

The prediction of the Precipitation Extremes over Iran for the Next Decade (2021-2028) using the Decadal Climate Prediction Project contribution to CMIP6 (CMIP6-DCPP)

Asadi-RahimBeygi, N.¹  | Zarrin, A.¹   | Mofidi, A.¹  | Dadashi-Roudbari, A. A.¹ 

1. Department of Geography, Faculty of Dr. Ali Shariati Letters and Humanities, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

Corresponding Author E-mail: zarrin@um.ac.ir

(Received: 28 Nov 2022, Revised: 2 Jan 2023, Accepted: 2 May 2023, Published online: 15 Nov 2023)

Summary

In recent years, the importance of climate prediction has increased as a scientific source for understanding climate change and evaluating its consequences in political and economic decisions. Providing predictions with less uncertainty, especially for precipitation and temperature is of considerable importance for policymakers in time periods from several months to several decades. The Decadal Climate Prediction Project (DCPP) is a coordinated multi-model investigation into decadal climate prediction, predictability and variability. The DCPP consists of three components (A, B, and C). Component A comprises of the production and analysis of an extensive archive of retrospective forecasts. Component B undertakes ongoing production, analysis and dissemination of experimental quasi-real-time multi-model forecasts, and Component C involves the organization and coordination of case studies of particular climate shifts and variations, both natural and naturally forced (Boer et al. 2016). The aim of this study is to predict precipitation extremes using the decadal Climate Prediction Project contribution to the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) for the period 2021 to 2028 over Iran. For this purpose, two types of data including 77 synoptic stations and three DCPP models (BCC-CSM2-MR, MPI-ESM1-2-HR, and MRI-ESM2-0) with a horizontal resolution of 100 km were used. The precipitation output of DCPP models, each with nine variants (27 members) were used for two time periods, including Hindcast (1981-2019) and Forecast (2021-2028). To evaluate DCPP models, we used the Root Mean squared error (RMSE), the Pearson correlation coefficient (PCC), the Mean Bias Error (MBE), the Percent bias (PBIAS), and the Taylor diagram methods. In addition, Direct Model Output (DMO) was corrected by the Delta Change Factor (DCF) method, and the Independent Weighted Mean (IWM) was used to generate a multi-model ensemble from 27 members. In this study, the ETCCDI indices including days with Heavy precipitation (R10mm), days with Very heavy precipitation days (R20mm), Simple daily intensity (SDII), The maximum 1-day precipitation amounts (Rx1day), The maximum 3-day precipitation amounts (Rx3day), The maximum 5-day precipitation amounts (Rx5day) were calculated to analyze precipitation extremes for all regions of Iran. Furthermore, the evaluation of the DCPP models showed that the output of mentioned models is acceptable for all regions of Iran. Also, the performance of CMIP6-DCPP-MME is higher than the individual models. The result of the prediction of precipitation extremes showed that the six studied extreme precipitation indices will increase for the next decade. The Southwest and Northeast are the two hotspots of positive anomaly. In contrast, the southern coast of the Caspian Sea for the R10mm index will experience a negative anomaly for the next decade. The findings show that the southeastern region of Iran, from the eastern borders to the north of the Strait of Hormuz, will be the main area of negative precipitation anomalies in the country in the next decade. So that the indices of days with heavy (R10mm) and very heavy (R20mm) precipitation will decrease by 2.7 and 0.3 days, and daily precipitation intensity (SDII) will decrease by 2.6 mm/day.

Keywords: Decadal Prediction, DCPP Models, Multi-Model Ensemble, Bias Correction, Climate Extremes.

Cite this article: Asadi-RahimBeygi, N., Zarrin, A., Mofidi, A., & Dadashi-Roudbari, A. A. (2023). The prediction of the Precipitation Extremes over Iran for the Next Decade (2021-2028) using the Decadal Climate Prediction Project contribution to CMIP6 (CMIP6-DCPP). *Journal of the Earth and Space Physics*, 49(3), 707-725. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.351678.1007474>

E-mail: (1) narges.asadirahimbeygi@mail.um.ac.ir | abbasmofidi@um.ac.ir | a-dadashi@um.ac.ir



پیش‌بینی فرین‌های بارشی ایران در آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۲۸) با استفاده از پروژه پیش‌بینی اقلیمی دهه‌ای (CMIP6-DCPP)

نرگس اسدی رحیم‌بیگی^۱ | آذر زرین^۱ | عباس مفیدی^۱ | عباسعلی داداشی رودباری^۱

۱. گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی دکتر علی شریعتی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: zarrin@um.ac.ir

(دریافت: ۱۴۰۱/۹/۷، بازنگری: ۱۴۰۱/۱۰/۱۲، پذیرش نهایی: ۱۴۰۲/۲/۱۲، انتشار آنلاین: ۱۴۰۲/۸/۲۴)

چکیده

پیش‌بینی دهه‌ای مرز بین پیش‌بینی کوتاه‌مدت و پیش‌نگری اقلیمی است. هدف از تحقیق حاضر، پیش‌بینی فرین‌های بارشی در دوره ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۸ در ایران است. دو گروه داده شامل ۷۷ ایستگاه همدید و برونداد سه مدل از پروژه CMIP6-DCPP با تفکیک افقی ۱۰۰ کیلومتر استفاده شد. برونداد بارش مدل‌های DCPP هر کدام با ۹ اجرای متفاوت، برای دو دوره گذشته‌نگر (۲۰۱۹-۱۹۸۱) و دوره پیش‌بینی (۲۰۲۱-۲۰۲۸) استفاده شد. جهت درستی‌سنجی برونداد مدل‌ها، از سنجه‌های آماری RMSE، PCC، MBE و PBIAS برای بررسی مدل همادی از نمودار تیلور استفاده شد. برونداد مستقیم مدل‌ها (DMO)، با روش تغییر عامل دلتا (DCF) تصحیح شد و از روش میانگین وزنی با رویکرد مستقل (IWM) برای تولید مدل همادی استفاده شد. برای بررسی فرین‌های بارشی از شاخص‌های روزهای همراه با بارش سنگین (R10mm) و خیلی سنگین (R20mm)، شدت بارش (SDII) و بیشینه بارش یک‌روزه، سه‌روزه و پنج‌روزه (RX1,3,5day) استفاده شد. درستی‌سنجی برونداد مدل‌های DCPP، نشان داد که همبستگی برونداد مدل‌های یادشده در بیشتر ایستگاه‌های مورد بررسی بیشتر از ۰/۸ به دست آمده است. با این حال، مدل همادی تولیدشده کارایی بالاتری را نسبت به مدل‌های منفرد نشان داد. نتیجه پیش‌بینی فرین‌های بارشی نشان داد که به‌طور کلی شش شاخص بارش فرین مورد بررسی در بیشتر مناطق کشور در دهه آینده نسبت به دوره گذشته‌نگر افزایش خواهند داشت. دو هسته اصلی بی‌هنجاری مثبت شاخص‌ها، مناطق جنوب‌غرب و شمال‌شرق کشور می‌باشند. در مقابل، شاخص روزهای همراه با بارش سنگین در سواحل جنوبی دریای خزر بی‌هنجاری منفی را تجربه خواهد کرد.

واژه‌های کلیدی: پیش‌بینی دهه‌ای، مدل‌های CMIP6-DCPP، مدل همادی، تصحیح اریبی، فرین‌های اقلیمی.

۱. مقدمه

در طول سه دهه گذشته با شدت یافتن گرمایش جهانی در اثر افزایش گازهای گلخانه‌ای، نگرانی‌های فزاینده‌ای در رابطه با تغییرات اساسی در اقلیم سیاره‌زمین ایجاد شده‌است. تغییر اقلیم سبب تغییر در ویژگی بسیاری از متغیرهای اقلیمی از جمله بارش شده است و احتمال رخداد بارش‌های فرین را تشدید کرده است (هیأت بین‌دولتی تغییر اقلیم، ۲۰۲۱). بنابراین، پیش‌بینی دقیق ویژگی‌های بارش فرین از جمله پراکندگی، شدت، فراوانی، مدت و مقدار از اهمیت به‌سزایی برخوردار است (هیأت بین‌دولتی تغییر اقلیم، ۲۰۰۷؛ ترنبرث و همکاران، ۲۰۰۳ و ترنبرث، ۲۰۱۱).

بارش یکی از اجزای حیاتی در چرخه آب و مؤلفه اصلی در فرایندهای هیدرولوژی محسوب می‌شود (ترنبرث و همکاران، ۲۰۰۳؛ مسترنتوناس و همکاران، ۲۰۱۹). از آنجایی که برنامه‌ریزی‌های منطقه‌ای و سیاست‌گذاری‌های محیطی به‌طور قابل‌توجهی از مقدار بارش و ویژگی‌های منطقه‌ای آن متأثر می‌شود، بنابراین، برآورد دقیق بارش در مقیاس‌های زمانی-مکانی از اهمیت بسیاری برخوردار است (نیو و همکاران، ۲۰۰۱). بارش فرین یکی از نشانگرهای مهم تغییر اقلیم به‌شمار می‌رود. رخداد این

در طول سه دهه گذشته با شدت یافتن گرمایش جهانی در اثر افزایش گازهای گلخانه‌ای، نگرانی‌های فزاینده‌ای در رابطه با تغییرات اساسی در اقلیم سیاره‌زمین ایجاد شده‌است. تغییر اقلیم سبب تغییر در ویژگی بسیاری از متغیرهای اقلیمی از جمله بارش شده است و احتمال رخداد بارش‌های فرین را تشدید کرده است (هیأت بین‌دولتی تغییر اقلیم، ۲۰۲۱). بنابراین، پیش‌بینی دقیق ویژگی‌های بارش فرین از جمله پراکندگی، شدت، فراوانی، مدت و مقدار از اهمیت به‌سزایی برخوردار است (هیأت بین‌دولتی تغییر اقلیم، ۲۰۰۷؛ ترنبرث و همکاران، ۲۰۰۳ و ترنبرث، ۲۰۱۱).

استناد: اسدی رحیم‌بیگی، نرگس؛ زرین، آذر؛ مفیدی، عباس و داداشی رودباری عباسعلی (۱۴۰۲). پیش‌بینی فرین‌های بارشی ایران در آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۲۸) با استفاده از پروژه پیش‌بینی اقلیمی دهه‌ای (CMIP6-DCPP). مجله فیزیک زمین و فضا، ۴۹(۳)، ۷۰۷-۷۲۵.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.351678.1007474>

رایانامه: (۱) narges.asadirahimbeygi@mail.um.ac.ir | abbasmofidi@um.ac.ir | a-dadashi@um.ac.ir



ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.351678.1007474>

انجام پیش‌بینی احتمالاتی در مقیاس زمانی دهه‌ای صورت گرفته‌است (کرتمن و همکاران، ۲۰۱۳؛ میهل و همکاران، ۲۰۱۴).

یکی از مهم‌ترین پروژه‌های پیش‌بینی دهه‌ای که توسط سازمان هواشناسی جهانی (WMO)، در چارچوب برنامه جهانی تحقیقات اقلیمی (WCRP) توسط کارگروه پیش‌بینی فصلی (WGSIP) ارائه شده‌است، پروژه پیش‌بینی اقلیمی دهه‌ای می‌باشد که به‌اختصار DCP (Decadal Climate Prediction Program) خوانده می‌شود (بوئر و همکاران، ۲۰۱۶). این برنامه با هدف ارائه سازوکار و مدلی جدید برای پرکردن شکاف بین سامانه‌های پیش‌بینی کوتاه‌مدت تا فصلی و پیش‌نگری اقلیمی بنیان نهاده شده‌است (کرتمن و همکاران، ۲۰۱۳). در این پروژه مدل‌سازی «Near-Term» یا «Decadal» بخشی از پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده فاز پنجم و ششم، یعنی CMIP5 و CMIP6 است. پیش‌بینی اقلیمی (Climate Prediction) که از چند سال تا یک دهه آینده را شامل می‌شود، به‌عنوان پیش‌بینی دهه‌ای یا پیش‌بینی سالانه تا دهه‌ای Annual to Decadal Climate Prediction (A2D or ADCP) شناخته می‌شود. از مهم‌ترین اصول پیش‌بینی دهه‌ای، آغازگری آن با استفاده از داده‌های آغازگری واقعی است. درحالی‌که پیش‌نگری دهه‌ای (Decadal Projection) از داده‌های آغازگری مبتنی بر سناریوهای IPCC استفاده می‌کند که به‌مراتب عدم قطعیت بیشتری را داراست (بوئر و همکاران، ۲۰۱۶). پیش‌بینی دهه‌ای عرصه پژوهشی نوینی است که در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری قرار گرفته‌است (گودارد و همکاران، ۲۰۱۳). در یکی از پژوهش‌های پیشگام این حوزه گوماس و همکاران (۲۰۱۳) مدل‌های پیش‌بینی دهه‌ای را در منطقه اقیانوس هند مورد بررسی قرار دادند. بررسی آنها نشان داد که مدل‌های پیش‌بینی دهه‌ای در بازه زمانی ۲ تا ۵ سال و ۶ تا ۹ سال دارای بالاترین کارایی هستند. در پژوهشی دیگر دوبلاس ریس و همکاران (۲۰۱۳) پیش‌بینی اقلیمی آینده نزدیک را با استفاده از برون‌داد CMIP5-DCPP به انجام رساندند. آنها

پدیده به‌عنوان مخاطره از دو منظر بارش‌های سیل‌آسا و خشکسالی‌های شدید قابل بررسی است که در هر دو جنبه ریسک قابل توجهی را به همراه دارد (سان و همکاران، ۲۰۱۸؛ ارمان و دتینجر، ۲۰۰۷).

رخدادهایی همچون بارش خیلی سنگین و سیل ایلام در آبان ۱۳۹۴، بارش‌های خیلی سنگین و سیل آق‌قلا و سیل‌های فراگیر بهار ۱۳۹۸، خشکسالی گسترده ۱۴۰۰-۱۳۹۹، بارش بسیار گسترده، سنگین و سیل مرداد ماه ۱۴۰۱ و بسیاری دیگر از این دست رخدادها فرین بارشی، از یک سو حجم بالای خسارات وارد شده به کشور و از سوی دیگر افزایش قابل‌ملاحظه این نوع رخدادها در سال‌های اخیر را نشان می‌دهد. همین امر بیانگر آن است که کشور در برابر رخدادهای فرین بارشی از آسیب پذیری بسیار بالا و تاب‌آوری بسیار پایین برخوردار است. بنابراین، بسیار منطقی است که در طول دهه‌های آینده، زیرساخت و محیط طبیعی ایران احتمالاً با چالش‌های بزرگ مواجه خواهد شد. در صورت شناخت رخدادهای اقلیمی مخاطره‌آمیز، این زیرساخت‌ها و منابع طبیعی و حتی منابع انسانی تا حد زیادی از آسیب وقوع این رخدادها مصون مانده و در صورت پیش‌بینی رخدادها به‌خوبی می‌توان با افزایش تاب‌آوری‌های محیطی این دست رخدادها را قبل از رخداد مدیریت کرد.

در سال‌های اخیر اهمیت پیش‌بینی‌های اقلیمی در سطوح مختلف ملی و بین‌المللی به‌عنوان یک منبع علمی برای درک تغییر اقلیم و ارزیابی پیامدهای آن در تصمیم‌گیری‌های سیاسی و اقتصادی افزایش یافته‌است (هیأت بین‌دولتی تغییر اقلیم، ۲۰۱۴؛ ارزیابی ملی اقلیم، ۲۰۱۴). ارائه پیش‌بینی‌هایی با عدم قطعیت پایین، به‌ویژه در خصوص متغیرهای بارش و دما، در مقاطع زمانی از چند ماه تا چند دهه، برای مدیران، تصمیم‌گیران و سیاست‌گذاران از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. در این میان پیش‌بینی‌های دقیق در بازه زمانی دهه‌ای به برنامه‌ریزی طولانی‌مدت جهت کاهش پیامدهای فرین‌های اقلیمی کمک زیادی می‌کند. بر این اساس در دو دهه گذشته تحقیقات هدفمندی با مبنای قرار دادن امکان

دریافتند که مدل‌ها در پیش‌بینی دما نسبت به بارش از کارایی بالاتری برخوردارند. پژوهش‌هایی که پیش‌بینی‌های دهه‌ای را در مناطق مختلف مورد بررسی قرار داده‌اند کارایی آنها را تأیید کرده‌اند. این پژوهش‌ها شامل تولید و به‌کارگیری مدل همادی (وان اولدنبرگ و همکاران، ۲۰۱۲)، پروژه A2D سازمان هواشناسی جهانی (مارتزوک و همکاران، ۲۰۱۶؛ یاگر و همکاران، ۲۰۱۸؛ شوستر و همکاران، ۲۰۱۹؛ جیانگ و همکاران، ۲۰۲۰) و پروژه پیش‌بینی اقلیمی دهه‌ای (DCPP) (بوئر و همکاران، ۲۰۱۶؛ یانگ و کریستینس، ۲۰۲۰؛ کروشک و همکاران، ۲۰۲۰؛ روجیری و همکاران، ۲۰۲۱) است. هرچند که پژوهش‌های انجام‌شده از روش و مدل‌های متفاوتی برای پیش‌بینی دهه‌ای بهره گرفته‌اند، اما تمام این پژوهش‌ها بر کارایی بالای پیش‌بینی دهه‌ای بارش و دما اتفاق نظر دارند.

مطالعات انجام‌شده در ایران در حوزه پیش‌بینی‌های جوی اقلیمی عمدتاً در چهار دسته پیش‌بینی جوی کوتاه‌مدت (گودرزی و همکاران، ۱۳۹۷؛ آزادی و همکاران، ۱۳۹۷)، پیش‌بینی فصلی (مدیریان و همکاران، ۱۳۸۹؛ بابایان و همکاران، ۱۳۹۷؛ قهرمان و همکاران، ۱۳۹۴)، پیش‌بینی دهه‌ای (بابایان و همکاران، ۱۴۰۰؛ زرین و همکاران، ۱۴۰۱، اسدی رحیم بیگی و همکاران، ۱۴۰۱) و پیش‌نگری (احمدی و همکاران، ۱۳۹۸، زرین و داداشی رودباری، ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ الف) قرار می‌گیرند. از محدود پژوهش‌های مبتنی بر پیش‌بینی دهه‌ای با بهره‌گیری از پروژه DCPP را می‌توان به پژوهش‌های بابایان و همکاران (۱۴۰۰)، زرین و همکاران (۱۴۰۱) و اسدی رحیم‌بیگی و همکاران (۱۴۰۱) اشاره کرد. بابایان و همکاران (۱۴۰۰) به پیش‌بینی چندساله بارش پرداختند. نتایج بررسی آنها نشان داد که در مجموع میانگین بارش در ایران در دوره ۲۰۲۳-۲۰۱۹ در محدوده نرمال تا کمتر از نرمال خواهد بود. زرین و همکاران (۱۴۰۱) به پیش‌بینی دمای ایران با مدل‌های CMIP6-DCPP پرداختند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که بی‌هنجاری دما در دهه‌ی آینده در تمامی ماه‌های سال مثبت و دما به‌طور متوسط ۰/۹

درجه‌سلسیوس افزایش می‌یابد. اسدی رحیم بیگی و همکاران (۱۴۰۱) به پیش‌بینی فرین‌های دمایی در ایران با استفاده از برون‌داد پروژه پیش‌بینی اقلیم دهه‌ای (DCPP) پرداختند. نتایج پژوهش آنها نشان داد که دما در یک دهه پیش‌رو در ایران روند افزایشی خواهد داشت و مناطق شمالی، ارتفاعات زاگرس و شمال شرق به‌طور کلی دماهای بالاتری را نسبت به دوره گذشته‌نگر تجربه خواهند کرد.

مرور پیشینه پژوهش نشان می‌دهد که به‌رغم مطالعات مختلفی که از پیش‌بینی‌های دهه‌ای در سطح جهانی انجام‌شده است، این عرصه پژوهشی در ایران کمتر مورد توجه قرار گرفته است. پژوهش‌های انجام‌شده در این حوزه صرفاً میانگین‌های اقلیمی بارش و دما را مورد بررسی قرار داده‌اند. هرچند که بررسی میانگین‌های اقلیمی از ارزش مطالعاتی زیادی برخوردار است اما آنچه که در مطالعات تغییر اقلیم و پیش‌بینی‌های بلندمدت اقلیم از اهمیت بیشتری برخوردار است. بررسی فرین‌های اقلیمی است که هدف اصلی این پژوهش را در بر می‌گیرد. بر این اساس تحقیق حاضر در چهار بخش شامل درستی‌سنجی مدل‌های در دسترس CMIP6-DCPP، تصحیح اریبی مدل‌ها، تولید مدل همادی CMIP6-DCPP-MME و پیش‌بینی فرین‌های اقلیمی در ایران سازماندهی شده است. دستاوردهای این پژوهش کاربردهای زیادی را در برنامه‌ریزی به‌ویژه در بخش‌های منابع آب، انرژی، کشاورزی و مدیریت بحران دارد.

۲. روش پژوهش

۲-۱. محدوده مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه این پژوهش کشور ایران است (شکل ۱-الف). ایران کشوری با تنوع اقلیمی بالا محسوب می‌شود، به‌طوری‌که در این کشور اقلیم‌های مختلفی از اقلیم مرطوب، کوهستانی، خشک تا نیمه‌خشک در مناطق جغرافیایی مختلف آن قابل مشاهده هستند. درهم تنیدگی خشکی و دریا، توپوگرافی بسیار پیچیده (شکل ۱-ب) و تنوع سامانه‌های همدیدی در مقیاس‌های زمانی-مکانی

(همگنی) است. نتایج آزمون همگنی بارش روزانه ۷۷ ایستگاه همدید را تأیید کرده است.

۲-۲-۲. برون‌داد پروژه پیش‌بینی اقلیمی دهه‌ای (CMIP6-DCPP)

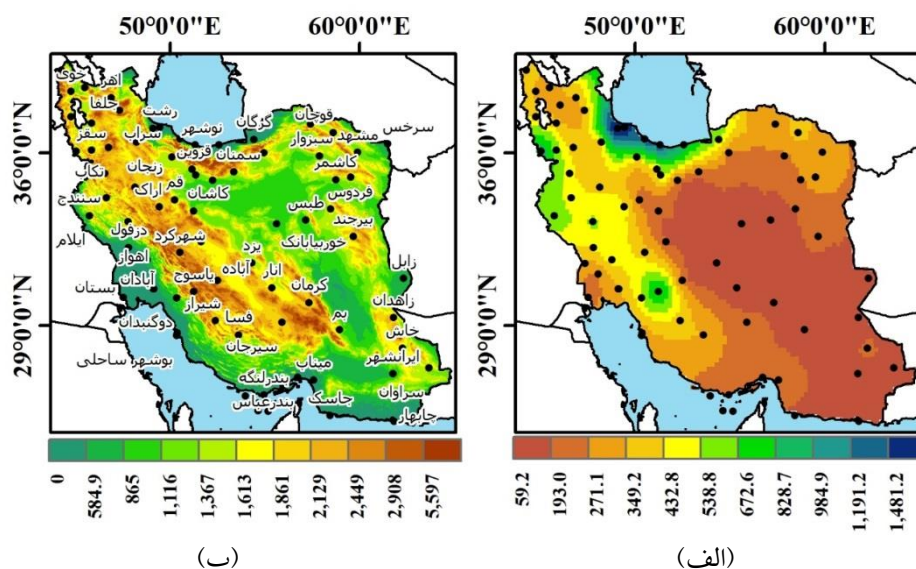
پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده مرحله ششم (CMIP6) از تعداد بسیاری زیر پروژه تشکیل شده است. یکی از جدیدترین این زیر پروژه‌ها برنامه پیش‌بینی اقلیمی دهه‌ای (DCPP) است. پیش‌بینی اقلیمی دهه‌ای (DCPP) دارای سه گروه اجرا است. مؤلفه A (اجرای گذشته‌نگر دهه‌ای چند مدلی چند ساله) یا گذشته‌نگر (Hindcast)، شامل تحلیل پیش‌بینی‌های گذشته‌نگر می‌باشد که از آن به‌عنوان پایه‌ای برای پیش‌بینی بازه‌های زمانی سالانه تا ده ساله استفاده می‌شود. مؤلفه B (اجرای پیش‌بینی‌های دهه‌ای چند مدلی زمان واقعی) یا پیش‌بینی (Prediction)، به تولید مداوم پیش‌بینی‌های اقلیمی با استفاده از مدل‌های چندگانه می‌پردازد. مؤلفه C (پیش‌بینی پذیری، سازوکارها و مطالعات موردی) که سومین قسمت از پروژه پیش‌بینی دهه‌ای اقلیم است به تبیین پیش‌بینی پذیری مدل، سازوکارها و فرایندهای اقلیمی می‌پردازد (بوئر و همکاران، ۲۰۱۶؛ زرین و همکاران، ۱۴۰۱).

مختلف در ترکیب با هم، تنوع اقلیمی بسیار زیادی را در این سرزمین رقم زده‌اند. به‌طوری‌که کمینه بارش سالانه ایران با ۷۷ ایستگاه همدید طی دوره ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۰، ۵۹/۲ میلی‌متر در جنوب‌شرق و ایران مرکزی و بیشینه بارش سالانه با ۱۴۸۱/۲ میلی‌متر در جنوب‌غربی دریای خزر مشاهده می‌شود (شکل ۱-الف). این تنوع بالای اقلیمی، پیش‌بینی و تحلیل فرایندها و پدیده‌های جوی از جمله بارش را در گستره ایران با چالش‌های بزرگی همراه کرده است.

۲-۲. داده‌های مورد استفاده

۲-۲-۱. داده‌های مشاهداتی (ایستگاه‌های همدید)

داده‌های روزانه بارش ۷۷ ایستگاه هواشناسی همدید طی سال‌های ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۰ مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به این‌که بارش یک متغیر هواشناسی با وردایی زیاد است، در این تحقیق طول دوره آماری برای درستی سنجی، یک دوره ۳۰ ساله (۱۹۹۱-۲۰۲۰) در نظر گرفته شد تا تراکم حداکثری از ایستگاه‌ها در تمام مناطق اقلیمی ایران در نظر گرفته شود (شکل ۱-الف). از آزمون همگنی استاندارد معمولی (SNHT) برای ارزیابی همگنی داده‌های بارش روزانه در طول دوره زمانی یادشده استفاده شد. آزمون SNHT یک تکنیک آماری برای بررسی یکنواختی نسبی



شکل ۱. منطقه مورد مطالعه؛ الف) پراکنش بارش سالانه با ۷۷ ایستگاه همدید طی دوره آماری ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۰ (واحد: میلی‌متر) ب) نام ایستگاه‌های همدید مورد بررسی به‌همراه توپوگرافی در زمینه شکل (واحد: متر)

(تیلور، ۲۰۰۱). نمودار تیلور جهت درستی سنجی برونداد مجموعه داده‌های مختلف یا مدل‌های اقلیمی به کار می‌رود و اخیراً در مطالعات اقلیم‌شناسی به کرات استفاده می‌شود (هیأت بین‌دولتی تغییر اقلیم، ۲۰۰۱؛ پینکس و همکاران، ۲۰۰۸؛ ونر، ۲۰۱۳). نمودار تیلور به شکل نیم‌دایره‌ای همبستگی منفی و مثبت را نشان می‌دهد که در هر دو صورت، مقادیر ضریب همبستگی به صورت شعاع دایره روی قوس آن نشان داده می‌شود.

۲-۳-۲. تصحیح اریبی مدل‌های پیش‌بینی دهه‌ای با روش تغییر عامل دلتا (DCF)

جهت تصحیح اریبی مدل‌های پیش‌بینی دهه‌ای از روش تغییر عامل دلتا (DCF) استفاده شد. شرح محاسباتی روش DCF در رابطه (۱) آمده است.

$$T_{frc}^{BC}(t) = P_{obs}(t) \cdot \left[\frac{\mu_{mP_{frc}(t)}}{\mu_{mP_{contr}(t)}} \right], \quad (1)$$

در رابطه فوق، T (متغیر مورد نظر) است؛ $contr$ تعداد سری‌های شبیه‌سازی شده CMIP6-DCCP در طول دوره کنترل است، obs دوره زمانی مشاهداتی؛ f سری زمانی پیش‌بینی شده آینده که باید اریبی آن تصحیح شود؛ BC سری زمانی پیش‌نگری شده آینده که اریبی آن تصحیح شده است، t گام زمانی و μ_m میانگین بلندمدت ماهانه است (مندز و همکاران، ۲۰۲۰).

۲-۳-۳. تولید مدل همادی با استفاده از مدل‌های پیش‌بینی دهه‌ای

برای کاهش عدم قطعیت مدل‌های منفرد CMIP6-DCPP یک مدل همادی CMIP6-DCPP-MME تولید شد. ابتدا اجراهای ۹ گانه هر مدل به روش حسابی میانگین‌گیری شد. سپس یک چند مدلی همادی با استفاده میانگین‌های به‌دست آمده برای هر مدل به روش میانگین وزنی با رویکرد مستقل (IWM) تولید شد. روش میانگین وزنی با رویکرد مستقل (IWM) روشی است که وابستگی بین مدل‌های تعریف شده را با استفاده از کوواریانس خطاهای مدل ارائه می‌دهد (تیبالدی و کانتوتی، ۲۰۰۷؛ بیشاپ و

با در نظر گرفتن در دسترس بودن داده‌های روزانه و جدیدترین اجرای در دسترس برای متغیر بارش، سه مدل و هر مدل شامل نه اجرا (variant) با تفکیک افقی ۱۰۰ کیلومتر (جدول ۱) برای دوره گذشته‌نگر (۲۰۱۹-۱۹۸۱) و دوره پیش‌بینی (۲۰۲۱-۲۰۲۸) در نظر گرفته شد. به دلیل در نظر گرفتن داده‌های شرایط آغازگری در دوره پیش‌بینی ضروری است که بین خاتمه دوره گذشته‌نگر و شروع دوره پیش‌بینی یک فاصله‌ی دوساله رعایت شود (بوئر و همکاران، ۲۰۱۶؛ سازمان هواشناسی جهانی، ۲۰۲۲). سه مدل مورد استفاده عبارت‌اند از BCC-CSM2-MR، MPI-ESM1-2-HR و MRI-ESM2-0 که جزئیات این مدل‌ها در جدول (۱) آمده است.

۲-۳-۳. روش انجام تحقیق

۲-۳-۱. سنجه‌های درستی سنجی

برای درستی سنجی برونداد مستقیم مدل‌ها (DMO) از سنجه‌های متداول آماری شامل RMSE، PCC، PBIAS و MBE استفاده شد. سنجه PCC نشان‌دهنده رابطه بین دو متغیر است که دامنه آن بین -۱ تا ۱ است. سنجه RMSE خطای بین مقادیر برآورد شده و مشاهده شده بارش را نشان می‌دهد. سنجه RMSE که همواره مقدار مثبت دارد نمی‌تواند تعیین کند که آیا مدل بیش برآوردی یا کم برآوردی دارد (استون و همکاران، ۱۹۹۳). به همین دلیل لازم است در کنار سنجه RMSE از سنجه MBE نیز استفاده شود. سنجه MBE میانگین اریبی خطا است که نشان‌دهنده بیش برآوردی و یا کم برآوردی است و سنجه PBIAS درصد مقدار اریبی را نشان می‌دهد (اسدی‌رحیم بیگی و همکاران، ۱۴۰۰). با توجه به پرتکرار بودن این سنجه‌ها از ارائه روابط پرهیز شده است.

جهت درستی سنجی مدل‌های تصحیح شده اریبی و مدل همادی تولید شده از نمودار تیلور استفاده شد. نمودار تیلور ابزار مناسبی برای کارایی مدل‌ها است که شامل سه بخش همبستگی فضایی، نسبت واریانس‌ها و تفاوت‌های مرکزی ریشه میانگین مربع بین مدل‌ها و مشاهدات است

(DMO) و ایستگاه‌ها نشان داد که در بیشتر ایستگاه‌های مورد بررسی همبستگی بیش از ۰/۸ است. در هر سه مدل مورد بررسی سواحل خزری در قیاس با سایر مناطق کشور پایین‌ترین همبستگی را بین بارش مدل‌ها و ایستگاه ارائه داده‌است. همبستگی پایین می‌تواند در نتیجه چندین عامل از جمله تفکیک افقی مدل‌ها، برهمکنش دریا-خشکی و عدم برآورد صحیح مدل در خط ساحل برای متغیر بارش باشد. در مجموع مدل MPI-ESM1-2-HR نسبت به دو مدل دیگر کارایی بالاتری را ارائه داده‌است. این نتیجه را می‌توان در همبستگی پایین بارش بین داده‌های ایستگاهی و دو مدل BCC-CSM2-MR و MPI-ESM1-2-HR در سواحل مکران نیز مشاهده کرد. به‌طوری‌که همبستگی به‌دست‌آمده برای این دو مدل در سواحل جنوب‌شرقی ایران کمتر از ۰/۲ است. این در حالی است که مدل MRI-ESM2-0 همبستگی بالای ۰/۸ را در ایستگاه‌های واقع در سواحل مکران ارائه داده است (شکل ۲). به رغم تفاوت‌های ارائه شده در همبستگی مدل‌ها در سواحل خزری و جنوب‌شرقی کشور در ارتفاعات کشور همانند ایستگاه‌های واقع در رشته کوه البرز، زاگرس و شمال‌غرب کشور برون‌داد مستقیم هر سه مدل CMIP6-DCPP همبستگی بالایی را برای بارش نشان داده‌اند.

آبرامویتز، ۲۰۱۳). این روش در حقیقت ترکیب خطی یک مجموعه از شبیه‌سازی‌های مدل است که میانگین اختلاف مربعات (MSD) را با توجه به مشاهدات به حداقل می‌رساند (زرین و داداشی‌رودباری، ۱۴۰۰ الف).

۲-۳-۴. شاخص‌های بارش فرین

در این پژوهش برای بررسی فرین‌های بارش در ایران از شاخص‌های روزهای همراه با بارش سنگین (R10mm)، روزهای همراه با بارش خیلی سنگین (R20mm)، شدت بارش روزانه (SDII) و بیشینه بارش یک‌روزه، سه‌روزه و پنج‌روزه (RX1,3,5day) استفاده شد. این شاخص‌ها توسط کارگروه تخصصی تغییر اقلیم و شاخص‌های فرین (ETCCDI) از برنامه جهانی تحقیقات اقلیمی (WCRP) ارائه شده‌است (جدول ۲).

۳. یافته‌ها

۳-۱. درستی سنجی برون‌داد مستقیم مدل‌های CMIP6-

DCPP

درستی سنجی برون‌داد مدل‌های منفرد CMIP6-DCPP در شکل ۲ ارائه شده است. در این شکل ستون‌ها نشان‌دهنده سنجه‌های درستی سنجی و ردیف‌ها مبین برون‌داد مستقیم (DMO) مدل‌های CMIP6-DCPP است. بررسی همبستگی خطی (PCC) بین برون‌داد مستقیم مدل‌ها

جدول ۱. اطلاعات مدل‌های منتخب DCPP برای پیش‌بینی فرین‌های بارشی.

نام مدل	نوع مدل	تفکیک افقی	اجرا (variant)	متغیر مورد استفاده
BCC-CSM2-MR	AOGCM	۱۰۰ کیلومتر	rli1p1f1 r9ilp1f1	بارش
MPI-ESM1-2-HR				
MRI-ESM2-0				

جدول ۲. شاخص‌های بارش فرین مورد استفاده در این پژوهش.

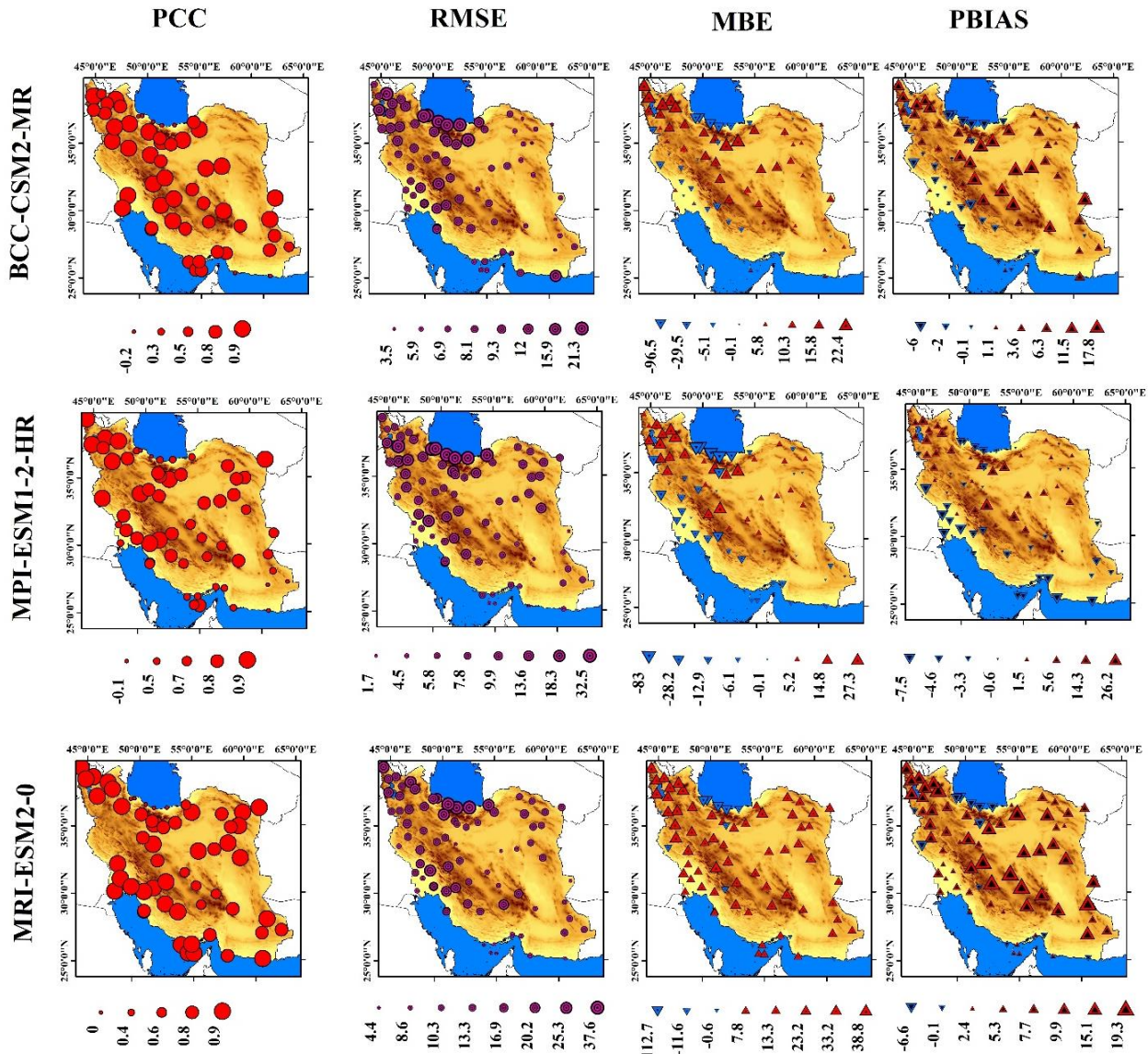
شاخص	نام شاخص	معرفی شاخص	یکا
SDII	شاخص ساده شدت روزانه بارش	اگر RR_{wz} مقدار بارش در یک‌روز بارانی (RR 10mm) در دوره j و w روزهای j در دوره j باشد آنگاه $SDII_j = \frac{\sum_{w=1}^w RR_{wz}}{w}$	میلی‌متر/روز
R(10 mm & 20mm)	روزهای همراه با بارش سنگین و خیلی سنگین	اگر RR_{zj} مقدار بارش روزانه در روز i و در دوره j باشد، آن‌گاه روزهای همراه با بارش سنگین/خیلی سنگین یعنی تعداد روزهایی با مقدار بارش روزانه مساوی یا بیشتر از (۱۰ و ۲۰ میلی‌متر) است.	روز
Rx(1,3,5day)	بارش یک‌روزه، سه‌روزه و پنج‌روزه	اگر RR_{ij} مقدار بارش روزانه در روز i و در دوره j باشد، بیشینه مقدار بارش (۱، ۳، ۵روزه) برای دوره j برابر است با $Rx(1,3,5day)$	میلی‌متر

دریای خزر، سواحل جنوبی، جنوب غرب و غرب کشور می باشد. در مقابل، مدل MRI-ESM2-0 بارش را در بیشتر مناطق ایران بیشتر برآورد کرده است. سواحل جنوبی دریای خزر در مدل MRI-ESM2-0 دارای بیشینه کم برآوردی بارش است. چند ایستگاه پراکنده نیز در شمال غرب، دامنه های جنوبی البرز و مناطق جنوبی ایران کم برآوردی دارند.

آخرین سنجه آماری مورد بررسی PBIAS است. نتایج به دست آمده برای کم برآوردی و بیش برآوردی بارش در سنجه PBIAS همانند سنجه MBE است. با این تفاوت که PBIAS درصد اریبی بارش را به نسبت کل مجموع بارش نشان می دهد. سنجه PBIAS بر خلاف سنجه های RMSE و MBE از مقدار خود متغیر (بارش) متأثر نمی شود. به طوری که هر چند که مدل MRI-ESM2-0 دارای بالاترین مقادیر RMSE و MBE است، اما این مدل کمترین مقدار درصد اریبی بارش را در کشور نشان داده است. بیشینه درصد اریبی بارش برای دو مدل BCC-CSM2-MR و MRI-ESM2-0 در مناطق داخلی ایران دیده می شود که بالاترین مقدار را کل کشور به خود اختصاص داده اند. در مقابل مدل MPI-ESM1-2-HR در مقایسه به دو مدل نامبرده در همین مناطق درصد اریبی بارش کمتری را ارائه داده است. از سوی دیگر دو مدل BCC-CSM2-MR و MPI-ESM1-2-HR در جنوبی (خلیج فارس)، جنوب غرب و غرب کشور به طور هماهنگ اریبی و درصد اریبی منفی را نشان داده اند. این در حالی است که مدل MRI-ESM2-0 برای همین مناطق بیش برآوردی اریبی و درصد اریبی را ارائه داده است. این نتیجه به روشنی نشان می دهد که مدل های منفرد کارایی لازم را برای بازتولید بارش در تمامی مناطق اقلیمی متنوع ایران ندارند. به طور کلی مدل های مورد بررسی حداقل ۰/۱- درصد کمتر از مقدار واقعی تا حداکثر ۲۶/۲ درصد بالاتر از مقدار واقعی بارش را در ایران برآورد می کنند.

بررسی سنجه RMSE نشان داد که مدل های CMIP6-DCPP با خطایی بین ۱/۷ میلی متر تا ۳۷/۶ میلی متر نسبت به داده های ایستگاهی بارش را در ایران برآورد می کنند. کمینه خطای برآورد شده در مدل BCC-CSM2-MR و بیشینه خطا در مدل MRI-ESM2-0 مشاهده شد. بیشینه خطا در هر سه مدل مورد بررسی در سواحل جنوبی دریای خزر و مناطق کوهستانی شمال غربی و زاگرس مشاهده می شود (شکل ۲). این مقدار زیاد خطا با توجه به همبستگی پایین بارش مدل و ایستگاه در این مناطق دور از انتظار نبوده است. با این حال باید در نظر داشت که سنجه RMSE از مقدار خود متغیر متأثر می شود و بنابراین به تنهایی نمی تواند سنجه مناسبی برای تحلیل نتایج درستی سنجه باشد. یکی از دلایل مقدار پایین RMSE مدل BCC-CSM2-MR، کم برآوردی قابل توجه بارش توسط این مدل در ایران است. در مقابل، یکی از دلایل مقدار بالای RMSE در مدل MRI-ESM2-0، بیش برآوردی بارش توسط این مدل است.

برای بررسی بیش برآوردی و کم برآوردی مدل های CMIP6-DCPP از سنجه میانگین اریبی خطا (MBE) استفاده شد. در محاسبه این سنجه، برخلاف RMSE، مقدار اختلافات مربع محاسبه نمی شود و بنابراین این سنجه می تواند مثبت و یا منفی باشد. مقدار مثبت این سنجه نشان دهنده بیش برآوردی بارش مدل نسبت به ایستگاه و مقدار منفی نشان دهنده کم برآوردی بارش مدل نسبت به داده های ایستگاهی است. بررسی سنجه MBE در سه مدل مورد بررسی نشان داد که دو مدل BCC-CSM2-MR و MPI-ESM1-2-HR در بیشتر مناطق کشور دارای کم برآوردی هستند. بیشینه کم برآوردی به ترتیب ۹۶/۵- میلی متر و ۸۳- میلی متر برای این دو مدل است. بیشینه بیش برآوردی این دو مدل نیز به ترتیب ۲۲/۴ و ۲۷/۳ میلی متر به دست آمده است. عمده مناطقی که بارش در آنها دارای کم برآوردی است شامل مناطق سواحل جنوبی



شکل ۲. درستی‌سنجی بارش در دوره گذشته‌نگر (۲۰۲۰-۱۹۹۱): ردیف‌ها مدل‌های منتخب DCPD و ستون‌ها سنج‌های آماری (PBIAS, RMSE, MBE) را نشان می‌دهد.

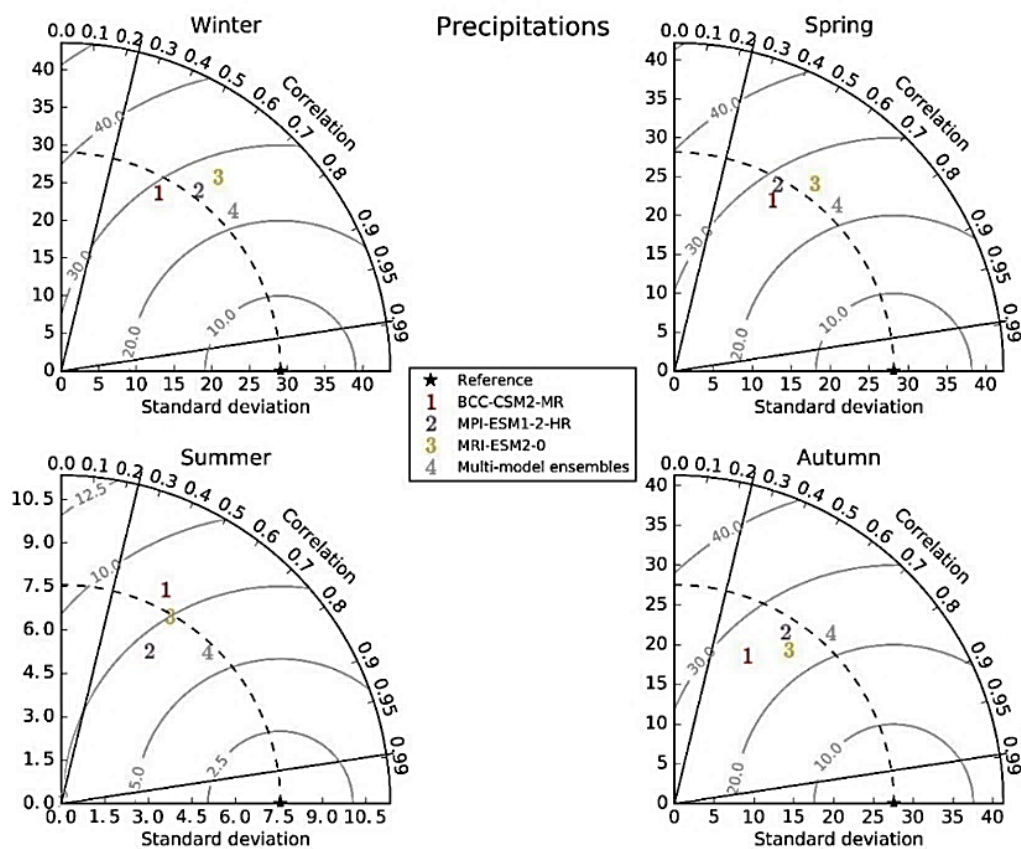
۲-۳. نشان داده شده و با هم مقایسه شده‌اند. مدل BCC- CSM2-MR با شماره ۱، مدل MPI-ESM1-2-HR با شماره ۲، مدل MRI-ESM2-0 با شماره ۳ و مدل همادی CMIP6-DCPP-MME با شماره ۴ مشخص شده است. داده‌های مشاهده‌ای (ایستگاه‌های هم‌دید) با نماد ستاره در محور X نمودار نشان داده شد و در راهنمای نمودار با Reference مشخص شده است (محور خط چین). فاصله بین هر مدل با مقدار مشاهده‌ای «Reference» معیاری است برای این که هر مدل چقدر مشاهدات را به‌طور واقعی بازتولید می‌کند. در نمودار ارائه‌شده برای هر مدل، سه

۲-۳. درستی‌سنجی مدل‌های تصحیح شده اریبی CMIP6-DCPP برای مقایسه کارایی مدل‌های منفرد تصحیح شده اریبی و مدل همادی تولیدشده در متوسط پهنه‌ای کشور از نمودار تیلور استفاده شد. نمودار تیلور ارائه‌شده در شکل ۳ خلاصه‌ای از کارایی مدل‌های منفرد CMIP6-DCPP و مدل همادی CMIP6-DCPP-MME برای فصول مختلف را ارائه می‌دهد. سه مدل منفرد CMIP6-DCPP و مدل همادی CMIP6-DCPP-MME هر کدام با یک شماره متفاوت در نمودار

داده است که نسبت به مدل‌های منفرد کارایی آن به شکل قابل توجهی افزایش یافته است. همچنین مدل همادی انحراف معیار کمتری را نسبت به مدل‌های منفرد ارائه داده است. کارایی بالاتر مدل همادی نسبت به مدل‌های منفرد، پیش‌تر توسط زرین و داداشی‌رودباری (۱۴۰۰الف) برای سایر پروژه‌های CMIP6 در ایران مورد تأیید قرار گرفته است. بررسی نتایج درستی‌سنجی مدل‌های منفرد با نمودار تیلور نشان داد که در فصل زمستان مدل‌های MPI-ESM1-2-HR و MRI-ESM2-0، در فصول پاییز و بهار مدل MRI-ESM2-0 و در فصل تابستان مدل MPI-ESM1-2-HR کارایی بهتری دارند. نتایج نشان داد کارایی مدل همادی در برآورد بارش فصلی نسبت به مدل‌های منفرد تصحیح شده ارزیابی در متوسط پهنه‌ای ایران افزایش یافته است (شکل ۳).

سنجه ترسیم شده است که عبارت‌اند از: ضریب همبستگی پیرسون (سنجش شباهت بین مدل و داده‌های مشاهده‌ای)، خطای مرکزی در مدل‌ها که متناسب با فاصله از ستاره «داده‌های مشاهده‌ای Reference» روی محور X است و انحراف معیار مدل‌ها که متناسب با فاصله شعاعی از مبدأ (محورهای خاکستری) است. برای مثال از این نمودار مشخص است که مدل شماره ۲ یعنی MPI-ESM1-2-HR برای بارش فصل زمستان دارای انحراف معیار حدود ۱۸ میلی‌متر و همبستگی حدود ۰/۷ است.

بررسی کلی نمودار تیلور نشان می‌دهد که مدل همادی تولید شده از سه مدل نامبرده، همبستگی بالاتری با داده‌های مشاهده‌ای دارد. به طوری که مدل همادی همبستگی فضایی بالای ۰/۸ را با داده‌های مشاهده‌ای نشان



شکل ۳. مقایسه متغیر بارش برونداد مدل‌های منفرد تصحیح شده CMIP6-DCPP و مدل همادی CMIP6-DCPP-MME در فصول زمستان، بهار، تابستان و پاییز.

بارش‌های شدید و سیل‌آسا می‌شود. از آنجایی که منطقه مورد مطالعه در مسیر عبوری این سامانه قرار دارد افزایش قابل توجه روزهای همراه با بارش‌های سنگین و خیلی‌سنگین در این منطقه از ایران دور از انتظار نمی‌باشد. در مقابل، مناطق خشک داخلی کشور به دلیل دور بودن از منابع رطوبتی و سدکنندگی رشته‌کوه‌های زاگرس و البرز در غرب و شمال بارش دریافتی بسیار کمی دارند و به همین ترتیب فراوانی روزهای همراه با بارش سنگین کمتری را دارا است. بیشینه روزهای همراه با بارش سنگین و خیلی‌سنگین برای ارتفاعات زاگرس ۱۶/۲ و ۷/۵ روز و برای سواحل خزری ۲۰/۵ و ۶/۲ است (شکل ۴).

بررسی روزهای همراه با بارش سنگین و خیلی‌سنگین نشان می‌دهد که در دوره پیش‌بینی بیشینه روزهای همراه با بارش سنگین افزایش یافته و به ۲۵ روز در سال رسیده است. این مقدار برای روزهای همراه با بارش خیلی‌سنگین به ۷/۸ روز می‌رسد. نتایج نشان می‌دهد که روزهای همراه با بارش سنگین تا سال ۲۰۲۸ به خصوص در سواحل جنوبی دریای خزر، جنوب شرق و شمال غربی ایران دارای بی‌هنجاری منفی است. کاهش روزهای همراه با بارش سنگین در سواحل جنوبی دریای خزر با کاهش ۲/۷ روز در دوره پیش‌بینی (۲۰۲۱-۲۰۲۸) نسبت به دوره گذشته‌نگر (۱۹۸۱-۲۰۱۹) همراه است. در مقابل، روزهای همراه با بارش سنگین در مناطق غربی، جنوب غربی و شمال شرقی ایران دارای بی‌هنجاری مثبت با مقدار بیشینه ۰/۸ روز است. این نتیجه نشان می‌دهد که روزهای همراه با بارش سنگین در مناطق نامبرده طی دوره پیش‌بینی افزایش حدوداً یک‌روزه را تجربه خواهد کرد.

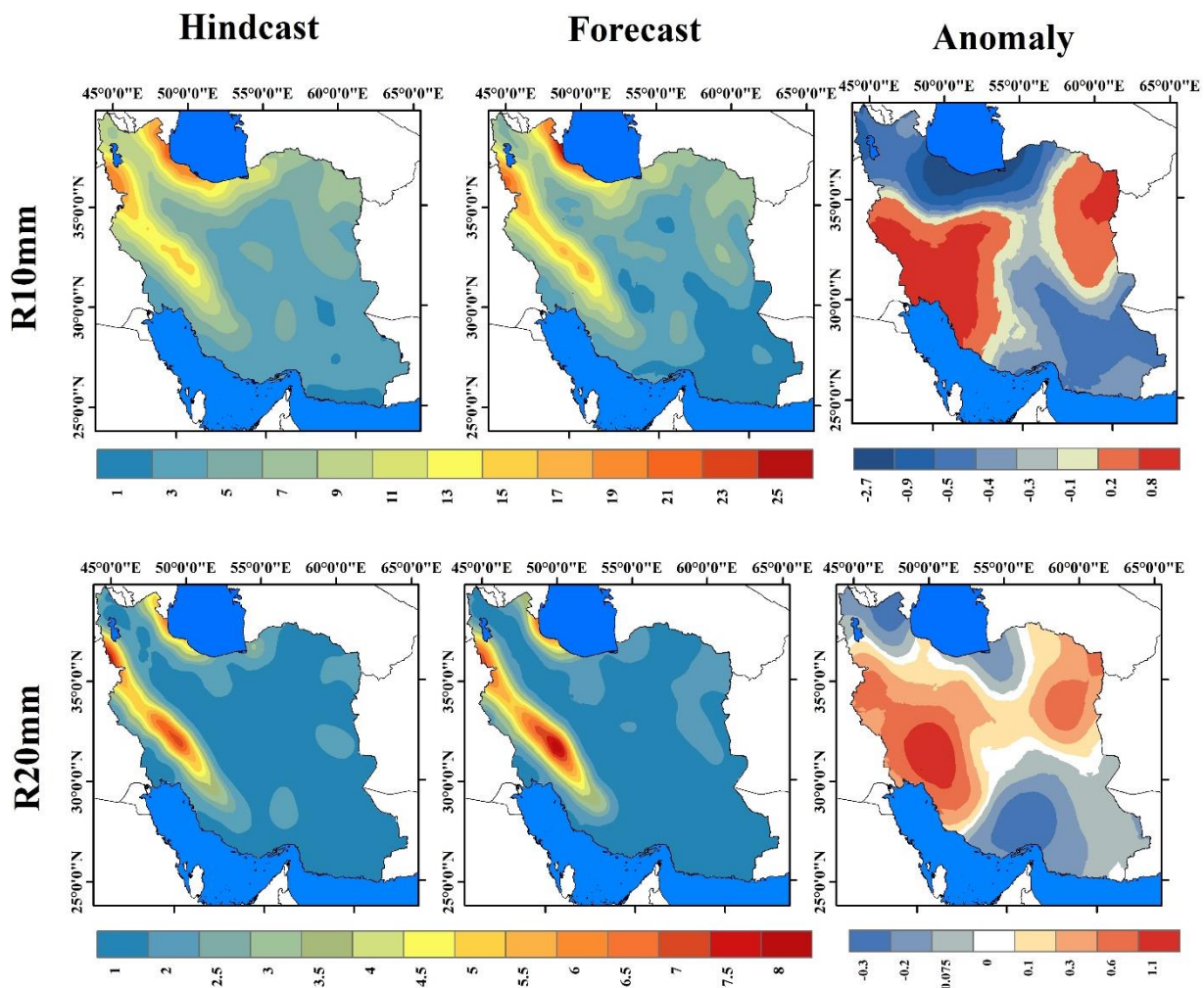
الگوی کلی روزهای همراه با بارش خیلی‌سنگین همانند روزهای همراه با بارش سنگین است. با این تفاوت که بیشینه روزهای همراه با بارش خیلی‌سنگین در مناطق مرتفع زاگرس و نه در سواحل جنوبی دریای خزر دیده می‌شود. یکی از دلایل این نتیجه می‌تواند در ارتباط با ظرفیت

۳-۳. پیش‌بینی دهه ای بارش سنگین (R10mm) و خیلی‌سنگین (R20mm)

مطابق با تعریف ETCCDI که پیش‌تر نیز گفته شد روزهای همراه با بارش سنگین و روزهای همراه با بارش خیلی‌سنگین به روزهایی گفته می‌شود که بارش در آن روز به ترتیب ۱۰ و ۲۰ میلی‌متر و یا بیشتر باشد. پرونداد مدل همادی تولید شده CMIP6-DCPP-MME در دوره گذشته‌نگر نشان می‌دهد که بیشینه شاخص روزهای همراه با بارش سنگین در مناطق جنوبی دریای خزر، ارتفاعات زاگرس و مناطق غربی ایران در مرز با کشور ترکیه به چشم می‌خورد (شکل ۴). مراجعه به تحقیقات انجام‌شده، بیانگر آن است که بیشینه بارش در سواحل جنوبی دریای خزر بیش از هر عاملی، ناشی از استقرار یک جریان جنوب سو بر روی دریای خزر و انتقال مناسب رطوبت از دریای خزر به حوضچه جنوبی و سواحل جنوبی این دریا می‌باشد (مفیدی و همکاران، ۱۳۸۶؛ ۱۳۹۱). همچنین، تحقیقات انجام‌شده، رخداد بیشینه بارش در محدوده زاگرس مرتفع در جنوب غرب ایران را عمدتاً حاصل عبور سامانه‌های کم فشار سودانی به شکل مستقل و یا در ادغام با سامانه‌های کم فشار مدیترانه‌ای دانسته‌اند (مفیدی و زرین، ۱۳۸۴؛ ۱۳۸۵). در مقیاس منطقه‌ای، تأثیر گرمایش جهانی بر فراوانی روزهای بارش سنگین بستگی به این دارد که کدام سامانه‌های بارشی در مقیاس همدید سبب رخداد بارش سنگین در مناطق جغرافیایی مختلف می‌شوند. همچنین روزهای بارش‌های سنگین و خیلی‌سنگین همانند آنچه در زاگرس مرتفع دیده می‌شود، علیرغم حجم بالای رطوبت انتقال یافته از دریاها گرم جنوبی و عبور سامانه‌های کم فشار سودانی-مدیترانه‌ای، به برهمکنش کوه‌های مرتفع با سامانه‌های عبوری و فرایند بارش اروگرافیک نیز مربوط می‌شود. در تأیید نتایج به‌دست‌آمده، مفیدی (۱۳۸۴) با بررسی همدیدی بارش‌های سیل‌زا با منشأ منطقه دریای سرخ در خاورمیانه به این نتیجه رسید که کم‌فشار منطقه دریای سرخ با توجه به دمای پتانسیل و ظرفیت رطوبتی بالا باعث ایجاد

CMIP6-MME در دوره آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۶۰) به این نتیجه رسیدند که روزهای همراه با بارش سنگین و خیلی سنگین در ایران همگام با گرم شدن کره زمین افزایش یافته و بی هنجاری در طول قرن بیست و یکم با شیب آرامی افزایشی است. در یک حالت کلی، روزهای همراه با بارش سنگین با گرم شدن کره زمین بیشتر می شوند که با نتایج تیبالدی و آربلاستر (۲۰۱۴) همخوانی دارد. افزایش روزهای همراه با بارش خیلی سنگین تهدیدی جدی برای این مناطق از نظر رخداد سیل خواهد بود.

رطوبتی بالاتر سامانه سودانی که مناطق زاگرس را تحت تأثیر قرار می دهد، باشد. بی هنجاری روزهای همراه با بارش خیلی سنگین در ایران الگوی تقریباً مشابهی با روزهای همراه با بارش سنگین دارد. بیشینه بی هنجاری منفی این شاخص با کاهش ۰/۳ روز بیشتر در جنوب شرق و شمال غرب کشور به همراه مناطق خزر شرقی دیده می شود. در مقابل، بیشینه بی هنجاری مثبت روزهای همراه با بارش خیلی سنگین در مناطق غربی، جنوب غربی و شمال شرقی به ۱/۱ روز می رسد. در تأیید نتیجه به دست آمده، زرین و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از مدل همادی



شکل ۴. شاخص روزهای همراه با بارش سنگین (R10mm) و روزهای همراه با بارش خیلی سنگین (R20mm)، دوره گذشته نگر (۲۰۱۹-۱۹۸۱)، دوره پیش بینی (۲۰۲۱-۲۰۲۸)، بی هنجاری روزهای همراه با بارش سنگین و خیلی سنگین (واحد: میلی متر)

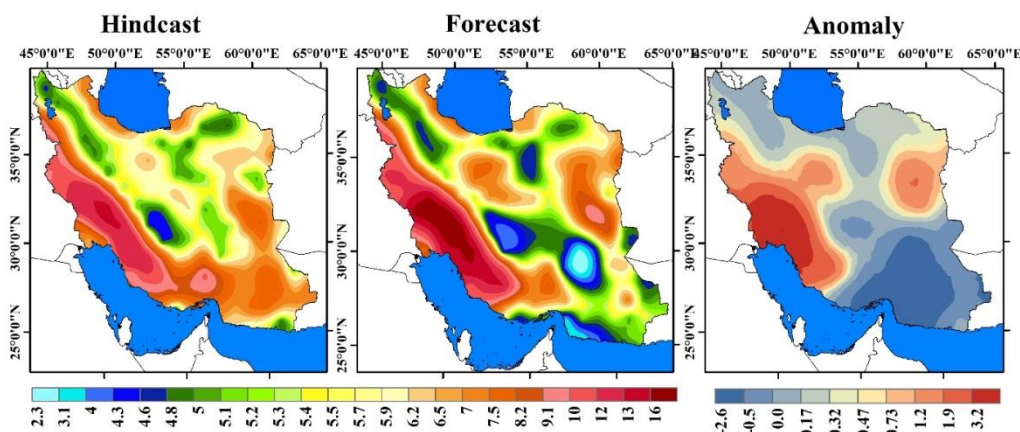
گرم سال از سامانه مونسون تابستانه دریافت می‌کنند و طبیعتاً به دلیل ظرفیت رطوبتی بیشتر هوای گرم، مقدار و شدت بارش بیشتری را به نسبت سامانه‌های دوره سرد در هر رخداد بارش تجربه می‌نمایند. برای مثال می‌توان به بارش‌های سیل‌آسای تابستان ۱۴۰۱ در مناطق نامبرده اشاره کرد.

نتایج پیش‌بینی مدل همادی CMIP6-DCPP-MME نشان می‌دهد که بارش در دوره پیش‌بینی از جهت شدت و گستره، افزایش قابل توجهی نسبت به دوره گذشته‌نگر دارد. شدت بارش طی دوره پیش‌بینی در زاگرس مرتفع تا ۱۵/۷ میلی‌متر / روز نیز می‌رسد که نسبت به دوره گذشته‌نگر ۳ میلی‌متر/روز افزایش نشان می‌دهد. همچنین شدت بارش در شمال شرق و مناطق جنوبی دریای خزر نیز با افزایش همراه است که مقدار آن ۱ میلی‌متر/روز است. این در حالی است که در دوره پیش‌بینی شدت بارش در جنوب شرق ایران حدود ۱ میلی‌متر/روز کمتر است (شکل ۵).

به‌طور کلی شدت بارش در شمال شرق و مناطق مرکزی سواحل جنوبی دریای خزر (۱ میلی‌متر/روز)، ارتفاعات البرز (۱ تا ۲ میلی‌متر در روز)، جنوب‌غربی و زاگرس مرتفع (۲ تا ۳/۲ میلی‌متر/روز) دارای بی‌هنجاری مثبت است. اما در جنوب شرق و شمال غرب کشور شدت بارش بی‌هنجاری منفی دارد که بیشینه این بی‌هنجاری با مقدار ۱- تا ۲/۶- میلی‌متر/روز در سواحل جنوبی و جنوب شرق کشور دیده می‌شود.

۳-۴. پیش‌بینی دهه‌ای شدت بارش (SDII)

بررسی شدت بارش در دوره گذشته‌نگر نشان می‌دهد که بیشینه این شاخص در ارتفاعات زاگرس (مرکزی و جنوبی) دیده می‌شود. به طوری که در این مناطق بیشینه شدت بارش بین ۸/۳ تا ۱۳ میلی‌متر/روز در نوسان است. این در حالی است که در مناطق جنوبی دریای خزر که پیش‌تر به‌عنوان یکی از مناطق بیشینه روزهای همراه با بارش سنگین نامبرده شد، بارش از شدت کمتری برخوردار است. شدت بارش در این منطقه بین ۷/۲ تا ۸/۳ میلی‌متر/روز در نوسان است. علت پایین بودن شدت بارش در سواحل خزری بیش از آن که دلیل اقلیمی داشته باشد می‌تواند دلیل آماری داشته باشد. دلیل آماری که برای پایین بودن شدت بارش در این منطقه می‌توان به آن اشاره کرد، فراوانی زیاد روزهای بارانی است؛ چراکه شدت بارش از تقسیم مجموع بارش به روزهای بارشی به دست می‌آید که طبیعتاً در منطقه خزری به دلیل زیاد بودن فراوانی روزهای بارشی مخرج کسر بزرگ‌تر شده و نتیجه به دست آمده برای شدت بارش کمتر از سایر مناطق کشور خواهد بود. شدت بارش روزانه در جنوب شرق ایران نیز قابل توجه است و مقدار آن بین ۵ تا ۷ میلی‌متر در روز در تغییر است (شکل ۵). بالابودن شدت بارش روزانه در جنوب شرقی ایران که از منظر اقلیمی تعداد روزهای بارشی پایینی را تجربه می‌کند نشانگر پتانسیل بالقوه این مناطق برای بروز رخداد سیل است. از سوی دیگر این مناطق عمده بارش‌های خود را در دوره



شکل ۵. شاخص شدت بارش روزانه (SDII): دوره گذشته‌نگر (۲۰۱۹-۱۹۸۱)، دوره پیش‌بینی (۲۰۲۱-۲۰۲۸)، بی‌هنجاری شدت بارش (واحد: میلی‌متر/روز)

۳-۵. پیش‌بینی دهه‌ای بیشینه بارش یک، سه و پنج‌روزه (Rx1,3,5 day)

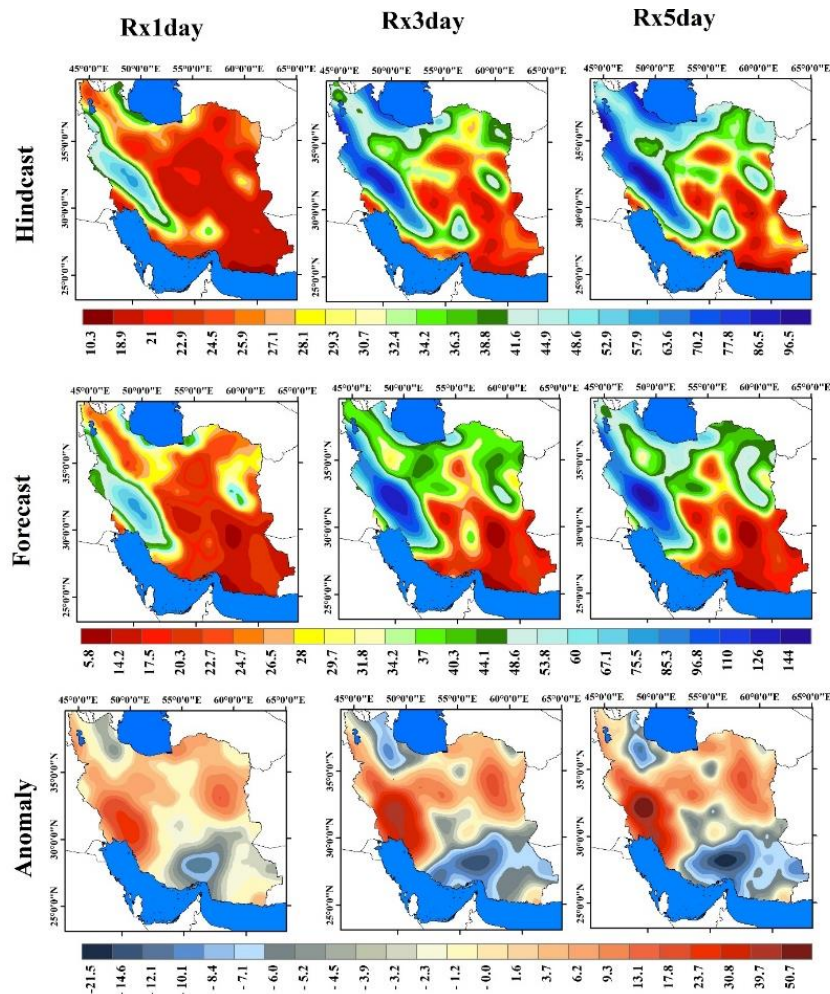
بررسی بیشینه بارش یک‌روزه، سه‌روزه و پنج‌روزه در دوره گذشته‌نگر نشان می‌دهد که به‌جز منطقه خزری، بخش عمده کانون‌های اصلی بیشینه بارش منطبق بر ارتفاعات بوده و کانون‌های اصلی آن به‌ترتیب در رشته‌کوه زاگرس، سواحل خزری و به‌خصوص منطقه خزر غربی و منطقه غرب ایران و شمال‌غرب ایران است. کمینه این سه شاخص در جنوب‌شرقی ایران واقع در سواحل مکران و مناطق داخلی کشور دیده می‌شود. کمینه و بیشینه این سه شاخص در ایران بین ۱۰/۳ میلی‌متر تا ۹۶/۵ میلی‌متر در نوسان است (شکل ۶).

بررسی دوره پیش‌بینی نشان می‌دهد که ارتفاعات زاگرس همانند دوره گذشته‌نگر کانون بیشینه شاخص‌های مورد بررسی است. در این منطقه شاخص Rx1day بین ۵۵ تا ۷۵ میلی‌متر، شاخص Rx3day بین ۹۰ تا ۱۳۰ میلی‌متر و شاخص Rx5day بین ۱۰۴ تا ۱۴۴ میلی‌متر است. این نتیجه نشان از افزایش قابل‌توجه بیشینه بارش‌های یک، سه و پنج‌روزه در این منطقه در دهه آینده دارد. در مقابل دو کانون اصلی دیگر بیشینه بارش یعنی سواحل دریای خزر و شمال‌غرب ایران افزایش بیشینه بارشی همانند زاگرس را ندارند (شکل ۶).

بی‌هنجاری بیشینه بارش‌های یک، سه و پنج‌روزه در ایران نشان از کاهش حداقل ۲۱/۵- میلی‌متر تا افزایش حداکثر ۵۰/۷ میلی‌متری را دارد. بی‌هنجاری منفی بیشینه بارش‌های یک، سه و پنج‌روزه در ایران در سه منطقه مجزا شمال‌غرب و جنوب و جنوب‌شرق ایران دیده می‌شود. کانون اصلی کاهش بیشینه بارش یک، سه و پنج‌روزه در

جنوب ایران (شمال تنگه هرمز) دیده می‌شود. کانون دوم بی‌هنجاری منفی که ضعیف‌تر از کانون نخست است در جنوب‌شرقی کشور به‌استثنای منطقه چابهار است. سومین و آخرین کانون بی‌هنجاری منفی بیشینه بارش‌های یک، سه و پنج‌روزه در شمال‌غربی ایران در استان اردبیل دیده می‌شود که تا استان‌های زنجان و قزوین نیز کشیده شده است. مناطقی با بی‌هنجاری مثبت برای سه شاخص مورد بررسی در بخش‌های بزرگی از ایران دیده می‌شود. به نظر می‌رسد این بخش‌ها که از جنوب‌غرب به سمت شمال‌شرقی کشور کشیده شده‌اند منطبق بر منطقه فعالیت سامانه سودانی می‌باشد و بی‌هنجاری مثبت به‌دست‌آمده برای دوره پیش‌بینی (۲۰۲۱-۲۰۲۸) می‌تواند در نتیجه فعالیت بیشتر سامانه یاد شده در دوره آینده نزدیک برای این مناطق از ایران باشد.

بی‌هنجاری مثبت در ایران دو کانون اصلی را نشان داده است. کانون نخست در جنوب‌غربی ایران دیده می‌شود. بی‌هنجاری در این منطقه برای بیشینه بارش یک روزه ۱۲ تا ۲۳ میلی‌متر، بیشینه بارش سه‌روزه ۲۸ تا ۴۳ میلی‌متر و بیشینه بارش پنج‌روزه ۳۲ تا ۵۰ میلی‌متر است. کانون دوم بیشینه بی‌هنجاری مثبت در منطقه شمال شرق ایران دیده می‌شود. به‌طوری‌که برای شاخص Rx1day بی‌هنجاری ۲ تا ۶ میلی‌متر، شاخص Rx3day بی‌هنجاری ۹ تا ۱۷ میلی‌متر و برای شاخص Rx5day بی‌هنجاری ۱۰ تا ۱۹ میلی‌متر دیده می‌شود. کانون بیشینه دیگری که برای بیشینه‌های بارش‌های یک، سه و پنج‌روزه دیده می‌شود، منطقه چابهار در گوشه جنوب‌شرقی ایران است. این مقدار افزایشی در این منطقه خشک از ایران در آینده نزدیک، می‌تواند در نتیجه فعالیت بیشتر سامانه مونسون تابستانه در این منطقه از کشور باشد.



شکل ۶. شاخص بارش یک، سه و پنج‌روزه (Rx1,3,5 day): دوره گذشته‌نگر (۲۰۱۹-۱۹۸۱)، دوره پیش‌بینی (۲۰۲۱-۲۰۲۸)، بی‌هنجاری (واحد: میلی‌متر/روز).

۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، شاخص‌های بارش فرین مخاطره‌آمیز در ایران بر اساس تعریف استاندارد کارگروه ETCCDI برای یک دوره نرمال اقلیمی گذشته و یک دهه آینده مورد بررسی قرار گرفت. برای پیش‌بینی بارش و فرین‌های بارشی از پروژه پیش‌بینی اقلیمی دهه‌ای (DCPP) مشارکت یافته در CMIP6 استفاده شد. یک مدل همادی با روش IWM از ۲۷ اجرای متفاوت تحت عنوان CMIP6-DCPP-MME برای بارش روزانه ایران با تفکیک افقی ۱۰۰ کیلومتر تولید شد. بر این اساس، مهم‌ترین یافته‌های تحقیق به شرح زیر می‌باشند:

یافته‌ها بیانگر آن است که کارایی مدل همادی CMIP6-MPI-ESM1-2 نسبت به مدل‌های منفرد DCPP-MME و BCC-CSM2-MR و MRI-ESM2-0.HR قابل توجهی افزایش یافته است.

نتایج نشان داد که به طور کلی فرین‌های بارش در بخش‌هایی از ایران در دهه آینده افزایش خواهند یافت. بر اساس پیش‌بینی‌ها، کانون‌های اصلی روند افزایشی فرین‌های بارشی بر جنوب‌غرب و شمال‌شرق ایران متمرکز خواهد بود. بی‌هنجاری مثبت شاخص‌های فرین که نشان‌دهنده روند افزایشی فرین‌های بارشی در دوره پیش‌بینی (۲۰۲۱-۲۰۲۸) نسبت به دوره گذشته‌نگر (۲۰۱۹-۱۹۸۱) است، برای روزهای همراه با بارش سنگین و خیلی سنگین حدود یک‌روز، برای شدت بارش روزانه ۳/۲ میلی‌متر / روز و برای بیشینه بارش‌های یک، سه و پنج روزه حداکثر تا ۵۰/۷ میلی‌متر خواهد بود. نتایج این تحقیق، یافته‌های زیرین و داداشی رودباری (۲۰۲۱) و

در پژوهش حاضر، شاخص‌های بارش فرین مخاطره‌آمیز در ایران بر اساس تعریف استاندارد کارگروه ETCCDI برای یک دوره نرمال اقلیمی گذشته و یک دهه آینده مورد بررسی قرار گرفت. برای پیش‌بینی بارش و فرین‌های بارشی از پروژه پیش‌بینی اقلیمی دهه‌ای (DCPP) مشارکت یافته در CMIP6 استفاده شد. یک مدل همادی با روش IWM از ۲۷ اجرای متفاوت تحت عنوان CMIP6-DCPP-MME برای بارش روزانه ایران با تفکیک افقی ۱۰۰ کیلومتر تولید شد. بر این اساس، مهم‌ترین یافته‌های تحقیق به شرح زیر می‌باشند:

یافته‌ها بیانگر آن است که کارایی مدل همادی CMIP6-MPI-ESM1-2 نسبت به مدل‌های منفرد DCPP-MME و BCC-CSM2-MR و MRI-ESM2-0.HR قابل توجهی افزایش یافته است.

نتایج نشان داد که به طور کلی فرین‌های بارش در بخش‌هایی از ایران در دهه آینده افزایش خواهند یافت. بر اساس پیش‌بینی‌ها، کانون‌های اصلی روند افزایشی فرین‌های بارشی بر جنوب‌غرب و شمال‌شرق ایران متمرکز خواهد بود. بی‌هنجاری مثبت شاخص‌های فرین که نشان‌دهنده روند افزایشی فرین‌های بارشی در دوره پیش‌بینی (۲۰۲۱-۲۰۲۸) نسبت به دوره گذشته‌نگر (۲۰۱۹-۱۹۸۱) است، برای روزهای همراه با بارش سنگین و خیلی سنگین حدود یک‌روز، برای شدت بارش روزانه ۳/۲ میلی‌متر / روز و برای بیشینه بارش‌های یک، سه و پنج روزه حداکثر تا ۵۰/۷ میلی‌متر خواهد بود. نتایج این تحقیق، یافته‌های زیرین و داداشی رودباری (۲۰۲۱) و

مراجع

- زرین و همکاران (۲۰۲۲) مبنی بر افزایش شدت بارش روزانه و روزهای همراه با بارش سنگین و خیلی سنگین برای دوره آینده نزدیک تحت سناریوهای SSP را تأیید می‌کند.
- بر اساس پیش‌بینی دهه‌ای، روزهای همراه با بارش‌های سنگین و خیلی سنگین، شدت بارش روزانه و بیشینه بارش‌های یک، سه و پنج‌روزه ظرف یک دهه آینده و در شرایط اقلیمی گرم‌تر در ایران افزایش پیدا خواهند کرد. این نتیجه یافته‌های قبلی را مورد تأیید قرار می‌دهد (چو و همکاران، ۲۰۰۹؛ کالینز و همکاران، ۲۰۱۳). این تغییرات با ظرفیت نگهداری بیشتر رطوبت در هوای گرم که به همگرایی بیشتر رطوبت کمک می‌کند سازگار است (تیبالدی و همکاران، ۲۰۰۶).
- همچنین وابستگی رابطه کلاوسوس-کلاپیرون بین افزایش دما و شدت بارش، در ارتباط با رخدادهای بارشی فرین، قادر به تخلیه ستون رطوبتی جو است (آلن و سودن، ۲۰۰۸). در حقیقت، کاملاً مشهود است که افزایش محتوای بخار آب جو عموماً با افزایش بارش‌های فرین در اقلیم گرم‌تر همراه است (پال و همکاران، ۲۰۰۷).
- یافته‌ها مبین آن است که منطقه جنوب شرقی ایران از مرزهای شرقی تا شمال تنگه هرمز محدوده اصلی رخداد بی‌هنجاری منفی بارش‌های فرین کشور در دهه آینده خواهد بود. به طوری که شاخص‌های روزهای همراه با بارش سنگین و خیلی سنگین با کاهش ۲/۷ و ۰/۳ روز، شدت بارش روزانه با کاهش ۲/۶ میلی‌متر/روز همراه خواهند بود. مضاف بر این، بیشینه بارش‌های یک، سه و پنج‌روزه نیز کاهش محسوسی به میزان ۲۱/۵ میلی‌متر در بارش‌های فرین را تجربه خواهند کرد. علاوه بر این، سواحل جنوبی دریای خزر با کاهش حداکثر ۷/۲ روز دومین محدوده کاهش روزهای همراه با بارش سنگین در کشور به‌شمار می‌رود. کاهش فراوانی روزهای همراه با بارش سنگین در منطقه خزری پیش‌تر توسط زرین و داداشی‌رودباری (۱۴۰۰ب) در پیش‌نگری این متغیر با مدل‌های CMIP6 نیز به‌دست آمده است.
- احمدی، م.؛ داداشی‌رودباری، ع.ع.؛ اکبری‌ازیرانی، ط. و کرمی، ج. (۱۳۹۸). کارایی مدل HadGEM2-ES در ارزیابی نابهنجاری فصلی دمای ایران تحت سناریوهای واداشت تابشی. *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۳(۳)، ۶۲۵-۶۴۴.
- آزادی، م.؛ دهملایی، م.؛ محمدی، س.ع. و صوفیانی، م. ر. (۱۳۹۷). پیش‌بینی احتمالاتی سرعت باد ده متری در استان تهران. *مجموعه مقالات هجدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران*، تهران مدل‌های گردش کلی سری CMIP5 (دوره ۲۰۱۰-۲۰۲۰). *نشریه نیوار*، ۴۳(۱۰۴۱۰۵)، ۶۲-۷۱.
- اسدی رحیمیگی، ن.؛ زرین، آ.؛ مفیدی، ع. و داداشی‌رودباری، ع.ع. (۱۴۰۰). تحلیل پراکنش فصلی بارش‌های فرین در ایران با استفاده از پایگاه AgERA5. *مجله تحقیقات آب و خاک ایران*، ۵۲(۱۱)، ۲۷۲۳-۲۷۳۷.
- اسدی رحیمیگی، ن.؛ زرین، آ.؛ مفیدی، ع. و داداشی‌رودباری، ع.ع. (۱۴۰۱). پیش‌بینی فرین‌های دمایی ایران برای آینده نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۲۸) با کاربست برون‌داد مدل‌های پیش‌بینی اقلیم دهه‌ای (DCPP). *بیستمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران*، ۱ و ۲ آذر ۱۴۰۱، موسسه ژئوفیزیک، تهران.
- بابایان، ا.؛ اقبالی، آ.؛ آزادی، م.؛ مدیریان، ر.؛ کریمیان، م.؛ حبیبی‌نوخندان، م. و زرین، آ. (۱۳۹۷). کارایی سامانه دینامیکی پیش‌بینی فصلی CFSv.2-RegCM4 در پیش‌بینی ماهانه بارش کشور، مطالعه موردی: ماه‌های سپتامبر تا دسامبر سال ۲۰۱۷. *اولین کنفرانس بین‌المللی پیش‌بینی عددی وضع هوا و اقلیم*، تهران.
- بابایان، ا.؛ مدیریان، ر.؛ کریمیان، م. و جوانشیری، ز. (۱۴۰۰). پیش‌بینی چندسالانه بارش ایران با مقیاس گاهی برون‌داد مدل‌های DCPP، مطالعه موردی: دوره ۲۰۱۹-۲۰۲۳. *پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی*، ۲(۶)، ۶۳-۷۸.

مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، (۱)۲۵،
۲۴۲-۲۲۹ .

مدیریان، ر.؛ بابایان، ا. و کریمیان، م. (۱۳۸۹). پیکربندی
بهینه مدل RegCM3 برای شبیه‌سازی بارش و دما در
فصل پاییز منطقه خراسان در دوره ۲۰۰۰-۱۹۹۱. مجله
پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۴۱(۷۰)، ۱۰۷-۱۲۰ .

مفیدی، ع. و زرین، آ. (۱۳۸۴). تحلیل سینوپتیک ماهیت
سامانه‌های کم فشار سودانی (مطالعه موردی: توفان
دسامبر ۲۰۰۱)، فصلنامه جغرافیایی آمایش سرزمین،
۲(۶)، ۴۸-۲۴ .

مفیدی، ع. و زرین، آ. (۱۳۸۵). بررسی سینوپتیک تأثیر
سامانه‌های کم فشار سودانی در وقوع بارش‌های
سیل‌زا در ایران، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، ۷۷،
۱۱۳-۱۳۶ .

مفیدی، ع. (۱۳۸۴). اقلیم‌شناسی سینوپتیک بارش‌های
سیل‌زا با منشا منطقه دریای سرخ در خاورمیانه،
فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، ۷۵، ۹۳-۷۱ .

مفیدی، ع.؛ زرین، آ. و جانباز قبادی، غ. ر. (۱۳۸۶). تعیین
الگوی هم دیدی بارش‌های شدید و حدی پاییزه در
سواحل جنوبی دریای خزر، مجله فیزیک زمین و فضا،
۳۳(۳)، ۱۵۴-۱۳۱ .

مفیدی، ع.؛ زرین، آ. و جانباز قبادی، غ. ر. (۱۳۹۱). تبیین
علل کاهش یافتن مقدار و شدت بارش‌های زمستانه
در قیاس با بارش‌های پاییزه در سواحل جنوبی
دریای خزر، مجله فیزیک زمین و فضا، ۳۸(۱)، ۲۰۳-
۱۷۷ .

زرین، آ. و داداشی رودباری، ع. ع. (۱۳۹۹). پیش‌نگری
چشم‌انداز بلندمدت دمای آینده ایران مبتنی بر پرونداد
پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده فاز ششم
(CMIP6). مجله فیزیک زمین و فضا، ۴۶(۳)، ۵۸۳-
۶۰۲ .

زرین، آ. و داداشی رودباری، ع. ع. (۱۴۰۰الف).
پیش‌نگری دوره‌های خشک و مرطوب متوالی در
ایران مبتنی بر پرونداد همادی مدل‌های تصحیح شده
اریبی CMIP6. مجله فیزیک زمین و فضا، ۴۷(۳)،
۵۷۸-۵۶۱ .

زرین، آ. و داداشی رودباری، ع. ع. (۱۴۰۰ب). یادداشت
تحلیلی: تأثیر تغییر اقلیم بر بارش‌های سنگین ایران با
به‌کارگیری مدل همادی CMIP6. مجله آب و
توسعه پایدار، ۸(۴)، ۱۱۹-۱۲۴ .

زرین، آ.؛ داداشی رودباری، ع. ع. و حسنی، س. (۱۴۰۱).
پیش‌بینی دمای ماهانه ایران با استفاده از پروژه
پیش‌بینی اقلیمی دهه‌ای (DCPP) در دهه آینده
(۲۰۲۱-۲۰۲۸). فیزیک زمین و فضا، ۴۸(۱)، ۱۸۹-
۲۱۱ .

قهرمان، ن.؛ بابایان، ا.؛ آزادی، م. و لوک‌زاده، ص.
(۱۳۹۴). پس‌پردازش آماری پرونداد بارش مدل
RegCM4 روی شمال غرب ایران. مجله پژوهش‌های
جغرافیای طبیعی، ۴۷(۳)، ۳۸۵-۳۹۸ .

گودرزی، ل.؛ بنی‌حیب، م. ا. و غفاریان، پ. (۱۳۹۷).
ارزیابی کارایی مدل WRF در شبیه‌سازی بارش‌های
سنگین (مطالعه موردی: حوضه آبریز رودخانه کن)،

Allan, R. P., & Soden, B. J. (2008). Atmospheric
warming and the amplification of precipitation
extremes. *Science*, 321(5895), 1481-1484.

Bishop, C. H., & Abramowitz, G. (2013). Climate
model dependence and the replicate Earth
paradigm. *Climate dynamics*, 41(3), 885-900.

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. (2016). The decadal climate
prediction project (DCPP) contribution to CMIP6.
Geoscientific Model Development, 9(10), 3751-
3777.

Chou, C., Neelin, J. D., Chen, C. A., & Tu, J. Y.
(2009). Evaluating the "rich-get-richer"

mechanism in tropical precipitation change under
global warming. *Journal of climate*, 22(8), 1982-
2005.

Collins, M., Knutti, R., Arblaster, J., Dufresne, J.L.,
Fichefet, T., Friedlingstein, P., Gao, X.,
Gutowski, W.J., Johns, T., Krinner, G., &
Shongwe, M. (2013). Long-term climate change:
projections, commitments and irreversibility. In
*Climate change 2013-The physical science basis:
Contribution of working group I to the fifth
assessment report of the intergovernmental panel
on climate change* (pp. 1029-1136). Cambridge
University Press.

Doblas-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 communications*, 4(1), 1-9.
- Earman, S., & Dettinger, M. (2007). Climate Influences on Groundwater Recharge: Implications for Western Groundwater and Surface Water Resources in the Face of Climate Change. In AGU Fall Meeting Abstracts (Vol. 2007, pp. H14E-04).
- Goddard, L., Kumar, A., Solomon, A., Smith, D., Boer, G., Gonzalez, P., Kharin, V., Merryfield, W., Deser, C., Mason, S.J., & Kirtman, B.P. (2013). A verification framework for interannual-to-decadal predictions experiments. *Climate Dynamics*, 40(1), 245-272.
- Guemas, V., Corti, S., García-Serrano, J., Doblas-Reyes, F. J., Balmaseda, M., & Magnusson, L. (2013). The Indian Ocean: The region of highest skill worldwide in decadal climate prediction. *Journal of Climate*, 26(3), 726-739.
- IPCC. (2001). Climate Change 2001: The Scientific Basis, Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC. (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II, and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Rep., 151 pp., IPCC, Geneva, Switzerland, 2014.
- IPCC. (2007). Climate change 2007: The physical science basis. In: Solomon Q, Qin D, Manning M, Chen Z and others (eds) Contribution of Working Group I to the 4th assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge
- IPCC. (2021). Summary for policymakers Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press (2021).
- Jiang, J., Zhou, T., Chen, X., & Zhang, L. (2020). Future changes in precipitation over Central Asia based on CMIP6 projections. *Environmental Research Letters*, 15(5), 054009
- Kirtman, B., Power, S.B., Adedoyin, A.J., Boer, G.J., Bojariu, R., Camilloni, I., Doblas-Reyes, F., Fiore, A.M., Kimoto, M., Meehl, G., & Prather, M. (2013). Near-term climate change: projections and predictability.
- Kruschke, T., Bafort, D., Nikulin, G., & Koenigk, T. (2020). Multi-model decadal predictions of probabilities for seasonal mean temperature and precipitation extremes. In EGU General Assembly Conference Abstracts (p. 17685).
- Marotzke, J., Müller, W.A., Vamborg, F.S., Becker, P., Cubasch, U., Feldmann, H., Kaspar, F., Kottmeier, C., Marini, C., Polkova, I., & Prömmel, K. (2016). MiKlip: A national research project on decadal climate prediction. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 97(12), 2379-2394.
- Mastrantonas, N., Bhattacharya, B., Shibuo, Y., Rasmy, M., Espinoza-Dávalos, G., & Solomatine, D. (2019). Evaluating the benefits of merging near-real-time satellite precipitation products: A case study in the Kinu basin region, Japan. *Journal of Hydrometeorology*, 20(6), 1213-1233.
- Meehl, G.A., Goddard, L., Boer, G., Burgman, R., Branstator, G., Cassou, C., Corti, S., Danabasoglu, G., Doblas-Reyes, F., Hawkins, E., & Karspeck, A. (2014). Decadal climate prediction: an update from the trenches. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95(2), 243-267
- Mendez, M., Maathuis, B., Hein-Griggs, D., & Alvarado-Gamboa, L. F. (2020). Performance Evaluation of Bias Correction Methods for Climate Change Monthly Precipitation Projections over Costa Rica. *Water*, 12(2), 482
- NCA. (2014). U. S. National Climate Assessment Rep., 1717 Pennsylvania Avenue, NW, Suite 250, Washington, D.C.
- New, M., Todd, M., Hulme, M., & Jones, P. (2001). Precipitation measurements and trends in the twentieth century. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 21(15), 1889-1922.
- Pall, P., Allen, M. R., & Stone, D. A. (2007). Testing the Clausius–Clapeyron constraint on changes in extreme precipitation under CO2 warming. *Climate Dynamics*, 28(4), 351-363.
- Pincus, R., Batstone, C. P., Hofmann, R. J. P., Taylor, K. E., & Glecker, P. J. (2008). Evaluating the present-day simulation of clouds, precipitation, and radiation in climate models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D14).
- Ruggieri, P., Bellucci, A., Nicolí, D., Athanasiadis, P.J., Gualdi, S., Cassou, C., Castruccio, F., Danabasoglu, G., Davini, P., Dunstone, N., & Eade, R. (2021). Atlantic multidecadal variability and North Atlantic jet: a multimodel view from the decadal climate prediction project. *Journal of Climate*, 34(1), 347-360.
- Schuster, M., Grieger, J., Richling, A., Schartner, T., Illing, S., Kadow, C., Müller, W.A., Pohlmann, H., Pfahl, S., & Ulbrich, U. (2019). Improvement in the decadal prediction skill of the Northern Hemisphere extra-tropical winter circulation through increased model resolution. *Earth System Dynamics Discuss*, 10, 171-187.
- Stone, R. J. (1993). Improved statistical procedure for the evaluation of solar radiation estimation

- models. *Solar energy*, 51(4), 289-291.
- Sun, Q., Miao, C., Duan, Q., Ashouri, H., Sorooshian, S., & Hsu, K. L. (2018). A review of global precipitation data sets: Data sources, estimation, and intercomparisons. *Reviews of Geophysics*, 56(1), 79-107.
- Taylor, K. E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D7), 7183-7192.
- Tebaldi, C., & Arblaster, J. M. (2014). Pattern scaling: Its strengths and limitations, and an update on the latest model simulations. *Climatic Change*, 122(3), 459-471.
- Tebaldi, C., & Knutti, R. (2007). The use of the multi-model ensemble in probabilistic climate projections. *Philosophical transactions of the royal society A: mathematical, physical and engineering sciences*, 365(1857), 2053-2075.
- Tebaldi, C., Hayhoe, K., Arblaster, J. M., & Meehl, G. A. (2006). Going to the extremes. *Climatic change*, 79(3), 185-211.
- Trenberth, K. E. (2011). Changes in precipitation with climate change. *Climate research*, 47(1-2), 123-138.
- Trenberth, K. E., Dai, A., Rasmussen, R. M., & Parsons, D. B. (2003). The changing character of precipitation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 84(9), 1205-1218.
- van Oldenborgh, G. J., Doblas-Reyes, F. J., Wouters, B., & Hazeleger, W. (2012). Decadal prediction skill in a multi-model ensemble. *Climate dynamics*, 38(7), 1263-1280.
- Wehner, M. F. (2013). Very extreme seasonal precipitation in the NARCCAP ensemble: model performance and projections. *Climate Dynamics*, 40(1), 59-80.
- WMO. (2022). global annual to decadal climate update: a prediction for 2021-25. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 103(4), E1117-E1129.
- Yang, S., & Christiansen, B. (2020). The decadal climate prediction skill with focus on the North Atlantic region. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (p. 11243).
- Yeager, S.G., Danabasoglu, G., Rosenbloom, N.A., Strand, W., Bates, S.C., Meehl, G.A., Karspeck, A.R., Lindsay, K., Long, M.C., Teng, H., & Lovenduski, N.S. (2018). Predicting near-term changes in the earth system: a large ensemble of initialized decadal prediction simulations using the community earth system model. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99(9), 1867-1886.
- Zarrin, A., & Dadashi-Roudbari, A. (2021). Projection of future extreme precipitation in Iran based on CMIP6 multi-model ensemble. *Theoretical and Applied Climatology*, 144(1), 643-660.
- Zarrin, A., Dadashi-Roudbari, A., & Hassani, S. (2022). Future changes in precipitation extremes over Iran: Insight from a CMIP6 bias-corrected multi-model ensemble. *Pure and Applied Geophysics*, 179(1), 441-464.