

## کارایی مدل HadGEM2-ES در ارزیابی نابهنجاری فصلی دمای ایران تحت

### سناریوهای واداشت تابشی

محمود احمدی<sup>۱\*</sup>، عباسعلی داداشی رودباری<sup>۲</sup>، طیبه اکبری ازیرانی<sup>۳</sup> و جمال کرمی<sup>۴</sup>

۱. دانشیار، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران  
 ۲. دانشجوی دکتری، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران  
 ۳. استادیار، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران  
 ۴. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران  
 (دریافت: ۹۸/۲/۴، پذیرش نهایی: ۹۸/۷/۹)

#### چکیده

پدیده گرمایش جهانی در سال‌های اخیر مشکلات بسیاری را برای سامانه زمین به همراه داشته است و ایران به دلیل اینکه کشوری خشک است، مطالعه شرایط آینده می‌تواند برای برنامه‌های مدیریتی مفید باشد. هدف این پژوهش کارایی مدل HadGEM2-ES از سری مدل‌های CMIP5 مبتنی بر روش ریزگردانی دینامیکی CORDEX و وردایی نابهنجاری دمای فصلی در ایران است. در این راستا داده‌های روزانه دمای هوا از ۴۵ ایستگاه همدید طی دوره آماری (۲۰۰۵-۱۹۷۰)، داده‌های دمای روزانه مدل HadGEM2-ES و ریزگردانی شده با استفاده از روش CORDEX و سناریوهای RCP برای دو دوره تاریخی (۲۰۰۵-۱۹۶۰) و پیش‌بینی شده طی سه دوره آینده نزدیک (۲۰۴۰-۲۰۱۱)، آینده میانی (۲۰۷۰-۲۰۴۱) و آینده دور (۲۰۹۹-۲۰۷۱) استفاده شد. برای ارزیابی کارایی مدل نیز از شش روش  $R^2$ ، MAE، MBE، RMSE، t-Jacovides و نسبت  $t$ -Jacovides/ $R^2$  استفاده شد. نتایج نشان داد که مدل از عملکرد مناسبی برخوردار است. نابهنجاری دمای فصلی در تمام فصول، سناریوها و دوره‌های زمانی مورد مطالعه مثبت و فصل زمستان بیشینه نابهنجاری دما را در بین فصول نشان داده است که یک تهدید بزرگ برای منابع آب کشور تلقی می‌شود. بیشینه نابهنجاری فصلی دمای ایران در فصول زمستان و بهار منطبق بر ارتفاعات و عرض‌های جغرافیایی بالاست که شمال غرب به‌عنوان کانون نابهنجاری‌ها شناخته شد. در تابستان ارتفاعات و ایران مرکزی بیشینه نابهنجاری دمای هوا را نشان داده‌اند. فصل پاییز نماینده بیشینه نابهنجاری دما در سواحل جنوبی ایران و نوار شرقی کشور است. همچنین، یک پاسخ فصلی از عملکرد مدل و تغییرات فضایی دمای هوا در ارتباط با ارتفاع و توزیع ناهمواری‌ها در کشور دیده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: نابهنجاری دما، مدل HadGEM2-ES، روش ریزگردانی دینامیکی CORDEX، CMIP5، سناریوهای RCP، ایران.

#### ۱. مقدمه

در طول سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۲ میلادی ۰/۷۸ درجه سلسیوس (با فاصله اطمینان ۰/۷۲-۰/۸۵) درجه سلسیوس) نسبت به دوره ۱۹۰۰-۱۸۵۰ افزایش داشته است (IPCC، ۲۰۱۳). این روند گرم شدن، به ویژه گرمایش اواسط قرن بیستم تا به امروز به احتمال زیاد به علت افزایش سطح غلظت گازهای گلخانه‌ای ناشی از فعالیت‌های انسانی است (تانگ و همکاران، ۲۰۱۶). بیشتر پیش‌بینی‌های آب‌وهوایی بر اساس مدل‌های گردش عمومی هواسپهر (GCMs) است که قادر به شبیه‌سازی ویژگی‌های آب‌وهوایی در مقیاس بزرگ هستند؛ این در

در سال‌های اخیر گرمایش کره زمین به‌خصوص در مناطق خشک توجه ویژه‌ای را به خود جلب کرده است؛ چراکه گرمایش جهانی در مناطق یادشده با کمبود آب همراه است و یک چالش عمده برای امنیت غذایی محسوب می‌شود. خاورمیانه و مدیترانه به‌عنوان یک منطقه حساس برای دگرگونی آب‌وهوایی شناخته شده‌اند (جورجی و لیونولو، ۲۰۰۸). دگرگونی آب‌وهوایی به دگرگونی الگوها و شرایط آب‌وهوایی درازمدت گفته می‌شود. پنجمین گزارش ارزیابی (AR5) هیئت بین‌الدول تغییرات آب‌وهوایی (IPCC) نشان داده است که دمای سطح زمین

مجموعه مدل‌های CMIP5 وجود دارد؛ بنابراین ارزیابی عملکرد مدل‌های آب‌وهوایی گزارش پنجم از اهمیت زیادی برخوردار است.

از آنجایی که GCM ها قدرت تفکیک مناسبی برای مطالعات منطقه‌ای ندارند؛ از روش‌های ریزگردانی برای کاربست کارایی دگرگونی آب‌وهوایی در سطح ایستگاه و منطقه استفاده خواهد شد. روش‌های ریزگردانی در یک تقسیم‌بندی پذیرفته‌شده و کلی به دو نوع آماری و دینامیکی تقسیم می‌شوند (احمدی و داداشی رودباری، ۱۳۹۵). ایران یک کشور بسیار متنوع از نظر آب‌وهوایی است لذا شرایط آب‌وهوایی شکننده و تغییرپذیری فضایی بالایی دارد که بر این اساس کاربست روش ریزگردانی دینامیکی بهتر می‌تواند رفتار آب‌وهوایی دمای ایران را توجیه کند بر این اساس در این پژوهش از یکی از جدیدترین روش‌های ریزگردانی دینامیکی موسوم به CORDEX استفاده شد.

مطالعات بسیاری از جمله دیفنباو و جورجی (۲۰۱۲)، چن و سان (۲۰۱۳) و دنک و همکاران (۲۰۱۳) نتایج شبیه‌سازی‌های مدل‌های CMIP5 را تکیه‌گاه اصلی پیش‌بینی دگرگونی آب‌وهوایی دانسته‌اند. در همین راستا گو و همکاران (۲۰۱۵) به ارزیابی مدل‌های مختلف CMIP5 برای تغییرات بارش و دما در چین پرداختند و به این نتیجه رسیدند که مدل‌های MPI و NCAR-CESM1 بیشینه کارایی را در شبیه‌سازی‌های دما و بارش در چین دارند؛ همچنین آنها دریافتند که گزینش یک مدل بهینه با توجه به واداشتهای مختلف آن در مناطق مختلف جغرافیایی فرآیندی دشوار است. پیش‌بینی دگرگونی آب‌وهوایی برای بارش و دما با استفاده از مدل CORDEX مبتنی بر RCM و GCM‌های مختلف پژوهشی است که دوسو و پانیتز (۲۰۱۶) بدان پرداختند؛ نتایج پژوهش آنها نشان داد که افزایش دمای فصلی بین GCM و RCM نسبتاً مشابه است، که این تا حدی ناشی از تغییرپذیری بین مدل‌های مختلف GCM در برخی مناطق است. ارزیابی عملکرد CORDEX-SA در شبیه‌سازی

حالی است که برخی از جنبه‌های مهم دگرگونی آب‌وهوایی در مقیاس محلی را نمی‌توانند بازتولید کنند. لیلود و همکاران (۲۰۱۶) دگرگونی آب‌وهوایی و افزایش شدت دما در منطقه خاورمیانه و شمال آفریقا (MENA) را بر اساس گروهی از مدل‌های CMIP5 تحت شرایط RCP4.5 و RCP8.5 مورد ارزیابی قرار دادند. آنها دریافتند که گرمایش آب‌وهوا در فصل تابستان (در ارتباط با تقویت کم‌فشار گرمایی) در خلیج فارس، جنوب آسیا تا دریای مدیترانه به‌عنوان یکی از مناطق مهم دگرگونی آب‌وهوایی است.

درک دگرگونی شرایط آب‌وهوایی در مقیاس‌های منطقه‌ای برای کارایی و در گام بعدی برای سیاست‌های کلان انطباق و سازگاری ضروری است (وستبی و همکاران، ۲۰۱۳)، با این وجود وردایی نابهنجاری فصلی مجموعه مدل‌های CMIP5 در ایران به‌طور کامل مورد بررسی قرار نگرفته است. دگرگونی در آب‌وهوا اغلب در مورد تغییرات میانگین سالیانه یا ماهانه است و در بیشتر موارد نابهنجاری‌های فصلی کمتر مورد توجه قرار گرفته است که می‌تواند برخی از تغییرات ناشی از گردش‌های فصلی را پنهان کند. رژیم نابهنجاری دمایی از جمله موج‌های سرد و گرم بر اقتصاد و سلامتی انسانی در بخش‌های مختلف مانند مصرف انرژی، کشاورزی، آب شدن یخچال‌های طبیعی، شیوع آفات، مختل کردن شبکه‌های ارتباطی و مخابراتی تأثیر می‌گذارد (سلولیتی و همکاران، ۲۰۰۶). این تحقیق به‌منظور بررسی دگرگونی دوره اخیر و پیش‌بینی شرایط آینده در چرخه میانگین فصلی برای پیش‌بینی‌های آب‌وهوایی انجام شده است. آنچه در خصوص کاربست مدل‌های دگرگونی آب‌وهوایی به‌ویژه برای کشورهایی همچون ایران که محدودیت شبکه ایستگاهی در آن دیده می‌شود مطرح است معمولاً عدم قطعیت این مدل‌هاست؛ به‌طوری‌که کومار و همکاران (۲۰۱۳) که ۱۹ مدل CMIP5 را مورد ارزیابی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که عدم قطعیت زیادی در شبیه‌سازی‌های دما به‌خصوص روند آن در

نتیجه رسیدند که مدل‌های BCC-CSM1.1 و CCSM4 نسبت به سایر مدل‌ها در پهنه ایران از دقت بالاتری برای بارش برخوردار هستند. اوجی (۱۳۹۷) به مقایسه ریزگردانی تک ایستگاهی و چند ایستگاهی فرین‌های دما و بارش در سواحل جنوبی دریای خزر پرداخت و به این نتیجه دست یافت که عملکرد روش ریزگردانی چند ایستگاهی، به‌ویژه در ریزگردانی شاخص‌های دما، بهتر از روش تک ایستگاهی است. ارزیابی دقت خروجی مدل‌های منطقه‌ای آب‌وهوا در ایران نیز پژوهشی است که کامیار و همکاران (۱۳۹۷) به ارزیابی آن پرداختند و به این نتیجه رسیدند که مدل‌های HadRM3P و RegCM4.1 برآورد نسبتاً بهتری از دمای بیشینه و کمینه در محدوده جنوب آسیا داشتند. شکوهی و همکاران (۱۳۹۷) به ارزیابی شبیه‌سازی دما و بارش مدل‌های اقلیمی CMIP5 در مناطق عمده تولید گندم دیم در ایران پرداختند؛ نتایج پژوهش آنها نشان داد شبیه‌سازی‌ها با خطا همراه است همچنین بالاترین متوسط مقدار نمره مهارت برای شبیه‌سازی متوسط سالانه بارش و دما به ترتیب ۰/۰۴ و ۰/۳۸ مربوط به مدل‌های انتخابی، در بین ایستگاه‌ها بود. ارزیابی کارایی مدل‌های سری CMIP5 در شبیه‌سازی و پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی بارندگی، دما و سرعت باد استان یزد پژوهشی است که میراکبری و همکاران (۱۳۹۷) با مدل CanESM2 تحت سه سناریوی RCP و براساس روش ریزگردانی SDSM انجام داده‌اند. نتایج پژوهش آنها نشان داد میانگین دمای متوسط طبق سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 به ترتیب نسبت به دوره مشاهداتی ۴/۵، ۶/۷، و ۱۲/۸ درصد افزایش خواهد داشت. تأثیر تغییرات آب و هوایی بر دمای بیشینه و کمینه ایران پژوهشی است که فلاح‌قاله‌ری و همکاران (۲۰۱۹) به ارزیابی آن پرداختند. در این تحقیق از دو روش ریزگردانی آماری SDSM و MarkSimGCM و روش ریزگردانی دینامیکی CORDEX برای شبیه‌سازی دمای کمینه و بیشینه ایران تحت مدل‌های CanESM2، GFDL-ESM2M و MPI-ESM-LR استفاده شد.

دمای متوسط فصلی در منطقه هیمالیا برای آب‌وهوای کنونی توسط ننگکر و همکاران (۲۰۱۸) انجام شد. نتایج پژوهش آنها نشان داده است که یک اریب سرد بین ۶- تا ۸- درجه سلسیوس به شکل ساختارمند در تمامی مدل‌ها دیده می‌شود. آنها دریافتند که در زمستان ناهنجاری دمایی مثبت در ارتفاعات بالاتر، از شدت و وسعت بیشتری برخوردار است.

در ایران نیز مطالعات مربوط به دگرگونی آب‌وهوایی سال‌هاست که توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده است؛ در این بین مطالعات انجام‌شده با استفاده از داده‌های شبکه‌ای ریزگردانی دینامیکی کمتر دیده می‌شود که شاید به دلیل هزینه بالای محاسباتی این مدل‌ها باشد. امیدوار و همکاران (۱۳۹۷) با استفاده از مدل منطقه‌ای RegCM4 فرین‌های سرد ایران را پهنه‌بندی کردند و به این نتیجه رسیدند که سرماهای فرین ایران طی دهه‌های آتی روندی کاهشی نشان خواهد داد. واکاوی اثر گرمایش جهانی بر تغییرات زمانی مکانی روند و شیب روند ماهانه دما در قلمرو ایران طی دهه‌های آینده (۲۰۱۵-۲۰۵۰) بر اساس خروجی مدل EHSOM پژوهشی است که امیدوار و همکاران (۱۳۹۵) به مطالعه آن پرداختند نتایج پژوهش آنها گویای گرم‌تر شدن ایران در فصل بهار طی دهه‌های آتی است. همچنین آنها افزایش دما را در ماه‌های فصل زمستان و بهار دربخش‌های کوهستانی نیمه غربی کشور گزارش کردند. دورنمای فرین‌های گرم ایران مبتنی بر برونداد مدل اقلیم منطقه‌ای (RegCM4) پژوهشی است که احمدی و همکاران (۱۳۹۶) به بررسی آن پرداختند و به این نتیجه رسیدند که تحت سناریو AIB برای دوره ۲۰۱۵ تا ۲۰۵۰ بیشینه فرین‌های گرم در نیمه غربی و نوار ارتفاعی ایران (کوهستان و کوهپایه) رخ خواهد داد و در مقابل کمینه فرین‌های سرد در ناحیه دشت کویر و جنوب شرق کشور رخ خواهد داد. ارزیابی داده‌های مدل‌های آب‌وهوایی CMIP5 در مقابل داده‌های مشاهده‌ای ایران نیز توسط معصوم پور سماکوش و همکاران (۱۳۹۶) با استفاده از داده‌های بارش ۸ مدل انجام‌شده است و به این

نتایج پژوهش آنها نشان داده است که بیشینه تغییرات افزایشی دمای کمینه و بیشینه ایران طی دوره ۲۰۷۱ تا ۲۱۰۰ تحت سناریو RCP8.5 اتفاق می‌افتد.

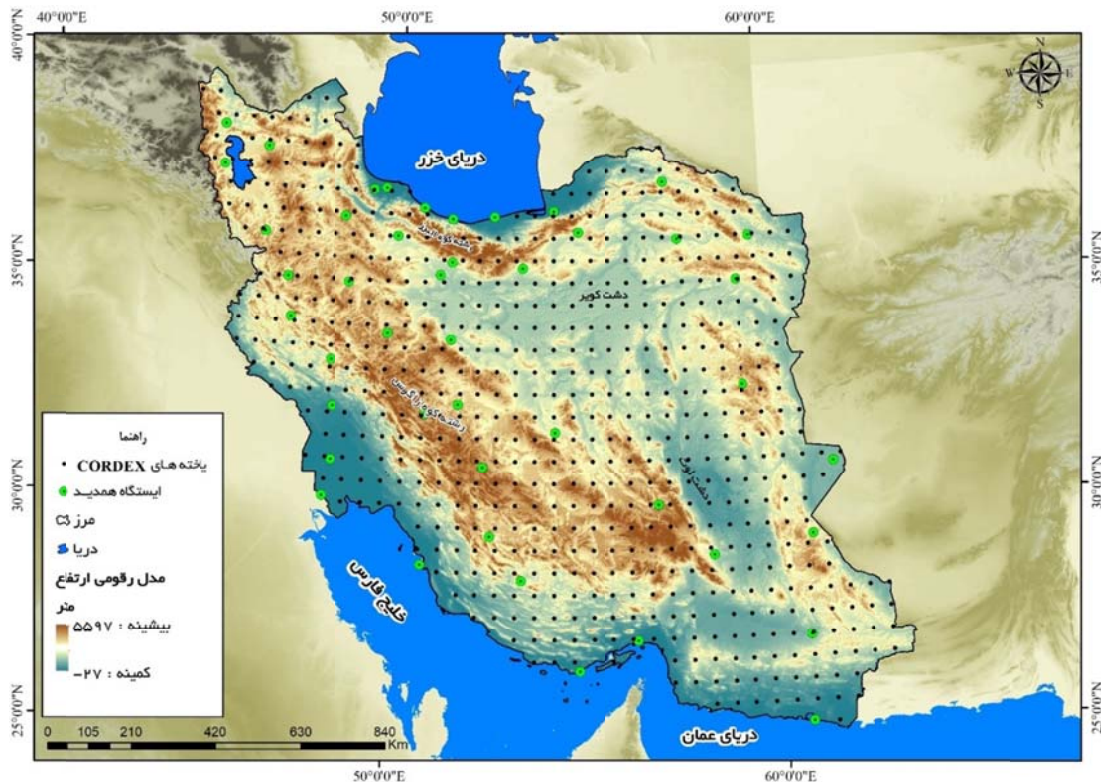
ارزیابی پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که مطالعات انجام‌شده در ایران در مقایسه با مطالعات جهانی در حوزه تغییرات آب‌وهوایی در سطح منطقه‌ای به‌ویژه با رویکرد مدل‌سازی دینامیکی بسیار محدود است و به‌نوعی می‌توان ادعان داشت که مدل‌سازی دینامیکی در ایران مبتنی بر داده‌های شبکه‌ای در آغاز راه قرار دارد؛ لذا این پژوهش باهدف کارایی روش ریزگردانی دینامیکی روزآمد به ارزیابی دگرذیسی نابهنجاری دمای فصلی ایران پرداخته است که بر این اساس از روش ریزگردانی CORDEX استفاده شد. نتایج این پژوهش می‌تواند در مطالعات مرتبط با منابع آب، انرژی و سایر مطالعات مرتبط با دگرگونی آب‌وهوایی

مفید باشد.

## ۲. روش تحقیق

### ۲-۱. داده‌های دمای ایستگاه‌های همدید

به‌منظور صحت‌سنجی داده‌های دمای هوا مستخرج از مدل HadGEM2-ES، ابتدا از مجموع ایستگاه‌های همدید موجود در کل کشور، ۴۵ ایستگاه طی دوره آماری ۲۰۰۵-۱۹۷۰ گزینش شد (همگام با داده‌های تاریخی مدل CORDEX). سعی بر آن بود که این ایستگاه‌های همدید در تمام استان‌های کشور پراکنده‌شده و از توزیع مکانی مناسبی برخوردار باشند به این منظور طول جغرافیایی، عرض جغرافیایی و ارتفاع از سطح دریا هر ایستگاه، جهت گزینش مورد استفاده قرار گرفت. پست‌ترین نقطه ایستگاهی بابلسر با ۲۱- متر و مرتفع‌ترین ۲۰۴۸/۹ متر ایستگاه شهرکرد است (شکل ۱).



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه به‌همراه ایستگاه‌های همدید منتخب و یاخته‌های CORDEX-WAS با قدرت تفکیک مکانی ۰/۴۴ درجه قوسی.

## ۲-۲. مدل و سناریوهای منتخب

خروجی‌های CMIP5 به‌عنوان یک مجموعه روزآمد و بزرگ از شبیه‌سازی‌های شرایط آب‌وهوایی و پیش‌نگری آن مبتنی بر برون‌داد نسل‌های جدید GCMs، پایه مطالعات بسیاری به‌ویژه دگرگونی‌های آب‌وهوایی تبدیل‌شده است (گو و همکاران، ۲۰۱۵). این مطالعه در گام نخست کارایی مدل HadGEM2-ES را از سری مدل‌های CMIP5 در برآورد دمای هوا در ایران بر اساس سه سناریو RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 مورد مطالعه قرار خواهد داد و سپس ناهنجاری دمای هوا را به شکل فصلی در ایران مطالعه خواهد کرد.

## ۲-۳. روش ریزگردانی دینامیکی CORDEX

طی سال‌های اخیر پژوهشگران آب‌وهواشناسی (بوچیگمانی و همکاران، ۲۰۱۶؛ ون وورن و همکاران، ۲۰۱۸) از مدل‌های آب‌وهوایی منطقه‌ای مختلف به‌منظور تولید مجموعه چندگانه از داده‌های ریزگردانی شده پروژه CMIP5 توسط WCRP استفاده کردند. در اقدامی هماهنگ با انجمن بین‌المللی ریزگردانی منطقه‌ای (CORDEX) باهدف پیش‌بینی تغییرات آب‌وهوایی به‌عنوان ورودی مطالعات دگرگونی آب‌وهوا و راهکارهای سازگاری با آن پروژه CORDEX ایجاد شد (جورجی و همکاران، ۲۰۰۹؛ لاپرایس و همکاران، ۲۰۱۳). هدف اصلی این پروژه بین‌المللی درک بهتر پدیده‌های محلی و منطقه‌ای آب‌ها و بهبود کارایی مدل‌ها و روش‌های ریزگردانی است (جورجی و همکاران، ۲۰۰۹). همان‌طور که توضیح داده شد در این پژوهش از RCM های تولیدشده CORDEX استفاده شد. در این راستا پیشنهادی‌های گزارش پنجم هیئت بین‌الدول تغییرات اقلیمی (IPCC) در خصوص استفاده از داده‌های کنترل کیفی شده و کاربست خروجی مدل‌های گزارش پنجم کارگروه هماهنگ‌کننده مدل‌های جفت‌شده آب‌وهوایی و جدیدترین سناریوهای تغییرات آب‌وهوایی بر مبنای خط سیر انتشار گازهای گلخانه‌ای (RCPs) استفاده شد.

مجموعه مدل‌های CORDEX در یک شبکه استاندارد، دامنه‌های ثابت و فرمت‌های گوناگون در اختیار پژوهشگران قرار گرفته است که امکان مقایسه مستقیم نتایج خروجی‌های مختلف را فراهم می‌آورد (نیکولین و همکاران، ۲۰۱۲). در این چارچوب از سناریوهای خط سیر انتشار گازهای گلخانه‌ای (RCPs) RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 استفاده شد، دو سناریو RCP4.5 و RCP8.5 برای تحقیق بیشتر در زمینه آسیب‌پذیری‌های ناشی از دگرگونی آب‌وهوایی و پاسخ‌های بعدی دگرگونی آب‌وهوایی مورد استفاده قرار می‌گیرند (وارناتشچ و رئی، ۲۰۱۹). در تحقیق حاضر از داده‌های دمای هوا محدود CORDEX-WAS با قدرت تفکیک مکانی ۰/۴۴ درجه قوسی، مدل RCA4 برای RCM و گروه (Ensemble) r1i1p1 استفاده شد (شکل ۱).

## ۲-۴. مدل HadGM2-ES

مدل‌های سری HadGEM یکی از مشهورترین مدل‌های GCM تأییدشده جهانی می‌باشند (حیدری و خوش‌اخلاق، ۱۳۹۴).

مدل‌های خانواده HadGEM2 شامل طیف وسیعی از پیکر بندی مدل‌های خاص با درجات مختلف پیچیدگی ولی با چهارچوبی مشترک می‌باشند، این مدل‌ها دربردارنده وضعیت جفت‌شده هواسپهری-اقیانوسی هستند که با گسترش قائم یا بدون آن در هواسپهر، شامل ارزیابی خوب از پوشش سپهر و موقعیت سامانه زمین است که شامل پوشش گیاهی، زیست اقیانوسی و شیمی هواسپهر نیز می‌شود. اجزای مختلف خانواده HadGEM2 در پنجمین گزارش IPCC مورد استفاده قرار گرفتند. مؤلفه هواسپهری مدل HadGM2-ES دارای ۳۸ لایه که تا ارتفاع ۴۰ کیلومتری امتداد می‌یابد و تفکیک افقی آن از ۱/۲۵ درجه عرض جغرافیایی و ۱/۸۷۵ درجه طول جغرافیایی است (یاخته‌های شبکه‌ای آن در شبکه جهانی ۱۹۲×۱۴۵ است). تفکیک مکانی مدل با حدود ۲۰۸ کیلومتر در ۱۳۹ کیلومتر در استوا است که در عرض‌های بالاتر این مقدار

جاکوویدز (۱۹۹۸) اعتقاد دارد که شاخص‌های RMSE و MBE به‌تنهایی برای انتخاب بهترین مدل کافی نمی‌باشند. بنا به توصیه وی علاوه بر دو معیار فوق که عموماً برای هم‌سنجی مدل‌ها استفاده می‌شود، می‌بایست از معیار سومی به نام  $t$  که ترکیبی از دو معیار فوق بوده، استفاده شود:

$$t = \sqrt{\frac{(n-1)(MBE^2)}{(RMSE^2 - MBE^2)}} \quad (5)$$

در رابطه فوق  $t$  معیار جاکوویدز و  $n$  تعداد مشاهدات هست. مقدار کمتر  $t$  بیانگر دقت بهتر مدل است. با توجه به اینکه در برخی موارد ممکن است، نتایج یک مدل دارای ضریب  $R^2$  بالا، ولی نمایه‌های RMSE و MBE و یا  $t$  قابل قبول باشند، در چنین مواردی تصمیم‌گیری برای انتخاب مدل بهینه دشوار است. بدین منظور، در تحقیق حاضر علاوه بر معیارهای معرفی شده توسط جاکوویدز، از معیار ترکیبی جدید که حاصل نسبت  $R^2$  به  $t$  می‌باشد ( $R^2/t$ ) نیز استفاده شد که مقادیر بالاتر آن بیانگر سازگاری بالاتر مدل با واقعیت است (جاکوویدز، ۱۹۹۸).

### ۳. نتایج و بحث

۳-۱. کارایی مدل HadGEM2-ES تحت روش ریزگردانی دینامیکی CORDEX در ایران  
پیش‌نگری آب‌وهوایی و آشکارسازی پیامدهای آن یکی از مهم‌ترین بخش‌ها در برنامه‌های راهبردی در قرن حاضر محسوب می‌شود. در این راستا داده‌های تاریخی مدل HadGEM2-ES تحت روش ریزگردانی دینامیکی CORDEX طی دوره آماری ۲۰۰۵-۱۹۷۰ با داده‌های دمای ۴۵ ایستگاه همدید بررسی شد (شکل ۲). نتایج بر اساس شش روش (RMSE، MAE، MBE،  $t$ -Jacovides،  $R^2$  و  $t$ -Jacovides/ $R^2$ ) مورد بررسی نشان داد که مدل HadGEM2-ES از توانایی مناسبی برخوردار است. همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شد در تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه مقادیر شبیه‌سازی دما از کارایی مناسبی برخوردار می‌باشند. به‌طوری‌که در تمامی

کاهش یافته و در عرض جغرافیایی ۵۵ به ۱۲۰ کیلومتر در ۱۳۹ کیلومتر می‌رسد. مؤلفه اقیانوسی از شبکه عرضی و طولی با تفکیک طولی یک درجه و تفکیک مکانی عرضی که از ۱ درجه بین قطبین و ۳۰ درجه شمالی و جنوبی که به‌طور یکنواخت یک‌سوم درجه در استوا است؛ استفاده می‌کند (کولینز و همکاران، ۲۰۰۸؛ ۲۰۱۱). ساختار این مدل، پایدار بوده که حالت و وضعیتی واقعی را از شرایط زیستی آب‌وهوا، پوشش گیاهی و اقیانوس بدون نیاز به اصلاحات فرضی و ساختگی ارائه دهد. این مدل تعامل چرخه کربن را بین اقیانوس، زمین و پوشش گیاهی پویا نشان می‌دهد (جونز و همکاران، ۲۰۰۶). مدل HadGEM2، سامانه زمین (HadGEM2-ES) شامل اجزای فیزیکی هواسپهر و اقیانوس است.

### ۲-۵. روش‌های ارزیابی کارایی داده‌های مشاهداتی و مدل‌سازی شده

ارزیابی مدل با استفاده از آماره‌های ضریب تعیین ( $R^2$ )، میانگین خطای مطلق (MAE)، میانگین انحراف خطا (MBE) و میانگین مربعات خطا (RMSE) که معادلات آن به ترتیب در روابط (۱) تا (۴) مشخص شده‌اند. داده‌های شبیه‌سازی شده دما توسط مدل و داده‌های مشاهده شده (داده‌های ایستگاهی) مورد ارزیابی قرار گرفتند.

$$R^2 = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(Y_i - \bar{Y}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (1)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - Y_i|}{n} \quad (2)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - Y_i)}{n} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n}} \quad (4)$$

در این روابط  $X_i$  و  $Y_i$  به ترتیب  $i$  امین داده واقعی و شبیه‌سازی شده توسط مدل،  $\bar{X}$  و  $\bar{Y}$  میانگین کل داده‌های  $X_i$  و  $Y_i$  در جامعه آماری  $n$  تعداد کل نمونه‌های مورد ارزیابی می‌باشند.

در ایستگاه‌های مرتفع منطقه مورد مطالعه (ایستگاه‌های تبریز، خوی، سنندج و شهرکرد) به سبب تغییرپذیری زیاد دما در این ایستگاه‌ها و نه ارتباط ضعیف بین دمای واقعی و مدل‌سازی شده است؛ از طرف دیگر آماره‌های میانگین مطلق خطا (MAE) و میانگین اریب خطا (MBE) نیز نتایج RMSE را تأیید کردند. مقدار میانگین اریبی خطا در ایستگاه‌های اهواز، آبادان، چابهار و رشت تا  $0.23$  - را نشان داده‌اند این مقدار از اریبی خطا در برآورد دما توسط مدل می‌تواند ناشی از چهار عامل: ۱- تغییر خرد آب‌وهوا شناسی محل (شیر غلامی و قهرمان، ۱۳۸۴)؛ ۲- افزایش هواویزهای هواسپهری (ژائو و همکاران، ۲۰۱۱)؛ ۳- بخار آب قابل بارش (هاردی، ۱۳۸۷) و ۴- ابرها و دامنه دگرگونی دما (هاردی، ۱۳۸۷) باشد. همان‌طور که پیش‌تر گفته شد واداشت هواویز در این مدل‌ها گنجانده نشد و یا در صورت لحاظ کردن کارایی آن دقیق و منطبق بر شرایط محیط نیست لذا این مقدار اریبی برای ایستگاه‌های نام‌برده که بیشتر آنها کانون هواویز ایران هستند (احمدی و همکاران، ۱۳۹۸) دور از انتظار نبوده است.

مقایسه آماری بین داده‌های شبیه‌سازی شده با مدل HadGEM2-ES و داده‌های مشاهداتی دما (ایستگاه‌های همدید) که با استفاده از ضریب تعیین محاسبه شد در تمامی ایستگاه‌ها بزرگ‌تر از  $0.92$  تا  $0.98$  است. به عبارت دیگر مدل HadGEM2-ES بیش از  $92$  درصد پراش دمای مشاهداتی را در اکثر ایستگاه‌های مورد بررسی، توصیف می‌کند. کمینه ضریب تعیین برای ایستگاه‌های سواحل شمالی و جنوبی ایران است. معیارهای t-Jacovides و نسبت  $t\text{-Jacovides}/R^2$  نتایج به دست آمده از شاخص‌های پیشین را تأیید کرده است چراکه آماره‌های نام‌برده صورتی از روش‌های پیشین است که مورد بحث واقع شدند.

مدل‌سازی عدم قطعیت در دگرگونی آب‌وهوایی، یکی از مسائل اساسی مربوط به مدل‌سازی‌هاست، عامل اساسی عدم قطعیت در مدل‌سازی‌های دگرگونی آب‌وهوایی

ایستگاه‌ها مقدار RMSE کمتر از  $10$  می‌باشد و در برخی از ایستگاه‌ها همچون چابهار، بابلسر، رشت، اهواز، آبادان و فسا این مقدار کمتر از عدد  $2$  می‌باشد که نشان‌دهنده دقت بالا در مدل‌سازی می‌باشد. یکی از دلایل کاهش مقدار RMSE در ایستگاه‌های نام‌برده که بیشتر ساحلی هستند می‌تواند تغییرپذیری کمتر دما ناشی از اثر تعدیلی آب باشد. در غالب ایستگاه‌های ایران که به رنگ زرد، سبز و آبی برای RMSE نشان داده شدند مقدار خطای جذر میانگین مربعات کمتر از  $3$  درجه سلسیوس می‌باشد، مبدأ تغییرپذیری دما در RCM ها به عوامل مختلفی بستگی دارد که از جمله می‌توان به سپیدایی سطح، ابرناکی، فرارفت حرارتی، آب‌های سطحی و شار انرژی اشاره کرد (سیلا و همکاران، ۲۰۱۳). مدل‌های CMIP5 قابل دسترس در CORDEX هیچ‌یک اثرات هواویزها را در بر نمی‌گیرند و گنجاندن واداشت تابشی گردوغبار می‌تواند عدم قطعیت را در دما کاهش دهد (گوبانی و همکاران، ۲۰۱۴). با در نظر گرفتن موارد اشاره شده عدم قطعیت RCM ها برای دمای نزدیک به سطح زمین حدود  $2$  درجه سانتی‌گراد است که بسته به شرایط محیطی و فیزیک مدل این عدد می‌تواند متفاوت باشد (جورجی و همکاران، ۲۰۰۸). یکی از دلایل دیگر که می‌تواند در افزایش مقدار RMSE نقش داشته باشد فاصله ایستگاه تا نزدیک‌ترین یاخته است. بیشینه RMSE نیز یا در ایستگاه‌های مرتفع همانند خوی، تبریز، سنندج و شهرکرد به دست آمد یا در ایستگاه‌های خشک داخلی ایران مانند یزد، آباده، کاشان و تهران مشاهده شد. البته ذکر این نکته ضروری است که در ایستگاه‌های کوهستانی همچون سنندج و خوی که مقدار RMSE بالایی را نشان داده است به این معنی نمی‌باشد که در سنندج و خوی مدل‌سازی انجام شده دارای ضعف می‌باشد بلکه باید به ماهیت آب‌وهوایی و تغییرپذیری بالای دما به خصوص در مقادیر دمای کمینه اشاره کرد. همچنین باید در نظر داشت از آنجاکه مقدار RMSE تابعی از دامنه مقدار دما در هر ایستگاه است، بنابراین به نظر می‌رسد مقدار زیاد RMSE

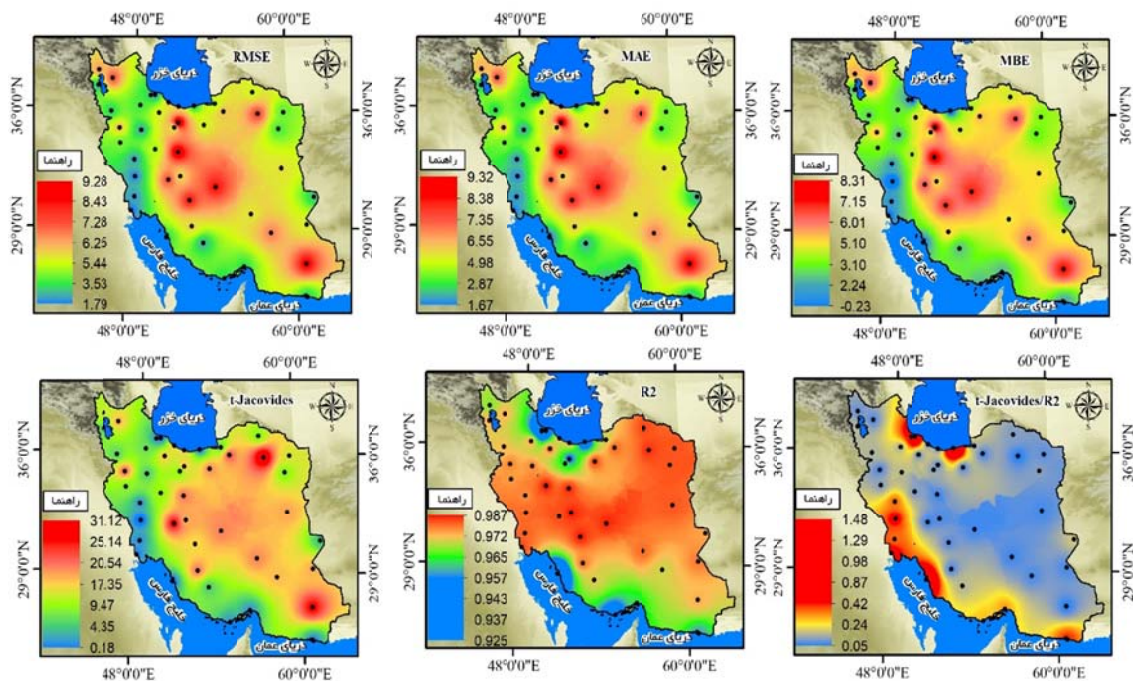
۱۸/۲۵ درجه سلسیوس به دست آمده است؛ میانگین دمای هوای زیر صفر درجه سلسیوس در این فصل با الگوی مکانی تغییرات ناهمواری در امتداد دو رشته کوه البرز و زاگرس منطبق است. مقادیر دمای زیر صفر تنها در فصل زمستان حاکم است. همچنین الگوی دمای بیش از ۵ درجه سلسیوس نیز سراسر نیمه جنوبی، جلگه خوزستان، جنوب شرق، مناطق مرکزی و دشت لوت را در بر گرفته است. در فصل بهار به علت نفوذ و اچرخند جنب حاره و حرکت آن از جنوب به شمال، مقدار دامنه دما افزایش یافته و حداقل دمای رخ داده در ایران در این فصل به میزان ۸/۰۱ درجه سلسیوس در سراسر مناطق مرتفع رشته کوه های البرز و زاگرس، ارتفاعات شمال غرب، شمال شرق و برخی مناطق مرتفع ایران مرکزی به وقوع پیوسته است و بیشترین دما نیز در این فصل به ۳۱/۰۱ درجه سلسیوس در مناطق کم ارتفاع سراسر نیمه جنوبی جلگه خوزستان، جنوب شرق، دامنه های جنوب غربی و جنوب زاگرس مناطق کم ارتفاع داخلی ایران اختصاص یافته است.

مدل های گردش عمومی (GCM) و سناریوهای انتشار گازهای گلخانه ای (GGES) است اما عامل مهم دیگری که موجب ایجاد عدم قطعیت در مدل سازی ها می شود روش های مختلف ریزگردانی است. هر چند که مدل تحت سناریوهای مختلف، دما را به صورت افزایشی با تغییر پذیری درون فصلی پیش بینی کرده است، اما میزان این تغییرات در سناریوهای مختلف، متفاوت بوده است. همین امر سبب عدم قطعیت در روش های ریزگردانی و داده های مختلف می شود که باید در مدل سازی، جهت پیش بینی دقیق تر و نزدیک تر به واقعیت، پارامتر عدم قطعیت لحاظ شود.

### ۲-۳. توزیع فصلی دمای فصلی ایران بر اساس

#### داده های تاریخی مدل HadGEM2-ES

ارزیابی میانگین فصلی دمای ایران بر اساس مدل HadGEM2-ES تحت روش ریزگردانی دینامیکی CORDEX در شکل (۳) نشان داده شد. دامنه دمای میانگین طی فصل زمستان به ترتیب ۶/۳۱- تا



شکل ۲. کارایی مدل HadGEM2-ES بر اساس صحت سنجی آماری داده های دمای مدل و داده های ایستگاهی طی دوره ۱۹۷۰-۲۰۰۵ با استفاده از نمایه های آماری (نام هر نمایه در گوشه بالای سمت راست نقشه نوشته شد).

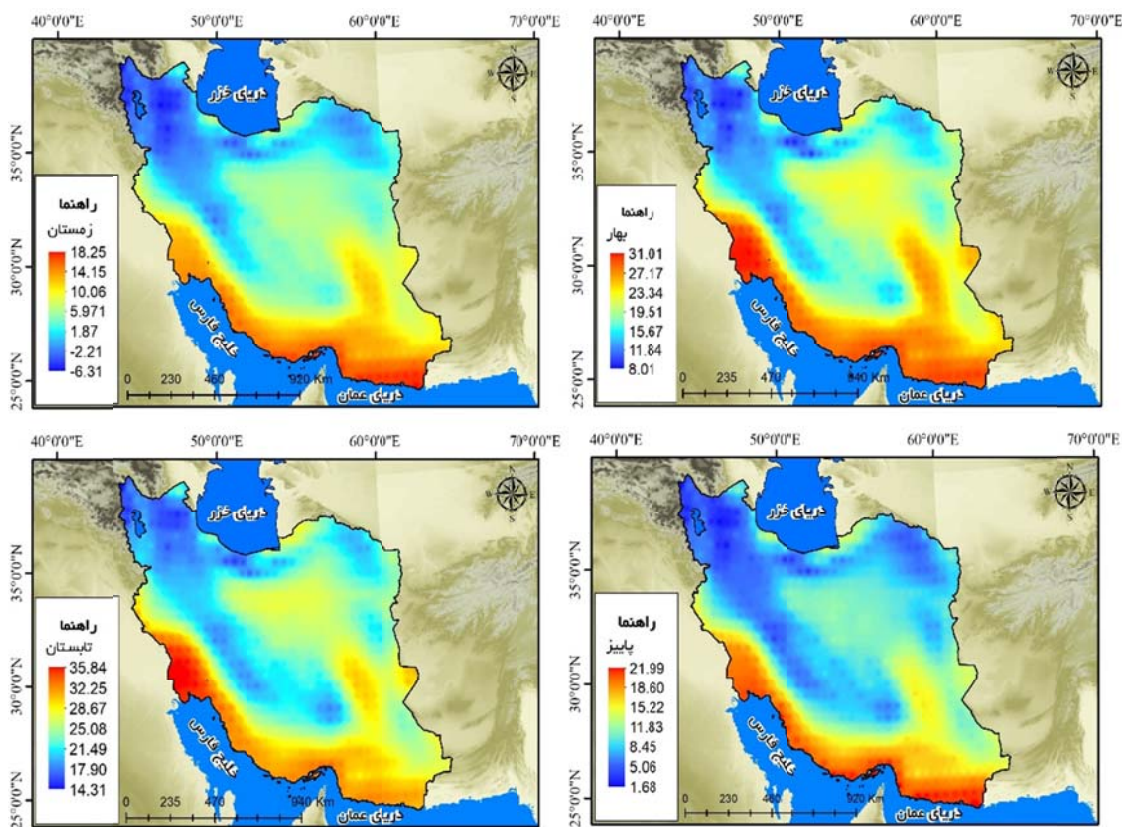


است و محدوده جنوبی ایران را در بر گرفته است و بنابراین از الگوی مکانی کلی در فصول پیشین تبعیت می‌کند.

### ۳-۳. ناهنجاری فصلی دمای ایران بر اساس مدل HadGEM2-ES تحت سناریوهای واداشت تابشی (RCPs)

ارزیابی ناهنجاری دامنه دمایی برای دمای میانگین فصلی ایران نشان داد (شکل‌های ۴ تا ۷) مطابق با گرمایش جهانی از مقدار دماهای زیر صفر کاسته شده است همچنین افزایش معنی‌دار دمای میانگین مشهود است. در نتیجه شاهد افزایش قابل‌ملاحظه دمای میانگین فصلی در ایران هستیم که بر این اساس از روزهای یخبندان کاسته شده و بر روزها و شب‌های گرم در ایران افزوده خواهد شد.

با آغاز فصل تابستان و حاکمیت سامانه پرفشار جنب حاره، بادهای غربی و سامانه‌های همراه آنها نیز به عرض‌های شمالی‌تر عقب‌نشینی می‌کنند و میانگین بیشترین دماهای رخ داده به میزان ۳۵/۸۴ همانند فصل بهار در سواحل جنوبی و با کانون بیشینه دشت خوزستان و کمینه دما با ۱۴/۳۱ درجه سلسیوس منطبق بر مناطق مرتفع می‌باشد. در فصل پاییز همزمان با شروع دوره سرد و ورود بادهای غربی به ایران و همچنین گسترش جنوب سوی پرفشار جنب حاره با توجه به موقعیت ایران بین منطقه نفوذ بیشینه زبانه‌های سرد سیبری روی سرزمین توران و پرفشارهای سرد مهاجر در بستر ناوه ترازبالای هواسپهر دمای هوا کاهشی محسوس خواهد داشت. کمترین دما در فصل پاییز به میزان ۱/۶۸ منطبق بر ارتفاعات و بیشینه آن ۲۱/۹۹ درجه سلسیوس به دست آمده



شکل ۳. الگوی فصلی میانگین دمای هوای مشاهداتی ایران طی دوره ۲۰۰۵-۱۹۶۰ بر اساس مدل HadGEM2-ES.

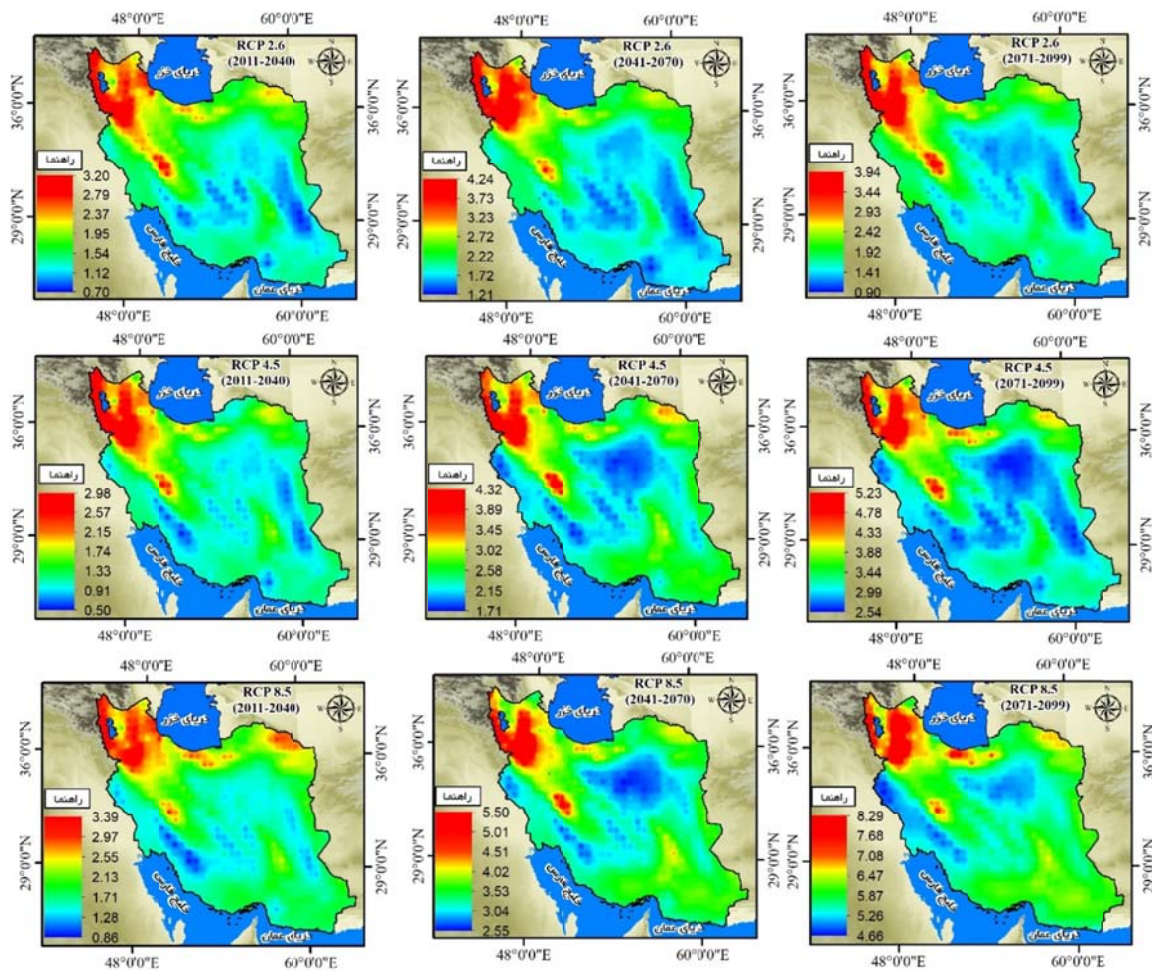
در چنین شرایطی کاهش چشم‌گیر تغییرات شبانه‌روزی دما نیز به وقوع خواهد پیوست. طبیعتاً با افزایش ساعات آفتابی و افزایش اختلاف فشار منطقه‌ای ناشی از الگوهای گرمایی سطح زمین سرعت باد افزایش خواهد یافت و همچنین طول درجه روز رشد گیاه (GDD) نیز دستخوش تغییرات جدی خواهد شد. افزایش دما به‌خصوص تغییرات میانگین دما در دوره سرد و مناطق سردسیر می‌تواند منجر به افزایش سرعت باد، تغییرات شدید رطوبت نسبی، افزایش بارش‌های فرین و تغییرات جدی در نرخ بارش، تغییرات بارش-رواناب، ذوب ناگهانی برف، عدم انباشت برف در یخچال‌های طبیعی، افزایش تبخیر و تعرق و ده‌ها عامل سوء دیگر منتهی شود. تغییر فرکانس و شدت رویدادهای فرین آب‌وهوایی و به‌خصوص افزایش دمای میانگین فصلی در نقاط مختلف ایران که در این تحقیق بر اساس آخرین گزارش IPCC (AR5) بدان پرداخته شد و نشان‌دهنده افزایش دمای هوا در تمام فصول ایران است که می‌تواند برای حیات میلیون‌ها انسان یک خطر جدی باشد.

نابهنجاری‌های دمای ایران طی فصل زمستان با استفاده از مدل آماری HadGEM2-ES تحت سه سناریو واداشت تابشی و سه دوره زمانی آینده نزدیک (۲۰۱۱-۲۰۴۰)، میانی (۲۰۴۱-۲۰۷۰) و دور (۲۰۷۱-۲۰۹۹) در شکل (۴) نشان داده شد. بر اساس سناریو RCP2.6 بیشینه نابهنجاری دمای فصل زمستان در آینده نزدیک ۳/۲۰، آینده میانی ۴/۲۴ و آینده دور ۳/۹۴ درجه سلسیوس محاسبه شد. همان‌طور که در شکل نیز پیداست نابهنجاری دما در فصل زمستان کاملاً مثبت می‌باشد. بیشینه نابهنجاری دما نسبت به دوره مشاهداتی در محدوده شمال غرب و تا حدودی غرب، زاگرس مرکزی، قسمت‌هایی از شمال کشور و شمال شرق قرار دارد. کمینه نابهنجاری دمای فصل زمستان در ایران نسبت به دوره مشاهداتی در آینده نزدیک، میانی و دور به ترتیب ۰/۷۰، ۱/۲۱ و ۰/۹۰ درجه سلسیوس طی هر سه دوره زمانی در قسمت‌های مرکزی و شرق کشور می‌باشد. سناریو RCP4.5 که پیش‌بینی شرایط

حد واسط را به تصویر کشیده است همانند سناریو RCP2.6 بیشینه تغییرپذیری دما در هر سه دوره زمانی در مناطقی بر عرض جغرافیایی بالا و کوهستانی ناحیه شمال غرب، شمال شرق، زاگرس مرکزی و قسمت‌های از کوه‌های البرز و شمال کشور به‌دست آمده است در حالی که کمینه تغییرپذیری در مناطق مرکزی و شرق کشور و قسمت‌هایی از زاگرس جنوبی و جنوب غرب نسبت به دوره مشاهداتی و نسبت به ناحیه شمال غرب در فصل زمستان قابل مشاهده است. بر اساس سناریو RCP8.5 که شرایط بدبینانه پیش‌بینی را در نظر می‌گیرد همانند دو سناریو قبل نابهنجاری دمای فصل زمستان در هر سه دوره زمانی آینده نزدیک، میانی و دور از الگویی مشابه اما با شدت و وسعت بیشتری پیروی می‌کند. در این سناریو دامنه کمینه و بیشینه نابهنجاری دمای فصل زمستان همانند مناطقی که در سناریوهای پیشین ذکر شد در هر سه دوره زمانی آینده نزدیک، میانی و دور در مناطق کوهستانی و مرتفع به‌دست آمده است با این تفاوت که مناطق شمالی کشور و رشته‌کوه البرز از شدت و وسعت قابل چشم‌گیری نسبت به سناریوهای پیشین خود برخوردار هستند. کمینه نابهنجاری دما به ترتیب برای سه دوره مورد مطالعه ۰/۸۶، ۲/۵۵ و ۴/۶۶ درجه سلسیوس به‌دست آمده است. با توجه به آنچه بحث شد در هر سه سناریو و دوره‌های زمانی آینده نزدیک، میانی و دور مناطقی که نسبت به میانگین مشاهداتی بلندمدت خود بیشینه نابهنجاری دمای فصل زمستان را داشته‌اند در شمال غرب شامل استان‌های آذربایجان غربی، شرقی، اردبیل، زنجان و شمال کردستان، در زاگرس مرکزی شامل استان‌های چهارمحال بختیاری، قسمت‌های شمال و شرق لرستان، همدان، شرق و شمال کرمانشاه، در شمال شرق ایران قسمت‌هایی از شرق خراسان رضوی قرار دارند. مهم‌ترین عاملی که باعث شده است نابهنجاری دمای ایران در سواحل جنوبی و مناطق داخلی کمتر از مناطق شمال غربی کشور باشد تأثیر رطوبت هوا، ارتفاع کم و عرض جغرافیایی پایین است. عباس نیا و همکاران (۲۰۱۶) با

نتایج به دست آمده از داده‌های AR4 با نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که افزایش دما در شمال غرب ایران که یک منطقه کوهستانی است تا پایان قرن از شدت بالایی برخوردار خواهد بود. به طور کلی شدت روند افزایشی دما در مناطق کوهستانی و برف‌گیر شمال غرب، شمال و تا حدودی غرب از مناطق جنوب ایران بیشتر است. مطابق با نتایج به دست آمده یان و لیو (۲۰۱۴) گرمایش وابسته به ارتفاع در طول ۵۰ سال گذشته در فلات تبت را تأیید کردند به طوری که آنها نرخ بالاتری از گرم شدن زمین را در مناطق با ارتفاع بالا به دست آوردند. همچنین ایشان نشان دادند که فصول سرد سال (زمستان و پاییز) اثرپذیری بیشتری از گرمایش جهانی دارند.

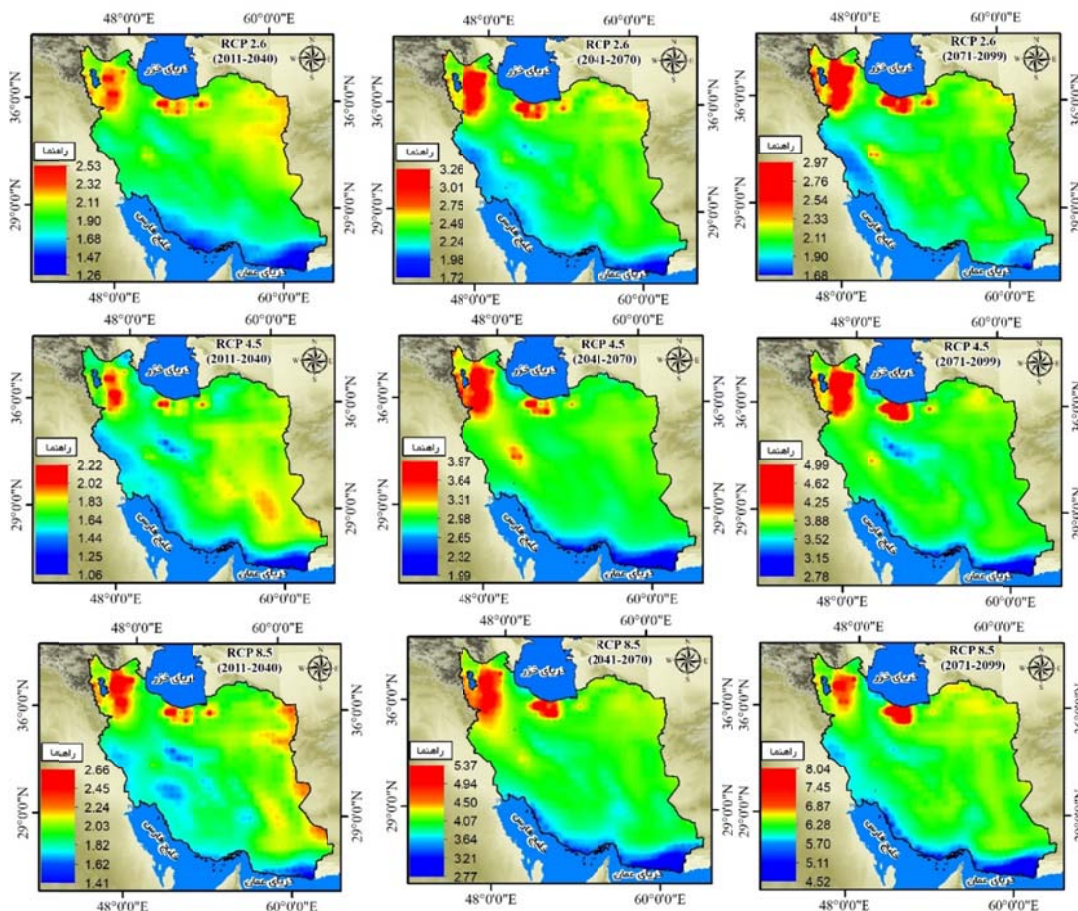
استفاده از دو مدل HADCM3 و CGCM3 دمای بیشینه ۷ ایستگاه ایران را با استفاده از روش ریزگردانی نمایی SDSM مبتنی بر گزارش چهارم IPCC (AR4) مورد ارزیابی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که حداکثر دما در آینده افزایش خواهد داشت و این افزایش دما برای مدل HADCM3 شدیدتر خواهد بود. آنها به این نتیجه رسیدند که حداکثر دمای ایران در اواسط و پایان قرن بیست و یکم بین ۰/۵ تا ۳/۵ درجه سلسیوس نسبت به دوره پایه (۲۰۱۰-۱۹۸۰) افزایش خواهد داشت. همچنین آنها نشان دادند که در ایستگاه تبریز در شمال غرب ایران حداکثر دما افزایش بیشتری خواهد داشت و ایستگاه بندرعباس کمترین افزایش دما را خواهد داشت. مقایسه



شکل ۴. ناهنجاری دمای فصل زمستان طی دوره آینده نزدیک (۲۰۱۱-۲۰۴۰)، آینده میانی (۲۰۴۱-۲۰۷۰) و آینده دور (۲۰۷۱-۲۰۹۹) بر اساس مدل HadGEM2-ES تحت سناریوهای واداشت تابشی (RCPs).

نزدیک پیش‌بینی شده است اما در آینده میانی و دور وسعت بیشتری از مناطق دچار نابهنجاری دمایی خواهند شد. در سناریو RCP8.5 در آینده نزدیک بیشینه نابهنجاری دمای فصل بهار از نظر مکانی در شمال غرب، ارتفاعات البرز، شمال شرق و شرق کشور و کمینه نابهنجاری مربوط به مناطق غرب و جنوب غرب کشور است؛ اما در آینده میانی بیشینه نابهنجاری دمای فصل بهار همانند آینده نزدیک از شدت بیشتری برخوردار خواهد بود. کمینه نابهنجاری نیز فقط محدود به بعضی از مناطق مرکزی و جنوب شرق کشور می‌باشد. توزیع نابهنجاری دما در تمام دوره‌ها و سناریوها در ایران از توپوگرافی پیروی می‌کند؛ به طوری که بیشینه نابهنجاری دمایی در ارتفاعات و عرض‌های جغرافیایی بالا به‌دست آمده است.

نابهنجاری دما در فصل بهار در شکل (۵) نشان داده شد. نابهنجاری دما در این فصل همانند فصل پیشین برای کل کشور در تمامی دوره‌ها و سناریوها مثبت است؛ کمینه نابهنجاری دما در این فصل ۱/۰۶ و بیشینه آن ۸/۰۴ درجه سلسیوس به‌دست آمده است. براساس سناریو خوش‌بینانه RCP2.6 در آینده نزدیک همانند فصل زمستان بیشینه نابهنجاری و فراوانی وقوع دماهای بیشتر از میانگین بلندمدت طی دوره تاریخی در شمال غرب، رشته‌کوه البرز و مناطق محدودی از شرق شمال شرق کشور رخ خواهد داد. اما در آینده میانی و دور این تغییرات به نسبت بیشتر شده و کمینه تغییرپذیری مربوط به نیمه جنوبی کشور (استان‌های هرمزگان، بوشهر و جنوب سیستان بلوچستان) است. در سناریو RCP4.5 نیز همانند سناریو RCP2.6 کمینه نابهنجاری دمای فصل بهار در آینده



شکل ۵. نابهنجاری دمای فصل بهار طی دوره آینده نزدیک (۲۰۴۰-۲۰۱۱)، آینده میانی (۲۰۷۰-۲۰۴۱) و آینده دور (۲۰۹۹-۲۰۷۱) بر اساس مدل-HadGEM2-ES تحت سناریوهای واداشت تابشی (RCPs).

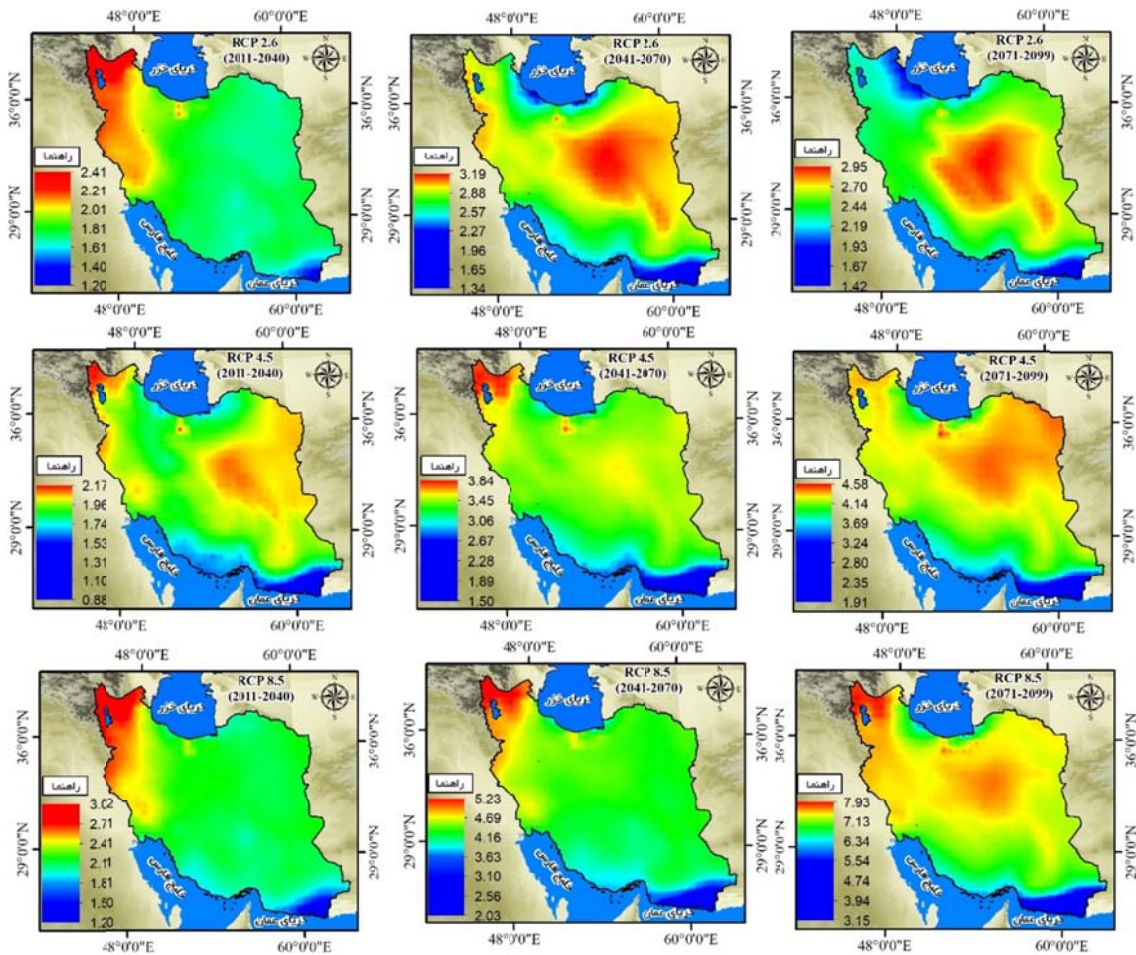
این شکل از تغییرات به‌خوبی نشان‌دهنده افت آهنگ محیطی دما و نقش بارز فرآیند کوه‌شناسی در توزیع دما است (تهاین اند و دیمری، ۲۰۱۴). لو و همکاران (۲۰۰۶) ابراز داشتند که شکل‌شناسی زمین مانند کوه‌ها، دامنه‌ها و جهت‌گیری آنها به‌شدت در وردایی فصلی دما تأثیر دارند. همچنین ننگکر و همکاران (۲۰۱۸) نیز در هیمالیا این نتیجه را تأیید کردند. مطالعات متعددی از جمله بنیستون (۲۰۰۳)، ربتز (۲۰۰۴) و یان و لیو (۲۰۱۴) روند صعودی و ناهنجاری مثبت دما را در مناطق کوهستانی در سراسر جهان مورد تأیید قرار دادند. با وجود پژوهش‌های بسیار برای نشان دادن وابستگی ارتفاع به گرمایش جهانی از سوی محققین هنوز تعریف درستی از تأثیر ارتفاع در گرمایش جهانی را نمی‌توان ارائه داد چراکه ضعف بسیار بزرگی در داده‌های مشاهداتی در این مناطق از یک‌سو و جزئیات فیزیوگرافی مناطق کوهستانی در مدل‌های آب‌وهوایی دیده می‌شود (ننگکر و همکاران، ۲۰۱۸).

شکل (۶) تغییرات ناهنجاری پیش‌نگری شده دما در فصل تابستان را در سه دوره آینده نزدیک (۲۰۱۱-۲۰۴۰)، آینده میانی (۲۰۴۱-۲۰۷۰) و آینده دور (۲۰۷۱-۲۰۹۹) با استفاده از سناریوهای واداشت تابشی (RCPs) نشان داده است. فصل تابستان همزمان با انقلاب تابستانی است و خورشید در روز اول تابستان در عمودی‌ترین حالت خود نسبت به افق در مدار ۲۳ درجه شمالی قرار دارد و دارای بیشترین انرژی ورودی به زمین است. در این فصل که همزمان بادهای غربی و جبهه قطبی به عرض‌های بالاتر جغرافیایی عقب‌نشینی می‌کنند پرفشار جنب حاره کل ایران را تا بالای کوه‌های البرز تحت سلطه خود قرار داده مانع از ورود هرگونه رطوبت به کشور می‌شود (علیجانی، ۱۳۸۹) و فقط در منتهی‌الیه سواحل دریای خزر واقع در شمال ایران در این فصل نسیم دریا به خشکی باعث بارندگی خواهد شد و دما نیز کاهش خواهد داشت. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از سناریو RCP2.6 بیشینه ناهنجاری دمای فصل تابستان ۲/۴۱ و کمینه آن ۱/۲۰ داشته باشد.

درجه سلسیوس است که نشان‌دهنده افزایش روند دمایی طی این دوره خواهد بود اما در آینده دور ناهنجاری دمای فصل تابستان نسبت به آینده میانی تقریباً با کاهش ۰/۲۵ درجه سلسیوسی دما مواجه خواهد بود. همان‌طور که در شکل (۶) مشخص است بیشینه ناهنجاری دمای این فصل در شمال غرب، غرب، شمال شرق و ایران مرکزی به‌دست‌آمده است.

بر اساس نتایج سناریو RCP4.5 بیشینه ناهنجاری دمای فصل تابستان به‌ترتیب در آینده نزدیک، میانی و دور ۲/۱۷، ۳/۸۴ و ۴/۵۸ درجه سلسیوس است. سناریو بدبینانه RCP8.5 در هر سه دوره آینده نزدیک، میانی و دور، بیشینه ناهنجاری دمای فصل تابستان را از آینده نزدیک (۲۰۴۰-۲۰۱۱) تا دور (۲۰۹۹-۲۰۷۱) به‌میزان ۴/۹۱ درجه سلسیوس و کمینه ناهنجاری دما از آینده نزدیک تا دور به‌میزان ۱/۹۵ درجه سلسیوس برآورد کرده است. در فصل تابستان سواحل دریای عمان، به‌رغم اینکه عرض جغرافیایی کمتری دارد، ناهنجاری دمای آن نسبت به سواحل خلیج فارس کمتر است؛ زیرا در فصل تابستان این منطقه تحت تأثیر سامانه موسمی قرار دارد و از طرف دیگر، اثر تعدیلی دریاهاى آزاد نیز تغییرات دما را کاهش می‌دهد. در مقابل، سواحل خلیج فارس در عرض جغرافیایی بالاتری از دریای عمان قرار گرفته است و تحت تأثیر بیابان‌های گرم جنوب و جنوب غرب ایران و وزش بادهای گرم این مناطق نیز قرار دارد. پرفشار عربستان یکی از مراکز مهم فشار شبه‌ساکنی است که در ترازهای زیرین جو ویژگی‌های آب‌وهوایی قلمرو تحت اشغال خود را متأثر می‌کند. نقش این پرفشار در مناطق جنوبی و جنوب غربی کشور بیشینه است. لذا دمای بالای جنوب غرب ایران تحت تأثیر سامانه‌های بزرگ‌مقیاس منطقه‌ای قرار دارد و هرگونه تغییر در رخداد این سامانه‌ها می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در ناهنجاری دمای ایران به‌ویژه در جنوب غرب کشور داشته باشد.

شکل (۶) تغییرات ناهنجاری پیش‌نگری شده دما در فصل تابستان را در سه دوره آینده نزدیک (۲۰۱۱-۲۰۴۰)، آینده میانی (۲۰۴۱-۲۰۷۰) و آینده دور (۲۰۷۱-۲۰۹۹) با استفاده از سناریوهای واداشت تابشی (RCPs) نشان داده است. فصل تابستان همزمان با انقلاب تابستانی است و خورشید در روز اول تابستان در عمودی‌ترین حالت خود نسبت به افق در مدار ۲۳ درجه شمالی قرار دارد و دارای بیشترین انرژی ورودی به زمین است. در این فصل که همزمان بادهای غربی و جبهه قطبی به عرض‌های بالاتر جغرافیایی عقب‌نشینی می‌کنند پرفشار جنب حاره کل ایران را تا بالای کوه‌های البرز تحت سلطه خود قرار داده مانع از ورود هرگونه رطوبت به کشور می‌شود (علیجانی، ۱۳۸۹) و فقط در منتهی‌الیه سواحل دریای خزر واقع در شمال ایران در این فصل نسیم دریا به خشکی باعث بارندگی خواهد شد و دما نیز کاهش خواهد داشت. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از سناریو RCP2.6 بیشینه ناهنجاری دمای فصل تابستان ۲/۴۱ و کمینه آن ۱/۲۰



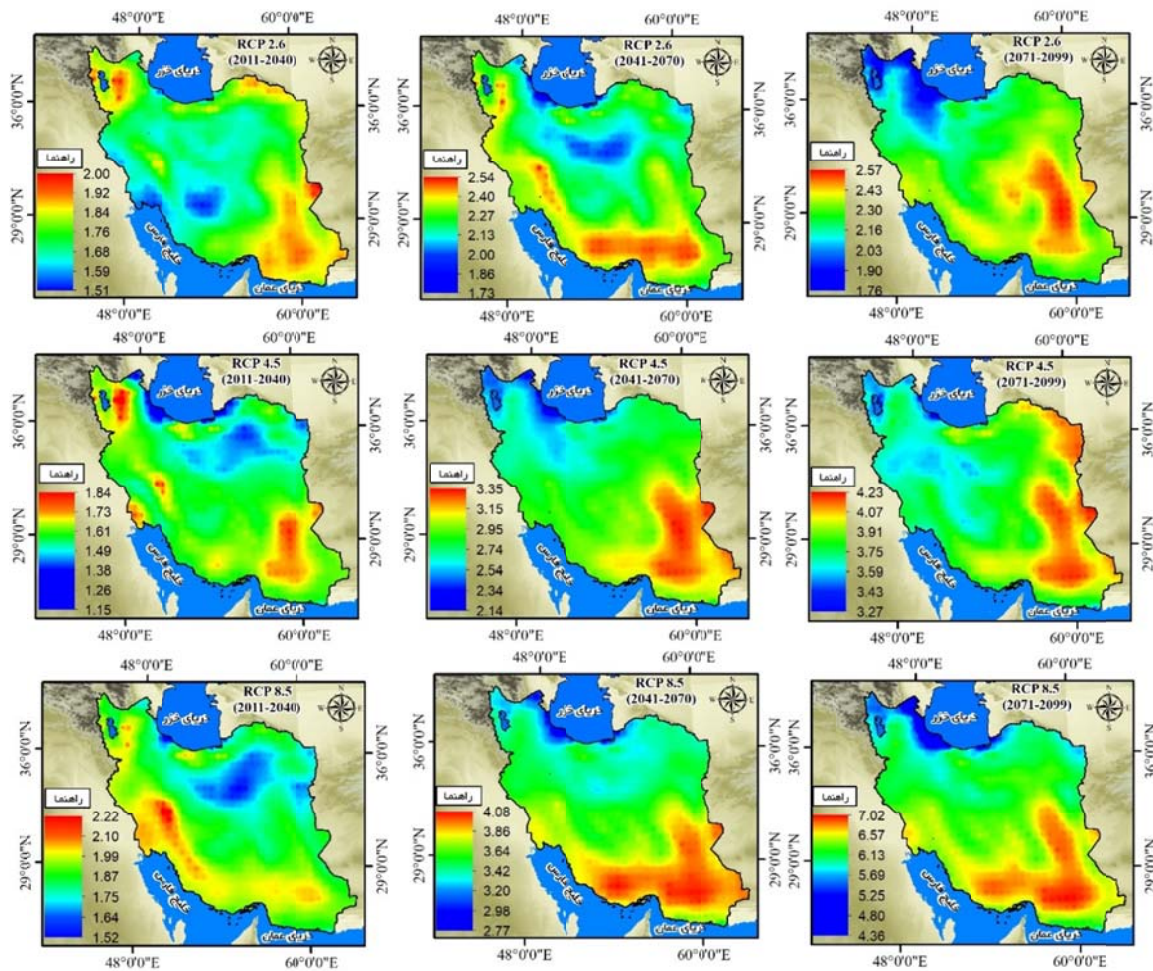
شکل ۶. ناهنجاری دمای فصل تابستان طی دوره آینده نزدیک (۲۰۴۰-۲۰۱۱)، آینده میانی (۲۰۷۰-۲۰۴۱) و آینده دور (۲۰۹۹-۲۰۷۱) بر اساس مدل HadGEM2-ES تحت سناریوهای واداشت تابشی (RCPs).

دور خواهد بود. دامنه ناهنجاری دمای فصل پاییز در آینده دور نسبت به آینده میانی تقریباً بدون تغییر در محدوده ۲/۵ تا ۱/۷ درجه سلسیوس است. کمینه ناهنجاری دما در این فصل در هر سه سناریو دارای الگوی متفاوتی در سه دوره آینده نزدیک، میانی و دور خواهد بود. در سناریو خوشبینانه کمینه ناهنجاری در آینده نزدیک، بیشتر در برخی ارتفاعات ایران مرکزی نظیر منطقه لاله‌زار کرمان و زاگرس (دنا، زرد کوه و اشترانکوه) خواهد بود در حالی که در آینده میانی در ارتفاعات رشته‌کوه البرز (دماوند، علم‌کوه)، شمال شرق (بینالود و هزار مسجد) و در آینده دور کمینه ناهنجاری دما در شمال غرب (سهند و سبلان) متمرکز

شکل (۷) ناهنجاری دمای فصل پاییز را در ایران بر اساس سناریوهای و دوره‌های مختلف نشان داده است. فصل پاییز برخلاف سه فصل پیشین اگرچه ناهنجاری سراسری مثبت را ارائه کرده اما الگوی کاملاً متفاوتی از ناهنجاری دما را در ایران نشان داده است. به طوری که بیشینه ناهنجاری دما در فصل پاییز در جنوب شرق، جنوب، جنوب غرب، شرق، شمال شرق و بخش‌های کمتری از شمال غرب کشور پیش‌بینی شده است. در این فصل پرفشار جنب حاره به سمت عرض‌های پایین حرکت کرده و راه را برای نفوذ بادهای غربی جبهه قطبی فراهم کرده است. در سناریو خوشبینانه RCP2.6 بیشینه ناهنجاری دما با شدت کمتری در آینده نزدیک نسبت به آینده میانی و آینده

سناریو قبل (RCP2.6) ابتدا در آینده نزدیک در شمال غرب و قسمت‌هایی از زاگرس مرکزی بیشینه ناهنجاری دما و کمینه آن در قسمت‌های شرق و شمال کشور قرار دارد. در آینده میانی و دور از شدت و گسترش آن در شمال غرب و غرب و کاسته شده و بیشینه ناهنجاری محدود به مناطق شرق و جنوب شرق کشور می‌شود. سناریو RCP8.5 در آینده نزدیک بیشینه ناهنجاری دما در شمال غرب کشور و زاگرس مرکزی قرار دارد و سپس در آینده میانی و دور هسته‌های بیشینه به مناطق شرق، جنوب شرق کشور و قسمت‌هایی از جنوب کشور جابه‌جا می‌شوند.

خواهد بود. توزیع مکانی ناهنجاری دما بر اساس سناریو RCP2.6 طی آینده نزدیک همانند فصل تابستان در شمال غرب، جنوب شرق، مناطقی از شرق و شمال شرق کشور و قسمت‌های محدودی از زاگرس مرکزی را در برداشته اما در آینده میانی ابتدا در نیمه جنوبی و جنوب شرق هرمزگان و سیستان بلوچستان سپس در زاگرس مرکزی و مناطق محدود از شمال غرب شاهد بیشینه ناهنجاری دمایی هستیم. در آینده دور هسته‌های بیشینه ناهنجاری محدود به شرق، جنوب شرق و مناطق مرکزی شده و شمال غرب کمینه ناهنجاری را نسبت به میانگین مشاهداتی خود داشته است. سناریو RCP4.5 نیز همانند



شکل ۷. ناهنجاری دمای فصل پاییز طی دوره آینده نزدیک (۲۰۱۱-۲۰۴۰)، آینده میانی (۲۰۴۱-۲۰۷۰) و آینده دور (۲۰۷۱-۲۰۹۹) بر اساس مدل HadGEM2-ES تحت سناریوهای واداشت تابشی (RCPs).

## ۴. نتیجه گیری

هرگونه دگرگونی در رخداد الگوهای مورد انتظار گردش هوا سپهر می‌تواند باعث بروز مشکلات بسیاری شود به‌عنوان مثال مناطق کوهستانی غرب ایران تحت تأثیر چرخند مدیترانه قرار دارند در مقابل جنوب شرق ایران تحت تأثیر سامانه مونسون و شمال ایران نیز در دوره سرد سال تحت تأثیر سامانه پرفشار سیبری قرار دارد که دگرگونی در رخداد بروز هر یک از این سامانه‌ها می‌تواند بازخوردهای کلان بسیاری به‌همراه داشته باشد. این پژوهش باهدف کارایی روش ریزگردانی دینامیکی CORDEX به ارزیابی دگرگونی ناهنجاری دمای فصلی ایران بر اساس مدل HadGEM2-E پرداخته است. مدل برای دوره تاریخی (۲۰۰۵-۱۹۶۰) و پیش‌نگری شده در آینده (۲۰۹۹-۲۰۱۱) تحت سه سناریو واداشت تابشی (RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5) اجرا شد. در گام بعدی داده‌های مدل به سه دوره آینده نزدیک (۲۰۴۰-۲۰۱۱)، آینده میانی (۲۰۷۰-۲۰۴۱) و آینده دور (۲۰۹۹-۲۰۷۱) تقسیم‌بندی شدند تا بهتر بتوان اثرات گرمایش جهانی را در ایران مورد ارزیابی قرار دهیم. ارزیابی مدل با استفاده از شش آماره ضریب تعیین ( $R^2$ )، میانگین خطای مطلق (MAE)، میانگین انحراف خطا (MBE) و میانگین مربعات خطا (RMSE)، t-Jacovides و نسبت  $t\text{-Jacovides}/R^2$  با داده‌های ۴۵ ایستگاه همدید در کشور مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد در اغلب ایستگاه‌ها مدل از عملکرد مناسبی برخوردار است. اختلاف دامنه دمایی به‌دست‌آمده بیشتر مربوط اهمیت فرآیندی فیزیکی درون مدل مانند سطح زمین، فیزیک به‌کار رفته در ابر و شرایط دمای سطح دریا (SST) است. همچنین مقدار انتشار در مدل‌های مختلف نیز به‌همراه آنچه گفته شد می‌تواند در وردایی دمای کمینه و بیشینه نقش داشته باشد. نتایج نشان داد بیشینه ناهنجاری دمای فصلی در عرض‌های جغرافیایی بالا و مناطق مرتفع کوهستانی است در بین فصول تنها فصل پاییز الگوی متفاوتی از ناهنجاری

را ارائه داده است که مناطق جنوب غرب، جنوب، جنوب شرق و شرق کشور بیشینه ناهنجاری مثبت دما را ارائه داده است. نتیجه به‌دست آمده با پژوهش فلاح‌قاله‌ری و همکاران (۲۰۱۹) که با استفاده از سه روش ریزگردانی MarkSimGCM،SDSM و CORDEX دمای کمینه و بیشینه ایران را تحت مدل‌های CanESM2، GFDL-ESM2M و MPI-ESM-LR تا ۲۱۰۰ شبیه‌سازی کردند همخوانی دارد؛ همگام با نتایج به‌دست آمده بیشینه ناهنجاری دما در پژوهش نام‌برده در مناطق کوهستانی و عرض‌های جغرافیایی بالا به‌دست آمده است. ناهنجاری دما در هیچ‌یک از فصول، سناریوها و دوره‌های مورد مطالعه منفی نبوده است به‌طوری‌که ناهنجاری سرتاسری مثبت در کشور دیده می‌شود. این افزایش ناهنجاری می‌تواند یک تهدید عمده برای منابع آب کشور باشد. افزایش دمای زمستان نیز پیش از این توسط براتی و موسوی (۱۳۸۴) مورد تأیید قرار گرفته است. همچنین فلاح‌قاله‌ری و داداشی رودباری (۲۰۱۸) تغییر کانون‌های حرارتی ایران و افزایش دما در مناطق مرتفع را تأیید کردند. دامنه دمایی مدل‌های مختلف و مقایسه آن با ناهنجاری به‌دست‌آمده برای دمای ایران نشان داده که مطابق با گرمایش جهانی از مقدار الگوهای دمایی سرد و خنک و به‌طور کلی سرماهای فرین کاسته خواهد شد. همچنین افزایش دمای هوا در ایران مشکلات بسیاری می‌تواند به‌همراه داشته باشد؛ باید در نظر داشت که ایران کشوری خشک است که بخش قابل توجهی از آب این کشور از منابع آب‌وهوایی زیرزمینی تأمین می‌شود که افزایش دما منجر به استفاده بیشتر از منابع آب‌های زیرزمینی خواهد شد.

در تأیید نتایج به‌دست‌آمده سولمن و همکاران (۲۰۰۸) و هاسلینگر و همکاران (۲۰۱۳) مقدار اریبی مدل را برای دماهای کمینه در مناطق کوهستانی به‌عنوان یک ویژگی مشترک تأیید کردند. گیماپر و همکاران (۲۰۱۸) با شبیه‌سازی بارش مبتنی بر CORDEX-SA در رشته‌کوه هیمالیا دریافتند که مقدار اریبی مدل ناشی از افزایش رطوبت



تأثیر و اچرخندها و الگوهای بلاکینگ مختلفی قرار دارد که احتمال وقوع آنها در شرایط گرمایش جهانی افزایشی نیز خواهد بود. الگوهای بلاکینگ باعث تغییر الگوی آب‌وهوایی می‌شود که منجر به سیل، خشکسالی، نابهنجاری دمایی و بروز سایر فرین‌های آب‌وهوایی خواهد شد.

پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های بعدی GCM‌های بیشتری با استفاده از روش‌های گوناگون ریزگردانی در کشور مورد ارزیابی قرار گیرند تا بتوان مدل بهینه را برای کشور معرفی کرد و از نتایج آن برای ارزیابی اثرات دگرگونی آب‌وهوایی در بخش‌های مختلف مدیریتی بهره برد.

#### مراجع

احمدی، م. و داداشی رودباری، ع.، ۱۳۹۵، دستورالعمل اجرایی ریز پیمانه‌نمایی آماری سری‌های روزانه آب‌وهوا، انتشارات نوید مهر، تهران.

احمدی، م.، داداشی رودباری، ع. و ابراهیمی، ر.، ۱۳۹۶، دورنمای فرین‌های گرم ایران مبتنی بر برونداد مدل میان‌مقیاس منطقه‌ای (REGCM4)، فصلنامه علمی-پژوهشی و بین‌المللی انجمن جغرافیای ایران، ۵۲، ۶۷-۸۰.

احمدی، م.، شکیبی، ع. و داداشی رودباری، ع.، ۱۳۹۸، بررسی نقش شاخص‌های پوشش گیاهی و مؤلفه‌های جغرافیایی مکان بر عمق نوری هواویزهای فصلی ایران، فیزیک زمین و فضا، ۴۵(۱)، ۲۱۱-۲۳۳.

امیدوار، ک.، ابراهیمی، ر.، داداشی رودباری، ع. و ملک میرزایی، م.، ۱۳۹۷، واکاوی زمانی- مکانی فرین‌های سرد ایران تحت تأثیر گرمایش جهانی به‌منظور کاهش مخاطرات، مدیریت مخاطرات محیطی، ۲(۴)، ۴۲۳-۴۳۷.

امیدوار، ک.، ابراهیمی، ر.، کیخسروی کیانی، م. و لک‌زاشکور، ق.، ۱۳۹۵، اثر گرمایش جهانی بر تغییرات دمای ایران تحت مدل دینامیکی EH5OM، نشریه

در ارتفاعات به دلیل بازخورد پوشش برف، رطوبت و تبخیر نقش به‌سزایی را در تغییرات دما خواهد داشت. شی و همکاران (۲۰۱۱) نشان دادند که عملکرد مدل وابسته به طول فضایی متغیر است به‌طوری‌که برای هر مدل مناطقی وجود دارد که کارایی بالا دارد و همچنین مناطقی هستند که اریبی بالایی دارند. همان‌طور که شاخص اریبی (MBE) نشان داده است تنوع فضایی اریبی دما در ایران وابسته به توپوگرافی پیچیده محیط است و این امر منجر می‌شود که مدل پاسخ ویژه‌ای به واداشت‌های سطحی داشته باشد. یکی از دلایل مهم افزایش نابهنجاری دما در مناطق مرتفع شمال غرب ایران برف است. والش و همکاران (۱۹۸۵) برف را عامل فعال دگرگونی آب‌وهوایی عنوان کردند. از سوی دیگر لو و همکاران (۲۰۱۰) نشان دادند که برف‌های انبارشده در ارتفاعات بالاتر از ۵۰۰۰ متر به‌وسیله سپیدایی بالا و ظرفیت حرارتی بالا شناخته می‌شوند و نسبت به مناطق کم‌ارتفاع، پاسخ قابل توجهی از گرمایش جهانی را نشان نمی‌دهند. تغییرات شدید توپوگرافی و ارتفاع زیاد منجر به وردایی بیشتر دما از مشخصه‌های محیطی نسبت به گرمایش جهانی خواهد شد لذا وقتی صحبت از مناطق مرتفع معمولاً بیش از ۵۰۰۰ متر می‌شود می‌بایستی با احتیاط بیشتری از کارایی گرمایش جهانی بحث کرد.

بر اساس آنچه بحث شد، مهم‌ترین عاملی که در مدل‌سازی باید به آن توجه داشت مسأله عدم قطعیت است؛ نکته دیگری که در خصوص عدم قطعیت مدل‌سازی انجام‌شده باید به آن توجه داشت الگوهای بلاکینگ است؛ شبیه‌سازی سامانه‌های بلاکینگ عرض‌های میانی کره زمین که ایران نیز در آن قرار گرفته است همواره از نقاط ضعف GCMs بوده است (دیوینی و دی آندریا، ۲۰۱۶). اگرچه پژوهش گیلیاردی و همکاران (۲۰۱۲) اخیراً پیشرفت‌هایی در این خصوص گزارش کردند اما همچنان وجود خطاهای احتمالی در GCM‌ها در خصوص کارایی بلاکینگ وجود دارد. ایران به‌علت قرار گرفتن در عرض‌های میانی کره زمین در فصول مختلف سال تحت

- و منابع طبیعی، ۹(۱)، ۲۳-۹.
- علیجانی، ب.، ۱۳۸۹، آب‌وهوای ایران، انتشارات دانشگاه پیام نور، چاپ دهم، تهران، ۲۲۱ ص.
- کامیار، ا.، یزدان‌پناه، ح. و موحدی، س.، ۱۳۹۷، ارزیابی دقت خروجی مدل‌های منطقه‌ای آب‌وهوا در ایران، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۵۰(۱)، ۱۶۱-۱۷۶.
- معصوم پورسماکوش، ج.، میری، م. و پورکمر، ف.، ۱۳۹۶، ارزیابی داده‌های مدل‌های اقلیمی CMIP5 در مقابل داده‌های مشاهده‌ای ایران، مجله ژئوفیزیک ایران، ۱۱(۴)، ۴۰-۵۳.
- میراکبری، م.، مصباح زاده، ط.، محسنی ساروی، م.، خسروی، ح. و مرتضایی فریزهندی، ق.، ۱۳۹۷، ارزیابی کارایی مدل سری CMIP5 در شبیه‌سازی و پیش‌بینی پارامترهای اقلیمی بارندگی، دما و سرعت باد (مطالعه موردی: استان یزد)، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۵۰(۳)، ۵۹۳-۶۰۹.
- হারدی، ج. ت.، ۱۳۸۷، تغییر اقلیم علل، اثرات و راه‌حل‌ها، ترجمه: مترجمان لیلی خزانه‌داری، منصوره کوهی، شهرزاد قندهاری و مهدی آسیائی، انتشارات پاپلی، مشهد، ۳۶۴ ص.
- Abbasnia, M., Tavousi, T. and Khosravi, M., 2016, Assessment of future changes in the maximum temperature at selected stations in Iran based on HADCM3 and CGCM3 models, Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, 52(4), 371-377.
- Beniston, M., 2003, Climatic change in mountain regions: a review of possible impacts, In Climate variability and change in high elevation regions: Past, present & future (pp. 5-31). Springer, Dordrecht.
- Bucchignani, E., Cattaneo, L., Panitz, H. J. and Mercogliano, P., 2016, Sensitivity analysis with the regional climate model COSMO-CLM over the CORDEX-MENA domain, Meteorology and Atmospheric Physics, 128(1), 73-95.
- Cellitti, M. P., Walsh, J. E., Rauber, R. M. and Portis, D. H., 2006, Extreme cold air outbreaks over the United States, the polar vortex, and the large-scale circulation, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 111(D2).
- Chen, H. and Sun, J., 2013, Projected change in East Asian summer monsoon precipitation under RCP scenario, Meteorology and Atmospheric Physics, 121(1-2), 55-77.
- Collins, W. J., Bellouin, N., Doutriaux-Boucher, M., Gedney, N., Halloran, P., Hinton, T., Hughes, J., Jones, C. D., Joshi, M., Liddicoat, S. and Martin, G., 2011, Development and evaluation of an Earth-System model-HadGEM2, Geoscientific Model Development, 4(4), 1051-1075.
- Collins, W. J., Bellouin, N., Doutriaux-Boucher, M., Gedney, N., Hinton, T., Jones, C. D., Liddicoat, S., Martin, G., O'Connor, F., Rae, J. and Senior, C., 2008, Evaluation of the HadGEM2 model, Hadley Cent. Tech. Note, 74.
- Davini, P. and D'Andrea, F., 2016, Northern Hemisphere atmospheric blocking representation in global climate models: Twenty years of improvements?, Journal of Climate, 29(24), 8823-8840.
- Deng, H., Luo, Y., Yao, Y. and Liu, C., 2013, Spring and summer precipitation changes from 1880 to 2011 and the future projections
- تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۱۶ (۴۳)، ۱۹۵-۲۱۶.
- اوجی، ر.، ۱۳۹۷، مقایسه ریزگردانی تک ایستگاهی و چند ایستگاهی فرین‌های دما و بارش (مطالعه موردی: سواحل جنوبی دریای خزر)، فیزیک زمین و فضا، ۴۴(۲)، ۳۹۷-۴۱۰.
- براتی، غ. و موسوی، س. ش.، ۱۳۸۴، جابه‌جایی مکانی موج‌های زمستانی گرما در ایران، مجله جغرافیا و توسعه، ۵، ۴۱-۵۲.
- حیدری، م. ا. و خوش‌اخلاق، ف.، ۱۳۹۴، اثر گرمایش جهانی بر مرکز چرخندزایی شرق مدیترانه و ارتباط آن با نابهنجاری بارش نیمه غربی ایران، مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، ۶(۲۲)، ۷۲-۸۸.
- شکوهی، م.، ثنائی نژاد، ح. و بنایان اول، م.، ۱۳۹۷، ارزیابی شبیه‌سازی دما و بارش مدل‌های اقلیمی CMIP5 در مطالعات منطقه‌ای تغییر اقلیم (مطالعه موردی: مناطق عمده تولید گندم دیم در ایران). آب و خاک، ۳۲(۵)، ۱۰۱۳-۱۰۱۴.
- شیر غلامی، ه. و قهرمان، ب.، ۱۳۸۴، بررسی روند تغییر دمای متوسط سالانه در ایران، علوم و فنون کشاورزی

- from CMIP5 models in the Yangtze River Basin, China, *Quaternary international*, 304, 95-106.
- Diffenbaugh, N. S. and Giorgi, F., 2012, Climate change hotspots in the CMIP5 global climate model ensemble, *Climatic change*, 114(3-4), 813-822.
- Dosio, A. and Panitz, H. J., 2016, Climate change projections for CORDEX-Africa with COSMO-CLM regional climate model and differences with the driving global climate models, *Climate Dynamics*, 46(5-6), 1599-1625.
- FallahGhalhari, G. F. and DadashiRoudbari, A. D., 2018, An investigation on thermal patterns in Iran based on spatial autocorrelation, *Theoretical and applied climatology*, 131(3-4): 865-876.
- 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*, 1-24. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02906-9>.
- Gbobaniyi, E., Sarr, A., Sylla, M.B., Diallo, I., Lennard, C., Dosio, A., Dhiédiou, A., Kanga, A., Klutse, N.A.B., Hewitson, B. and Nikulin, G., 2014, Climatology, annual cycle and interannual variability of precipitation and temperature in CORDEX simulations over West Africa, *International Journal of Climatology*, 34(7), 2241-2257.
- Ghimire, S., Choudhary, A. and Dimri, A. P., 2018, Assessment of the performance of CORDEX-South Asia experiments for monsoonal precipitation over the Himalayan region during present climate: part I, *Climate dynamics*, 50(7-8), 2311-2334.
- Giorgi, F. and Lionello, P., 2008, Climate change projections for the Mediterranean region, *Global and planetary change*, 63(2-3), 90-104.
- Giorgi, F., Diffenbaugh, N.S., Gao, X.J., Coppola, E., Dash, S.K., Frumento, O., Rauscher, S.A., Remedio, A., Sanda, I.S., Steiner, A. and Sylla, B., 2008, The regional climate change hyper-matrix framework, *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 89(45), 445-446.
- Giorgi, F., Jones, C. and Asrar, G. R., 2009, Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework, *World Meteorological Organization (WMO) Bulletin*, 58(3), 175.
- Gu, H., Yu, Z., Wang, J., Wang, G., Yang, T., Ju, Q., Yang, C., Xu, F. and Fan, C., 2015, Assessing CMIP5 general circulation model simulations of precipitation and temperature over China, *International Journal of Climatology*, 35(9), 2431-2440.
- Guilyardi, E., Cai, W., Collins, M., Fedorov, A., Jin, F. F., Kumar, A., Sun, D. Z. and Wittenberg, A., 2012, New strategies for evaluating ENSO processes in climate models, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(2), 235-238.
- Haslinger, K., Anders, I. and Hofstätter, M., 2013, Regional climate modelling over complex terrain: an evaluation study of COSMO-CLM hindcast model runs for the Greater Alpine Region, *Climate dynamics*, 40(1-2), 511-529.
- IPCC 2013, *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. In: Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, P.M. (Eds.), Working Group I Contribution to the IPSS 5th Assessment Report – Changes to the underlying Scientific/Technical Assessment, Cambridge University Press, Cambridge, UK & New York, USA.
- Jacovides, C. P., 1998, Reply to comment on "Statistical procedures for the evaluation of evapotranspiration computing models", *Agricultural Water Management*, 37(1), 95-97.
- Johns, T.C., Durman, C.F., Banks, H.T., Roberts, M.J., McLaren, A.J., Ridley, J.K., Senior, C.A., Williams, K.D., Jones, A., Rickard, G.J. and Cusack, S., 2006, The new Hadley Centre climate model (HadGEM1): Evaluation of coupled simulations, *Journal of Climate*, 19(7), 1327-1353.
- Kumar, S., Merwade, V., Kinter III, J. L. and Niyogi, D., 2013, Evaluation of temperature and precipitation trends and long-term persistence in CMIP5 twentieth-century climate simulations, *Journal of Climate*, 26(12), 4168-4185.
- Laprise, R., Hernández-Díaz, L., Tete, K., Sushama, L., Šeparović, L., Martynov, A., Winger, K. and Valin, M., 2013, Climate projections over CORDEX Africa domain using the fifth-generation Canadian Regional Climate Model (CRCM5), *Climate Dynamics*, 41(11-12), 3219-3246.
- Lelieveld, J., Proestos, Y., Hadjinicolaou, P., Tanarhte, M., Tyrlis, E. and Zittis, G., 2016, Strongly increasing heat extremes in the Middle East and North Africa (MENA) in the 21st century, *Climatic Change*, 137(1-2), 245-260.
- Lu, A., Kang, S., Li, Z. and Theakstone, W. H., 2010, Altitude effects of climatic variation on Tibetan Plateau and its vicinities, *Journal of Earth Science*, 21(2), 189-198.
- 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.
- Nengker, T., Choudhary, A. and Dimri, A. P., 2018, Assessment of the performance of CORDEX-SA experiments in simulating seasonal mean temperature over the Himalayan region for the present climate: part I, *Climate dynamics*, 50(7-8), 2411-2441.
- Nikulin, G., Jones, C., Giorgi, F., Asrar, G., Büchner, M., Cerezo-Mota, R., Christensen, O.B., Déqué, M., Fernandez, J., Hänsler, A. and van Meijgaard, E., 2012, Precipitation climatology in an ensemble of CORDEX-Africa regional climate simulations, *Journal of Climate*, 25(18), 6057-6078.
- Rebetez, M., 2004, Summer 2003 maximum and minimum daily temperatures over a 3300 m altitudinal range in the Alps, *Climate Research*, 27(1), 45-50.
- Shi, Y., Gao, X., Zhang, D. and Giorgi, F., 2011, Climate change over the Yarlung Zangbo–Brahmaputra River Basin in the 21st century as simulated by a high resolution regional climate model, *Quaternary international*, 244(2), 159-168.
- Solman, S. A., Nunez, M. N. and Cabré, M. F., 2008, Regional climate change experiments over southern South America. I: present climate, *Climate Dynamics*, 30(5), 533-552.
- Sylla, M. B., Giorgi, F., Coppola, E. and Mariotti, L., 2013, Uncertainties in daily rainfall over Africa: assessment of gridded observation products and evaluation of a regional climate model simulation, *International Journal of Climatology*, 33(7), 1805-1817.
- Thayyen, R. J. and Dimri, A. P., 2014, Factors controlling Slope Environmental Lapse Rate (SELR) of temperature in the monsoon and cold-arid glacio-hydrological regimes of the Himalaya, *The Cryosphere Discussions*, 8(6), 5645-5686.
- Van Vooren, S., Van Schaeybroeck, B., Nyssen, J., Van Genderachter, M. and Termonia, P., 2018, Evaluation of CORDEX rainfall in northwest Ethiopia: Sensitivity to the model representation of the orography, *International Journal of Climatology*.
- Walsh, J. E., Jaspersen, W. H. and Ross, B., 1985, Influences of snow cover and soil moisture on monthly air temperature, *Monthly Weather Review*, 113(5), 756-768.
- 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.
- Westby, R. M., Lee, Y. Y. and Black, R. X., 2013, Anomalous temperature regimes during the cool season: long-term trends, low-frequency mode modulation, and representation in CMIP5 simulations, *Journal of Climate*, 26(22), 9061-9076.
- 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.
- Zhao, C., Liu, X., Ruby Leung, L. and Hagos, S., 2011, Radiative impact of mineral dust on monsoon precipitation variability over West Africa, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(5), 1879-1893.

## The Performance of the HadGEM2-ES Model in the Evaluation of Seasonal Temperature Anomaly of Iran under RCP scenarios

Ahmadi, M.<sup>1\*</sup>, Dadashi Roudbari, A. A.<sup>2</sup>, Akbari Azirani, T.<sup>3</sup> and Karami, J.<sup>4</sup>

1. Associate Professor, Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

2. Ph.D. Student, Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

3. Assistant Professor, Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

4. M.Sc. Student, Department of Physical Geography, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

(Received: 24 April 2019, Accepted: 1 Oct 2019)

### Summary

Global warming is considered as a major challenge for food security and in recent years, it has attracted attentions, especially in arid areas. The Middle East and the Mediterranean are known as sensitive areas to climate changes. It is essential to understand the condition of climate changes, firstly at regional scales and secondly at large scales to adopt appropriate policies. Although the variety of seasonal temperature anomalies by the CMIP5 through the use of statistical downscaling model has not been thoroughly investigated. The aim of this research is to evaluate the diversity of seasonal temperature anomalies which are extracted from RegCM2-ES as the CMIP5 collection model based on the dynamic regression method by CORDEX model for the first time in Iran.

In this study, the HadGEM2-ES model has been applied as one of the CMIP5 collection models to investigate the seasonal temperature anomaly by the use of CORDEX dynamic regression downscaling method under the Representative Concentration Pathway (RCP) scenarios. This model was operated for the period (1970-2005) and for a predicted future period (2011-2099) under three RCP scenarios (RCP2.6, RCP4.5, RCP8.5). In order to achieve better evaluation of global warming at the next step, the model data was divided into three time intervals comprises near future (2011-2040), middle future (2041-2070), and far future (2071-2099). The model was validated using data based on 31 synoptic stations and by applying six statistics of deterministic coefficient ( $R^2$ ), mean absolute error (MAE), mean bias error (MBE), root mean square error (RMSE), t-Jacovides, and t-Jacovides/ $R^2$  ratio.

According to statistical results of validation, the HadGem2-ES model proves that it has appropriate ability to reconstruct the seasonal temperature anomalies. Results show that the seasonal temperature anomalies are positive during the study of time intervals under the used RCP scenarios and it is high in winters which is considered as a significant threat to the water resources in Iran. The reconstructed maximum seasonal temperature anomalies indicate that it matches well in high regions and high latitudes during winters and springs. Subsequently the northwest of Iran is known as the center of maximum temperature anomalies. In summer, the mountains and central Iran indicate the maximum temperature anomalies while in autumn, anomalies are recognized on the coastal regions in the south and east border of Iran. Furthermore, there is evidence for a seasonal response to performance of the model and spatial diversity based on different topography in Iran.

Based on the results, it can be concluded that the most seasonal temperature anomalies based on the HadGEM2-ES model and dynamical downscaling CORDEX method is evident in high latitudes and mountainous regions of Iran. There is a different pattern of maximum positive anomalies in southwest, south, southeast, and east of country during autumn. Not only was the temperature anomaly positive in all of seasons but also it was positive in each of scenarios and time periods of study. Consequently, it is a major threat to natural water resources in Iran. The temperature anomaly extracted from HadGEM2-ES Model comparing to the temperature ranges of different models proves that according to global warming, there is a reduction in the cold extreme events in Iran. Moreover, the spatial variation of temperature in Iran depends on the complex environment topography which causes a specific response of the model to surface forcing. It is concluded that the existence of snow is the main reason for increasing the temperature anomaly in the highlands of northwest of Iran.

**Keywords:** Temperature anomaly, HadGEM2-ES model, CORDEX, CMIP5, RCP scenarios, Iran.

\* Corresponding author:

ma\_ahmadi@sbu.ac.ir