

## Projection of extreme precipitation over Iran based on the ensemble approach of CMIP6 models in the near future (2026-2050) with rank-based weighting

Khansalari, S.<sup>1</sup>  | Mohammadi, S. A.<sup>1</sup> 

1. Atmospheric science and Meteorological Research Center, Tehran, Iran.

Corresponding Author E-mail: [khansalari@ut.ac.ir](mailto:khansalari@ut.ac.ir)

(Received: 28 Nov 2022, Revised: 5 Feb 2023, Accepted: 2 May 2023, Published online: 15 Nov 2023)

### Summary

In this study, a future projection of four extreme precipitation indices consists of total extreme precipitation (R95p), extreme precipitation days (R95d), the fraction of total rainfall from events exceeding the extreme precipitation threshold (R95pT) and extreme precipitation intensity (AEPI) over Iran was carried out using the reference period of 1990-2014 based on the multi-model ensemble approach and a rank-based weighting method using five models from the CMIP6 models (MPI-ESM1-2-HR, EC-Earth3, EC-Earth3-Veg, GFDL-ESM4, and MRI-ESM2-0). The weight of each model was calculated depending on its historical simulation skill and then weighted and unweighted groups were used for future projections. In this study, the threshold of heavy precipitation was calculated using percentiles, according to the method of Zhai et al. (2005). For this purpose, at each grid point, annual rainfall data (daily rainfall greater than or equal to 1 mm) were sorted in ascending order to obtain the sequence of annual rainfall for each year from 1990 to 2014. Then, the mean 95th percentile for the 25-year precipitation sequence at each grid point was defined as the extreme precipitation threshold (Rwn95). It should be noted that the heavy rainfall threshold for observations and CMIP6 models was calculated separately from observation data of synoptic stations and from each CMIP6 model. Based on this extreme precipitation threshold, four extreme precipitation indices were calculated. The results of the spatial skill of the simulation show that the EC-Earth3 model with MR\_taylor equal to 0.65 and with a horizontal resolution of 0.7 degrees has the best skill in simulating the spatial pattern of extreme precipitation indicators, and the MPI-ESM1-2-HR model with MR\_taylor equal to 0.5 and with a horizontal resolution of 0.938 degrees is the second suitable model among the five selected models used for simulating the spatial pattern of extreme precipitation indices. Also, the results of the simulation time skill test show the superiority of MPI-ESM1-2-HR and GFDL-ESM4 models with MR\_IVS respectively equal to 0.6 and 0.5 compared to other studied models. It is important to note that the horizontal resolution of the model is not the only factor that determines the skill of the model in simulating extreme precipitation indicators in the study area. Because the model with above-average weight (>0.2) is not a high-resolution model and improvement in physical processes which are also needed. The results show that the probability of increasing the total extreme precipitation (R95p) and extreme precipitation intensity (AEPI) in the study area in the period 2026-2050 under four scenarios SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 and SSP5-8.5 with values greater than 0.5 is almost certain. According to the median value close to zero or even negative of the extreme index R95d, it is inferred that the priority of the increase of the extreme amount of precipitation is over the number of days of occurrence, and these extreme precipitations will occur in fewer days, which is a warning for the flood risk. A comparison between the weighted and unweighted ensemble means shows that the uncertainty in the study area is almost always reduced after applying the weighted scheme to future probabilistic projections.

**Keywords:** Extreme precipitation, CMIP6 model, Scenario, Probabilistic projection, Rank-based weighting.

Cite this article: Khansalari, S., & Mohammadi, S. A. (2023). Projection of extreme precipitation over Iran based on the ensemble approach of CMIP6 models in the near future (2026-2050) with rank-based weighting. *Journal of the Earth and Space Physics*, 49(3), 727-746. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.351711.1007476>

E-mail: (1) [mohamadi.atefeh@yahoo.com](mailto:mohamadi.atefeh@yahoo.com)



## پیش‌نگری بارش‌های فرین در ایران بر اساس رویکرد همادی مدل‌های CMIP6 در

### آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰) با وزندهی مبتنی بر رتبه

سکینه خان‌سالاری<sup>۱</sup> | سیده عاطفه محمدی<sup>۱</sup> ✉

۱. پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: [khansalari@ut.ac.ir](mailto:khansalari@ut.ac.ir)

(دریافت: ۱۴۰۱/۹/۷، بازنگری: ۱۴۰۱/۱۱/۱۶، پذیرش نهایی: ۱۴۰۲/۲/۱۲، انتشار آنلاین: ۱۴۰۲/۸/۲۴)

#### چکیده

در این مطالعه پیش‌نگری چهار شاخص بارش فرین (R95p, AEPI, R95d, R95p) بر روی کشور ایران، با استفاده از دوره مرجع ۲۰۱۴-۱۹۹۰ بر اساس رویکرد مجموعه چندمدلی و روش وزندهی مبتنی بر رتبه با کاربست پنج مدل از مدل‌های CMIP6 انجام شد. وزن هر مدل بسته به مهارت شبیه‌سازی تاریخی آن محاسبه و سپس، گروه‌های وزن‌دار و بدون وزن برای پیش‌نگری‌های آینده استفاده شدند. نتایج بررسی مهارت نشان می‌دهد که مدل MPI-ESM1-2-HR با MR\_taylor برابر با ۰/۵ و با MR\_IVS برابر با ۰/۶ به ترتیب دومین و اولین مدل مناسب در بین پنج مدل منتخب برای شبیه‌سازی الگوهای فضایی و زمانی شاخص‌های بارش فرین است. بنابراین تفکیک افقی مدل تنها عامل تعیین‌کننده مهارت مدل در شبیه‌سازی نیست و بهبود در فرایندهای فیزیکی نیز مورد نیاز است. نتایج نشان می‌دهد احتمال این که کل بارش فرین (R95p) و شدت مطلق بارش فرین (AEPI) در منطقه مورد مطالعه، در دوره ۲۰۲۶-۲۰۵۰ تحت چهار سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5، SSP3-7.0 و SSP5-8.5 بیش از صفر باشد، در کل کشور بزرگ‌تر از ۰/۵ است. با توجه به مقدار میانه نزدیک به صفر و یا حتی منفی شاخص فرین R95d، تقدم افزایش مقدار بارش فرین بر تعداد روزهای رخداد استنباط می‌شود و این بارش‌های فرین در تعداد روزهای کمتری رخ خواهند داد که خود اعلام خطری برای رخداد بارش‌های سیل‌آسا می‌باشد. مقایسه بین میانگین‌های گروه وزن‌دار و بدون وزن نشان می‌دهد که عدم قطعیت پیش‌نگری احتمالی آینده در منطقه مورد مطالعه تقریباً همیشه پس از اعمال حالت وزندهی به مدل‌ها برای پیش‌نگری احتمالی آینده کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: بارش فرین، مدل CMIP6، سناریو، پیش‌نگری احتمالی، وزندهی مبتنی بر رتبه.

#### ۱. مقدمه

رویدادهای فرین در نظر گرفته می‌شوند (چن و همکاران، ۲۰۱۰؛ چن، ۲۰۱۳). مطالعات متعددی بر اساس ارزیابی مدل انجام شده است تا تغییرات اقلیمی آینده در بارش‌های فرین در مناطق مختلف، مانند جنوب آسیا (کریلانی و همکاران، ۲۰۰۷)، آسیای شرقی (لی و همکاران، ۲۰۲۰) را نشان دهد. با این حال، عدم قطعیت‌های بزرگ هنوز در پیش‌نگری‌های مدل، در مقیاس منطقه‌ای و جهانی وجود دارد. در میان این عدم قطعیت‌ها، سه علت اصلی وجود دارد: عدم قطعیت مدل، عدم قطعیت سناریو، و تنوع داخلی تصادفی در خود اقلیم (هاوکینز و ساتن، ۲۰۱۰). روش‌های پیش‌نگری احتمالی به‌طور گسترده در پیش‌نگری‌های اقلیمی مورد استفاده قرار گرفته‌اند

گرم‌شدن کره‌زمین در چند دهه اخیر، نه تنها از نظر آب‌وهوای میانگین، بلکه با توجه به رویدادهای فرین در مناطق مختلف جهان، عمیقاً بر اقلیم تأثیر گذاشته است (کریستنسن و کریستنسن، ۲۰۰۴؛ شیو و همکاران، ۲۰۱۲؛ پاپالکسیو و مونتاناری، ۲۰۱۹). علاوه بر این، پیش‌نگری می‌شود که رویدادهای مرطوب شدید در بسیاری از مناطق خشکی به دلیل گرمایش جهانی بیشتر رخ دهد (میل و همکاران، ۲۰۰۷؛ آلن و سوندن، ۲۰۰۸). در منطقه آسیا و اقیانوسیه، افزایش فراوانی روزهای خشک و تغییر به سمت باران شدیدتر برای قلمرو خشکی وجود دارد (واترسن، ۲۰۲۰). مدل‌های اقلیمی جهانی به‌عنوان ابزارهای مؤثری برای پیش‌نگری تغییرات آبی در اقلیم متوسط و

استناد: خان‌سالاری، سکینه و محمدی، سیده عاطفه (۱۴۰۲). پیش‌نگری بارش‌های فرین در ایران بر اساس رویکرد همادی مدل‌های CMIP6 در آینده نزدیک (۲۰۲۶-۲۰۵۰) با

وزندهی مبتنی بر رتبه. مجله فیزیک زمین و فضا، ۴۹(۳)، ۷۲۷-۷۴۶. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.351711.1007476>

رایانامه: (۱) [mohamadi.atefeh@yahoo.com](mailto:mohamadi.atefeh@yahoo.com)



ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2023.351711.1007476>

مطلوب است. با این‌حال، انتخاب روشی که برای تعیین وزن‌های متناظر مدل‌های مختلف استفاده شود جای بحث و بررسی دارد. چن و همکاران (۲۰۱۱) اولین کسانی بودند که یک روش وزن‌دهی مبتنی بر رتبه را پیشنهاد کردند و از آن برای انجام پیش‌نگری احتمالی میانگین دما و میانگین بارش در چین استفاده کردند. لی و همکاران (۲۰۱۶) همچنین از این روش برای پیش‌نگری احتمالی در چین استفاده کرد اما بر شاخص‌های بارش فرین متمرکز شدند. روش وزن‌دهی مبتنی بر رتبه (چن و همکاران، ۲۰۱۱) می‌تواند مدل‌ها را با در نظر گرفتن میانگین حالت و تغییرپذیری آب‌وهوا در یک لیست رتبه‌بندی مرتب کند.

در خارج از کشور ایران مطالعات گسترده‌ای در زمینه کاربرد مدل‌های CMIP6، در پیش‌نگری اقلیمی انجام شده است. برای مثال آلمازویی و همکاران (۲۰۲۱)، عملکرد مجموعه بزرگی از مدل‌های CMIP6 در آمریکای جنوبی را برای یک دوره مرجع اخیر ارزیابی و پیش‌نگری‌های آن‌ها را برای بارش و تغییرات دما در قرن بیست‌ویکم بررسی کرده‌اند. تغییرات آینده برای دو برش زمانی (۲۰۵۹-۲۰۴۰ و ۲۰۹۹-۲۰۸۰) نسبت به دوره مرجع (۱۹۹۵-۲۰۱۴) تحت چهار سناریو (SSP1-2.6، SSP2-4.5، SSP3-7.0 و SSP5-8.5) محاسبه کرده‌اند. مدل‌های CMIP6 با موفقیت ویژگی‌های اصلی آب‌وهوا را در سراسر آمریکای جنوبی ثبت کرده‌اند. با این‌حال، مدل‌های مختلف مهارت‌های متفاوتی را در توزیع مکانی و زمانی بارش و دما در مقیاس زیرمنطقه‌ای، به‌ویژه در عرض‌های جغرافیایی و ارتفاعات بالا نشان می‌دهند. همچنین تانگ و همکاران (۲۰۲۱) پیش‌نگری آینده از چهار شاخص بارش فرین بر روی منطقه شبه جزیره هندوچین و چین جنوبی با مرجع به دوره ۱۹۵۸-۲۰۱۴ از طریق استفاده از رویکرد همادی و وزن‌دهی مبتنی بر رتبه را تحت سه سناریو انجام داده‌اند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که افزایش در کل بارش فرین و تعداد روزهای شامل بارش فرین در شبه جزیره هندوچین نسبت به جنوب چین قابل توجه است. گان و همکاران (۲۰۲۲) بر اساس

(جورجی و بی، ۲۰۰۵؛ خو و همکاران، ۲۰۱۰؛ چن و همکاران، ۲۰۱۱؛ لی و همکاران، ۲۰۱۶). علاوه بر این، برای افزایش سطح قابلیت اطمینان، روش همادی چند مدلی (Multi Model Ensemble) MME نیز به‌طور گسترده‌ای برای پیش‌نگری‌های اقلیمی آینده استفاده شده است (فاولر و همکاران، ۲۰۰۷؛ یانگ و همکاران، ۲۰۱۱؛ سیلمن و همکاران، ۲۰۱۳ و ژو و همکاران ۲۰۱۴). در طی دهه‌های اخیر مدل‌های گردش کلی جو بسیاری در مناطق مختلف جهان توسعه یافته است که این مدل‌ها در قالب پروژه جهانی CMIP با یک چارچوب مشخص به‌منظور مطالعات اقلیمی ارائه شده‌اند. مدل‌های اقلیمی جهانی به‌عنوان ابزارهای مؤثری برای پیش‌نگری تغییرات آتی در اقلیم عدم قطعیت‌های بزرگ در پیش‌نگری‌های اقلیمی با علت‌های مختلف دارند. بنابراین این عدم قطعیت‌ها نوع مطالعات را تعیین کرده است. بر این اساس مطالعات متعددی بر اساس ارزیابی بدون وزن و وزن‌دار مدل انجام شده است تا تغییرات اقلیمی آینده در بارش در مناطق مختلف را نشان دهد.

برای افزایش سطح قابلیت اطمینان، روش همادی چند مدلی (MME) به‌طور گسترده‌ای برای پیش‌نگری‌های اقلیمی آینده استفاده شده است. برای مثال، جیانگ و همکاران (۲۰۱۲) با استفاده از هفت مدل از فاز سوم پروژه درون مقایسه‌ای مدل‌های جفت‌شده نشان دادند که هم فراوانی و هم شدت بارش شدید تا پایان قرن بیست‌ویکم در سراسر چین، به‌ویژه در فلات تبت و مناطق ساحلی جنوب‌شرقی افزایش می‌یابد. در این مطالعه و بسیاری از مطالعات دیگر از یک رویکرد MME ساده استفاده کردند که در آن وزن برابر به هر مدل شرکت‌کننده در پیش‌نگری آتی حداکثری بارش اختصاص داده شده است. با این‌حال، مهارت کلی پیش‌نگری آب‌وهوا با استفاده از رویکرد MME ساده ممکن است زمانی که مدل‌هایی با ظرفیت‌های شبیه‌سازی ضعیف استفاده می‌شوند، کاهش یابد (لی و همکاران، ۲۰۱۶). بنابراین، تعیین و مشخص کردن وزن‌های متفاوت برای مدل‌های مختلف برای به‌دست آوردن نتیجه‌ای قابل‌اعتمادتر

از میانگین داده‌های مشاهداتی وزن‌دهی شده‌اند. نتایج مطالعه حاکی از افزایش بارش در دو دوره ۲۰۴۰-۲۰۲۱ و ۲۰۸۰-۲۰۶۱ و کاهش در دو دوره ۲۰۶۰-۲۰۴۱ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱ برای سناریو SSP5-8.5 می‌باشد. این در حالی است که مقدار بارش تحت سناریو SSP1-2.6 برای دوره اول تغییرات قابل توجهی نداشته است ولی برای دو دوره ۲۰۶۰-۲۰۴۱ و ۲۰۸۰-۲۰۶۱ افزایش و برای دوره آخر کاهش را تجربه کرده است. همچنین برای سناریو-SSP3-7.0 کاهش بارش برای تمامی دوره‌ها به‌جز دوره اول که بارش تغییرات قابل توجهی نداشته است، می‌باشد. سپس ایشان در ادامه (سرابی و همکاران، ۱۳۹۹ب) به بررسی اثر تغییر اقلیم بر وضعیت سیلاب حوضه آبخیز سد طرق با استفاده از ترکیب نتایج مدل گردش کلی CMIP6 و سناریوهای مورد مطالعه با مدل هیدرولوژیکی و نیمه توزیعی HEC-HMS برای چهار دوره آینده پرداخته‌اند. که نتایج این مطالعه حاکی از تجمع بارش و جریان در یک محدوده زمانی خاص یعنی ماه مارس و کاهش این موارد به‌سمت ماه‌های آوریل و مه می‌باشد. زرین و داداشی رودباری (۲۰۲۱) به مطالعه شدت بارش شدید در ایران بر اساس مجموعه پنج مدل CMIP6 با تصحیح اریبی داده‌های بارش روزانه با وضوح افقی ۰/۵ درجه بر اساس سه سناریو (SSP1-2.6، SSP3-7.0 و SSP5-8.5) پرداخته‌اند. در بین مدل‌های تصحیح شده اریبی CMIP6، مدل IPSL-CM6A-LR نسبت به مدل‌های دیگر کمترین برآورد را دارد و مدل MPI-ESM1-2-HR بالاترین عملکرد را نشان می‌دهد. به‌طور کلی، نتایج این مطالعه حاکی از عدم قطعیت‌های مدل‌های CMIP6 برای بارش است که بر اساس آن هیچ مدل واحدی حتی در روش تصحیح اریبی قابل اعتماد نیست. همچنین زرین و داداشی رودباری (۱۴۰۰الف) در پژوهشی دیگر به پیش‌نگری بلندمدت روزهای خشک و مرطوب متوالی ایران پرداخته است. در این پژوهش از برونداد پنج مدل CMIP6 در دوره آینده ۲۰۶۰-۲۰۲۱ و ۲۱۰۰-۲۰۶۱ تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP3-7.0 و SSP5-8.5 به بررسی روزهای خشک و مرطوب متوالی پرداخته است. پس از بررسی

داده‌های روزانه هشت ایستگاه در حوضه فوقانی مخزن چوشندیان واقع در منطقه مرکزی چین، از سال ۱۹۵۷ تا ۲۰۱۷ و خروجی‌های چهار مدل CMIP6 تحت چهار سناریو (SSP1-2.6، SSP2-4.5، SSP3-7.0 و SSP5-8.5)، شاخص بارش فرین را محاسبه کرده‌اند. در این مطالعه برای بررسی تغییرپذیری مکانی و زمانی شاخص بارش فرین از روش من-کندال و تحلیل روند خطی استفاده شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که یک روند نزولی واضح در میزان بارندگی و شدت بارش از سال ۱۹۵۷ تا ۲۰۱۷ و یک روند صعودی در مقیاس‌های سالانه وجود دارد. همچنین روند شاخص بارش فرین در دوره‌های آینده در سال‌های ۲۰۲۰-۲۰۵۰ کاهش می‌یابد و سپس در سال‌های ۲۰۶۰-۲۱۰۰ افزایش می‌یابد. این یافته‌ها حاکی از آن است که بارش کل، فراوانی و تداوم بارش‌های فرین رو به افزایش است و وضعیت بارش‌های فرین در آینده به‌ویژه در پاییز و به دنبال آن تابستان شدید است.

در ایران، مطالعه مدل‌های CMIP5 عملکرد خوبی را در برآورد بارش نشان دادند، اما هنوز عدم قطعیت مکانی و زمانی چشمگیری برای این مدل‌ها در کشور وجود دارد (احمدی و همکاران، ۲۰۲۰). در رابطه با کاربست مدل CMIP6 در پیش‌نگری بارش مطالعات اندکی در کشور انجام شده است. سرابی و همکاران (۱۳۹۹الف) در پژوهشی به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر میزان پارامترهای دما و بارش حوضه آبخیز سد طرق با استفاده از ترکیب وزنی چهار مدل گردش کلی CMIP6 تحت سه سناریو SSP1-2.6، SSP3-7.0 و SSP5-8.5 برای یک دوره پایه (۲۰۱۲-۱۹۹۳) و چهار دوره آینده ۲۰۴۰-۲۰۲۱، ۲۰۶۰-۲۰۴۱، ۲۰۸۰-۲۰۶۱ و ۲۱۰۰-۲۰۸۱ می‌پردازد. در این مطالعه مدل‌ها با استفاده از چند سنجه آماری و همچنین ضریب همبستگی برای مقایسه نتایج دوره تاریخی مدل‌ها با داده مشاهداتی ایستگاه‌های منتخب و همچنین میانگین حوضه آبخیز راست‌آزمایی شده است. به‌منظور کاهش عدم قطعیت، نتایج هر چهار مدل با استفاده از مقدار انحراف میانگین دما یا بارش شبیه‌سازی شده در دوره پایه

شبه‌سازی دما و بارش دوره تاریخی در ایستگاه‌های مورد مطالعه هواشناسی استان یزد دارا بوده‌اند. همچنین نتایج این بررسی نشان می‌دهد که در سناریوهای مورد استفاده، دمای سالانه افزایش و بارندگی سالانه کاهش پیدا خواهد کرد. که بیشترین میزان افزایش دما و کاهش بارندگی در این منطقه، به ترتیب در فصول بهار و فصل پاییز رخ خواهند داد.

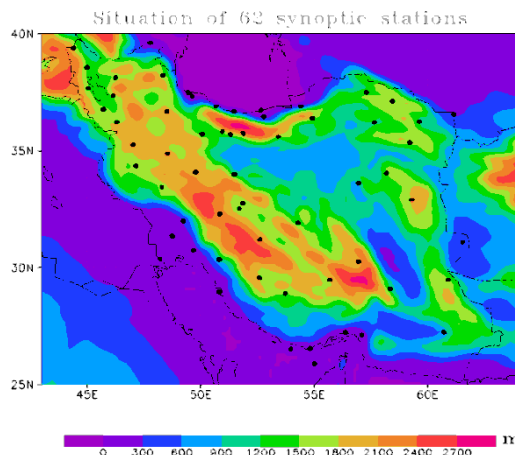
در رابطه با کاربست مدل CMIP6 در پیش‌نگری بارش و به‌خصوص بارش‌های فرین مطالعات اندکی در کشور انجام شده است و در مطالعات موجود به آستانه فرین مختص به هر منطقه کمتر توجه شده است. بنابراین در پژوهش حاضر بر اساس آستانه بارش فرین مربوط به هر منطقه که بر اساس مطالعات ۲۵ ساله حاصل شده است به پیش‌نگری همادی این بارش‌های فرین با رویکرد وزندهی مبتنی بر رتبه پرداخته شده است. لازم به ذکر است در این روش وزندهی هر دو معیار مهارت مکانی و زمانی شبه‌سازی در نظر گرفته می‌شود.

## ۲. داده‌ها و روش پژوهش

### ۲-۱. داده‌ها و منطقه مورد مطالعه

در این پژوهش از مجموعه داده‌های بارش دیدبانی شده واقع در بازه زمانی ۲۰۱۴-۱۹۹۰ که مشترک با بازه زمانی داده‌های تاریخی مدل‌های CMIP6 است و همچنین از داده‌های تاریخی مدل‌های CMIP6 (۱۹۹۰-۲۰۱۴) به منظور ارزیابی مهارت مدل‌های CMIP6 استفاده کرده و سپس پس از ارزیابی وزنی مدل‌ها به پیش‌نگری شاخص‌های فرین بارشی در بازه زمانی ۲۰۲۶-۲۰۵۰ پرداخته شده است. موقعیت ایستگاه‌های همدیدی مورد استفاده در این پژوهش به همراه کوهساری منطقه مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است. همچنین نام پنج مدل از مجموعه مدل‌های CMIP6 مورد استفاده در این مطالعه به همراه مشخصات تفکیک افقی و پیکربندی آن‌ها در جدول ۱ قابل پیگیری است.

مهارت هر یک از مدل‌ها، یک مدل همادی با به کارگیری روش میانگین وزنی مستقل ارائه شد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که بی‌هنجاری دوره‌های خشک متوالی به‌عنوان یک نمایه استاندارد برای خشکسالی‌های کوتاه‌مدت تحت شرایط تغییر اقلیم در ایران افزایشی است. بر اساس نتایج این پژوهش بیشترین افزایش روزهای خشک متوالی در ایران با حداکثر ۲۶/۴ روز تحت سناریوی SSP5-8.5 در دوره ۲۱۰۰-۲۰۶۱ در حوضه‌هی آبخیز دریای خزر و دریاچه ارومیه خواهد بود. علاوه بر این ایشان (زرین و داداشی رودباری، ۱۴۰۰ ب) به بررسی روزهای همراه با بارش سنگین در ایران با استفاده از سه مدل EC-Earth3، EC-Earth3-CC و EC-Earth3-Veg با روش میانگین وزنی با رویکرد مستقل پرداختند. جهت بررسی روزهای همراه با بارش سنگین از شاخص R10mm توصیه شده توسط کارگروه تخصصی در زمینه تغییر اقلیم و شاخص‌های فرین استفاده کرده‌اند. شاخص R10mm با سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5، SSP3-7.0 و SSP5-8.5 در دوره تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۹۰) و سه دوره ۲۵ ساله شامل دوره‌های آینده نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۶)، آینده میانی (۲۰۷۵-۲۰۵۱) و آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۷۶) محاسبه شد. نتایج این مطالعه نشان داد بارش سنگین در ایران تحت شرایط تغییر اقلیم آینده افزایش خواهد داشت. بیشینه افزایش روزهای همراه با بارش سنگین تحت سناریوهای SSP3-7.0 و SSP5-8.5 به ترتیب در سه حوضه دریای خزر، دریاچه ارومیه و قره‌قوم دیده شد. همچنین زارعیان (۱۴۰۱) به بررسی اثرات تغییر اقلیم بر دما و بارش چهار ایستگاه هواشناسی همدیدی استان یزد پرداخته است. بر این اساس، ترکیبی از خروجی هفت مدل CMIP6 با استفاده از روش وزندهی بر اساس شاخص ترکیبی کلینگ-گوپتا (KGE) پرداخته است و مقدار تغییرات ماهانه دما و بارش در هر ماه بر اساس سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 محاسبه شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که مدل‌های CanESM5 و BCC-CSM2-MR، بیشترین توانایی را به ترتیب در



شکل ۱. موقعیت ایستگاه‌های هم‌دیدگی مورد مطالعه به همراه کوهساری منطقه.

جدول ۱. مشخصات مدل‌های CMIP6 مورد استفاده به همراه پی‌کرندگی آنها.

شیمی جو	یخ دریا	اقیانوس	یخ زمین	سطح زمین	جو	تفکیک افقی (بر حسب درجه)	موسسه سازنده	مدل
-	بدون نام (Thermodynamic zero-layer) Dynamic (Hibler 79))	MPIOM1.63	-	JSBACH3.20	ECHAM6.3	۰/۹۳۸×۰/۹۳۸	موسسه هواشناسی ماکس پلانک آلمان	MPI-ESM1-2-HR
-	LIM3	NEMO3.6	-	HTESSEL	IFS cy36r4	۰/۷×۰/۷	انجمنی از چندین شرکت تجاری	EC-Earth3
-	LIM3	NEMO3.6	-	HTESSEL, LPJ-GUESS v4	IFS cy36r4	۰/۷×۰/۷	انجمنی از چندین شرکت تجاری	EC-Earth3-Veg
GFDL- ATM-CHEM 4.1	GFDL- SIM4p5	GFDL- OM4p5	GFDL- LM4.1	GFDL-LM4.1	GFDL- AM4.1	۱×۱	اداره ملی اقیانوسی و جوی، آزمایشگاه دینامیک سیالات ژئوفیزیکی آمریکا	GFDL-ESM4
MRI- CCM2.1	MRI.COM4. 4	MRI.COM4. 4	-	HAL 1.0	MRI- AGCM3.5	۱/۱۲۵×۱/۱۲۵	موسسه تحقیقات هواشناسی ژاپن	MRI-ESM2-0

## ۲-۲. روش کار

### ۲-۲-۱. شاخص‌های بارش فرین

در این مطالعه، آستانه بارش فرین با استفاده از صدک‌ها، به روش ژای و همکاران (۲۰۰۵) محاسبه شد؛ این روش

به‌طور گسترده در مطالعات بسیاری مورد استفاده قرار گرفته است (ونگ و همکاران، ۲۰۱۲، وو و همکاران، ۲۰۱۳، ژانگ و همکاران، ۲۰۱۴، کویی و همکاران، ۲۰۱۸ و تانگ و همکاران، ۲۰۲۱). بدین‌منظور در هر نقطه

## ۲-۲-۲. معیارهای ارزیابی مدل‌های منتخب CMIP6

## ۲-۲-۲-۱. نمودار تیلور

در این مطالعه برای ارزیابی کمی ظرفیت مدل‌های منتخب CMIP6 برای بازتولید تغییرات مکانی-تاریخی در چهار شاخص فرین از نمودار تیلور (تیلور، ۲۰۰۱) با بررسی ریشه میانگین مربعات اختلاف نرمال شده متمرکز (Centered Normalized Root-Mean-Square Difference (RMS) Difference)، ضریب همبستگی (R) و نسبت انحراف معیار مقادیر مدل و مقادیر مشاهده‌شده (STD\_ratio) استفاده شد. اگر مقدار مدل در سال  $t$ ام،  $m_i$  و مقدار مشاهداتی  $o_i$  باشد:

$$CNRMSD = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^I ((m_i - \bar{m}) - (o_i - \bar{o}))^2}{I}}}{std\_obs} \quad (4)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^I (m_i - \bar{m})(o_i - \bar{o})}{\sqrt{\sum_{i=1}^I (m_i - \bar{m})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^I (o_i - \bar{o})^2}} \quad (5)$$

$$STD\_ratio = \frac{std\_model}{std\_obs} \quad (6)$$

که  $\bar{m}$  و  $\bar{o}$  به ترتیب میانگین مقادیر مدل و مشاهدات، I تعداد سال‌ها و  $std\_obs$  و  $std\_model$  به ترتیب انحراف معیار مقادیر مدل و مشاهدات می‌باشد. این آماره‌ها برای هر یک از مدل‌ها در هر چهار شاخص فرین شامل R95p، R95d، AEPI، R95pT و محاسبه و رتبه‌بندی می‌شود. به این صورت که هرچه R و STD\_ratio به عدد یک و CNRMSD به مقدار صفر نزدیک‌تر باشند، مدل مورد بررسی با مهارت بیشتر است.

## ۲-۲-۲-۲. امتیاز مهارتی تغییرپذیری بین‌سالانه

برای ارزیابی کمی ظرفیت‌های مدل‌های CMIP6 برای بازتولید تغییرات زمانی تاریخی، از امتیاز مهارتی تغییرپذیری بین‌سالانه (Interannual Variability) Skill score (چن و همکاران، ۲۰۱۱) استفاده شده است. اگر  $STD_m$  و  $STD_o$  به ترتیب انحراف معیار بین سالانه مدل و مشاهدات باشند:

$$IVS = \left( \frac{STD_m}{STD_o} - \frac{STD_o}{STD_m} \right)^2 \quad (7)$$

شبکه، داده‌های بارش سالانه (بارش روزانه بزرگ‌تر یا مساوی یک میلی‌متر) به صورت صعودی مرتب شدند تا توالی بارش سالانه برای هر سال از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴ به دست آید. سپس، میانگین صدک ۹۵ برای توالی بارش ۲۵ ساله در هر نقطه شبکه به عنوان آستانه بارش فرین تعریف شد (R95 در رابطه ۱). لازم به ذکر است که آستانه بارش فرین برای مشاهدات و مدل‌ها به طور جداگانه از داده‌های دیدبانی ایستگاه‌های همدیدی و از هر مدل CMIP6 محاسبه شده است. بر اساس این آستانه بارش فرین، چهار شاخص بارش فرین محاسبه شد که توسط سازمان جهانی هواشناسی، کمیسیون اقلیم‌شناسی و توصیه‌های برنامه تغییر اقلیم و پیش‌نگری تهیه شده است. علاوه بر این، این شاخص‌ها به طور گسترده‌ای برای انعکاس ویژگی‌های اساسی بارش فرین مورد استفاده قرار گرفته‌اند (یانگ و همکاران، ۲۰۰۸؛ چوی و همکاران، ۲۰۰۹؛ فاتیحی و کاپورالی، ۲۰۰۹؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۱۱؛ پنگ و همکاران، ۲۰۱۸ و تانگ و همکاران، ۲۰۲۱). مجموع بارش فرین بر حسب واحد میلی‌متر (R95p) (رابطه ۱)، تعداد روزهایی که در سال مورد بررسی، مقدار بارش در آنها از آستانه بارش فرین آن سال بیشتر باشد (R95d)، و شدت مطلق بارش فرین بر حسب میلی‌متر بر روز (AEPI) (رابطه ۲) متغیرهای آماری اساسی هستند که بارش فرین را توصیف می‌کنند. کسری از کل بارندگی ناشی از رویدادهای فراتر از آستانه بارش فرین (R95pT) منعکس‌کننده نسبت بارش فرین به بارش سالانه در روزهای بارانی (بارش روزانه بیش از یک میلی‌متر) بر حسب درصد است (رابطه ۳).

$$R95p_i = \sum_{w=1}^W R_{wj} \text{ \& } R_{wj} > R_{wn95} \quad (1)$$

$$R95d / R95p = AEPI \quad (2)$$

$$R95pT_j = \sum_{w=1}^W R_{wj} / R_j \text{ \& } R_{wj} > R_{wn95} \quad (3)$$

که  $R_{wj}$  و  $R_{wn95}$  به ترتیب مقدار بارش روزانه در روزهای مرطوب (بارش بیش از یک میلی‌متر) در دوره  $j$  و مقدار بارش آستانه فرین هستند.

معادله ۱۰ به دست آورد. به طور خلاصه،  $W_i$  مقدار نرمال شده  $R_i$  است.

#### ۲-۲-۲-۴. اختلاف ریشه میانگین مربعات

تغییر میانگین وزنی با استفاده از فرمول شرح داده شده در مطالعه چن و همکاران (۲۰۱۱) برای هر شاخص بارش فرین، به صورت رابطه ۱۱ تعریف می شود:

$$\Delta P = \frac{\sum_i W_i \Delta P_i}{\sum_i W_i} \quad (11)$$

که در آن  $\Delta P_i$  تغییر پیش‌نگری شده در مدل  $i$  ام و  $W_i$  وزن متناظر آن است که در معادله ۱۰ تعریف شده است.

اختلاف ریشه میانگین مربعات (RMSD: root-mean-square difference) تغییرات پیش‌نگری شده در اینجا برای اندازه‌گیری عدم قطعیت در پیش‌نگری استفاده می‌شود (چن و همکاران، ۲۰۱۱). توجه داشته باشید که اصطلاح "اختلاف" در اینجا به معنای تفاوت در تغییر پیش‌نگری شده بین مدل‌های فردی و مجموعه مدل‌های همادی (MME: MultiModel Ensemble) است. RMSD تغییرات پیش‌نگری شده با میانگین وزنی و میانگین وزن‌نشده به طور جداگانه توسط معادلات ۱۲ و ۱۳ به شرح زیر تعریف می‌شوند:

$$\delta_{\Delta P} = \left[ \frac{\sum_i W_i (\Delta P_i - \Delta P)^2}{\sum_i W_i} \right]^{1/2} \quad (12)$$

$$\bar{\delta}_{\Delta P} = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N W_i (\Delta P_i - \bar{\Delta P})^2 \right]^{1/2} \quad (13)$$

در این دو فرمول،  $\Delta P$  تغییر میانگین وزنی است که توسط معادله ۱۱ تعریف شده است و  $\bar{\Delta P}$  میانگین وزنی برابر است.

### ۳. نتایج و بحث

#### ۳-۱. نتایج ارزیابی و وزن‌دهی مدل‌های منتخب

##### CMIP6

#### ۳-۱-۱. نتایج ارزیابی تغییرات فضایی

شکل ۲ رتبه‌بندی مدل‌های منتخب CMIP6 را برای هر یک از چهار شاخص بارش فرین با توجه به اثر کلی سه جنبه نمودار تیلور، شامل همبستگی الگو، نسبت انحراف استاندارد فضایی، و ریشه میانگین مربعات اختلاف

مقدار IVS ابتدا در هر ایستگاه همدیدی محاسبه و سپس برای همه ایستگاه‌ها میانگین گرفته می‌شود. هرچه مقدار IVS کوچک‌تر باشد، توافق بهتری از نظر تغییرپذیری بین سالانه بین شبیه‌سازی مدل و مشاهدات وجود دارد.

#### ۲-۲-۲-۳. معیارهای رتبه‌بندی جامع و وزن‌دهی هر مدل منتخب

با توجه به نمودار تیلور و مقادیر IVS، از هر یک از شاخص‌های بارش فرین برای رتبه‌بندی مدل‌های CMIP6 بر اساس قابلیت‌های شبیه‌سازی مکانی و زمانی تاریخی آنها استفاده شد. سپس، یک رتبه‌بندی جامع، MR (جیانگ و همکاران، ۲۰۱۵) محاسبه شد:

$$MR = 1 - \frac{1}{nm} \sum_{i=1}^n rank_i \quad (8)$$

در این فرمول  $m$  تعداد مدل‌ها،  $n$  تعداد شاخص‌های بارش فرین و  $rank_i$  رتبه مدل برای  $i$  امین شاخص بارش فرین است. هرچه عملکرد مدل بهتر باشد،  $rank_i$  مقدار کمتری خواهد داشت. برای هر مدل، دو مقدار MR (یکی با توجه به نمودار تیلور و دیگری با توجه به IVS) محاسبه می‌شود.

از رابطه ۸، رتبه‌های تیلور (رتبه MRها بر اساس سه آماره نمودار تیلور) و IVS (رتبه MRها بر اساس IVS) به دست می‌آید. مجموع رتبه‌های تیلور و IVS برای هر مدل، نشان‌دهنده رتبه‌بندی کلی ظرفیت شبیه‌سازی تاریخی هر مدل CMIP6 است. سپس وزن متناظر هر مدل به روش چن و همکاران (۲۰۱۱) محاسبه می‌شود:

$$R_i = \frac{\sum_{i=1}^N S_i}{S_i} \quad (9)$$

$$W_i = \frac{R_i}{\sum_{i=1}^N R_i} \quad (10)$$

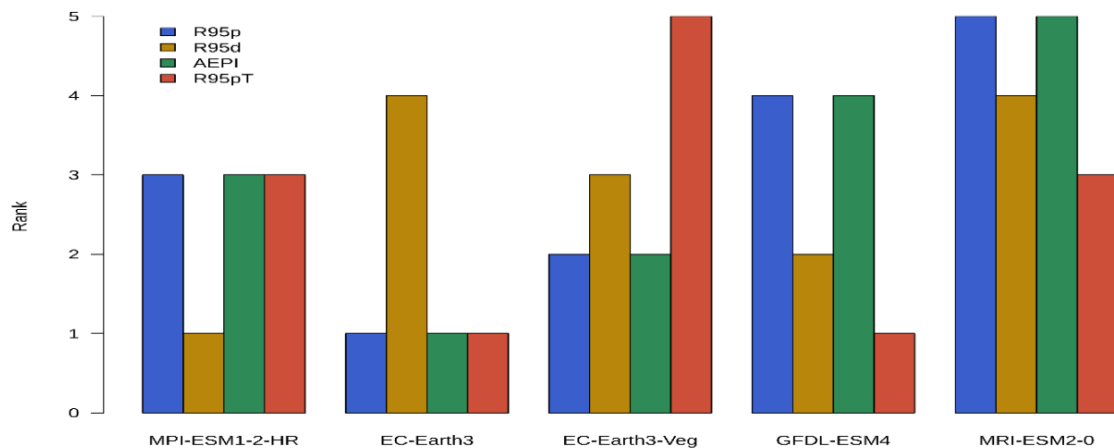
که در آن  $S_i$  مجموع رتبه‌های هر مدل CMIP6 با توجه به مهارت‌های شبیه‌سازی آن در هر دو الگوی فضایی و تغییرپذیری بین سالانه است و  $N$  تعداد کل مدل‌ها است. بنابراین،  $R_i$  را می‌توان به عنوان یک شاخص عملکرد ترکیبی برای مدل  $i$  ام در نظر گرفت. مدل‌هایی که مهارت‌های شبیه‌سازی بهتری دارند، مقادیر  $R_i$  بالاتری خواهند داشت. از طریق  $R_i$ ، می‌توان  $W_i$  را با استفاده از



## ۳-۱-۲. نتایج ارزیابی تغییرات بین سالانه

امتیاز IVS شرح داده شده در بخش روش کار برای اندازه‌گیری مقدار شباهت تغییرپذیری بین سالانه، بین مدل‌ها و مشاهدات معرفی شد. در جدول ۲، امتیاز IVS برای هر چهار شاخص بارش فرین نشان داده شده است. هر چه مقدار IVS کمتر باشد، توافق بهتری از نظر تغییرپذیری بین سالانه بین شبیه‌سازی مدل و مشاهدات وجود دارد. دو شاخص با مقادیر نسبتاً بالا R95p و AEPI در مقایسه با دو شاخص دیگر ضعیف شبیه‌سازی شده‌اند. این مطلب ممکن است به این دلیل باشد که R95p و AEPI مستقیماً تحت تأثیر اریبی‌های شدت بارندگی قرار می‌گیرند، اما این سوگیری‌ها تا حدی در R95d (وابستگی مقدار آستانه بارش فرین به مدل) و در R95pT (مدل‌ها با بارش فرین بیشتر، تمایل به بارش کل بیشتری دارند) کمتر مشاهده می‌شوند. MR بر اساس نتایج محاسبه IVS چهار شاخص بارش فرین برای به دست آوردن رتبه‌بندی مدل‌های CMIP6 از نظر تنوع بین سالانه است. به طور کلی، مدل MPI-ESM1-2-HR و GFDL-ESM4 به ترتیب با MR\_IVS برابر با ۰/۶ و ۰/۵ (جدول ۲) مناسب‌تر از سایر مدل‌های مورد مطالعه هستند. شکل ۳ رتبه‌بندی مدل‌های منتخب CMIP6 را برای هر یک از چهار شاخص بارش فرین با توجه به امتیاز IVS نشان می‌دهد.

نرمال‌شده متمرکز نشان می‌دهد. مقادیر دقیق هر آماره در جدول ۲ نشان داده شده است. رتبه‌های سه معیار به دست آمده از نمودارهای تیلور برای هر شاخص بارش فرین ابتدا مدل به مدل میانگین‌گیری می‌شود؛ سپس، رتبه‌های به دست آمده به عنوان مبنایی برای محاسبه MR مرتب می‌شوند تا توانایی هر مدل CMIP6 در بازتولید الگوی فضایی مشاهدات را کمی‌سازی کند (جدول ۲). کاربرد MR معرفی شده در بخش روش کار، یک رتبه‌بندی فضایی جامع برای هر مدل ارائه می‌دهد. با توجه به مقادیر MR فضایی هر چه مقدار MR به ۱ نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده مهارت بیشتر شبیه‌سازی مدل برای شاخص‌های بارش فرین است. بر این اساس مدل EC-Earth3 با MR\_taylor برابر با ۰/۶۵ (جدول ۲) و با تفکیک افقی ۰/۷ درجه (جدول ۱) بهترین مهارت در شبیه‌سازی الگوی فضایی شاخص‌های بارش فرین را دارد. این نتیجه نیز در مطالعه تانگ و همکاران (۲۰۲۱) که قابلیت شبیه‌سازی مکانی ۲۶ مدل از مدل‌های CMIP6 را در جزیره هندوچین بررسی کردند، حاصل شده است. در این مطالعه نیز مدل مذکور، بیشترین تفکیک افقی شبیه‌سازی را داراست. مدل MPI-ESM1-2-HR با MR\_taylor برابر با ۰/۵ (جدول ۲) و با تفکیک افقی ۰/۹۳۸ درجه (جدول ۱) دومین مدل مناسب در بین پنج مدل منتخب برای شبیه‌سازی الگوی فضایی شاخص‌های بارش فرین است.



شکل ۲. رتبه‌بندی پنج مدل منتخب CMIP6 برای هر یک از چهار شاخص بارش فرین با توجه به سه آماره نمودار تیلور.

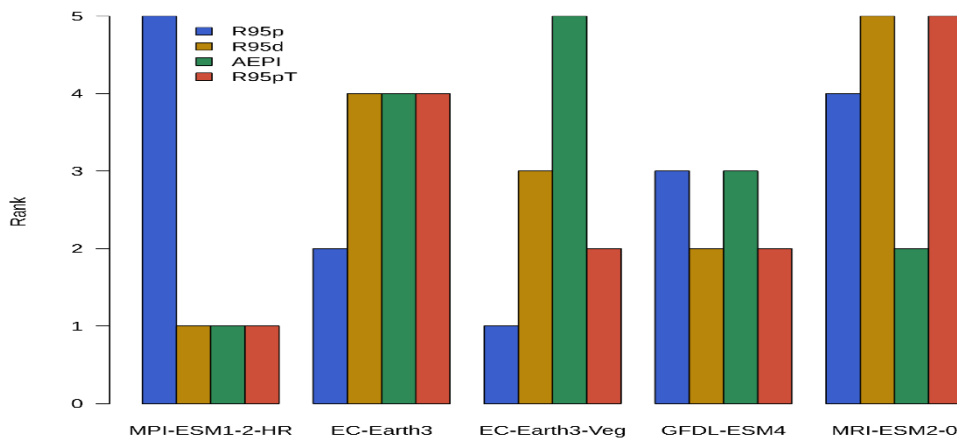
## ۳-۱-۳. محاسبه وزن‌ها

رتبه‌بندی پنج مدل CMIP6 توسط MRها بر اساس نمودار تیلور و IVS انجام شد. سپس وزن متناظر آنها با استفاده از معادله ۱۰ محاسبه شد. جدول ۲ رتبه‌بندی تیلور و IVS و همچنین مجموع رتبه‌ها (S) و وزن‌های مربوط به پنج مدل CMIP6 را نشان می‌دهد که در آن خانه‌های سبزرنگ نشان می‌دهد که وزن مدل‌های مربوطه بزرگ‌تر از مقدار وزن مدل‌ها با وزن‌های برابر است (۰/۲). به عبارت دیگر،

این مدل‌ها با رتبه‌بندی بالاتر تأثیر بیشتری بر پیش‌نگری احتمالی آینده شاخص‌های بارش فرین در منطقه مورد مطالعه خواهند داشت. توجه به این نکته ضروری است که تفکیک افقی مدل تنها عامل تعیین‌کننده مهارت مدل در شبیه‌سازی شاخص‌های بارش فرین در منطقه مورد مطالعه نیست. زیرا مدل با وزن بالاتر از میانگین (۰/۲) مدل با تفکیک افقی بالاتر نیست و بهبود در فرایندهای فیزیکی نیز موردنیاز است (بادور و همکاران ۲۰۲۰).

جدول ۲. مقادیر آماره‌های تیلور و امتیاز IVS، برای هر شاخص بارش فرین؛ رتبه‌ها و وزن‌های مربوط به پنج مدل CMIP6 (۱). MPI-ESM1-2-HR، ۲. EC-Earth3، ۳. EC-Earth3-Veg، ۴. GFDL-ESM4 و ۵. MRI-ESM2-0) با توجه به عملکرد جامع آنها با در نظر گرفتن نمودار تیلور و تغییرپذیری بین‌سالانه در منطقه مورد مطالعه. خانه‌های سبزرنگ نشان‌دهنده مدل با وزن بزرگ‌تر از ارزش مدل‌های هم‌وزن (۰/۲) است.

شماره مدل	R95p_STD_ratio	R95d_STD_ratio	AEP1_STD_ratio	R95pT_STD_ratio	R95p_CNRMMSD	R95d_CNRMMSD	AEP1_CNRMMSD	R95pT_CNRMMSD	R95p_R	R95d_R	AEP1_R	R95pT_R
۱	۰/۰۰۶۶	۱/۲۵۴۱	۰/۰۶۹۹۹	۱/۱۰۵۷۸	۰/۹۴۸	۱/۳۳۵۵	۰/۹۴۹۳	۱/۴۷۶۸	۰/۳۵۳۸	۰/۳۱۴۱	۰/۳۸۷۲	۰/۰۵۵۴
۲	۰/۷۷۴۲	۲/۰۳۶۵	۰/۰۴۵۴۳	۰/۹۷۲۱	۰/۹۱۸۸	۱/۹۰۱۷	۰/۸۰۸۲	۱/۰۳۸	۰/۵۲۵۹	۰/۳۷۵۳	۰/۶۳۶۱	۰/۰۱۵۸
۳	۰/۷۳۸۷	۱/۹۵۹۶	۰/۰۴۲۱۸	۰/۹۵۹۶	۰/۹۲۴۶	۱/۸۵۱۶	۰/۷۱۲۸	۱/۰۳۱۰۷	۰/۵۰۵۶	۰/۳۵۹۷	۰/۶۲۹۹	۰/۰۳۶۸
۴	۰/۶۰۶۰	۱/۵۴۲	۰/۰۳۸۷۸	۰/۱۷۱۴۴	۱/۰۰۷۹	۱/۲۲۳۴	۰/۹۱۶۸	۱/۲۷۵۲	۰/۲۹۱۳	۰/۲۸۶۳	۰/۰۴۱۲۸	۰/۰۲۲۱
۵	۰/۶۳۹۰	۱/۶۵۴۶	۰/۰۴۱۳۴	۰/۳۸۷۰۴	۱/۱۲۷۰	۱/۵۷۱۶	۰/۹۵۸۴	۱/۲۴۵۷	۰/۱۰۷۵	۰/۲۰۱۷	۰/۳۱۹۰	۰/۰۱۳۲
شماره مدل	R95p_IVS	R95d_IVS	AEP1_IVS	R95pT_IVS	MR_Taylor	MR_IVS	Rank of Taylor	Rank of IVS	S	R	W	
۱	۱/۳۷	۰/۵۳	۲/۴۴	۰/۳	۰/۵	۰/۶	۲	۱	۳	۱۰	۰/۳۴۱۵	
۲	۰/۷۷	۱/۳	۶/۳۶	۰/۶۳	۰/۶۵	۰/۳	۱	۴	۵	۶	۰/۲۰۴۹	
۳	۰/۷۱	۱/۱۶	۷/۵۲	۰/۳۹	۰/۴	۰/۵۴	۴	۳	۷	۴/۲۸۵۷	۰/۰۴۶۳	
۴	۱/۱۹	۰/۹	۴/۲۷	۰/۳۹	۰/۴۵	۰/۵	۳	۲	۵	۶	۰/۲۰۴۹	
۵	۱/۳۲	۱/۴۲	۴/۱۱	۰/۷۲	۰/۱۵	۰/۲	۵	۵	۱۰	۳	۰/۱۰۲۴	



شکل ۳. رتبه‌بندی پنج مدل منتخب CMIP6 برای هر یک از چهار شاخص بارش فرین با توجه به امتیاز IVS.

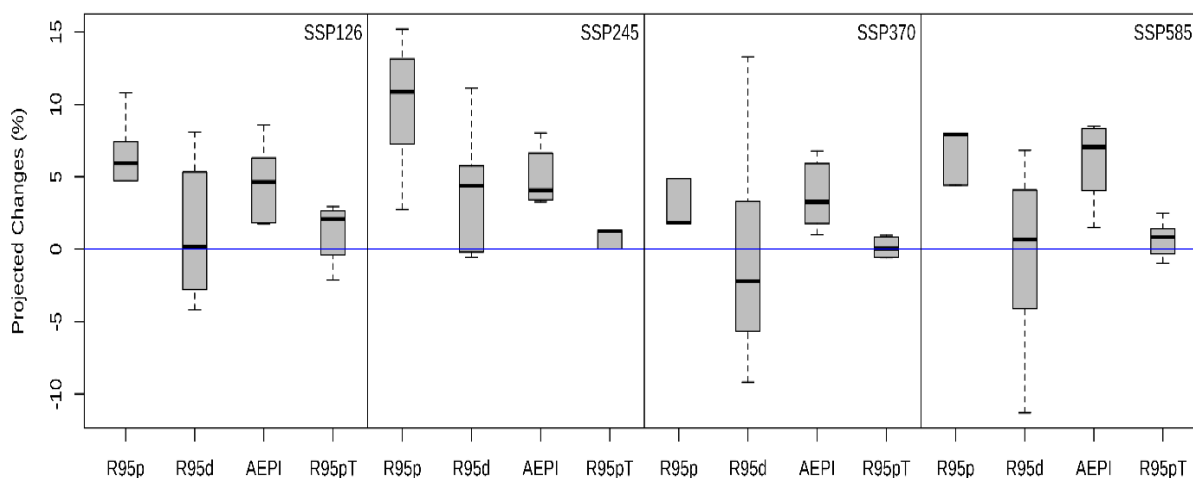
شدت مطلق بارش فرین (نسبت مجموع بارش بیشتر از آستانه بارش فرین سالانه به تعداد روزهایی که در آن این بارش‌های فرین رخ داده است) در منطقه مورد مطالعه در دوره ۲۰۲۶-۲۰۵۰ (شکل ۴)، با توجه به این که صدک‌های ۲۵ این تغییر در هر یک از چهار سناریو بزرگ‌تر از صفر هستند، تقریباً قطعی است. همچنین به جز سناریوی SSP370، در سایر سناریوها شاخص R95p بیشترین افزایش را نشان می‌دهد، در حالی که افزایش R95pT ناچیز است. این مطلب گویای این نکته است که در کل مجموع بارش سال‌های جدید با سال‌های قبل تفاوت چندانی ندارد اما مجموع این بارش در تعداد روزهای کمتری و با شدت بیشتر رخ می‌دهد. همچنین با توجه به این که در تمام سناریوها به غیر از سناریوی SSP245، میانه شاخص فرین R95d نزدیک به صفر و یا منفی است باز مطلب ذکر شده نتیجه‌گیری می‌شود که خود هشدار برای رخداد بارش‌های سیل‌آسا می‌باشد. لازم به ذکر است که تحت دو سناریوی بدبینانه و خیلی بدبینانه SSP370 و SSP585 پراکندگی داده‌های شاخص فرین R95d (فاصله بین صدک‌های ۵ و ۹۵) بیشتر است؛ به این معنی که تفاوت‌های زیادی در تغییرات پیش‌نگری شده در شاخص‌های مربوطه در منطقه وجود دارد و عدم قطعیت آن‌ها بیشتر است.

### ۲-۳. پیش‌نگری آینده

در این بخش، تغییرات آتی در چهار شاخص بارش فرین در دوره زمانی آینده نزدیک (۲۰۲۶ تا ۲۰۵۰) تحت چهار سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5، SSP3-7.0، و SSP5-8.5 بررسی می‌شود.

### ۱-۲-۳. پیش‌نگری آینده چهار شاخص بارش فرین

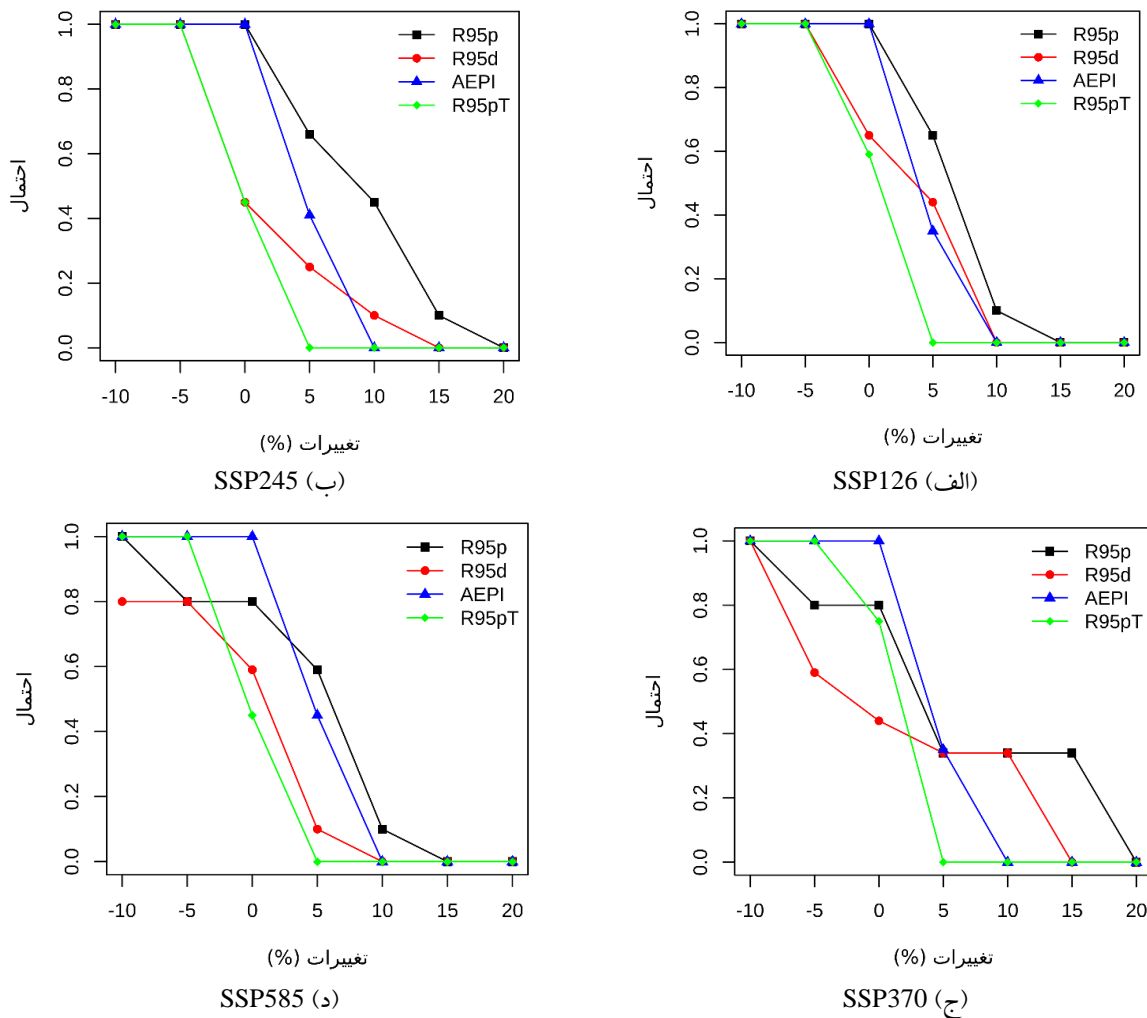
تغییرات پیش‌نگری شده (بر حسب درصد) در چهار شاخص بارش فرین در دوره مورد مطالعه (۲۰۲۶-۲۰۵۰) با توجه به دوره ۲۰۱۴-۱۹۹۰ تحت چهار سناریو در منطقه مورد مطالعه در شکل ۴ نشان داده شده است. تغییرات پیش‌نگری شده در چهار شاخص بارش فرین در قالب یک نمودار جعبه‌ای ارائه شده است که در آن حد بالایی و پایینی هر جعبه به ترتیب مقادیر صدک ۷۵ و ۲۵ را نشان می‌دهد، در حالی که خط افقی در هر جعبه میانه توزیع را نشان می‌دهد و انتهای خط‌های بالا و پایین به ترتیب مقادیر صدک ۹۵ و ۵ را نشان می‌دهند. توجه داشته باشید که شکل ۴ از پنج مدل CMIP6 با وزن‌های مساوی مشتق شده است. لازم به ذکر است که ابتدا شاخص‌های بارش فرین در تمامی نقاط ایستگاهی میانگین‌گیری شده و سپس درصد تغییر بر اساس میانگین ناحیه‌ای شاخص‌های بارش فرین محاسبه می‌شود. افزایش در شاخص‌های R95p و



شکل ۴. نمودارهای جعبه‌ای برای تغییرات پیش‌نگری‌شده (بر حسب درصد) چهار شاخص بارش فرین در دوره ۲۰۲۶-۲۰۵۰ نسبت به دوره ۱۹۹۰-۲۰۱۴ تحت چهار سناریو در منطقه ایران. حد بالا و پایین هر جعبه به ترتیب مقادیر صدک ۷۵ و ۲۵ را نشان می‌دهد و خط افقی در هر جعبه میانه توزیع‌ها را نشان می‌دهد. میله بالا و پایین به ترتیب مقادیر صدک ۹۵ و ۵ را نشان می‌دهند. خط آبی افقی نشان می‌دهد که تغییر صفر است. توجه داشته باشید که توزیع از پنج مدل CMIP6 با وزن‌های مساوی مشتق شده است، که در آن‌ها محدوده تغییرات آینده، توسط مجموعه آن مدل‌ها نشان داده می‌شود.

بزرگ‌تر از صفر باشد در حدود ۸۰ درصد است و احتمال این‌که تغییرات این شاخص فرین بین ۵- تا ۱۰- باشد در حدود ۲۰ درصد است. تعداد روزهای همراه با بارش فرین در سناریوهای SSP126 و SSP585 به احتمال حدود ۶۰ درصد و در دو سناریو دیگر به احتمال ۴۰ درصد افزایش می‌یابد. شاخص AEPI که نسبت شاخص اول به شاخص دوم است در هر چهار سناریو به احتمال صددرصد افزایش می‌یابد و تقریباً روند یکسانی را نشان می‌دهند. برای مثال احتمال این‌که افزایش این شاخص نسبت به دوره تاریخی بیش از ۵ درصد باشد در هر چهار سناریو در حدود ۴۰ درصد است. شاخص چهارم که نسبت مجموع بارش‌های فرین به بارش سالانه در روزهای بارانی با بارش بیش از یک میلی‌متر است در سناریو اول به احتمال ۶۰ درصد، در سناریو دوم و چهارم به احتمال ۴۵ درصد و در سناریو سوم به احتمال ۷۵ درصد بزرگ‌تر از صفر است.

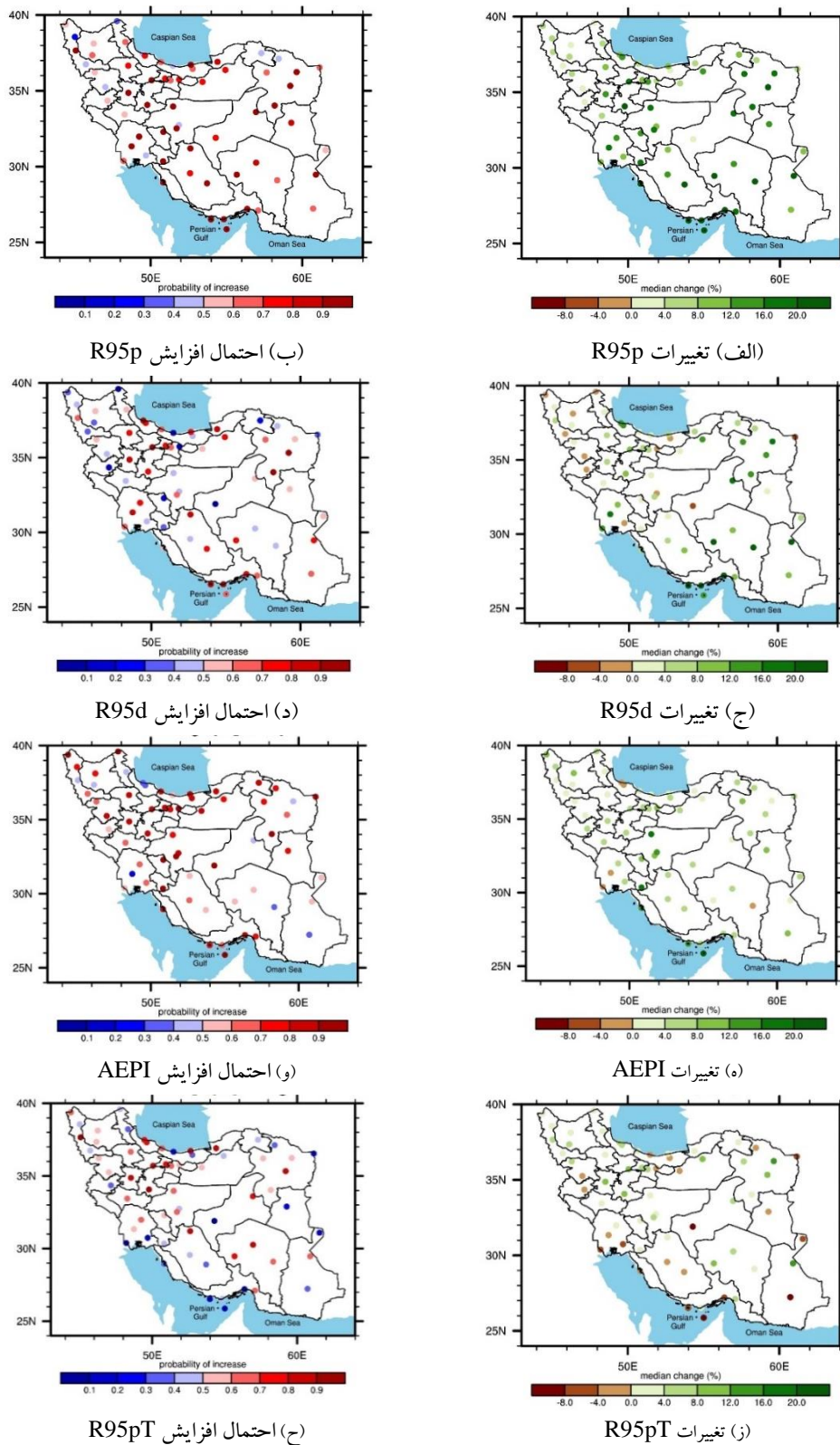
در شکل ۵ مقدار احتمال این‌که درصد تغییرات هر شاخص فرین در دوره ۲۰۲۶-۲۰۵۰ نسبت به دوره ۲۰۱۴-۱۹۹۰ تحت چهار سناریو در منطقه ایران بیشتر از مقدار آستانه‌ای که در محور افقی است، باشد نشان داده شده است. این شکل بر اساس پنج مدل منتخب CMIP6 (جدول ۱) در حالت وزن‌دار ترسیم شده است. بر اساس این شکل احتمال افزایش شاخص R95p نسبت به دوره تاریخی تحت دو سناریوی SSP126 و SSP245 صددرصد و احتمال این‌که افزایش این شاخص بیش از ۵ درصد باشد، در حدود ۶۵ درصد است. اما احتمال تغییرات بزرگ‌تر از ۱۰ درصد در سناریوی SSP245 بیشتر از ۴۰ درصد و در سناریوی SSP126 در حدود ۱۰ درصد است. در دو سناریو دیگر پراکندگی داده‌های شاخص‌های فرین بیشتر از دو سناریو اول است. در این دو سناریو احتمال این‌که تغییرات شاخص فرین R95p



شکل ۵. مقدار احتمال اینکه درصد تغییرات هر شاخص فرین در دوره ۲۰۲۶-۲۰۵۰ نسبت به دوره ۱۹۹۰-۲۰۱۴ تحت چهار سناریو در منطقه ایران بیشتر از مقدار آستانه‌ای که در محور افقی است، باشد: الف) SSP126، ب) SSP245، ج) SSP370، د) SSP585.

شاخص‌های بارش فرین R95p و AEPI با مقدار بزرگ‌تر از ۰/۵ در اکثر مناطق کشور وجود دارد (شکل ۶ب، شکل ۶ و) که به این معنی است که بارش فرین سالانه با شدت قابل توجه، به احتمال زیاد در اوایل قرن بیست‌ویکم افزایش می‌یابد. تعداد روزهای همراه با بارش فرین در هر چهار سناریو در اکثر مناطق کشور کاهش را نشان می‌دهد. همچنین توزیع تغییرات میانه این شاخص (شکل ۶ج) عمدتاً بیانگر کاهش به‌خصوص در نوار شمالی کشور است و کاهش میانه این شاخص در دو سناریوی SSP370 و SSP585 بارزتر است. به‌طور میانگین شاخص چهارم که نسبت مجموع بارش‌های فرین به بارش سالانه در روزهای بارانی با بارش بیش از یک میلی‌متر است، تغییرات قابل توجهی ندارد.

شکل ۶، الگوهای فضایی احتمال افزایش در چهار شاخص بارش فرین با مقدار بیش از صفر (سمت چپ) و توزیع میانه تغییرات (بیان شده بر حسب درصد) (سمت راست) در منطقه مورد مطالعه تحت سناریوی SSP245 در دوره ۲۰۲۶-۲۰۵۰ نسبت به دوره تاریخی ۱۹۰۰-۲۰۱۵ را نشان می‌دهد. لازم به‌ذکر است که احتمالات در ستون سمت چپ شکل ۶ بر اساس روش وزن‌دهی مبتنی بر رتبه محاسبه شدند تا تخمین واقعی‌تری از احتمال افزایش برای شاخص‌های بارش فرین داشته باشند، در حالی که ستون‌های سمت راست بر اساس میانگین ساده چند مدل برای مشخص کردن محتمل‌ترین بزرگی تغییر هستند. در دوره ۲۰۲۶-۲۰۵۰ نسبت به دوره تاریخی ۱۹۰۰-۲۰۱۵، احتمال افزایش



شکل ۶. الف، ج، ه، ز) تغییرات میانه چهار شاخص فرین بارش برحسب درصد براساس رویکرد همادی چند مدلی؛ ب، د، و، ح) الگوی فضایی احتمال افزایش چهار شاخص فرین بارش از مقدار صفر براساس روش وزن‌دهی مبتنی بر رتبه، در دوره ۲۰۲۶-۲۰۵۰ نسبت به دوره تاریخی ۱۹۰۰-۲۰۱۴ تحت سناریوی SSP245.

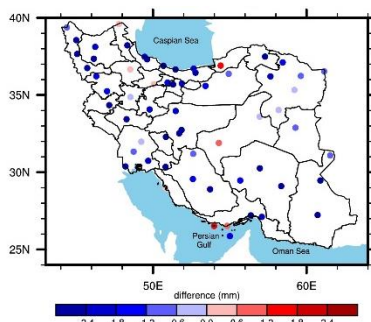


اصلی تغییرات در چهار شاخص بارش فرین نسبت به سال‌های ۲۰۱۴-۱۹۹۰ کاملاً بین این دو حالت سازگار است. با این حال، تفاوت‌های جزئی در بزرگی‌ها و مکان‌های بزرگ‌ترین تغییرات شاخص بین این دو حالت وجود دارد. اگرچه نتایج پیش‌نگری چهار شاخص بارش فرین با استفاده از حالت وزن‌دار و بدون وزن تحت هر SSP مشابه است، RMSDs از چهار شاخص بارش فرین منطقه به‌طور میانگین، بر اساس معادلات ۱۲ و ۱۳ برای مقایسه این دو حالت محاسبه شدند و در جدول ۳ نشان داده شده است. جدول ۳ نسبت بین RMSDهای وزنی و بدون وزن (توضیح داده شده در بخش ۲-۲-۲ د) را برای هر یک از چهار سناریو خلاصه می‌کند  $(ratio = \frac{RMSD \text{ with weighted scheme}}{RMSD \text{ with unweighted scheme}})$ . توجه داشته باشید که RMSD تغییرات پیش‌نگری شده با میانگین وزنی و میانگین بدون وزن ابتدا در هر نقطه شبکه محاسبه می‌شود و سپس در کل کشور ایران میانگین‌گیری می‌شود. RMSDهای شاخص‌های بارش فرین به‌دست آمده از حالت وزن‌دهی مبتنی بر رتبه به‌طور کلی در مقایسه با طرح بدون وزن تحت چهار SSP کاهش نشان می‌دهند که بیانگر کاهش عدم قطعیت است. با این حال، تفاوت‌هایی در کاهش RMSD در سناریوهای مختلف وجود دارد. RMSDهای شاخص‌های بارش فرین (به جز AEPI) به‌دست آمده از طرح وزنی تقریباً برای سه سناریو SSP126، SSP245 و SSP585 کاهش‌های خاصی دارند.

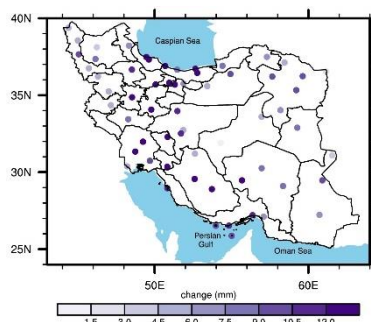
۲-۲-۳. مقایسه بین میانگین وزنی مبتنی بر رتبه و میانگین ساده چند مدل

در قسمت قبل، پیش‌نگری‌های آتی چهار شاخص بارش فرین در دوره ۲۰۵۰-۲۰۲۶ تحت چهار سناریو و الگوی فضایی احتمال افزایش این شاخص‌ها نسبت به دوره تاریخی ۲۰۱۴-۱۹۹۰ و الگوی مکانی تغییرات میانه چهار شاخص فرین بارش بر حسب درصد را گزارش شد. این تغییرات تا حدی بر این فرض استوار بودند که توافق بهتر با آب‌وهوای کنونی همیشه منجر به قابلیت اطمینان بیشتر پیش‌نگری آینده مدل می‌شود. با این حال، این سوال مطرح است که تأثیرات وزن‌دهی مبتنی بر رتبه برای هر مدل، بر پیش‌نگری چیست؟ برای پاسخ به این سؤالات، در این مرحله، میانگین تغییرات پیش‌نگری شده در چهار شاخص بارش فرین در منطقه مورد مطالعه را که توسط (۱) میانگین وزنی مبتنی بر رتبه پنج مدل CMIP6 و (۲) میانگین‌گیری ساده چند مدل تعیین می‌شود، مقایسه می‌شود.

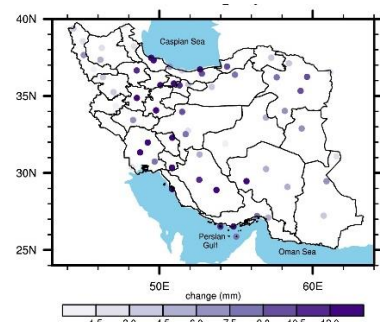
شکل ۷ توزیع جغرافیایی میانگین تغییرات پیش‌نگری شده در چهار شاخص بارش فرین را در دوره ۲۰۵۰-۲۰۲۶ نسبت به سال‌های ۲۰۱۴-۱۹۹۰ تحت سناریوی SSP245 (شکل‌های متناظر برای سایر سناریوها در شکل‌های تکمیلی ۴-پ تا ۶-پ قابل مشاهده است) برای حالت مدل‌های وزن‌دار و بدون وزن و تفاوت بین این دو حالت نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که الگوهای مکانی



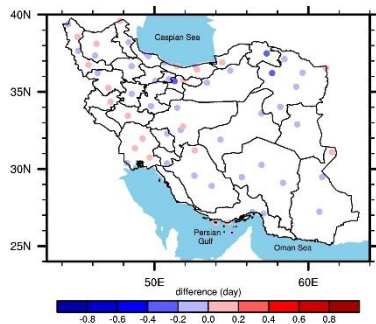
(ج) اختلاف R95p



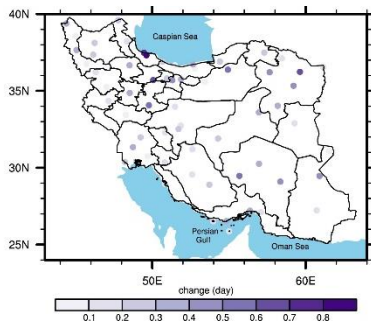
(ب) میانگین غیر وزنی تغییرات R95p



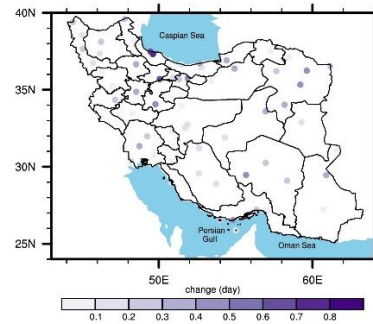
(الف) میانگین وزنی تغییرات R95p



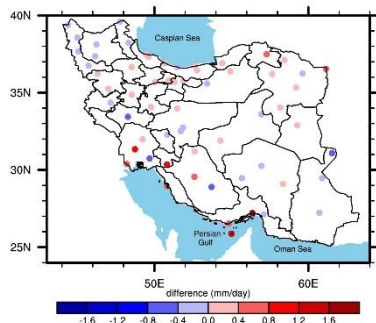
(و) اختلاف R95d



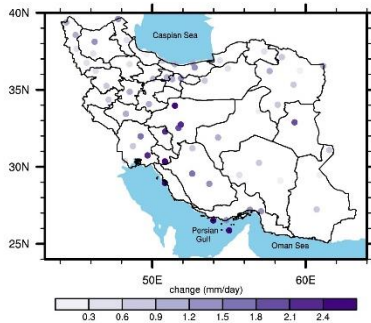
(ه) میانگین غیر وزنی تغییرات R95d



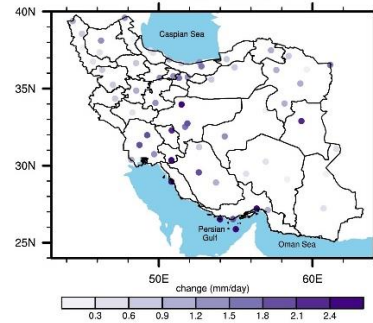
(د) میانگین وزنی تغییرات R95d



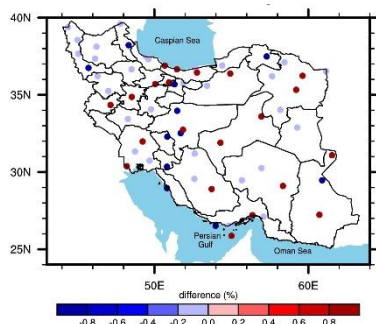
(ط) اختلاف AEPI



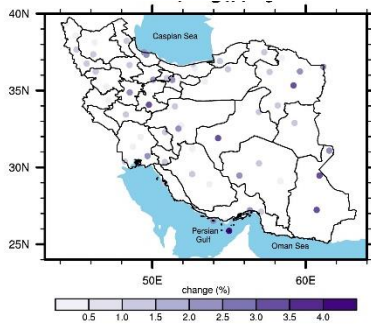
(ح) میانگین غیر وزنی تغییرات AEPI



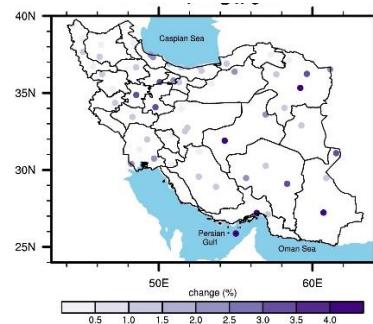
(ز) میانگین وزنی تغییرات AEPI



(ل) اختلاف R95pT



(ک) میانگین غیر وزنی تغییرات R95pT



(ی) میانگین وزنی تغییرات R95pT

شکل ۷. توزیع جغرافیایی میانگین تغییرات پیش‌نگری‌شده در چهار شاخص بارش فرین (الف-ج R95p؛ د-و R95d؛ ز-ط AEPI؛ ی-ل R95pT) در دوره ۲۰۲۶-۲۰۵۰ نسبت به سال‌های ۱۹۹۰-۲۰۱۴ تحت سناریوی SSP245 حاصل از حالت وزن‌دار و بدون وزن و تفاوت بین این دو حالت (بدون وزن-وزن‌دار=تفاوت). میانگین تغییرات بر حسب واحدهای مطلق داده شده است (R95p) بر حسب میلی‌متر؛ R95d بر حسب روز؛ AEPI بر حسب میلی‌متر بر روز؛ R95pT بر حسب درصد).

جدول ۳. نسبت بین RMSDهای وزنی و غیروزنی میانگین‌گیری‌شده در کشور ایران برای دوره ۲۰۲۶-۲۰۵۰. مقادیر پررنگ نشان می‌دهد که حالت وزنی مبتنی بر رتبه عدم قطعیت در پیش‌نگری آینده را در مقایسه با طرح بدون وزن کاهش داده است.

SSP	R95p	R95d	AEPI	R95pT
SSP126	۰/۹۵۳	۰/۹۳۲	۱/۰۱۷	۰/۹۹۶
SSP245	۰/۹۴۵	۰/۹۳۳	۱/۰۰۸	۰/۹۸۰
SSP370	۱/۰۱۵	۰/۹۹۴	۰/۹۸۶	۱/۰۱۵
SSP585	۰/۹۲۵	۰/۹۵۱	۱/۰۶۳	۰/۹۹۶



## ۴. نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر بر اساس رتبه‌بندی کلی (مکانی+زمانی) ظرفیت‌های شبیه‌سازی تاریخی پنج مدل CMIP6 در کشور ایران، وزن‌های مربوط به هر مدل CMIP6 به‌دست آمد. سپس، با استفاده از این روش وزن‌دهی مبتنی بر رتبه، پیش‌نگری آتی چهار شاخص بارش فرین در منطقه مورد مطالعه در دوره زمانی ۲۰۲۶-۲۰۵۰ تحت چهار سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5، SSP3-7.0 و SSP5-8.5 در این مطالعه ارائه شد. علاوه بر این، تفاوت‌ها در پیش‌نگری‌ها بین حالت‌های وزن‌دار و بدون وزن مورد بحث قرار گرفت. نتایج بررسی مهارت مکانی شبیه‌سازی نشان می‌دهد که مدل EC-Earth3 با MR\_taylor برابر با ۰/۶۵ و با تفکیک افقی ۰/۷ درجه بهترین مهارت در شبیه‌سازی الگوی فضایی شاخص‌های بارش فرین را دارد و مدل MPI-ESM1-2-HR با MR\_taylor برابر با ۰/۵ و با تفکیک افقی ۰/۹۳۸ درجه دومین مدل مناسب در بین پنج مدل منتخب برای شبیه‌سازی الگوی فضایی شاخص‌های بارش فرین است. همچنین نتایج بررسی مهارت زمانی شبیه‌سازی بیانگر ارجحیت دو مدل MPI-ESM1-2-HR و GFDL-ESM4 به ترتیب با MR\_IVS برابر با ۰/۶ و ۰/۵ نسبت به سایر مدل‌های مورد مطالعه هستند.

بر اساس یافته‌های این تحقیق انتظار می‌رود کل بارش فرین (R95p) و شدت مطلق بارش فرین (AEPI) (نسبت مجموع بارش بیشتر از آستانه بارش فرین سالانه به تعداد روزهایی که این بارش‌های فرین در آن رخ داده است) در کشور ایران در دوره ۲۰۲۶-۲۰۵۰، تحت هر چهار سناریو افزایش یابد. شاخص R95p بیشترین افزایش را در بین شاخص‌ها به جز در سناریو SSP370 نشان می‌دهد، در حالی که افزایش کسری از کل بارندگی ناشی از رویدادهای فراتر از آستانه بارش فرین (R95pT) ناچیز است. این مطلب به این نکته اشاره دارد که مجموع بارش سال‌های جدید با سال‌های قبل تفاوت چندانی ندارد اما مجموع این بارش در تعداد روزهای کمتری و با شدت بیشتر رخ می‌دهد. با توجه به این که در تمام سناریوها

(به‌جز سناریوی SSP245)، میانه شاخص فرین R95d نزدیک به صفر و یا منفی است می‌توان این گونه استنباط کرد که افزایش مقدار بارش فرین بر تعداد روزهای رخداد آن تقدم دارد و این بارش‌های فرین در تعداد روزهای کمتری رخ خواهند داد که خود اعلام خطری برای رخداد بارش‌های سیل‌آسا می‌باشد. همچنین پراکندگی داده‌های شاخص فرین R95d تحت دو سناریوی بدبینانه و خیلی بدبینانه SSP370 و SSP585 بیشتر است به این معنی که تفاوت‌های زیادی در تغییرات پیش‌نگری‌شده در شاخص‌های مربوطه در منطقه وجود دارد. احتمال این که شاخص‌های بارش فرین R95p و AEPI در منطقه مورد مطالعه، در دوره ۲۰۲۶-۲۰۵۰ تحت چهار سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5، SSP3-7.0 و SSP5-8.5 بیش از صفر باشد، در کل کشور بزرگ‌تر از ۰/۵ است.

اگرچه نتایج پیش‌نگری چهار شاخص بارش فرین محاسبه شده توسط حالت وزن‌دار و بدون وزن تحت چهار SSP به‌طور کلی مشابه است، کاهش عدم قطعیت مدل تقریباً همیشه پس از اعمال طرح وزن‌دار برای پیش‌نگری احتمالی آینده مشاهده می‌شود. با این حال، کاهش عدم قطعیت در منطقه مورد مطالعه ممکن است به SSPها بستگی داشته باشد. با توجه به پیش‌نگری‌های احتمالی شاخص‌های بارش فرین در مطالعه ما، خطرات رویدادهای بارندگی فرین ممکن است در آینده در اکثر مناطق مورد مطالعه به‌طور قابل توجهی افزایش یابد. با این حال، در اینجا لازم به ذکر است که وزن‌های اختصاص داده شده به هر مدل با در نظر گرفتن مهارت‌های شبیه‌سازی مدل در هر دو الگوی فضایی و تنوع بین‌سالانه برای اقلیم امروزی به‌دست آمده است. بر این اساس، عوامل ذهنی، مانند انتخاب شاخص‌های بارش فرین، اعضای مختلف یک مدل، و انتخاب معیارهای ارزیابی، ممکن است تا حدی بر نتایج تخصیص وزن برای مدل‌های CMIP6 تأثیر بگذارند (وایگل و همکاران ۲۰۱۰). تلاش‌های بیشتری در کارهای آینده برای بهبود روش وزن‌دهی انجام خواهد شد.

CMIP6. مجله فیزیک زمین و فضا، ۴۷(۳)، ۵۷۸-

۵۶۱

زرین، آ. و داداشی رودباری، ع.ع. (۱۴۰۰). تأثیر تغییر اقلیم بر بارش‌های سنگین ایران با بکارگیری مدل همدادی CMIP6، نشریه آب و توسعه پایدار، ۸(۴)، ۱۱۹-۱۲۴.

سرابی، م؛ دستورانی، م. ت. و زرین، آ. (۱۳۹۹الف). بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی آینده بر وضعیت دما و بارش (مطالعه موردی: حوضه آبخیز سد طرق مشهد)، مجله هواشناسی و علوم جو، ۳(۱)، ۸۳-۶۳. سرابی، م؛ دستورانی، م. ت. و زرین، آ. (۱۳۹۹ب). اثر تغییر اقلیم آینده بر پاسخ هیدرولوژیک در حوضه آبخیز سد طرق مشهد، مجله هواشناسی و علوم جو، ۳(۴)، ۳۳۰-۳۱۰.

Ahmadi, H., Rostami, N., & Dadashi-roudbari, A. (2020). Projected climate change in the Karkheh Basin, Iran, based on CORDEX models. *Theoretical and Applied Climatology*, 142(1), 661-673, <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03335-9>. Allan, R. P., & Soden, B. J. (2008). Atmospheric warming and the amplification of precipitation extremes. *Science*, 321, 1481-484, <https://doi.org/10.1126/science.1160787>. Almazroui, M., Ashfaq, M., Islam, M. N., Rashid, I. U., Kamil, S., Abid, M. A., O'Brien, E., Ismail, M., Reboita, M. S., Sörensson, A. A., Arias, P. A., Alves, L. M., Tippet, M. K., Saeed, S., Haarsma, R., Doblas-Reyes, F. J., Saeed, F., Kucharski, F., Nadeem, I., Silva-Vidal, Y., Rivera, J. A., Ehsan, M. A., Martínez-Castro, D., Muñoz, Á. G., Ali, M. A., Coppola, E., & Sylla, M. B. (2021). Assessment of CMIP6 Performance and Projected Temperature and Precipitation Changes Over South America. *Earth Syst Environ* 5, 155-183, <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00233-6>. Bador, M., Boé, J., Terray, L., Alexander, L. V., Baker, A., Bellucci, A., Haarsma, R., Koenigk, T., Moine, M. P., Lohmann, K., Putrasahan, D. A., Roberts, C., Roberts, M., Scoccimarro, E., Schiemann, R., Seddon, J., Senan, R., Valcke, S., & Vanniere, B. (2020). Impact of higher spatial atmospheric resolution on precipitation extremes over land in global climate models. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 125, e2019JD032184, <https://doi.org/10.1029/2019JD032184>.

همچنین با توجه به دستاورد این پژوهش مشابه با مطالعه بادور و همکاران (۲۰۲۰) تفکیک افقی مدل تنها عامل تعیین کننده مهارت مدل در شبیه سازی شاخص های بارش فرین در منطقه مورد مطالعه نیست. زیرا مدل با وزن بالاتر از میانگین (<۰/۲) مدل با تفکیک افقی بالاتر نیست و بهبود در فرایندهای فیزیکی نیز مورد نیاز است.

## مراجع

زارعیان، م. ج. (۱۴۰۱). اثرات تغییر اقلیم بر دما و بارش استان یزد بر اساس خروجی ترکیبی مدل های CMIP6. نشریه علوم آب و خاک، ۲۶(۲)، ۹۱-۱۰۵. زرین، آ. و داداشی رودباری، ع.ع. (۱۴۰۰الف). پیش‌نگری دوره‌های خشک و مرطوب متوالی در ایران مبتنی بر برون داد همدادی مدل تصحیح شده اریبی Chen, H. (2013). Projected change in extreme rainfall events in China by the end of the 21st century using CMIP5 models. *Chin. Sci. Bull.*, 58, 1462-1472, <https://doi.org/10.1007/s11434-012-5612-2>. Chen, W., Jiang, Z., & Li, L. (2011). Probabilistic projections of climate change over China under the SRES A1B scenario using 28 AOGCMs. *J. Climate*, 24, 4741-4756, <https://doi.org/10.1175/2011JCLI4102.1>. Chen, H., Sun, J., Chen, X., & Zhou, W. (2010). CGCM projections of heavy rainfall events in China. *Int. J. Climatol.*, 32, 441-450, <https://doi.org/10.1002/joc.2278>. Choi, G., Collins, D., Ren, G., Trewin, B., Baldi, M., Fukuda, Y., Afzaal, M., Pianmana, T., Gomboluudev, P., Huong, P. T. T., Lias, N., Kwon, W. T., Boo, K. O., Cha, Y. M., & Zhou, Y. (2009). Changes in means and extreme events of temperature and precipitation in the Asia-Pacific network region, 1955-2007. *Int. J. Climatol.*, 29, 1906-1925, <https://doi.org/10.1002/joc.1979>. Christensen, O. B., & Christensen, J. H. (2004). Intensification of extreme European summer precipitation in a warmer climate. *Global Planet. Change*, 44, 107-117. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2004.06.013>. Cui, D., Wang, C., & Santisirisomboon, J. (2018). Characteristics of extreme precipitation over eastern Asia and its possible connections with Asian summer monsoon activity. *Int. J. Climatol.*, 39, 711-723, <https://doi.org/10.1002/joc.5837>.

- Fatichi, S., & Caporali, E. (2009). A comprehensive analysis of changes in precipitation regime in Tuscany. *Int. J. Climatol.*, 29, 1883–1893, <https://doi.org/10.1002/joc.1921>.
- Fowler, H. J., Ekström, M., Blenkinsop, S., & Smith, A. P. (2007). Estimating change in extreme European precipitation using a multimodel ensemble. *J. Geophys. Res.*, 112, D18104, <https://doi.org/10.1029/2007JD008619>.
- Gan, R., Li, D., Chen, C., Yang, F., & Ma, X. (2022). Impacts of climate change on extreme precipitation in the upstream of Chushandian Reservoir, China. *Hydrology Research*, 53 (3), 504 doi: 10.2166/nh.2022.135.
- Giorgi, F., & Bi, X. (2005). Updated regional precipitation and temperature changes for the 21st century from ensembles of recent AOGCM simulations. *Geophys. Res. Lett.*, 32, 365–370, <https://doi.org/10.1029/2005GL024288>.
- Hawkins, E., & Sutton, R. (2010). The potential to narrow uncertainty in projections of regional precipitation change. *Climate Dyn.*, 37, 407–418, <https://doi.org/10.1007/s00382-010-0810-6>.
- Jiang, Z., Li, W., Xu, J., & Li, L. (2015) Extreme precipitation indices over China in CMIP5 models. Part I: Model evaluation. *J. Climate*, 28, 8603–8619, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0099.1>.
- Jiang, Z., Song, J., Li, L., Chen, W., Wang, Z., & Wang, J. (2012). Extreme climate events in China: IPCC-AR4 model evaluation and projection. *Climatic Change*, 110, 385–401, <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0090-0>.
- Kripalani, R. H., Oh, J. H., Kulkarni, A., Kulkarni, S. S., & Chaudhari, H. S. (2007). South Asian summer monsoon precipitation variability: Coupled climate model simulations and projections under IPCC AR4. *Theor. Appl. Climatol.*, 90, 133–159, <https://doi.org/10.1007/s00704-006-0282-0>.
- Lee, Y., Paek, J., Park, J.-S., & Boo, K. O. (2020). Changes in temperature and rainfall extremes across East Asia in the CMIP5 ensemble. *Theor. Appl. Climatol.*, 141, 143–155, <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03180-w>.
- Li, W., Jiang, Z., Xu, J., & Li, L. (2016). Extreme precipitation indices over China in CMIP5 models. Part II: Probabilistic projection. *J. Climate*, 29, 8989–9004, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0377.1>.
- Meehl, G. A., Stocker, T. F., Collins, W. D., Friedlingstein, P., Gaye, T., Gregory, J. M., Kitoh, A., Knutti, R., Murphy, J. M., Noda, A., Raper, S. C. B., Watterson, I. G., Weaver, A. J., & Zhao, Z. C. (2007). Global climate projections. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*, S. Solomon et al., Eds., Cambridge University Press, 747–846.
- Papalexiou, S. M., & Montanari, A. (2019). Global and regional increase of precipitation extremes under global warming. *Water Resour. Res.*, 55, 4901–4914, <https://doi.org/10.1029/2018WR024067>.
- Peng, Y., Zhao, X., Wu, D., Tang, B., Xu, P., Du, X., & Wang, H. (2018). Spatiotemporal variability in extreme precipitation in China from observations and projections, *Water*, 10, 1089, <https://doi.org/10.3390/w10081089>.
- Shiu, C. J., Liu, S. C., Fu, C., Dai, A., & Sun, Y. (2012). How much do precipitation extremes change in a warming climate?. *Geophys. Res. Lett.*, 39, L17707, <https://doi.org/10.1029/2012GL052762>.
- Sillmann, J., Kharin, V. V., Zwiers, F. W., Zhang, X., & Bronaugh, D. (2013). Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 2. Future climate projections. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118, 2473–2493, <https://doi.org/10.1002/jgrd.50188>.
- Tang, B., Hu, W., & Duan, A. (2021). Future Projection of Extreme Precipitation Indices over the Indochina Peninsula and South China in CMIP6 Models. *Journal of Climate*, 34(21), 8793–8811, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0946.1>.
- Taylor, K. E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *J. Geophys. Res.*, 106, 7183–7192, <https://doi.org/10.1029/2000JD900719>.
- Wang, Y., Ding, Y. Y., & Miao, Q. L. (2012). Spatial and temporal variations of extreme precipitation events in Northeast China. *Adv. Mat. Res.*, 573–574, 395–399, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.573-574.395>.
- Watterson, I. G. (2020). Influence of sea surface temperature on simulated future change in extreme rainfall in the Asia-Pacific. *Asia-Pac. J. Atmos. Sci.*, 56, 349–366, <https://doi.org/10.1007/s13143-019-00141-w>.
- Weigel, A. P., Knutti, R., Liniger, M. A., & Appenzeller, C. (2010). Risks of model weighting in multimodel climate projections. *Journal of Climate*, 23, 4175–4191, <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3594.1>.
- Wu, C., Huang, G., Yu, H., Chen, Z., & Ma, J. (2013). Spatial and temporal distributions of trends in climate extremes of the Feilaixia catchment in the upstream area of the Beijiing River Basin, South China. *Int. J. Climatol.*, 34, 3161–3178, <https://doi.org/10.1002/joc.3900>.
- Xu, Y., Gao, X., & Giorgi, F. (2010). Upgrades to the reliability ensemble averaging method for producing probabilistic climate-change

- projections. *Climate Res.*, 41, 61–81, <https://doi.org/10.3354/cr00835>.
- Yang, J. H., Jiang, Z. H., Wang, P. X., & Chen, Y. S. (2008). Temporal and spatial characteristic of extreme precipitation event in China. *Climate Environ. Res.*, 13, 75–83, <https://doi.org/10.4236/gep.2020.86004>.
- Yang, T., Wang, X., Zhao, C., Chen, X., Yu, Z., Shao, Q., & Wang, W. (2011). Changes of climate extremes in a typical arid zone: Observations and multimodel ensemble projections. *J. Geophys. Res.*, 116, D19106, <https://doi.org/10.1029/2010JD015192>.
- Zarrin, A., & Dadashi-Roudbari, A. A. (2021). Projection of future extreme precipitation in Iran based on CMIP6 multi-model ensemble. *Theor Appl Climatol*, 144, 643–660, <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03568-2>.
- Zhai, P., Zhang, X., Wan, H., & Pan, X. (2005). Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China. *J. Climate*, 18, 1096–1108, <https://doi.org/10.1175/JCLI-3318.1>.
- Zhang, K., Pan, S., Cao, L., Wang, Y., Zhao, Y., & Zhang, W. (2014). Spatial distribution and temporal trends in precipitation extremes over the Hengduan Mountains region, China, from 1961 to 2012. *Quat. Int.*, 349, 346–356, <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.04.050>.
- Zhang, X., Alexander, L., Hegerl, G. C., Jones, P., Klein Tank, A., Peterson, T. C., Trewin, B., & Zwiers, F. W. (2011). Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *Wiley Interdiscip. Rev.: Climate Change*, 2, 851–870, <https://doi.org/10.1002/wcc.147>.
- Zhou, B., Wen, Q. H., Xu, Y., Song, L., & Zhang, X. (2014). Projected changes in temperature and precipitation extremes in China by the CMIP5 multimodel ensembles. *J. Climate*, 27, 6591–6611, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00761.1>.