










Multi-annual prediction of precipitation and temperature over Iran and neighboring countries during 2022-2026 using DCPD models

Babaeian, I.¹  | Javanshiri, Z.¹  | Modirian, R.¹  | Khazanedari, L.¹  | Falamarzi, Y.¹  | Malbusi, Sh.¹  | Karimian, M.¹  | Pakdaman, M.¹  | Kouhi, M.¹ 

1. Atmospheric Science and Meteorological Research Center, Climate Research Institute, Mashhad, Iran.

Corresponding Author E-mail: ibabaeian@yahoo.com

(Received: 14 March 2023, Revised: 15 April 2023, Accepted: 26 Sep 2023, Published online: 5 May 2024)

Summary

The maximum range of long-term operational predictions was limited to one year until 2018, while with the implementation of the Decadal Climate Prediction Project (DCPP), their range was increased to a decade. These predictions are made by initializing global climate models using observational data. The current study aims to predict the precipitation and air temperature of Iran and neighboring countries for the next 5 years (2022 to 2026) in three time scales of seasonal, annual and five-year, using the output of DCPD models initialized in November 2021. For this purpose, the precipitation and temperature coarse data of the MPI-ESM1.2-LR (Max Plank Institute in Germany), MIROC6 (Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology) and CNRM-ESM2-1 (Centre National de Recherches Meteorologiques, France) models were used. The horizontal resolution of the MPI-ESM1.2-LR, MIROC6 and CNRM-ESM2-1 models are 200×200, 250×250 and 250×250 km, respectively. The correction of the output of the climate models was done based on the standard methodology proposed by the WCRP (World Climate Research Program) working group of World Meteorological Organization (WMO). To correct the raw output of precipitation and temperature of the DCPD models, the GPCC and ERA5 datasets were used for precipitation and temperature, respectively.

The results showed that Iran's precipitation is unlikely to be more than normal in any of the next five years. The highest decrease in precipitation will likely occur in 2022 and 2025, and the precipitation of the 2023 will most likely be normal. The high predictability of ENSO and the expectation of El Niño occurrence in 2023 confirm that the precipitation of Iran and neighboring countries is within the normal range for 2023. It is more likely that, in none of the next 5 years, the average temperature of the Iran will be below normal, and the temperature anomaly is at least in the range of 0.3-0.5 degree Celsius, and the largest increase is expected in the western half of Iran and the northeast region under study. The minimum and maximum temperature increase will most likely occur in 2022 and 2026 over Iran. In the studied period, the precipitation of West Asia, especially the areas adjacent to the Arabian Sea and the Red Sea, is most likely more than normal and other countries are estimated to be within the normal range. Also, the average air temperature of the next five years in West Asia will be between 0.3 and 1.2 degree of Celsius above normal, with the largest increase of 1 to 1.2 degrees occurring in eastern Turkmenistan, Tajikistan and Kyrgyzstan. It is expected that the air temperature anomaly in the Arabian Peninsula will be in the range of 0.3 to 0.5 degrees, which will be about 0.5 degrees lower than other countries in the region.

Keywords: Bias correction, DCPD, Iran, Asia, Precipitation, Temperature.

Cite this article: Babaeian, I., Javanshiri, Z., Modirian, R., Khazanedari, L., Falamarzi, Y., Malbusi, Sh., Karimian, M., Pakdaman, M., & Kouhi, M. (2024). Multi-annual prediction of precipitation and temperature over Iran and neighboring countries during 2022-2026 using DCPD models. *Journal of the Earth and Space Physics*, 50(1), 199-215. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.356693.1007510>

E-mail: (1) javanshirizohreh@gmail.com | r_modiryan@yahoo.com | l.khazanedari@yahoo.com | yashar.fa@gmail.com | malbusi_434@yahoo.com | mkarimian59@yahoo.com | pakdaman.m@gmail.com | man_koohi@yahoo.com



پیش‌بینی چندسالانه بارش و دمای ایران و کشورهای همسایه در دوره

۲۰۲۲-۲۰۲۶ با استفاده از مدل‌های پیش‌بینی دهه‌ای DCP

ایمان بابائیان^۱ | زهره جوانشیری^۱ | راهله مدیریان^۱ | لیلی خزانه‌داری^۱ | یاشار فلامرزی^۱ | شراره ملیوسی^۱ |
مریم کریمیان^۱ | مرتضی پاکدامن^۱ | منصوره کوهی^۱

۱. پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، پژوهشکده اقلیم‌شناسی، مشهد، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: ibabaeian@yahoo.com

(دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲۳، بازنگری: ۱۴۰۲/۱/۲۶، پذیرش نهایی: ۱۴۰۲/۷/۴، انتشار آنلاین: ۱۴۰۳/۲/۱۶)

چکیده

در مطالعه حاضر پیش‌بینی سالانه بارش و دمای هوای ایران و کشورهای غرب آسیا در بازه زمانی سال‌های ۲۰۲۲ تا ۲۰۲۶ با استفاده از تصحیح برونداد سه مدل پیش‌بینی دهه‌ای شامل MIROC6، MPI-ESM1.2-LR و CNRM-ESM2-1 انجام شده است. تصحیح اریبی بر مبنای شیوه‌نامه استاندارد کارگروه WCRP سازمان جهانی هواشناسی انجام شد. نتایج نشان داد که میانگین بارش ایران در پنج سال آینده (۲۰۲۲-۲۰۲۶) بیش از نرمال خواهد بود و محتمل‌ترین سال‌های بارش کمتر از نرمال سال‌های ۲۰۲۲ و ۲۰۲۵ و نرمال سال ۲۰۲۳ است. با توجه به پیش‌بینی‌پذیری بالای انسو و تأثیر آن بر افزایش بارش ایران، وقوع النینو در سال ۲۰۲۳ می‌تواند تأییدی بر پیش‌بینی بارش نرمال در سال ۲۰۲۳ باشد. انتظار می‌رود در ۵ سال آینده میانگین دمای کشور بیشتر از نرمال باشد و حداقل بی‌هنگاری مورد انتظار دما در محدوده ۰-۰/۵ درجه سلسیوس پیش‌بینی می‌شود. بیشترین افزایش دما در سال‌های ۲۰۲۲ و ۲۰۲۶ در نیمه غربی و شمال شرق کشور رخ می‌دهد. در مدت یادشده بارش غرب آسیا به ویژه مناطق همجوار با پهنه‌های آبی دریای عرب و دریای سرخ بیشتر از نرمال و سایر کشورها در محدوده نرمال برآورد می‌شود. میانگین دمای هوا در غرب آسیا بین ۰/۳ تا ۱/۲ درجه سلسیوس بیشتر از نرمال برآورد شد.

واژه‌های کلیدی: DCP، تصحیح اریبی، ایران، بارش، دما.

۱. مقدمه

در سال ۲۰۱۸ اولین پیش‌بینی اقلیمی دهه‌ای یا چندسالانه با هماهنگی برنامه جهانی خدمات اقلیمی سازمان جهانی هواشناسی به‌طور عملیاتی توسط چند مرکز بین‌المللی پیش‌بینی اقلیمی منتشر شد. تا قبل از آن خلأ به نسبت بزرگی بین پیش‌بینی‌های بلندمدت (با برد زمانی حداکثر یک سال) و پیش‌نگری‌های اقلیمی (با برد زمانی بیش از یک دهه) وجود داشت. برای غلبه به چالش یادشده و پر کردن خلأ موجود در پیش‌بینی‌های اقلیمی با برد یک تا ۱۰ سال آینده، ایده پیش‌بینی دهه‌ای (Decadal Climate Prediction Project یا A2D) یا (Annual to Decadal) در سال ۲۰۱۸ پیشنهاد شد. ارائه مدل‌های اقلیمی را در پیش‌بینی نوسانات اقلیمی در بازه یک سال تا یک دهه آینده را با مطالعه رفتار پیش‌بینی‌های گذشته‌نگر بررسی و نحوه تأثیرگذاری اغتشاشات جوی و اقیانوسی را بر پیش‌بینی‌های چندسالانه ارزیابی می‌کند. یکی از مزایای پیش‌بینی‌های دهه‌ای استفاده از داده‌های شرایط اولیه واقعی برای آغازگری (Initialization) مدل‌های پیش‌بینی اقلیمی است، در حالی که در پیش‌نگری‌های (Projection) دهه‌ای از داده‌های شرایط اولیه مربوط به زمان واقعی اجرای مدل استفاده

در سال ۲۰۱۸ اولین پیش‌بینی اقلیمی دهه‌ای یا چندسالانه با هماهنگی برنامه جهانی خدمات اقلیمی سازمان جهانی هواشناسی به‌طور عملیاتی توسط چند مرکز بین‌المللی پیش‌بینی اقلیمی منتشر شد. تا قبل از آن خلأ به نسبت بزرگی بین پیش‌بینی‌های بلندمدت (با برد زمانی حداکثر یک سال) و پیش‌نگری‌های اقلیمی (با برد زمانی بیش از یک دهه) وجود داشت. برای غلبه به چالش یادشده و پر کردن خلأ موجود در پیش‌بینی‌های اقلیمی با برد یک تا ۱۰ سال آینده، ایده پیش‌بینی دهه‌ای (Decadal Climate Prediction Project یا A2D) یا (Annual to Decadal) در سال ۲۰۱۸ پیشنهاد شد.

استناد: بابائیان، ایمان؛ جوانشیری، زهره؛ مدیریان، راهله؛ خزانه‌داری، لیلی؛ فلامرزی، یاشار؛ ملیوسی، شراره؛ کریمیان، مریم؛ پاکدامن، مرتضی و کوهی، منصوره (۱۴۰۳). پیش‌بینی چندسالانه بارش و دمای ایران و کشورهای همسایه در دوره ۲۰۲۲-۲۰۲۶ با استفاده از مدل‌های پیش‌بینی دهه‌ای DCP. مجله فیزیک زمین و فضا، ۵۰(۱)، ۱۹۹-۲۱۵. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.356693.1007510>

رایانامه: (۱) yashar.fa@gmail.com | l.khazanedari@yahoo.com | r_modiriyan@yahoo.com | javanshirizohreh@gmail.com | man_koochi@yahoo.com | pakdaman.m@gmail.com | mkarimian59@yahoo.com | malbousi_434@yahoo.com



ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.356693.1007510>

نمی‌شود (مانند سناریوهای هیات بین‌الدول تغییر اقلیم). مشخصه‌های آماری جو توسط شرایط مرزی آن مشخص می‌شود. گردش جو و چرخه آب‌شناختی بر اساس شرایط مرزی مانند دمای سطح دریا، پوشش یخ خشکی و پوشش یخ دریا به تعادل می‌رسند. سایر مقادیر شرایط مرزی (به‌ویژه رطوبت خشکی و سطح زمین، پوشش گیاهی، پوشش برف و یخ) از طریق جفت‌شدن مدل‌های جوی و خشکی تعیین می‌شوند. اگر شرایط مرزی جو در زمان مشخصی پیش‌بینی شود، در آن صورت می‌توان اطلاعاتی در خصوص مشخصه‌های آماری جو در زمان موردنظر به‌دست آورد. شرایط جو در بلندمدت با دقت زیاد و در مقیاس روزانه عموماً قابل پیش‌بینی نیست، زیرا شرایط مرزی دائم در حال تغییر هستند؛ اما امکان پیش‌بینی میانگین ماهانه و فصلی بارش و دما برای آینده وجود دارد. به‌دلیل این که تغییرات دمای سطح اقیانوس‌ها به آرامی صورت می‌گیرد، لذا پیش‌بینی شرایط مرزی در مناطق حاره‌ای به نسبت راحت‌تر است زیرا تغییرات آن متأثر از دمای سطح اقیانوس‌ها است. اما به‌دلیل تغییرپذیری زیاد شرایط جوی، پیش‌بینی شرایط مرزی در عرض‌های میانه، به‌ویژه در زمستان، به مراتب دشوارتر است.

آغازگری نقش تعیین‌کننده‌ای در پیش‌بینی‌های اقلیمی دارد؛ بدون آغازگری امکان پیش‌بینی اقلیم در زمان مشخص وجود ندارد، اما امکان برآورد میانگین و تغییرپذیری اقلیم در زمان موردنظر در آینده وجود دارد. پیش‌بینی‌های دینامیکی زیرفصلی تا فصلی از جمله پیش‌بینی‌های با آغازگری بوده و پیش‌بینی‌های (پیش‌نگری) مبتنی بر سناریوهای اقتصادی اجتماعی (SSP) از جمله پیش‌بینی‌های بدون آغازگری هستند. اولین تلاش‌ها برای پیش‌بینی اقلیمی توسط شوکلا (۱۹۸۱) انجام شد. هدف او برآورد حد بالای پیش‌بینی‌پذیری میانگین ماهانه متغیرهای اقلیمی و انجام آزمایش‌هایی برای پیش‌بینی ۶۰ روزه با استفاده از شرایط اولیه مختلف ولی با شرایط مرزی یکسان (شامل دمای سطح دریا، پوشش برف، پوشش یخ دریا و رطوبت خاک) بود. نتایج نشان داد که امواج بلند به‌طور قابل‌قبولی بین یک ماه تا ۴۵ روز

آینده قابل پیش‌بینی هستند و پیش‌بینی‌پذیری اقلیم در نیمکره شمالی بیشتر از نیمکره جنوبی است و با بهبود تفکیک مدل و پارامتری‌سازی فیزیکی، امکان پیش‌بینی تا بیش از یک ماه نیز وجود خواهد داشت. لیونگ و نورت (۱۹۹۰) پیش‌بینی‌پذیری اقلیم را با تکیه بر شرایط اولیه و مقادیر نسبت سیگنال به نوفه را مطالعه کردند. آنها نشان دادند هنگامی که نسبت سیگنال به نوفه صفر باشد، پیش‌بینی اقلیمی همان میانگین اقلیمی بلندمدت خواهد بود و سهم بخش قابل پیش‌بینی تابعی از مکان بوده و قابلیت پیش‌بینی این قسمت قابل‌ارتقاء است (لیونگ و نورت، ۱۹۹۰). میهل و همکاران (۲۰۱۴) نشان دادند که ارزیابی پیش‌بینی دهه‌ای به‌صورت تابعی از زمان افزایش می‌یابد و دارای منشأهای مختلفی نظیر سوگیری کلی مدل‌ها به تغییر از شرایط اولیه مشاهداتی به شرایط ترجیحی ناشی از دینامیک مدل (شوگ آغازگری)، ناتوانی ذاتی مدل‌ها در شبیه‌سازی نوسانات طبیعی در مقیاس سالانه تا دهه‌ای، عدم قطعیت در برآورد واداشت تابشی (مانند فعالیت‌های آتشفشانی و هواویزها) و داده‌های مشاهداتی ناکافی و نادرست است. یافته‌های آنها نشان داد که توانایی پیش‌بینی دمای دو متری با لحاظ آغازگری به مراتب بیشتر از بارش است (میل و همکاران، ۲۰۱۴). دابلاس ریز و همکاران (۲۰۱۳) پیش‌بینی اقلیمی آغازگری شده برای پیش‌بینی تغییر اقلیم در آینده نزدیک (یک دهه آینده) را با استفاده از مدل‌های سری CMIP5 مطالعه کردند. آنها دریافتند که مدل‌ها در پیش‌نگری دما، توانمندی به نسبت زیادی در مقایسه با بارش دارند (دابلاس ریز و همکاران، ۲۰۱۳)، هرمانسون و همکاران، (۲۰۲۲). در تحقیقی نایت و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از یک سیستم پیش‌بینی بهبودیافته دهه‌ای، با مطالعه پیش‌بینی آب‌وهوا در مقیاس دهه‌ای نسخه جدیدی از سیستم پیش‌بینی دهه‌ای مرکز هادلی را معرفی کردند که در مقایسه با سایر مدل‌ها، جدیدتر و دارای صحت بیشتری بود. بررسی‌های انجام‌شده بر روی این مدل نشان داد که مهارت پیش‌بینی مدل به‌دلیل تفاوت در مدل‌های اقلیمی در زیرساخت مدل، بهبود یافته است که سبب افزایش بهبود پیش‌بینی در

۲۰۲۳-۲۰۱۹ در محدوده نرمال تا کمتر از نرمال خواهد بود، به این صورت که بر اساس دو روش تصحیح اریبی و وزنی، بارش در نیمه غربی و جنوب کشور بیشتر از نرمال و در شرق کشور نرمال تا کمتر از نرمال مورد انتظار است. از دیدگاه پیش‌بینی احتمالاتی نیز بارش طی سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ در طبقه بیشتر از نرمال و طی سال‌های ۲۰۲۱، ۲۰۲۲ و ۲۰۲۳ عمدتاً در طبقه کمتر از نرمال تا نرمال و به روش دورپیوندی در محدوده کمتر از نرمال پیش‌بینی می‌شود. بر اساس مطالعه زرین و همکاران (۱۴۰۱) با استفاده از مدل‌های پروژه DCPD، بی‌هنجاری دمای ایران در دهه آینده در تمامی ماه‌های سال حداقل $+0/9$ بوده و بیشترین افزایش برای ماه‌های مارس، آوریل، ژوئن و ژوئیه برآورد شده است.

پژوهش حاضر بخشی از پروژه «پیش‌بینی اقلیم کشور در بازه ۱ الی ۵ سال آینده (۲۰۲۲-۲۰۲۶)» است که در پژوهشکده اقلیم‌شناسی با هدف پیش‌بینی بارش و دمای هوای ایران و کشورهای منطقه به کمک برون‌داد مدل‌های مجموعه DCPD که با استفاده از داده‌های واقعی نوامبر ۲۰۲۱ برای پیش‌بینی سالانه تا دهه‌ای آغازگری شده‌اند، انجام پذیرفته است. پروژه DCPD به‌روزترین پروژه سازمان جهانی هواشناسی است که اولین پیش‌بینی آن در سال ۲۰۱۸ ارائه شد. بخش دوم این مقاله به روش پژوهش شامل معرفی مختصر پروژه DCPD و شیوه‌نامه استاندارد سازمان جهانی هواشناسی برای تصحیح اریبی مدل‌های پیش‌بینی دهه‌ای می‌پردازد. بخش سوم مقاله به یافته‌های پژوهش و بخش چهارم به جمع‌بندی اختصاص دارد.

۲. روش پژوهش

۲-۱. معرفی پروژه پیش‌بینی دهه‌ای (DCPD)

پیش‌بینی‌های دهه‌ای مقیاس زمانی از یک سال تا یک دهه را پوشش می‌دهند. اگرچه سطح اعتماد این پیش‌بینی‌ها نسبتاً قابل قبول است، به‌ویژه هنگامی که مدل‌های جفت‌شده اقلیمی با داده‌های شرایط اولیه واقعی آغازگری شوند، اما همواره با چالش‌های زیادی مواجه هستند. مهم‌ترین این چالش‌ها شناخت و مدل‌سازی مکانیسم

مناطق حاره‌ای اقیانوس آرام شد، در حالی که در عرض‌های بالا بهبود کمتری به‌دست آمد (نایت و همکاران، ۲۰۱۴). اسمیت و همکاران (۲۰۱۹)، مهارت پیش‌بینی دهه‌ای را با استفاده از مجموعه بزرگی از پیش‌بینی‌های همادی ارزیابی کردند و مهارت قابل توجهی در پیش‌بینی بارش و دمای سطحی به‌دست آوردند. نتایج آنها نشان داد که اقلیم دهه‌ای قابل پیش‌بینی‌تر از آن است که قبلاً تصور می‌شد. این امر می‌تواند به آمادگی و سازگاری جامعه با نوسانات اقلیمی کمک کند (اسمیت و همکاران، ۲۰۱۹). اخیراً تکنیک‌های هوش مصنوعی به‌صورت گسترده در پیش‌بینی هوا و اقلیم و پیش‌بینی دهه‌ای مورد استفاده قرار گرفته است (دویت و همکاران، ۲۰۲۱). رابیتی و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهشی از روش‌های آماری شامل اعتبارسنجی متقابل خودرگرسیون (cross-validation of autoregressive model) و نیز شبکه عصبی برای پیش‌بینی دهه‌ای هیدرواقلمی در منطقه‌ای از شمال ایتالیا استفاده کردند. طبق پیش‌بینی آنها برای ۲۵ سال آینده، یک دوره خشک شدید در این منطقه در اواخر دهه ۲۰۲۰ و اوایل دهه ۲۰۳۰ اتفاق خواهد افتاد. پیش‌بینی آنها علاوه بر این که اطلاعات بسیار ارزشمندی را برای مدیریت منابع آبی فراهم آورد، برای پیش‌بینی‌های هیدرولوژیکی کوتاه‌مدت آتی نیز ابزارهای لازم را فراهم کرد (روبینتی و همکاران، ۲۰۲۰). بابائیان و همکاران (۱۳۹۸، ۱۳۹۹، ۱۴۰۰ و ۱۴۰۱) مراحل انجام کار و یافته‌های پیش‌بینی چندسالانه بارش را با استفاده از مقیاس‌کاهی آماری برون‌داد مدل‌های پیش‌بینی چندسالانه (دهه‌ای) (DCPD) از مجموعه مدل‌های پروژه CMIP6 که با داده‌های واقعی اول نوامبر سال ۲۰۱۹ آغازگری شده‌اند، را بر روی ایران مطالعه کردند. آنها از دو نوع داده برون‌داد مدل‌های پروژه DCPD در دو دوره تاریخی (۱۹۸۹-۲۰۱۸) و پیش‌بینی (۲۰۱۹-۲۰۲۳) و بارش شبکه‌ای GPCC در دوره ۱۹۸۹-۲۰۱۸ به‌عنوان داده‌های بازکاوی استفاده و دوره هدف پیش‌بینی ۲۰۱۹-۲۰۲۳ را در نظر گرفتند. نتایج آنها نشان داد که در مجموع میانگین بارش طی دوره

برای ارزیابی و شناخت مهارت پیش‌بینی دهه‌های تاریخی، به‌عنوان پایه‌ای برای بهبود در همه جنبه‌های پیش‌بینی دهه‌ای و مبنایی برای پیش‌بینی‌های در مقیاس سالانه تا دهه‌ای به کار می‌رود. واضح‌ترین نتایج تحلیل مؤلفه A، حصول مهارت پیش‌بینی تاریخی در محدوده‌های پیش‌بینی سالانه، چند ساله و دهه‌ای برای هر مدل و در نهایت، برای ترکیبی بهینه از این نتایج در یک پیش‌بینی چندمدلی است (بوئر و همکاران، ۲۰۱۶). در این گروه دو مؤلفه dcppA-hindcast (پیش‌بینی تاریخی با آغازگری مدل اقلیمی از داده‌های دیدبانی) و dcppA-historical (شبه‌سازی تاریخی یا آینده بدون استفاده از آغازگری از داده‌های دیدبانی) نیز قرار دارند. مؤلفه B (dcppB) تولید، تجزیه، تحلیل و انتشار مداوم پیش‌بینی‌های چندمدلی شبه‌واقعی را به‌عنوان مبنایی برای استفاده در پیش‌بینی‌های عملیاتی بالقوه به‌عهده دارد. در این مؤلفه از یافته‌های پژوهشی مؤلفه A برای تولید نهایی پیش‌بینی‌های عملیاتی دهه‌ای استفاده می‌شود. پیش‌بینی‌های dcpp معمولاً در نوامبر هر سال آغازگری می‌شوند. برای واسنجی برونداد مدل‌های DCPD نیاز به استفاده از پیش‌بینی‌های تاریخی مؤلفه dcppA برای یک دوره بلندمدت حدود ۳۰ ساله است. در واقع پیش‌بینی‌هایی که در پایگاه‌های مختلف تحت عنوان سال ۲۰۲۲ در دسترس قرار دارند مربوط به اجرای نوامبر ۲۰۲۱ می‌باشند. مؤلفه C (dcppC) مطالعات موردی نوسانات اقلیمی خاص، نظیر بررسی اثرات ناشی از واداشت‌های طبیعی مانند فوران آتشفشان‌ها (نظیر پیناتوبو و...) را به‌عهده دارد. داده‌های این مؤلفه تحت فعالیت VolMIP در پایگاه ESGF موجود است که بر اساس آن می‌توان تأثیر فوران احتمالی آتشفشان پیناتوبو را بر پیش‌بینی متغیرهای هواشناسی بررسی کرد (پایگاه داده ESGF، ۲۰۲۲).

۲-۲. منطقه مورد مطالعه و داده‌ها

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق، گستره ایران و کشورهای منطقه در محدوده ۱۵ تا ۴۵ شمالی و ۳۰ تا ۷۰ شرقی شامل کشورهای واقع در شرق مدیترانه، شبه‌جزیره

فیزیکی پیش‌بینی‌های چندسالانه و تحول زمانی هر یک از آنها است. آغازگری این مدل‌ها به کمک داده‌های اقیانوسی حال حاضر دارای اهمیت زیادی است و هرگونه پیشرفت در این زمینه موجب ارتقاء سطح کیفی پیش‌بینی‌های پیوسته می‌شود (کوشنیر و همکاران، ۲۰۱۹). اولین تلاش برای پیش‌بینی دهه‌ای در پروژه CMIP5 آغاز شد. نتایج نشان داد که توانمندی به نسبت مناسبی برای پیش‌بینی دما طی چند سال آینده وجود دارد (تیلور و همکاران، ۲۰۱۲ و دابلاس ریز و همکاران، ۲۰۱۳). در پیش‌بینی دهه‌ای اهمیت آغازگری در سال‌های اولیه بیشتر است، اما با افزایش برد پیش‌بینی به بیش از حدود دو سال و اثرگذاری واداشت‌های بیرونی، کارایی پیش‌بینی‌ها به تدریج کاهش می‌یابد. به‌عبارت دیگر در سال‌های اولیه، آغازگری نقش اصلی را در پیش‌بینی برعهده دارد، در حالی که در سال‌های بعد نقش واداشت‌های بیرونی بیشتر می‌شود. کارایی آغازگری مبتنی بر واداشت‌های داخلی با افزایش برد پیش‌بینی به صفر نزدیک می‌شود، اما کارایی پیش‌بینی با استفاده از آغازگری مبتنی بر واداشت بیرونی با گذشت زمان ثابت می‌ماند (بوئر و همکاران، ۲۰۱۶). تجربیات حاصل از پروژه CMIP5 به طراحی پروژه DCPD که زیرمجموعه پروژه کلان CMIP6 است، کمک کرد. تفاوت پروتکل CMIP6 در مقایسه با CMIP5 که پیش‌نگری‌های با آغازگری متعدد و پیش‌نگری چندگانه را مهیا می‌کند، موجب می‌شود تا تخمین‌های به مراتب بهتری از توانمندی مدل‌های CMIP6 در دسترس باشد.

پروژه پیش‌بینی دهه‌ای از سه گروه شبه‌سازی‌ها، شامل dcppA، dcppB و dcppC تشکیل شده‌اند. تفاوت dcppB با dcppA در این است که در dcppB فرض شده که سه آتشفشان مهم کره‌زمین در اندونزی، فیلیپین و مکزیک فعال شده باشند، در حالی که در dcppA فرض بر عدم فعالیت آنها است. مؤلفه dcppC مربوط به مطالعات پیش‌بینی‌پذیری و موردی است (WCRP، ۲۰۲۲). مؤلفه A (dcppA) شامل آرشویی از داده‌ها برای تجزیه و تحلیل گسترده از پیش‌بینی‌های تاریخی است که

در این پژوهش، با توجه به عدم دسترسی به داده‌های دیدبانی از کشورهای همسایه، برای واسنجی داده‌های dcppA hindcast برای بارش و دما به ترتیب از داده‌های ERA5 و GPCP استفاده شد. کارآیی داده‌های دو پایگاه یادشده توسط مسعودیان و همکاران (۱۳۹۳)، محمدی قلعه نی و شرفی (۱۴۰۱) مورد بررسی و تأیید قرار گرفته است. از آنجا که تفکیک افقی مدل‌های جهانی مورد استفاده در این پژوهش از 200×200 تا 250×250 کیلومتر متغیر بوده است، لذا طی فرایند تصحیح اریبی، تفکیک افقی متغیرهای بارش و دما متناسب با تفکیک افقی داده‌های ERA5 و GPCP به ترتیب ۱ و 0.25 درجه قوسی افزایش یافت. دوره واسنجی داده‌ها $2014-1970$ در نظر گرفته شد.

عربستان، بخش عمده‌ای از کشورهای پاکستان و افغانستان و کشورهای واقع در شمال ایران می‌باشند. داده‌های مدل‌های DCPD شامل ۴۵ متغیر مندرج در جدول ۱ در مجموع از دو پایگاه اصلی ESGF (E) و JASMIN (J) از آدرس زیر قابل دریافت هستند.

<https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6/>
https://gws-access.jasmin.ac.uk/public/wmo_ntcp/
 در مجموع در مراکز بین‌المللی پیش‌بینی دهه‌ای از ۲۲ مدل اقلیمی استفاده شده است که تا زمان اجرای این پژوهش (آذرماه ۱۴۰۱)، داده‌های سه مدل اقلیمی MPI-ESM1.2-LR، MIROC6 و CNRM-ESM2-1 از اجراهای سال ۲۰۲۱ به ترتیب با تفکیک‌های افقی 200×200 ، 250×250 و 250×250 کیلومتر در دسترس می‌باشد.

جدول ۱. متغیرهای در دسترس مدل‌های dcpp از دو پایگاه ESGF (E) و JASMIN (J).

پایگاه	متغیر	ردیف	پایگاه	متغیر	ردیف	پایگاه	متغیر	ردیف
E	surface downward heat flux in sea water	۳۱	E	sea surface height above geoid	۱۶	E	air pressure at mean sea level	۱
E	surface downward latent heat flux	۳۲	E	sea surface salinity	۱۷	J/E	air temperature	۲
E	surface downward sensible heat flux	۳۳	E	sea surface temperature	۱۸	E	eastward wind	۳
E	surface downward x stress	۳۴	E	sea water potential temperature	۱۹	E	geopotential height	۴
E	surface downward y stress	۳۵	E	sea water potential temp. at sea floor	۲۰	E	net downward shortwave flux at sea water surface	۵
E	surface net downward longwave flux	۳۶	E	sea water salinity	۲۱	E	northward ocean heat transport	۶
E	surface temperature	۳۷	E	sea water salinity at sea floor	۲۲	E	northward ocean heat transport, eddy advection	۷
E	surface upward latent heat flux	۳۸	E	sea water x velocity	۲۳	E	northward ocean heat transport, eddy diffusion	۸
E	surface upward sensible heat flux	۳۹	E	sea water y velocity	۲۴	E	northward wind	۹
E	upward sea water velocity	۴۰	E	Specific humidity	۲۵	E	ocean barotropic mass streamfunction	۱۰
E	virtual salt flux into sea water	۴۱	E	square of ocean mixed layer thickness	۲۶	E	ocean meridional overturning mass streamfunction	۱۱
E	water flux into sea water	۴۲	E	square of sea surface height above geoid	۲۷	E	ocean meridional overturning	۱۲
E	water flux into sea water from rivers	۴۳	E	square of sea surface salinity	۲۸	E	ocean mixed layer thickness defined by sigma t	۱۳
J	Sea level pressure	۴۴	E	square of SST	۲۹	J/E	precipitation flux	۱۴
J	Athlantic meridional ocerturning	۴۵	E	surface air pressure	۳۰	E	relative humidity	۱۵

کرد که مدل در ساعت 0000UTC روز اول ماه ژانویه سال ۲۰۲۱ برای پیش‌بینی پنج ماه آینده (تا ماه می سال ۲۰۲۱) آغازگری شود. از آنجا که هر گروه از پیش‌بینی‌های آن از ۵۱ عضو تشکیل شده است، لذا اگر از عضو شماره ۱۷ برای پیش‌بینی ماه می استفاده شده باشد، در آن صورت مقادیر k ، j و τ به ترتیب ۱۷، ۲۰۲۱۰۱۰۱۰۰۰ (ساعت صفر روز اول ژانویه) و ۵ ماه خواهند بود. در این مثال اگر از مدل‌های پیش‌بینی چندسالانه (DCPP) برای پیش‌بینی ۴ سال آینده استفاده شود، مقدار τ برابر ۴ سال خواهد شد.

اگر X نشان‌دهنده داده‌های دیدبانی باشد، در این صورت $X_{j\tau}$ داده‌های دیدبانی متناظر با پیش‌بینی‌ها برای درستی‌سنجی پیش‌بینی است. بر این اساس، میانگین مقادیر دیدبانی در برد پیش‌بینی τ مطابق رابطه (۱) نشان داده می‌شود:

$$\bar{X}_{\tau} = \sum_{j=year1}^{year2} \frac{X_{j\tau}}{N_x} \quad (1)$$

که در آن N_x تعداد سال‌های دیدبانی است که سال ۱ (سال شروع) تا ۲ (سال پایان) را پوشش می‌دهد. به طور مثال اگر سال ۱، ۱۹۷۰ و سال ۲، ۲۰۱۶ باشد و برد پیش‌بینی برابر ۳ سال باشد. در این صورت:

$$\bar{X}_3 = \frac{X_{1970,3} + X_{1971,3} + \dots + X_{2016,3}}{45} \quad (2)$$

در واقع \bar{X}_3 میانگین داده‌های دیدبانی از سال ۱۹۷۲ تا ۲۰۱۶ است. حال اگر $\tau = 5$ باشد، \bar{X}_5 میانگین داده‌های دیدبانی دوره ۱۹۷۴ تا ۲۰۱۶ خواهد بود. بی‌هنجاری از میانگین از رابطه (۳) پیروی می‌کند:

$$X'_{j\tau} = X_{j\tau} - \bar{X}_{\tau} \quad (3)$$

به روشی مشابه، میانگین اقلیمی پیش‌بینی (Forecast Climatology) برای پیش‌بینی با برد زمانی τ با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می‌شود:

$$\{\bar{Y}\}_{\tau} = \sum_{j=year1}^{year2} \frac{\{Y\}_{j\tau}}{N_y} \quad (4)$$

که در آن پیش‌بینی میانگین چندگانه که از طریق میانگین‌گیری اعضای پیش‌بینی چندگانه حاصل شده است، با $\{Y\}_{j\tau}$ نشان داده می‌شود. در اینجا میانگین‌گیری

۲-۳. پس پردازش داده‌های DCPD بر مبنای شیوه‌نامه

WMO

هیچ‌یک از مدل‌های اقلیمی دقیق نیستند و همواره تفاوت‌هایی بین داده‌های حاصل از دیدبانی و شبیه‌سازی وجود دارد. سازمان جهانی هواشناسی در سال ۲۰۱۶ شیوه‌نامه‌ای برای تصحیح اریبی مدل‌های پیش‌بینی چندسالانه (دهه‌ای) (DCPP) تهیه کرد (بوئر و همکاران، ۲۰۱۶؛ کلاپور، ۲۰۱۱). در آغازگری مدل‌های پیش‌بینی چندسالانه دو دیدگاه وجود دارد: آغازگری بر مبنای مقدار اصلی (Full-field) داده‌ها و آغازگری بر مبنای بی‌هنجاری داده‌ها. در آغازگری بر مبنای داده‌های اصلی، مدل در آغاز به داده‌های دیدبانی نزدیک است، اما به تدریج که برد پیش‌بینی‌ها افزایش می‌یابد، برآورد مدل به سوی حالت اقلیمی ترجیحی رانده می‌شود. مقدار اریبی به برد پیش‌بینی و سایر مشخصات آن بستگی دارد و تصحیح آن به مجموعه‌ای از پیش‌بینی‌های تاریخی (گذشته‌نگر) نیاز دارد. در آغازگری بر مبنای بی‌هنجاری، آغازگری مدل با استفاده از بی‌هنجاری مشاهدات به علاوه میانگین مدل اقلیمی (که از شبیه‌سازی‌های گذشته‌نگر به دست آمده‌اند) انجام می‌شود. این روش تلاشی برای جلوگیری از رانش (Model Drift) مدل است. آغازگری بر مبنای بی‌هنجاری منجر به عدم تعادل دینامیکی می‌شود که پیامد آن شوک و سوگیری در پیش‌بینی‌ها است. تصحیح چنین منبعی از اریبی نیازمند مجموعه داده‌های پیش‌بینی تاریخی می‌باشد.

رویکرد اصلی در پیش‌بینی چندسالانه (دهه‌ای) معطوف به اصلاح مرتبه اول اریبی است. با فرض این که اریبی فقط تابعی از برد پیش‌بینی باشد، برای هر برد خاص، یک اریبی جداگانه محاسبه می‌شود. این فرایند به طور یکسان برای تصحیح اریبی در هر دو روش آغازگری، یعنی آغازگری‌های بر مبنای بی‌هنجاری و داده‌های اصلی به کار برده می‌شود. به عنوان مثال، برای یک سری از پیش‌بینی‌های خام اقلیمی مانند $Y_{k,j\tau}$ ، که در آن k شماره عضو (Member) پیش‌بینی، j زمان آغازگری (زمان شروع پیش‌بینی) و τ برد پیش‌بینی است، می‌توان فرض

بر روی تعداد N_y پیش‌بینی انجام شده است که بین سال ۱ تا ۲ قرار می‌گیرد. بی‌هنجاری از رابطه (۵) پیروی می‌کند و اطلاعات دیدبانی و پیش‌بینی تصحیح‌شده برحسب این بی‌هنجاری‌ها مقایسه می‌شوند.

بر روی تعداد N_y پیش‌بینی انجام شده است که بین سال ۱ تا ۲ قرار می‌گیرد. بی‌هنجاری از رابطه (۵) پیروی می‌کند و اطلاعات دیدبانی و پیش‌بینی تصحیح‌شده برحسب این بی‌هنجاری‌ها مقایسه می‌شوند.

$$Y'_{kj\tau} = Y_{kj\tau} - \{\bar{Y}\}_\tau \quad (5)$$

برای تصحیح اریبی، ابتدا رانش مدل مطابق رابطه (۶) تعریف می‌شود:

$$d_\tau = \{\bar{Y}\}_\tau - \bar{X}_\tau \quad (6)$$

و سپس پیش‌بینی تصحیح‌شده $\hat{Y}_{kj\tau}$ از رابطه (۷) تعیین می‌شود:

$$\hat{Y}_{kj\tau} = Y_{kj\tau} - d_\tau = Y_{kj\tau} - \{\bar{Y}\}_\tau + \bar{X}_\tau = \bar{X}_\tau + Y'_{kj\tau} \quad (7)$$

نکته مهم این است که بایستی طول دوره ۱ تا سال ۲ برای همه بردهای پیش‌بینی یکسان باشد تا برآوردها سازگار شوند (هاوکیتر و همکاران، ۲۰۱۶) و از پیچیدگی‌ها در تفسیر پیش‌بینی‌ها نسبت به دوره‌های پایه مختلف پرهیز شود (اسمیت و همکاران، ۲۰۱۳). مهم است که بازه بین سال ۱ تا سال ۲ تا حد امکان طولانی باشد تا از فازهای مختلف تغییرپذیری اقلیمی نمونه‌هایی در دوره مورد بررسی وجود داشته باشد تا برآورد قوی از رفتارهای مختلف اقلیمی حاصل شود. اگرچه انتظار می‌رود تعداد پیش‌بینی‌های گذشته‌نگر N_y با تعداد سال‌های بین دوره سال ۱ تا سال ۲، یعنی N_x ، برابر باشد ولی ممکن است برخی مراکز قادر به آغازگری و اجرای پیش‌بینی گذشته‌نگر در هر سال نباشند. لذا، مناسب است تا از تمام داده‌های دیدبانی، یعنی N_x ، جهت برخورداری از یک برآورد قوی اقلیمی مبتنی بر دیدبانی استفاده شود. در نهایت از آنجاکه بی‌هنجاری‌های پیش‌بینی به مشاهدات بستگی ندارند، آنها می‌توانند برای متغیرهای مشاهده نشده یا دارای مقادیر مشاهداتی محدود مانند گردش نصف‌النهاری معکوس اقیانوس اطلس نیز محاسبه شوند، هرچند که درستی‌سنجی در این‌گونه موارد مستقیماً قابل‌انجام نبوده و بر مبنای متغیرهای دیدبانی مرتبط (غیرمستقیم) انجام می‌شود. کارآیی روش تصحیح اریبی مورد استفاده با استفاده از پنج سنجه آماری MAE، Bias،

۳. نتایج و بحث

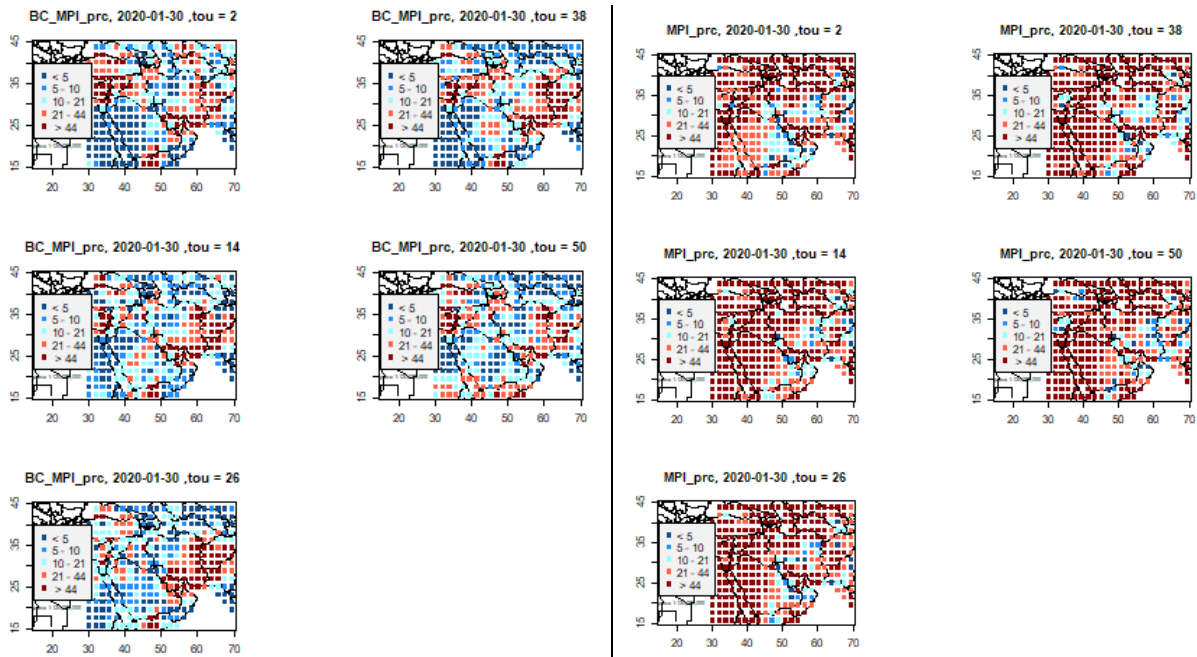
یافته‌های این پژوهش برای متغیرهای بارش و دما در سه برش زمانی ۵-ساله، سالانه و فصلی برای سه مدل شامل CNRM-ESM2-1 و MIRO6، MPI-ESM1.2-LR دوره ۲۰۲۲-۲۰۲۶ به صورت بی‌هنجاری نسبت به دوره مشاهداتی ۱۹۹۱-۲۰۱۹ ارائه شده است.

۳-۱. برآورد اریبی

نتایج تصحیح اریبی بارش و دمای مدل‌ها برای پیش‌دیدهای (Lead Time) صفر تا ۶۰ ماه (صفر تا ۵ سال) مطابق با شیوه‌نامه تصحیح اریبی پروژه DCPD سازمان جهانی هواشناسی در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است. برای آگاهی از توزیع فضایی خطاها در پهنه مورد مطالعه در هر یک از مدل‌های اقلیمی مورد نظر، توزیع فضایی شاخص‌های آماری پیش‌بینی بارش و دما برای ماه نمونه ژانویه سال ۲۰۲۰ آورده شده است. علت انتخاب سال ۲۰۲۰ به این دلیل بوده است که داده‌های سال مذکور دخالتی در فرایند برآورد اریبی پیش‌بینی‌ها در دوره واسنجی (۱۹۷۰ تا ۲۰۱۹) نداشته است. در شکل ۱ الگوی فضایی میانگین قدرمطلق خطای پیش‌بینی بارش ماه ژانویه در دو حالت قبل و بعد از تصحیح خطا برای پیش‌دیدهای نمونه ۳، ۱۵، ۲۷، ۳۹ و ۵۱ ماهه برای مدل MPI-ESM1.2-LR آورده شده است. مطابق این شکل مثال برای پیش‌دید ۳ (پیش‌بینی ۳ ماه جلوتر) در طبقه ۴۴-۲۱ میلی‌متر قرار دارد، در حالی که بعد از تصحیح عمدتاً تا طبقه ۲۱-۵ میلی‌متر کاهش یافته است. در عین حال بیشینه خطا بعد از تصحیح بر روی امتداد کوه‌های البرز و زاگرس میانی و شمالی قرار دارد. همچنین میانگین قدرمطلق خطای بارش قبل از تصحیح اریبی برای پیش‌دید ۵۱ (پیش‌بینی ۵۱ ماه جلوتر) در شمال غرب کشور عمدتاً بیش از ۴۴ میلی‌متر است در حالی که بعد از تصحیح اریبی

برای منطقه مورد مطالعه، برای سه مدل اقلیمی مورد استفاده آورده شده است. برای مثال جذر مربع خطای مدل‌ها قبل از تصحیح اریبی بین ۶۱-۵۴ میلی‌متر و بعد از تصحیح اریبی بین ۲۸-۲۶ قرار دارد. همچنین ضریب همستگی بین داده‌های خام مدل و بارش مشاهداتی بین ۰/۰-۳۱/۳۷ است در حالی که بعد از تصحیح اریبی به ۰/۰-۶۱/۷۳ ارتقاء یافته است.

به کمتر از ۲۱ میلی‌متر کاهش یافته است. با این حال قدرمطلق خطای بعد از تصحیح بهبود قابل ملاحظه‌ای در دو سوی رشته کوه البرز نشان نمی‌دهد اما اریبی بارش در نیمه جنوبی کشور به مقدار قابل ملاحظه‌ای بهبود یافته است و از طبقه خطای ۲۱-۵ میلی‌متر تا طبقه ۱۰-۵ میلی‌متر کاهش یافته است. در جدول ۲، مقادیر شاخص‌های آماری قبل و بعد از تصحیح اریبی بارش



(ب)

(الف)

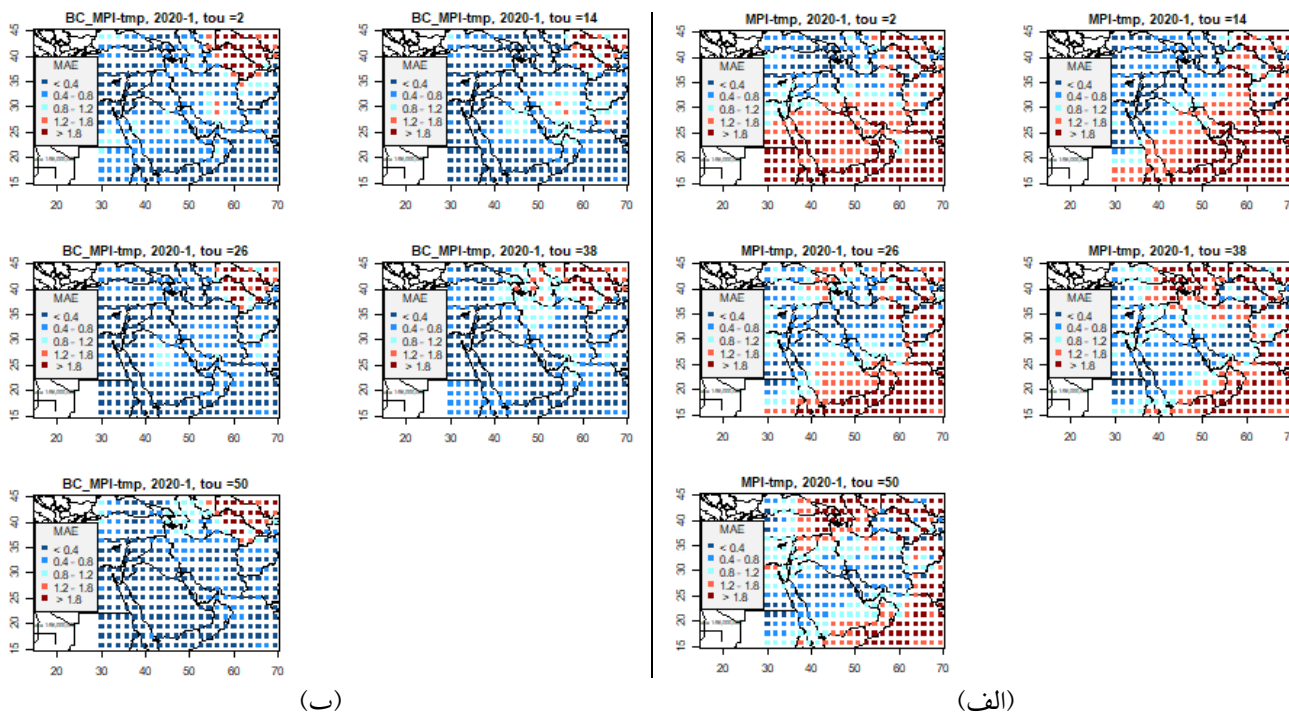
شکل ۱. پهنه‌بندی فضایی قدرمطلق اریبی پیش‌بینی بارش سال ۲۰۲۰ برای ماه نمونه ژانویه-داده‌های تصحیح‌نشده (الف) و تصحیح‌شده (ب) بر اساس پیش‌بینی‌های مختلف، مدل MPI-ESM1.2-LR (نتایج دو مدل دیگر و سایر ماه‌ها درج نشده است).

جدول ۲. مقادیر شاخص‌های آماری قبل و بعد از تصحیح اریبی بارش برای منطقه مورد مطالعه، برای سه مدل اقلیمی مورد استفاده (شاخص‌های اریبی و خطا برحسب میلی‌متر و سایر شاخص‌های بدون بعد هستند).

مدل	شاخص	Bias	MAE	RMSE	N-S	r	KGE
MPI-ESM1.2-LR	قبل از تصحیح	-۱/۸۰	۳۸/۴۹	۵۴/۳۰	-۴/۰	۰/۳۵	-۱/۲۰
	بعد از تصحیح	-۰/۲۵	۱۵/۲۱	۲۶/۴۳	۰/۰۴	۰/۷۳	۰/۲
MIROC6	قبل از تصحیح	-۲/۴۲	۴۶/۷۵	۶۰/۹۰	-۴/۹۱	۰/۳۷	-۱/۷۷
	بعد از تصحیح	-۰/۴۲	۱۵/۵۶	۲۸/۱۲	-۰/۳۳	۰/۶۴	۰/۰۷
CNRM-ESM2-1	قبل از تصحیح	-۲/۷۷	۴۲/۰۴	۵۶/۳۲	-۵/۶۷	۰/۳۱	-۲/۰۶
	بعد از تصحیح	-۰/۴۹	۱۶/۸۳	۲۸/۰۹	-۰/۴۶	۰/۶۱	۰

محدوده ۱/۲-۰/۴ کاهش یافته است. در پیش‌دید دو ماهه بهترین بهبود در پیش‌بینی‌های دمای مدل در مناطق جنوبی کشور رخ داده است. همچنین در پیش‌دید ۵۰ ماهه، قدرمطلق خطای مدل قبل از تصحیح در طبقه ۱/۸-۰/۴ و بعد از تصحیح در طبقه ۰/۴-۰/۸ قرار دارد که بیشترین تصحیح اریبی به مقدار حدود ۱ درجه سلسیوس مربوط به نیمه شمالی کشور است. در جدول ۳، خلاصه مقادیر شاخص‌های آماری قبل و بعد از تصحیح اریبی دمای هوا در منطقه مورد مطالعه، برای سه مدل اقلیمی مورد استفاده آورده شده است. مطابق جدول مذکور، جذر مربع خطای مدل‌ها قبل از تصحیح اریبی بین ۲/۵-۱/۸ درجه سلسیوس و بعد از تصحیح اریبی بین ۰/۸۷-۰/۸۹ درجه سلسیوس می‌باشد. همچنین ضریب همبستگی بین داده‌های خام مدل و دمای مشاهداتی بین ۰/۹۳-۰/۹۲ و با داده‌های تصحیح‌شده ۰/۹۹ است.

در شکل ۲ پهنه‌بندی فضایی نتایج تصحیح اریبی دمای مدل MPI-ESM1.2-LR برای پیش‌دیدهای صفر تا ۶۰ ماه (صفر تا ۵ سال جلوتر) مطابق با شیوه‌نامه تصحیح اریبی پروژه DCPD سازمان جهانی هواشناسی برای ژانویه سال ۲۰۲۰ آورده شده است. همانند بارش، علت انتخاب سال ۲۰۲۰ به این دلیل بوده است که برای برآورد مقدار اریبی پیش‌بینی‌ها از داده‌های مشاهداتی دوره واسنجی (۱۹۷۰ تا ۲۰۱۹) استفاده شده و داده‌های سال ۲۰۲۰ دخالتی در این فرایند نداشته است. در شکل الگوی فضایی میانگین قدرمطلق خطای پیش‌بینی دمای ماه ژانویه در دو حالت قبل و بعد از تصحیح خطا برای پیش‌دیدهای نمونه ۲، ۱۴، ۲۶، ۳۸ و ۵۰ ماهه آورده شده است. مطابق این شکل میانگین قدرمطلق خطای دمای هوا برای حالت قبل از تصحیح اریبی برای مثال برای پیش‌دید ۲ (پیش‌بینی ۲ ماه جلوتر) بین ۱/۸-۰/۴ سلسیوس است که بعد از تصحیح به



شکل ۲. پهنه‌بندی فضایی قدرمطلق اریبی پیش‌بینی دمای سال ۲۰۲۰ برای ماه نمونه ژانویه-داده‌های تصحیح‌نشده (الف) و تصحیح‌شده (ب) بر اساس پیش‌دیدهای مختلف، مدل MPI-ESM1.2-LR (نتایج دو مدل دیگر و سایر ماه‌ها درج نشده است).

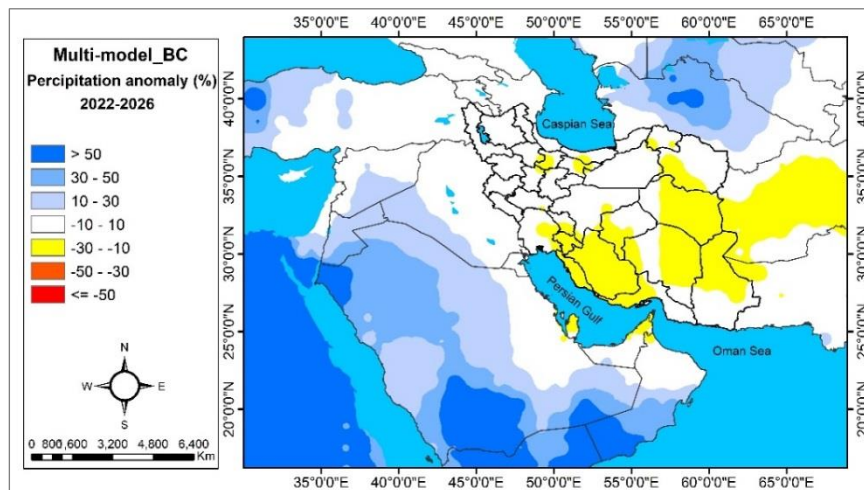
جدول ۳. مقادیر شاخص‌های آماری قبل و بعد از تصحیح اریبی دما برای منطقه مورد مطالعه (شاخص‌های اریبی و خطا برحسب درجه سلسیوس و سایر شاخص‌ها بی‌بعد هستند).

نام مدل	شاخص	Bias	RMSE	r	KGE
MIROC6	قبل از تصحیح	۰/۰۸	۲/۵۲	۰/۹۲	۰/۷۶
	بعد از تصحیح	-۰/۰۱	۰/۸۷	۰/۹۹	۰/۹۵
MPI-ESM1.2-LR	قبل از تصحیح	۰/۰۲	۱/۸۹	۰/۹۶	۰/۸۰
	بعد از تصحیح	-۰/۰۱	۰/۸۸	۰/۹۹	۰/۹۵
CNRM-ESM2-1	قبل از تصحیح	۰/۰۲	۱/۷۷	۰/۹۳	۰/۸۷
	بعد از تصحیح	-۰/۰۱	۰/۸۹	۰/۹۹	۰/۹۵

۳-۲. پیش‌بینی بارش

کشورهای همسایه ایران (به استثنای ترکمنستان) در محدوده نرمال و در دو سوی دریای سرخ، جنوب و شرق شبه‌جزیره عربستان و کشور ترکمنستان در محدوده بیشتر از نرمال برآورد می‌شود. نتایج این پژوهش برای نیمه شمالی کشور با یافته‌های هرمانسون و همکاران (۲۰۲۲) که اعضای کارگروه پروژه پیش‌بینی دهه‌ای سازمان جهانی هواشناسی هستند، هماهنگ است ولی برای نیمه جنوبی با پژوهش یادشده هماهنگی ندارد. آنها پیش‌بینی بارش دوره ۲۰۲۱-۲۰۲۵ را با استفاده از داده‌های شرایط اولیه سال ۲۰۲۰ انجام دادند و از نظر استفاده از داده‌های شرایط اولیه یک سال از داده‌های مورد استفاده در این مطالعه پیرتر (آغاز‌گیری در سال ۲۰۲۰) است. در عین حال مطابق پیش‌بینی آنها بارش در دوره ۲۰۲۱-۲۰۲۶ در نیمه جنوبی و شرقی کشور گرایش به بیشتر از نرمال و در نیمه غربی در محدوده نرمال است.

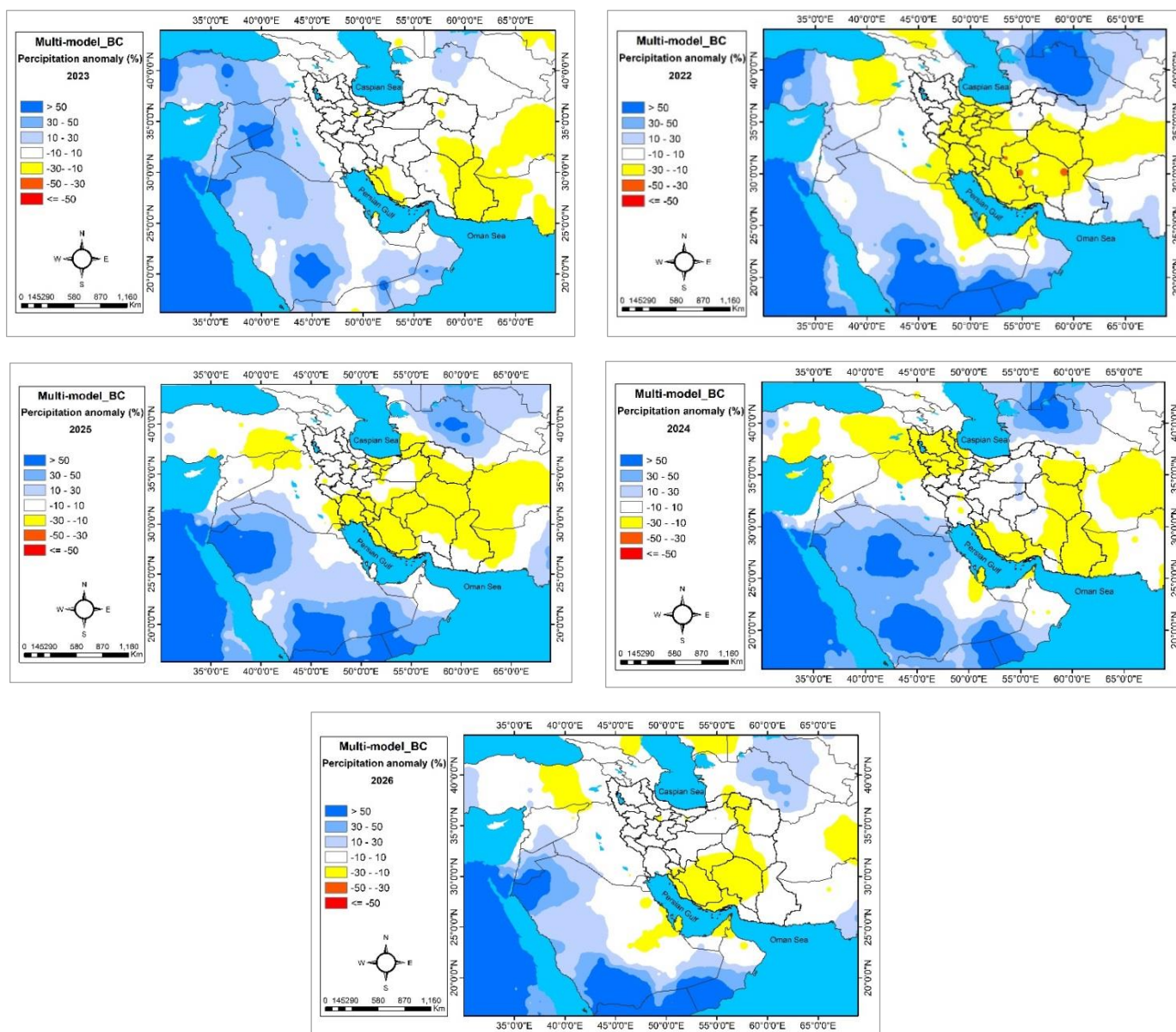
پیش‌بینی بی‌هنجاری بارش منطقه مورد مطالعه نسبت به دوره ۱۹۹۱-۲۰۱۹ به صورت میانگین پنج-ساله در شکل ۳ آورده شده است. شکل یادشده با تلفیق پیش‌بینی‌های تصحیح‌شده سه مدل اقلیمی MPI-ESM1.2-LR، MIROC6 و CNRM-ESM2-1 تهیه شده است. مطابق شکل یادشده بارش کشور در دوره پنج-ساله ۲۰۲۶-۲۰۲۲ به صورت میانگین در محدوده نرمال تا کمتر از نرمال برآورد می‌شود. توزیع مکانی بارش به گونه‌ای است که در استان‌های واقع در دوسوی رشته کوه‌های زاگرس میانی و شمالی، شمال‌غرب، دو سوی رشته کوه البرز (به استثنای بخش‌هایی از دامنه جنوبی)، نوار شمال‌شرق و جنوب‌شرق در محدوده نرمال (بین ۱۰ درصد کمتر تا ۱۰ درصد بیشتر از نرمال) و سایر مناطق کشور بارشی در محدوده ۱۰٪- تا ۳۰٪- را دریافت خواهند کرد. بارش در



شکل ۳. پیش‌بینی چندمدلی بی‌هنجاری بارش ایران و کشورهای همسایه برای دوره ۲۰۲۲-۲۰۲۶ (بر حسب درصد).

درگیر کاهش بارش باشد. در سال یادشده در بخش‌هایی از مناطق غربی کشور بارش گرایش به بیشتر از نرمال دارد. در جدول ۴ میانگین و دامنه تغییرات بی‌هنجاری کشوری بارش به تفکیک سال آورده شده است که در آن بیشترین کاهش بارش در ۲۰۲۲ به مقدار ۱۲/۶ درصد رخ می‌دهد. در سال‌های مورد مطالعه بیشترین مقدار بارش برای سال ۲۰۲۳ با ۲ درصد افزایش نسبت به نرمال بلندمدت برآورد شده است. بیشترین و کمترین عدم قطعیت در پیش‌بینی بارش به ترتیب مربوط به سال‌های ۲۰۲۳ و ۲۰۲۶ به ترتیب با ۳۱ و ۱۱ درصد نوسان نسبت به دوره بلندمدت می‌باشد.

در شکل ۴ میانگین چندمدلی بی‌هنجاری بارش کشور به تفکیک سال آورده شده است. نتایج نشان می‌دهند که در هیچ‌یک از ۵ سال آینده میانگین بارش کشور بیشتر از نرمال نخواهد بود و از نظر مساحت تحت پوشش، بیشترین کاهش بارش در سال‌های ۲۰۲۲ و ۲۰۲۵ مورد انتظار است. در سال ۲۰۲۲ در بخش‌های محدودی از سواحل خزر و مرکز کشور کاهش بارش در طبقه ۳۰٪ تا ۵۰٪ برآورد شده است. چنین شرایطی کم‌وبیش در سایر سال‌ها در غرب خزر مشاهده می‌شود. انتظار می‌رود کمترین کاهش بارش در سال ۲۰۲۳ رخ دهد و مساحت به نسبت کمتری از کشور



شکل ۴. پهنه‌بندی پیش‌بینی چندمدلی بی‌هنجاری بارش سالانه منطقه مورد مطالعه به تفکیک برای سال‌های ۲۰۲۲، ۲۰۲۳، ۲۰۲۴، ۲۰۲۵ و ۲۰۲۶.

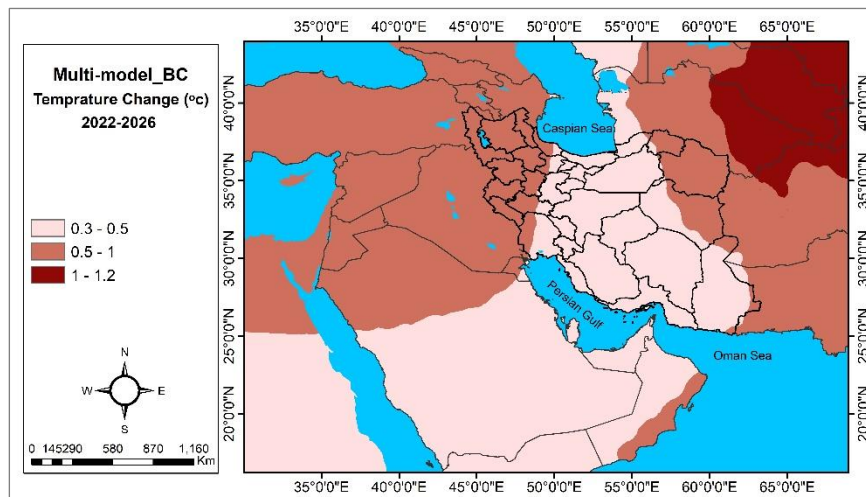
جدول ۴: پیش‌بینی تغییرات سالانه بارش پنج سال آینده ایران (۲۰۲۲-۲۰۲۶) نسبت به نرمال بلندمدت (برحسب درصد).

سال	۲۰۲۲	۲۰۲۳	۲۰۲۴	۲۰۲۵	۲۰۲۶
تغییرات (%)	-۱۲/۶	۲	-۱/۵	-۶/۵	-۴/۵
حداقل	-۱۴/۵	-۱۲/۰	-۱۱/۹	-۱۲/۶	-۹/۴
حداکثر	+۷/۱	+۱۹/۱	+۱۷/۳	+۸/۰	+۱/۸

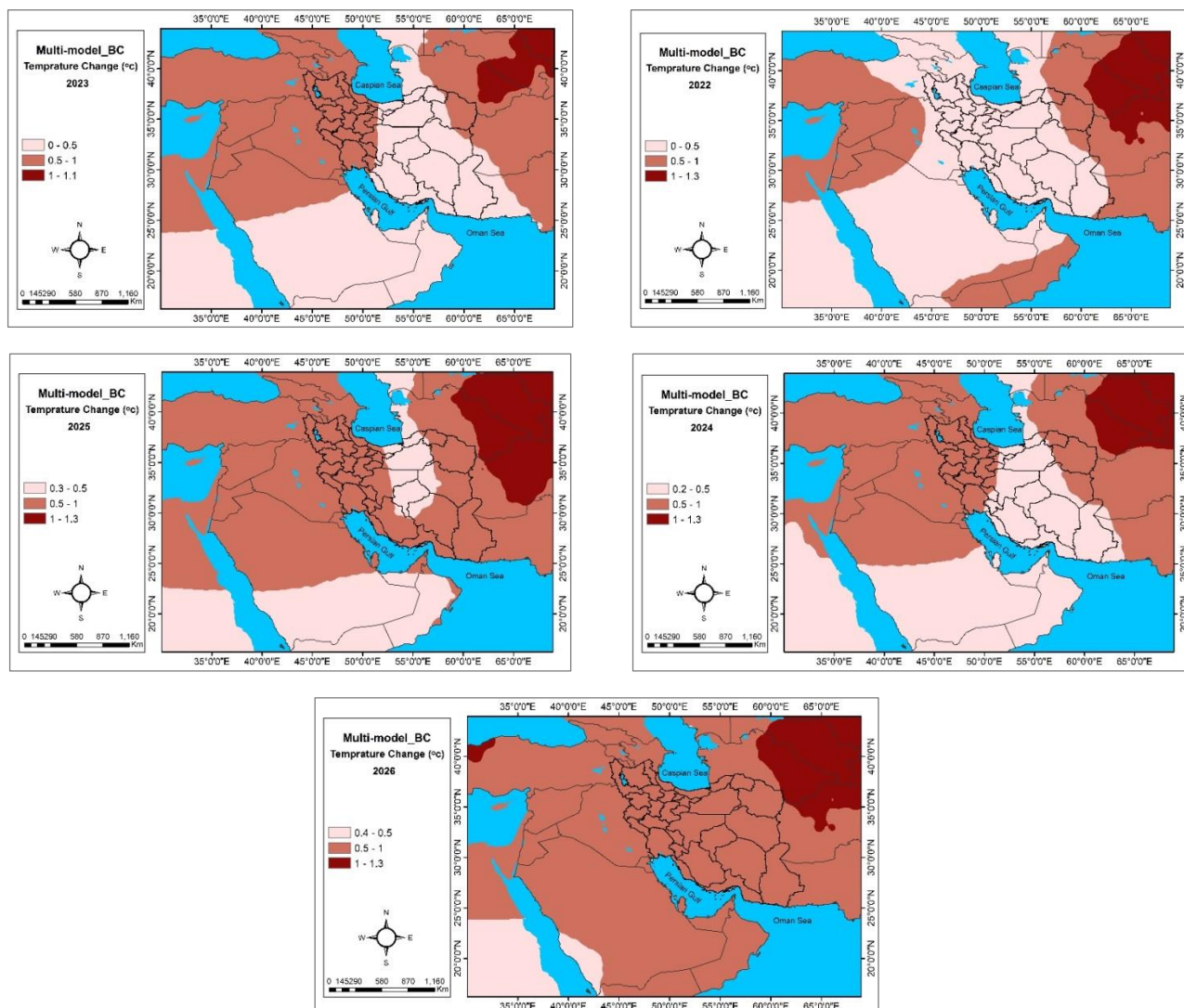
۳-۳. پیش‌بینی دما

پیش‌بینی بی‌هنجاری دمای ایران و کشورهای همسایه به صورت میانگین بی‌هنجاری پنج-ساله دوره ۲۰۲۲-۲۰۲۶ در شکل ۵ نشان داده شده است. شکل یادشده با استفاده از تلفیق پیش‌بینی‌های تصحیح‌شده حاصل از سه مدل اقلیمی MIRO6، MPI-ESM1.2-LR و CNRM-ESM2-1 تهیه شده است. شکل نشان می‌دهد که دمای کشور در دوره مورد مطالعه بین ۰/۳ تا ۱ درجه سلسیوس بیشتر از نرمال خواهد بود. در بخش شمال‌شرقی منطقه مورد مطالعه شامل بخش‌هایی از کشورهای ترکمنستان و شمال افغانستان بی‌هنجاری دما بیش از ۱ درجه سلسیوس برآورد شده است. افزایش دمای یادشده این منطقه می‌تواند منجر به کاهش سهم بارش برف به ویژه بر روی کوه‌های مرتفع هندوکش در ۵ سال آینده شود. در پهنه ایران بیشترین افزایش دما بین ۰/۵ تا ۱ درجه سلسیوس در شمال‌شرق، نوار شرقی، شمال‌غرب، غرب رشته کوه البرز و غرب کشور رخ خواهد داد. دمای

سایر مناطق کشور و کشورهای واقع در جنوب خلیج فارس بین ۰/۳ تا ۰/۵ درجه سلسیوس فراتر از نرمال برآورد شده است. در شکل ۶ تغییرات دمای منطقه مورد مطالعه به تفکیک سال و با استفاده از میانگین چندمدلی آورده شده است. مطابق شکل بی‌هنجاری دما در گوشه شمال‌شرق کشور بین ۰/۵ تا ۱ درجه سلسیوس و در سایر مناطق کشور تا ۰/۵ درجه سلسیوس است. در سال‌های ۲۰۲۳ و ۲۰۲۴ علاوه بر شمال‌شرق کشور بخش عمده‌ای از نیمه غربی کشور نیز با بی‌هنجاری بین ۰/۵ تا ۱ درجه سلسیوس مواجه خواهند شد. در سال ۲۰۲۵ به جز دوسوی رشته کوه البرز و مناطق مرکزی کشور که دارای بی‌هنجاری بین ۰/۳ تا ۰/۵ درجه سلسیوس خواهند بود، میانگین دمای سایر مناطق کشور بین ۰/۵ تا ۱ درجه سلسیوس فراتر از نرمال برآورد می‌شود. بیشینه بی‌هنجاری دمای کشور بین ۰/۵ تا ۱ درجه سلسیوس در سال ۲۰۲۶ رخ می‌دهد. در دوره مورد بررسی بیشترین بی‌هنجاری دما در بین کشورهای همسایه بین ۱ تا ۱/۵ درجه سلسیوس در کشور افغانستان رخ می‌دهد.



شکل ۵: پیش‌بینی چندمدلی بی‌هنجاری دمای ایران و کشورهای همسایه برای دوره ۲۰۲۲-۲۰۲۶ (بر حسب درجه سلسیوس).



شکل ۶. پهنه‌بندی پیش‌بینی چندمدلی بی‌هنجاری دمای سالانه منطقه مورد مطالعه به تفکیک برای سال‌های ۲۰۲۲، ۲۰۲۳، ۲۰۲۴، ۲۰۲۵ و ۲۰۲۶.

دارای بیشترین عدم قطعیت می‌باشد. یافته‌های این پژوهش در مقایسه با نتایج هرمانسون و همکاران (۲۰۲۲) دارای اریبی سرد است، به این صورت که آنها دمای ایران و کشورهای منطقه در پنج سال آینده بین ۰/۵ تا ۲ درجه سلسیوس فراتر از نرمال پیش‌بینی کرده‌اند در حالی که در پژوهش حاضر بین ۰/۳ تا ۱/۲ است. بیشترین تطابق پژوهش حاضر با نتایج هرمانسون و همکاران (۲۰۲۲) مربوط به گوشه شمال شرق و شمال غرب و غرب کشور (با ۱ تا ۱/۲ درجه سلسیوس افزایش نسبت به نرمال) و جنوب شرق کشور (با ۰/۳ تا ۰/۵ درجه سلسیوس افزایش نسبت به نرمال) است.

در جدول ۵ میانگین افزایش دمای کشور در ۵ سال آینده ارائه شده است. مشاهده می‌شود که کمترین افزایش دما به مقدار ۰/۵ درجه سلسیوس نسبت به نرمال در سال ۲۰۲۲ و بیشترین افزایش به مقدار ۰/۶ درجه سلسیوس در سال ۲۰۲۴ برآورد شده است. در عین حال بیشترین وسعت محدوده افزایش دما در سال ۲۰۲۶ رخ می‌دهد. کمترین و بیشترین دامنه تغییرات پیش‌بینی میانگین دما در ۵ سال آینده به ترتیب در سال ۲۰۲۲ و ۲۰۲۵ با مقادیر ۰/۲ و ۰/۷ درجه سلسیوس برآورد شده است که نشان می‌دهد پیش‌بینی دمای سال ۲۰۲۲ دارای کمترین و پیش‌بینی دمای سال ۲۰۲۵

جدول ۵. میانگین و دامنه تغییرات پیش‌بینی افزایش دمای کشور بر مبنای پیش‌بینی‌های سه مدل مورد استفاده در دوره ۲۰۲۲-۲۰۲۶.

سال	۲۰۲۲	۲۰۲۳	۲۰۲۴	۲۰۲۵	۲۰۲۶
حداقل افزایش	۰/۴	۰/۴	۰/۴	۰/۳	۰/۳
حداکثر افزایش	۰/۵	۰/۶	۰/۷	۱/۰	۱/۰
میانگین افزایش	۰/۵	۰/۶	۰/۶	۰/۶	۰/۶

۴. نتیجه‌گیری

به مقدار ۰/۵ درجه سلسیوس گرم‌تر از نرمال خواهد بود. کمترین و بیشترین دامنه تغییرات پیش‌بینی میانگین دما در ۵ سال آینده به ترتیب در سال ۲۰۲۲ و ۲۰۲۵ با مقادیر ۰/۲ و ۰/۷ درجه سلسیوس برآورد شده است که نشان می‌دهد، پیش‌بینی دمای سال ۲۰۲۲ دارای کمترین و بیش‌ترین دمای سال ۲۰۲۵ دارای بیشترین عدم قطعیت می‌باشد. مراحل نهایی داوری این مقاله با انتشار داده‌های مشاهداتی بارش و دمای سال ۲۰۲۲ همزمان شد، که مقایسه کلی مقادیر پیش‌بینی‌شده با مقادیر مشاهداتی نشان‌دهنده هماهنگی کلی پیش‌بینی‌ها می‌باشد. با این حال بایستی توجه کرد که پیش‌بینی‌های چندسالانه برخلاف پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت بوده دارای عدم قطعیت بیشتری بوده و نبایستی به صورت پیش‌بینی یقینی در نظر گرفته شود. نویسندگان مقاله در نظر دارند تا در آینده با استفاده از مدل‌های بیشتر و داده‌های مشاهداتی شبکه‌ای با دقت بیشتر، کارایی پیش‌بینی دهه‌ای را افزایش داده و بسترهای علمی و فنی را برای عملیاتی کردن پیش‌بینی دهه‌ای را فراهم آورند.

تشکر و قدردانی

از سازمان پدافند غیرعامل کشور برای حمایت مالی از پروژه، پایگاه داده ESGF برای دسترسی به داده‌ای مدل‌های اقلیمی و دکتر داگلاس اسمیت از بخش تحقیق و توسعه مرکز هادلی برای در اختیار قرار دادن داده‌های مدل‌های اقلیمی دهه‌ای و مشورت‌های بسیار سازنده علمی قدردانی می‌شود.

مراجع

بابائیان، ا.؛ جوانشیری، ز.؛ مدیریان، ر.؛ خزانه‌داری، ل.؛

در این پژوهش با استفاده از شیوه‌نامه استاندارد سازمان جهانی هواشناسی و به کارگیری برون‌داد سه مدل اقلیمی جهانی دهه‌ای MIROC6، MPI-ESM1.2-LR و CNRM-ESM2-1، پیش‌بینی ۱ تا ۵ سال آینده بارش و دمای ایران و کشورهای منطقه ارائه شد. نتایج نهایی پیش‌بینی بارش برای منطقه مورد مطالعه نشان داد که بارش در نیمه جنوبی کشور (به استثنای بخش عمده‌ای از استان خوزستان، جنوب استان سیستان و بلوچستان، شرق استان هرمزگان و مناطقی از استان کرمان)، شرق و مناطقی از شمال‌شرق کشور و همچنین بخش‌هایی از دامنه جنوبی رشته کوه البرز کمتر از نرمال خواهد بود. در هیچ‌یک از پنج سال آینده بارش کشور بیشتر از نرمال نخواهد بود و انتظار می‌رود بیشترین کاهش بارش در سال‌های ۲۰۲۲ به مقدار ۱۲/۶ درصد کمتر از نرمال رخ دهد. همچنین بارش سال ۲۰۲۳ در محدوده نرمال برآورد می‌شود. در بین سال‌های مورد بررسی بیشترین عدم قطعیت در پیش‌بینی بارش در سال ۲۰۲۳ با بازه نوسان ۳۱ درصد نسبت به میانگین بلندمدت ۲۰۱۹-۱۹۹۱ و کمترین عدم قطعیت مربوط به سال ۲۰۲۶ با دامنه تغییرات ۱۱ درصد نسبت به دوره بلندمدت می‌باشد. پیش‌بینی دمای کشور نیز نشان می‌دهد که در ۵ سال آینده در هیچ‌یک از سال‌های پیش‌بینی میانگین دمای کشور کمتر از نرمال نیست و بی‌هنجاری دمای آن حداقل در طبقه ۰/۳-۰/۵ درجه سلسیوس قرار دارد که بیشترین افزایش در نیمه غربی کشور و شمال‌شرق مورد انتظار است. در دوره مورد مطالعه کمترین و بیشترین افزایش دما به ترتیب در سال‌های ۲۰۲۲ و ۲۰۲۶ رخ خواهد داد. برخلاف دیگر سال‌های مورد پیش‌بینی، در سال ۲۰۲۶ (سال آخر پیش‌بینی) تمامی پهنه کشور حداقل

- (۱۳۹۸). پیش‌بینی احتمالاتی ماهانه بارش و دمای کشور برای دوره ۲۰۲۰-۲۰۲۴ بر اساس پروژه DCCP سازمان جهانی هواشناسی، پروژه خاتمه یافته پژوهشکده اقلیم‌شناسی مشهد، ۹۲ صفحه.
- زرین، آ.؛ داداشی رودباری، ع. ع. و حسنی، س. (۱۴۰۱) پیش‌بینی دمای ماهانه ایران با استفاده از پروژه پیش‌بینی اقلیمی دهه‌ای (DCCP) در دهه آینده (۲۰۲۱-۲۰۲۸). *مجله فیزیک فضا و زمین*، ۴۸(۱)، ۲۱۱-۱۸۹.
- مسعودیان، س. ا.؛ کیخسروی کیانی، م. ص. و رعیت‌پیشه، ف. (۱۳۹۳). معرفی و مقایسه‌ی پایگاه داده‌ی اسفزاری با پایگاه‌های داده‌ی GPCP، GPCC و CMAP. *تحقیقات جغرافیایی*، ۲۹(۱۱۲)، ۸۸-۷۳.
- محمدی قلعه‌نی، م. و شرفی، س. (۱۴۰۱). ارزیابی دقت پایگاه داده‌های ERA5 و CRU TS4.05 برای متغیرهای بارش، دما و تبخیر/تعرق پتانسیل در اقلیم‌های مختلف ایران. *نشریه آبیاری و زهکشی ایران*، ۱۶(۵)، ۸۹۰-۸۷۹.
- Boer, G. J., Smith, D. M., Cassou, C., Doblaser-Reyes, F., Danabasoglu, G., Kirtman, B., Kushnir, Y., Kimoto, M., Meehl, G. A., Msadek, R., Mueller, W. A., Taylor, K. E., Zwiers, F., Rixen, M., Ruprich-Robert, Y., & Eade, R. (2016). The Decadal Climate Prediction Project (DCPP) contribution to CMIP6. *Geosci. Model Dev.*, 9, 3751-3777.
- CLIVAR (International CLIVAR Project Office). (2011). Decadal and bias correction for decadal climate predictions. January. International CLIVAR Project Office, CLIVAR Publication Series No., 150.
- Dewitte, S., Cornelis, J. P., Müller, R., & Munteanu, A. (2021). Artificial intelligence revolutionizes weather forecast, climate monitoring and decadal prediction. *Remote Sensing*, 13(16), 3209.
- Doblaser-Reyes, F. J., Andreu-Burillo, I., Chikamoto, Y., García-Serrano, J., Guemas, V., Kimoto, M., Mochizuki, T., Rodrigues, L. R. L., & Van Oldenborgh, G. J. (2013). Initialized near-term regional climate change prediction. *Nature Communication*, 16(4), 1715.
- ESGF. (2022). DCCP. <https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/>
- Hawkins, E., Tietsche, S., Day, J., Melia, N., Haines, K., & Keeley, S. (2016). Aspects of designing and evaluating seasonal-to-interannual Arctic sea-ice prediction systems. *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 142, 672-683.
- Hermanson, L., Smith, D., Seabrook, M., Bilbao, R., Doblaser-Reyes, F., Tourigny, E., Lapin, V., Kharin, V. V., Merryfield, W. J., Sospedra-Alfonso, R., Athanasiadis, P., Nicoli, D., Gualdi, S., Dunstone, N., Eade, R., Scaife, A., Collier, M., O'Kane, T., Kitsios, V., Sandery, P., Pankatz, K., Früh, B., Pohlmann, H., Müller, W., Kataoka, T., Tatebe, H., Ishii, M., Imada, Y., Kruschke, T., Koenigk, T., Karami, M. P., Yang, S., Tian, T., Zhang, L., Delworth, T., Yang, X., Zeng, F., Wang, Y., Counillon, F., Keenlyside, N., Bethke, I., Lean, J., Luterbacher, J., Kolli, R. K., & Kumar, A. (2022). WMO Global Annual to Decadal Climate Update: A Prediction for 2021-25. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 103(4), E1117-E1129. doi: 10.1175/BAMS-D-20-0311.1.
- Knight J. R., Andrews M. B., Smith D. M., Arribas A., Colman A. W., Dunstone N. J., Hermanson L., MacInchlan C., Peterson K. A., Scaife A. A., & Williams A. (2014). Predictions of Climate Several Years Ahead
- فلامرزی، ی.؛ ملبوسی، ش.؛ کریمیان، م.؛ پاکدامن، م. و کوهی، م. (۱۴۰۱). پیش‌بینی اقلیم کشور در بازه ۱ الی ۵ سال آینده. پروژه خاتمه یافته، کارفرما: سازمان پدافند غیرعامل کشور، مجری: پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو- پژوهشکده اقلیم‌شناسی مشهد، ۱۲۵ صفحه.
- بابائیان، ا.؛ مدیریان، ر.؛ کریمیان، م. و جوانشیری، ز. (۱۴۰۰). پیش‌بینی چندسالانه بارش ایران با مقیاس‌کاهی پرونداد مدل‌های DCCP، مطالعه موردی: دوره ۲۰۲۳-۲۰۱۹. *نشریه پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی*، ۲(۶)، ۶۳-۷۸.
- بابائیان، ا.؛ مدیریان، ر.؛ کریمیان، م. و جوانشیری، ز. (۱۳۹۹). یافته‌های پروژه جدید پیش‌بینی چندسالانه سازمان جهانی هواشناسی DCCP برای پیش‌بینی بارش ایران در دوره ۲۰۲۰-۲۰۲۴. *هشتمین کنفرانس ملی مدیریت منابع آب ایران*، ۲۷ بهمن ۱۳۹۹، دانشگاه فردوسی مشهد.
- بابائیان، ا.؛ مدیریان، ر.؛ کریمیان، م. و جوانشیری، ز.

- Using an Improved Decadal Prediction System. *Journal of Climate*, 27(20), 7550-7567.
- Kushnir, Y., Scaife, A. A., Arritt, R., Balsamo, G., Boer, G., Doblas-Reyes, F., Hawkins, E., Kimoto, M., Kolli, R. K., Kumar, A., Matei, D., Matthes, K., Müller, W. A., O'Kane, T., Perlwitz, J., Power, S., Raphael, M., Shimp, A., Smith, D., Tuma, M., & Wu, B. (2019). Towards operational predictions of the near-term climate. *Nature Climate Change*, 9. pp. 94-101. ISSN 1758-6798
- Leung L. Y.A., & North, G. R. (1990). Information theory and climate prediction. *Journal of Climate*, 3, 1-14.
- Meehl, G. A., Goddard, L., Boer, G., Burgman, R., Branstator, G., Cassou, C., Corti, S., Danabasoglu, G., Doblas-Reyes, F., Hawkins, E., Karspeck, A., Kimoto, M., Kumar, A., Matei, D., Mignot, J., Msadek, R., Navarra, A., Pohlmann, H., Rienecker, M., Rosati, T., Schneider, E., Smith, D., Sutton, R., Teng, H., van Oldenborgh, G. J., Vecchi, G., & Yeager, S. (2014). Decadal Climate Prediction: An Update from the Trenches. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95(2), 243-267. doi: 10.1175/BAMS-D-12-00241.1.
- Rubinetti, S., Taricco, C., Alessio, S., Rubino, A., Bizzarri, I., & Zanchettin, D. (2020). Robust decadal hydroclimate predictions for northern Italy based on a twofold statistical approach. *Journal of Atmosphere*, 11(6), 671.
- Shukla, J. (1981). Dynamical predictability of monthly means. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 38(12), 2547-2572.
- Smith, D. M., Eade, R., & Pohlmann, H. (2013). A comparison of full field and anomaly initialization for seasonal to decadal climate prediction. *Journal of Climate Dynamics*, 41, 3325-3338.
- Smith, D. M., Eade, R., Scaife, A. A., Caron, L. - P., Danabasoglu, G., DelSole, T. M., Delworth, T., Doblas-Reyes, F. J., Dunstone, N. J., Hermanson, L., Kharin, V., Kimoto, M., Merryfield, W. J., Mochizuki, T., Müller, W. A., Pohlmann, H., Yeager, S., & Yang, X. (2019). Robust skill of decadal climate predictions. *Npj Climate and Atmospheric Science*, 2(1), 1-10.
- Taylor, K.E., Stouffer, R.J. & Meehl, G.A. (2012). An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 93, 485-498
- WCRP. (2022). WMO-WCRP portal: <https://www.wcrp-climate.org/dcp-overview>; available in: 24/1/2020.