پیش‌بینی چندسالانه بارش و دمای ایران و کشورهای همسایه در دوره ۲۰۲۶-۲۰۲۲ با استفاده از مدل‌های پیش‌بینی دهه‌ای DCPP

ایمان بابائیان، زهره جوانشیری، راهله مدیریان، لیلی خزانه‌داری، یاشار فلامرزی، شراره ملبوسی، مریم کریمیان مرتضی پاکدامن، منصوره کوهی

پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، پژوهشکده اقلیم‌شناسی، مشهد

Iman Babaeian, Zohreh Javanshiri, Raheleh Modirian, Leili Khazanedari, Yashar Falamarzi, Sharareh Makbusi, Maryam Karilian, Morteza Pakdaman, Mansureh Koohi

Climate Research Institute, Atmospheric Science and Meteorological Research Center (SMERC), Mashhad, Iran

مقاله قبل از انتشار (ویراستاری نشده)

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 MPI-ESM1.2-LR، MIROC6 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 (۲۰۲۶-۲۰۲۲) بیش از نرمال نخواهد بود و محتمل‌ترین سال‌های با بارش کمتر از نرمال سال‌های ۲۰۲۲ و ۲۰۲۵ و نرمال سال ۲۰۲۳ است. با توجه به پیش‌بینی‌پذیری بالای انسو و تاثیر آن بر افزایش بارش ایران، وقوع النینو در سال ۲۰۲۳ می‌تواند تاییدی بر پیش‌بینی بارش نرمال در سال ۲۰۲۳ باشد. انتظار می‌رود در ۵ سال آینده میانگین دمای کشور بیشتر از نرمال باشد و حداقل بی‌هنجاری مورد انتظار دما در طبقه ۰٫۵-۰ درجه سلسیوس پیش‌بینی می‌شود. بیشترین افزایش دما در سال‌های ۲۰۲۲ و ۲۰۲۶ در نیمه غربی و شمال‌شرق 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 بیشتر از نرمال برآورد گردید.

کلمات کلیدی: DCPP، 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 به طور عملیاتی توسط چند مرکز بین‌المللی پیش‌بینی اقلیمی منتشر شد. تا قبل از آن خلاء به نسبت بزرگی بین پیش‌بینی‌های بلندمدت (با برد زمانی حداکثر یک سال) و پیش‌نگری‌های اقلیمی (با بر زمانی بیش از یک دهه) وجود

داشت. برای غلبه به چالش یادشده و پر کردن خلاء موجود در پیش‌بینی‌های اقلیمی با برد یک تا ۱۰ سال آینده، ایده پیش‌بینی دهه‌ای (Decadal Climate Prediction Project) یا A2D (Annual to Decadal prediction) ارائه شد. پیش‌بینی دهه‌ای توانمندی مدل‌های اقلیمی را در پیش‌بینی نوسانات اقلیمی در بازه یک سال تا یک دهه آینده را با مطالعه رفتار پیش‌بینی‌های گذشته‌نگر بررسی و نحوه تاثیرگذاری 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، درحالیکه در پیش‌نگری‌های (Projection) دهه‌ای از داده‌های شرایط اولیه مربوط به زمان واقعی اجرای مدل استفاده نمی‌شود(مانند سناریوهای هیات بین‌الدول تغییراقلیم).

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 آنصورت می‌توان اطلاعاتی درخصوص مشخصه‌های آماری جو در زمان مورد نظر بدست آورد. شرایط جو در بلندمدت با دقت زیاد و در مقیاس روزانه عموما 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. به دلیل اینکه تغییرات دمای سطح اقیانوس‌ها به آرامی صورت می‌گیرد، لذا پیش‌بینی شرایط مرزی در مناطق حاره‌ای به نسبت راحت‌تر است زیرا تغییرات آن متاثر از دمای سطح اقیانوس‌ها است. اما به دلیل تغییرپذیری زیاد شرایط جوی، پیش‌بینی شرایط مرزی در عرض‌های میانه ، بویژه در زمستان، به مراتب دشوارتر است.

آغازگری نقش تعیین کننده‌ای در پیش‌بینی‌های اقلیمی دارد؛ بدون آغازگری امکان پیش‌بینی اقلیم در زمان مشخص وجود ندارد، اما امکان برآورد میانگین و تغییرپذیری اقلیم در زمان مورد نظر در آینده وجود دارد. پیش‌بینی‌های دینامیکی زیرفصلی تا فصلی از جمله پیش‌بینی‌های با آغازگری بوده و پیش‌بینی‌های (پیش‌نگری) مبتنی بر سناریوهای اقتصادی اجتماعی (SSP) مورد استفاده در گزارش‌های IPCC از جمله پیش‌بینی‌های بدون آغازگری هستند. اولین تلاش‌ها برای پیش‌بینی اقلیمی توسط Shukla (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 بطور 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 همکاران (۱۹۹۰) پیش‌بینی‌پذیری اقلیم را با تکیه بر شرایط اولیه و مقادیر نسبت سیگنال به نوفه را مطالعه کردند. آنها نشان دادند هنگامیکه 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 قابل ارتقاء است (Leung et al., 1990). میهل و همکاران (۲۰۱۴) نشان دادند که اریبی پیش‌بینی دهه‌ای بصورت تابعی از زمان افزایش می‌یابد و دارای منشاءهای مختلفی نظیر سوگیری کلی مدل‌ها به تغییر از شرایط اولیه مشاهداتی به شرایط ترجیحی ناشی از دینامیک مدل (شوک 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 (Meehl et al., 2014). 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 (Doblas-Reyes et al., 2013; Hermanson, 2022). در تحقیقی نایت و همکاران (۲۰۱۴) با استفاده از یک سیستم پیش‌بینی بهبود یافته دهه‌ای، با مطالعه پیش‌بینی آب و هوا 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 انجام شده بر روی این مدل نشان داد که مهارت پیش‌بینی مدل به دلیل تفاوت در مدل‌های اقلیمی در زیرساخت مدل، بهبود یافته است که سبب افزایش بهبود پیش‌بینی در مناطق حاره‌ای اقیانوس آرام شد، درحالیکه در عرض‌های بالا بهبود کمتری بدست آمد(Knight et. al., 2014). اسمیت و همکاران (۲۰۱۹)، مهارت پیش‌بینی دهه‌ای را با استفاده از مجموعه بزرگی از پیش‌بینی‌های همادی ارزیابی کردند و مهارت قابل‌توجهی در پیش‌بینی بارش و دمای سطحی بدست آوردند. نتایج آنها نشان داد که اقلیم دهه‌ای قابل‌پیش‌بینی‌تر از آن است که قبلا تصور می‌شد. این امر می‌تواند به آمادگی و سازگاری جامعه با نوسانات اقلیمی کمک کند (Smith et al., 2019). اخیرا تکنیک‌های هوش مصنوعی بصورت گسترده در پیش‌بینی هوا و اقلیم و پیش‌بینی دهه‌ای مورد استفاده قرار گرفته است (Dewitte et al., 2021). رابینتی و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهشی از روش‌های آماری شامل اعتبارسنجی متقابل خودرگرسیونی (cross-validation of autoregressive model) و نیز شبکه عصبی برای پیش‌بینی دهه‌ای هیدرواقلیمی 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 اینکه اطلاعات بسیار ارزشمندی را برای مدیریت منابع آبی فراهم آورد، برای پیش‌بینی‌های هیدرولوژیکی کوتاه مدت آتی نیز ابزارهای لازم را فراهم نمود (Rubinetti et al., 2020). 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) (DCPP) 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 DCPP در دو دوره تاریخی (۲۰۱۸-۱۹۸۹) و پیش‌بینی (۲۰۲۳-۲۰۱۹) و بارش شبکه‌ای GPCC در دوره ۲۰۱۸-۱۹۸۹ بعنوان داده‌های بازکاوی استفاده و دوره هدف پیش‌بینی ۲۰۲۳-۲۰۱۹ را درنظر گرفتند. نتایج آنها نشان داد که در مجموع میانگین بارش طی دوره ۲۰۲۳-۲۰۱۹ در محدوده نرمال تا کمتر از نرمال خواهد بود، به اینصورت که براساس 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 عمدتا 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 DCPP، بی‌هنجاری دمای ایران در دهه آینده در تمامی ماههای سال حداقل ۰,۹+ 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 (۲۰۲۶-۲۰۲۲)» است که در پژوهشکده اقلیم‌شناسی با هدف پیش‌بینی بارش و دمای هوای ایران و کشورهای منطقه به کمک برونداد مدل‌های مجموعه DCPP که با استفاده از داده‌های واقعی نوامبر ۲۰۲۱ برای پیش‌بینی سالانه تا دهه‌ای آغازگری شده‌اند، انجام پذیرفته است. پروژه DCPP به‌روزترین پروژه سازمان جهانی هواشناسی است که اولین پیش‌بینی آن در سال ۲۰۱۸ ارایه گردید. بخش دوم این مقاله به روش پژوهش شامل معرفی مختصر پروژه DCPP 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 (DCPP)

پیش‌بینی‌های دهه‌ای مقیاس زمانی از یک سال تا یک دهه را پوشش می‌دهند. اگرچه سطح اعتماد این پیش‌بینی‌ها نسبتا قابل‌قبول است، به‌ویژه هنگامیکه مدل‌های جفت‌شده اقلیمی با داده‌های شرایط اولیه واقعی آغازگری شوند، اما همواره با چالش‌های زیادی مواجه هستند. مهمترین این چالش‌ها شناخت و مدل‌سازی مکانیسم فیزیکی پیش‌بینی‌های چندسالانه و تحول زمانی هریک 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 (Kushnir, et al.; 2019). 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 (Doblas-Reyes et al. 2013; Taylor et. al., 2012). 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، درحالیکه 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 (Boer et. al., 2016). تجربیات حاصل از پروژه CMIP5 به طراحی پروژه DCPP 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 شبیه‌سازی‌ها، شامل dcppA ، dcppB و dcppC تشکیل شده‌اند. تفاوت dcppB با dcppA در این است که در dcppB فرض شده که سه آتشفشان مهم کره زمین در اندونزی، فیلیپین و مکزیک فعال شده باشند، درحالیکه در dcppA فرض بر عدم فعالیت آنها است. مولفه dcppC مربوط به مطالعات پیش‌بینی‌پذیری و موردی است(WCRP, 2022). مولفه A (dcppA) شامل آرشیوی از داده‌ها برای تجزیه و تحلیل گسترده از پیش‌بینی‌های تاریخی است که برای ارزیابی و شناخت مهارت پیش‌بینی دهه‌های تاریخی، بعنوان پایه‌ای برای بهبود در همه جنبه‌های پیش‌بینی دهه‌ای و مبنایی برای پیش‌بینی‌های در مقیاس سالانه تا دهه‌ای بکار می‌رود. واضح‌ترین نتایج تحلیل مولفه A، حصول مهارت پیش‌بینی تاریخی در محدوده‌های پیش‌بینی سالانه، چند ساله و دهه‌ای برای هر مدل و درنهایت، برای ترکیبی بهینه از این نتایج در یک پیش‌بینی چندمدلی است (Boer et al., 2016). در این گروه دو مولفه dcppA-hindcast (پیش‌بینی تاریخی با آغازگری مدل اقلیمی از داده‌های دیدبانی) و dcppA-historical (شبیه‌سازی تاریخی یا آینده بدون استفاده از آغازگری از داده‌های دیدبانی) نیز قرار دارند. مولفه B (dcppB) تولید، تجزیه، تحلیل و انتشار مداوم پیش‌بینی‌های چندمدلی شبه‌واقعی را بعنوان مبنایی برای استفاده در پیش‌بینی‌های عملیاتی بالقوه بعهده دارد. در این مولفه از یافته‌های پژوهشی مولفه A برای تولید نهایی پیش‌بینی‌های عملیاتی دهه‌ای استفاده می‌شود. پیش‌بینی‌های dcpp عموما در نوامبر هر سال آغازگری می‌شوند. برای واسنجی برونداد مدل‌های DCPP نیاز به استفاده از پیش‌بینی‌های تاریخی مولفه 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. مولفه C (dcpp C) مطالعات موردی نوسانات اقلیمی خاص، نظیر بررسی اثرات ناشی از واداشت‌های طبیعی مانند فوران آتشفشان‌ها (نظیر پیناتوبو و ...) را بعهده دارد. داده‌های این مولفه تحت فعالیت VolMIP در پایگاه ESGF موجود است که براساس آن می‌توان تاثیر فوران احتمالی آتشفشان پیناتوبو را بر پیش‌بینی متغیرهای هواشناسی بررسی کرد (پایگاه داده ESGF).

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 عربستان، بخش عمده‌ای از کشورهای پاکستان و افغانستان و کشورهای واقع در شمال ایران می‌باشند. داده‌های مدل‌های DCPP 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 (آذر ۱۴۰۱)، داده‌های سه مدل اقلیمی MPI-ESM1.2-LR ،MIRO6 و CNRM-ESM2-1 از اجراهای سال ۲۰۲۱ به ترتیب با تفکیک‌های افقی ۲۰۰×۲۰۰، ۲۵۰×۲۵۰ و ۲۵۰×۲۵۰ کیلومتر در دسترس می‌باشد.

جدول ۱- متغیرهای دردسترس مدل‌های dcpp از دو پایگاه ESGF (E) و JASMIN (J)

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

مقاله قبل از انتشار (ویراستاری نشده)

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 GPCC و ERA5 استفاده شد. کارآیی داده‌های دو پایگاه یادشده توسط مسعودیان و همکاران (۱۳۹۳)، میری و همکاران (۱۳۹۵) و محمدی و شرفی(۱۴۰۱) مورد بررسی و تایید قرار گرفته است. از آنجا که تفکیک افقی مدل‌های جهانی مورد استفاده در این پژوهش از ۲۰۰×۲۰۰ تا ۲۵۰×۲۵۰ کیلومتر متغیر بوده است، لذا طی فرآیند تصحیح اریبی، تفکیک افقی متغیرهای بارش و دما متناسب با تفکیک افقی داده‌های GPCC و ERA5 به ترتیب تا ۱ و ۰/۲۵ درجه قوسی افزایش یافت. دوره واسنجی داده‌ها ۲۰۱۴-۱۹۷۰ در نظر گرفته شد.

۲-۳- پس‌پردازش داده‌های DCPP بر مبنای شیوه‌نامه WMO

هیچ یک 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(Boer, et. al., 2016; CLIVAR, 2011). در آغازگری مدل‌های پیش‌بینی چندسالانه دو دیدگاه وجود دارد: آغازگری برمبنای مقدار اصلی(Full-field) داده‌ها و آغازگری برمبنای بی‌هنجاری داده‌ها. در آغازگری برمبنای داده‌های اصلی، مدل در آغاز به داده‌های دیدبانی نزدیک است، اما بتدریج که برد پیش‌بینی‌ها افزایش می‌یابد، برآورد مدل بسوی 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 برمبنای بی‌هنجاری، آغازگری مدل با استفاده از بی‌هنجاری مشاهدات بعلاوه میانگین مدل اقلیمی (که از شبیه‌سازی‌های گذشته‌نگر بدست آمده‌اند) انجام می‌شود. این روش تلاشی برای جلوگیری از رانش(Model Drift) مدل است. آغازگری برمبنای 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 اینکه اریبی فقط تابعی از برد پیش‌بینی باشد، برای هر برد خاص، یک اریبی جداگانه محاسبه می‌گردد. این فرآیند بطور یکسان برای تصحیح اریبی در هر دو روش آغازگری، یعنی آغازگری‌های برمبنای بی‌هنجاری و داده‌های اصلی بکار برده می‌شود. بعنوان مثال، برای یک سری از پیش‌بینی‌های خام اقلیمی مانند $Y_{kj\tau}$، که در آن k شماره عضو (Member) پیش‌بینی، j زمان آغازگری (زمان شروع پیش‌بینی) و τ برد پیش‌بینی است، می‌توان فرض 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، ۲۰۲۱۰۱۰۱۰۰۰۰ (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 اینصورت $X_{j\tau}$ 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:

$$\overline{X}_{\tau} = \sum_{j=year1}^{year2} \frac{X_{j\tau}}{N_x} \qquad (۱)$$

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

$$\bar{X}_3 = \frac{X_{1970,3}+X_{1971,3}+\cdots+X_{2016,3}}{45} \qquad (۲)$$

در واقع $\bar{X}_3$ میانگین داده‌های دیدبانی از سال ۱۹۷۲ تا ۲۰۱۶ است. حال اگر $\tau = ۵$ باشد، $\bar{X}_5$ میانگین داده‌های دیدبانی دوره ۱۹۷۴ تا ۲۰۱۶ خواهد بود. بی‌هنجاری از میانگین از رابطه (۳) پیروی می کند:

$$\mathbf{X'}_{j\tau} = \mathbf{X}_{j\tau} - \bar{X}_\tau \qquad (۳)$$

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

$$\{\bar{Y}\}_\tau = \sum_{j=year1}^{year2} \frac{\{Y\}_{j\tau}}{N_y} \qquad (۴)$$

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 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 تصحیح شده برحسب این بی‌هنجاری‌ها مقایسه می‌شوند.

$$\mathbf{Y'}_{kj\tau} = \mathbf{Y}_{kj\tau} - \{\bar{Y}\}_\tau \qquad (۵)$$

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

$$d_\tau = \{\bar{Y}\}_\tau - \bar{X}_\tau \qquad (۶)$$

و سپس پیش‌بینی تصحیح شده $\hat{Y}_{kj\tau}$ از رابطه (۷) تعیین می گردد:

$$\hat{Y}_{kj\tau} = \mathrm{Y}_{kj\tau} - d_r = \mathrm{Y}_{kj\tau} - \{\bar{Y}\}_\tau + \bar{X}_\tau = \bar{X}_\tau + \mathrm{Y'}_{kj\tau} \qquad (۷)$$

نکته مهم این است که بایستی طول دوره سال ۱ تا سال ۲ برای همه بردهای پیش‌بینی یکسان باشد تا برآوردها سازگار شوند (Hawkins et al., 2016) و از پیچیدگی‌ها در تفسیر پیش‌بینی‌ها نسبت به دوره‌های پایه مختلف پرهیز شود (Smith, et al., 2013b). 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. درنهایت از آنجا که 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 مستقیما قابل انجام نبوده و برمبنای متغیرهای دیدبانی مرتبط (غیرمستقیم) انجام می‌شود. کارآیی روش تصحیح اریبی مورد استفاده با استفاده از پنج سنجه آماری Bias، MAE، RMSE، N-S و KGE مورد بررسی قرار گرفت که در بخش بعد نتایج آنها توضیح داده می‌شود.

مقاله قبل از انتشار (ویراستاری نشده)

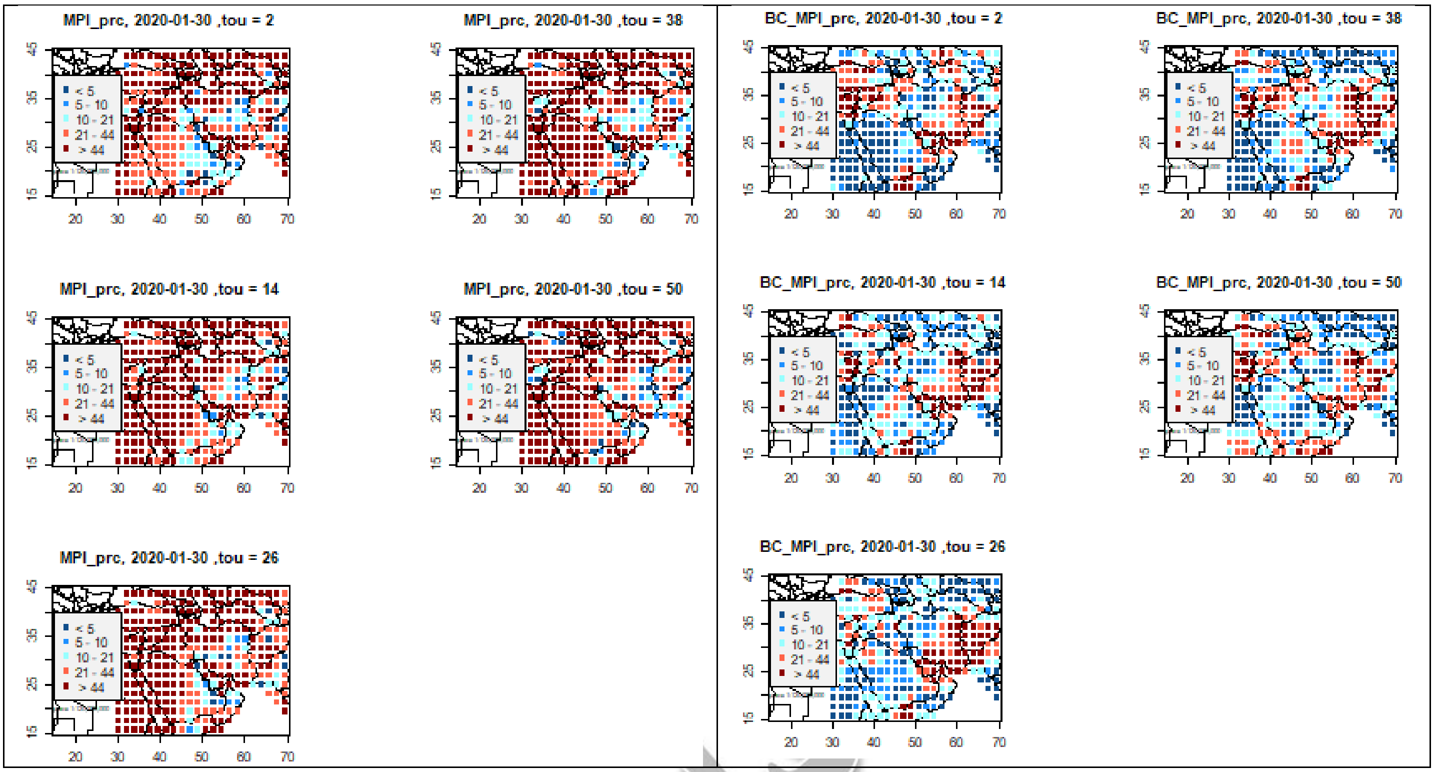
۳- نتایج و بحث

یافته‌های این پژوهش برای متغیرهای بارش و دما در سه برش زمانی ۵- ساله، سالانه و فصلی برای سه مدل شامل MPI-ESM1.2-LR، MIRO6 و CNRM-ESM2-1 برای دوره ۲۰۲۶-۲۰۲۲ به صورت بی‌هنجاری نسبت به دوره مشاهداتی ۲۰۱۹-۱۹۹۱ ارایه 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 DCPP سازمان جهانی هواشناسی در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است. برای آگاهی از توزیع فضایی خطاها در پهنه مورد مطالعه در هریک 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 فرآیند 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 میانگین قدرمطلق خطای بارش قبل از تصحیح اریبی برای مثال برای پیش‌دید ۳ (پیش‌بینی ۳ ماه جلوتر) در طبقه ۴۴-۲۱ م.م. قرار دارد، درحالیکه بعد از تصحیح عمدتا تا طبقه ۲۱-۵ م.م. 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 شمال‌غرب کشور عمدتا بیش از ۴۴ م.م. است در حالیکه بعد از تصحیح اریبی به کمتر از ۲۱ م.م. کاهش یافته است. با این حال قدرمطلق خطای بعد از تصحیح بهبود قابل ملاحظه‌ای در دو سوی رشته‌کوه البرز نشان نمی‌دهد اما اریبی بارش در نیمه جنوبی کشور به مقدار قابل ملاحظه‌ای بهبود یافته است و از طبقه خطای ۲۱-۵ م.م. تا طبقه ۱۰-۵ م.م. کاهش یافته است. در جدول ۲، مقادیر شاخص‌های آماری قبل و بعد از تصحیح اریبی بارش 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 م.م. و بعد از تصحیح اریبی بین ۲۸-۲۶ قرار دارد. همچنین ضریب همبستگی بین داده‌های خام مدل و بارش مشاهداتی بین ۰,۳۷-۰,۳۱ است در حالیکه بعد از تصحیح اریبی به ۰,۷۳-۰,۶۱ ارتقاء یافته است.

مقاله قابل انتشار (ویراستاری نشده)



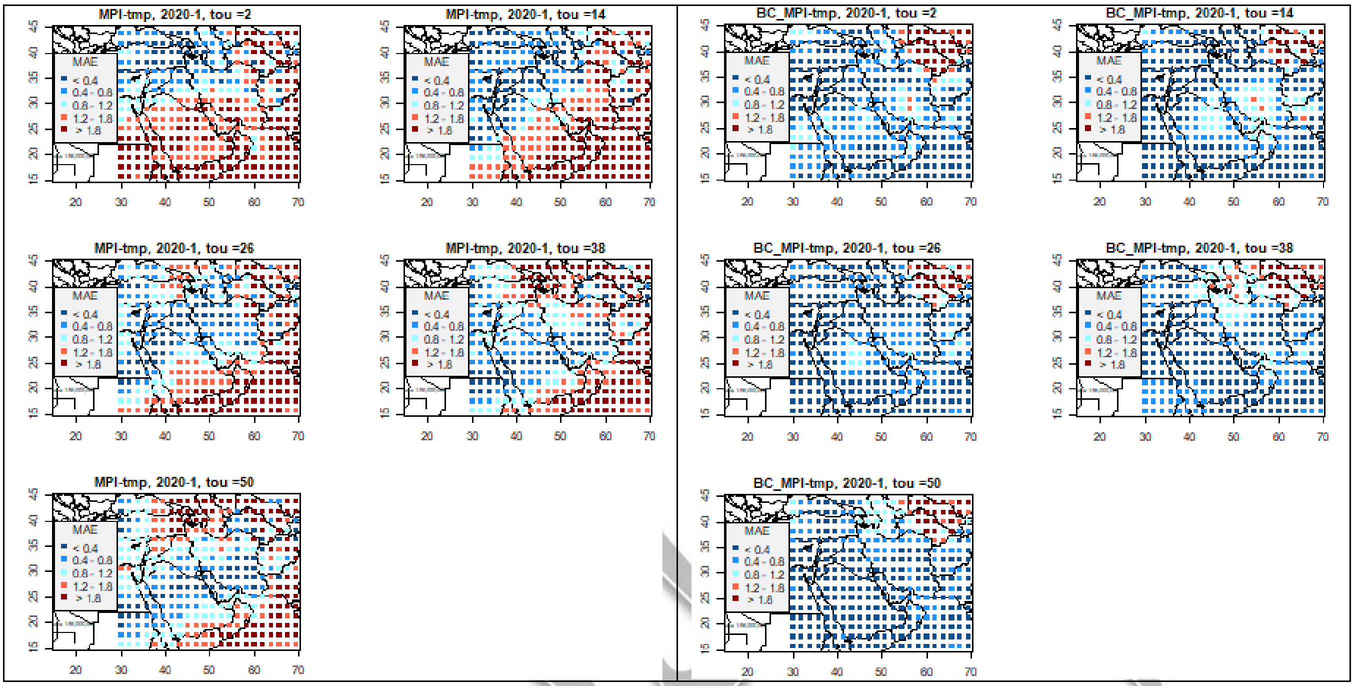
شکل ۱- پهنه‌بندی فضایی قدرمطلق اریبی پیش‌بینی بارش سال ۲۰۲۰ برای ماه نمونه ژانویه- داده‌های تصحیح نشده (چپ) و تصحیح شده (راست) بر اساس پیش‌دیدهای مختلف، مدل MPI-ESM1.2-LR (نتایج دو مدل دیگر و سایر ماهها درج نشده است).

جدول۲- 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 م.م. و سایر شاخص‌های بدون بعد هستند.)

مدل	شاخص	Bias	MAE	RMSE	N-S	r	KGE
MPI-ESM1.2-LR	قبل از تصحیح	−۱/۸۰	۳۸/٤۹	٥٤/۳۰	−٤/۰	۰/۳٥	−۱/۲۰
	بعد از تصحیح	−۰/۲٥	۱٥/۲۱	۲٦/٤۳	۰/۰٤	۰/۷۳	۰/۲
MIROC6	قبل از تصحیح	−۲/٤۲	٤٦/۷٥	٦۰/۹۰	−٤/۹۱	۰/۳۷	−۱/۷۷
	بعد از تصحیح	−۰/٤۲	۱٥/٥٦	۲۸/۱۲	−۰/۳۳	۰/٦٤	۰/۰۷
CNRM-ESM2-1	قبل از تصحیح	−۲/۷۷	٤۲/۰٤	٥٦/۳۲	−٥/٦۷	۰/۳۱	−۲/۰٦
	بعد از تصحیح	−۰/٤۹	۱٦/۸۳	۲۸/۰۹	−۰/٤٦	۰/٦۱	۰

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 DCPP 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 فرآیند 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) بین۱/۸-۰/۴ سلسیوس است که بعد از تصحیح به 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 ۱/۸-۰/۴ولی بعد از تصحیح در طبقه ۰/۸-۰/۴ قرار دارد که بیشترین تصحیح اریبی به مقدار حدود ۱

درجه 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 بین۲/۵–۱/۸ درجه و بعد از تصحیح اریبی بین ۰/۸۹–۰/۸۷ درجه می‌باشد. همچنین ضریب همبستگی بین داده‌های خام مدل و دمای مشاهداتی بین ۰/۹۳–۰/۹۲ و با داده‌های تصحیح شده ۰/۹۹ است.



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

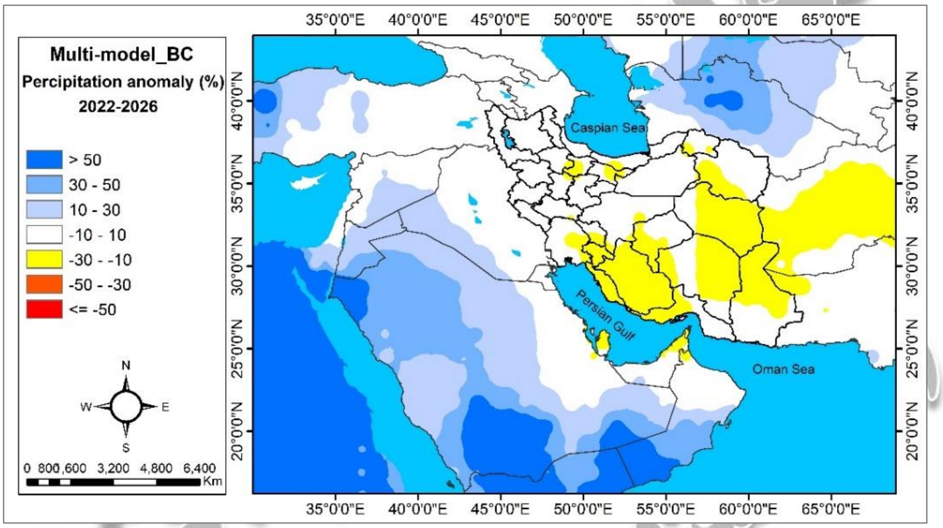
جدول ۳– مقادیر شاخص‌های آماری قبل و بعد از تصحیح اریبی دما برای منطقه مورد مطالعه (شاخص‌های اریبی و خطا برحسب درجه سلسیوس و سایر شاخص‌ها بی‌بعد هستند.)

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

۲-۳- پیش‌بینی بارش

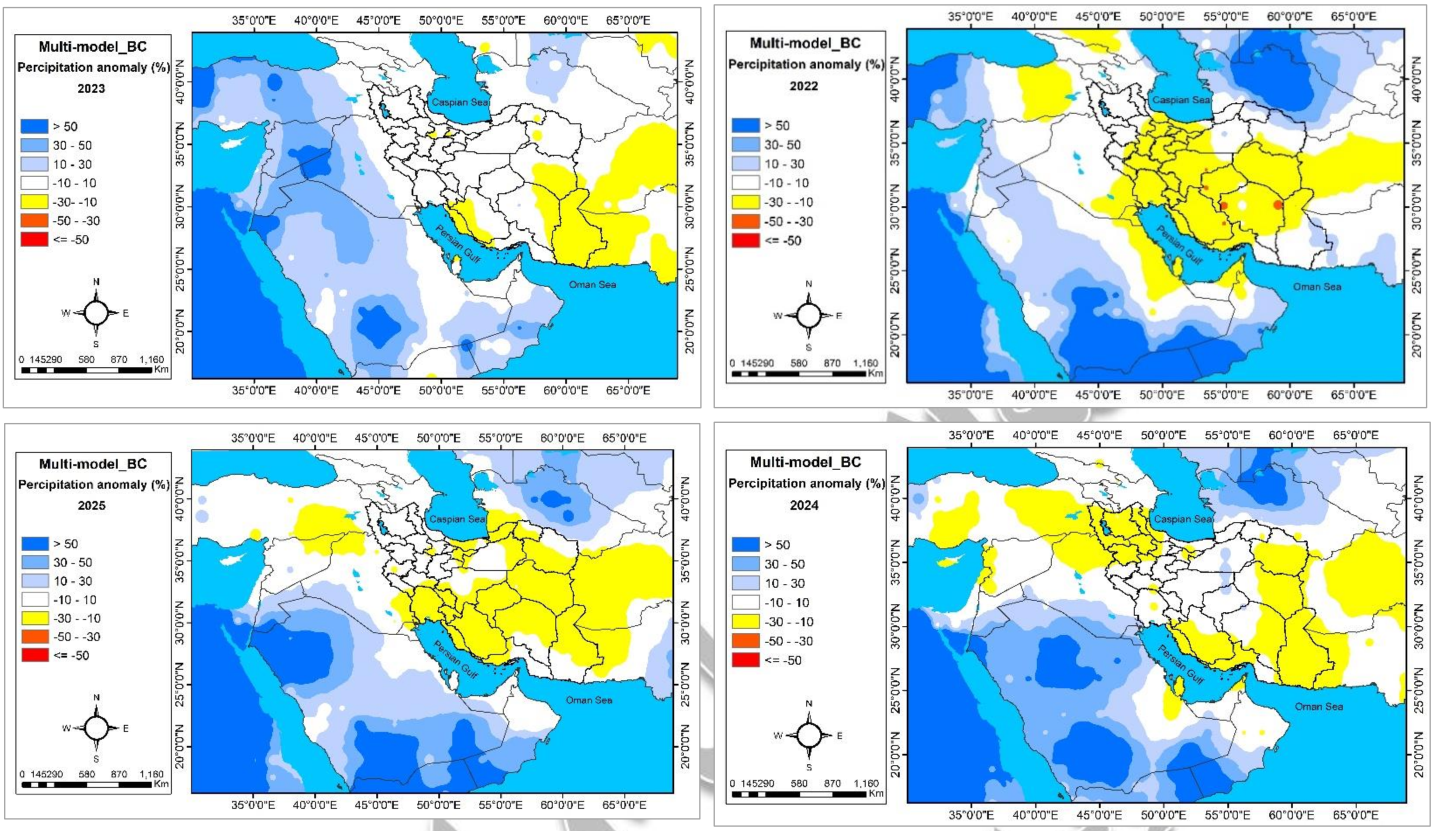
پیش‌بینی بی‌هنجاری بارش منطقه مورد مطالعه نسبت به دوره ۱۹۹۱–۲۰۱۹ به صورت میانگین پنج–ساله در شکل ۳ آورده شده است. شکل یادشده با تلفیق پیش‌بینی‌های تصحیح شده سه مدل اقلیمی MPI-ESM1.2-LR، MIRO6 و CNRM-ESM2-1 تهیه شده است. مطابق شکل یادشده بارش کشور در دوره پنج–ساله ۲۰۲۲–۲۰۲۶ به صورت میانگین در محدوده نرمال تا کمتر از نرمال برآورد می‌شود. توزیع مکانی بارش به گونه‌ای است که در

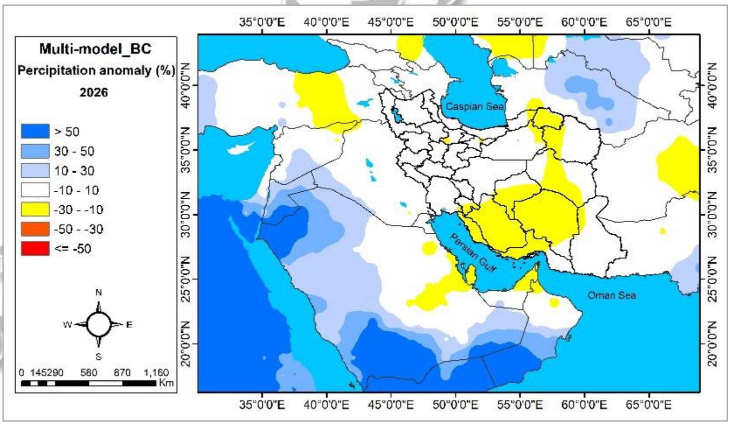
استان‌های واقع در دوسوی رشته کوههای زاگرس میانی و شمالی، شمال‌غرب، دو سوی رشته‌کوه البرز(به استثنای بخش‌هایی از دامنه جنوبی)، نوار شمال‌شرق و جنوب‌شرق در محدوده نرمال (بین ۱۰ درصد کمتر تا ۱۰ درصد بیشتر از نرمال) و سایر مناطق کشور بارشی در محدوده ۱۰٪- تا ۳۰٪- را دریافت خواهند کرد. بارش در کشورهای همسایه 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 یافته های Hermanson 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 ۲۰۲۵-۲۰۲۱ 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 (آغازگری در سال ۲۰۲۰) است. در عین حال مطابق پیش‌بینی آنها بارش در دوره ۲۰۲۶-۲۰۲۱ در نیمه جنوبی و شرقی کشور گرایش به بیشتر از نرمال و در نیمه غربی در محدوده نرمال است.



شکل۳-پیش‌بینی چندمدلی بی‌هنجاری بارش ایران و کشورهای همسایه برای دوره ۲۰۲۶-۲۰۲۲ (بر حسب درصد)

در شکل ۴ میانگین چندمدلی بی‌هنجاری بارش کشور به تفکیک سال آورده شده است. نتایج نشان می‌دهند که در هیچ یک 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 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 ۲۰۲۶به ترتیب با ۳۱ و ۱۱ درصد نوسان نسبت به دوره بلندمدت می‌باشد.

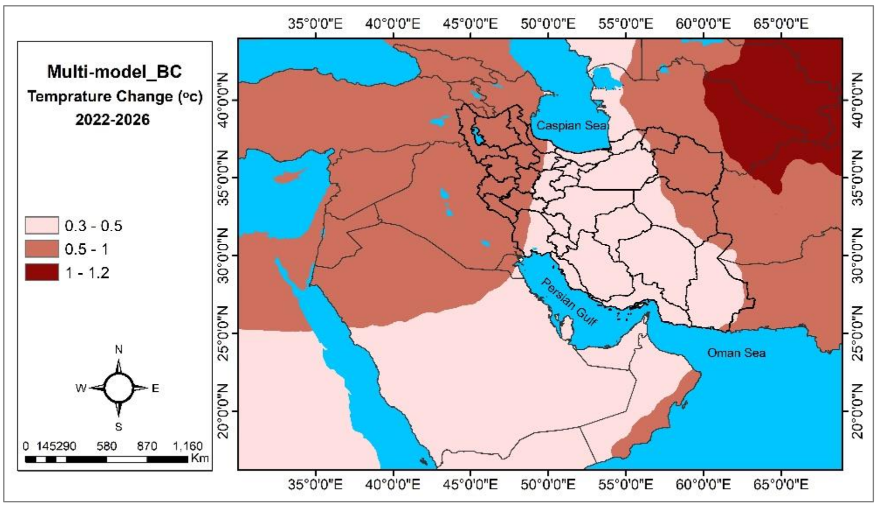
شکل۴- پهنه‌بندی پیش‌بینی چندمدلی بی‌هنجاری بارش سالانه منطقه مورد مطالعه به تفکیک برای سال‌های ۲۰۲۲، ۲۰۲۳، ۲۰۲۴، ۲۰۲۵ و ۲۰۲۶

جدول ۴- پیش‌بینی تغییرات سالانه بارش پنج سال آینده ایران (۲۰۲۶-۲۰۲۲) 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

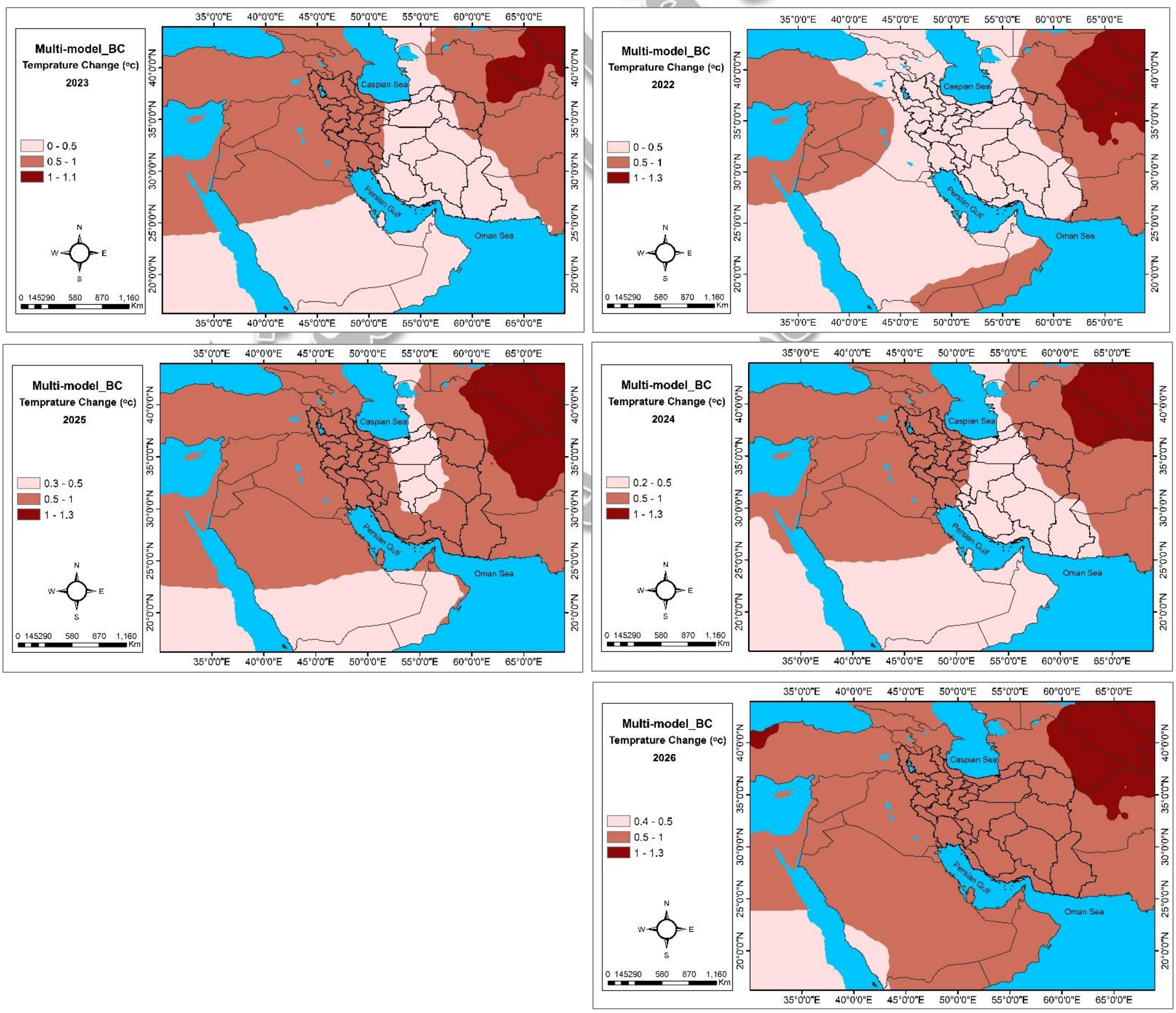
۳-۳- پیش‌بینی دما

پیش‌بینی بی‌هنجاری دمای ایران و کشورهای همسایه به صورت میانگین بی‌هنجاری پنج-ساله دوره ۲۰۲۶-۲۰۲۲ در شکل ۵ نشان داده شده است. شکل یادشده با استفاده از تلفیق پیش‌بینی‌های تصحیح شده حاصل از سه مدل اقلیمی MPI-ESM1.2-LR، MIRO6 و CNRM-ESM2-1 تهیه شده است. شکل نشان می‌دهد که دمای کشور در دوره مورد مطالعه بین ۰/۳ تا ۱ درجه بیشتر از نرمال خواهد بود. در بخش شمال‌شرقی منطقه مورد مطالعه شامل بخش‌هایی از کشورهای ترکمنستان وشمال افغانستان بی‌هنجاری دما بیش از ۱ درجه برآورد شده است. افزایش دمای یادشده در این منطقه می‌تواند منجر به کاهش سهم بارش برف به ویژه بر روی کوه‌های مرتفع هندوکش در ۵ سال آینده گردد. در پهنه ایران بیشترین افزایش دما بین ۰/۵ تا ۱ درجه در شمال‌شرق، نوار شرقی، شمال‌غرب، غرب رشته‌کوه 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 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 و در سایر مناطق کشور تا ۰/۵ درجه 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 مواجه خواهند شد. در سال ۲۰۲۵ به جز دوسوی رشته‌کوه البرز و مناطق مرکزی کشور که دارای بی‌هنجاری بین ۰/۳ تا ۰/۵ درجه خواهند بود، میانگین دمای سایر مناطق کشور بین ۰/۵ تا ۱ درجه فراتر از نرمال برآورد می‌شود. بیشینه بی‌هنجاری دمای کشور بین ۰/۵ تا ۱ درجه در سال ۲۰۲۶ رخ می‌دهد. در دوره مورد بررسی بیشترین بی‌هنجاری دما در بین کشورهای همسایه بین ۱ تا ۱/۵ درجه در کشور افغانستان رخ می‌دهد.



مقاله قبل از انتشار (ویراستاری نشده)

شکل۵-پیش‌بینی چندمدلی بی‌هنجاری دمای ایران و کشورهای همسایه برای دوره ۲۰۲۶-۲۰۲۲ (بر حسب درجه سلسیوس)



شکل۶- پهنه‌بندی پیش‌بینی چندمدلی بی‌هنجاری دمای سالانه منطقه مورد مطالعه به تفکیک برای سال‌های ۲۰۲۲، ۲۰۲۳، ۲۰۲۴، ۲۰۲۵ و ۲۰۲۶

در جدول ۵ میانگین افزایش دمای کشور در ۵ سال آینده ارایه 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 دارای بیشترین عدم قطعیت می‌باشد. یافته‌های این پژوهش در مقایسه با نتایج Hermanson و همکاران (۲۰۲۲) دارای اریبی سرد است، به اینصورت که آنها دمای ایران و کشورهای منطقه در پنج سال آینده بین ۰/۵ تا ۲ درجه فراتر از نرمال پیش‌بینی کرده‌اند در حالیکه در پژوهش حاضر بین ۰/۳ تا ۱/۲ است. بیشترین تطابق پژوهش حاضر با نتایج Hermanson و همکاران (۲۰۲۲) مربوط به گوشه شمال‌شرق و شمال‌غرب و غرب کشور (با ۱ تا ۱/۲ درجه افزایش نسبت به نرمال) و جنوب‌شرق کشور (با ۰/۳ تا ۰/۵ درجه افزایش نسبت به نرمال) است.

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

سال	۲۰۲۲	۲۰۲۳	۲۰۲٤	۲۰۲۵	۲۰۲٦
حداقل افزایش	۰/٤	۰/٤	۰/٤	۰/۳	۰/۳
حداکثر افزایش	۰/۵	۰/٦	۰/۷	۱/۰	۱/۰
میانگین افزایش	۰/۵	۰/٦	۰/٦	۰/٦	۰/٦

٤- نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از شیوه‌نامه استاندارد سازمان جهانی هواشناسی و بکارگیری برونداد سه مدل اقلیمی جهانی دهه‌ای MPI-ESM1.2-LR، MIRO6 و CNRM-ESM2-1، پیش‌بینی ۱ تا ۵ سال آینده بارش و دمای ایران و کشور های 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 هیچ یک 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 هیچ یک از سال‌های پیش‌بینی میانگین دمای کشور کمتر از نرمال نیست و بی‌هنجاری دمای آن حداقل در طبقه ۰/۵-۰/۳ 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 به مقدار ۰/۵ درجه 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 پیش‌بینی 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 پیش‌بینی شده با مقادیر مشاهداتی نشان دهنده هماهنگی کلی پیش‌بینی‌ها می‌باشد. با این حال بایستی توجه کرد که پیش‌بینی‌های چندسالانه برخلاف پیش‌بینی‌های کوتاه مدت بوده دارای عدم قطعیت بیشتری بوده و نبایستی به صورت پیش‌بینی یقینی در نظر گفته 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.

سپاس‌گزاری:

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.

منابع

۱. بابائیان، ایمان، جوانشیری، زهره، مدیریان، راهله، خزانه‌داری، لیلی ، فلامرزی، یاشار، ملبوسی، شراره، کریمیان، مریم، پاکدامن، مرتضی، کوهی، منصوره. (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.

۲. بابائیان، ایمان، مدیریان، راهله، کریمیان، مریم، جوانشیری، زهره. (۱۴۰۰). پیش‌بینی چندسالانه بارش ایران با مقیاس‌کاهی برونداد مدل‌های DCPP، مطالعه موردی: دوره ۲۰۲۳-۲۰۱۹. نشریه پژوهش‌های تغییرات آب وهوایی، ۲(۶)، ۶۳-۷۸.

۳. بابائیان، ایمان، مدیریان، راهله، کریمیان، مریم، جوانشیری، زهره. (۱۳۹۹). یافته های پروژه جدید پیش بینی چند سالانه سازمان جهانی هواشناسی DCPP برای پیش بینی بارش ایران در دوره ۲۰۲۰-۲۰۲۴. هشتمین کنفرانس ملی مدیریت منابع آب ایران، ۲۷ بهمن ۱۳۹۹، دانشگاه فردوسی مشهد.

۴. بابائیان، ایمان، مدیریان، راهله، کریمیان، مریم، جوانشیری، زهره. (۱۳۹۸). پیش‌بینی احتمالاتی ماهانه بارش و دمای کشور برای دوره ۲۰۲۴-۲۰۲۰ بر اساس پروژه DCPP سازمان جهانی هواشناسی، پروژه خاتمه یافته پژوهشکده اقلیم‌شناسی مشهد، ۹۲ صفحه.

۵. زرین، آذر، داداشی رودباری، عباسعلی، حسنی، سمیرا. (۱۴۰۱) پیش‌بینی دمای ماهانه ایران با استفاده از پروژه پیش‌بینی اقلیمی دهه‌ای(DCPP) در دهه آینده (۲۰۲۸-۲۰۲۱). مجله فیزیک فضا و زمین، ۴۸(۱)، ۱۸۹-۲۱۱.

مقاله قبل از انتشار (ویراستاری نشده)

۶. مسعودیان، سید ابوالفضل، کیخسروی کیانی، محمد صادق، رعیت پیشه، فاطمه. (۱۳۹۳). معرفی و مقایسه‌ی پایگاه داده‌ی اسفزاری با پایگاه‌های داده‌ی GPCC ، GPCPو CMAP . تحقیقات جغرافیایی، ۲۹(۱۱۲)، ۸۸-۷۳.

۷. رضیئی، صیب، رحیمی، مجتبی. (۱۳۹۵). ارزیابی و مقایسه آماری داده‌های بارش TRMM و GPCC با داده‌های مشاهده‌ای در ایران. فیزیک زمین و فضا، ۴۲(۳)، ۶۵۷-۶۷۲.

۸ محمدی قلعه نی، مهدی، شرفی، سعید. (۱۴۰۱). ارزیابی دقت پایگاه داده‌های CRU TS4.05 و ERA5 برای متغیرهای بارش، دما و تبخیرتعرق پتانسیل در اقلیم‌های مختلف ایران. نشریه آبیاری و زهکشی ایران،۱۶(۵)، ۸۷۹-۸۹۰.

9. Boer, G. J., Smith, D. M., Cassou, C., Doblas-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., and Eade, R. (2016). The Decadal Climate Prediction Project (DCPP) contribution to CMIP6. Geosci. Model Dev., 9, 3751-3777.
10. CLIVAR (International CLIVAR Project Office). (2011). Decadal and bias correction for decadal climate predictions. January. International CLIVAR Project Office, CLIVAR Publication Series No., 150.
11. 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.
12. Doblas-Reyes, F. J., Andreu-Burillo, I., Chikamoto, Y., García-Serrano, J., Guemas, V., Kimoto, M., Mochizuki, T., Rodrigues, L. R. L., and van Oldenborgh, G. J. (2013). Initialized near-term regional climate change prediction. Nature Communication, 16(4), 1715.
13. ESGF. (2022, May). DCPP. https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/
14. Hawkins, E., Tietsche, S., Day, J., Melia, N., Haines, K., and Keeley, S. (2016). Aspects of designing and evaluating seasonal-to-interannual Arctic sea-ice prediction systems. Q. J. Roy. Meteorol. Soc., 142, 672–683.
15. Hermanson, L., and Coauthors. (2022). WMO Global Annual to Decadal Climate Update: A Prediction for 2021–2025. Bull. Amer. Meteor. Soc., 103, E1117–E1129.
16. Knight J. R., Andrews M. B., Smith D. M., Arribas A., Colman A. W., Dunstone N. J., Hermanson L., Maclnchlan C., Peterson K. A., Scaife A. A., Williams A. (2014). Predictions of Climate Several Years Ahead Using an Improved Decadal Prediction System. Journal of Climate, 27(20), 7550-7567.
17. Kushnir, Y., Scaife, A.A., Arritt, R. et al. (2019). Nature Climate Change 9, 94–101.
18. Leung L. Y.a, North G. R. (1990). Information theory and climate prediction. Journal of Climate, Vol.3, pp 1-14.
19. Meehl, G. A. and coauthors. (2014). Decadal climate prediction: an update from the trenches. Bull. Am. Meteorol. Soc., 95, 243-267.
20. 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.
21. Shukla, J. (1981). Dynamical predictability of monthly means. Journal of the Atmospheric Sciences, 38(12), 2547-2572.

22. Smith, D. M., Eade, R., and Pohlmann, H. (2013b). A comparison of full field and anomaly initialization for seasonal to decadal climate prediction. Journal of Climate Dynamics, 41, 3325–3338.
23. Smith, D. M., Eade, R., Scaife, A. A., Caron, L. -P., Danabasoglu. G., DelSole5, 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.
24. Taylor, K.E., R.J., Stouffer, Meehl, G.A. (2012). An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. Bull. Amer. Meteor. Soc., 93, 485–498
25. WCRP. (2022). WMO-WCRP portal: https://www.wcrp-climate.org/dcp-overview; available in: 24/1/2020.

مقاله قبل از انتشار
(ویراستاری نشده)

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

Abstract

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 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 DCPP 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, 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 DCPP 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 is

not 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 the Iran and the northeast of the 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, DCPP, Iran, Asia, Precipitation, Temperature

مقاله قبل از انتشار (ویراستاری نشده)