

ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم بر متغیرهای اصلی اقلیم (ECVs) در ایران

الهام کدخدا^۱، کمال امیدوار^{۲*}، آذر زرین^۳، احمد مزیدی^۴ و عباسعلی داداشی رودباری^۵

^۱ دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه یزد، یزد، ایران

^۲ استاد آب و هواشناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه یزد، یزد، ایران

^۳ دانشیار آب و هواشناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

^۴ دانشیار آب و هواشناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه یزد، یزد، ایران

^۵ پژوهشگر پسادکتری آب و هواشناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

(دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۱۱، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۲۰)

چکیده

برآورد چگونگی تغییر اقلیم یک منطقه در اثر گرمایش جهانی در آینده، موضوعی چالش برانگیز است. این پژوهش با هدف بررسی کارایی مدل‌های CMIP6 در برآورد دما، تندی باد و رطوبت نسبی و پیش‌نگری آنها در دوره‌های آینده انجام شده است. این سه متغیر نقشی کلیدی در تنش گرمایی دارند؛ لذا مطالعه آنها برای بررسی شرایط تغییر اقلیم ضروری است. در این پژوهش برای بررسی متغیرهای اقلیمی، یک چندمدلی همادی با روش IWM از برون‌داد پنج مدل CMIP6 تولید شد. نتایج نشان داد CMIP6-MME هم از نظر میانگین اقلیمی و هم از نظر پراکنش فضایی با داده‌های مشاهداتی همخوانی دارد و کارایی آن نسبت به مدل‌های منفرد افزایش یافته است. همگام با روند افزایشی دما در ایران، در اواخر قرن ۲۱ تندی باد در بیشتر مناطق کشور تحت دو سناریوی SSP کاهش می‌یابد. این روند کاهشی می‌تواند در نتیجه کاهش ناپایداری جو و افزایش دمای پتانسیل باشد به گونه‌ای که تحت سناریوی SSP5-8.5، در آینده دور در شمال غرب کشور بیشینه بی‌هنجاری افزایشی دما ۵/۹ درجه سلسیوس و بیشینه بی‌هنجاری کاهشی تندی باد ۰/۵۷ متر بر ثانیه است. کاهش رطوبت نسبی در ایران از دهه ۱۹۹۰ مشهود است و نتایج این پژوهش حاکی از روند کاهشی آن در بخش‌های بزرگی از ایران در آینده است. بر این اساس رطوبت نسبی در آینده دور در متوسط پهنه‌ای ایران تحت سناریوی SSP5-8.5 به مقدار ۲/۱۷ درصد کاهش خواهد یافت. در مقابل، در جنوب شرقی ایران تحت هر دو سناریو مقدار بی‌هنجاری افزایشی بیش از ۱٪ است که احتمالاً می‌تواند در نتیجه فعالیت بیشتر موسمی تابستانه آسیایی (ASM) در این منطقه از ایران طی دهه‌های آتی باشد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد در سرتاسر ایران به دلیل کاهش تندی باد و افزایش دما، تنش گرمایی تحت سناریوی SSP5-8.5 به‌طور چشمگیری بیشتر از تنش گرمایی تحت سناریوی SSP2-4.5 خواهد بود.

کلمه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، دما، تندی باد، رطوبت نسبی، CMIP6، ایران

۱ مقدمه

متغیرهای اقلیمی از وضعیت گذشته، حال و آینده سامانه اقلیم خبر می‌دهند. این متغیرها زیربنای علم اقلیم‌شناسی هستند و ضمن افزایش آگاهی از پیامدهای تغییر اقلیم، به اتخاذ سیاست‌های تعدیل و سازگاری کمک می‌کنند. سامانه مشاهدات اقلیم (GCOS) که نهادی از سازمان هواشناسی جهانی (WMO) است، متغیرهای اصلی اقلیم (Essential Climate Variables) را با بیشترین استانداردها در قالب سوابق داده‌های اقلیمی (CDR) پایش و بایگانی می‌کند (لاورنی و همکاران، ۲۰۲۲). به‌جز بارش، متغیرهای دما، تندی باد و رطوبت نسبی از جمله متغیرهای اصلی هستند که اهمیت بسیار زیادی در شکل‌گیری اقلیم یک مکان دارند و تغییرات آنها در ارتباط با یکدیگر می‌تواند پیامدهای زیانباری همانند افزایش تنش گرمایی (اولسون و همکاران، ۲۰۱۵)، افزایش شدت شرجی در مناطق ساحلی (ماتزاراکیس و همکاران، ۲۰۱۲) و افزایش تبخیر-تعرق (یاسن و همکاران، ۲۰۲۰) داشته باشد.

در دهه‌های اخیر، دمای کره زمین در نتیجه افزایش گازهای گلخانه‌ای (GHGs) افزایش یافته است. روند تدریجی گرمایش زمین در بلندمدت از دوره انقلاب صنعتی به تغییر چرخه انرژی، آب و کربن زمین در نتیجه، تغییر سامانه اقلیم منجر شده است (اسکالاک و همکاران، ۲۰۱۸). گرمایش جهانی و به‌تبع آن، تغییر اقلیم نه تنها بر فرین‌های اقلیمی، بلکه بر ویژگی‌های اقلیمی منطقه‌ای مانند میانگین بلندمدت دما، تندی باد، رطوبت نسبی و بارش تأثیر گذاشته است (هیات بین‌دولتی تغییر اقلیم، ۲۰۱۳، ۲۰۱۸، ۲۰۲۱). بررسی تغییرات توأمان این متغیرها در هنگام تغییر اقلیم می‌تواند در جنبه‌هایی نظیر سلامت انسانی بسیار مهم باشد. علاوه‌براین، گرمایش جهانی آینده احتمالاً باعث تغییرات مداوم در اقلیم می‌شود (ترنبرث، ۲۰۱۱). بررسی متغیرهای اصلی اقلیم (ECVs) پیش‌نیازی ضروری برای درک واکنش آنها به تغییر اقلیم است. بررسی هم‌زمان

متغیرهای اصلی اقلیم و به‌خصوص متغیرهایی که ترکیب آنها با یکدیگر می‌تواند تهدیدی برای سلامت انسانی باشد، بینش ارزشمندی درباره برهم‌کنش بین اقلیم و سامانه‌های فیزیکی و زیست‌شناختی زمین برای اقلیم کنونی و همچنین برای آینده ارائه می‌دهد (ماهلشتاین و همکاران، ۲۰۱۳). بررسی تغییرات بالقوه متغیرهای اقلیمی در مقیاس منطقه‌ای در اثر گرمایش جهانی برای پرداختن به مسئله تغییر اقلیم ضروری است، به‌ویژه برای ایران که با مشکلات بسیاری در زمینه محیط زیست و منابع آب روبه‌رو است و مستعد مخاطرات اقلیمی زیادی است.

تندی باد در بسیاری از فرایندها، از جمله چرخه‌های آب‌شناختی، تولید انرژی از باد، تنش گرمایی و آلودگی هوا نقش مهمی ایفا می‌کند، اما اینکه چه چیزی باعث تغییرات آن می‌شود، هنوز مشخص نیست (دنگ و همکاران، ۲۰۲۱). هنگام تغییر اقلیم، تغییراتی در الگو و شدت تندی باد مشاهده می‌شود. کاهش تندی باد را که سکون جهانی (Global Stilling) نامیده می‌شود، مطالعات مختلفی در سراسر جهان گزارش کرده‌اند.

رطوبت نسبی، نسبت فشار نسبی بخار آب به فشار بخار اشباع آب در همان دما است (هیات بین‌دولتی تغییر اقلیم، ۲۰۱۳). رطوبت نسبی مستقیماً بر دید افقی و تشکیل ابرها و مه تأثیر می‌گذارد و هم‌زمانی آن با دمای زیاد نقش مهمی در تشدید تنش گرمایی دارد. همچنین رطوبت نسبی نقش مهمی در فرایندهای آب‌شناختی (شامل بارش و تبخیر) و بودجه انرژی سطحی دارد (یو و همکاران، ۲۰۱۵)؛ لذا تغییرات رطوبت نسبی چه در دوره مشاهداتی و چه در دوره آینده در سطوح پایین جو برای درک تغییرات در چرخه آب‌شناختی، از جمله محتوای رطوبت و بارش بسیار مهم است (زی و همکاران، ۲۰۱۱).

مدل‌های گردش کلی (GCMs) ابزار اولیه و بنیادی برای بررسی تغییر اقلیم هستند. پس از شروع به کار پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده (CMIP) که هدف آن درک تغییر

مناطق مختلف جهان است که این روند تحت سناریوهای با انتشار بالا (همانند SSP5-8.5) بیشتر از دیگر سناریوها است.

با توجه به بخش زیادی از مطالعات انجام شده درباره تغییر اقلیم در سطح جهانی که به دما و بارش پرداخته‌اند، مطالعات زیادی نیز متغیرهای اصلی اقلیم همانند تندی باد و رطوبت نسبی را بررسی کرده‌اند. مطالعات مختلفی که تندی باد را در سطح جهانی با استفاده از مدل‌های CMIP6 بررسی کرده‌اند، بسیار است که می‌توان به مطالعات انجام شده در چین (وو و همکاران، ۲۰۲۰) و دنگ و همکاران، (۲۰۲۱)، مناطق خشک کشور چین (لانگ و همکاران، ۲۰۲۱)، غرب آفریقا (آکینسانولا و همکاران، ۲۰۲۱) و در سطح جهانی (دنگ و همکاران، ۲۰۲۱) و شن و همکاران، (۲۰۲۱) اشاره کرد. نتیجه کلی این مطالعات روند کاهشی تندی باد را در بخش‌های بزرگی از جهان نشان داده است؛ باین‌حال بر اساس مطالعه دنگ و همکاران (۲۰۲۱)، تندی باد در آینده در دو نیمکره شمالی و جنوبی روند متفاوتی دارد، به طوری که در نیمکره جنوبی تندی باد روند افزایشی و در نیمکره شمالی روند کاهشی خواهد داشت.

در پژوهش‌های مختلفی در سطح جهانی، به رطوبت نسبی نیز توجه شده است که می‌توان به پژوهش‌های انجام شده در هند (کومار و سارتنی، ۲۰۲۱)، چین (یو و همکاران، ۲۰۲۳) و مناطق خشک چین (شی و همکاران، ۲۰۲۳) اشاره کرد. نتایج این مطالعات نشان داد برعکس دما و تندی باد، رطوبت نسبی تغییرات یکنواخت کاهشی و افزایشی در مناطق مختلف جهان نداشته است. در این بین در برخی از مطالعات به بررسی توأمان متغیرهای دمای هوا، تندی باد و رطوبت نسبی در سطح جهانی پرداخته‌اند؛ برای مثال بر اساس مطالعه هوانگ و همکاران (۲۰۲۲) احتمال و شدت رخدادهای فرین اقلیمی در سطح جهانی افزایش خواهد یافت.

در ایران نیز مطالعات بسیاری به بررسی متغیرهای اصلی

اقلیم در گذشته، پیش‌نگری‌ها و برآورد عدم قطعیت آینده است، به‌طور گسترده از این مدل‌ها استفاده شد. در دهه‌های اخیر، از مدل‌های مشارکت‌یافته در فازهای سوم و پنجم پروژه CMIP (موسوم به CMIP3 و CMIP5) استفاده و کارایی آنها تأیید شده است (میهل و همکاران، ۲۰۰۷) و تیلور و همکاران، (۲۰۱۲). در فاز ششم (CMIP6) پروژه CMIP (آیرینگ و همکاران، ۲۰۱۶) که برون‌داد مدل‌های آن چند سالی است در دسترس قرار گرفته است، تعداد ۱۱۲ مدل گردش کلی از ۳۳ مؤسسه در سراسر جهان مشارکت کرده‌اند. مشهودترین تفاوت در CMIP6 در مقایسه با CMIP5، استفاده از سناریوهای جدید با عنوان سناریوهای اجتماعی-اقتصادی (SSPs) است (اونیل و همکاران، ۲۰۱۶).

تغییر اقلیم مسئله‌ای جدی است که امروزه تمام کشورهای جهان را تحت تأثیر خود قرار داده و سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان در سطح جهانی به دنبال راهکارهایی برای تعدیل پیامدهای آن و همچنین برنامه‌سازگاری با آن هستند. بررسی مطالعات انجام شده درباره پیش‌نگری متغیرهای اقلیمی در سطح جهانی نشان می‌دهد تمرکز اصلی این مطالعات بر دما و فرین‌های دمایی (ژو و همکاران، ۲۰۲۰) است. پس از دما، متغیر بارش و فرین‌های بارشی به میزان زیادی بررسی شده‌اند، البته در تحقیق حاضر به این متغیر پرداخته نمی‌شود و در مرور منابع نیز به آن اشاره‌ای نخواهد شد. مطالعات بسیار زیادی به بررسی دما و فرین‌های آن با استفاده از مدل‌های مشارکت‌یافته در CMIP6 در مناطق مختلف همانند ایالات متحده آمریکا، آمریکای مرکزی و کارائیب (المزروعی و همکاران، ۲۰۲۱)، فلات تبت (لون و همکاران، ۲۰۲۱)، چین (یانگ و همکاران، ۲۰۲۱)، جنوب شرقی آسیا (سوفاراتید و همکاران، ۲۰۲۲)، افغانستان (فرهت و همکاران، ۲۰۲۲) و در سطح جهانی (اسکافتا، ۲۰۲۳) پرداخته‌اند. براین‌د کلی این مطالعات نشان‌دهنده روند افزایشی درخور توجه دما در

تنش گرمایی و تغییرات آن دارند. نتایج این مطالعه درک عمیق‌تری از وردایی مشترک (co-variability) بین متغیرهای اقلیمی فراهم می‌کند و پیش‌نگری‌های اقلیم منطقه‌ای آینده را در ایران بهبود می‌بخشد.

همان‌طور که پیشتر نیز گفته شد، مطالعه توأمان متغیرهای اقلیمی به‌خصوص متغیرهای دما، تندی باد و رطوبت نسبی نقش حیاتی در بررسی تنش گرمایی خواهد داشت؛ لذا نتایج این تحقیق کاربردهای بسیاری در بررسی کارایی مدل‌های CMIP6 برای متغیرهای اصلی اقلیم (به غیر از بارش در این تحقیق)، تنش گرمایی و حوزه سلامت در ایران دارد. بر این اساس پژوهش حاضر با هدف بررسی کارایی متغیرهای دما، تندی باد و رطوبت نسبی و پیش‌نگری آنها در ایران انجام شده است. برای دستیابی به این هدف، مقاله در سه بخش اصلی سازمان‌دهی شده است. ابتدا، کارایی مدل‌های CMIP6 در برآورد دمای میانگین، رطوبت نسبی و تندی باد بررسی و سپس با استفاده از داده‌های ایستگاهی، پراکنش فضایی سه متغیر نامبرده در مقیاس سالانه مطالعه شده است. در بخش پایانی، بی‌هنجاری و متوسط پهنه‌ای روند دما، تندی باد و رطوبت نسبی در مقیاس سالانه با دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در سه دوره آینده نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۶)، آینده میانی (۲۰۵۱-۲۰۷۵) و آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۷۶) بررسی و نتایج آن با یافته‌های پیشین در سطح جهانی و ایران مقایسه شده است.

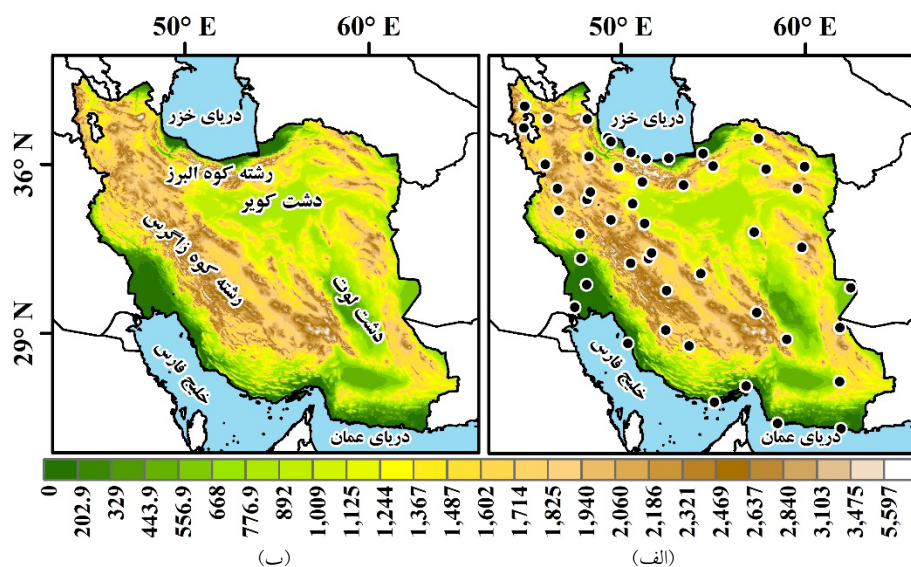
۲ روش تحقیق

۲-۱ منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه این تحقیق کشور ایران است (شکل ۱). ایران به دلیل گستردگی جغرافیایی زیاد اقلیم‌های متنوعی دارد که شامل اقلیم‌های خشک، نیمه‌خشک داخلی و شرقی تا اقلیم سرد شمال غربی و غرب و اقلیم مرطوب بارانی شمالی است. اقلیم ایران به دلیل موقعیت جغرافیایی

اقلیم با استفاده از برون‌داد مدل‌های گردش کلی فاز ششم پرداخته‌اند. از جمله این مطالعات، می‌توان به بررسی دما (سرابی و همکاران، ۱۳۹۹؛ زرین و داداشی‌رودباری، ۱۳۹۹ و زرین و داداشی‌رودباری، ۱۴۰۱)، بارش و فرین‌های بارشی (زرین و داداشی‌رودباری، ۱۴۰۰)، فرین‌های دما (زرین و همکاران، ۲۰۲۱)، خشکسالی (زرین و همکاران، ۱۴۰۱)، تنش گرمایی (کدخدا و همکاران، ۱۴۰۲)، تبخیر-تعرق پتانسیل (مدرسی و عراقی، ۲۰۲۳) و بارش برف (احمدی و همکاران، ۲۰۲۳) با استفاده از مدل‌های CMIP6 اشاره کرد. بر اساس نتایج کلی این مطالعات مدل‌های CMIP6 کارایی زیادی برای برآورد متغیرهای اقلیمی دارند. از سوی دیگر، بسیاری از این مطالعات نشان داده‌اند مدل همادی کارایی بیشتری نسبت به مدل‌های منفرد CMIP6 دارد. به‌طور خلاصه نتایج این مطالعات نشان می‌دهد دما و تبخیر-تعرق پتانسیل و تنش گرمایی در ایران روند افزایشی خواهند داشت و روند افزایشی دما برای مناطق غربی و شمال غربی بیشتر از سایر مناطق کشور است. همچنین به‌رغم کاهش بارش و برف در ایران، فرین‌های بارش شدید خواهند شد که نشان می‌دهد مخاطرات ناشی از تغییر اقلیم در سال‌های پیش‌رو در ایران افزایش خواهد یافت.

بررسی پیشینه تحقیق نشان می‌دهد برخلاف مطالعات بسیار خوبی که درباره متغیرهای دما و بارش در اقلیم ایران انجام شده است، کماکان در ایران مطالعه‌ای درباره سایر متغیرهای اصلی اقلیم همانند تندی باد و رطوبت نسبی انجام نشده است. علاوه‌براین، بیشتر مطالعات صورت گرفته درباره وضعیت اقلیمی آینده در ایران با تأکید بر یک متغیر همانند دما یا بارش انجام شده است. بر اساس آنچه که مشخص است، هم‌زمانی تغییرات متغیرهای اقلیمی می‌تواند پیامدهای درخور توجهی به همراه داشته باشد. در پژوهش حاضر، سه متغیر اصلی اقلیم یعنی دما، تندی باد و رطوبت نسبی بررسی شده‌اند. این متغیرها نقش تعیین‌کننده‌ای در



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه. (الف) موقعیت ایستگاه‌های همدید مورد استفاده (ب) مدل رقومی ارتفاعی (DEM) ایران (واحد: متر).

پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده (CMIP) را که کارگروه برنامه تحقیقاتی جهانی اقلیم (WCRP) و کارگروه مدل‌سازی جفت‌شده (WGCM) سازمان‌دهی کرده‌اند، داده‌های تحقیقاتی ضروری را برای ارزیابی تغییر اقلیم جهانی و منطقه‌ای و پیش‌نگری‌های بلندمدت فراهم می‌کند (هوانگ و همکاران، ۲۰۲۲). آخرین فاز از پروژه CMIP که موسوم به فاز ششم (CMIP6) است، نسبت به فازهای پیشین (CMIP3 و CMIP5) از نظر پارامترهای فیزیکی، تفکیک افقی و سایر فرایندهای دینامیکی و شبیه‌سازی مؤلفه‌های سامانه اقلیم به پیشرفت‌های چشمگیری دست یافته است (آپرینگ و همکاران، ۲۰۱۶، ۲۰۱۹). معرفی سناریوهای اجتماعی-اقتصادی (SSP) یکی دیگر از نوآوری‌های این فاز است که با در نظر گرفتن چالش‌های چشمداشتی برای تعدیل و سازگاری، به پیش‌نگری اقلیم آینده می‌پردازد (گیدن و همکاران، ۲۰۱۹). در این مقاله پنج مدل CMIP6 از اولین گونه اجرا (r1i1p1f1) شامل MPI-ESM1-2-، JPSL-CM6A-LR، GFDL-ESM4 HR، MRI-ESM2-0 و UKESM1-0-LL با تفکیک افقی به ترتیب ۱۰۰، ۲۵۰، ۱۰۰، ۱۰۰ و ۲۵۰ کیلومتر برای

و توپوگرافی ویژه آن، تحت تأثیر عوامل طبیعی بسیاری قرار دارد؛ برای مثال رشته کوه البرز نقش مهمی در اقلیم مرطوب و بارانی شمالی دارد و رشته کوه زاگرس نیز به دلیل سدکنندگی توده‌های هوای رسیده به ایران، در ایجاد اقلیم خشک و نیمه‌خشک داخلی کشور دخیل است.

۲-۲ داده‌های مشاهداتی

داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی همدید، داده‌های مرجع اقلیم‌شناسی در سطح جهانی هستند. در این تحقیق نیز برای درستی‌سنجی برون‌داد مدل‌های منفرد CMIP6 و مدل همادی تولیدشده CMIP6-MME از سه متغیر دمای هوا، تندی باد و رطوبت نسبی، از داده‌های پنجاه ایستگاه هواشناسی همدید استفاده شد (شکل ۱-الف). طول دوره آماری این ایستگاه‌ها نیز مطابق با طول دوره تاریخی مدل‌های CMIP6 در این تحقیق از ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴ لحاظ شده است.

۲-۳ پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده فاز ششم (CMIP6)

مجدد، تفکیک افقی مدل‌ها به کوچک‌ترین تفکیک افقی یعنی ۰/۵ درجه قوسی بازتولید و شبکه‌ها یکسان شده‌اند. در نهایت، برای تولید چندمدلی همادی (MME) از مدل‌های CMIP6 (CMIP6-MME)، از روش میانگین وزنی مستقل (Independent Weighted Mean) IWM (Method) استفاده شد. شرح کامل محاسباتی این روش در بای و همکاران (۲۰۲۱)، زرین و داداشی رودباری (۱۴۰۰) و زرین و همکاران (۲۰۲۱) ارائه شده است.

۵-۲ ارزیابی کارایی مدل‌های منفرد CMIP6 و چندمدلی همادی CMIP6-MME

در مطالعه حاضر از نمودار تیلور جهت ارزیابی کارایی مدل‌های منفرد CMIP6 و مدل همادی تولیدشده (CMIP6-MME) برای متغیرهای دمای هوا، تندی باد و رطوبت نسبی استفاده شده است. نمودار تیلور خلاصه‌ای آماری از میزان همخوانی مشاهدات و الگوهای فضایی مدل‌سازی/برآوردشده ارائه می‌کند (تیلور، ۲۰۰۱). شباهت بین مدل و مشاهدات با استفاده از همبستگی فضایی، ریشه میانگین مربعات خطا و انحراف معیار نرمال‌شده برآورد می‌شود. همبستگی بین مدل‌ها و مشاهدات با موقعیت آزمون‌تال در نمودار تیلور و ریشه میانگین مربعات خطا با فاصله تا نقطه REF (مشاهدات) در محور x اندازه‌گیری می‌شود. انحراف معیار با فاصله شعاعی از مبدأ متناسب است. به‌طور کلی، الگوهای شبیه‌سازی شده که به‌خوبی با مشاهدات مطابقت دارند، نزدیک‌ترین نقطه به نقطه REF هستند (وی و همکاران، ۲۰۲۰).

۳ نتایج و بحث

۳-۱ درستی‌سنجی برون‌داد مدل‌های CMIP6

جهت ارزیابی مدل‌های منفرد CMIP6 و مدل همادی تولیدشده در این پژوهش از نمودار تیلور استفاده شد. برای این منظور ضریب همبستگی مکانی، اختلاف ریشه میانگین

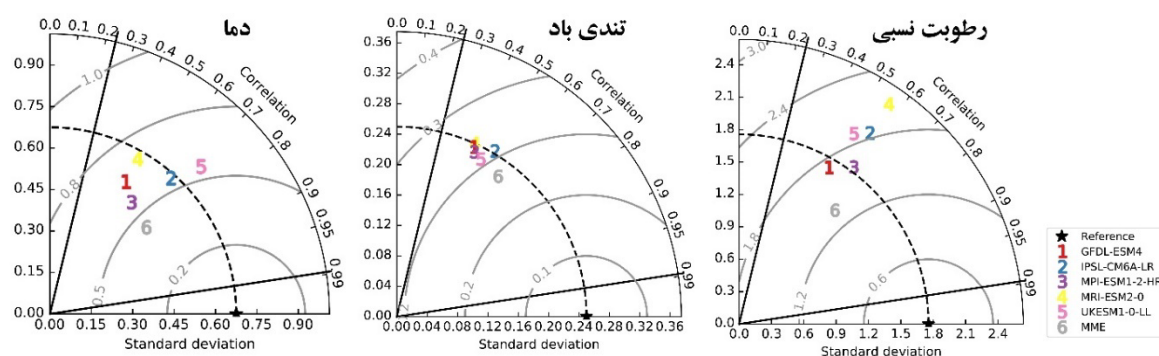
متغیرهای اصلی دمای هوا، رطوبت نسبی و تندی باد تحت دو سناریوی حد واسط (SSP2-4.5) و خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) بررسی شده است. این پنج مدل از سوی پروژه تحقیقات هماهنگ در سامانه زمین و اقلیم: آزمایش‌ها، دانش، انتشار و گسترش (CRESCENDO) به عنوان مدل‌هایی معرفی شده‌اند که فرایندهای اقلیمی را به‌خوبی نمایش می‌دهند. از نظر حساسیت اقلیمی، این مدل‌ها نمایندگان خوبی برای مدل‌های مشارکت‌یافته در پروژه CMIP6 هستند (زرین و داداشی رودباری، ۱۴۰۱). سه مدل مؤسسه‌های GFDL، MPI و MRI مدل‌هایی با حساسیت اقلیمی کم و دو مدل مؤسسه‌های IPSL و MOHC (مدل اقلیمی UKESM) مدل‌هایی با حساسیت اقلیمی زیاد هستند. برای بررسی بهتر تغییرات متغیرهای بررسی شده در آینده، دوره پیش‌نگری به سه دوره آینده نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۶)، آینده میانی (۲۰۷۵-۲۰۵۱) و آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۷۶) تقسیم شده است. دوره تاریخی نیز یک دوره ۲۵ ساله (۲۰۱۴-۱۹۹۰) است که بی‌هنجاری دوره‌های آینده بر مبنای این دوره محاسبه شده است.

۴-۲ تصحیح اریبی و تولید مدل همادی

در مطالعات تغییر اقلیم، از تصحیح اریبی به‌طور گسترده‌ای برای برون‌داد مستقیم GCM ها استفاده می‌شود (سوفاراتید و همکاران، ۲۰۲۲). تصحیح اریبی برون‌داد مستقیم مدل‌ها خطاهای نظام‌مند را کاهش می‌دهد و همخوانی آنها را با داده‌های مشاهداتی بهبود می‌بخشد. در مطالعات مختلف از روش‌های تصحیح اریبی متفاوتی استفاده شده است. در این پژوهش، برای تصحیح اریبی دما، تندی باد و رطوبت نسبی طی دوره تاریخی و پیش‌نگری، روش تصحیح مرتبه متوالی (Sequential Elevation Correction) SEC (ویدون و همکاران، ۲۰۱۱) به‌کاررفته است. پیش از تولید مدل همادی، از روش درون‌یابی نگاشت دوخطی (BIM) جهت شبکه‌بندی مجدد مدل‌ها استفاده شده است. در شبکه‌بندی

برآورد کند. همچنین انحراف معیار بیشتر مدل‌ها در محدوده ۰/۲ تا ۱ است. این نتایج نشان می‌دهد کارایی CMIP6-MME در برابر داده‌های مشاهداتی مناسب است. از بین سه متغیر دما، رطوبت نسبی و تندى باد، مدل‌های منفرد CMIP6 برای برآورد دما کارایی بیشتری دارند به طوری که ضریب همبستگی فضایی در نمودار تیلور برای دما در هیچ‌یک از مدل‌ها کمتر از ۰/۶ نیست. ضریب همبستگی فضایی تندى باد برای مدل‌های منفرد بین ۰/۴ تا ۰/۶ در تغییر است و به همین ترتیب، ضریب همبستگی فضایی برای رطوبت نسبی نیز در ایران بین ۰/۵ تا ۰/۷ محاسبه شده است؛ لذا از بین سه متغیر اقلیمی بررسی شده، پنج مدل مشارکت یافته در CMIP6 برای برآورد تندى باد در ایران کارایی کمتری داشتند.

مربعیات و انحراف معیار نسبت به داده‌های مشاهداتی برای سه متغیر دما، تندى باد و رطوبت نسبی محاسبه و نتایج در نمودار تیلور (شکل ۲) ارائه شده است. در این نمودار نماد ستاره معرف داده‌های مشاهداتی (ایستگاه‌های هواشناسی همدید) است و شماره‌های موجود، نتایج ارزیابی مدل‌های منفرد و مدل همادی را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل می‌توان دریافت، ضریب همبستگی فضایی بین تمامی مدل‌ها و داده‌های مشاهداتی بیشتر از ۰/۴ است که نشان می‌دهد تمامی مدل‌های بررسی شده می‌توانند توزیع فضایی میانگین سالانه متغیرها را به خوبی برآورد کنند. مدل‌های منفرد ضریب همبستگی فضایی متفاوتی دارند، اما CMIP6-MME (شماره ۶ در نمودار تیلور) می‌تواند به خوبی تغییرات بلندمدت دما، تندى باد و رطوبت نسبی را

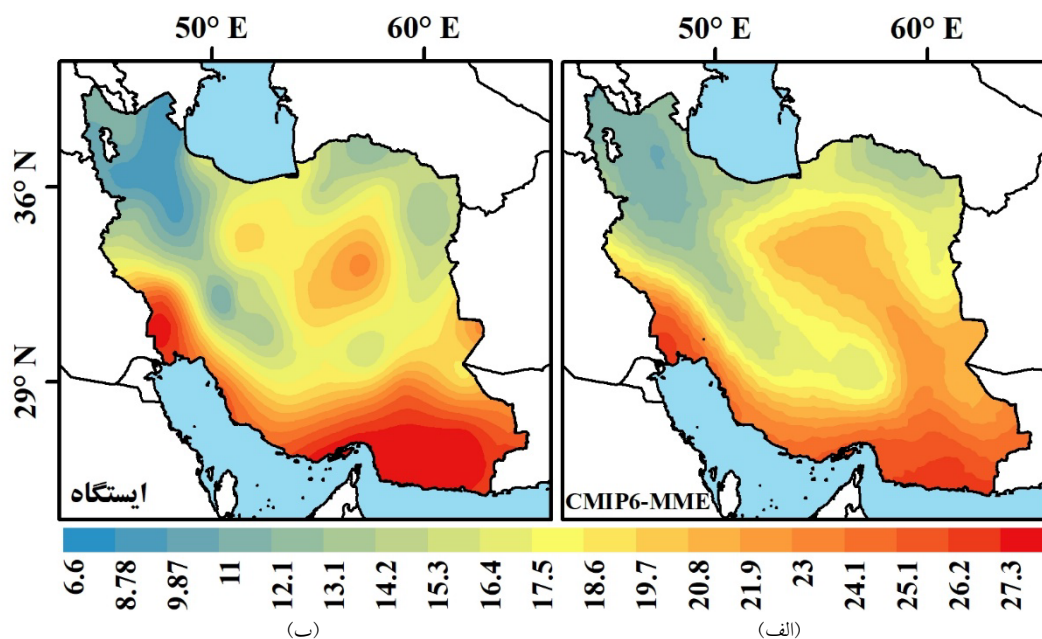


شکل ۲. نمودار تیلور سالانه دمای هوا، تندى باد و رطوبت نسبی از پنج مدل CMIP6 بررسی شده، مدل همادی CMIP6 و داده‌های مشاهداتی برای دوره ۱۹۹۰-۲۰۱۴. منحنی نشان‌دهنده همبستگی و محورهای X و Y نشان‌دهنده اختلاف ریشه میانگین مربعیات از نقطه مرجع (REF) و انحراف معیار است.

۱۷/۸۰ درجه سلسیوس و بر اساس مدل CMIP6-MME، ۱۷/۶۱ درجه سلسیوس است. این نتیجه نشان می‌دهد مدل همادی تولیدشده در این پژوهش دمای ایران را به خوبی برآورد کرده است. از آنجاکه دمای ایران از توپوگرافی پیروی می‌کند، کمینه‌های دمای سالانه ایران که اغلب کمتر از ۱۰ درجه سلسیوس است، در مناطق کوهستانی البرز و زاگرس رخ داده است. بیشینه دمای سالانه نیز با بیش از ۲۵ درجه سلسیوس در هر دو خروجی مشاهداتی و CMIP6-

۳-۲ وردایی تاریخی و پیش‌نگری آینده دمای سالانه

بررسی پراکنش فضایی دمای سالانه پنجاه ایستگاه هواشناسی همدید و برون‌داد چندمدلی همادی CMIP6-MME طی دوره تاریخی (۱۹۹۰-۲۰۱۴) نشان می‌دهد CMIP6-MME در برآورد دمای سالانه ایران از کارایی بیشتری برخوردار است به گونه‌ای که میانگین دمای سالانه ایران بر اساس داده‌های پنجاه ایستگاه هواشناسی همدید،



شکل ۳. دمای میانگین سالانه در ایران طی دوره تاریخی (۱۹۹۱-۲۰۱۴). (الف) برونداد چندمدلی همادی CMIP6-MME (ب) برونداد پنجاه ایستگاه هواشناسی همدید (واحد: درجه سلسیوس).

بی‌هنجاری دمای سالانه در کشور با افزایش طول دوره افزایشی است. به عبارت دیگر، هرچه به دوره‌های پایانی قرن بیست و یکم نزدیک‌تر شویم، دمای هوا در ایران روند افزایشی بیشتری خواهد داشت.

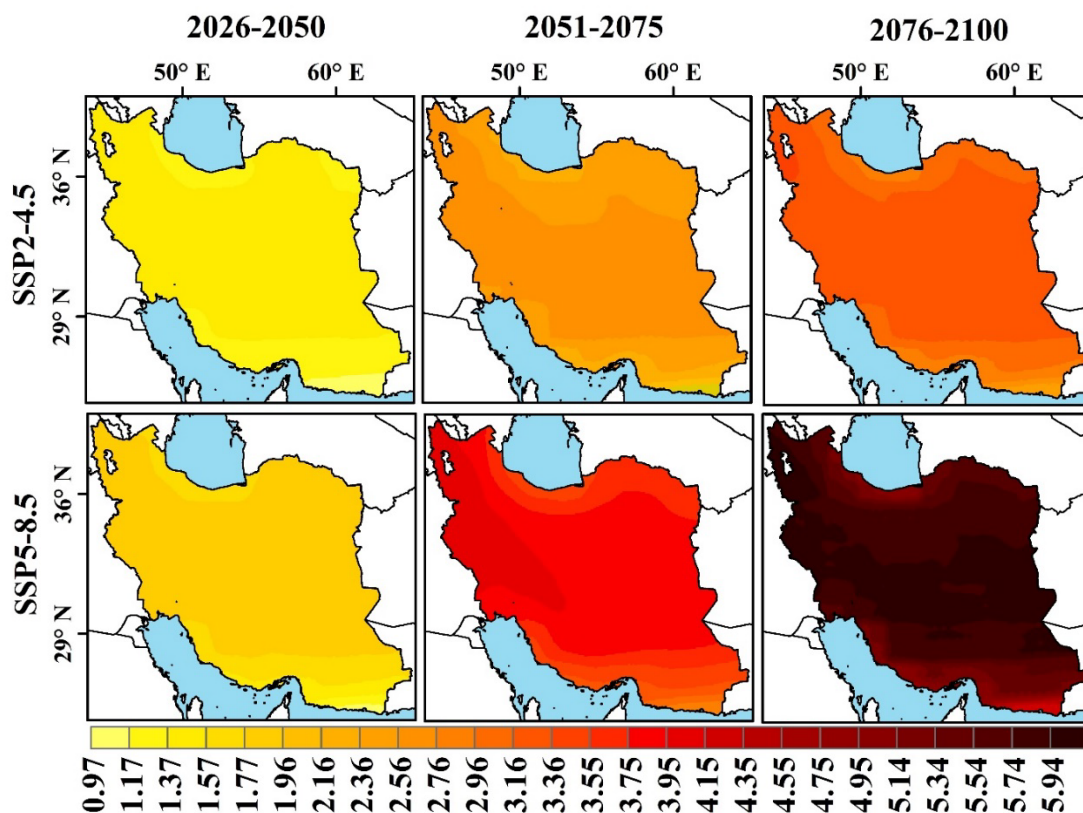
به‌طور کلی پراکنش فضایی تغییرات بی‌هنجاری دمای میانگین سالانه در ایران تغییرات زیادی دارد. در آینده، سواحل مکران واقع در جنوب شرقی ایران و سپس سواحل شمالی ایران نسبت به سایر مناطق کشور افزایش بی‌هنجاری به نسبت کمتری خواهند داشت (شکل ۴)، در حالی که بخش‌های شمال غربی، غربی و بخش‌هایی از ایران مرکزی، در تمامی سناریوها و دوره‌های آینده افزایش بیشتری در میانگین سالانه دمای هوا تجربه می‌کنند. دلیل این موضوع می‌تواند زیاد بودن رطوبت نسبی این مناطق و اثر گلخانه‌ای بخار آب موجود در جو باشد. پیش‌نگری رطوبت نسبی نیز فرض حاضر را در آینده تأیید می‌کند. همان‌طور که در شکل ۸ نیز آمده است، رطوبت نسبی در

MME در مکران واقع در سواحل جنوبی ایران و در خوزستان واقع در جنوب غربی ایران دیده می‌شود (شکل ۳).

پراکنش فضایی بی‌هنجاری میانگین سالانه دما در ایران تحت دو سناریوی SSP مختلف در شکل ۴ نشان داده شده است. برای دوره آینده نزدیک، میانگین دمای سالانه در ایران تحت سناریوی SSP2-4.5 افزایش ۱/۴۰ درجه سلسیوسی و تحت سناریوی SSP5-8.5 افزایش ۱/۸۳ درجه سلسیوسی را تجربه خواهد کرد. این مقدار در آینده میانی تحت دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به ترتیب ۲/۳۴ و ۳/۵۸ درجه سلسیوس خواهد بود. به همین ترتیب، بی‌هنجاری دما در آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) تحت دو سناریوی حد واسط (SSP2-4.5) و خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) به ترتیب ۲/۹۹ درجه سلسیوس و ۵/۵۸ درجه سلسیوس افزایش خواهد داشت. تغییرات دمایی پیش‌نگری‌شده در مناطق غربی و شمال غربی کشور شایان توجه است.

انتظار، افزایش بیشتر دمای میانگین سالانه در ایران تحت سناریوی خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) رخ می‌دهد.

تمامی سناریوها و دوره‌های بررسی شده در سواحل مکران واقع در جنوب شرقی ایران افزایش خواهد یافت. مطابق

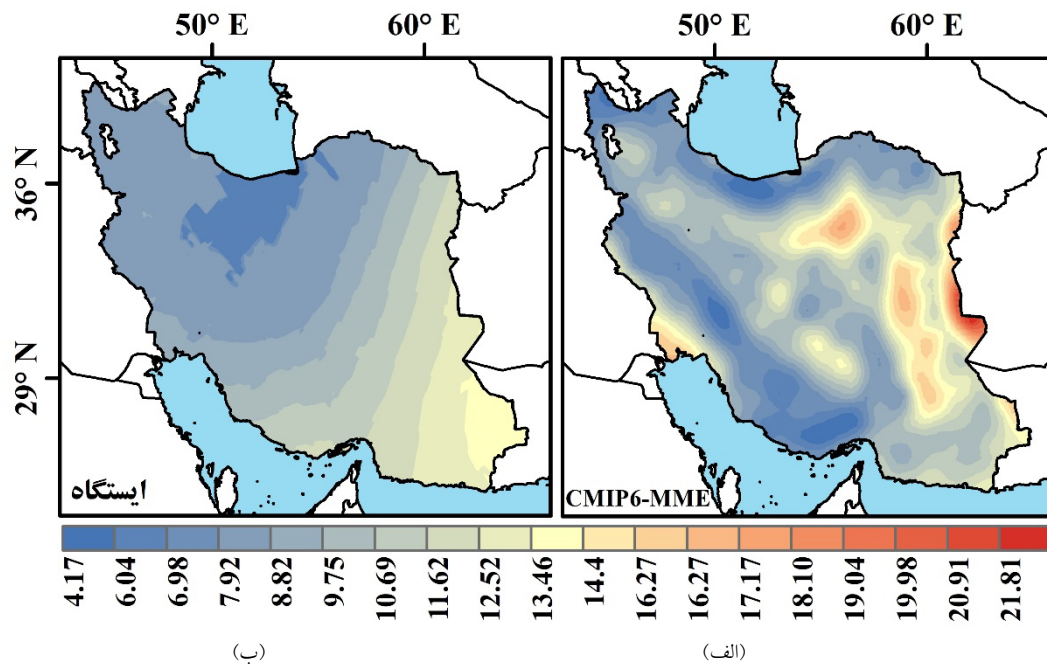


شکل ۴. بی‌هنجاری دمای میانگین سالانه مبتنی بر برآورد CMIP6-MME تحت سناریوهای حد واسط (SSP2-4.5) و خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) طی دوره‌های آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰)، آینده میانی (۲۰۵۱-۲۰۷۵) و آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) (واحد: درجه سلسیوس).

اغلب در مناطق شهری واقع شده‌اند، این نقشه نتوانسته است پراکنش فضایی تندى باد ایران را به‌درستی نمایش دهد. در مقابل، CMIP6-MME تندى باد را در شرق ایران و به‌خصوص برای باد ۱۲۰ روزه به‌خوبی نشان داده است. با توجه به اینکه در منطقه مرزی شرق ایران، ایستگاه اندازه‌گیری با طول دوره آماری همگام با این مطالعه در دسترس نیست، نمی‌توان با قطعیت از مقدار برآوردشده تندى باد CMIP6-MME در این منطقه از کشور صحبت کرد. به‌طور کلی GCM های CMIP6 به‌خوبی قادر به بازتولید میانگین الگوی اقلیمی فضایی تندى باد در ایران هستند.

۳-۳ وردایی تاریخی و پیش‌نگری آینده تندى باد سالانه

برای ارزیابی کمی کارایی شبیه‌سازی GCM های CMIP6 در بازتولید الگوی فضایی سالانه تندى باد در ایران، الگوهای اقلیمی تندى باد سالانه بر اساس داده‌های مشاهداتی و چندمدلی همادی CMIP6 در شکل ۵ نشان داده شده است. به‌طور کلی تندى باد حاصل از CMIP6-MME بیشتر از داده‌های مشاهداتی است. تندى باد در ایران حداقل ۴/۱۷ کیلومتر بر ساعت و حداکثر ۲۱/۸۱ کیلومتر بر ساعت است (شکل ۵). از آنجایی که نقشه تندى باد ایستگاهی با داده‌های پنجاه ایستگاهی تولید شده است که



شکل ۵. تندی باد سالانه در ایران طی دوره تاریخی (۱۹۹۱-۲۰۱۴). (الف) پرونداد چندمدلی همادی CMIP6-MME (ب) پرونداد پنجاه ایستگاه هواشناسی همدید (واحد: کیلومتر/ساعت).

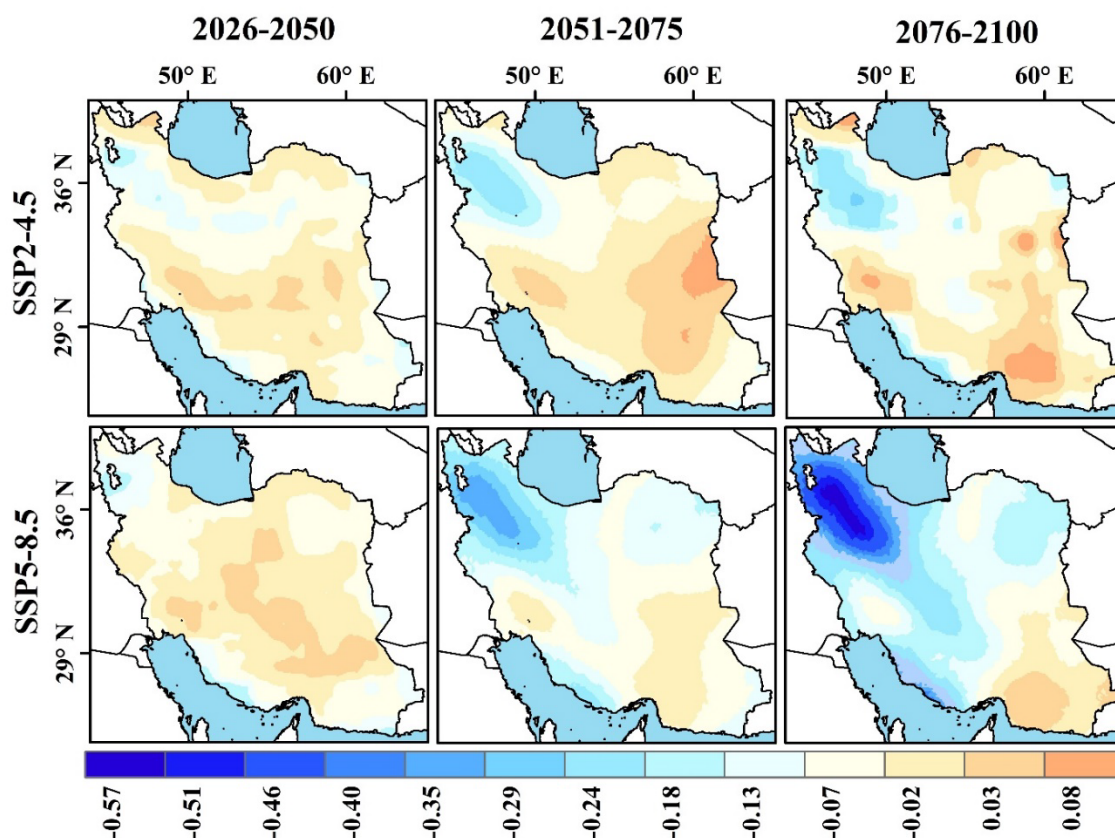
دمای ایران (زرین و داداشی رودباری، ۱۳۹۹ و زرین و همکاران، ۲۰۲۱)، افزایش دما در منطقه شمال غرب تأیید شده است. کاهش ناپایداری‌های جوّی همانند فعالیت همرفتی موضوع چالش برانگیزی است که مستلزم تحقیقات مستقل در این حوزه است. در مقابل، تندی باد در مناطق جنوب شرقی، شرق و بخش‌هایی از ایران مرکزی افزایشی است؛ باین حال بی‌هنجاری افزایشی همانند بی‌هنجاری کاهش در منطقه شمال غربی و تا حدودی شمال شرقی طی دوره‌های آینده نزدیک تا آینده دور پیوستگی زمانی-مکانی ندارد.

شبیه‌سازی‌های CMIP6 نشان می‌دهد واداشت گازهای گلخانه‌ای (GHGs)، در طول سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۰ یک واداشت اصلی برای تغییرات جهانی تندی باد از طریق سلول هدلی (Hadley Cell) تقویت شده روی نیمکره جنوبی و تسریع گرمایش قطب شمال روی نیمکره شمالی بوده است؛ باوجوداین، از سال ۲۰۱۰ تغییرات فاز PDO می‌تواند نقش

بررسی بی‌هنجاری سالانه تندی باد با استفاده از CMIP6-MME تحت دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 برای سه دوره آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰)، آینده میانی (۲۰۷۵-۲۰۵۱) و آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۷۶) در شکل ۶ نشان داده شده است. نتایج بی‌هنجاری تندی باد نشان داده است این متغیر در سال‌های آتی در بیشتر مناطق ایران کاهش خواهد بود. بیشترین کاهش تندی باد در دوره‌های آینده میانی و آینده دور تحت دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 دیده می‌شود. بیشترین مقدار کاهش این متغیر در مناطق شمالی غربی ایران با مقدار ۰/۵۷- کیلومتر بر ساعت تحت سناریوی SSP5-8.5 طی دوره آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۷۶) دیده می‌شود. همان‌طور که برای متغیر دما نشان داده شده است، این منطقه بیشینه افزایشی دما را در آینده دارد. تندی باد به کاهش ناپایداری جوّی همانند فعالیت همرفتی و افزایش دمای پتانسیل نسبت داده می‌شود. بر اساس این اصل، در این تحقیق و در مطالعات پیشین درباره

می‌تواند اختلاط قائم جو را به دلیل فعل‌وانفعالات جوی کاهش دهد (شن و همکاران، ۲۰۲۱). از سوی دیگر، تغییرات پوشش گیاهی/کاربری زمین و گرم شدن شتابان قطب شمال در نیمکره شمالی (دننگ و همکاران، ۲۰۲۱) نیز از دلایل احتمالاتی مرتبط با تغییرات تندی باد هستند. طی سال‌های اخیر، تغییرات کاربری اراضی در ایران باروند بسیار سریعی انجام شده است و انتظار می‌رود در صورت کنترل نشدن از سوی دولت، در سال‌های آتی نیز این روند با شدت بیشتری ادامه داشته باشد.

غالب‌تری در روند تندی باد نسبت به واداشت گازهای گلخانه‌ای (GHGs) داشته باشد (دننگ و همکاران، ۲۰۲۱). همچنین نتایج تحقیقات در سطح جهانی نشان می‌دهد به دلیل گرم شدن مداوم زمین، تندی باد در چین (وو و همکاران، ۲۰۲۰) و در کل کره زمین (دننگ و همکاران، ۲۰۲۱) در قرن بیست و یکم کاهش خواهد یافت. علت کاهش تندی باد پیچیده است و به کاهش ناپایداری جو مانند فعالیت همرفتی و افزایش دمای پتانسیل نسبت داده می‌شود (لانگ و همکاران، ۲۰۲۱). افزایش پایداری هوا



شکل ۶. بی‌هنجاری تندی باد سالانه مبتنی بر برونداد CMIP6-MME تحت سناریوهای حد واسط (SSP2-4.5) و خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) طی دوره‌های آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰)، آینده میانی (۲۰۵۱-۲۰۷۵) و آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) (واحد: کیلومتر بر ساعت).

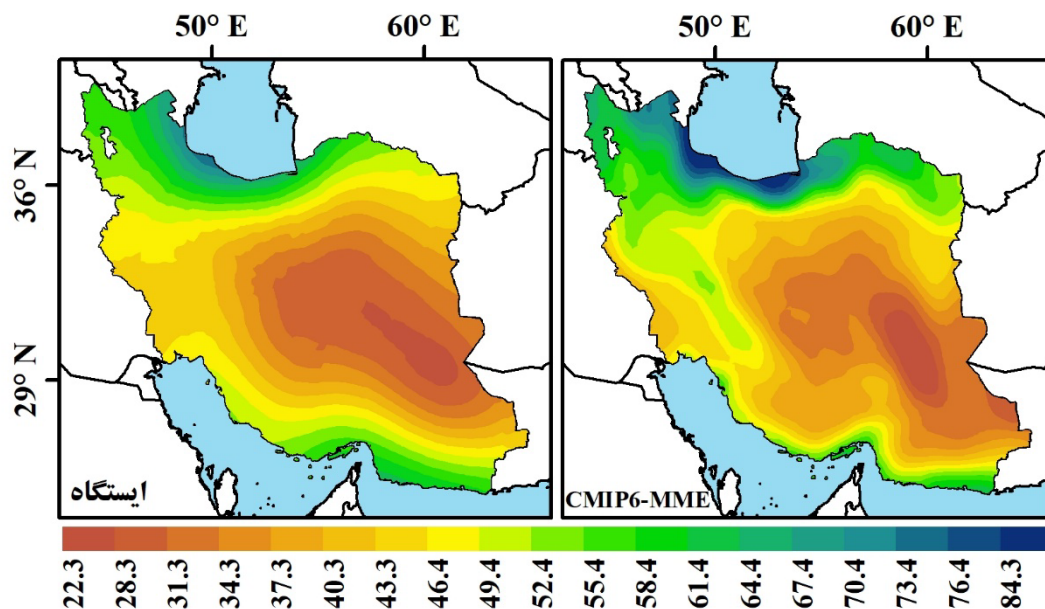
فرونی تنش گرمایی و شاخص شدت شرحی در مناطق ساحلی شود. رطوبت نسبی در ایران بسته به دوری و نزدیکی از منابع آبی تغییر می‌کند به طوری که بیشینه مقدار رطوبت نسبی در دو سری از داده‌های مشاهداتی و

۳-۴ وردایی تاریخی و پیش‌نگری آینده رطوبت نسبی سالانه

رطوبت نسبی متغیری کلیدی در اقلیم‌شناسی است. هم‌زمانی افزایش این متغیر با افزایش دما، می‌تواند باعث

CMIP6-MME، ۴۵/۵۱ درصد به دست آمده است (شکل ۷). اختلاف حدود ۵ درصدی بین CMIP6-MME و داده‌های ایستگاهی ایران کاملاً روشن است؛ زیرا در مناطق خشک و نیمه‌خشک داخلی ایران و به‌خصوص در دو منطقه دشت لوت و دشت کویر ایستگاهی وجود ندارد. در مقابل، در چندمدلی همادی CMIP6-MME در این مناطق نقطه شبکه وجود دارد که همین عامل باعث کاهش رطوبت نسبی در متوسط پهنه‌ای ایران برای CMIP6-MME شده است.

CMIP6-MME در سواحل شمالی و جنوبی ایران (شکل ۷) و کمینه رطوبت نسبی در مناطق داخلی کشور دیده می‌شود. رطوبت نسبی سالانه در ایران بین ۲۲/۳ تا ۸۴/۳ درصد در تغییر است. مقدار زیاد رطوبت نسبی در سواحل شمالی کشور در برون داد CMIP6-MME دیده شده است. برون داد چندمدلی همادی CMIP6 پراکنش فضایی رطوبت نسبی ایران را به خوبی نشان داده است. متوسط پهنه‌ای رطوبت نسبی سالانه ایران بر اساس داده‌های پنجاه ایستگاه هواشناسی همدید، ۵۰/۷۲ درصد و بر اساس برون داد



شکل ۷. میانگین رطوبت نسبی سالانه در ایران طی دوره تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۹۱). (الف) برون داد چندمدلی همادی CMIP6-MME (ب) برون داد پنجاه ایستگاه هواشناسی همدید (واحد: درصد).

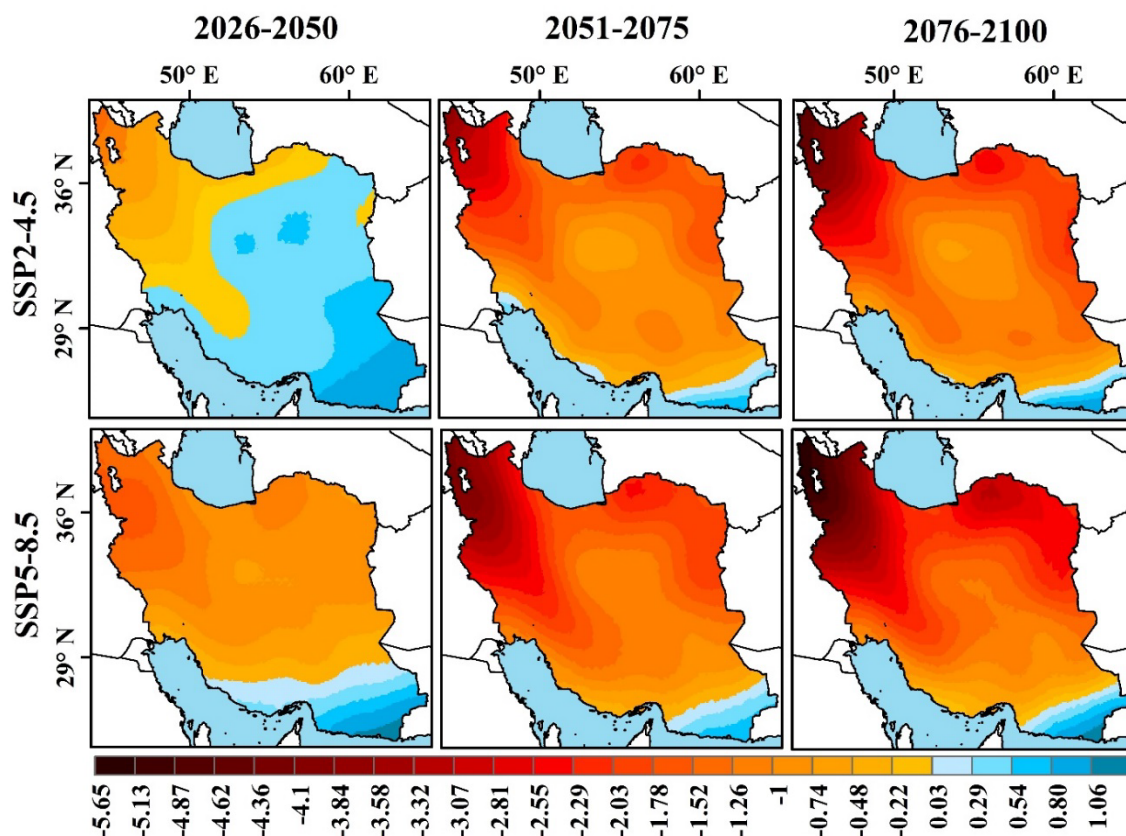
۸.۵ که سناریوی خیلی بدبینانه محسوب می‌شود، رطوبت نسبی با مقدار بیشتری نسبت به دوره تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۹۰) کاهش خواهد داشت. این مقدار کاهش برای آینده نزدیک ۰/۷۴ درصد، برای آینده میانی ۱/۶۳ درصد و برای آینده دور ۲/۱۷ درصد خواهد بود.

به‌رغم پیش‌نگری کاهش رطوبت نسبی در ایران، جنوب شرق کشور الگویی کاملاً متفاوت در هر دو سناریو و سه دوره بررسی شده دارد. در جنوب شرقی کشور رطوبت

بررسی بی‌هنجاری رطوبت نسبی سالانه در ایران بر اساس برون داد CMIP6-MME نشان می‌دهد رطوبت نسبی در بخش‌های درخور توجهی از ایران روند کاهشی خواهد داشت (شکل ۸). کاهش رطوبت نسبی در ایران با افزایش چشمگیر دما در طول مدت مشابه همراه است. رطوبت نسبی سالانه تحت سناریوی SSP2-4.5 به ترتیب کاهش ۰/۲ درصد، ۱/۲۳ درصد و ۱/۵۷ درصد در آینده نزدیک، آینده میانی و آینده دور خواهد داشت. تحت سناریوی SSP5-

آینده میانی و آینده دور است. باید در نظر داشت که چشمه‌های رطوبتی اصلی ایران و سازوکارهای مؤثر در تغییرات رطوبت نسبی در خارج از محدوده مورد مطالعه این تحقیق (کشور ایران) واقع است که این موضوع مستلزم تحقیقی مستقل در این حوزه است، اما به‌طور کلی همان‌طور که IPCC نیز در گزارش‌های خود اشاره داشته است، روند و بی‌هنجاری رطوبت نسبی با بسیاری از فرایندها از جمله تغییر دما، تغییرات بارش، الگوهای گردش جو و حتی عوامل انسانی مرتبط است (هیات بین‌دولتی تغییر اقلیم، ۲۰۱۳).

نسبی روند افزایشی نشان داده است که این افزایش تحت سناریوی SSP5-8.5 در دوره آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) تا ۱/۰۶ درصد نیز می‌رسد. این روند افزایشی احتمالاً به دلیل اقلیم خاص این منطقه از کشور در دوره گرم سال است. در تابستان، جنوب شرق ایران تحت تأثیر موسمی تابستانه آسیایی (ASM) قرار می‌گیرد که رطوبت فراوانی را از اقیانوس هند به ارمغان می‌آورد؛ لذا افزایش رطوبت نسبی در این منطقه از ایران می‌تواند در نتیجه فعالیت موسمی باشد. کاهش رطوبت نسبی در ایران حاکی از عرضه محدود رطوبت در جو طی دوره‌های آتی به‌خصوص در



شکل ۸. بی‌هنجاری میانگین رطوبت نسبی سالانه مبتنی بر برونداد CMIP6-MME تحت سناریوهای حد واسط (SSP2-4.5) و خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) طی دوره‌های آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰)، آینده میانی (۲۰۵۱-۲۰۷۵) و آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) (واحد: درصد).

۴ نتیجه‌گیری

تأثیر تغییر اقلیم بر متغیرهای اصلی اقلیم (دما، رطوبت نسبی و تندی باد) پرداخته است. مهم‌ترین یافته‌های این تحقیق به شرح زیر است:

تحقیق حاضر با استفاده از مدل‌های مشارکت‌یافته در فاز ششم (CMIP6) تحت سناریوهای مختلف SSP به بررسی

می‌دهد این متغیر در دهه‌های آتی در میانگین سالانه و در متوسط پهنه‌های کشور روند کاهشی خواهد داشت. در شمال غرب کشور، بیشینه بی‌هنجاری کاهشی تندی باد حداکثر ۰/۵۷ متر بر ثانیه با سناریوی SSP5-8.5 در آینده دور (۲۰۷۶-۲۱۰۰) نسبت به دوره تاریخی (۱۹۹۰-۲۰۱۴) است. این نتیجه با یافته‌های پیشین در چین (وو و همکاران، ۲۰۲۰) و در کل کره زمین (دننگ و همکاران، ۲۰۲۱) سازگار است.

❖ رطوبت نسبی در ایران از دهه ۱۹۹۰ به بعد روند کاهشی داشته است. در همین راستا پژوهش‌های مختلفی در ایران روند کاهشی رطوبت نسبی را طی دهه‌های اخیر گزارش کرده‌اند؛ برای مثال دارند (۱۳۹۴) روند کاهشی رطوبت جوئی و نم نسبی را طی دوره ۱۹۷۹ تا ۲۰۱۳ با استفاده از داده‌های ERA-Interim و ابلاغیان و همکاران (۱۳۹۸) با استفاده از داده‌های ایستگاهی در بیشتر مناطق کشور گزارش کرده‌اند. بررسی بی‌هنجاری رطوبت نسبی در ایران نشان می‌دهد این متغیر در هر دو سناریوی SSP طی سال‌های آتی در ایران بی‌هنجاری کاهشی دارد به گونه‌ای که رطوبت نسبی در آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۷۶) تحت سناریوی SSP5-8.5 در متوسط پهنه‌های کشور ۲/۱۷ درصد نسبت به دوره تاریخی (۱۹۹۰-۲۰۱۴) کاهش خواهد داشت. این نتایج نشان می‌دهد رطوبت جوئی ایران طی سال‌های آتی محدود خواهد شد. همگام با بی‌هنجاری کاهشی رطوبت نسبی در بخش‌های زیادی از ایران، الگویی متفاوت از بی‌هنجاری رطوبت نسبی در جنوب شرقی کشور مشاهده می‌شود. رطوبت نسبی در جنوب شرقی کشور در تمامی دوره‌ها و سناریوهای بررسی‌شده بی‌هنجاری افزایشی دارد. این نتیجه ممکن است ناشی از فعالیت‌های بیشتر موسمی تابستانه آسیا (ASM) طی سال‌های آتی در جنوب شرقی کشور باشد.

❖ نتایج این مطالعه حاکی از ضرورت کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای (GHGs) و تدوین برنامه‌های عملیاتی

❖ برونداد تصحیح اریبی شده به‌طور مؤثری اریبی مدل‌های منفرد CMIP6 را کاهش داده است و خروجی چندمدلی همادی همخوانی بسیار خوبی با داده‌های مشاهداتی طی دوره تاریخی دارد. کارایی چندمدلی همادی CMIP6 نسبت به مدل‌های منفرد CMIP6، بیشتر و خروجی آن به داده‌های مشاهداتی نزدیک‌تر است. این نتیجه در توافق با مطالعات بسیاری همانند بای و همکاران (۲۰۲۱) و شی و همکاران (۲۰۲۳) در سطح جهانی است. در ایران نیز کارایی بیشتر CMIP6-MME در برآورد فرین‌های دمایی (زرین و همکاران، ۲۰۲۱)، روزهای خشک و مرطوب متوالی (زرین و داداشی رودباری، ۱۴۰۰) و تبخیر-تعرق پتانسیل (مدرسی و عراقی، ۲۰۲۳) گزارش شده است. پژوهش حاضر نتایج تحقیقات پیشین در خصوص کارایی بیشتر چندمدلی همادی را در مطالعات تغییر اقلیم تأیید می‌کند.

❖ یافته‌های این مطالعه بر افزایش چشمگیر دما در سراسر ایران طی دهه‌های آتی تأکید دارد. شدت افزایش دما بسته به نوع سناریو و طول دوره مطالعه متغیر است به گونه‌ای که با افزایش طول دوره و کاربست سناریوی انتشار بالا (SSP5-8.5)، دما بی‌هنجاری بیشتری در آینده دارد. افزایش درخورتوجه دما در دهه‌های اخیر در ایران با یافته‌های پیشین همخوانی دارد (مسعودیان، ۱۳۸۴ و عزیزاده چوبری و نجفی، ۱۳۹۶). روند افزایشی دما که از نتایج این تحقیق است، در توافق با نتایج سایر پژوهش‌هایی است که با استفاده از مدل‌های CMIP5 (دارند و حمیدی، ۱۴۰۰) و CMIP6 (زرین و داداشی رودباری، ۱۳۹۹ و زرین و همکاران، ۲۰۲۱) انجام شده‌اند. در همین راستا چمانه‌فر و همکاران (۱۴۰۱) نیز روند کاهشی معنادار درصد شب‌های سرد و روند افزایشی معنادار درصد شب‌های گرم را در شمال شرق ایران در حالت تغییر اقلیم آینده گزارش کرده‌اند.

❖ بررسی تندی باد در ایران در حالت تغییر اقلیم نشان

CMIP6 در برآورد دمای ایران با تأکید بر حساسیت اقلیم ترازمند (ECS) و پاسخ اقلیم گذرا (TCR): مجله ژئوفیزیک ایران، ۱۷(۱)، ۳۹-۵۶.

سرابی، م.، دستورانی، م.، زرین، آ.، ۱۳۹۹، بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی آینده بر وضعیت دما و بارش (مطالعه موردی: حوضه آبخیز سد طرق مشهد): نشریه هواشناسی و علوم جو، ۳(۱)، ۶۳-۸۳.

علیزاده چوبری، ا.، نجفی، م. س.، ۱۳۹۶، روند تغییرات دمای هوا و بارش در مناطق مختلف ایران: فیزیک زمین و فضا، ۳۳(۳)، ۵۶۹-۵۸۴.

کدخدا، ا.، امیدوار، ک.، زرین، آ.، مزیدی، ا.، داداشی رودباری، ع.، ۱۴۰۲، پیش‌نگری تنش گرمایی در ایران بر اساس برونداد چندمدلی همادی CMIP6: مجله ژئوفیزیک ایران، ۱۷(۲)، ۱۵۷-۱۷۳.

مسعودیان، س. ا.، ۱۳۸۴، بررسی روند دمای ایران در نیم سده گذشته: پژوهش‌های جغرافیایی، ۵۴، ۲۹-۴۵.

Ahmadi, H., Rostami, N., and Dadashi-Roudbari, A., 2023, The impact of climate change on snowfall in Iran Basins using the satellite-derived snow products and CMIP6 Bias Corrected model: Theoretical and Applied Climatology, 151(1-2), 603-618.

Akinsanola, A. A., Ogunjobi, K. O., Abolude, A. T., and Salack, S., 2021, Projected changes in wind speed and wind energy potential over West Africa in CMIP6 models: Environmental Research Letters, 16(4), 044033.

Almazroui, M., Islam, M. N., Saeed, F., et al., 2021, Projected changes in temperature and precipitation over the United States, Central America, and the Caribbean in CMIP6 GCMs: Earth Systems and Environment, 5, 1-24.

Bai, H., Xiao, D., Wang, B., Liu, D. L., Feng, P., and Tang, J., 2021, Multi-model ensemble of CMIP6 projections for future extreme climate stress on wheat in the North China Plain: International Journal of Climatology, 41, E171-E186.

Deng, K., Azorin-Molina, C., Minola, L., Zhang, G., and Chen, D., 2021, Global near-surface wind speed changes over the last decades revealed by reanalyses and CMIP6 model simulations: Journal of Climate, 34(6), 2219-

سازگاری با تغییر اقلیم به منظور کاهش پیامدهای گرمایش جهانی همچون تنش‌های گرمایی در ایران است.

منابع

ابلاغیان، آ.، آخوندعلی، ع. م.، رادمنش، ف.، زارعی، ح.، ۱۳۹۸، بررسی روند تغییرات دما، بارندگی و رطوبت نسبی در ایران: علوم و مهندسی آبیاری، ۴۲(۳)، ۱۹۷-۲۱۲.

چمانه‌فر، س.، موسوی بایگی، م.، بابائیان، ا.، مدرسی، ف.، ۱۴۰۱، پیش‌نگری شاخص‌های حدی بارشی و دمایی در دوره ۲۰۲۶-۲۱۰۰ بر اساس برونداد مدل‌های CMIP6 (مطالعه موردی: مشهد): نشریه آبیاری و زهکشی ایران، ۱۶(۵)، ۹۶۳-۹۷۶.

دارند، م.، ۱۳۹۴، واکاوی وردایی زمانی- مکانی رطوبت جوّی ایران زمین طی بازه زمانی ۲۰۱۳-۱۹۷۹: پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۴۷(۲)، ۲۱۳-۲۳۹.

دارند، م.، حمیدی، س.، ۱۴۰۰، شبیه‌سازی تغییرات دمای ایران زمین بر پایه سناریوهای مختلف RCP: مخاطرات محیط طبیعی، ۱۰(۲۸)، ۸۵-۱۰۶.

زرین، آ.، داداشی رودباری، ع.، ۱۳۹۹، پیش‌نگری چشم‌انداز بلندمدت دمای آینده ایران مبتنی بر برونداد پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده فاز ششم (CMIP6): فیزیک زمین و فضا، ۳۳(۳)، ۵۸۳-۶۰۲.

زرین، آ.، داداشی رودباری، ع.، ۱۴۰۰، پیش‌نگری دوره‌های خشک و مرطوب متوالی در ایران مبتنی بر برونداد همادی مدل‌های تصحیح‌شده آریبی CMIP6: فیزیک زمین و فضا، ۳۳(۳)، ۵۶۱-۵۷۸.

زرین، آ.، داداشی رودباری، ع.، کدخدا، ا.، ۱۴۰۱، پیش‌نگری خشکسالی تحت سناریوهای SSP تا پایان قرن بیست‌ویکم، مطالعه موردی: حوضه دریاچه ارومیه: تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۳(۷)، ۱۴۹۹-۱۵۱۶.

زرین، آ.، داداشی رودباری، ع.، ۱۴۰۱، بررسی مدل‌های

- variability of Indian Summer Monsoon Rainfall in CMIP6 models simulation: *Theoretical and Applied Climatology*, **145**(1-2), 687-702.
- Lavergne, T., Kern, S., Aaboe, S., et al., 2022, A new structure for the sea ice essential climate variables of the Global Climate Observing System: *Bulletin of the American Meteorological Society*, **103**(6), E1502-E1521.
- Long, Y., Xu, C., Liu, F., Liu, Y., and Yin, G., 2021, Evaluation and projection of wind speed in the arid region of northwest China based on CMIP6: *Remote Sensing*, **13**(20), 4076.
- Lun, Y., Liu, L., Cheng, L., Li, X., Li, H., and Xu, Z., 2021, Assessment of GCMs simulation performance for precipitation and temperature from CMIP5 to CMIP6 over the Tibetan Plateau: *International Journal of Climatology*, **41**(7), 3994-4018.
- Mahlstein, I., Daniel, J. S., and Solomon, S., 2013, Pace of shifts in climate regions increases with global temperature: *Nature Climate Change*, **3**(8), 739-743.
- Matzarakis, A., Hämmerle, M., Endler, C., Muthers, S., and Koch, E., 2012, Assessment of tourism and recreation destinations under climate change conditions in Austria: *Meteorologische Zeitschrift*, **21**(2), 157.
- Meehl, G. A., Covey, C., Delworth, T., et al., 2007, The WCRP CMIP3 multimodel dataset: A new era in climate change research: *Bulletin of the American Meteorological Society*, **88**(9), 1383-1394.
- Modaresi, F., and Araghi, A., 2023, Projecting future reference evapotranspiration in Iran based on CMIP6 multi-model ensemble: *Theoretical and Applied Climatology*, **153**, 101-112.
- Oleson, K. W., Monaghan, A., Wilhelmi, O., et al., 2015, Interactions between urbanization, heat stress, and climate change: *Climatic Change*, **129**, 525-541.
- O'Neill, B. C., Tebaldi, C., Van Vuuren, D. P., et al., 2016, The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6: *Geoscientific Model Development*, **9**(9), 3461-3482.
- Scafetta, N., 2023, CMIP6 GCM ensemble members versus global surface temperatures: *Climate Dynamics*, **60**(9-10), 3091-3120.
- Shen, C., Zha, J., Zhao, D., Wu, J., Fan, W., Yang, M., and Li, Z., 2021, Estimating centennial-scale changes in global terrestrial near-surface wind speed based on CMIP6 GCMs: *Environmental Research Letters*, **16**(8), 2234.
- 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.
- Eyring, V., Cox, P. M., Flato, G. M., et al., 2019, Taking climate model evaluation to the next level: *Nature Climate Change*, **9**(2), 102-110.
- Farhat, F., Kashifi, M. T., Jamal, A., and Saba, I., 2022, Spatiotemporal projections of precipitation and temperature over Afghanistan based on CMIP6 global climate models: *Modeling Earth Systems and Environment*, **8**(3), 4229-4242.
- Gidden, M. J., Riahi, K., Smith, S. J., et al., 2019, Global emissions pathways under different socioeconomic scenarios for use in CMIP6: a dataset of harmonized emissions trajectories through the end of the century: *Geoscientific Model Development*, **12**(4), 1443-1475.
- Huang, J., Li, Q., and Song, Z., 2022, Historical global land surface air apparent temperature and its future changes based on CMIP6 projections: *Science of The Total Environment*, **816**, 151656.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2013, Summary for Policymakers of 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, UK.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2018, Global warming of 1.5°C, in Masson-Delmotte, V., et al. (eds.), An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty: Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (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.
- Kumar, P., and Sarthi, P. P., 2021, Intraseasonal

- 084039.
- Shi, J., Tian, Z., Lang, X., and Jiang, D., 2023, Past to future drylands in China: A multimodel analysis using CMIP6 simulations: *Journal of Climate*, **36**(8), 2735-2751.
- Supharatid, S., Nafung, J., and Aribarg, T., 2022, Projected changes in temperature and precipitation over mainland Southeast Asia by CMIP6 models: *Journal of Water and Climate Change*, **13**(1), 337-356.
- Taylor, K. E., 2001, Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **106**(D7), 7183-7192.
- Taylor, K. E., Stouffer, R. J., and Meehl, G. A., 2012, An overview of CMIP5 and the experiment design: *Bulletin of the American Meteorological Society*, **93**(4), 485-498.
- Trenberth, K. E., 2011, Changes in precipitation with climate change: *Climate Research*, **47**(1-2), 123-138.
- Wei, T., Yan, Q., Qi, W., Ding, M., and Wang, C., 2020, Projections of Arctic sea ice conditions and shipping routes in the twenty-first century using CMIP6 forcing scenarios: *Environmental Research Letters*, **15**(10), 104079.
- Wu, J., Shi, Y., and Xu, Y., 2020, Evaluation and projection of surface wind speed over China based on CMIP6 GCMs: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **125**(22), e2020JD033611.
- Xie, B., Zhang, Q., and Ying, Y., 2011 Trends in precipitable water and relative humidity in China: 1979–2005: *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, **50**(10), 1985-1994.
- 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**, 817-830.
- Yassen, A. N., Nam, W. H., and Hong, E. M., 2020, Impact of climate change on reference evapotranspiration in Egypt: *Catena*, **194**, 104711.
- You, Q., Min, J., Lin, H., Pepin, N., Sillanpää, M., and Kang, S., 2015, Observed climatology and trend in relative humidity in the central and eastern Tibetan Plateau: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **120**(9), 3610-3621.
- Yu, E., Liu, D., Yang, J., Sun, J., Yu, L., and King, M. P., 2023, Future climate change for major agricultural zones in China as projected by CORDEX-EA-II, CMIP5 and CMIP6 ensembles: *Atmospheric Research*, **288**, 106731.
- Zarrin, A., Dadashi-Roudbari, A., and Hassani, S., 2021, Historical variability and future changes in seasonal extreme temperature over Iran: *Theoretical and Applied Climatology*, **146**, 1227-1248.
- Zhou, T., Chen, Z., Zou, L., et al., 2020, Development of climate and earth system models in China: Past achievements and new CMIP6 results: *Journal of Meteorological Research*, **34**, 1-19.

The impacts of climate change on the essential climate variables (ECVs) in Iran

Elham Kadkhoda¹, Kamal Omidvar^{2*}, Azar Zarrin³, Ahmad Mazidi⁴ and Abbasali Dadashi-Roudbari⁵

¹ Ph.D. Student, Department of Geography, Yazd University, Yazd, Iran

² Professor, Department of Geography, Yazd University, Yazd, Iran

³ Associate Professor, Department of Geography, Faculty of Letters and Humanities, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

⁴ Associate Professor, Department of Geography, Yazd University, Yazd, Iran

⁵ Postdoctoral Research Associate, Department of Geography, Faculty of Letters and Humanities, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

(Received: 02 July 2023, Accepted: 12 October 2023)

Summary

It is challenging to estimate how the climate of a region will change under global warming in the future. Among the essential climate variables, temperature, relative humidity and wind speed are very important, and their changes in relation to each other can have many consequences, such as increasing heat stress and evapotranspiration.

In this research, we investigated future temperature, wind speed, and relative humidity in Iran. Five models, namely GFDL-ESM4, IPSL-CM6A-LR, MPI-ESM1-2-HR, MRI-ESM2-0, and UKESM1-0-LL from the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) have been evaluated versus observations for 1990-2014. A multi-model ensemble was generated with the Integrated Weighted Mean (IWM) method from selected CMIP6 models, and the performances of individual CMIP6 and CMIP6-MME models in estimating temperature, wind speed, and relative humidity were investigated. The results showed that all five selected models are capable to reproduce the variables; however, the CMIP6-MME significantly improved the results. The CMIP6-MME showed good agreement with observational data both in terms of climatology and spatial distribution of each variable, and its performance is higher compared to individual models.

We have used two Shared Socioeconomic Pathways (SSPs), namely SSP2-4.5 and SSP5-8.5, and three-time periods, namely near-term (2026-2050), midterm (2051-2075), and long-term (2076-2100) relative to the historical period (1990-2014).

The results of this study showed that Iran will undergo changes in temperature, wind speed, and relative humidity spatial distribution in the future. The decrease in relative humidity and dryness of the air in the future can have important consequences for agriculture, food security, and water resources management. The findings of this study, in agreement with previous studies, emphasize the significant increase in temperature throughout Iran. Under the SSP2-4.5 (SSP5-8.5) scenario, the average annual temperature of the country increases by 1.40 (1.83), 2.34 (3.58), and 2.99 (5.58) degrees Celsius in the near (2026-2050), middle (2051-2075), and far (2076-2100) future, respectively.

Along with the increasing trend of temperature in Iran, wind speed will decrease in most regions of the country in the middle and end of the 21st century under two SSP scenarios. This decreasing trend can be a result of decreasing atmospheric instability and increasing potential temperature. The northwest of Iran has shown the maximum increasing temperature and the maximum decreasing wind speed. The decrease in relative humidity in Iran has been evident since the 1990s, and the projection results indicate that it will decrease in large parts of Iran in the future. However, the relative humidity in the southeast of Iran shows an increasing rate in the future. Results of this study show that the heat stress will be significantly higher through SSP5-8.5 than SSP2-4.5 in the 21st century due to the decrease in wind speed and increase in temperature throughout Iran. Therefore, Iran should quickly move on to formulate and implement long-term adaptation plans for resilience against climate change.

Keywords: Climate change, temperature, wind speed, relative humidity, CMIP6-MME, Iran