

## پیشن‌نگری دمای ایران در آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۴۰) بر اساس رویکرد همادی چندمدلی CMIP6

آذر زرین\* - استادیار آب‌وهواشناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد  
عباسعلی داداشی رودباری - پژوهشگر پسادکتری آب و هواشناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۲۰

### چکیده

هدف از این پژوهش پیشنهاد دمای ایران بر اساس رویکرد همادی چندمدلی (MME) با کاربست مدل‌های CMIP6 است. برون‌داد پنج مدل برای دوره تاریخی (۱۹۹۵-۲۰۱۴) و آینده نزدیک (۲۰۱۲-۲۰۴۰) تحت دو سناریوی بدبینانه (SSP3-7.0) و خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) به‌کار گرفته شد. برای درستی‌سنجی مدل‌ها از سنج‌های آماری MBE و NRMSE و داده‌های دمای روزانه ۱۲۰ ایستگاه هم‌دید استفاده شد. از روش‌های تغییر عامل دلتا (DCF) و میانگین وزنی مستقل (IWM) به‌ترتیب برای تصحیح اریبی و ایجاد یک مدل همادی استفاده شد. برای آشکارسازی تنش‌های گرمایی از شاخص طول مدت گرما (WSDI) استفاده شد. نتایج نشان داد که تصحیح اریبی و همادی کردن مدل‌ها با روش IWM پیشنهاد دمای سالانه را به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک نسبت به مناطق مرطوب شمالی بهبود می‌بخشد. نتایج کلی نشان داد که بر اساس سناریوهای SSP3-7.0 و SSP5-8.5، میانگین دمای سالانه کشور به‌ترتیب ۱/۱۳ و ۱/۲۶ درجه سلسیوس افزایش خواهد یافت. کمینه بی‌هنجاری در جنوب شرق و بیشینه آن در مناطق شمال غربی و مرکزی ایران اتفاق می‌افتد. شاخص طول مدت گرما نیز بی‌هنجاری مثبت را برای آینده نشان می‌دهد. بر اساس سناریوی SSP5-8.5، بیشینه این شاخص در سواحل جنوبی ایران بی‌هنجاری مثبت ۷۴/۵ روز را نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی: ایران، پیشنهاد دما، شاخص WSDI، مدل‌های CMIP6، مدل همادی.

### مقدمه

تغییر اقلیم یکی از تهدیدات مهم قرن بیست‌ویکم است. نگرانی اصلی در خصوص اثرهای تغییر اقلیم معطوف به وردش‌های احتمالی مرتبط با وردایی اقلیم و به‌تبع آن افزایش رخداد‌های فرین است (گراس و همکاران، ۲۰۲۰: ۱۴). تغییرات فراسنج دما تأثیرات گوناگونی در سامانه اقلیم دارد. تغییر طولانی‌مدت میانگین سالانه دما در سطح جهانی یکی از نشانگرهای گرمایش جهانی است که تأثیرات چشم‌گیری در اکوسیستم‌های زمینی دارد. این تأثیرات می‌تواند دربرگیرنده چرخه‌های هیدرولوژیکی، کشاورزی، و خشک‌سالی باشد (دای و همکاران، ۲۰۱۱: ۴۷). بر این اساس، بررسی تغییرات سالانه و دهه‌ای میانگین دما در سطح منطقه‌ای بسیار مهم است. همچنین، درک چگونگی تغییر دما و شاخص‌های مرتبط با آن همانند تنش‌های گرمایی در مقیاس‌های زمانی مختلف مهم است تا بر اساس آن تصمیمات آگاهانه‌ای در رابطه با توسعه اقتصادی و برنامه‌های اقدام اقلیم (CAP) اتخاذ کرد.

یکی از منابع عمده داده برای مطالعه تغییر اقلیم مدل‌های گردش کلی جو (GCM) هستند که به‌طور گسترده‌ای

برای پایش و پیش‌نگری تغییر اقلیم گذشته و آینده (هی و همکاران، ۲۰۱۹) و برآورد مخاطرات ریسک منطقه‌ای از آن استفاده می‌شود (خان و دیگران، ۲۰۲۰). GCMها توانایی قابل توجهی را برای شبیه‌سازی دما و بارش دارند. با این حال، آن‌ها محدودیت‌هایی نیز دارند. از جمله این محدودیت‌ها خطاهای سیستماتیک (IPCC, 2013) در بازتولید میانگین دما و بارش به‌ویژه در مناطقی با توپوگرافی پیچیده، همانند ایران، است. پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده مرحله ششم (CMIP6) مرحله جدیدی از مدل‌های اقلیمی و به عبارتی GCMهایی هستند که از سال ۲۰۱۵ با به‌خدمت‌گرفتن سناریوهای جدید (SSPs) و همچنین مجموعه‌ای جدید از مشخصات غلظت، انتشار، و سناریوهای پوشش سطح زمین (گیدن و همکاران، ۲۰۱۹) به شبیه‌سازی اقلیم آینده زمین پرداخته‌اند. هنوز مشخص نیست مدل‌های جدید CMIP6 تا چه میزان قادر به بازتولید متغیرهای اقلیمی برای ایران باشند و عملکرد این مدل‌ها در شرایط کاربست مستقیم، تصحیح اریبی، و ایجاد یک مدل همادی به چه شکل خواهد بود. بنابراین، این پژوهش به بررسی برون‌داد خام، تصحیح‌شده اریبی، و در نهایت کاربست یک رویکرد چندمدلی (MME) برای دمای ایران با استفاده از مدل‌های CMIP6 می‌پردازد. ارائه پیش‌نگری‌های اقلیمی در هر سه رویکرد گفته‌شده (برون‌داد مستقیم، تصحیح‌شده اریبی، و ایجاد مدل همادی) با کمترین عدم قطعیت برای برنامه‌های راهبردی و مدیریتی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. یک روش معمول برای کاستن از عدم قطعیت مدل‌ها گزینش مدلی با کمترین مقدار اریبی است. در این رویکرد عملکرد مدل برای دوره تاریخی با توجه به مشاهدات ایستگاهی و داده‌های بازتحلیل‌شده آزمون می‌شود (لی و وانگ، ۲۰۱۴: ۱۰۱). با این حال، کاربست این رویکرد با مشکلاتی همراه است که می‌توان به وردایی زیاد مدل در دوره تاریخی اشاره کرد (یان و همکاران، ۲۰۱۹: ۱۳۳۳).

به‌طور کلی، عدم قطعیت پیش‌نگری‌های اقلیمی را می‌توان در سه بخش تفکیک کرد: ۱. عدم قطعیت ناشی از سناریو: این نوع از عدم قطعیت در سناریوهای مختلف انتشار می‌تواند به‌عنوان واداشت خارجی برای مدل‌های اقلیمی مورد استفاده قرار گیرد؛ ۲. عدم قطعیت پاسخ مدل: این حالت مربوط به پاسخ مدل‌های مختلف نسبت به شرایط محیطی است؛ ۳. وردایی طبیعی: وردایی رفتار ذاتی سامانه اقلیم است و عدم قطعیت ناشی از آن در همه مدل‌ها دیده می‌شود (هاوکینز و ساتون، ۲۰۰۹: ۱۰۹۶). کاهش عدم قطعیت مدل‌های اقلیمی دشوار است؛ زیرا این امر مستلزم دانش آینده در خصوص انتشار گازهای گلخانه‌ای و انتشار ذرات معلق در هوا و همچنین پیشرفت در فناوری‌های مربوط به مدل‌سازی است که به‌طور بالقوه ممکن است در آینده با توسعه بیشتر مدل‌های اقلیمی مقدار آن نیز کمتر شود (ماس و همکاران، ۲۰۱۰: ۷۴۹). عدم قطعیت مدل ممکن است با پیشرفت دانش فرایندهای طبیعی و تفکیک افقی آن‌ها کاهش یابد. به‌عنوان مثال، افزایش تفکیک افقی مدل‌های اقلیم منطقه‌ای (RCM)<sup>۱</sup> از ۰/۴۴ تا ۰/۱۱ درجه قوسی تأثیر معنی‌داری در عملکرد مدل دارد که اغلب به‌عنوان «ارزش‌افزوده» مدل‌ها نامیده می‌شود. از سوی دیگر، افزایش قابلیت‌های محاسباتی در دسترس برای گروه‌های مدل‌سازی و پیشرفت‌های بیشتر در توصیف دقیق‌تر فرایندهای موجود در مدل‌ها این توانایی را برای کاهش عدم قطعیت دارد. اما افزودن پیچیدگی بیشتر به مدل‌ها ممکن است به عدم قطعیت‌های بالاتر در پیش‌نگری‌ها منجر شود (لورنز و همکاران، ۲۰۱۸: ۴۵۰۷). همان‌طور که گفته شد، بخش سوم عدم قطعیت در پیش‌نگری‌های اقلیمی وردایی طبیعی است. وردایی طبیعی می‌تواند با اندرکنش بین اجزای داخلی سامانه اقلیم همراه باشد که نتیجه آن به وردش‌های سالانه، دهه‌ای، یا حتی چنددهه‌ای مانند ENSO<sup>۲</sup> و NAO<sup>۳</sup> منجر شود (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۸: ۴۰۱۹).

1. Regional Climate Models (RCM)  
 2. El Niño–Southern Oscillation (ENSO)  
 3. North Atlantic Oscillation (NAO)

در مدل‌های CMIP6 از سناریوهای جدید (SSP) استفاده شدند. سناریوهای جدید به خدمت گرفته شده در مرحله ششم (CMIP6)، علاوه بر در نظر گرفتن انتشار گازهای گلخانه‌ای، از تلفیق خط سیرهای اجتماعی-اقتصادی مشترک در کنار خط سیرهای نماینده غلظت گازهای گلخانه‌ای برای تحلیل پسخورهای بین تغییر اقلیم و فاکتورهای اجتماعی-اقتصادی نظیر رشد جهانی جمعیت، توسعه اقتصادی، و پیشرفت‌های فناوری استفاده شده است.

در پژوهش‌های بسیاری به بررسی مدل‌های اقلیمی برای پیش‌نگری دما در سطح جهانی پرداخته شده است. این پژوهش‌ها را می‌توان در دو دسته کلی قرار داد: در دسته نخست، که طیف بیشتری از مطالعات را دربر می‌گیرد، به تحلیل نتایج منتج از بهترین مدل (کمترین عدم قطعیت)، از بین مجموعه مدل‌های مورد بررسی پرداخته شده است و در دسته دوم از رویکرد همادی برای بررسی وردایی و پیش‌نگری تغییر اقلیم مربوط به دما و بارش استفاده شده است.

برای نمونه، کیم و همکاران (۲۰۲۰) با همادی کردن چند مدل CMIP6 و CMIP5 مشابه و بررسی فرین‌های اقلیمی در سطح جهانی به این نتیجه رسیدند که CMIP6 عدم قطعیت کمتری نسبت به CMIP5 دارد. نتایج این تحقیق نشان داد که روزهای گرم روند افزایشی و شب‌های سرد روند کاهشی خواهند داشت. ارزیابی مدل‌های همادی امریکای شمالی پژوهشی است که بکر و همکاران (۲۰۲۰) به مطالعه آن پرداختند. بررسی آن‌ها از توانمندی مدل‌های همادی نشان‌دهنده بهبود قابل توجه فراسنج دماست. بای و همکاران (۲۰۲۰) از مدل‌های همادی CMIP6 برای بررسی تغییر اقلیم آینده و اثر آن در عملکرد محصول گندم دشت‌های شمالی چین استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند که دما تحت سناریوی SSP3-7.0 تا پایان قرن حاضر ۱ درجه سلسیوس و بر اساس سناریوی SSP5-8.5 تا ۶ درجه سلسیوس افزایش خواهد داشت و این تغییرات دما در تولید گندم نقش چشم‌گیری دارد. یو و همکاران (۲۰۲۰) به ارزیابی ۱۸ مدل اقلیمی از مجموعه مدل‌های CMIP5 برای بررسی تغییرات دمای جهانی در مقیاس‌های زمانی مختلف پرداختند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد که مدل‌ها در سطح اقیانوس‌ها بهتر از سطح زمین دما را برآورد می‌کنند. پیش‌نگری تغییرات فرین‌های گرم، خشک، و مرطوب با کاربست مدل‌های همادی CMIP6 پژوهشی است که وگل و همکاران (۲۰۲۰) انجام دادند. نتایج این پژوهش نشان داد تحت پدیده گرمایش جهانی فرین‌های دمایی به شکل قابل توجهی افزایش خواهند یافت.

در پژوهش‌های بسیاری بررسی دمای ایران مورد توجه قرار گرفته است؛ از جمله این مطالعات می‌توان به پژوهش مسعودیان (۱۳۹۰) اشاره کرد که نواحی دمایی و تغییرات آن را در نیم قرن گذشته با استفاده از داده‌های ایستگاهی بررسی کرده است. همچنین، مطالعاتی همچون عزیززاده چوبری و نجفی (۱۳۹۶) با بررسی روند تغییرات دمای هوا و بارش در مناطق مختلف ایران روندهای افزایشی دماهای کمینه، بیشینه، و میانگین روزانه را در بیشتر مناطق ایران گزارش کردند. احمدی و همکاران (۱۳۹۸)، ضمن بررسی عملکرد مدل HadGEM2-ES از پروژه CORDEX، بی‌هنجاری فصلی دمای ایران را مطالعه کردند؛ نتایج آن‌ها نشان داد بی‌هنجاری دما در همه فصول، سناریوها، و دوره‌های زمانی تا پایان قرن ۲۱ مثبت است و فصل زمستان بیشینه بی‌هنجاری دما را در بین فصول داراست. در همین راستا، فلاح قاهره و همکاران (۲۰۱۹) نیز بی‌هنجاری مثبت دما را در ارتفاعات شمال غرب و غرب ایران بر اساس مدل‌های CMIP5 نشان دادند.

اغلب مطالعاتی که ذکر شد بر پیش‌نگری دمای کشور با استفاده از برون‌داد پروژه مرحله سوم (CMIP3) و پنجم (CMIP5) مدل‌های جفت‌شده اقلیمی با استفاده از مدل‌های منفرد متمرکز شده‌اند. هرچند که کاربست مدل‌های همادی نیز برای دیگر متغیرهای اقلیمی همچون بارش (آزادی و همکاران، ۱۳۹۱؛ نجفی و همکاران، ۱۳۹۶) انجام شده است،

این امر برای دما تاکنون بررسی نشده است. برون داد مرحله ششم (CMIP6) پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده اقلیمی مدتی است که در دسترس قرار گرفته است و محدود مطالعاتی همچون زرین و همکاران (۱۴۰۰) و زرین و داداشی رودباری (۱۳۹۹) به بررسی بی‌هنجاری و روند دمای ایران با استفاده از مدل‌های ۱۰۰ کیلومتری CMIP6 پرداخته‌اند. کاربست مدل‌های منفرد عدم قطعیت بالایی دارند؛ به همین منظور، در این پژوهش ایجاد یک مدل همادی برای دمای ایران مورد توجه قرار گرفته است. هدف از این پژوهش ایجاد یک مدل همادی (MME) با استفاده از برون داد مدل‌های تصحیح‌شده اریبی CMIP6 برای پیش‌نگری دمای ایران و طول مدت دوره گرما در آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۴۰) است.

## مواد و روش‌ها

### داده‌های مورد استفاده

#### ایستگاه‌های همدید

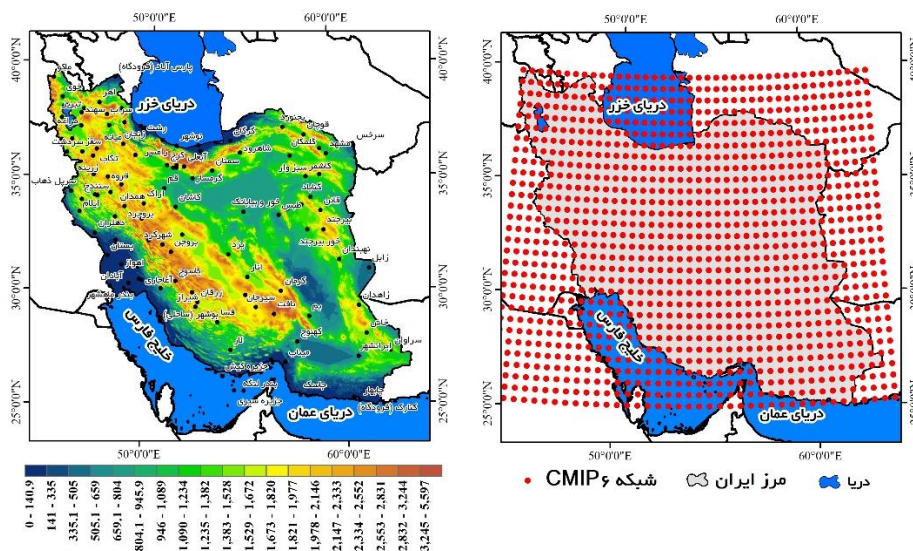
برای درستی‌سنجی متغیر دمای مدل‌های CMIP6 در دوره تاریخی ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۴ (این دوره بیست‌ساله به‌عنوان مبنای مطالعه حاضر در نظر گرفته شد) از مجموعه داده‌های ایستگاه‌های همدید ایران (۱۲۰ ایستگاه در شکل ۱) استفاده شد. به‌منظور گزینش این ایستگاه‌ها، علاوه بر مشارکت حداکثری در مناطق مختلف اقلیمی ایران، تلاش شد تا ایستگاه‌هایی مطالعه شوند که کمترین داده مفقود را در کل سری زمانی داشته باشند.

#### پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده مرحله ششم (CMIP6)

کارگروه مدل‌های جفت‌شده (WGCM) از برنامه تحقیقات جهانی آب‌وهوا (WCRP) بر پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده نظارت می‌کند؛ پروژه‌ای که اکنون در مرحله ششم است. مدل‌های CMIP6 نسبت به نسخه پیشین (CMIP5)، ضمن بهبود سازوکار فرایندهای فیزیکی و همرفت، ماژول‌های جدیدی را نیز در بخش‌های اقیانوس، بیوژئوشیمی اقیانوس، و یخ دریا اضافه کرده‌اند (سوارت و همکاران، ۲۰۱۹؛ تاتیه و همکاران، ۲۰۱۹؛ ژو و یانگ، ۲۰۲۰). در این پژوهش پنج مدل از سری مدل‌های CMIP6 با تفکیک افقی ۰٫۵ درجه قوسی (اطلاعات مدل‌های مورد استفاده در جدول ۱ آمده است) تحت سناریوهای خط سیر مشترک اجتماعی-اقتصادی (SSPs) (ریاحی و همکاران، ۲۰۱۷) استفاده شد. سناریوهای SSP در پنج گروه با عنوان SSP1 تا SSP5 نام‌گذاری شده‌اند. در این پژوهش از سناریوهای بدبینانه (SSP3-7.0) (High challenges to mitigation and adaptation) و خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) (High challenges to mitigation, low challenges to adaptation) برای پیش‌نگری دمای سالانه و تنش گرمایی تحت شرایط تغییر اقلیم برای دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۴۰) استفاده شده است.

جدول ۱. مدل‌های CMIP6 مورد بررسی در این پژوهش

مدل	مؤسسه سازنده	تفکیک افقی (درجه قوسی)
GFDL-ESM4	آزمایشگاه دینامیک شاره‌های ژئوفیزیکی آمریکا	۰٫۵
IPSL-CM6A-LR	مؤسسه پیر سیمون لاپلاس فرانسه	۰٫۵
MPI-ESM1-2-HR	مدل سامانه زمین مؤسسه ماکس پلانک آلمان	۰٫۵
MRI-ESM2-0	مؤسسه تحقیقات هواشناسی ژاپن	۰٫۵
UKESM1-0-LL	مرکز هدلی، اداره هواشناسی انگلستان	۰٫۵



شکل ۱. ایستگاه‌های همدید منتخب (چپ) به همراه شبکه ۵۰ کیلومتری برون داد مدل‌های CMIP6 (راست)

## روش‌های آماری

### درستی‌سنجی مدل‌های منتخب

از سنجه‌های آماری برای درستی‌سنجی عملکرد مدل‌ها استفاده می‌شود تا شباهت بین داده‌های مشاهداتی و مدل‌سازی شده در قالب مقادیر آماری نشان داده شود (گوپتا و همکاران، ۲۰۰۹: ۸۴). در این مطالعه برای درستی‌سنجی عملکرد و همچنین محاسبه مقدار اریبی مدل‌های مورد بررسی از سنجه‌های مجذور میانگین مربعات خطای بهنجار (NRMSE)<sup>۱</sup> و میانگین خطای اریبی (MBE)<sup>۲</sup> استفاده شد. علت استفاده از این دو روش از بین روش‌های موجود به دلیل سنجش بهتر خطا و اریبی مدل‌ها از یکسو و همچنین متداول بودن این روش‌ها از سوی دیگر است؛ زیرا متداول بودن سنجه‌های نام‌برده قابلیت مقایسه را با سایر پژوهش‌ها و نتایج به دست آمده ایجاد می‌کند.

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum (P_i - O_i)^2}{n}}}{\bar{O}} \quad (1)$$

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z^*(X_i) - Z(X_i)) \quad (2)$$

در رابطه ۱ تعداد کل گام‌های زمانی است؛  $P_i$  مقدار شبیه‌سازی شده (دمای سالانه مدل همادی ایجاد شده با CMIP6) و  $O_i$  مقدار مشاهداتی (ایستگاه‌های همدید منتخب) است. در رابطه ۲،  $z^*(X_i)$  مقدار دما در برون داد همادی CMIP6 در  $X_i$ ،  $Z(X_i)$  مقدار مشاهده‌ای متغیر در  $X_i$ ،  $n$  تعداد نقاط متغیر مشاهده‌ای است (نوبن و همکاران، ۲۰۱۹: ۴۳۲۷).

### مقیاس‌کاهی مدل‌های CMIP6 به منظور تصحیح اریبی با روش تغییر عامل دلتا (DCF)<sup>۳</sup>

مدل‌های گردش کلی جو (GCMs) معمولاً دارای دو مشخصه اصلی بزرگ مقیاس بودن و داشتن اریبی نسبت به داده‌های

1. Normalized Root Mean Square Error (NRMSE)
2. Mean Bias Error (MBE)
3. Delta change Factor (DCF)

مشاهداتی هستند. بر این اساس، ضرورت دارد به جای استفاده مستقیم از داده‌های مدل در مطالعات مرتبط با تغییر اقلیم از میانگین دوره‌های درازمدت این داده‌ها استفاده شود (علیزاده و همکاران، ۱۳۹۹). برای تصحیح اربیی مدل‌های CMIP6 از داده‌های ۱۲۰ ایستگاه همدید استفاده شد. شرح محاسباتی کامل این روش را زرین و داداشی رودباری (۱۳۹۹) و علیزاده و همکاران (۱۳۹۹) ارائه کرده‌اند.

### همادی چندمدلی پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده مرحله ششم (MME-CMIP6) با استفاده از روش میانگین وزنی مستقل (IWM)<sup>۱</sup>

با توجه به پیچیدگی سامانه اقلیم، توصیف کافی از تغییر اقلیم با یک مدل غیرممکن است. برای کاهش عدم قطعیت، میانگین، یا ترکیب از نتایج حاصل از چندین مدل در پیش‌نگری‌های اقلیمی استفاده می‌شود. از رویکرد همادی می‌توان برای درک بهتر و کاهش عدم قطعیت در مطالعات تغییر اقلیم استفاده کرد. بیشاپ و آبراموویتز (۲۰۱۳) یک روش میانگین وزنی با رویکرد مستقل (IWM) ایجاد کردند که وابستگی بین مدل‌های تعریف‌شده را با استفاده از کوواریانس خطاهای مدل نشان می‌دهد. در این مطالعه از IWM برای همادی کردن مدل‌های منتخب (GFDL-ESM4, MPI-, UKESM1-0-LL, ESM1-2-HR, IPSL-CM6A-LR, MRI-ESM2-0) استفاده شد. روش IWM در حقیقت ترکیب خطی یک مجموعه از شبیه‌سازی‌های مدل است که میانگین اختلاف مربع (MSD) را با توجه به مشاهدات به حداقل می‌رساند. این روش بر اساس رابطه ۳ محاسبه می‌شود (برای کاهش حجم مقاله سایر جزئیات ارائه نشد).

$$\sum_{j=1}^J (\mu_e^j - y^j)^2 \text{ where } \mu_e^j = w^T x^j = \sum_{k=1}^K w_k x_k^j \quad (3)$$

در رابطه ۳،  $(1, \dots, j, \dots, J)$  گام‌های زمانی مقادیر سالانه دما (در این پژوهش مقادیر همادی دمای سالانه) و  $(1, \dots, k, \dots, K)$  GCM‌های منتخب CMIP6 هستند.  $\mu_e^j$  مقدار دمای همادی شده چندمدلی و  $j$ th گام زمانی است؛  $y^j$  نشان‌دهنده  $j$ th گام زمانی در دوره مشاهداتی است.  $w$  وزن هر مدل از مجموعه مدل‌های همادی است که جمع آن ۱ خواهد بود. در نهایت،  $x^j$  ضریب مدل در ترکیب خطی است (بای و همکاران، ۲۰۲۰: ۲۷).

### شاخص طول مدت گرما (WSDI)

شاخص WSDI تعداد روزهایی در هر سال با حداقل شش روز متوالی که  $TX > TX^{90th}$  باشد تعریف می‌شود. این شاخص توسط کارگروه ETCCDI توسعه و ارائه شده است. در این شاخص TX دمای بیشینه روزانه و  $TX^{90th}$  صدک ۹۰ دمای بیشینه روزانه است. برای محاسبه  $TX^{90th}$  برای هر روز، از میانگین متحرک پنج‌روزه در طول دوره تاریخی و پیش‌نگری شده استفاده شد. این شاخص نمایانگر تنش گرمایی است.

### یافته‌های تحقیق

#### درستی سنجی و وزن‌دهی مدل‌های منتخب CMIP6

برای تحلیل بهتر پاسخ هر مدل و کاهش حجم مقاله یک ایستگاه نماینده از پهنه‌های کلان‌مقیاس اقلیمی ایران (مسعودیان، ۱۳۹۰: ۱۷۹) بررسی شد. بر اساس برون‌داد مستقیم مدل‌ها (DMO)<sup>۲</sup> در اقلیم کرانه‌های دریای عمان و

1. Independence Weighted Mean (IWM)

2. Direct Model Output (DMO)

خزر هر پنج مدل CMIP6 میانگین دمای سالانه را کمتر برآورد کردند (جدول ۲ ایستگاه‌های چابهار و رشت). با این حال، مدل‌های CMIP6 در سایر اقلیم‌های ایران، میانگین دمای سالانه را بیشتر برآورد کردند. از طرف دیگر، مقدار اریبی میانگین سالانه دما، تغییرات زیادی را در پهنه کشور نشان می‌دهد. از نظر گستره مکانی، مقادیر اریبی دمای میانگین سالانه در مناطق شمالی ایران زیاد است (اریبی مدل MRI-ESM2-0 برای ایستگاه رشت ۴/۱۰- درجه سلسیوس است). بالابودن اریبی دما در مناطق شمالی ایران و عرض‌های جغرافیایی بالاتر ممکن است با توپوگرافی پیچیده، تقابل دریا و خشکی، و همچنین تنوع زیاد پوشش سطح زمین در مقیاس مکانی کوچک در این مناطق در ارتباط باشد. مطالعات قبلی بر اساس مدل‌های CMIP5 نشان دادند که عملکرد GCMها بسیار متفاوت است و همچنین تغییرات متغیرهای اقلیمی همچون دما و بارش به پارامترهای متفاوتی همچون توپوگرافی، عرض جغرافیایی، نوع پوشش منطقه، و دوری/ نزدیکی به منابع رطوبتی بستگی دارد (پاتاک و همکاران، ۲۰۱۹: ۶). پس از تصحیح اریبی مدل‌های منتخب با استفاده از روش DCF و ایجاد مدل همادی چندگانه (MME) با روش IWM مقدار اریبی به شکل قابل توجهی کاهش یافته است (جدول ۲). در مطالعه حاضر بررسی دامنه اریبی مدل همادی در پهنه‌های مختلف اقلیمی نشان‌دهنده عملکرد رضایت‌بخش MME-CMIP6 در ایران است؛ اما در خصوص کاربست برون‌داد مدل‌های CMIP6 برای مناطق شمالی ایران حتی در صورت تصحیح اریبی و استفاده از رویکرد MME-CMIP6 نیز باید احتیاط بیشتری کرد. برای این مناطق استفاده از روش مقیاس‌گاهی دینامیکی که شرایط جغرافیایی منطقه به‌عنوان شرایط آغازین در مدل‌های منطقه محدود وارد می‌شود الزامی است.

بخش انتهایی جدول ۲ وزن هر یک از مدل‌ها را در دوره تاریخی (۱۹۹۵-۲۰۱۴) نشان داده است. در همه ایستگاه‌های نمونه وزن مدل UKESM1-0-LL بیشتر از چهار مدل دیگر است. سپس، مدل IPSL-CM6A-LR بیشترین وزن را در مدل همادی به خود اختصاص داده است. مدل GFDL-ESM4 در غالب مناطق ایران و در بیشتر ایستگاه‌های نمونه فقط یک‌پنجم کل وزن MME-CMIP6 را در روش IWM به خود اختصاص داده است. این مدل بیشترین مقدار اریبی را در بین مدل‌های منتخب داشته است.

برای مقایسه بهتر عملکرد مدل‌های منتخب در شبیه‌سازی میانگین دمای سالانه کشور در دوره تاریخی (۱۹۹۵-۲۰۱۴)، از مجذور میانگین مربعات خطای بهنجار (NRMSE) و میانگین خطای اریبی (MBE) استفاده شده است (شکل ۲). باید توجه داشت که مقادیر NRMSE و MBE به‌طور مستقیم قابل مقایسه نیستند؛ زیرا رابطه آن‌ها غیروابسته است و تا حدودی به ضریب تغییرات (CV) سری زمانی مشاهداتی بستگی دارد. بنابراین، نتایج سنجه NRMSE نمی‌تواند راهنمایی برای درک MBE باشد.

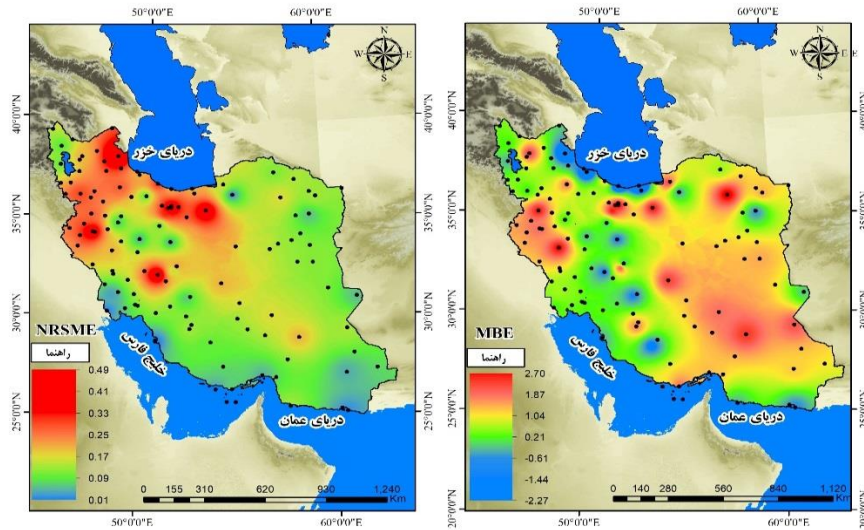
مقادیر سنجه NRMSE خطای بهنجار شده مدل همادی ایجاد شده تلقی می‌شود و هر چه مقدار آن کمتر باشد، نشان‌دهنده عملکرد مناسب مدل است. همان‌طور که در شکل ۲ نیز دیده می‌شود، مقدار NRMSE در بیشتر ایستگاه‌های مورد بررسی برای مدل همادی ایجاد شده کمتر از ۰/۰۵ است که بر این اساس می‌توان اذعان کرد رویکرد MME-CMIP6 عملکرد خوبی را در شبیه‌سازی دمای ایران دارد. برون‌داد MME-CMIP6 در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران از عملکرد بالاتری برخوردار است. بررسی سنجه اریبی (MBE) که میزان انحرافات و متعاقب آن بیش‌برآوردی و کم‌برآوردی را آزمون می‌کند، بیانگر این است که MME-CMIP6 دما را در کل بیشتر از واقعیت برآورد می‌کند؛ زیرا متوسط اریبی ایران مثبت است. متوسط اریبی برای مدل GFDL-ESM4، ۱/۰۰، IPSL-CM6A-LR، ۰/۹۶۲، MPI-ESM1-2-HR، ۰/۹۸۳، MRI-ESM2-0، ۱/۰۰۱، و UKESM1-0-LL، ۰/۹۳۶ درجه سلسیوس به دست آمده است.

بنابراین، مدل‌های UKESM1-0-LL و IPSL-CM6A-LR به‌ترتیب مدل‌های کارا برای برآورد دمای ایران در بین مدل‌های بررسی‌شده‌اند. مقدار اریبی دما در ایران ۲/۲۷- تا ۲/۷۰ درجه سلسیوس در نوسان است. جنوب شرق، ایران مرکزی، و سواحل مکران و خلیج فارس کمترین مقدار اریبی دما را نشان می‌دهند و در مقابل غرب، شمال شرق، و بخش‌هایی از ایران مرکزی بیشینه مقدار اریبی را نشان می‌دهند. سواحل خزری نیز بیشترین مقدار اریبی منفی (کم‌برآوردی) را برای دما تحت مدل MME-CMIP6 نشان می‌دهد. به‌طور کلی، می‌توان اذعان کرد که برون‌داد مدل MME-CMIP6 در مناطق مرکزی، فلات شرقی، و سواحل جنوبی ایران نتایج مناسب‌تری ارائه می‌دهد.

جدول ۲. میانگین خطای اریبی و وزن مدل‌های منتخب CMIP6 در ایستگاه‌های نمونه مناطق مختلف اقلیمی ایران با روش‌های DMO، DCF، و IWM (دوره آماری بیست‌ساله ۱۹۹۵-۲۰۱۴)

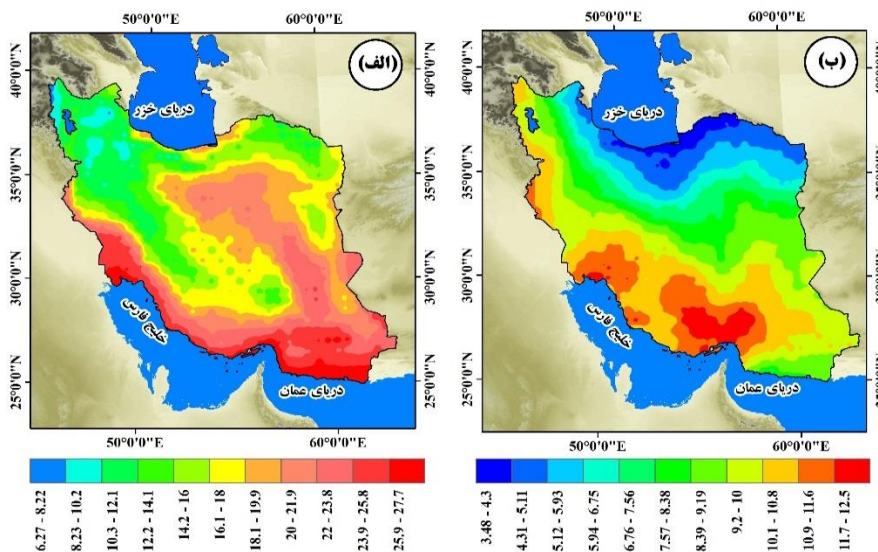
وزن هر مدل در روش IWM	میانگین خطای اریبی (MBE)			مدل	ایستگاه	پهنه اقلیمی
	IWM	DCF	DMO			
۰/۱۲۵		۲/۲۲	۳/۸۸	GFDL-ESM4	کرمانشاه	اقلیم بلندی‌ها
۰/۲۷۶		۲/۰۲	۳/۹۹	IPSL-CM6A-LR		
۰/۱۶۷	۱/۸۷	۲/۳۹	۳/۶۱	MPI-ESM1-2-HR		
۰/۱۵۴		۱/۹۸	۳/۷۴	MRI-ESM2-0		
۰/۲۷۸		۱/۷۲	۳/۸۹	UKESM1-0-LL		
۰/۱۲۴		۱/۷۸	۳/۵۴	GFDL-ESM4	شیراز	اقلیم کوهپایه غربی
۰/۲۶۱		۱/۸۷	۲/۹۵	IPSL-CM6A-LR		
۰/۱۹۰	۱/۶۵	۱/۸۹	۳/۴۸	MPI-ESM1-2-HR		
۰/۱۳۹		۱/۹۱	۴/۰۱	MRI-ESM2-0		
۰/۲۸۶		۱/۶۹	۳/۶۸	UKESM1-0-LL		
۰/۱۷۳		۰/۶۱	۱/۶۵	GFDL-ESM4	اهواز	اقلیم کرانه‌های خلیج فارس
۰/۲۲۳		۰/۵۸	۱/۴۷	IPSL-CM6A-LR		
۰/۱۵۱	۰/۵۷	۰/۷۴	۱/۶۷	MPI-ESM1-2-HR		
۰/۱۴۲		۰/۷۸	۲/۰۳	MRI-ESM2-0		
۰/۳۱۱		۰/۵۳۳	۲/۰۰	UKESM1-0-LL		
۰/۱۳۳		۲/۸۳	۳/۹۸	GFDL-ESM4	گرگان	اقلیم دامنه‌های شمالی البرز
۰/۲۳۹		۲/۶۸	۳/۴۵	IPSL-CM6A-LR		
۰/۱۸۲	۲/۰۹	۲/۴۷	۳/۶۹	MPI-ESM1-2-HR		
۰/۱۵۴		۲/۷۸	۳/۴۷	MRI-ESM2-0		
۰/۲۹۲		۲/۱۲	۳/۵۴	UKESM1-0-LL		
۰/۱۱۱		-۳/۱۰	-۳/۹۹	GFDL-ESM4	رشت	اقلیم کرانه‌های خزر
۰/۲۷۹		-۲/۶۷	-۳/۸۷	IPSL-CM6A-LR		
۰/۱۹۲	-۲/۰۸	-۳/۰۷	-۳/۵۴	MPI-ESM1-2-HR		
۰/۱۳۴		-۳/۴۵	-۴/۱۰	MRI-ESM2-0		
۰/۲۸۴		-۲/۶۴	-۳/۳۰	UKESM1-0-LL		
۰/۱۰۹		۲/۶۴	۲/۹۸	GFDL-ESM4	مشهد	اقلیم کوهپایه‌های شرقی
۰/۲۶۷		۲/۰۱	۲/۸۴	IPSL-CM6A-LR		
۰/۱۹۱	۱/۴۰	۲/۰۵	۲/۹۳	MPI-ESM1-2-HR		
۰/۱۱۸		۲/۵۴	۳/۰۱	MRI-ESM2-0		
۰/۳۱۵		۱/۸۷	۲/۹۱	UKESM1-0-LL		
۰/۱۰۸		۲/۴۳	۳/۱۴	GFDL-ESM4	زاهدان	اقلیم فلات شرقی
۰/۲۷۰		۲/۲۹	۲/۸۷	IPSL-CM6A-LR		
۰/۱۸۲	۲/۰۸	۲/۲۷	۳/۰۹	MPI-ESM1-2-HR		
۰/۱۴۹		۲/۲۵	۲/۹۸	MRI-ESM2-0		
۰/۲۸۹		۲/۱۱	۲/۹۱	UKESM1-0-LL		
۰/۱۲۷		-۰/۹۲	-۱/۸۷	GFDL-ESM4	چابهار	اقلیم کرانه‌های عمان
۰/۲۹۹		-۰/۹۷	-۱/۵۴	IPSL-CM6A-LR		
۰/۱۴۴	-۰/۶۱	-۱/۰۲	-۱/۹۷	MPI-ESM1-2-HR		
۰/۱۱۰		-۱/۳۲	-۲/۱۲	MRI-ESM2-0		
۰/۳۲۰		-۰/۷۴	-۱/۳۵	UKESM1-0-LL		





شکل ۲. عملکرد فراسنج دما مبتنی بر برون‌داد مدل MME-CMIP6 در ایران مبتنی بر سنج‌های مجذور میانگین مربعات خطای بهنجار (NRMSE) و میانگین خطای اریبی (MBE) در دوره تاریخی (۱۹۹۵-۲۰۱۴)

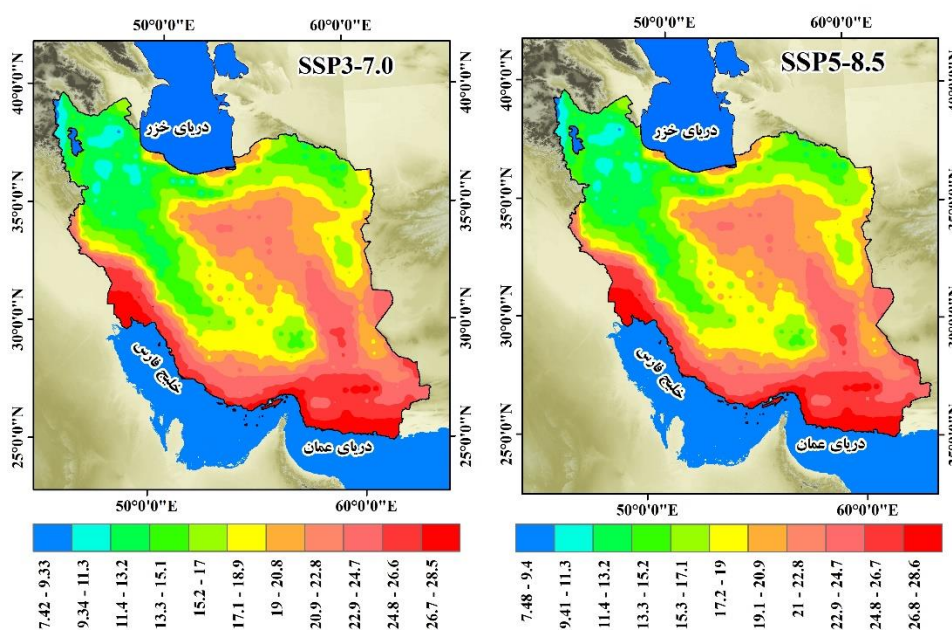
تغییرات میانگین دمای سالانه و شاخص طول مدت گرما طی دوره تاریخی (۱۹۹۵-۲۰۱۴) تغییرات بلندمدت دمای ایران و شاخص طول مدت گرما (WSDI) برای یک دوره بیست‌ساله با استفاده از مدل MME-CMIP6 بررسی شد (شکل ۳). دمای متوسط سالانه ایران بر اساس برون‌داد MME-CMIP6 بین ۶/۲۷ و ۲۷/۷ درجه سلسیوس در نوسان است. سواحل خلیج فارس و دریای عمان بیشینه دما و مناطق شمال‌غربی ایران کمینه دما را نشان دادند. دامنه طول مدت گرما در ایران در طی دوره تاریخی بین ۳/۴۸ تا ۱۲/۵ روز در تغییر است. سواحل خلیج فارس بیشینه و مناطق شمالی و شمال‌غربی ایران بخصوص استان اردبیل به همراه مناطقی از شمال شرق ایران کمینه شاخص WSDI را نشان دادند.



شکل ۳. (الف) میانگین بلندمدت دمای سالانه مبتنی بر برون‌داد MME-CMIP6؛ (ب) شاخص طول مدت گرما (WSDI) طی دوره تاریخی (۱۹۹۵-۲۰۱۴)

## پیش‌نگری دمای کشور مبتنی بر برون‌داد MME-CMIP6 در آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۴۰)

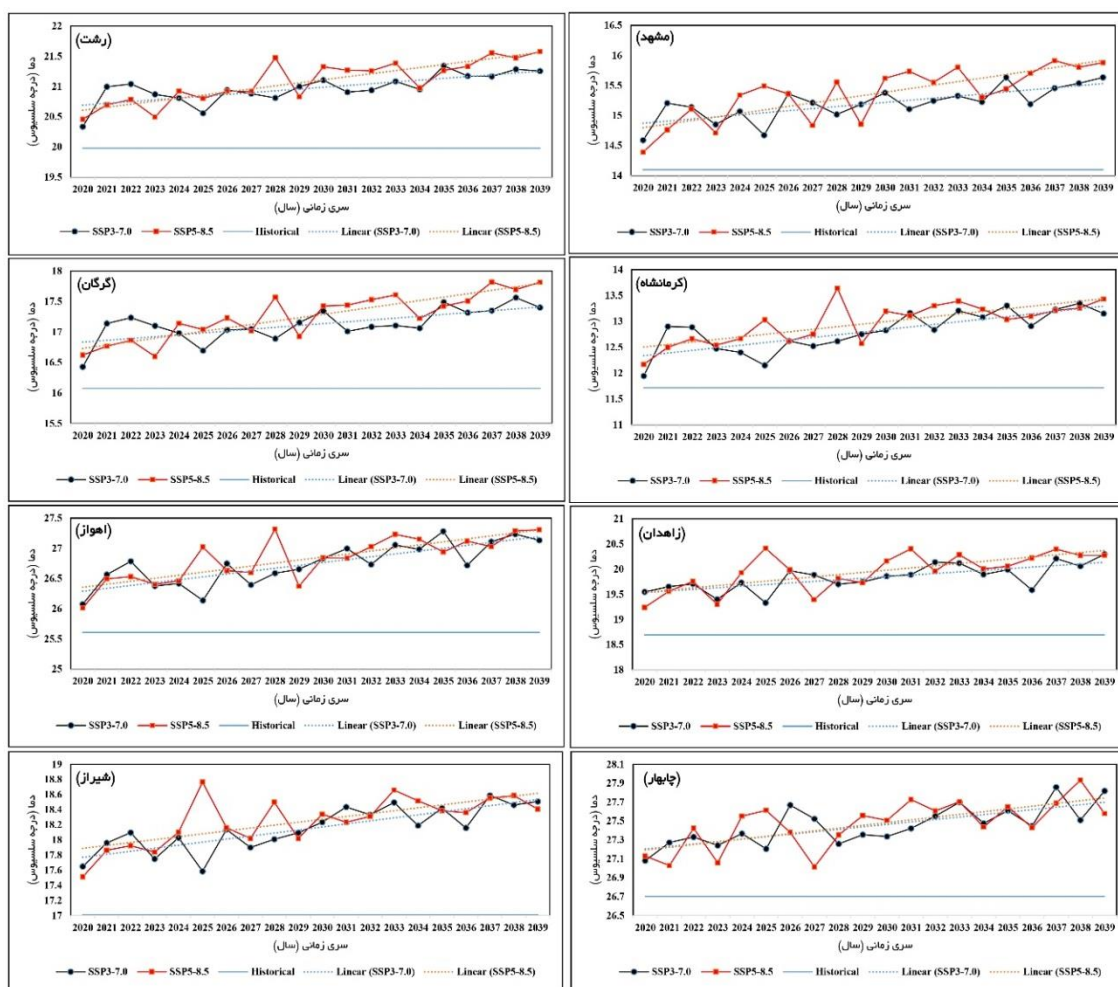
دمای پیش‌نگری شده در هر دو سناریوی SSP3-7.0 و SSP5-8.5 در آینده افزایش بیشتری را در مناطق داخلی، شمال غرب، شمال، و شمال شرق ایران نشان می‌دهد. برای دوره آینده نزدیک طی سال‌های ۲۰۲۱-۲۰۴۰ به‌طور متوسط بی‌هنجاری سالانه دمای ایران ۱/۱۳ و ۱/۲۶ درجه سلسیوس به‌ترتیب بر اساس سناریوهای SSP3-7.0 و SSP5-8.5 برآورد شده است (شکل ۴). کمینه بی‌هنجاری دمای کشور بر اساس سناریوی SSP3-7.0، ۰/۷۶۵ و بیشینه آن ۱/۲۲۷ درجه سلسیوس است. همچنین، برای سناریوی SSP5-8.5 نیز بی‌هنجاری دما برای مقادیر کمینه و بیشینه دمای سالانه به‌ترتیب ۰/۷۸۵ و ۱/۳۸۰ درجه سلسیوس به‌دست آمده است. بیشینه گستره مکانی تغییرات دما در بخش‌های شمال غربی، ارتفاعات غربی، و شمال ایران دیده می‌شود. سایر مناطق ایران هم تحت هر دو سناریوی منتخب، تغییرات مداوم افزایشی دما را در دوره مورد مطالعه نشان داد. همان‌طور که انتظار می‌رود، بیشینه افزایش میانگین سالانه دما در ایران تحت سناریوی SSP5-8.5 رخ داده است. بی‌هنجاری مثبت دما در ارتفاعات ایران بخصوص در مناطق شمالی و شمال غربی باعث تسریع ذوب یخچال‌های طبیعی در این منطقه می‌شود. در همین راستا، رحمان و همکاران (۲۰۱۸) نیز به این نتیجه رسیدند که رشته‌کوه‌های بزرگ جهان، همانند هندوکوش و مناطق غربی هیمالیا، بیشینه بی‌هنجاری مثبت دما را بر اساس مدل‌های CMIP6 نشان می‌دهند.



شکل ۴. پیش‌نگری دمای سالانه کشور در آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۴۰) مبتنی بر برون‌داد MME-CMIP6 برای دو سناریوی بدبینانه (چپ) و خیلی بدبینانه SSP5-8.5 (راست)

پیش‌نگری تغییرات سری زمانی فراسنج دما در هشت ایستگاه نماینده ایران برای آینده نزدیک تحت سناریوهای SSP3-7.0 و SSP5-8.5 نشان داد که مقدار گرمایش در مناطق مختلف ایران متفاوت است (شکل ۵). شیب روند افزایشی به ازای هر سال بر اساس سناریوی SSP3-7.0، ۰/۰۲۸، ۰/۰۲۸، ۰/۰۳۴، ۰/۰۵۵، ۰/۰۴۹، ۰/۰۳۹، ۰/۰۳۲ و ۰/۰۲۵ و سناریوی SSP5-8.5، ۰/۰۵۱، ۰/۰۵۱، ۰/۰۵۶، ۰/۰۵۵، ۰/۰۴۸، ۰/۰۵۱، ۰/۰۳۹، ۰/۰۴۳ و ۰/۰۲۸ به‌ترتیب در رشت،

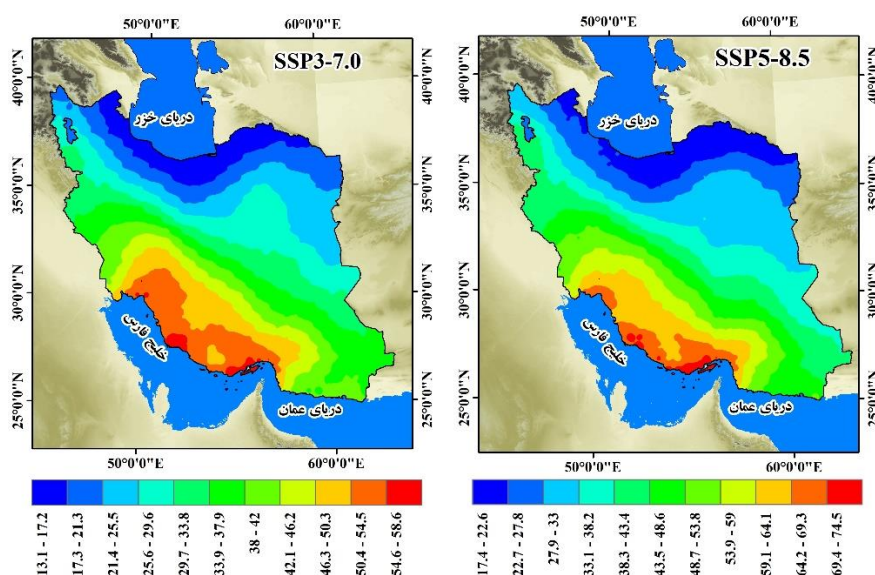
گرگان، مشهد، کرمانشاه، اهواز، شیراز، زاهدان، و چابهار به‌دست آمده است (شکل ۴). بیشینه گرمایش به‌ترتیب در کرمانشاه، اهواز، و مشهد دیده می‌شود که از بزرگ‌ترین مناطق جمعیتی ایران هستند. به عبارت دیگر، اقلیم کرانه‌های دریای عمان کمترین شدت روند افزایشی دما را در بیست سال آینده خواهد داشت. درست در نقطهٔ مقابل اقلیم کرانه‌های ساحلی دریای عمان، در مناطق مرتفع دما شدت روند افزایشی بیشتری خواهد داشت؛ به‌طوری‌که در اقلیم دامنه‌های شمالی البرز، کوهپایه شرقی، و اقلیم بلندی‌ها شیب روند افزایشی دما نسبت به پهنه‌های کم‌ارتفاع بیشتر است. دلیل اختلاف شدت تغییرات دما در پهنه‌های اقلیمی مختلف کشور می‌تواند با سطح توسعهٔ این شهرها در سال‌های مختلف در ارتباط باشد. توسعهٔ شهرها می‌تواند تابش خورشیدی طول موج بلند خروجی را در شب کاهش دهد و همچنین با جذب ذخیرهٔ تابش خورشیدی در طول روز در افزایش دما نقشی مهمی داشته باشد.



شکل ۵. روند تغییرات میانگین دمای سالانه MME-CMIP6 در ایستگاه‌های منتخب کشور در آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۴۰) برای دو سناریوی SSP3-7.0 و SSP5-8.5

از شاخص طول مدت گرما (WSDI) برای پیش‌نگری تنش‌های گرمایی ایران استفاده شد. شکل ۶ بی‌هنجاری سالانهٔ شاخص WSDI مبتنی بر MME-CMIP6 را تحت سناریوهای SSP3-7.0 و SSP5-8.5 نشان می‌دهد. بی‌هنجاری شاخص طول مدت دورهٔ گرمایی در ایران بر اساس سناریوی SSP3-7.0 حداقل ۱۳/۱ و حداکثر ۵۸/۶ روز

افزایش خواهد داشت. همچنین، نتایج مربوط به سناریوی خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) نیز یک افزایش حداقلی ۱۷/۴ روزه و حداکثری ۷۴/۵ روزه را در ایران نشان داده است. سواحل خزری، بخش‌هایی از شمال غرب در استان اردبیل، و شمال شرقی ایران کمترین افزایش را برای طول مدت گرما نشان دادند. در مقابل شاخص WSDI در سواحل خلیج فارس بخصوص در دو استان بوشهر و هرمزگان افزایش بسیار زیادی را نشان می‌دهد. بررسی الگوی مکانی طول مدت گرما در ایران نشان داد هسته‌های گرمایی عموماً در مناطق جنوبی ایران به‌ویژه در سواحل خلیج فارس و دریای عمان قرار دارند. ایم و همکاران (۲۰۱۷) نیز با بررسی امواج گرمایی کشورهای آسیایی به این نتیجه رسیدند که در پایان قرن حاضر وقوع موج گرما هر ۱۰ تا ۲۰ روز یک بار اتفاق خواهد افتاد و شهرهای ساحلی جنوب ایران همانند دوبی، ابوظبی، و دوحه از جمله مناطقی خواهند بود که بیشترین تأثیر را خواهند پذیرفت. مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش با پژوهش‌های پیشین (شار، ۲۰۱۶؛ ایم و همکاران، ۲۰۱۷) حاکی از افزایش تنش‌های حرارتی مناطق جنوبی ایران در سال‌های پیش رو است. بنابراین، گرمایش جهانی نه‌تنها باعث افزایش دما در ایران شده است، بلکه همچنین باعث افزایش دوره‌های متوالی رخداد فرین گرمایی (به‌عنوان مثال WSDI) می‌شود.



شکل ۶. بی‌هنجاری شاخص طول مدت گرما (WSDI) مبتنی بر رویکرد MME-CMIP6 با استفاده از سناریوهای SSP3-7.0 و SSP5-8.5 طی دوره آماری پیش‌نگری‌شده آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۴۱)

## بحث و نتیجه‌گیری

بررسی برون‌داد مستقیم پنج مدل از سری مدل‌های جفت‌شده مرحله ششم (GFDL-ESM4, MPI-ESM1-2-HR, IPSL-CM6A-LR, MRI-ESM2-0, UKESM1-0-LL) در دوره تاریخی ۱۹۹۵-۲۰۱۴ نشان داد که با آنکه برخی مدل‌ها در بعضی از مناطق اقلیمی کشور عملکرد بهتری نشان دادند، استفاده از برون‌داد مستقیم مدل‌های منفرد باعث افزایش عدم قطعیت در نتایج شد. بدین منظور، با استفاده از روش میانگین وزنی مستقل (IWM)، برون‌داد مدل‌ها همادی گردید. درستی‌سنجی برون‌داد مدل همادی نسبت به برون‌داد مستقیم مدل‌ها و همچنین اعمال روش DCF نشان داد که برون‌داد MME-CMIP6 اریبی کمتری نسبت به داده‌های ایستگاهی در دوره تاریخی نشان می‌دهد و بهتر

می‌تواند تغییرات دمای سالانه را در ایران نشان دهد. در همین راستا، یو و کانگ (۲۰۰۵) دریافتند که مدل همادی در مقایسه با مدل‌های منفرد نتایج بهتری ارائه می‌دهد. به‌طور کلی، نتایج درستی‌سنجی مدل‌ها نشان داد که برون‌داد مدل‌های CMIP6 چه بعد از تصحیح اریبی یا همادی‌کردن برای مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران از عملکرد بالاتری برخوردار است. اما برای استفاده از این مدل‌ها در مناطق اقلیمی خیلی مرطوب (پهنه شمالی ایران) باید احتیاط بیشتری داشت؛ زیرا حتی با وجود تصحیح اریبی و همادی‌کردن نیز اریبی این مدل‌ها بیشتر از ۲ درجه سلسیوس برای مناطق نام‌برده است.

دلایل احتمالی متعددی وجود دارد که باعث ایجاد اریبی بالا در برون‌داد مستقیم مدل (DMO) می‌شود. علت اول ممکن است پوشش ناکافی ایستگاه‌های هواشناسی در مناطقی با توپوگرافی پیچیده همانند سواحل شمالی ایران باشد، که طیف کاملی از شرایط اقلیمی را به‌ویژه در مناطق مرتفع به‌تصویر نمی‌کشند. بیشتر ایستگاه‌های این منطقه از ایران در مناطق هموار و ساحلی (قراخیل قائم‌شهر، بابلسر، نوشهر، رامسر، رشت، و بندر انزلی) واقع شده‌اند. همچنین، مدل‌های اقلیمی معمولاً توپوگرافی هموارتری نسبت به مشاهدات در نظر می‌گیرند (یانگ و همکاران، ۲۰۱۸). اختلاف ارتفاع بین مدل و مشاهدات یکی از موارد مهم در عدم قطعیت مدل‌ها و اختلاف بین DMO و DCF است که در مدل‌های اقلیمی به اریبی منفی (کم‌برآوردی) منجر می‌شود (یو و همکاران، ۲۰۲۰). دلیل دوم ممکن است به‌دلیل ناکارآمدی مدل‌ها در شبیه‌سازی بازخورد برف-آلبدو باشد (کانگ و همکاران، ۲۰۱۹).

به‌طور کلی، نتایج پیش‌نگری MME-CMIP6 نشان‌دهنده افزایش دمای سالانه در ایران است. بی‌هنجاری متوسط دمای سالانه ایران به‌ترتیب ۱/۱۳ و ۱/۲۶ درجه سلسیوس تحت سناریوهای SSP3-7.0 و SSP5-8.5 طی دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۴۰) افزایش خواهد داشت. نتایج به‌دست‌آمده حاکی از نقش بسیار مهم ناهمواری‌ها در توزیع ناهمگون دما در افزایش میانگین دمای سالانه کشور در دو دهه پیش رو است. حداقل بی‌هنجاری دما در جنوب شرقی ایران و حداکثر آن در مناطق شمال غربی و مرکزی محتمل خواهد بود.

پیش‌نگری شاخص طول مدت گرما (WSDI) نشان از بی‌هنجاری سراسر افزایشی در کشور دارد. کانون اصلی افزایش WSDI در سواحل جنوبی ایران و بخصوص خلیج فارس است که بر اساس نتایج سناریوی خیلی بدبینانه افزایشی معادل با ۷۴/۵ روز خواهد داشت. افزایش WSDI تنها معطوف به ایران نیست، بلکه شار (۲۰۱۶) و ایم و همکاران (۲۰۱۷) همین روند افزایشی قابل توجه را برای موج‌های گرمایی کشورهای حوزه خلیج فارس پیش‌نگری کردند. در سطح جهانی با استفاده از مدل‌های CMIP5 (لو و همکاران، ۲۰۱۸) و اخیراً با مدل‌های CMIP6 (کیم و همکاران، ۲۰۲۰) این روند افزایشی گسترده گزارش شده است.

تجزیه و تحلیل تغییرات میانگین دمای سالانه MME-CMIP6 نشان می‌دهد که ایران در دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۴۰) نسبت به دوره تاریخی (۱۹۹۵-۲۰۱۴) با شتاب بیشتری گرم خواهد شد. گرمایش بیشتر به‌ویژه در مناطق مرتفع و برف‌گیر بر زیست‌بوم‌های طبیعی اثر گذاشته و دسترسی به منابع آب در آینده را تحت تأثیر قرار می‌دهد. عمده مناطق داخلی، شرقی، و جنوبی ایران دارای اقلیم خشک یا نیمه‌خشک هستند و افزایش شدید دما تحت سناریوی خیلی بدبینانه (SSP5-8.5) به تخریب محیط زیست و تشدید خشک‌سالی از یک طرف و افزایش بیابان‌زایی از طرف دیگر منجر خواهد شد.

## منابع

- احمدی، محمود؛ داداشی رودباری، عباسعلی؛ اکبری ازیرانی، طیبه و کرمی، جمال (۱۳۹۸). کارایی مدل HadGEM2-ES در ارزیابی ناپهنجاری فصلی دمای ایران تحت سناریوهای واداشت تابشی، فیزیک زمین و فضا، ۴۵(۳): ۶۲۵-۶۴۴.
- آزادی، مجید؛ واشانی، سعید و حجام، سهراب (۱۳۹۱). پیش‌بینی احتمالاتی بارش با استفاده از پس‌پردازش (post processing) برون‌داد یک سامانه همادی، مجله فیزیک زمین و فضا، ۳۸(۳): ۲۰۳-۲۱۶.
- زرین، آذر و داداشی رودباری، عباسعلی (۱۳۹۹). پیش‌نگری چشم‌انداز بلندمدت دمای آینده ایران مبتنی بر برون‌داد پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده مرحله ششم (CMIP6)، فیزیک زمین و فضا، ۴۶(۳): ۵۸۳-۶۰۲.
- زرین، آذر؛ داداشی رودباری، عباسعلی و صالح‌آبادی، نرگس (۱۴۰۰). بررسی بی‌هنجاری و روند دمای ایران در پهنه‌های مختلف اقلیمی با استفاده از پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده مرحله ششم (CMIP6)، مجله ژئوفیزیک ایران، ۱۵(۱): ۱-۱۳.
- علیزاده چوبری، امید و نجفی، محمدسعید (۱۳۹۶). روند تغییرات دمای هوا و بارش در مناطق مختلف ایران، فیزیک زمین و فضا، ۴۳(۳): ۵۶۹-۵۸۴.
- علیزاده، احمد؛ بابائیان، ایمان؛ نوری، حمید و نجاتیان، محمدعلی (۱۳۹۹). بررسی اثر تغییر اقلیم بر کیفیت انگور بی‌دانه سفید (مطالعه موردی: ایستگاه هواشناسی کشاورزی گل‌مکان)، پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، ۱۳۹۹(۴۳): ۱۰۹-۱۲۶.
- مسعودیان، سیدابوالفضل (۱۳۹۰). آب‌وهوای ایران، مشهد: شریعه توس.
- نجفی، حسین؛ مساح بوانی، علیرضا؛ ایران‌نژاد، پرویز و رابرتسون، اندرو (۱۳۹۶). کاربست مدل‌های همادی امریکای شمالی در پیش‌بینی فصلی بارش گستره ایران، تحقیقات منابع آب ایران، ۱۳(۴): ۲۸-۳۸.
- Bai, H.; Xiao, D., ; Wang, B.; Liu, D. L.; Feng, P. and Tang, J. (2020). Multi-model ensemble of CMIP6 projections for future extreme climate stress on wheat in the North China Plain, *International Journal of Climatology*, 40: 21-39.
- Becker, E.; Kirtman, B. P. and Pegion, K. (2020). Evolution of the North American Multi-Model Ensemble, *Geophysical Research Letters*, 47: 35-53.
- Bishop, C. H. and Abramowitz, G. (2013). Climate model dependence and the replicate Earth paradigm, *Climate dynamics*, 41: 885-900.
- Dai, A. (2011). Drought under global warming: a review, *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2: 45-65.
- 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.
- Gidden, M. J., ; Riahi, K., ; Smith, S. J., ; Fujimori, S., ; Luderer, G., ; Kriegler, E., ... & Takahashi, K. (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.
- Grose, M.R.; Narsey, S.; Delage, F.P.; Dowdy, A.J.; Bador, M.; Boschat, G.; Chung, C.; Kajtar, J.B.; Rauniyar, S.; Freund, M.B. and Lyu, K. (2020). Insights from CMIP6 for Australia's future climate, *Earth's Future*, 8(5): 12-24.

- Gupta, H. V.; Kling, H.; Yilmaz, K. K. and Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling, *Journal of hydrology*, 377(1-2): 80-91.
- Hawkins, E. and Sutton, R. (2009). The potential to narrow uncertainty in regional climate predictions, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90(8): 1095-1108.
- He, S., ; Yang, J., ; Bao, Q., ; Wang, L., & Wang, B. (2019). Fidelity of the observational/reanalysis datasets and global climate models in representation of extreme precipitation in East China. *Journal of Climate*, 32(1), ): 195-212.
- Im, E. S., ; Pal, J. S., & Eltahir, E. A. (2017). Deadly heat waves projected in the densely populated agricultural regions of South Asia. *Science advances*, 3(8), ): e1603322.
- IPCC (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge and New York.
- Kang, S., ; Zhang, Q., ; Qian, Y., ; Ji, Z., ; Li, C., ; Cong, Z., ... & Qin, D. (2019). Linking atmospheric pollution to cryospheric change in the Third Pole region: current progress and future prospects. *National Science Review*, 6(4), ): 796-809.
- Khan, A. J., ; Koch, M., & Tahir, A. A. (2020). Impacts of Climate Change on the Water Availability, Seasonality and Extremes in the Upper Indus Basin (UIB). *Sustainability*, 12(4), ): 1283.
- Kim, Y. H., ; Min, S. K., ; Zhang, X., ; Sillmann, J., & Sandstad, M. (2020). Evaluation of the CMIP6 multi-model ensemble for climate extreme indices. *Weather and Climate Extremes*, 29, : 100269.
- Knoben, W. J., Freer, J. E., and Woods, R. A. (2019). Inherent benchmark or not? Comparing Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta efficiency scores. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(10): 4323-4331.
- Knoben, W. J.; Freer, J. E. and Woods, R. A. (2019). Inherent benchmark or not? Comparing Nash–Sutcliffe and Kling–Gupta efficiency scores, *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(10): 4323-4331.
- Lee, J. Y. and Wang, B. (2014). Future change of global monsoon in the CMIP5. *Climate Dynamics*, 42(1-2): 101-119.
- Lorenz, R.; Herger, N.; Sedláček, J.; Eyring, V.; Fischer, E. M. and Knutti, R. (2018). Prospects and caveats of weighting climate models for summer maximum temperature projections over North America, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(9): 4509-4526.
- Lu, C., ; Sun, Y., & Zhang, X. (2018). Multimodel detection and attribution of changes in warm and cold spell durations. *Environmental Research Letters*, 13(7), ): 074013.
- Marengo, J. A.; Rusticucci, M.; Penalba, O. and Renom, M. (2010). An intercomparison of observed and simulated extreme rainfall and temperature events during the last half of the twentieth century: part 2: historical trends, *Climatic Change*, 98(3-4): 509-529.
- Moss, R.H.; Edmonds, J.A.; Hibbard, K.A.; Manning, M.R.; Rose, S.K.; Van Vuuren, D.P.; Carter, T.R.; Emori, S.; Kainuma, M.; Kram, T. and Meehl, G.A. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment, *Nature*, 463(7282): 747-756.
- Pathak, R.; Sahany, S.; Mishra, S. K. and Dash, S. K. (2019). Precipitation Biases in CMIP5 Models over the South Asian Region, *Scientific reports*, 9(1): 1-13.
- Rehman, N.; Adnan, M. and Ali, S. (2018). Assessment of CMIP5 climate models over South Asia and climate change projections over Pakistan under representative concentration pathways, *International Journal of Global Warming*, 16(4): 381-415.

- Riahi, K., ; Van Vuuren, D. P., ; Kriegler, E., ; Edmonds, J., ; O'neill, B. C., ; Fujimori, S., ... & Tavoni, M. (2017). The shared socioeconomic pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: an overview. *Global Environmental Change*, 42, : 153-168.
- Schär, C. (2016). Climate extremes: The worst heat waves to come. *Nature Climate Change*, 6(2), ): 128-129.
- Swart, N. C., ; Cole, J. N., ; Kharin, V. V., ; Lazare, M., ; Scinocca, J. F., ; Gillett, N. P., ... & Winter, B. (2019). The canadian earth system model version 5 (CanESM5. 0.3). *Geoscientific Model Development*, 12(11), ): 4823-4873.
- Tatebe, H., ; Ogura, T., ; Nitta, T., ; Komuro, Y., ; Ogochi, K., ; Takemura, T., ... & Kimoto, M. (2019). Description and basic evaluation of simulated mean state, internal variability, and climate sensitivity in MIROC6. *Geoscientific Model Development*, 12(7), ): 2727-2765.
- Vogel, M. M., ; Hauser, M., & Seneviratne, S. I. (2020). Projected changes in hot, dry and wet extreme events' clusters in CMIP6 multi-model ensemble. *Environmental Research Letters*, 15(9),: 094021.
- Yan, Y., ; Lu, R. and Li, C. (2019). Relationship between the future projections of Sahel rainfall and the simulation biases of present South Asian and Western North Pacific rainfall in summer, *Journal of Climate*, 32(4): 1327-1343.
- Yang, X., ; Wood, E. F., ; Sheffield, J., ; Ren, L., ; Zhang, M., . & Wang, Y. (2018). Bias correction of historical and future simulations of precipitation and temperature for China from CMIP5 models. *Journal of Hydrometeorology*, 19(3), ): 609-623.
- Yoo, J. H. and Kang, I. S. (2005). Theoretical examination of a multi-model composite for seasonal prediction. *Geophysical research letters*, 32(18): 14-27.
- You, Q., ; Wu, F., ; Wang, H., ; Jiang, Z., ; Pepin, N., & Kang, S. (2020). Projected changes in snow water equivalent over the Tibetan Plateau under global warming of 1.5° and 2° C. *Journal of Climate*, 33(12), ): 5141-5154.
- Yu, H.; Wei, Y.; Zhang, Q.; Liu, X.; Huang, J.; Feng, T. and Zhang, M. (2020). Multi-model assessment of global temperature variability on different time scales, *International Journal of Climatology*, 40(1): 273-291.
- Zheng, X. T.; Hui, C. and Yeh, S. W. (2018). Response of ENSO amplitude to global warming in CESM large ensemble: uncertainty due to internal variability, *Climate Dynamics*, 50(11-12): 4019-4035.
- Zhu, Y. Y., . and Yang, S. (2020). Evaluation of CMIP6 for historical temperature and precipitation over the Tibetan Plateau and its comparison with CMIP5. *Advances in Climate Change Research*, 11(3), ): 239-251.