

## پیش‌نگری فراسنج‌های اقلیمی کشور با به‌کارگیری مدل‌های گردش کلی سری CMIP5 (دوره ۲۰۲۰-۲۱۰۰ میلادی)

ایمان بابائیان<sup>۱</sup>، مریم کریمیان\*<sup>۲</sup>، راهله مدیریان<sup>۲</sup>، ابراهیم میرزایی<sup>۳</sup>

۱- استادیار، گروه پژوهشی تغییر اقلیم، پژوهشکده اقلیم‌شناسی، سازمان هواشناسی کشور

۲- کارشناس پژوهشی، گروه پژوهشی تغییر اقلیم، پژوهشکده اقلیم‌شناسی، سازمان هواشناسی کشور

۳- دانشجوی دکتری هواشناسی موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، سازمان هواشناسی کشور

(تاریخ دریافت: ۹۷/۰۵/۰۹، تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۲/۱۲)

### چکیده

تا قبل از انتشار گزارش پنجم ارزیابی تغییر اقلیم (AR5) هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم در نوامبر سال ۲۰۱۳، محققان کشورمان از داده‌های مدل‌های گردش کلی سری CMIP3 برای پیش‌نگری تغییر اقلیم کشور استفاده می‌کردند اما از حدود سال ۲۰۱۵ به تدریج دسترسی به داده‌های مدل‌های گردش کلی سری CMIP5 تسهیل شد، به طوری که هم‌اکنون اغلب پژوهش‌های مرتبط با پیش‌نگری تغییر اقلیم با به‌کارگیری داده‌های مدل‌های CMIP5 انجام می‌شوند. در این پژوهش از برونداد تمامی مدل‌های سری CMIP5 به کار رفته در تهیه گزارش AR5، برای برآورد چشم‌انداز تغییر اقلیم کشور استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان داد که به استثنای سناریوی خوش بینانه RCP2.6 در سه سناریوی دیگر، میانگین بارش از مدیترانه تا افغانستان کاهش می‌یابد. در سناریوی RCP8.5 که ناظر بر عدم پایداری کشورها به توافق نامه تغییر آب و هوای پاریس (COP21) در سال ۲۰۱۵ است کاهش بارش در غرب ایران تا ۲۰ درصد و در سوریه، اردن، فلسطین و عراق تا ۳۰ درصد در مقایسه با بلند مدت خواهد بود. همچنین در صورت عدم پایداری به توافق نامه پاریس، میانگین دمای کشور حدود ۵/۲ و در صورت پایداری به آن ۱/۳ درجه سلسیوس نسبت به دوره ۲۰۰۵-۱۹۸۶ افزایش می‌یابد. در مجموع با توجه به کاهش بارش و افزایش دما، انتظار می‌رود مناطق غرب کشور و به ویژه زاگرس در معرض خشکسالی، تنش آبی، کاهش سطح پوشش جنگلی، کاهش منابع آبی، کاهش تولید نیروگاه‌های برقی و افزایش رخدادهای حدی اقلیمی قرار گیرد. این وضعیت ایجاب می‌کند مسئولان و برنامه‌ریزان ملی و منطقه‌ای برنامه عملیاتی مناسبی برای مواجهه با پیامدهای سوء تغییر اقلیم تدوین کنند.

**کلمات کلیدی:** مدل‌های گردش کلی، CMIP5، RCP، ایران، تغییر اقلیم

### مقدمه

پروژه استانداردسازی استفاده از مدل‌های جفت شده جوئی-اقیانوسی را راه‌اندازی کرد که ثمره آن پروژه CMIP<sup>۳</sup> (پروژه مقایسه متقابل مدل‌های اقلیمی) بود. تعدادی از مراکز و مدل‌های جفت شده جوئی-اقیانوسی که در این پروژه مشارکت دارند، عبارتند از: BCM, BMRC, CCCma, CCSR, CERFACE, COALA, CSIRO, DOE PCM ECHAM, GFDL, GISS, IAP/LASG, INMCM, LMD/IPSL, MRI, NCAR, NRL, UKMO(HAdCM), YONU. (۱). پروژه CMIP نقش مهمی را در مطالعات هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم (IPCC) ایفا می‌کند. برآوردهای اخیر از گرمایش جهانی با

هم‌اکنون در مراکز بین‌المللی از مدل‌های متعددی با سناریوهای انتشار، طرحواره‌های فیزیکی و محاسباتی گوناگون برای پیش‌نگری<sup>۱</sup> اقلیم دهه‌های آینده کره زمین استفاده می‌شود که محققان را در زمینه انتخاب نوع مدل گردش کلی برای مطالعات کمی تغییر اقلیم، پیامدها و روش‌های سازگاری با آن، با مشکل مواجهه می‌سازند. برای فائق آمدن بر این مشکل در سال ۱۹۹۵ هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم<sup>۲</sup> با گرد هم آوردن نمایندگان مراکز فعال در زمینه مدل‌سازی‌های تغییر اقلیم،

<sup>1</sup> projection

<sup>2</sup> Intergovernmental Panel on Climate Change

<sup>3</sup> Coupled model Intercomparison project

کاهش اریبی مدل‌ها شود، منتشر کنند (دلورت و همکاران، ۲۰۰۶؛ فریم و همکار، ۲۰۱۳ و هونگ و همکاران، ۲۰۱۳). به همین منظور در سپتامبر ۲۰۰۸ همایشی با شرکت نمایندگان ۲۰ مرکز و گروه مدل‌سازی اقلیمی از مناطق مختلف جهان برگزار شد و برنامه WCRP<sup>۵</sup> سازمان جهانی هواشناسی موافقت کرد تا سری جدیدی از داده‌های پروژه مقایسه بین مدلی تحت عنوان CMIP5 تهیه شود تا در گزارش پنجم هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم استفاده شود (۱).

هم‌اکنون چهار نوع سناریو RCP<sup>۶</sup> موجود است: RCP2.6، RCP4.5، RCP6.0 و RCP8.5. نامگذاری RCPها بر اساس خط سیر اقتصادی و اجتماعی است که از نیروهای تابشی مشخص تا سال ۲۱۰۰ میلادی به دست می‌آید (چتورودی و همکاران، ۲۰۱۲). تاکنون مطالعات متعددی برای مقایسه مدل‌های CMIP3 و مدل‌های CMIP5 که دارای قدرت تفکیک بهتر و فرایندهای فیزیکی بیشتر و اجزای سیستم با انتگرال‌گیری بهتری هستند، انجام شده است (نوتی و همکار، ۲۰۱۳ و کوگ و همکاران، ۲۰۱۲). راستی‌آزمایی از مدل‌های CMIP5 حاکی از بهبود نتایج شبیه‌سازی در فرایندهای مهم است (میل و همکاران، ۲۰۰۹ و ماینس هوزن و همکاران، ۲۰۱۱). همچنین مطالعات گسترده‌ای در زمینه داده‌های CMIP5 انجام شده است. از جمله جنا و همکاران (۲۰۱۵) تغییرات پیش‌بینی CMIP5 در چرخه سالانه بارش مونسون هند را بررسی کردند. آنها دریافتند که مدل‌های MPI-ESM-LR، MRI-CGCM3 و INM-CM4 و مونسون را در مونسون زمستانه و مدل‌های MIROC، MIROC-ESM و MIROC-ESM-CHEM مونسون تابستانه بهتر شبیه‌سازی می‌کند. اسکوسیمارو و همکاران (۲۰۱۲) تغییرات ممکن در توزیع بارش‌های سنگین را تحت شرایط اقلیم گرم‌تر با استفاده از نتایج ۲۰ مدل اقلیمی بر پایه داده‌های CMIP5 بررسی کردند. بررسی‌ها نشان داد که مدل‌های

استفاده از داده‌های پروژه CMIP دقیق‌تر شده که منجر به افزایش اعتماد به صحت پروژه مذکور شده است (بیکر و همکار، ۲۰۱۳ و بلزکیوز و همکار، ۲۰۱۳). اولین سری از داده‌های این پروژه با نام CMIP1 شامل نتایج اجرای کنترل (با فرض ثابت بودن تابش خورشید، غلظت دی اکسید کربن و سایر واداشت‌های خارجی اقلیمی) بودند. در سال ۱۹۹۶ مدل‌ها با سناریوی افزایش دی اکسید کربن به میزان یک درصد در سال اجرا شدند که نتایج آن در قالب پروژه CMIP2 ارائه شد که علاوه بر داده‌های اجرای کنترلی، بروندادهای با سناریوی افزایش دی اکسید کربن با آهنگ یک درصد در سال را نیز در بر داشت. در این پروژه بعد از ۷۰ سال غلظت دی اکسید کربن دو برابر فرض می‌شود. در مرحله یاد شده هیچ‌گونه واداشت‌های دیگری ناشی از دخالت جوامع انسانی در اقلیم مانند افزایش هواویزها (که نقش سرمایه‌ی در اقلیم کره زمین دارند) در مدل‌ها لحاظ نشده‌اند (۱). مرحله سوم پروژه مقایسه متقابل مدل‌های اقلیمی (CMIP3) همراه با گزارش AR4 هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم در سال ۲۰۰۷ منتشر شد. بسیاری از پروژه‌های مطالعاتی شبیه‌سازی تغییر اقلیم در گذشته بر اساس مدل‌های CMIP3 انجام شده است (برندز و همکاران، ۲۰۱۳ و کتیوس و همکاران، ۲۰۱۳). مطالعات نشان می‌دهند که افزایش واداشت تابشی ناشی از سناریوی افزایش یک درصدی دی اکسید کربن بر سال، حدود دو برابر آن چیزی است که در دهه‌های اخیر رخ داده است؛ بنابراین فرض یاد شده معقول نیست. لذا هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم در پروژه CMIP3 سناریوهای نسبتاً واقعی در نظر گرفت که در گزارش چهارم به کار برده شد (چتورودی و همکاران، ۲۰۱۲). به دلیل صحت قابل قبول نتایج مطالعات حاصل از CMIP3 و قدیمی شدن سناریوهای انتشار SRES<sup>۴</sup> محققان تصمیم گرفتند که سری جدید داده‌های CMIP5 را با هدف افزایش قدرت تفکیک افقی مدل‌ها و پیچیدگی و دقت محاسبات آن‌ها که منجر به

5- World Climate Research Program  
6- Representative Concentration Pathway

4- Special Report on Emissions Scenarios

**جدول ۱-** طول و عرض منطقه مورد مطالعه شامل گستره ایران و هفت منطقه جغرافیایی کشور

منطقه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
ایران	۶۱-۴۴,۵	۳۹-۲۴
شمال شرق	۶۱-۵۸	۳۸-۳۳
جنوب شرق	۶۱-۵۶	۲۸-۲۴
مرکز	۵۷-۵۳	۳۴-۳۰
جنوب غرب	۵۶-۴۸	۳۲-۲۴
زاگرس	۴۹-۴۶	۳۷-۳۲
شمال غرب	۴۸-۴۴,۵	۳۹-۳۶
خزر	۵۴-۴۸	۳۸-۳۶

CMIP5 رخداد بارش‌های سنگین دوره ۱۹۹۷-۲۰۰۵ را به خوبی شبیه‌سازی می‌کنند. در مطالعه‌ای دیگر، هونگ و همکارانش (۲۰۱۳) امواج استوایی جفت شده همرفتی و MJO<sup>۷</sup> را به وسیله مدل‌های اقلیمی CMIP5 شبیه‌سازی کردند. آنها دریافتند که نتایج حاصل از مدل‌های CMIP5 بهبود کلی در شبیه‌سازی تغییرپذیری درون فصلی حاره‌ای به ویژه در امواج استوایی جفت شده همرفتی و MJO نشان می‌دهند. به دلیل کمبود مطالعات مربوط به پیش‌نگری اقلیمی کشور با بکارگیری مدل‌های سری CMIP5، در این تحقیق پیش‌بینی‌های تاریخی تمامی مدل‌های مشارکت کننده در پروژه فوق با داده‌های باز تحلیل در دوره مشابه مقایسه شده و مدل‌هایی که از نظر نمایه‌های آماری دارای کارایی قابل قبولی باشند، برای پیش‌نگری اقلیم آینده کشور مورد استفاده قرار می‌گیرند. نتایج این تحقیق می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های بلندمدت بخش‌های کشاورزی و منابع آب استفاده شود.

## مواد و روش‌ها

در این تحقیق با دو رویکرد چشم‌انداز رفتار بارش و دمای کشور تا سال ۲۱۰۰ میلادی مورد بررسی قرار گرفته است؛ ابتدا با استفاده از برونداد تمامی مدل‌های CMIP5، تغییرات بارش و دمای کشور در دهه‌های آتی (۲۰۲۱-۲۱۰۰) نسبت به دوره بازتحلیل (۱۹۸۶-۲۰۰۵) برآورد شد که مطابق با روش مورد استفاده در گزارش پنجم ارزیابی تغییر اقلیم (AR5) است. در رویکرد دوم فقط آن دسته از مدل‌هایی که از نظر آماری قابل قبول بودند مورد استفاده قرار گرفتند. برای انتخاب مدل‌های گردش کلی، کمیت‌های آماری نظیر اریبی، انحراف معیار، و میانگین ریشه مربعات خطای نرمال شده محاسبه شد. در بررسی کمیت‌های یاد شده از نمودار تیلور نیز استفاده شد. پس از غربالگری مدل‌ها، چشم‌انداز تغییرات بارش و دمای کشور تا سال ۲۱۰۰ در چهار دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۴۰)، میانه (۲۰۴۱-۲۰۶۰)، دور (۲۰۶۱-۲۰۸۰) و افق ۲۱۰۰ (۲۱۰۰-۲۰۸۱) مورد بررسی قرار گرفت.

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش گستره کشورمان بوده است که به طور تقریبی در محدوده ۲۴ تا ۳۹ درجه شمالی و ۴۴/۵ تا ۶۱ شرقی قرار دارد. برای بررسی چشم‌انداز تغییر اقلیم آتی، گستره کشور به هفت منطقه شمال شرق، جنوب شرق، مرکزی، جنوب غرب، زاگرس، شمال غرب و خزر تقسیم شد و در هر منطقه تغییرات بارش و دما تا سال ۲۱۰۰ مورد بررسی قرار گرفت. جدول ۱ مشخصات منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. داده‌های مورد استفاده شامل دو سری داده‌های بازتحلیل ERA-Interim و مدل‌های گردش کلی سری CMIP5 هستند. داده‌های ERA-Interim از سال ۱۹۷۹ تاکنون در دسترس است ولی به دلیل اینکه پیش‌بینی‌های گذشته نگر مدل‌های CMIP5 تا سال ۲۰۰۵ اجرا شده‌اند، دوره بررسی توانمندی مدل‌های گردش کلی ۱۹۷۹-۲۰۰۵ انتخاب شد. داده‌های CMIP5 از منابع گوناگون قابل دریافت است.

## نتایج و بحث

## چشم‌انداز بارش

کارایی مدل‌های مختلف سری CMIP5 در شبیه‌سازی بارش کشور در دوره پایه ۲۰۰۵-۱۹۸۶ با استفاده از شاخص‌های آماری ذکر شده در بخش مواد و روش‌ها مورد بررسی قرار گرفت. با مشخص شدن ۵ مدل با مهارت قابل قبول (جدول ۲)، پیش‌نگری بارش کشور با لحاظ چهار سناریوی واداشت تابشی RCP2.6، RCP4.5، RCP6 و RCP8.5 انجام گرفت که در ادامه به تحلیل چشم‌انداز بارش هر یک از مناطق می‌پردازیم.

## جدول ۲- مشخصات آماری مدل‌های منتخب پیش‌نگری بارش کشور

نام مدل	کشور	همبستگی	انحراف معیار (نرمال)	NRMSE(%)
BCC-CSM1-1-m	چین	۰,۲۴	۰,۱۲	۱۹,۹
GFDL-CM3	آمریکا	۰,۲	۰,۲	۱۵,۸
GISS-E2-H	آمریکا	۰,۲۲	۰,۱۶	۲۱,۶
GISS-E2-R	آمریکا	۰,۳۹	۰,۱۷	۲۵,۸
MPI-ESM-MR	آلمان	۰,۲۴	۰,۱۷	۱۸,۲

## پهنه کشور

با به کارگیری برون‌داد پنج مدل گردش کلی موجود در جدول ۳ و چهار سناریوی واداشت تابشی، تغییرات بارش کشور در بازه‌های ۲۰ ساله ۲۰۲۱-۲۰۴۰ (دهه ۳۰)، ۲۰۴۱-۲۰۶۰ (دهه ۵۰)، ۲۰۶۱-۲۰۸۰ (دهه ۷۰) و ۲۰۸۱-۲۱۰۰ (دهه ۹۰) نسبت به دوره پایه ۱۹۸۶-۲۰۰۵ محاسبه شد. نتایج حاکی از آن است که در سناریوی RCP2.6 که خوشبینانه‌ترین سناریو با کمترین افزایش دماست، بارش در پهنه کشورمان تغییرات قابل ملاحظه‌ای ندارد اما متمایل به بیش از نرمال است، برخلاف آن بیشترین کاهش بارش در سناریوی RCP8.5 رخ

خواهد داد. چند نکته حائز اهمیت در چشم‌انداز بارش کشور تا افق ۲۱۰۰ میلادی به شرح زیر است:

الف) کاهش بارش در غرب ایران، سوریه، ترکیه و عراق، به خصوص در محدوده دریای مدیترانه، مشهود است.

ب) در کشورهای حاشیه جنوبی خلیج فارس و دریای عمان و همچنین شمال اقیانوس هند، بارش افزایش قابل ملاحظه‌ای داشته و دامنه افزایش بارش در برخی سناریوها و دهه‌ها تا مناطق جنوبی کشور نیز گسترش یافته است. برخی مطالعات نشان می‌دهند که ماهیت افزایش بارش در مناطق جنوبی به شکل رگباری و سیل آسا خواهد بود.

بارش در نواحی غرب، مرکز و شرق کشور کاهش می‌یابد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که بیشترین کاهش بارش کشور در دهه‌های پایانی قرن حاضر (۲۰۸۱-۲۱۰۰) و تحت سناریوی RCP8.5 رخ خواهد داد. در عین حال کاهش بارش در کشورهای همسایه غربی کشورمان یعنی ترکیه، عراق و سوریه و همچنین افغانستان بیش از ایران خواهد بود.

شکل (۱) سری زمانی تغییرات میانگین بارش سالانه کشور تحت چهار سناریوی واداشت تابشی نسبت به دوره پایه ۲۰۰۵-۱۹۸۶ را نشان می‌دهد. مطابق شکل مذکور در صورتی که وضعیت انتشار گازهای گلخانه‌ای مطابق سناریوی RCP2.6 باشد، تغییرات بارش کشور قابل ملاحظه نیست اما در سایر سناریوها به ویژه سناریوی RCP8.5 بارش کشور به طور معنی‌داری کاهش می‌یابد.

RCP8.5 با ۲۹/۳ درصد کاهش است. بارش تابستانی در تمامی سناریوها کاهشی است.

- بارش زمستان در تمامی سناریوها نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد. میانگین افزایش بارش فصل زمستان ۸/۷ درصد است.

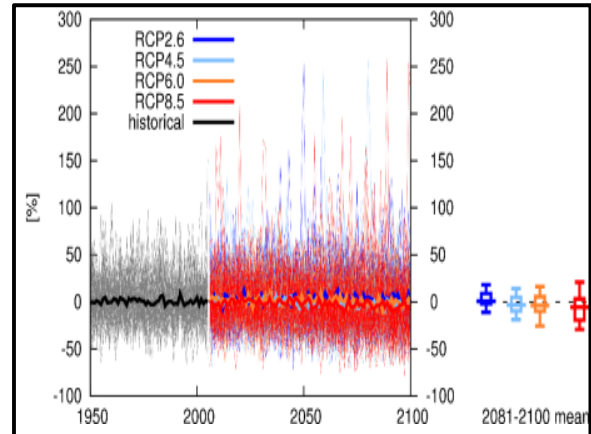
- بارش فصول بهار و پاییز تغییرات معنی‌داری نسبت به دوره پایه نخواهد داشت.

در مجموع بارش سالانه منطقه خزری به مقدار ۷/۵ درصد نسبت به دوره پایه کاهش خواهد یافت. بخش مهمی از آن به کاهش بارش تابستانی مربوط می‌شود. نتایج نشان می‌دهند هر چه گرمایش جهانی بیشتر باشد کاهش بارش سالانه و تابستانی در منطقه خزری بیشتر خواهد بود.

**منطقه جنوب شرق:** در مقایسه با بارش کل کشور و سایر مناطق مورد بررسی، مهم‌ترین رفتار بارش جنوب شرق کشور افزایش تغییرپذیری (نوسانات) بارش خواهد بود؛ به طوری که در برخی سال‌ها، بارش سالانه بیش از ده برابر میانگین دوره آماری می‌شود که نشانه افزایش بی‌اعتمادی به بارش‌های فصلی این منطقه و افزایش وقوع رخدادهای حدی آب‌شناسی و اقلیم‌شناسی است. یکی از پیامدهای چنین رفتاری افزایش وقوع بارش‌های سنگین و سیل آسا خواهد بود.

**منطقه جنوب غرب:** مشخصه‌های مهم بارش در جنوب غرب کشور افزایش بارش فصل بهار، افزایش تغییرپذیری بارش تابستان و افزایش بارش در سناریوی RCP8.5 در مقایسه با دوره پایه است. بارش فصل پاییز نیز روند افزایشی خواهد داشت اما در دو فصل تابستان و زمستان قابل ملاحظه نیست.

**منطقه زاگرس:** نتایج نشان می‌دهند که در منطقه زاگرس هر چه واداشت تابشی (گرمایش جهانی) افزایش یابد، بارش در این منطقه کاهش بیشتری خواهد داشت، به طوری که بیشترین کاهش به مقدار ۱۲/۱ درصد در سناریوی RCP8.5 پیش‌بینی



شکل ۱- تغییرات میانگین سالانه بارش ایران (%) تا سال ۲۱۰۰ نسبت به دوره‌های ۲۰۰۵-۱۹۸۶ تحت سناریوهای واداشت تابشی RCP

با در نظر گرفتن نتایج تمامی سناریوها و مدل‌ها، میان تغییرات درصد بارش کشور ۲/۳-٪ است. ۵۷ درصد مدل‌ها پیش‌بینی کرده‌اند که بارش کشور در انتهای قرن حاضر کمتر از میانگین دوره پایه باشد. در سناریوی RCP8.5، تعداد ۷۰/۶ درصد از مدل‌ها پیش‌بینی کرده‌اند که میانگین بارش دهه پایانی قرن حاضر کمتر از نرمال دوره پایه خواهد بود. در همین سناریو کمتر از ۳۰ درصد مدل‌ها احتمال داده‌اند که بارش بیش از نرمال باشد؛ به بیان دیگر هر چه گرمایش جهانی شدیدتر باشد کاهش بارش در کشور نیز بیشتر خواهد بود.

**منطقه خزری:** تغییرات بارش در سواحل جنوبی دریای خزر به عنوان یکی از مناطق حساس اقلیمی از دیدگاه گردشگری، پوشش جنگلی و کشاورزی در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفت. بارش سالانه در این منطقه در مجموع کاهش می‌یابد، اما در مقیاس فصلی دارای چند مشخصه بارز است:

- بارش در فصل تابستان دارای کاهش معنی‌داری نسبت به دوره پایه ۲۰۰۵-۱۹۸۶ است. میانگین کاهش بارش تابستانی حدود ۱۶ درصد خواهد بود که بیشترین آن تحت سناریوی

### چشم‌انداز دما

کارایی مدل‌های مختلف سری CMIP5 در شبیه‌سازی دمای کشور در دوره پایه ۱۹۸۶-۲۰۰۵ نیز با استفاده از شاخص‌های آماری ذکر شده در بخش مواد و روش‌ها مورد بررسی قرار گرفت و با مشخص شدن ۹ مدل با مهارت قابل قبول (جدول ۳)، پیش‌نگری دمای کشور با لحاظ چهار سناریوی واداشت تابشی انجام شد که در ادامه به تحلیل چشم‌انداز دمای هر یک از مناطق می‌پردازیم.

#### جدول ۳- مشخصات مدل‌های منتخب برای پیش‌نگری دما؛

همبستگی‌های معنی‌دار در سطح ۱٪ با دو ستاره، ۵٪ با یک ستاره و ۱۰٪ بدون ستاره نشان داده شده‌اند.

نام مدل اقلیمی	کشور	همبستگی	انحراف استاندارد	NRMSE(%)
BCC-CSM1-1	چین	۰/۵۵	۰/۶۶	۱۲/۶
BCC-CSM1-1-m	چین	۰/۶۵	۰/۶۶	۱۰/۵
CCSM4	آمریکا	۰/۷۴	۰/۶۶	۶/۴
GFDL-CM3	آمریکا	۰/۵۹	۰/۹۴	۱۱/۹
GISS-E2-H	آمریکا	۰/۷۰	۰/۵۳	۳/۴
HadGEM2-AO	کره جنوبی	۰/۵۲	۰/۶۴	۱۰/۹
HadGEM2-ES	انگلیس	۰/۷۸	۰/۶۱	۱۱/۵
MPI-ESM-LR	آلمان	۰/۵۶	۰/۶۰	۳/۸
MPI-ESM-MR	آلمان	۰/۶۷	۰/۶۶	۴/۲

**پهنه کشور:** بیشترین افزایش دما در پهنه کشورمان در دهه ۲۰۹۰ و به ترتیب به مقدار ۱/۳، ۲/۷، ۳/۲ و ۵/۱ درجه سلسیوس در سناریوهای RCP2.6، RCP4.5، RCP6.0 و RCP8.5 در مقایسه با میانگین دمای دوره پایه (۱۹۸۶-۲۰۰۵) رخ می‌دهد. بررسی روندهای تغییرات سالانه (شکل ۲) و فصلی کشور تا سال ۲۱۰۰ تحت سناریوهای واداشت تابشی مختلف

شده است؛ این در حالی است که کاهش بارش در سناریوی RCP2.6 حدود یک درصد پیش‌بینی شده است. هر چند بارش تابستانی در این منطقه سهم قابل ملاحظه‌ای از بارش کل سال را ندارد، اما این فصل با ۱۴/۵ درصد بیشترین کاهش را دارا می‌باشد. بعد از فصل تابستان دو فصل بهار و زمستان به ترتیب با ۶/۸ و ۳/۱ درصد کاهش مواجه خواهند شد.

**منطقه شمال غرب:** در شمال غرب کشور در مجموع کاهش بارش با افزایش واداشت تابشی بیشتر می‌شود به طوری که در سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 به ترتیب بارش ۰/۸ و ۹/۶ درصد کاهش می‌یابد. همچنین بیشترین کاهش به ترتیب با ۱۴/۵ و ۶/۸ درصد به ترتیب در فصول تابستان و بهار رخ می‌دهد. بارش فصل پاییز تغییر قابل توجهی نسبت به دوره پایه ندارد.

**منطقه شمال شرق:** در منطقه شمال شرق کشور با افزایش واداشت تابشی (افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای) بارش کاهش می‌یابد، به طوری که کمترین و بیشترین کاهش بارش به مقدار ۲/۵ و ۹/۳ درصد در سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 رخ می‌دهد. بیشترین کاهش بارش در این منطقه به ترتیب در فصول تابستان، بهار و پاییز رخ می‌دهد اما بارش زمستانی به مقدار اندکی افزایش می‌یابد.

**منطقه مرکزی:** در مناطق مرکزی تغییرپذیری فصلی بارش نسبتاً زیاد است که بیشترین تغییرپذیری در فصل تابستان رخ می‌دهد. در منطقه مرکزی کشور بیشترین کاهش بارش در فصول بهار و پاییز به ترتیب با ۴/۵ و ۶/۷ درصد کاهش رخ می‌دهد. در سایر فصول تغییرات قابل توجهی مشاهده نمی‌شود. همچنین بیشترین کاهش بارش سال و فصول بهار و تابستان در سناریوی RCP8.5 رخ خواهد داد.

پایانی قرن حاضر، حتی در سناریوی خوش بینانه، بیش از دو درجه (بین ۲ تا ۲/۳ درجه سلسیوس) خواهد بود که از حد تعیین شده در توافق پاریس (۱/۵ درجه) بیشتر است. در سناریوی بدبینانه میانگین دمای کشور حدود ۴/۵ درجه بیش از دوره قبل از انقلاب صنعتی خواهد بود.

**منطقه خزری:** افزایش دمای پیش‌بینی شده برای منطقه خزری بین ۱/۳ در سناریوی RCP2.6 تا ۴/۷ درجه سلسیوس در سناریوی RCP8.5 است.

**منطقه جنوب شرق:** نتایج نشان می‌دهد که تغییرات دمای این منطقه در سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 به ترتیب ۱/۱ تا ۴/۵ درجه سلسیوس است. در بین مناطق مورد مطالعه، جنوب شرق کشور کمترین افزایش دما را تجربه خواهد کرد.

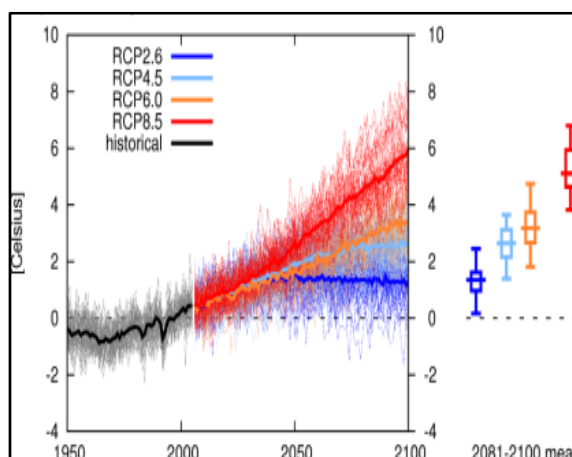
**منطقه جنوب غرب:** مطابق مقادیر کمی پیش‌بینی تغییرات دما، افزایش دمای این منطقه در انتهای قرن حاضر بین ۱/۳ تا ۴/۸ سلسیوس به ترتیب در سناریوی خوشبینانه RCP2.6 و سناریوی بدبینانه (RCP8.5) خواهد بود.

**منطقه زاگرس:** در این منطقه افزایش دما بین ۱/۵ تا ۵/۵ درجه پیش‌بینی شده است. این منطقه بیشترین افزایش دما را در بین مناطق مورد بررسی تجربه خواهد کرد.

**منطقه شمال غرب:** مقدار تغییرات دما در این منطقه بین ۱/۳ تا ۵/۲ درجه سلسیوس خواهد بود.

**منطقه شمال شرق:** تغییرات پیش‌بینی شده میانگین دمای سالانه و فصلی شمال شرق کشور از دهه ۲۰۲۰ تا ۲۱۰۰ نشان می‌دهد که تغییرات سالانه دمای این منطقه تحت دو سناریوی خوش بینانه و بدبینانه به ترتیب ۱/۴ تا ۵/۱ درجه سلسیوس است.

نشان می‌دهد که روند افزایش دمای کشورمان در سناریوی RCP6.0 تا دهه ۲۰۷۰ کمتر از سناریوی RCP4.5 بوده ولی بعد از دهه مذکور سرعت افزایش دمای سناریوی RCP6.0 بیشتر از RCP4.5 می‌شود. همچنین در سناریوی RCP2.6 سرعت افزایش دما از حدود دهه ۲۰۳۰ صفر شده و تا انتهای قرن حاضر مقدار آن ثابت خواهد ماند.



شکل ۲- تغییرات میانگین سالانه دمای ایران (oC) تا سال ۲۱۰۰ نسبت به دوره ۱۹۸۶-۲۰۰۵ تحت سناریوهای واداشت تابشی RCP

برای برنامه‌ریزی و اخذ تصمیم‌های متناسب با شرایط تغییر اقلیم آینده، آگاهی از سطح عدم قطعیت مدل‌سازی اقلیمی ضروری است. در این ارتباط پیش‌بینی‌های واقع در بین ۲۵٪ حد پایین (چارک اول) و ۷۵٪ حد بالا (چارک سوم) نشان دهنده قراگرفتن ۵۰ درصد پیش‌بینی‌ها در بازه یادشده است که به عنوان بازه میان چارکی پیش‌بینی‌ها شناخته می‌شود. بررسی پیش‌بینی‌های واقع در بین دو چارک اول و سوم دما در سطح کشور در دهه پایانی قرن بیست و یکم (۲۰۸۱-۲۱۰۰) و تغییرات آن نسبت به دوره پایه (۱۹۸۶-۲۰۰۵) نشان می‌دهد که در سناریوی خوشبینانه میانگین دمای کشور در دهه ۲۱۰۰ حدود ۱/۳ درجه سلسیوس نسبت به دوره پایه ۱۹۸۶-۲۰۰۵ افزایش می‌یابد که با لحاظ میزان افزایش دمای دوره پایه نسبت به قبل از انقلاب صنعتی، میانگین افزایش دمای کشور در دهه

دوره پایه خواهد بود. در همین سناریو کمتر از ۳۰ درصد مدل‌ها احتمال داده‌اند که بارش بیش از نرمال باشد؛ به عبارت دیگر هر چه گرمایش جهانی شدیدتر باشد کاهش بارش در کشور نیز بیشتر خواهد بود. در منطقه خزری بارش در فصل تابستان دارای کاهش معنی‌داری نسبت به دوره پایه ۲۰۰۵-۱۹۸۶ خواهد بود. میانگین کاهش بارش تابستانی حدود ۱۶ درصد خواهد بود که بیشترین آن تحت سناریوی RCP8.5 با ۲۹/۳ درصد کاهش است. یکی از دلایل کاهش بارش تابستانی در منطقه خزری تضعیف سامانه پرفشاری است که در فصل تابستان جریان‌های خروجی از آن با جهت وزش شمالی تا شمال شرقی روی این دریا موجب تزریق رطوبت دریای خزر به دامنه‌های شمالی البرز و بارش می‌شود. این یافته با نتایج صبوری (۱۳۹۳) مبنی بر کاهش بارش در منطقه خزر تحت سناریوهای SRES و مدل‌های گردش کلی CMIP3 مطابقت دارد.

مهم‌ترین رفتار بارش جنوب شرق کشور افزایش تغییرپذیری (نوسانات) بارش خواهد بود؛ به طوری که در برخی سال‌ها، بارش سالانه چندین برابر میانگین دوره آماری می‌شود که نشانه افزایش بی‌اعتمادی به بارش‌های فصلی این منطقه و افزایش وقوع رخدادهای حدی آب‌شناسی و اقلیم‌شناسی است. یکی از پیامدهای چنین رفتاری افزایش وقوع بارش‌های سنگین و سیل‌آسا خواهد بود.

با بررسی شرایط دمایی کشور، کمترین افزایش دما در مناطق ساحلی دریای خزر و خلیج فارس و دریای عمان رخ خواهد داد. همچنین بیشترین افزایش در مناطق مرکزی و استان‌های مجاور رشته کوه زاگرس رخ می‌دهد. در منطقه خزری افزایش دما به دلیل نزدیکی به دریا کمتر است. همچنین منطقه جنوب شرق کشور به دلیل نزدیکی به پهنه‌های آبی اقیانوسی دارای کمترین افزایش دما در مقایسه با سایر مناطق کشور خواهد بود. جنوب غرب کشور منطقه‌ای است که دارای افزایش دمای بیشتری نسبت به سایر مناطق خواهد بود.

**منطقه مرکزی:** بررسی تغییرات سالانه دما در این منطقه تحت دو سناریوی خوش بینانه و بدبینانه بین ۱/۴ تا ۵/۳ درجه سلسیوس پیش‌بینی شده است.

نتایج فوق نشان می‌دهند که در پهنه کشورمان کاهش بارش در غرب ایران، سوریه، ترکیه و عراق، به خصوص در محدوده دریای مدیترانه، مشهود است. کاهش بارش در ترکیه می‌تواند موجب کاهش جریان آب در این کشور و تغذیه ناکافی رودخانه‌های دجله و فرات و جلگه‌های تحت پوشش آنها در بین‌النهرین می‌شود. از آنجا که مناطق یادشده یکی از منابع عمده خیزش گرد و غبار است، چنین شرایطی موجب افزایش رخداد پدیده یاد شده در ایران و مناطق مرکزی و غرب آسیا خواهد شد. کشورهای حاشیه جنوبی خلیج فارس و دریای عمان و همچنین شمال اقیانوس هند، افزایش بارش قابل ملاحظه‌ای را تجربه خواهند کرد و دامنه افزایش بارش در برخی سناریوها و دهه‌ها تا مناطق جنوبی کشور نیز گسترش خواهد یافت. برخی مطالعات نشان می‌دهند که ماهیت افزایش بارش در مناطق جنوبی به شکل رگباری و سیل‌آسا خواهد بود. بارش در نواحی غرب، مرکز و شرق کشور کاهش می‌یابد. بیشترین کاهش بارش کشور در دهه‌های پایانی قرن حاضر (۲۱۰۰-۲۰۸۱) و تحت سناریوی RCP8.5 رخ خواهد داد و البته کشورهای همسایه غربی کشورمان یعنی ترکیه، عراق و سوریه با کاهش بارش بیشتری در مقایسه با ایران مواجه خواهند شد. تغییرات بارش کشور در سناریوهای خوش بینانه و میانه قابل ملاحظه نیست اما در سایر سناریوها به ویژه سناریوی RCP8.5 به طور معنی‌داری کاهش می‌یابد. با لحاظ نتایج تمامی سناریوها، میانه تغییرات درصد بارش کشور ۲/۳-٪ خواهد بود و ۵۷ درصد مدل‌ها پیش‌بینی کرده‌اند که بارش کشور در انتهای قرن حاضر کمتر از میانگین دوره پایه باشد. در سناریوی RCP8.5، تعداد ۷۰/۶ درصد از مدل‌ها پیش‌بینی کرده‌اند که میانگین بارش دهه پایانی قرن حاضر کمتر از نرمال



## جمع‌بندی

چشم‌انداز بارش و دما در کشور و شش منطقه اقلیمی با به کارگیری برون‌داد مدل‌های گردش کلی منتخب از سری مدل‌های CMIP5 و چهار سناریوی واداشت تابشی RCP2.6، RCP4.5، RCP6 و RCP8.5، در بازه‌های ۲۰ ساله ۲۰۴۰-۲۰۲۱ (دهه ۳۰)، ۲۰۴۱-۲۰۶۰ (دهه ۵۰)، ۲۰۶۱-۲۰۸۰ (دهه ۷۰) و ۲۰۸۱-۲۱۰۰ (دهه ۹۰) نسبت به دوره پایه ۱۹۸۶-۲۰۰۵ محاسبه شد. با لحاظ تمامی سناریوها، بین ۵۷ تا ۷۱ درصد مدل‌ها کاهش بارش ایران را در قرن ۲۱ تأیید می‌کنند اما دامنه کاهش بارش در هر یک از سناریوها متفاوت است، به طوری که در سناریوی RCP2.6 کمترین و در سناریوی RCP8.5 بیشترین کاهش بارش را در کشور خواهیم داشت. از دیدگاه منطقه‌ای بیشترین کاهش بارش در منطقه زاگرس روی خواهد داد. تنها منطقه‌ای از کشور که در قرن ۲۱ با افزایش بارش مواجه خواهد شد، جنوب شرق کشور است؛ هر چند که هر گونه افزایش بارش این منطقه با افزایش نسبی دما بی‌اثر می‌شود، ضمن اینکه رفتار بارش این منطقه در آینده به شکل بارش‌های ناگهانی و سیل آسا خواهد بود.

کمترین افزایش دما در استان‌های حاشیه پهنه‌های آبی جنوب شرق و شمال کشور رخ می‌دهد. زاگرس منطقه‌ای است که بیشترین افزایش دما را در بین مناطق کشور در دهه‌های آینده تجربه می‌کند. این منطقه همچنین بیشترین کاهش بارش را تجربه خواهد کرد. چنین شرایطی موجب کاهش بارش‌ها به شکل برف و کاهش منابع آبی حاصل از ذوب برف در استان‌های زاگرس خواهد شد. بعد از زاگرس، شمال غرب رتبه دوم بیشترین افزایش دما را در کشور دارا خواهد بود. با توجه به پیش‌بینی کاهش بارش در منطقه غرب کشور، چنین شرایطی می‌تواند کاهش سطح دریاچه ارومیه را تشدید کند، مگر اینکه برنامه‌ریزی‌های جامعی در مدیریت آب در این حوضه آبریز انجام شده باشد.

## سیاسگزاری

این مقاله برگرفته از پروژه داخلی "پیش‌نگری تغییر اقلیم کشور در دهه‌های آینده" است که در پژوهشکده اقلیم‌شناسی و با حمایت سازمان هواشناسی کشور انجام شده است. بدین وسیله از مدیریت محترم و همکاران در این دو نهاد سپاسگزاری می‌شود.

## منابع

- ۱- صبوری، غ.، ۱۳۹۳، مطالعه تغییرات پهنه‌های اقلیمی ایران در دوره ۲۰۹۹-۲۰۱۰ تحت پدیده گرمایش جهانی با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی مدل‌های گردش عمومی، پایان‌نامه، دانشگاه فردوسی مشهد.
- ۲- وبلاگ گفت و گویای اقلیمی:

<http://climate.mihanblog.com/post/7>

- 3- Baker, N. & H. Huang, 2013, A Comparative Study of Precipitation and Evaporation between CMIP3 and CMIP5 Climate Model Ensembles in Semiarid Regions, *Journal of Climate*, Vol. 27, pp. 3731-3749.
- 4- Blázquez, J. & M. N. Nuñez, 2013, Analysis of Uncertainties in Future Climate Projections for South America: Comparison of WCRP-CMIP3 and WCRP-CMIP5 Models, *Climate Dynamics*, Vol. 41, pp. 1039-1056.
- 5- Brands, S., S. Herrera, J. Fernández & J. M. Gutiérrez, 2013, How Well Do CMIP5 Earth System Models Simulate Present Climate Conditions in Europe and Africa, *Climate Dynamics*, Vol. 41, pp. 803-817.
- 6- Cattiaux, J., H. Douville & Y. Peings, 2013, European Temperatures in CMIP5: Origins of Present-Day Biases and Future Uncertainties, *Climate Dynamics*, Vol. 41, pp. 2889-2907.
- 7- Delworth, T. L., A. J. Broccoli, A. Rosati, R. J. Stouffer, V. Balaji & J. A. Beesley, 2006, GFDL's CM2 Global Coupled Climate Models, Part 1: Formulation and Simulation Characteristics, *Journal of Climate*, 19, pp. 643-674.

- 14- Kug, J. S., Y. G. Ham, J. Y. Lee & F. F. Jin, 2012, Improved Simulation of Two Types of El Niño in CMIP5 Models, *Environmental Research Letters*, Vol. 7.
- 15- Meinshausen, M., S. J. Smith, K. Calvin, J. S. Daniel, M. L. T. Kainuma, J. F. Lamarque et al., 2011, The RCP Greenhouse Gas Concentrations and Their Extensions from 1765 to 2300, *Climatic Change*, Vol. 109, pp. 213-241.
- 16- Meehl, G. A., L. Goddard, J., Murphy, R. J. Stouffer, G. Boer, G. Danabasoglu et al., 2009, Decadal Prediction: Can It Be Skillful, *Bulletin of the American Meteorological Society*, Vol. 90, pp. 1467-1485.
- 17- Scoccimarro, E. & S. Gualdi, 2016, Heavy Precipitation Events in a Warmer Climate: Results from CMIP5 Models, *Journal of Climate*, Vol. 26, pp. 7902-7911.
- 8- Chaturvedi, R. K., J. Joshi, M. Jayaraman, G. Bala & N. H. Ravindranath, 2012, Multi-Model Climate Change Projections for India under Representative Concentration Pathways, *Current Science*, Vol. 103, pp. 791-802.
- 9- [ftp://gdo-dcp.ucllnl.org/pub/dcp/archive/cmip5/global\\_mon/BCS](ftp://gdo-dcp.ucllnl.org/pub/dcp/archive/cmip5/global_mon/BCS)
- 10- Frame D. J. & D. A. Stone, 2013, Assessment of the first consensus prediction on climate change, *Nature Clim. Change*, Vol. 3, pp. 357-9.
- 11- HUNG, M., J. L. LIN, W. Wang, D. Kim, T. Shinoda & S. Weaver, 2013, MJO and Convectively Coupled Equatorial Waves Simulated by CMIP5 Climate Models, *Journal of Climate*, Vol. 26, pp. 6185-6214.
- 12- Jena, P., S. Azad & M. Rajeevan, 2015, CMIP5 Projected Changes in the Annual Cycle of Indian Monsoon Rainfall, *Journal of Climate*, Vol. 4.
- 13- Knutti R. & J. Sedlacek, 2013, Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections, *Nature Clim. Change*, Vol. 3, pp. 369-73.