ و ۲۰/۴۳ درجه سلسیوس به دست آمده است. شمال غربی ایران کانون اصلی دمای کمینه در فصل پاییز است. به طوری کلی در ماه‌های سرد سال همگنی



شکل ۴. تغییرات ماهانه دمای ایران بر اساس داده‌های ایستگاه‌های همدید طی دوره آماری ۲۰۰۹-۱۹۹۰.

## ۳-۵. توزیع زمانی-مکانی بی‌هنجاری ماهانه دمای

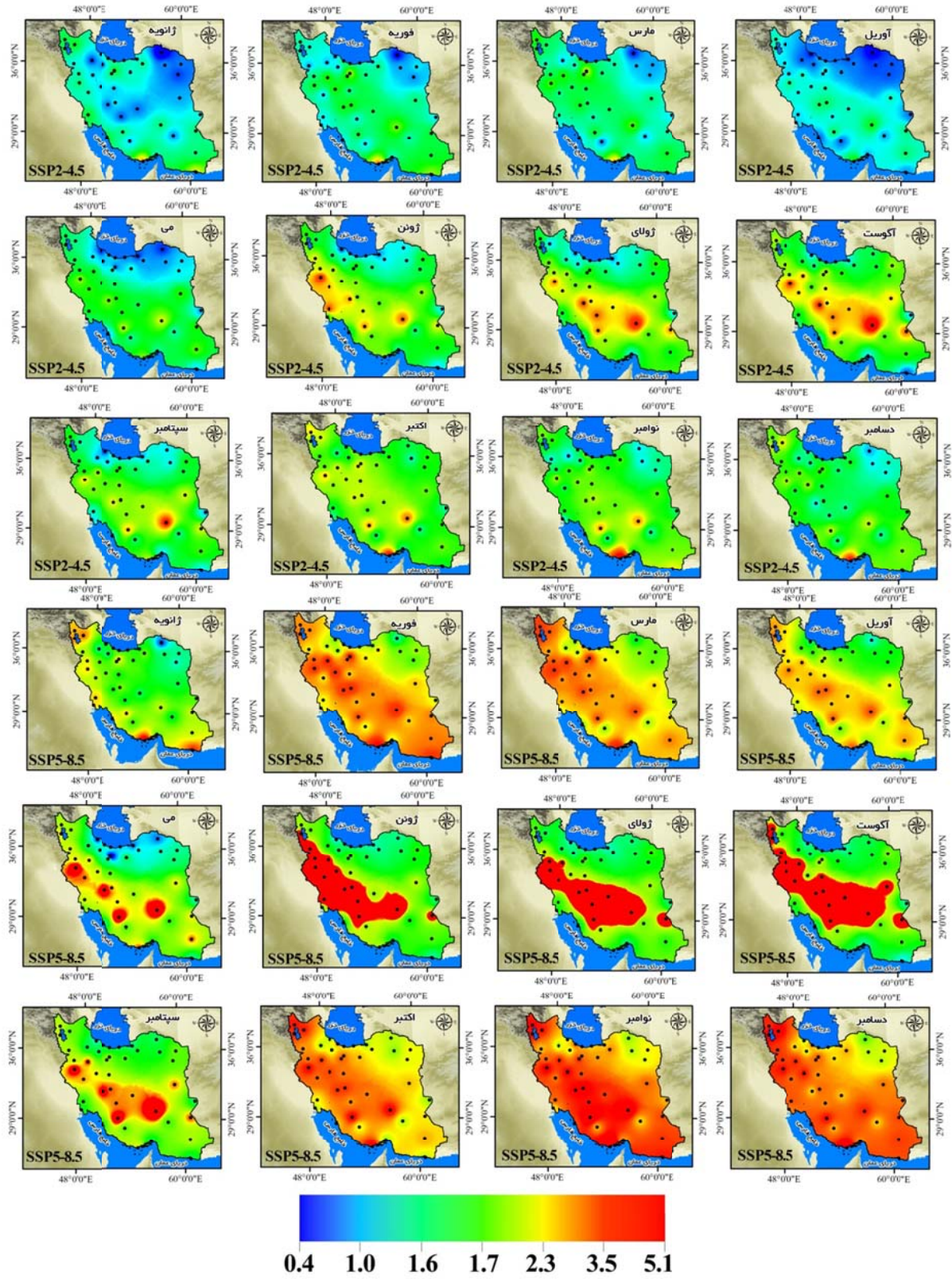
## ایران مبتنی بر پرونداد مدل MRI-ESM2-0

شکل ۵ بی‌هنجاری زمانی-مکانی ماهانه دمای ایران را تحت دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5 تا پایان قرن حاضر (۲۱۰۰-۲۰۲۰) نشان می‌دهد. بیشینه بی‌هنجاری دما در فصل زمستان تحت سناریو SSP2-4.5  $3/06$  درجه سلسیوس در ماه فوریه محاسبه شد. سواحل جنوبی ایران و ایستگاه‌های واقع در زاگرس و البرز بیشینه بی‌هنجاری دما را دارند. کمینه بی‌هنجاری در ژانویه  $0/48$ ، فوریه  $1/36$  و مارس  $1/35$  درجه سلسیوس در شمال شرقی ایران محاسبه شد. مناطق داخلی، شرقی و غربی ایران، بی‌هنجاری دما بین ۱ تا ۲ درجه سلسیوس در تغییر است. نتایج سناریو SSP5-8.5 برای فصل زمستان نشان داد کمینه دما به ترتیب  $1/53$  درجه سلسیوس در ماه ژانویه و  $2/40$  درجه سلسیوس در ماه‌های فوریه و مارس محاسبه شد. بیشینه بی‌هنجاری دما نیز در ماه فوریه با مقدار  $4/13$  درجه سلسیوس محاسبه شد. ایستگاه‌های نوار غربی ایران به‌همراه ایستگاه‌های مرتفع واقع در زاگرس کانون اصلی بیشینه بی‌هنجاری دما شناسایی شدند. شکل‌شناسی زمین مانند کوه‌ها، دامنه‌ها و جهت‌گیری آنها به شدت در تغییر پذیری فصلی دما در ایران تأثیر می‌گذارند که با نتایج لو و همکاران (۲۰۰۶) مطابقت دارد. همچنین یان و لیو (۲۰۱۴) نیز بی‌هنجاری مثبت دما را در مناطق کوهستانی در سراسر جهان مورد تأیید قرار دادند.

فصل بهار (شکل ۵) بی‌هنجاری دما تغییرات افزایشی را نشان داده است. همانند فصل زمستان سناریو SSP5-8.5 به دلیل رویکرد بدبینانه نسبت به سناریوی خوش‌بینانه SSP2-4.5 مقدار دمای بیشتری را برای ایران تا پایان قرن حاضر پیش‌نگری کرده است. کانون اصلی بیشینه بی‌هنجاری در فصل بهار تحت هر دو سناریو در غرب و جنوب غرب ایران به‌همراه ایستگاه‌های فسا، شیراز، آباده و کرمان به‌دست آمده است. بیشینه بی‌هنجاری فصل بهار در ماه ژوئن برای سناریو SSP2-4.5  $3/76$  و برای سناریو

SSP5-8.5،  $5/11$  درجه سلسیوس محاسبه شد. در این فصل کمینه بی‌هنجاری دما، بالاتر از مدار  $36$  درجه شمالی قرار گرفته است که می‌توان به ایستگاه‌های بجنورد، سبزوار، شاهرود، گرگان، بابلسر، رامسر، رشت و انزلی اشاره کرد. در فصل تابستان بی‌هنجاری دما در ایران تحت هر دو سناریو SSP2-4.5 و SSP5-8.5 مقدار بیشینه را در بین تمامی ماه‌های سال دارند. سناریو حد واسط SSP2-4.5 نشان داد، بیشینه دما تا پایان قرن حاضر در ایران  $3/91$  درجه سلسیوس افزایش خواهد داشت و در حالت بدبینانه (SSP5-8.5) این مقدار  $5/11$  درجه سلسیوس خواهد بود. کانون اصلی این بی‌هنجاری شدید دما در ایستگاه‌های مرتفع کوهستانی است. در فصل تابستان کانون اصلی بیشینه بی‌هنجاری دما در منطقه‌ای بین کرمان، آباده، شیراز و فسا قرار دارد؛ اما در دوره سرد سال (فصول زمستان و پاییز) شمال غربی ایران به‌همراه ایستگاه‌های واقع در زاگرس و البرز (البرز میانی و جنوبی) کانون اصلی روند افزایشی دما خواهند بود.

در فصل پاییز بی‌هنجاری دمای ایران به نسبت دوره گرم سال کمتر خواهد بود. بیشینه و کمینه بی‌هنجاری دما در فصل پاییز مبتنی بر سناریو SSP2-4.5 در ماه نوامبر با  $1/31$  و  $3/24$  درجه سلسیوس محاسبه شد؛ اما برای سناریو SSP5-8.5 کمینه بی‌هنجاری دما  $2/37$  درجه سلسیوس در ماه دسامبر و بیشینه بی‌هنجاری دما با  $4/31$  درجه سلسیوس در ماه نوامبر به‌دست آمده است. کمینه بی‌هنجاری دما در شمال شرق ایران و جنوب غربی دریای خزر تا زنجان و قزوین دیده می‌شود. مناطق داخلی ایران تحت سناریو SSP2-4.5 بی‌هنجاری ۱ تا ۲ درجه سلسیوسی و تحت سناریو SSP5-8.5 بی‌هنجاری ۲ تا ۳ درجه سلسیوسی را نشان دادند. این مقدار از بی‌هنجاری به‌خصوص در ایستگاه‌های مرتفع ایران در دوره سرد سال یک زنگ خطر جدی برای منابع آبی کشور تلقی می‌شود و توجه نکردن به آن می‌تواند عواقب جبران‌ناپذیری را برای منابع آب کشور به‌همراه داشته باشد.



شکل ۵. چشم‌انداز بلندمدت (۲۱۰۰-۲۰۲۰) بی‌هنجاری ماهانه دمای ایران مبتنی بر برونداد مدل MRI-ESM2-0.

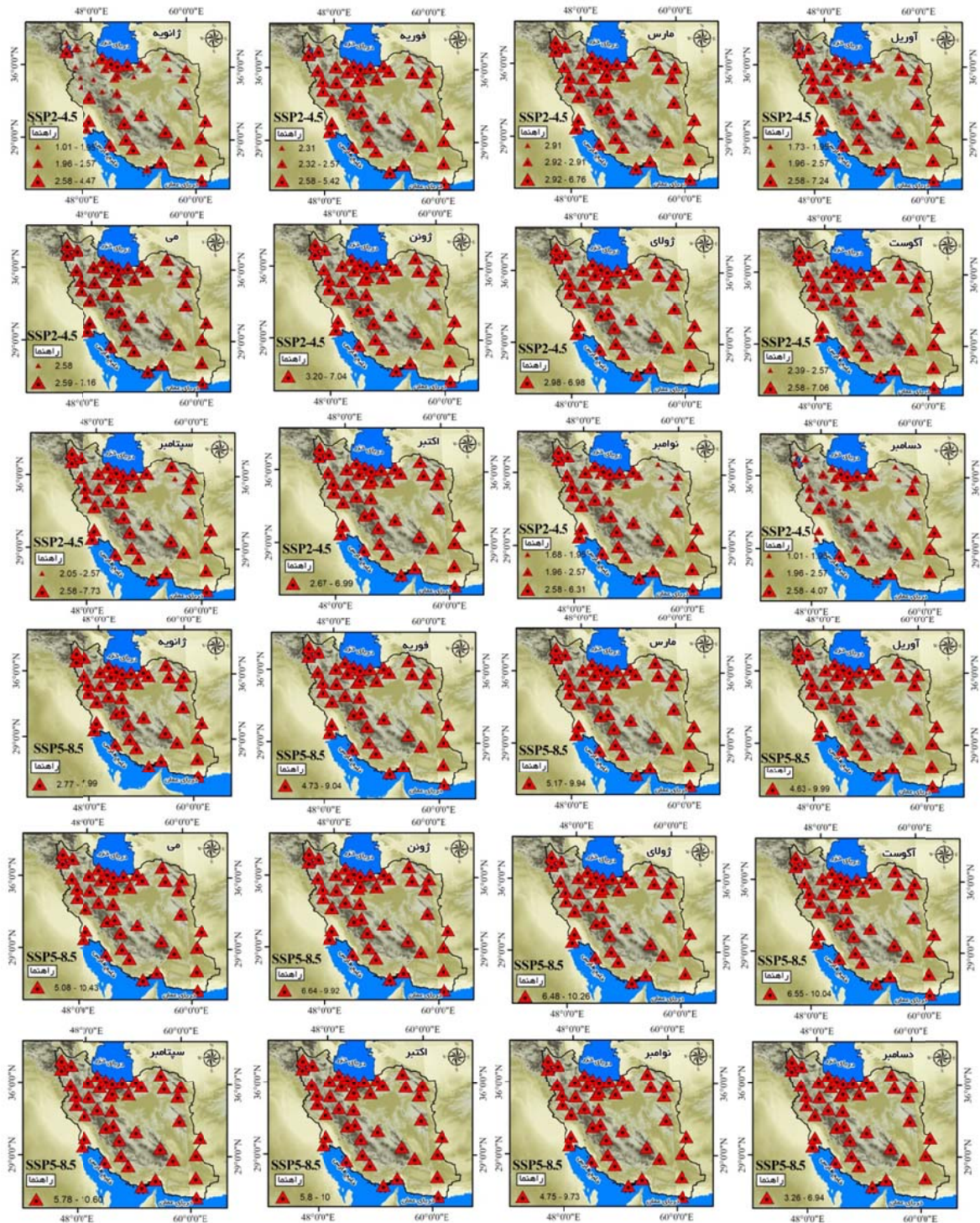
### ۳-۶. روند ماهانه دمای آینده ایران بر اساس مدل MRI-ESM2-0 با آزمون نا پارامتریک من-کنندال (M-K)

شکل ۶ روند دمای ایران را در چشم‌انداز بلندمدت (۲۱۰۰-۲۰۲۰) تا پایان قرن حاضر نشان می‌دهد. در راهنمای نقشه‌های ارائه شده مقادیر روند برحسب معنی‌داری مرتب شده‌اند (۰ تا ۱/۹۶ فاقد روند معنی‌دار افزایشی، ۱/۹۶ تا ۲/۵۷ روند معنی‌دار افزایشی در سطح ۰/۵ و بیشتر از ۲/۵۷ روند معنی‌دار افزایشی در سطح ۰/۱). میانگین دما طی ۸۰ سال آینده در ایران روند سراسر افزایشی را نشان می‌دهد. این مقدار روند از نظر شدت در سناریو بدبینانه SSP5-8.5 سراسر افزایشی و در سطح ۰/۱ در تمامی ماه‌ها معنی‌دار است. بیشینه شدت روند با نمره Z، ۱۰/۶۰ در ماه سپتامبر و کمینه شدت روند با مقدار ۲/۷۷ در ماه ژانویه محاسبه شد.

در ماه ژانویه برای سناریو SSP2-4.5 ایستگاه‌های سبزوار، شهرکرد، اراک، کرمانشاه، سنندج، سقز، زنجان، همدان، نوژه و خوی فاقد روندی معنی‌دار افزایشی (نمره Z ۱/۹۵-۱/۰۱) هستند. بیشینه شدت روند در ماه ژانویه در سواحل خزری و پایین‌تر از مدار ۲۹ درجه شمالی قرار دارد. در ماه فوریه تنها ایستگاه خوی در سطح ۰/۵ دارای روند افزایشی است و سایر ایستگاه‌ها روند معنی‌دار افزایشی را در سطح ۰/۱ نشان دادند. روند ماه مارس نیز کاملاً افزایشی است به طوری که کمینه نمره Z ۲/۹۱ و بیشینه آن ۶/۷۶ محاسبه شد.

ماه‌های می و ژوئن روند معنی‌دار افزایشی در سطح ۰/۱ را برای هر ۴۳ ایستگاه مورد مطالعه را نشان دادند. ایستگاه‌های خوی، شهرکرد و کاشان در فصل بهار فاقد روند افزایشی معنی‌دار هستند و ۴۰ ایستگاه دیگر روند افزایشی معنی‌دار را در سطح ۰/۵ و ۰/۱ دارند. بیشینه شدت روند افزایشی در رشته‌کوه البرز، زاگرس و شمال‌غرب ایران مشاهده می‌شود که بی‌هنجاری دما نیز

همین را امر تأیید می‌کند. ماه جولای کمینه شدت روند را ۲/۹۸ و بیشینه آن را ۶/۹۶ نشان داد. در اوت و سپتامبر نیز روند معنی‌دار افزایشی در سطوح ۰/۱ و ۰/۵ مشاهده شد. با شروع فصل پاییز از شدت روند افزایشی دما در ایران کاسته شد؛ به طوری که بیشینه نمره Z محاسباتی در ۴۳ ایستگاه که اریبی آن حذف شد از اکتبر تا دسامبر از مقدار شدت روند کاسته شد. بیشینه روند نمره Z در اکتبر ۶/۹۹، در نوامبر ۶/۳۱ و در دسامبر ۴/۰۷ محاسبه شد. همین امر برای کمینه نمره Z در ماه‌های فصل پاییز نیز صادق است؛ به طوری که این مقدار در اکتبر ۲/۶۷، نوامبر ۱/۶۸ و دسامبر ۱/۰۱ به دست آمده است. از بین ایستگاه‌های مورد مطالعه فقط سبزوار و بجنورد در شمال-شرق ایران در ماه‌های نوامبر و دسامبر فاقد روند معنی‌دار افزایشی هستند و در سایر ایستگاه‌ها روند معنی‌دار افزایشی در سطوح ۰/۵ و ۰/۱ دیده می‌شود. در ماه دسامبر از فصل پاییز بر اساس نتایج سناریو SSP2-4.5 ایستگاه‌هایی با روند معنی‌دار افزایشی در سطح ۰/۵ در مرزهای غربی ایران از شمال‌غرب تا جنوب‌غرب کشیده شدند. همانند فصل زمستان در ماه دسامبر ایستگاه‌هایی با روند افزایشی معنی‌دار در سطح ۰/۱ در سواحل خزری، جنوب شرقی و سواحل جنوبی ایران دیده می‌شوند. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد؛ چشم‌انداز روند دما بر اساس نتایج سناریو بدبینانه SSP5-8.5 در ایران تا پایان قرن حاضر سراسر افزایشی و در سطح ۰/۱ معنی‌دار است. از نظر شدت روند سناریو SSP5-8.5 از همان الگوی کلی سناریو SSP2-4.5 پیروی می‌کند. به طور کلی ایستگاه‌هایی که بالاتر از مدار ۳۶ درجه شمالی قرار دارند کانون اصلی روند افزایشی دما در ایران تا پایان قرن حاضر هستند. پژوهش‌هایی همچون عزیزاده و همکاران (۲۰۱۶) نشان دادند که روند صعودی دما در ایران مؤید افزایش امواج گرمایی است؛ که انتظار می‌رود در آینده نیز با توجه به روند سراسر افزایشی دما؛ امواج گرمایی نیز روندی افزایشی داشته باشند.



شکل ۶. روند بلندمدت (۲۰۲۰-۲۱۰۰) دمای ایران بر اساس مدل MRI-ESM2-0 با آزمون نا پارامتریک من-کندال (M-K).

۴. بحث و نتیجه‌گیری

مدل MRI-ESM2-0 در بین سه مدل یادشده می‌باشد؛ بنابراین مدل MRI-ESM2-0 به‌عنوان مدل منتخب جهت پیش‌نگری دمای آتی کشور تحت دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 انتخاب شد. نتایج درستی‌سنجی مدل MRI-ESM2-0 نتایج متفاوتی را برای پهنه‌های

این مطالعه روند و بی‌هنجاری چشم‌انداز بلندمدت دما (۲۰۲۰-۲۱۰۰) را در ایران مبتنی بر برونداد مدل‌های CMIP6 تحت سناریوهای SSP مورد مطالعه قرارداد؛ سنج‌های آماری محاسبه‌شده نشان‌دهنده عملکرد بهتر

مختلف اقلیمی در ایران نشان داد؛ به طوری که پهنه‌های اقلیمی خیلی مرطوب و بلندی‌های ایران به همراه کوهپایه‌های البرز و زاگرس بیشینه مقدار خطا را دارند. علت اصلی خطا را می‌توان در تفکیک افقی زیاد مدل برای این پهنه‌های ناهمگن دانست. در واقع برای مطالعات دقیق‌تر در این پهنه‌ها ریزمقیاس کردن برون‌داد مدل‌ها الزامی است. همچنین در تمامی ایستگاه‌ها بیش از ۹۰ درصد پراش موجود در داده‌های مدل با داده‌های ایستگاهی تبیین شده است. سپس حذف اریبی دمای ماهانه ایران با استفاده از روش تغییر عامل دلتا (DCF) تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 تا پایان قرن حاضر انجام شد.

ساختار دمای ایران در دوره مشاهداتی و آینده از یک الگوی زنگدیس پیروی می‌کند؛ بیشینه و کمینه دمای ایران به ترتیب با ۲۹/۲۱ و ۵/۵۶ درجه سلسیوس در ماه‌های جولای ژانویه محاسبه شد. بی‌هنجاری بلندمدت (۲۱۰۰-۲۰۲۰) چشم‌انداز دمای ایران مبتنی بر سناریو حد واسط SSP2-4.5 در سردترین ماه سال (ژانویه) ۱/۴۹ درجه سلسیوس و سناریو بدبینانه (SSP5-8.5) ۲/۶۷ درجه سلسیوس است. در گرم‌ترین ماه سال (جولای) نیز به ترتیب برای سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 دما در آینده به ترتیب ۲/۳۶ و ۳/۵۵ درجه سلسیوس افزایش خواهد داشت. متوسط روند دما مبتنی بر اساس آزمون نا پارامتریک من-کندال (M-K) در ایران در تمامی ماه‌ها و سناریوهای مورد مطالعه افزایشی و این مقدار به جهت آماری در سطح آلفا ۰/۱ معنی‌دار است. شیب روند نیز که با استفاده از آزمون نا پارامتریک سنس (SSE) مورد سنجش قرار گرفت؛ تحت سناریو SSP2-4.5 به طور متوسط  $0.02 \text{ year}^{-1}$  درجه سلسیوس و بر اساس سناریو SSP5-8.5، به طور متوسط  $0.05 \text{ year}^{-1}$  درجه سلسیوس افزایش خواهد داشت.

بی‌هنجاری دما بر اساس سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به ترتیب بین ۱/۴۹ تا ۲/۷۲ و ۲/۱۹ تا ۳/۹۰ درجه سلسیوس افزایش خواهد یافت. نتایج این مطالعه، از

نظر تغییرپذیری دما در آینده عمدتاً با مطالعات پیشین درباره تغییرات اقلیمی در ایران مطابقت دارد (سلطانی و همکاران، ۲۰۱۶؛ احمدی و همکاران، ۱۳۹۸؛ فلاح‌قاله‌ری و همکاران، ۲۰۱۹). تغییرپذیری آبی دما به احتمال زیاد چالش‌های مدیریت آب را در ایران افزایش خواهد داد. به جهت مکانی، پیشینه تغییرپذیری دمای ماهانه به ترتیب در نواحی کوهستانی ارتفاعات زاگرس و البرز مشاهده شد. به عبارت دیگر بالاترین نرخ تغییرپذیری دمای ماهانه در دوره سرد سال به ویژه در مناطق کوهستانی مشاهده شد. یکی از دلایل این تغییرپذیری بالا می‌تواند ناشی از هدایت توده‌های هوای مختلف در فصل سرد سال به ایران باشد. علاوه بر آنچه گفته شد؛ در مناطق مرتفع کوهستانی به علت ضخامت کمتر جو تغییرپذیری دما بالاتر است. تغییرپذیری پایین دما در سواحل کشور، می‌تواند به دلیل رطوبت بالا در تمامی ماه‌های سال، نوسان پایین دمای شب و روز و نزدیکی به دریا باشد. روند صعودی دما در تمامی مناطق ایران مشاهده شد؛ اما شدت روند در مناطق مختلف ایران متفاوت است. این نتیجه پیش‌تر توسط عزیزاده چوبری و نجفی (۱۳۹۶) مورد تأیید قرار گرفت. نتایج این پژوهش برای مدیریت منابع آب، انرژی، گسترش فصل رشد، افزایش رخدادهای فرین و حیات موجودات زنده بسیار مهم است؛ اما با این حال باید توجه داشت GCMها تصویری محتمل از تغییرات اقلیمی جهانی را ارائه می‌دهند؛ اما پدیده‌های مهم جوی همچون SOI، El Niño، سامانه‌های مونسون و یا مسیر طوفان‌های عرض‌هایی میانی کره زمین با عدم قطعیت زیادی در این مدل‌ها همراه هستند. لذا مدل‌های گردش کلی جو بدون حذف اریبی نمی‌توانند نمایانگر تغییرات این پدیده‌ها باشند و باید در نظر داشت چنین خطاهایی در مقیاس بزرگ در نمایندگی اقلیم منطقه‌ای نیز تأثیر خواهند داشت (شفر، ۲۰۱۴). بنابراین جهت انجام مطالعات بعدی در پهنه‌های منطقه‌ای، ریزمقیاس‌نمایی دینامیکی با تفکیک افقی ۲۰-۳۰ کیلومتر برای برون‌داد مدل MRI-ESM2-0 پیشنهاد می‌شود که بتوان با لحاظ کردن ویژگی‌هایی



بابائیان، ا.، نجفی نیک، ز.، عباسی، ف.، حمید، ن.، ادب، ح. و ملبوسی، ش.، ۱۳۸۷، ارزیابی تغییر اقلیم کشور در دوره ۲۰۱۰-۲۰۳۹ با استفاده از ریزمقیاس نمائی داده‌های مدل گردش عمومی جو ECHO-G، جغرافیا و توسعه، ۱۶، ۳۴-۴۱.

بابائیان، ا.، ملبوسی، ش.، اثمري، م. و گلی مختاری، ل.، ۱۳۹۱، ارزیابی تغییر اقلیم ایران در دهه‌های آینده (۲۰۲۵ تا ۲۱۰۰ میلادی) با استفاده از ریزمقیاس نمایی داده‌های مدل گردش عمومی جو، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، ۲۷ (۱)، ۲۰۵-۲۳۰.

بحری، م.، دستورانی، م. و گودرزی، م.، ۱۳۹۴، بررسی خشکسالی‌های دهه ۲۰۱۱-۲۰۳۰ تحت اثر تغییر اقلیم، مطالعه موردی: حوزه آبخیز اسکندری، استان اصفهان، نشریه مهندسی و مدیریت آبخیز، ۲، ۱۵۷-۱۷۱.

بختیاری، ب.، پور موسوی، ش. و سیاری، ن.، ۱۳۹۳، بررسی اثر تغییر اقلیم بر منحنی‌های شدت-مدت-فراوانی بارش ایستگاه بابلسر طی دوره زمانی ۲۰۱۱-۲۰۳۰، نشریه آبیاری و زهکشی، ۴، ۶۹۴-۷۰۴.

پورمحمدی، س.، دستورانی، م.ت. و مساح بوانی، ع.، ۱۳۹۶، بررسی اثرات تغییر اقلیم بر رواناب رودخانه و ارائه راهکارهای سازگار با اثرات آن (مطالعه موردی: حوضه آبریز تویسرکان همدان). نشریه علمی پژوهشی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، سال ۱۱، شماره ۳۷، صفحات ۱-۱۳.

تابان، ح.، ظهراپی، ن. و نیکبخت شهبازی، ع.، ۱۳۹۷، ارزیابی عدم قطعیت‌های مدل‌های گردش کلی در تخمین بارش و رواناب حوضه دز علیا تحت تأثیر تغییر اقلیم، فیزیک زمین و فضا، ۴۴ (۱)، ۸۹-۱۰۲.

جهانبخش اصل، س.، خورشید دوست، ع.م.، عالی نژاد، م. ح. و پور اصغر، ف.، ۱۳۹۵، تأثیر تغییر اقلیم بر دما و بارش با در نظر گرفتن عدم قطعیت مدل‌ها و سناریوهای اقلیمی (مطالعه موردی: حوضه شهر چای ارومیه)، هیدروژئومورفولوژی ۲ (۷)، ۱۰۷-۱۲۲.

حمیدیان پور، م.، باعقیده، م. و عباس‌نیا، م.، ۱۳۹۵، ارزیابی

جغرافیایی اعم از توپوگرافی، پوشش گیاهی، کاربری زمین و پارامترهای دیگر خروجی مدل‌ها را دقیق‌تر کرد.

### تشکر و قدردانی

مقاله حاضر مستخرج از طرح پژوهشی دانشگاه «فردوسی مشهد» با عنوان «پیش‌نگری دما در ایران تحت شرایط تغییر اقلیم آینده با استفاده از برونداد مدل‌های تغییر اقلیم فاز ششم CMIP6» است که با پشتیبانی معاونت پژوهشی دانشگاه فردوسی مشهد با کد ۵۳۰۴۷ انجام شد. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از دانشگاه فردوسی مشهد و داوران نشریه فیزیک زمین و فضا که ما را در انجام و ارتقاء کیفی این پژوهش یاری دادند، اعلام نمایند.

### مراجع

احمدی، ح.، فلاح قالمهری، غ. و باعقیده، م.، ۱۳۹۸، پیش‌نگری اثرات تغییر اقلیم بر بارش فصلی مناطق سردسیر ایران بر اساس سناریوهای واداشت تابشی (RCP)، فیزیک زمین و فضا، ۴۵ (۱)، ۱۷۷-۱۹۶.

احمدی، م.، داداشی رودباری، ع.، احمدی، ح. و علی‌بخشی، ز.، ۱۳۹۷، واکاوی ساختار دمای ایران مبتنی بر برونداد پایگاه داده مرکز پیش‌بینی میان‌مدت هواسپهر اروپایی (ECMWF) نسخه ERA Interim، ۵۰ (۲)، ۳۵۳-۳۷۲.

احمدی، م.، داداشی رودباری، ع.، اکبری ازیرانی، ط. و کرمی، ج.، ۱۳۹۸، کارایی مدل HadGEM2-ES در ارزیابی نابهنجاری فصلی دمای ایران تحت سناریوهای واداشت تابشی، فیزیک زمین و فضا، ۴۵ (۳)، ۶۲۵-۶۴۴.

انصاری، ح.، مهدی خدیوی، صالح‌نیا، ن. و بابائیان، ا.، ۱۳۹۳، بررسی عدم قطعیت مدل LARS تحت سناریوهای A1B، A2 و B1 در پیش‌بینی بارش و دما (مطالعه موردی: ایستگاه سینوپتیک مشهد)، نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۴، ۶۶۴-۶۷۲.

عساکره، ح. و اکبرزاده، ی.، ۱۳۹۶، شبیه‌سازی تغییرات دما و بارش ایستگاه سینوپتیک تبریز طی دوره (۲۰۱۰-۲۰۱۰) با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی آماری (SDSM) و خروجی مدل CanESM2، جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۲۱، ۱۷۴-۱۵۳.

عسکری‌زاده، م.، مظفری، غ. و مزیدی، ا.، ۱۳۹۷، پیش‌بینی نوسانات نمایه‌های حدی بارش در شهر مشهد با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی مدل LARS-WG برای دو دوره آتی ۲۰۱۱-۲۰۳۰ و ۲۰۶۵-۲۰۴۶، جغرافیای و توسعه ناحیه‌ای، (۱)۱۶، ۲۵-۵۰.

علیزاده چوبری، ا. و نجفی، م.، ۱۳۹۶، روند تغییرات دمای هوا و بارش در مناطق مختلف ایران، فیزیک زمین و فضا، (۳)۴۳، ۵۶۹-۵۸۴.

کریمی، م.، ستوده، ف. و رفعتی، س.، ۱۳۹۷، تحلیل روند تغییرات و پیش‌بینی پارامترهای حدی دمای ناحیه جنوبی دریای خزر، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۱۸ (۴۸)، ۷۹-۹۳.

تغییرات دما و بارش جنوب شرق ایران با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی خروجی مدل‌های مختلف گردش عمومی جو در دوره ۲۰۹۹-۲۰۱۱، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۱: ۱۰۷-۱۲۳.

خورانی، ا. و جمالی، ز.، ۱۳۹۵، اثر تغییر اقلیم بر شدت و مدت خشکسالی در ایستگاه‌های خشک و نیمه‌خشک (بندرعباس و شهرکرد) تحت مدل HADCM3. نشریه جغرافیا و برنامه‌ریزی، ۵۷، ۱۱۵-۱۳۱.

روحبخش سیگارودی، ح.ع.، کریمپور، م.، قائمی، ه.، مرادی، م. و آزادی، م.، ۱۳۹۷، بررسی بی‌هنجاری میانگین دمای کمینه و بیشینه ایران در دوره گرم سال به‌منظور شناسایی دوره گرم و سرد، جغرافیا و مخاطرات محیطی، شماره ۲۷، ۱۶۱-۱۷۸.

زرین، آ. و صالح‌آبادی، ن.، ۱۳۹۸، پیش‌آگاهی مخاطره خشکسالی در تهران بر اساس برونداد مدل‌های CMIP6، ششمین کنفرانس منطقه‌ای تغییر اقلیم، تهران، سازمان هواشناسی کشور.

Alizadeh-Choobari, O., Ghafarian, P. and Adibi, P., 2016, Inter-annual variations and trends of the urban warming in Tehran. Atmospheric research, 170, 176-185.

Chen, J., Brissette, F. P., Chaumont, D. and Braun, M., 2013, Finding appropriate bias correction methods in downscaling precipitation for hydrologic impact studies over North America. Water Resources Research, 49(7), 4187-4205.

Chen, J., Brissette, F. P., Zhang, X. J., Chen, H., Guo, S. and Zhao, Y., 2019, Bias correcting climate model multi-member ensembles to assess climate change impacts on hydrology. Climatic Change, 153(3), 361-377.

Dadashi-Roudbari, A. and Ahmadi, M., 2020, Evaluating temporal and spatial variability and trend of aerosol optical depth (550 nm) over Iran using data from MODIS on board the Terra and Aqua satellites. Arabian Journal of Geosciences 13(6), 277.

Ehret, U., Zehe, E., Wulfmeyer, V., Warrach-Sagi, K. and Liebert, J., 2012, "HESS Opinions" Should we apply bias correction to global and regional climate model data? Hydrology & Earth System Sciences Discussions, 9(4).

Estoque, R. C., Ooba, M., Togawa, T. and Hijioka, Y., 2020, Projected land-use changes

in the Shared Socioeconomic Pathways: Insights and implications. Ambio.

Fallah-Ghalhari, G., Shakeri, F. and Dadashi-Roudbari, A., 2019, Impacts of climate changes on the maximum and minimum temperature in Iran. Theoretical and Applied Climatology, 138(3-4), 1539-1562.

Frame, B., Lawrence, J., Ausseil, A. G., Reisinger, A. and Daigneault, A., 2018, Adapting global shared socio-economic pathways for national and local scenarios. Climate Risk Management, 21, 39-51.

Guo, Q., Chen, J., Zhang, X., Shen, M., Chen, H. and Guo, S., 2019, A new two-stage multivariate quantile mapping method for bias correcting climate model outputs. Climate Dynamics, 53(5-6), 3603-3623.

Hagemann, S., Göttel, H., Jacob, D., Lorenz, P. and Roeckner, E., 2009, Improved regional scale processes reflected in projected hydrological changes over large European catchments. Climate Dynamics, 32(6), 767-781.

Harding, R. J., Weedon, G. P., Van Lanen, H. A. and Clark, D. B., 2014, The future for global water assessment. Journal of Hydrology, 518, 186-193.

Intergovernmental Panel on Climate Change, 2013, Summary for policymakers, in Climate

- Change (2013), *The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by T. F. Stocker et al., Cambridge Univ. Press, Cambridge, U. K., and New York.
- Jacovides, C. P., 1998, Reply to comment on "Statistical procedures for the evaluation of evapotranspiration computing models", *Agricultural Water Management*, 37(1), 95-97.
- Liu, H., Remer, L. A., Huang, J., Huang, H. C., Kondragunta, S., Laszlo, I., Oo, M. and Jackson, J. M., 2014, Preliminary evaluation of S-NPP VIIRS aerosol optical thickness. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(7), 3942-3962.
- Lu, A., Pang, D., Ge, J., He, Y., Pang, H. and Yuan, L., 2006, Effect of landform on seasonal temperature structures across China in the past 52 years, *Journal of Mountain Science*, 3(2), 158.
- M'Po, Y. N. T., Lawin, A. E., Oyerinde, G. T., Yao, B. K. and Afouda, A. A., 2016, Comparison of daily precipitation bias correction methods based on four regional climate model outputs in Ouémé Basin, Benin. *Hydrology*, 4(6), 58-71.
- Maghrabi, A. H. and Alotaibi, R. N., 2018, Long-term variations of AOD from an AERONET station in the central Arabian Peninsula. *Theoretical and Applied Climatology*, 134(3-4), 1015-1026.
- Maraun, D., 2016, Bias correcting climate change simulations-a critical review. *Current Climate Change Reports*, 2(4), 211-220.
- Maraun, D., Wetterhall, F., Ireson, A.M., Chandler, R.E., Kendon, E.J., Widmann, M., Brienen, S., Rust, H.W., Sauter, T., Themeßl, M. and Venema, V.K.C., 2010, Precipitation downscaling under climate change: Recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user. *Reviews of Geophysics*, 48(3).
- Maurer, E. P., Das, T. and Cayan, D. R., 2013, Errors in climate model daily precipitation and temperature output: time invariance and implications for bias correction.
- Mendez, M., Maathuis, B., Hein-Griggs, D. and Alvarado-Gamboa, L. F., 2020, Performance Evaluation of Bias Correction Methods for Climate Change Monthly Precipitation Projections over Costa Rica. *Water*, 12(2), 482.
- O'Neill, B. C., Kriegler, E., Ebi, K. L., Kemp-Benedict, E., Riahi, K., Rothman, D. S., van Ruijven, B. J., van Vuuren, D. P., Birkmann, J., Kok, K. and Levy, M., 2017, The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Global Environmental Change*, 42, 169-180.
- Räty, O., Räisänen, J. and Ylhäisi, J. S., 2014, Evaluation of delta change and bias correction methods for future daily precipitation: intermodel cross-validation using ENSEMBLES simulations. *Climate dynamics*, 42(9-10), 2287-2303.
- Riahi, K., Van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O. and Lutz, W., 2017, The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: an overview. *Global Environmental Change*, 42, 153-168.
- Rogelj, J., Popp, A., Calvin, K.V., Luderer, G., Emmerling, J., Gernaat, D., Fujimori, S., Strefler, J., Hasegawa, T., Marangoni, G. and Krey, V., 2018, Scenarios towards limiting global mean temperature increase below 1.5 C. *Nature Climate Change*, 8(4), 325.
- Shabalova, M. V., Van Deursen, W. P. A. and Buishand, T. A., 2003, Assessing future discharge of the river Rhine using regional climate model integrations and a hydrological model. *Climate research*, 23(3), 233-246.
- Sharafati, A., Nabaei, S. and Shahid, S., 2020, Spatial assessment of meteorological drought features over different climate regions in Iran. *International Journal of Climatology*, 40(3), 1864-1884.
- Shepherd, T. G., 2014, Atmospheric circulation as a source of uncertainty in climate change projections. *Nature Geoscience*, 7(10), 703-708.
- Soltani, M., Laux, P., Kunstmann, H., Stan, K., Sohrabi, M.M., Molanejad, M., Sabziparvar, A.A., SaadatAbadi, A.R., Ranjbar, F., Roustaa, I. and Zavar-Reza, P., 2016, Assessment of climate variations in temperature and precipitation extreme events over Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 126(3-4), 775-795.
- Teutschbein, C. and Seibert, J., 2012, Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *Journal of hydrology*, 456, 12-29.
- Warnatzsch, E. A. and Reay, D. S., 2019, Temperature and precipitation change in Malawi: Evaluation of CORDEX-Africa climate simulations for climate change impact assessments and adaptation planning. *Science of The Total Environment*, 654, 378-392.
- Wu, T., Lu, Y., Fang, Y., Xin, X., Li, L., Li, W., Jie, W., Zhang, J., Liu, Y., Zhang, L. and

- Zhang, F., 2019, The Beijing Climate Center climate system model (BCC-CSM): The main progress from CMIP5 to CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 12, 1573-1600.
- Yan, L. and Liu, X., 2014, Has climatic warming over the Tibetan Plateau paused or continued in recent years, *J. Earth Ocean Atmos. Sci.*, 1(1), 13-28.
- Yang, X., Wood, E. F., Sheffield, J., Ren, L., Zhang, M. and 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.
- Yue, S. and Hashino, M., 2003, Temperature trends in Japan: 1900–1996. *Theoretical and Applied Climatology*, 75(1-2), 15-27.
- Yukimoto, S., Kawai, H., Koshiro, T., Oshima, N., Yoshida, K., Urakawa, S., Tsujino, H., Deushi, M., Tanaka, T., Hosaka, M. and Yabu, S., 2019, The Meteorological Research Institute Earth System Model version 2.0, MRI-ESM2. 0: Description and basic evaluation of the physical component. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*.
- Zhou, T., Chen, Z., Zou, L., Chen, X., Yu, Y., Wang, B., Bao, Q., Bao, Y., Cao, J., He, B. and Hu, S., 2020, Development of Climate and Earth System Models in China: Past Achievements and New CMIP6 Results. *Journal of Meteorological Research*, 34(1), 1-19.

## Projection the Long-Term Outlook Iran Future Temperature Based on the Output of The coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6)

Zarrin, A.<sup>1\*</sup> and Dadashi Roudbari, A. A.<sup>2</sup>

1. Assistant Professor, Department of Geography, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

2. Post-Doc Researcher, Department of Geography, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

(Received: 28 June 2020, Accepted: 29 Sep 2020)

### Summary

The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) has stated that climate change is undoubtedly real and greenhouse gas emissions continue to heat up all components of the climate system (IPCC, 2013). In this study, we have addressed two main concerns: First, we assessed the performance of temperature simulations of the available CMIP6 and next, we projected future temperature in Iran by underlying socioeconomic scenarios by the late 21st century.

In this study, the average annual temperature data of 43 synoptic stations were obtained for the period of 1980-2018. Also, the latest Coupled Model Intercomparison Project phase 6 (CMIP6) dataset was analyzed to examine the projected changes in temperature over Iran during the twenty-first century. Three available CMIP6 models used in this study including BCC-CSM2-MR, CAMS-CSM1-0, and MRI-ESM2-0. To project the temperature anomaly and the monthly temperature trend of Iran to the end of 21<sup>st</sup> century, data from the CMIP6 model set under two SSP2.4-5 scenarios (Consistent with the RCP4.5 scenario of the CMIP5 modes) and SSP5.8-5 (Consistent with RCP8.5 scenario of the CMIP5 modes) was used for the period (2020-2100) with a horizontal resolution of 100 km. The Delta change factor (DCF) method was used to correct the bias of the data and to test the trend analysis in the long-term data series of the Man-Kendall nonparametric test (MK). Sen's Slope Estimator nonparametric method was also used to estimate the actual slope of the trend in the time series.

The minimum monthly temperature in Iran was investigated based on observational data with 5.64 degrees Celsius in January and the maximum temperature of 29.21 degrees Celsius in July. The same is true for future data; the minimum monthly temperature of Iran during the projected future (2020-2100) under the scenario of SSP245 is 7.14 degrees Celsius and under the scenario of SSP585 is 33.8. The maximum temperature, like the observational period in the future projected period in July, for SSP2.4-5 and SSP5.8-5 scenarios, 31.38 and 32.76 degrees Celsius was calculated, respectively. The average temperature anomaly, according to the SSP2.4-5 scenario, is more than 2 degrees Celsius in 9 months of the year, and less than 2 degrees Celsius in January, November and December, which are considered the coldest months of the year. Investigating the temperature trends for over 80 years, it is found that the overall trend of increase in the amount of the increase in intensity in the scenario of SSP5.8-5 under the 0.1 level in all months is significant. The maximum trend intensity was calculated with a Z score of 10.60 in September and the minimum trend intensity was calculated as 2.77 in January.

The average temperature trend based on the non-parametric Man-Kendall (M-K) test in Iran is increasing in all months in both of the studied scenarios. This value is statistically significant at the alpha level of 0.1. The trend slope was also measured using the nonparametric Sen's Slope Estimator (SSE); Under the SSP2.4-5 scenario, the average annual Celsius will be 0.02 year-1 degrees Celsius, and according to the SSP5.8-5 scenario, the average -0.05 year-1 degrees Celsius will increase. Locally, the maximum monthly temperature variability was observed in the mountainous areas of the Zagros and Alborz highlands, respectively. In other words, the highest monthly temperature change rate was observed in the cold period of the year in the mountainous regions. One of the reasons for this high variability can be due to the existence of different weather conditions in the cold season of the year to Iran.

**Keywords:** CMIP6 Models, SSP Scenarios, DCF, Temperature Trend, Iran.

\* Corresponding author:

zarrin@um.ac.ir