Vol 16, No. 3, Autumn 2026

University of Tehran Press

Journal of Water and Irrigation Management Online ISSN: 2382-9931

Homepage: https://jwim.ut.ac.ir/

Evaluation of the Climate Models and Ensemble in Harmonization Province using Quantile Mapping

Bromand Salahi[1]✉ | **Ali Shahi**[2]

1. Corresponding Author, Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. E-mail: Salahi@uma.ac.ir
2. Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. E-mail: ali.shahi@uma.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 17 April 2026
Received in revised form
18 August 2026
Accepted 30 August 2026
Published online 26 October 2026

Keywords:
Hormozgan Province
Multi-model Ensemble
Precipitation
Quantile Mapping

ABSTRACT

This study was conducted to evaluate the performance of CMIP6 climate models and their ensemble output in the statistical downscaling of precipitation over Hormozgan Province using the Empirical Quantile Mapping (EQM) method. For this purpose, monthly precipitation data from four coupled atmosphere–ocean general circulation models, namely BCC-CSM2-MR, MPI-ESM1-2-HR, CESM2-WACCM, and GFDL-ESM4, for the period 1985–2014, together with observations from seven synoptic stations (Minab, Bandar Abbas, Bandar Lengeh, Siri, Jask, Kish, and Abu Musa) located in Hormozgan Province, were used. Model performance was evaluated using the Kling–Gupta Efficiency (KGE) index and Taylor diagrams. To reduce uncertainty, an ensemble model was developed using a rank-based weighted averaging approach. All computations were performed in the R software environment. The findings showed that the EQM method performed effectively in correcting precipitation bias in the climate model outputs. Among the individual models, GFDL-ESM4 showed the best performance, with KGE values ranging from −0.05 to 0.14, whereas MPI-ESM1-2-HR exhibited the weakest performance across all stations, with KGE values ranging from −0.22 to −0.66. The highest accuracy of GFDL-ESM4 was recorded in the central and eastern parts of the province, particularly at Minab (KGE = 0.13) and Bandar Abbas (KGE = 0.14). The results also indicated that the ensemble model, with KGE values ranging from −0.16 to 0.01, did not outperform the best individual model (GFDL-ESM4) in simulating precipitation over the study area. In most stations, GFDL-ESM4 provided more accurate results than the ensemble model, for example at Minab, where its KGE value was 0.22 higher than that of the ensemble.

Cite this article: Salahi, B., & Shahi, A. (2026). Evaluation of the Climate Models and Ensemble in Harmonization Province using Quantile Mapping. *Journal of Water and Irrigation Management*, 16 (3), 607-624.
DOI: https://doi.org/10.22059/jwim.2026.412497.1296

© The Author(s).
Publisher: University of Tehran Press.
DOI: https://doi.org/10.22059/jwim.2026.412497.1296

دوره شانزدهم، شماره سوم، پاییز ۱۴۰۵

انتشارات دانشگاه تهران

مدیریت آب و آبیاری

Homepage: https://jwim.ut.ac.ir/

شاپا الکترونیکی: ۹۹۳۱-۲۳۸۲

ارزیابی مدل‌ها و همادی اقلیمی بارش استان هرمزگان با نگاشت چارک

برومند صلاحی[1]✉ | علی شاهی[2]

۱. نویسنده مسئول، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: Salahi@uma.ac.ir

۲. گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: ali.shahi@uma.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقالهٔ پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۲۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۵/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۰۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۸/۰۴

کلیدواژه‌ها:

استان هرمزگان

بارش

نگاشت چارک

همادِ چندمدلی

چکیده

این پژوهش با هدف ارزیابی مدل‌های اقلیمی CMIP6 و برون‌داد همادی در مقیاس‌کاهی بارش استان هرمزگان با روش نگاشت چارک تجربی انجام گرفت. بدین‌منظور، از داده‌های بارش ماهانه چهار مدل گردش کلی جفت‌شده اقیانوس–جو BCC-CSM2-MR، MPI-ESM1-2-HR، CESM2-WACCM و GFDL-ESM4 (دوره ۲۰۱۴–۱۹۸۵) و هفت ایستگاه همدیدی (میناب، بندرعباس، بندرلنگه، سیری، جاسک، کیش و ابوموسی) واقع در استان هرمزگان استفاده شد. ارزیابی کارایی مدل‌ها با استفاده از شاخص کلینگ–گوپتا (KGE) و نمودار تیلور صورت گرفت و جهت کاهش عدم قطعیت، مدل همادی با روش میانگین‌گیری وزنی مبتنی بر رتبه تولید شد. محاسبات در محیط نرم‌افزار R انجام شد. یافته‌ها نشان داد که روش EQM عملکرد مناسبی در اصلاح اریبی بارش مدل‌ها دارد. در میان مدل‌های منفرد، مدل GFDL-ESM4 با مقادیر KGE بین ۰/۰۵− تا ۰/۱۴ بهترین عملکرد و مدل MPI-ESM1-2-HR با مقادیر KGE بین ۰/۲۲− تا ۰/۶۶− ضعیف‌ترین کارایی را در تمامی ایستگاه‌ها داشت. بهترین دقت مدل GFDL-ESM4 در بخش مرکزی و شرقی در ایستگاه‌های میناب (KGE=۰/۱۳) و بندرعباس (KGE=۰/۱۴) ثبت شد. هم‌چنین، نتایج نشان داد که مدل همادی (با دامنه KGE بین ۰/۱۶− تا ۰/۰۱) در مقایسه با مدل برتر منفرد (GFDL-ESM4) کارایی بهینه‌ای در شبیه‌سازی بارش این منطقه نداشته و مدل GFDL-ESM4 در اکثر ایستگاه‌ها (مانند میناب با اختلاف KGE معادل ۰/۲۲ نسبت به مدل همادی) عملکرد دقیق‌تری ارائه می‌دهد.

استناد: صلاحی، برومند و شاهی، علی (۱۴۰۵). ارزیابی مدل‌ها و همادی اقلیمی بارش استان هرمزگان با نگاشت چارک. *نشریه مدیریت آب و آبیاری*، ۱۶ (۳)، ۶۰۷-۶۲۴. DOI: https://doi.org/10.22059/jwim.2026.412497.1296

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

© نویسندگان.

CC BY NC

۱. مقدمه

بارش یکی از مؤلفه‌های کلیدی چرخه هیدرولوژیک است که به‌طور مستقیم بر مدیریت منابع آب، کشاورزی، سازگاری با تغییر اقلیم، و مخاطرات جوی تأثیر می‌گذارد (Cai *et al*., 2023). تغییرات اقلیمی جهانی، ناشی از افزایش گازهای گلخانه‌ای، باعث جابه‌جایی در مقدار، شدت، و توزیع مکانی- زمانی بارش در بسیاری از مناطق جهان شده است، به‌گونه‌ای که الگوهای بارش گذشته دیگر قابل اتکا برای آینده نیستند (Suo *et al*., 2025).

در ایران، با توجه به موقعیت در ناحیه خشک و نیمه‌خشک جهان و الگوهای متنوع اقلیمی، تغییر الگوی بارش یک چالش جدی برای مدیریت آب و سازگاری با شرایط آینده است، به‌طوری‌که مطالعات متعددی نشان داده‌اند که مدل‌های اقلیمی در شبیه‌سازی بارش دارای تفاوت‌های قابل‌توجه هستند و ارزیابی دقیق عملکرد آن‌ها ضروری است. مدل‌های جهانی اقلیم (GCM) که در Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 استفاده می‌شوند، ابزارهای استاندارد برای بررسی اثر تغییر اقلیم بر بارش هستند، اما خروجی آن‌ها در مقیاس منطقه‌ای و محلی دارای بایاس‌های مهم می‌باشد، به‌ویژه در مناطق با ناهمواری‌های پیچیده و تنوع اقلیمی مانند ایران (Azad & Ahmadi, 2024). این بایاس‌ها در خروجی مدل‌ها به‌دلیل فرایندهای پیچیده فیزیکی و عدم تفکیک‌های مکانی کافی ایجاد می‌شوند که باعث می‌شود نتایج به‌طورمستقیم برای برنامه‌ریزی منابع آب یا مدیریت خطرات قابل‌اعتماد نباشند. بنابراین، ریزمقیاس‌سازی یا ریزگردانی آماری که خطاهای سیستماتیک مدل‌ها را تصحیح می‌کند، برای تولید شبیه‌سازی‌های قابل اعتماد در سطح ایستگاه‌ها ضروری است. به‌گونه‌ای که پیش از هرگونه کاربرد برای برنامه‌ریزی منابع آب و مدیریت خطرات لازم است خروجی مدل‌ها از طریق روش‌های ریزگردانی آماری و تصحیح بایاس تعدیل شوند تا نتایج در مقیاس ایستگاه و منطقه قابل اعتماد شوند (Lafferty & Sriver, 2023).

روش نگاشت چارک (Quantile Mapping) یکی از پرکاربردترین و قابل‌اعتمادترین تکنیک‌های ریزگردانی آماری است که می‌تواند توزیع آمارهای شبیه‌سازی‌شده مدل را با توزیع داده‌های مشاهده‌ای تطبیق دهد، به‌ویژه زمانی‌که هدف بررسی شاخص‌های بارش در مقیاس ماهانه و فصلی است (Lehner *et al*., 2023).

با این‌حال، ارزیابی عملکرد مدل‌های مختلف CMIP6[1] و ترکیب چندمدلی (Ensemble) در شبیه‌سازی بارش استان‌های خاص ایران، به‌ویژه استان هرمزگان، هنوز به‌طور جامع انجام نشده است. علاوه بر این، کمبود داده‌های جامع برای پهنه‌بندی مکانی و ارزیابی با شاخص‌های چندمعیاره مانند نمودار تیلور، RMSE[2] و ضریب همبستگی نشان می‌دهد که هنوز چارچوب استاندارد و منسجمی برای سنجش کیفیت خروجی مدل‌ها در مقیاس محلی وجود ندارد (Azad & Ahmadi, 2024).

در ادامه مطالعاتی که در این زمینه در جهان انجام‌شده ارائه می‌گردد. Lehner *et al*. (2023) با تمرکز بر اتریش و با استفاده از داده‌های روزانه دما و بارش مدل‌های اقلیمی در دوره تاریخی، به بررسی و مقایسه روش‌های مختلف تصحیح بایاس آماری پرداخت. در این پژوهش، عملکرد چهار روش شامل Quantile Mapping (QM)، Scaled Distribution Mapping (SDM)، Quantile Delta Mapping (QDM) و PresRATe با استفاده از داده‌های واقعی و داده‌های مصنوعی ارزیابی شد. معیارهای ارزیابی شامل تطابق میانگین اقلیمی دوره پایه با مشاهدات، حفظ سیگنال تغییر اقلیم در روندهای بلندمدت و اصلاح صحیح فراوانی روزهای بارشی بود. نتایج نشان داد که روش‌های QDM و PresRATe توانستند هر سه معیار را به‌طور هم‌زمان برآورده سازند و به‌ویژه در حفظ سیگنال تغییر اقلیم در متغیر بارش عملکرد قابل‌اعتمادتری ارائه دهند که این امر اهمیت استفاده از روش‌های پیشرفته مبتنی بر Quantile را در مطالعات اثرات تغییر اقلیم برجسته می‌کند.

Azad & Ahmadi (2024) عملکرد ۴۰ مدل از پروژه Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) در مقیاس ایستگاه‌های سینوپتیک ایران ارزیابی کردند. داده‌های خروجی مدل‌ها برای متغیرهای بارش و دما با داده‌های

مشاهداتی مقایسه گردید و ارزیابی با شاخص‌هایی نظیر RMSE، MAE و ضریب همبستگی انجام شد. هم‌چنین دو روش تصحیح اریبی شامل Quantile Mapping و Linear Scaling در ترکیب با میانگین‌گیری بیزی مدل‌ها (BMA) به‌کار رفت. نتایج نشان داد دقت مدل‌ها بسته به شرایط اقلیمی و شاخص ارزیابی متفاوت است. مدل‌های NorESM2-MM، AWI-ESM-1-1-LR و MPI-ESM1-2-LR در شبیه‌سازی بارش، جزو برترین‌ها بودند. روش Quantile Mapping عملکرد بهتری نسبت به Linear Scaling داشت. بهره‌گیری از میانگین چندمدلی موجب بهبود دقت و کاهش دامنه خطاها شد.

Kazora *et al.* (2025) در پژوهشی در منطقه آفریقای شرقی–مرکزی، عملکرد ۱۹ مدل CMIP6 در شبیه‌سازی بارش و شاخص‌های حدی آن طی دوره ۲۰۱۴–۱۹۸۱ با استفاده از شاخص‌های PRCPTOT، CDD، R95p، R20mm و SDII را ارزیابی کردند. تحلیل مکانی با نمودار تیلور و ارزیابی زمانی براساس تغییرپذیری بین‌سالی انجام گرفت. نتایج نشان داد برخی مدل‌ها از جمله ACCESS-ESM1-5، EC-Earth3-Veg و MRI-ESM2-0 تطابق بهتری با داده‌های مشاهده‌ای داشته و بایاس و خطای کم‌تری نشان می‌دهند، درحالی‌که مدل‌هایی نظیر CNRM-ESM2-1 و MIROC6 عملکرد ضعیف‌تری داشتند، به‌ویژه در مناطق با ناهمواری پیچیده. هم‌چنین تحلیل چندمدلی بیانگر آن بود که ترکیب مدل‌های کارا موجب کاهش عدم‌قطعیت و بهبود شبیه‌سازی بارش‌های حدی می‌شود.

Ershadfath *et al.* (2025) در مطالعه‌ای سراسری در ایران، عملکرد ۱۴ مدل CMIP6 برای شبیه‌سازی توزیع مکانی–زمانی بارش در ۱۵۴نقطه شبکه‌ای طی دوره پایه ۲۰۱۴–۱۹۸۵ ارزیابی شد. داده‌های مرجع شامل محصولات شبکه‌ای ERA5 و CHIRPS بودند و رتبه‌بندی مدل‌ها با چارچوبی نوآورانه مبتنی بر سه روش RIM، CPI و JOC انجام گرفت. نتایج نشان داد مدل MPI-ESM1-2-LR با مقدار CPI برابر صفر، به‌عنوان برترین مدل در هر دو مجموعه داده انتخاب شد و سپس با روش Delta Change تصحیح اریبی گردید. Odunmorayo *et al.* (2025) به مطالعه عملکرد ۳۰ مدل CMIP6 و میانگین چندمدلی (GCM_Ensemble) در شبیه‌سازی بارش فصلی و سالانه در غرب آفریقا (۲۰۱۴–۱۹۸۵) پرداختند. ارزیابی با استفاده از همبستگی، خطای میانگین باقیمانده و خطای مطلق میانگین انجام شد و نشان داد که مدل‌ها در فصل خشک کم‌بارش را کم‌تر از واقعیت شبیه‌سازی می‌کنند، اما در مانسون و مناطق مرتفع عملکرد خوبی دارند. میانگین چندمدلی دقت شبیه‌سازی را بهبود می‌بخشد و GFDL-ESM4 بهترین عملکرد را نشان داد.

Shahi & Salahi (2025) به ارزیابی دقت مدل‌های اقلیمی در شبیه‌سازی بارش بخش جنوبی حوضه آبریز رودخانه ارس طی دوره تاریخی ۲۰۱۴–۱۹۸۵ پرداختند. در این پژوهش، داده‌های چهار مدل AOGCM شامل MPI-ESM1-2-HR، CMCC-CM2-SR5، BCC-CSM2-MR و EC-EARTH3-CC از پروژه Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 مورداستفاده قرار گرفت. برون‌داد خام مدل‌ها پس از استخراج، با نرم‌افزار CMHyd[۳] و سه روش Linear Scaling، Power Transformation و Distribution Mapping ریزمقیاس و اصلاح اریبی شد و انتخاب روش بهینه با بهره‌گیری از نمودار تیلور انجام گرفت. ارزیابی عملکرد مدل‌ها در دوره تاریخی براساس مؤلفه‌های همبستگی، انحراف معیار و RMSE در قالب نمودار تیلور نشان داد که خروجی خام مدل‌ها دارای خطای قابل‌توجه بوده و استفاده مستقیم از آن‌ها توصیه نمی‌شود. در نهایت، مدل BCC-CSM2-MR به‌عنوان مناسب‌ترین مدل برای پیش‌نگری بارش در منطقه موردمطالعه معرفی شد که بر اهمیت اعتبارسنجی دوره تاریخی پیش از کاربردهای آینده‌نگر تأکید دارد.

Chanie (2026) عملکرد ۱۲ مدل CMIP6 را در شبیه‌سازی بارش تاریخی (۲۰۱۴–۱۹۸۵) در حوضه رودخانه جناله داوا (GDRB) در جنوب‌شرق اتیوپی را بررسی کرد. داده‌های مشاهده‌ای شامل ENACTS و ۶۰ ایستگاه زمینی بودند و خروجی مدل‌ها با تفکیک مکانی ۰/۰۵ درجه در ۰/۰۵ درجه بازنمونه‌گیری و با quantile mapping اصلاح شدند. ارزیابی با استفاده از MBE، RMSE، همبستگی پیرسون و Taylor Skill Score (TSS) انجام شد. نتایج نشان داد که میانگین

چندمدلی (MME) عملکرد بهتری نسبت به مدل‌های منفرد دارد و بین مدل‌های منفرد، CNRM-CM6-1 بهترین عملکرد را در شبیه‌سازی بارش نشان داد.

از مطالعات صورت‌گرفته در ایران می‌توان به پژوهش‌هایی که در ادامه بیان می‌شود اشاره کرد. Zareian *et al.* (2023) با هدف ارزیابی دقت مدل‌های اقلیمی در مقیاس ملی، عملکرد جدیدترین مدل‌های AOGCM[۴] مربوط به گزارش ششم IPCC را در نواحی مختلف ایران بررسی کردند. در این پژوهش، خروجی تاریخی ۱۰ مدل از پروژه Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 طی دوره ۲۰۱۴–۱۹۸۰ استخراج و با داده‌های بازتحلیل ERA5 مرکز European Centre for Medium-Range Weather Forecasts مقایسه شد. ارزیابی عملکرد مدل‌ها در دوره تاریخی براساس شاخص‌های RMSE، ضریب همبستگی پیرسون و شاخص کلینگ–گوپتا (KGE)[۵] انجام گرفت. نتایج نشان داد دقت مدل‌ها در بازتولید دما و بارش دارای تغییرات ماهانه و مکانی بوده و نوسانات خطا در شبیه‌سازی بارش بیش‌تر از دماست. در مقیاس سالانه، مدل IPSL-CM6A-LR بهترین عملکرد را در برآورد دما و مدل HadGEM3-GC31-LL بهترین کارایی را در شبیه‌سازی بارش نشان دادند. هم‌چنین خطای مدل‌ها در نواحی مرکزی و شرقی ایران کم‌تر از سایر مناطق بود که بیانگر وابستگی مکانی دقت مدل‌ها و ضرورت ارزیابی دقیق دوره تاریخی پیش از کاربردهای پیش‌نگرانه است.

Javadi *et al.* (2023) اثر تغییر اقلیم بر بارش آینده ایران را در دوره ۲۰۴۰–۲۰۲۱ بررسی کردند. در این پژوهش، خروجی سه مدل گردش عمومی شامل GFDL-ESM2M، HadGEM2-ES و IPSL-CM5A-LR از پروژه Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 به‌کار گرفته شد. داده‌های روزانه بارش در دوره پایه ۲۰۱۹–۱۹۸۶ برای ریزمقیاس‌نمایی و تصحیح سوگیری با استفاده از مدل CCT مورداستفاده قرار گرفت تا قابلیت اعتماد برون‌داد مدل‌ها در بازنمایی شرایط تاریخی تقویت شود. در عین‌حال، کاهش شدید کمینه بارش و افزایش قابل‌توجه بیشینه آن بیانگر تشدید رخدادهای حدی نظیر خشک‌سالی و سیلاب در آینده است که اهمیت ارزیابی و اصلاح سوگیری مدل‌ها در دوره تاریخی را برای افزایش اطمینان پیش‌نگری‌ها برجسته می‌سازد.

Nemati Shishehgaran *et al.* (2024) با هدف کمّی‌سازی منشأهای مختلف عدم‌قطعیت در پیش‌نگری بارش، متوسط بارش ماهانه را در محدوده رفسنجان طی دوره‌های تاریخی و آینده بررسی کردند. در این پژوهش، خروجی ۱۰ مدل گردش عمومی جو از پروژه Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 تحت سناریوهای مختلف SSP به‌کار گرفته شد و برای افزایش قابلیت اعتماد در بازنمایی شرایط گذشته، داده‌ها با روش‌های مختلف تصحیح اریبی مبتنی بر نگاشت چندکی اصلاح گردید. به‌طورکلی، در دوره‌های پیش‌نگری، انتخاب مدل و افق زمانی مهم‌ترین منشأ عدم‌قطعیت محسوب می‌شود که بر ضرورت ارزیابی دقیق عملکرد مدل‌ها در دوره تاریخی پیش از استفاده در تحلیل‌های سازگاری و سیاست‌گذاری اقلیمی تأکید دارد.

Seraj Ebrahimi *et al.* (2024) به ارزیابی دقت ۱۰ مدل AOGCM از گزارش ششمIPCC (CMIP6) در شبیه‌سازی دما و بارش حوضه آبریز سفیدرود پرداختند. در این پژوهش، داده‌های مشاهداتی ۱۶ ایستگاه هواشناسی طی دوره ۲۰۱۴–۱۹۸۰ با خروجی مدل‌ها مقایسه شدند و عملکرد مدل‌ها با شاخص ترکیبی کلینگ–گوپتا (KGE) در مقیاس‌های سالانه و ماهانه ارزیابی شد. نتایج نشان داد دقت مدل‌ها در بازتولید دما بیش‌تر از بارش بوده و توانایی آن‌ها در شبیه‌سازی متغیرها در ماه‌های مختلف متفاوت است. به‌طور مشخص، مدل‌های MIROC6 و MRI-ESM2-0 بهترین عملکرد را در برآورد دمای ماهانه و مدل HadGEM3-GC31-LL بیش‌ترین دقت را در بازتولید بارش تاریخی نشان دادند. یافته‌ها بر اهمیت انتخاب مدل‌های دقیق برای هر ماه پیش از انجام مطالعات پیش‌نگرانه تغییر اقلیم تأکید دارند.

Shahi *et al.* (2025) پیش‌نگری بارش‌های سنگین را در ۲۳ ایستگاه همدید شمال‌غرب ایران طی دوره تاریخی

۲۰۱۹–۱۹۹۰ و آینده ۲۰۵۹–۲۰۳۰ بررسی کردند. در این پژوهش از داده‌های مشاهده‌ای و خروجی هشت مدل AOGCM از پروژه Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 استفاده شد. برون‌دادها پس از استخراج و تبدیل واحد، با نرم‌افزار CMHyd و سه روش مختلف مقیاس‌کاهی اصلاح اریبی شدند و عملکرد مدل‌ها در دوره تاریخی با شاخص‌های PCC، KGE، RMSE، NSE[۶] و R^2 ارزیابی گردید. نتایج نشان داد دقت مدل‌ها در بازتولید رخدادهای حدی متفاوت بوده و مدل همادی حاصل از میانگین‌گیری وزنی نسبت به مدل‌های منفرد کارایی بالاتری دارد یافته‌ها بر اهمیت ارزیابی دقیق دوره تاریخی برای کاهش عدم‌قطعیت پیش‌نگری‌ها تأکید دارد.

Shahi & Salahi (2025) به‌منظور پیش‌نگری بارش ۳۲ ایستگاه همدیدی در نیمه شمالی ایران برای دوره ۲۰۵۹–۲۰۳۰، کارایی پنج مدل CMIP6 را تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 ارزیابی کردند. در این پژوهش، پس از تصحیح اریب داده‌ها با روش‌های مقیاس‌گذاری خطی، تبدیل توان و نگاشت توزیع، ارزیابی مدل‌ها براساس معیار KGE انجام شد. نتایج نشان داد که مدل همادی وزنیِ مبتنی بر رتبه، عملکرد دقیق‌تری نسبت به مدل‌های منفرد دارد. هم‌چنین پیش‌نگری‌ها حاکی از رفتار متفاوت بارش در مواجهه با دو سناریو است، به‌طوری‌که تحت سناریوی متوسط (SSP2-4.5)، بارش در ۷۸ درصد ایستگاه‌ها کاهش می‌یابد (با بیش‌ترین افت حدود ۴۰ درصد در جلفا)، درحالی‌که تحت سناریوی بدبینانه (SSP5-8.5)، ۷۵ درصد ایستگاه‌ها افزایش بارش را تجربه خواهند کرد (با بیش‌ترین رشد ۱۴ درصد در سهند).

Shoja *et al.* (2025) با استفاده از خروجی‌های مدل MPI-ESM1-2-HR در قالب پروژه DCPP و شاخص SPEI بر پایه تئوری رون، به تحلیل و پیش‌بینی ویژگی‌های خشک‌سالی در جنوب‌شرق ایران پرداختند. نتایج اعتبارسنجی و پیش‌نگری دهه‌ای نشان داد که در افق پنج‌ساله پیش‌رو، این منطقه با کاهش ۱۷ درصدی بارش و افزایش ۱/۱ درجه سانتی‌گرادی دمای کمینه و بیشینه مواجه خواهد شد. این ناپایداری‌های اقلیمی به پیشروی خشک‌سالی در منطقه دامن زده و فراوانی آن را در ایستگاه‌های نهبندان، زاهدان، زهک، کرمان، قشم، میناب و زابل بین ۲۶ تا ۳۲ درصد افزایش می‌دهد. هم‌چنین طبق این پیش‌بینی، بیش‌ترین شدت خشک‌سالی در ایستگاه‌های بندرلنگه، انار و زاهدان رخ خواهد داد.

Abbaszadeh *et al.* (2025) اثرات تغییر اقلیم بر دبی رودخانه میناب را برای افق ۲۰۵۰–۲۰۲۰ تحت سناریوهای SSP مدل CanESM5 بررسی کردند. آن‌ها جهت شبیه‌سازی هیدرولوژیکی، پنج مدل یادگیری ماشین را واسنجی کردند که مدل KNN بالاترین دقت را در تخمین جریان رودخانه ارائه داد. نتایج پیش‌نگری‌ها نشان‌دهنده افزایش دمای بیشینه و کمینه (به‌ترتیب تا ۴/۹ و ۵/۲ درجه سانتی‌گراد تحت سناریوی SSP3-7.0) و رشد ۳۳ درصدی میانگین رواناب سالانه است. براساس یافته‌های این پژوهش، تمرکز بارش‌ها و افزایش دبی در فصل پاییز خطر وقوع سیلاب‌های فصلی را تشدید می‌کند، درحالی‌که تقلیل جریان رودخانه در فصول گرم، چالش‌های مدیریتی مخزن سد استقلال میناب را در پی خواهد داشت.

با توجه به موقعیت اقلیمی خاص استان هرمزگان، تغییرات بارش می‌تواند تأثیرات مستقیم بر منابع آب، کشاورزی و سازگاری با تغییر اقلیم داشته باشد. مدل‌های جهانی CMIP6 باوجود پیشرفت‌های فنی، به‌دلیل تفکیک مکانی محدود و عدم توانایی در شبیه‌سازی دقیق الگوهای محلی بارش، برای مطالعات کاربردی در سطح ایستگاه‌ها قابل استفاده مستقیم نیستند. بنابراین، ریزگردانی آماری با روش نگاشت چارک و تحلیل Ensemble چندمدلی ضروری است تا نتایج مدل‌ها با مشاهدات هماهنگ شود و عدم قطعیت‌ها کاهش یابد.

نوآوری پژوهش حاضر در چند محور قابل بیان است؛ نخست، ارزیابی هم‌زمان عملکرد چهار مدل منتخب CMIP6 و همادی چندمدلی آن‌ها در شبیه‌سازی بارش ماهانه استان هرمزگان؛ دوم، به‌کارگیری روش نگاشت چارک تجربی برای تصحیح اریبی و انطباق توزیع آماری برون‌داد مدل‌ها با داده‌های دیده‌بانی؛ سوم، بررسی مکانی نتایج مقیاس‌کاهی‌شده در ایستگاه‌های منتخب استان به‌منظور شناخت بهتر تغییرپذیری محلی بارش و چهارم، ارزیابی جامع عملکرد مدل‌ها و

همادی با استفاده از شاخص کلینگ–گوپتا و نمودار تیلور. این رویکرد امکان مقایسه کمی کارایی مدل‌ها و همادی را در مقیاس ایستگاهی فراهم می‌کند و می‌تواند شواهدی برای انتخاب برون‌دادهای اقلیمی مناسب در مطالعات منابع آب، پیشروی خشک‌سالی و سازگاری با تغییر اقلیم در استان هرمزگان فراهم آورد.

هدف این پژوهش، ارزیابی عملکرد چهار مدل منتخب CMIP6 و برآورد هماد چندمدلی (Multi-model ensemble) در شبیه‌سازی بارش ماهانه و فصلی در استان هرمزگان است. علاوه بر این، با استفاده از روش نگاشت چارک برای ریزگردانی آماری، توزیع شبیه‌سازی‌های مدل‌ها با داده‌های مشاهده‌ای هماهنگ شده و عدم قطعیت‌ها کاهش می‌یابد. پژوهش هم‌چنین به پهنه‌بندی مکانی نتایج ریزگردانی شده و ارزیابی کمی مدل‌ها با شاخص‌هایی مانند نمودار تیلور، RMSE و ضریب همبستگی می‌پردازد تا کاربردی‌ترین داده‌ها برای مدیریت منابع آب و سازگاری با تغییرات اقلیمی در مقیاس منطقه‌ای فراهم شود.

دامنه این پژوهش به ارزیابی و مقیاس‌کاهی آماری بارش ماهانه در استان هرمزگان محدود است. در این راستا، از داده‌های بارش ماهانه چهار مدل منتخب CMIP6 (BCC-CSM2-MR، MPI-ESM1-2-HR، CESM2-WACCM و GFDL-ESM4) و داده‌های دیده‌بانی هفت ایستگاه همدیدی میناب، بندرعباس، بندرلنگه، سیری، جاسک، کیش و ابوموسی در دوره ۲۰۱۴–۱۹۸۵ استفاده شد. تصحیح اریبی/ مقیاس‌کاهی با روش نگاشت چارک تجربی (EQM) انجام گرفت و کارایی مدل‌ها و همادی چندمدلی با شاخص کلینگ–گوپتا (KGE) و نمودار تیلور ارزیابی شد. لازم به ذکر است که این مطالعه به متغیر بارش و مقیاس زمانی ماهانه محدود بوده و تحلیل حدی‌های روزانه، سایر متغیرهای اقلیمی و نیز ارزیابی سناریوهای آینده در دامنه این مقاله قرار ندارد.

پژوهش حاضر در کنار دستاوردهای خود با محدودیت‌هایی مواجه بوده است، از جمله این محدودیت‌ها می‌توان به توزیع نامتوازن فضایی ایستگاه‌های همدیدی در پهنه استان هرمزگان به‌ویژه در مناطق مرتفع کوهستانی و جزایر خلیج‌فارس اشاره کرد که ارزیابی‌های مکانی را با چالش مواجه می‌سازد.

۲. روش‌شناسی پژوهش

۲. ۱. منطقه موردمطالعه

منطقه موردمطالعه در این پژوهش، جنوب کشور ایران، استان هرمزگان است که در محدوده عرض‌های جغرافیایی ۲۵ تا ۲۸ درجه شمالی و طول‌های جغرافیایی ۵۳ تا ۵۹ درجه شرقی قرار گرفته است. ایستگاه‌های سینوپتیک (همدید) منتخب در محدوده موردمطالعه، با هدف بازنمایی حداکثری تغییرپذیری اقلیمی استان هرمزگان برگزیده شدند. معیارهای انتخاب این هفت ایستگاه شامل پراکنش جغرافیایی مناسب، تنوع توپوگرافی (اختلاف ارتفاع)، حفظ فواصل معنادار میان ایستگاه‌ها به‌منظور اجتناب از هم‌پوشانی مکانی، پوشش‌دهی تنوع رژیم بارشی، و در نهایت برخورداری از تداوم و پیوستگی سری‌های زمانی (بدون داده گمشده) در طول دوره آماری ۳۰ ساله (۲۰۱۴–۱۹۸۵) بوده است. مشخصات و موقعیت ایستگاه‌های منتخب در شکل (۱) نمایش داده شده است.

با توجه به موقعیت جغرافیایی استان هرمزگان، تبخیر–تعرق مرجع (ET) یکی از محرک‌های کلیدی در بیلان آب و چرخه هیدرولوژیکی منطقه به‌شمار می‌رود. براساس یافته‌های Yahyavi Dizaj *et al.* (2023) که به بررسی فصلی ET در ایران با روش استاندارد فائو پنمن–مانتیث ۵۶ در یک دوره آماری ۴۵ ساله (۲۰۲۰–۱۹۷۶) پرداخته‌اند، روند تغییرات تبخیر–تعرق مرجع در سطح کشور صعودی بوده و الگوی توزیع مکانی آن نشان‌دهنده افزایش مقادیر از سمت شمال به جنوب است. استان هرمزگان در جنوبی‌ترین بخش این گرادیان صعودی قرار دارد و پتانسیل تبخیر اتمسفری بسیار بالایی را تجربه می‌کند. براساس تحلیل حساسیت این پژوهش، افزایش دما (به‌ویژه دمای کمینه در بهار و دمای بیشینه

در زمستان) در کنار تأثیر منفی و کاهشی رطوبت نسبی، پتانسیل تبخیر را در این عرض‌های جغرافیایی به‌شدت بالا برده که این امر فرایند پیشروی خشک‌سالی را در منطقه تشدید می‌کند.

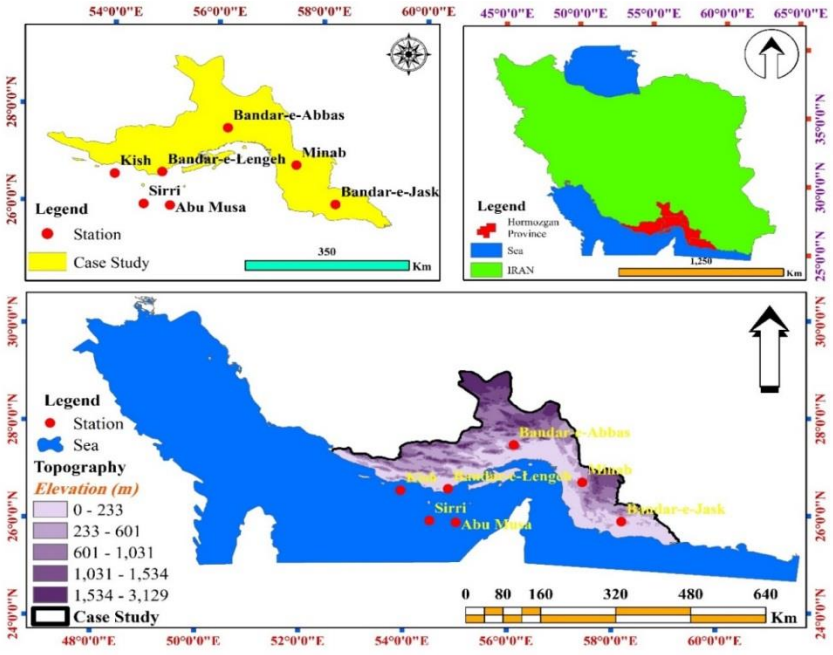


Figure 1. Geographical location of the study area

۲. ۲. داده‌های مطالعه

در این پژوهش از دو گروه داده‌های مشاهداتی و مدل در مقیاس زمانی ماهانه استفاده شده است. داده‌های بارش ماهانه هفت ایستگاه همدیدی واقع در استان هرمزگان از سازمان هواشناسی ایران (www.irimo.ir) اخذ گردید و برون‌داد خام مدل‌های گزارش ششم از سایت https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6/ ESGF برای دوره زمانی ۳۰ ساله ۲۰۱۴– ۱۹۸۵ (دوره تاریخی) استخراج شد (جدول ۱).

جهت ارزیابی و مقیاس‌کاهی آماری بارش ماهانه استان هرمزگان، از میان مدل‌های موجود در فاز ششم پروژه مقایسه بین‌مدلی جفت‌شده (CMIP6)، چهار مدل BCC-CSM2-MR، MPI-ESM1-2-HR، CESM2-WACCM و GFDL-ESM4 انتخاب شدند. فرایند انتخاب این مدل‌ها براساس معیارهای چندگانه صورت گرفت؛ نخست، بررسی دسترس‌پذیری کامل داده‌های بارش ماهانه در دوره تاریخی مشترک (۲۰۱۴–۱۹۸۵). دوم، توجه به رزولوشن افقی مدل‌ها، به‌طوری‌که تلاش شد مدل‌هایی با تفکیک‌پذیری افقی مناسب و تا حد امکان یکسان و نزدیک به هم انتخاب شوند. این رویکرد مانع از ورود خطاهای ساختاری ناشی از تفاوت‌های شدید در تفکیک مکانی شبکه‌ها (Grid Resolution Mismatch) در مراحل تصحیح اریب و ترکیب مدل‌ها می‌شود و مقایسه خروجی‌ها را در چارچوبی همگن‌تر میسر می‌سازد. سوم، استفاده از نتایج مطالعات پیشین ارزیابی مدل‌های CMIP6 در ایران و حوضه‌های جنوبی که نشان‌دهنده توانایی نسبی این چهار مدل در شبیه‌سازی نوسانات فصلی و فرایندهای اقلیمی حاکم بر خاورمیانه است. در نهایت، پیش از اعمال روش نگاشت چندک تجربی (EQM)، انطباق تاریخی مدل‌های مذکور با داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌های هفت‌گانه سینوپتیک استان هرمزگان با استفاده از معیارهای آماری موردارزیابی و تأیید قرار گرفت.

Table 1. Specifications of the atmospheric–oceanic climate models (AOGCMs) used in this study

Row	Model	Developer Organization	Country	Spatial Resolution
1	MPI-ESM1-2-HR	German Regional Data Center	Germany	100 km
2	BCC-CSM2-MR	Beijing Climate Center	China	100 km
3	GFDL-ESM4	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	United states	100 km
4	CESM2-WACCM	Community Earth System Model	United states	100 km

۲. ۳. روش‌شناسی

در گام اول بعد از دریافت داده‌های بارش خام مدل‌های گردش عمومی، براساس مختصات ایستگاه‌های همدیدی موردمطالعه در پژوهش برش مکانی داده شد و مقادیر بارش ایستگاهی در دوره ۳۰ ساله برای هر ماه استخراج گردید سپس واحد داده‌ها به میلی‌متر تبدیل شد و داده‌ها از حالت باینری خارج شدند؛ محاسبات در محیط نرم‌افزار R انجام شده است. با توجه به بزرگ‌مقیاس‌بودن برون‌داد مدل‌ها و افزایش دقت آن‌ها با استفاده از روش تصحیح بایاس نگاشت چارک (EQM)[۷] مقیاس‌کاهی انجام گرفت و تخمین بارش هر چهار مدل برای هرکدام از هفت ایستگاه منطقه موردمطالعه بهینه شد. در گام بعدی برای ارزیابی عملکرد روش تصحیح بایاس و اطمینان از مقیاس‌کاهی، از نمودار تیلور استفاده شد، برای این منظور هفت ایستگاه همدیدی به‌عنوان نماینده منطقه موردمطالعه برای مقایسه برون‌داد خام چهار مدل با داده‌های تصحیح‌شده انتخاب گردید که ملاک انتخاب پراکندگی اقلیمی، فاصله مناسب و توپوگرافی بود. در ادامه با استفاده از شاخص آماری دقیق KGE، برون‌داد بارشی تصحیح اریبی‌شده هر چهار مدل برای هر ایستگاه را با مقادیر بارش مشاهداتی ایستگاه نظیر خود موردمقایسه قرار گرفت. برای افزایش قابلیت اطمینان و کاهش خطای شبیه‌سازی بارش توسط مدل‌های منتخب، مدل همادی مستخرج از چهار مدل گزارش ششم مورداستفاده در این پژوهش نیز موردارزیابی قرار داده شد. مدل همادی از روش میانگین وزنی مبتنی به رتبه به‌دست آمد، ابتدا رتبه مدل‌ها با شاخص کلینگ گوپتا تعیین شد و بعد با استفاده از رابطه (۱) وزن هر مدل در هر ایستگاه مشخص گردید و سپس مدل همادی هر ایستگاه محاسبه و موردارزیابی قرار داده شد. برای تفکیک بهتر عملکرد هر مدل در هر ایستگاه در منطقه موردمطالعه، نمودار هیت‌مپ ترسیم گردید. در گام آخر در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، نقشه پهنه‌بندی برای استان هرمزگان براساس معیار KGE ترسیم و تفسیر شد؛ محاسبات مربوط به درون‌یابی (Interpolation) با روش فاصله وزنی معکوس (IDW) انجام شده است.

$$W_i = \frac{R_i}{\sum_{i=1}^{n} R_i}$$ رابطه ۱)

در این رابطه، R رتبه هر مدل، W وزن هر مدل و n تعداد مدل‌ها است (Chen *et al*., 2011).

۳. ۱. روش تصحیح بایاس نگاشت چارک تجربی (Empirical Quantile Mapping)

گونه‌ای از روش QM است که در آن توابع توزیع تجمعی به‌صورت تجربی (Empirical) و براساس داده‌های واقعی محاسبه می‌شوند، بدون آن‌که فرضی درباره شکل توزیع آماری داده‌ها در نظر گرفته شود (رابطه ۲).

$$x^* = F_{obs,emp}^{-1}(F_{\mathrm{mod},emp}(x))$$ رابطه ۲)

که در آن، x: مقدار شبیه‌سازی‌شده مدل، $F_{mod,exp}(x)$: تابع توزیع تجمعی تجربی مدل، $F_{obs,\,emp}^{-1}$: تابع معکوس CDF تجربی مشاهدات، x^*: مقدار تصحیح شده بعد از EQM (Gudmundsson *et al*., 2012).

۲. ۳. ۲. شاخص آماری کلینگ گوپتا (Kling Gupta Efficiency)

شاخص ترکیبی است که همبستگی، انحراف معیار و بایاس را هم‌زمان در نظر می‌گیرد و براساس پیشنهاد کلینگ و گوپتا (Gupta *et al*., 2009) تعریف شده است، مقدار نزدیک به عدد یک عملکرد بهتر مدل را نشان می‌دهد (رابطه ۳).

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_o} - 1\right)^2 + \left(\frac{\mu_s}{\mu_o} - 1\right)^2}$$ رابطه ۳)

در این رابطه، Oi و Si به‌ترتیب مقادیر داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده بارش هستند. میانگین و انحراف معیار و r ضریب همبستگی پیرسن است (Zareian, 2022).

۲. ۳. ۳. چند مدلی یا همادی (Ensemble)

مدل همادی یا مدل ترکیبی از چند مدل اقلیمی گردش عمومی جوی- اقیانوسی در اغلب مواقع در مقایسه با مدل‌های منفرد نتایج بهتری ارائه می‌دهد به‌عبارتی مدل همادی، عدم قطعیت‌های ناشی ازشبیه‌سازی مدل‌ها را در ارتباط با متغیر مورد پیش‌نگری را تا حد زیادی کاهش می‌دهد (Ge *et al*., 2021).

اگرچه شناسایی و به‌کارگیری مدل اقلیمی منفرد برتر (Best Single Model) به‌دلیل سادگی محاسباتی در برخی مطالعات رایج است، اما این رویکرد به‌ویژه برای متغیر بارش که دارای تغییرپذیری مکانی-زمانی شدید و عدم‌قطعیت بالایی است، ریسک سوگیری‌های سیستماتیک ساختاری را افزایش می‌دهد. مدل‌های اقلیمی به‌دلیل تفاوت در توابع فیزیکی و پارامترسازی فرایندهای ریزمقیاس، رفتارهای متفاوتی در شبیه‌سازی رژیم‌های بارشی دارند. از این رو، در پژوهش حاضر از رویکرد هماد چندمدلی (MME) با ترکیب چهار مدل منتخب استفاده شد.

هدف از این اقدام، کاهش عدم‌قطعیت ساختاری مدل‌ها، بهره‌گیری از اصل خنثی‌سازی خطاهای انفرادی (Error Cancellation) و ایجاد یک برآورد پایدارتر است. با اعمال روش وزن‌دهی بر مبنای عملکرد، وزن بیش‌تری به مدل‌های با خطای کم‌تر اختصاص یافت تا توانمندی‌های شبیه‌سازی هر مدل به حداکثر رسیده و ضعف‌های آن تعدیل شود. علاوه بر این، تولید خروجی همادی وزنی این امکان را فراهم ساخت تا برتری یا ضعف عملکردی ترکیب چندمدلی در مقایسه با بهترین مدل انفرادی به‌صورت کمّی و ساختاریافته ارزیابی شود.

۲. ۳. ۴. نمودار تیلور (Taylor diagram)

نمودار تیلور ابزاری گرافیکی است که برای نمایش هم‌زمان سه سنجه آماری مهم در مقایسه بین داده‌های شبیه‌سازی و دیده‌بانی کاربرد دارد. این سه شاخص عبارتند از:

۱- ضریب همبستگی (R)، ۲- انحراف معیار (SD) و ۳- ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)

این نمودار در دستگاه مختصات قطبی طراحی شده است، به‌گونه‌ای که موقعیت هر مدل نسبت به نقطه مرجع تعیین‌کننده دقت آن مدل است؛ هرچه فاصله نقطه مدل از مرجع کم‌تر باشد، عملکرد مدل بهتر ارزیابی می‌شود. در این نمودار، محور شعاعی معرف انحراف معیار بوده و زاویه نسبت به محور افقی بیانگر میزان همبستگی است. هم‌چنین، خطوط منحنی متحدالمرکز پیرامون نقطه مرجع نشان‌دهنده سطوح مختلف RMSE هستند. این ابزار کاربرد گسترده‌ای در سنجش دقت مدل‌های اقلیمی، دارد (Taylor, 2001).

۲. ۳. ۵. مفروضات مدل‌سازی

چارچوب ارزیابی و تصحیح اریبی داده‌های تاریخی در این پژوهش بر مفروضات کلیدی زیر استوار است:

۱. مفروضات دینامیکی و فیزیکی: مدل‌های شبیه‌سازی تاریخی CMIP6 بر پایه قوانین فیزیکی بقای جرم، انرژی و تکانه عمل می‌کنند. در این مدل‌ها فرض می‌شود که فرایندهای جوی ریزمقیاس (نظیر بارش‌های همرفتی

محلی و تأثیرات ناهمواری‌ها بر بارش در جنوب ایران) که فراتر از قدرت تفکیک شبکه مدل هستند، به‌طور مناسبی توسط طرح‌واره‌های پارامترسازی فیزیکی شبیه‌سازی می‌شوند.

۲. **مفروضات آماری (تصحیح اریبی):** به‌کارگیری روش نگاشت چارک تجربی جهت اصلاح خطای داده‌های تاریخی، مستلزم فرض ایستایی اریبی (Bias Stationarity) در طول دوره مبنا است؛ بدین معنی که فرض می‌شود ساختار آماری خطاهای سیستماتیک مدل در کل بازه زمانی ۲۰۱۴–۱۹۸۵ پایا بوده و دستخوش تغییرات ناگهانی نشده است. هم‌چنین فرض می‌شود داده‌های دیده‌بانی نقطه‌ای حاصل از هفت ایستگاه سینوپتیک منتخب، نماینده مناسبی برای ارزیابی و واسنجی بارش در مقیاس سلول‌های شبکه مدل‌های گردش عمومی هستند.

چارچوب روش‌شناسی و فرایند اجرایی گام‌به‌گام این پژوهش، شامل استخراج داده‌های خام NetCDF و تبدیل واحد در محیط نرم‌افزار R، تصحیح اریبی با روش نگاشت چارک تجربی، ساخت همادی چندمدلی مبتنی بر وزن‌دهی رتبه‌ای و در نهایت ارزیابی عملکرد با شاخص KGE و نمودار تیلور، در شکل (۲) نشان داده شده است.

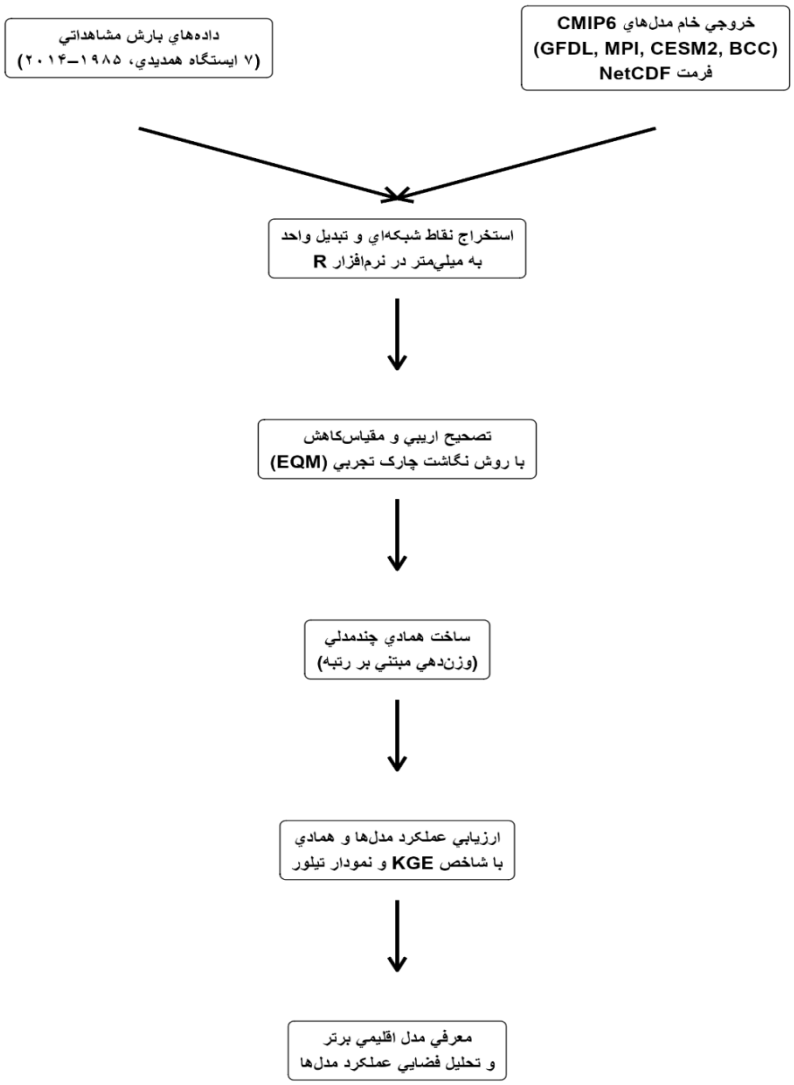


Figure 2. Workflow of the study (NetCDF → R, EQM bias correction, weighted ensemble, KGE and Taylor diagram)

۳. یافته‌های پژوهش و بحث

براساس یافته‌های این پژوهش، روش تصحیح بایاس به‌کاررفته، در مقیاس‌کاهی برون‌داد خام بارش چهار مدل اقلیمی منتخب عملکرد مناسبی داشته است، به‌گونه‌ای که نمودارهای تیلور مربوط به هفت ایستگاه منتخب نشان‌دهنده بهبود نتایج مدل‌ها پس از اعمال تصحیح اریبی است و برون‌داد هر چهار مدل در تمامی هفت ایستگاه، پس از تصحیح، با خطای کم‌تر و دقت بالاتر نسبت به برون‌داد خام مدل‌ها در نمودار تیلور مشاهده شد (شکل ۳).

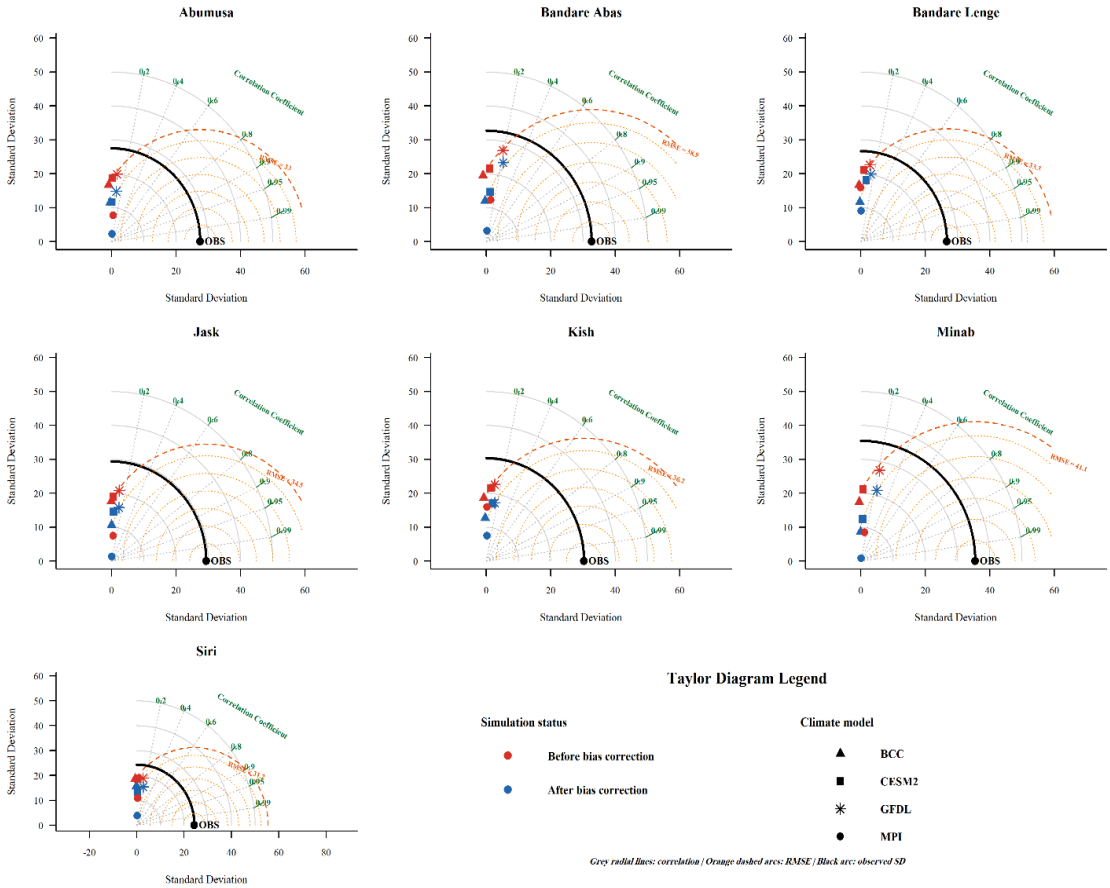


Figure 3. Taylor diagrams for evaluating the performance of the EQM bias-correction method over the study area during the 30-year period

طبق شکل فوق، در ایستگاه‌های بندرعباس، بندرلنگه، جاسک، کیش، سیری، میناب و ابوموسی که با درنظرگرفتن تنوع ارتفاع، بارش و پراکندگی جغرافیایی نسبت به یکدیگر انتخاب شدند، مقایسه قبل و بعد از تصحیح بایاس با روش نگاشت چارک تجربی نشان‌دهنده برتری محسوس این روش در بهبود محاسبات است. مطابق نمودارهای ترسیم‌شده، در تمامی ایستگاه‌ها و برای هر چهار مدل، ریشه میانگین مربعات خطا و نیز انحراف استاندارد پس از اعمال تصحیح اریبی کاهش یافته‌اند. در نمودار تیلور، رنگ‌های قرمز و آبی به‌ترتیب بیانگر وضعیت قبل و بعد از انجام تصحیح اریب بر داده‌های بارش چهار مدل منتخب BCC-CSM2-MR، MPI-ESM1-2-HR، CESM2-WACCM و GFDL-ESM4 هستند.

با توجه به این‌که متغیر موردبررسی در این مطالعه بارش است و این متغیر دارای ویژگی‌های پیچیده، نوسانات زیاد و

تغییرپذیری مکانی و زمانی بالاست، پایین‌بودن ضریب همبستگی در برخی موارد امری غیرمنتظره نیست. از این‌رو، مدل‌های اقلیمی با وجود پیشرفت‌های حاصل‌شده، به‌ویژه در گزارش ششم IPCC، همچنان به‌طور کامل ایده‌آل نیستند و در مقایسه با دما از عدم‌قطعیت بیش‌تری برخوردارند. در این مطالعه تلاش شد با انتخاب مدل‌های مناسب برای شبیه‌سازی بارش و هم‌چنین استفاده از تفکیک افقی دقیق و تا حد امکان همگن، نتایجی با دقت بالاتر ارائه شود.

در مجموع، نمودار تیلور نشان می‌دهد که پس از اعمال تصحیح اریبی با روش نگاشت چارک تجربی، موقعیت نقاط مربوط به مدل‌ها در بیش‌تر ایستگاه‌ها به نقطه مشاهده‌ای (OBS) نزدیک‌تر شده است. این جابه‌جایی بیانگر بهبود هم‌زمان در ضریب همبستگی، کاهش اختلاف انحراف استاندارد و کاهش خطای بازنمایی بارش است. با این‌حال، میزان این بهبود در ایستگاه‌های مختلف یکسان نیست و عملکرد مدل‌ها تحت تأثیر ویژگی‌های مکانی و اقلیمی هر ایستگاه تغییر می‌کند. بنابراین، نتایج نمودار تیلور نشان می‌دهد که EQM توانسته است توان بازنمایی بارش مدل‌های CMIP6 را در مقیاس محلی استان هرمزگان بهبود دهد، هرچند تفاوت‌های بین‌ایستگاهی همچنان قابل‌توجه است.

در هر یک از هفت ایستگاه همدیدی واقع در منطقه موردمطالعه، ابتدا چهار مدل گردش عمومی جوّی–اقیانوسی منتخب براساس شاخص کلینگ–گوپتا (KGE) رتبه‌بندی شدند (جدول ۲) و سپس وزن هر مدل اقلیمی مطابق رابطه (۱) تعیین گردید (جدول ۳). بر پایه وزن‌های به‌دست‌آمده در هر ایستگاه، مدل همادی (Ensemble) به‌روش میانگین وزنی مبتنی بر رتبه، به‌صورت ترکیبی از چهار مدل BCC-CSM2-MR، MPI-ESM1-2-HR، CESM2-WACCM و GFDL-ESM4 استخراج شد. هدف از ساخت مدل همادی، کاهش عدم‌قطعیت شبیه‌سازی بارش است، به‌گونه‌ای که مطابق مطالعات پیشین، مدل برآیند حاصل از چند مدل منتخب با بهره‌گیری از نقاط قوت و تعدیل نقاط ضعف مدل‌ها (از طریق وزن‌دهی بیش‌تر به مدل برتر و وزن‌دهی کم‌تر به مدل ضعیف‌تر) می‌تواند به شبیه‌سازی‌ها و پیش‌نگری‌های پایدارتر و مناسب‌تر منجر شود. مقادیر شاخص KGE مربوط به مدل همادی در جدول (۲) در سطر پایانی با رنگ قرمز مشخص شده است.

براساس جدول (۲)، بهترین عملکرد در میان چهار مدل گردش عمومی برگرفته از گزارش ششم IPCC در منطقه موردمطالعه، به مدل GFDL-ESM4 تعلق دارد، به‌گونه‌ای‌که این مدل در هر هفت ایستگاه استان هرمزگان بیشینه مقدار KGE را ثبت کرده و در همه ایستگاه‌ها رتبه نخست را به‌خود اختصاص داده است (در جدول (۲) با رنگ آبی مشخص شده است). این نتیجه بیانگر آن است که GFDL-ESM4 دقیق‌ترین مدل برای شبیه‌سازی بارش در این منطقه محسوب می‌شود. در مقابل، یافته‌ها نشان داد که مدل MPI-ESM1-2-HR ضعیف‌ترین عملکرد را در میان چهار مدل موردبررسی داشته و در هر هفت ایستگاه، براساس کم‌ترین مقدار KGE، در رتبه چهارم قرار گرفته است.

Table 2. KGE values for each station, disaggregated by the four selected climate models and the ensemble

Station / Model	KGE						
	Abumusa	**Minab**	**Kish**	**Jask**	**Siri**	**Bandare_lenge**	**Bandare_ abas**
MPI-ESM1-2-HR	-0.55	-0.64	-0.32	-0.66	-0.5	-0.22	-0.6
GFDL-ESM4	-0.05	0.13	0.04	0.03	0.1	0.08	0.14
BCC-CSM2-MR	-0.21	-0.31	-0.18	-0.23	-0.34	-0.19	-0.21
CESM2-WACCM	-0.29	-0.28	0.02	-0.09	-0.46	0	-0.12
Ensemble	-0.16	-0.09	-0.07	-0.09	-0.08	-0.03	0.01

Table 3. Weights of the GCMs used in this study

Model Ranking	**First**	**Second**	**Third**	**Fourth**
Model weights	0.4	0.3	0.2	0.1

افزون بر این، مقایسه مقادیر KGE نشان می‌دهد که مدل همادی، با وجود برخورداری از عملکرد پایدار و دامنه تغییرات محدود بین ایستگاه‌ها، در هیچ‌یک از هفت ایستگاه نتوانسته از مدل برتر منفرد (GFDL-ESM4) پیشی بگیرد و

تنها در ایستگاه بندرعباس به مقدار مثبت (۰/۰۱) رسیده است. از این‌رو، هرچند همادی وزنی توانسته است از مدل‌های ضعیف‌تر عملکرد بهتری ارائه دهد و نوسانات بین‌ایستگاهی را کاهش دهد، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که همادی وزنی لزوماً در همه شرایط عملکردی برتر از بهترین مدل منفرد ندارد، یافته‌ای که با نتایج برخی مطالعات پیشین مبنی بر عدم برتری همیشگی همادی بر مدل برتر منفرد همسو است.

به‌منظور درک دقیق‌تر عملکرد هر یک از مدل‌های موردمطالعه و مقایسه کارایی مدل برتر با مدل همادی در سطح استان هرمزگان، نتایج شاخص آماری کلینگ–گوپتا (KGE) حاصل از مقایسه بارش مقیاس‌کاهی شده با مقادیر دیده‌بانی در قالب نمودار هیت‌مپ (Heatmap) ارائه شده است (شکل ۴). در این نمودار، طیف رنگی قرمز نشان‌دهنده عملکرد ضعیف و طیف سبز بیانگر دقت بالای مدل‌ها در شبیه‌سازی بارش است. مطابق شکل فوق، مدل MPI-ESM1-2-HR با تونالیته شدید رنگ قرمز در تمامی ایستگاه‌ها، ضعیف‌ترین کارایی را نشان می‌دهد، درحالی‌که مدل GFDL-ESM4 با تونالیته متمایل به سبز در شش ایستگاه از هفت ایستگاه، برترین مدل در بازنمایی بارش استان محسوب می‌شود.

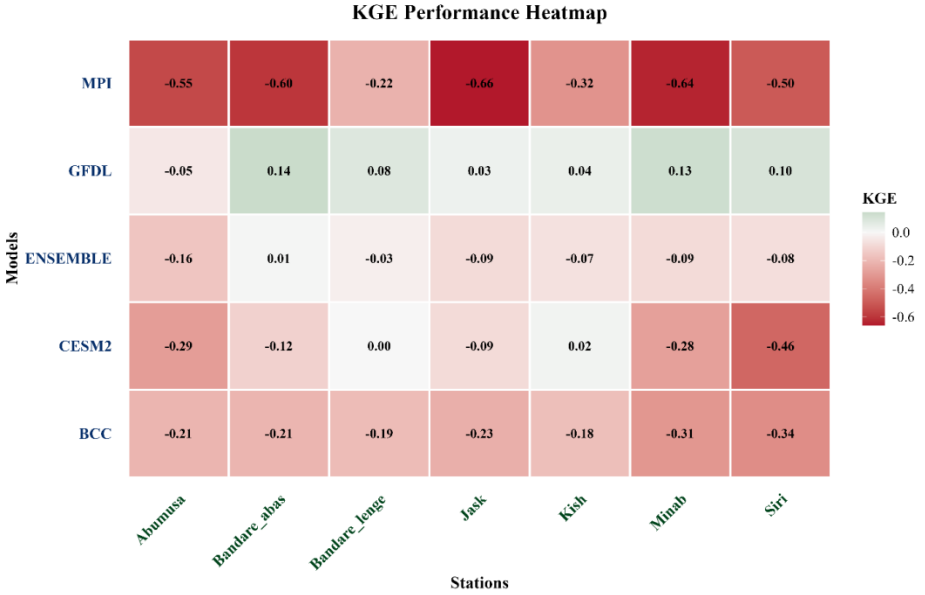


Figure 4. Heat-map diagram for the seven synoptic stations of Hormozgan Province with four climate models based on the KGE index over the 30-year period

یافته‌ها نشان می‌دهد که مدل همادی در رتبه پس از مدل برتر (GFDL-ESM4) قرار گرفته و در این منطقه نتوانسته است به رتبه نخست دست یابد. مدل همادی با وجود تعدیل خطاهای سیستماتیک مدل‌های ضعیف‌تر و ایجاد ثبات در نتایج، تنها در ایستگاه بندرعباس به مقدار مثبت (۰/۰۱) رسیده است. هم‌چنین کم‌ترین میزان انطباق میان داده‌های شبیه‌سازی‌شده و دیده‌بانی در ایستگاه ابوموسی رخ داده است، به‌طوری‌که در این ایستگاه، تمامی مدل‌ها (حتی مدل برتر) دارای مقادیر KGE منفی بوده و نسبت به سایر ایستگاه‌ها از دقت کم‌تری برخوردارند، در مقابل، در ایستگاه‌های کیش و بندرلنگه، کارایی مدل‌ها در مقایسه با ابوموسی در سطح مطلوب‌تری قرار داشت.

بیشینه مقدار شاخص KGE در کل منطقه (۰/۱۴) در ایستگاه بندرعباس توسط مدل GFDL-ESM4 ثبت شده و کم‌ترین مقدار این شاخص (۰/۶۶–) در ایستگاه جاسک توسط مدل MPI-ESM1-2-HR رقم خورده است. هم‌چنین در مقایسه بین‌مدلی، مدل CESM2-WACCM در ایستگاه‌های بندرعباس، بندرلنگه، جاسک و کیش نسبت به مدل BCC-CSM2-MR

کارایی بهتری از خود نشان داده است. در مجموع، هیت‌مپ ترسیم‌شده برتری قاطع مدل GFDL-ESM4 و نقش «تعدیل‌کنندگی» مدل همادی را در برابر مدل‌های دارای خطای بالا (مانند MPI) به‌خوبی به تصویر می‌کشد. مدل همادی با میانگین‌گیری از خروجی مدل‌های منفرد، ضمن کاهش دامنه خطاهای حدّی و افزایش پایداری نتایج، عملکرد مدل‌های ضعیف را تعدیل می‌کند، با این‌حال در این منطقه از نظر مقدار KGE از مدل برتر (GFDL-ESM4) پایین‌تر عمل کرده است.

شکل (۵) نقشه پهنه‌بندی شاخص آماری KGE را برای مدل GFDL-ESM4–که براساس ارزیابی‌های آماری، برترین عملکرد را در شبیه‌سازی بارش استان هرمزگان طی دوره ۳۰ ساله داشته است– نشان می‌دهد. مطابق این نقشه، یک الگوی مشخص مکانی در توزیع دقت مدل مشاهده می‌شود، به‌طوری‌که بیش‌ترین کارایی و انطباق (بازه ۰/۱ تا ۰/۱۴) در نواحی مرکزی و متمایل به شرق استان، به‌ویژه در ایستگاه‌های بندرعباس و میناب، متمرکز شده است. با فاصله‌گرفتن از این کانون مرکزی و حرکت به سمت منتهی‌الیه شرقی (جاسک) و غربی (کیش)، از شدت رنگ سبز کاسته شده که نشان‌دهنده کاهش تدریجی دقت مدل در تخمین بارش این نواحی است.

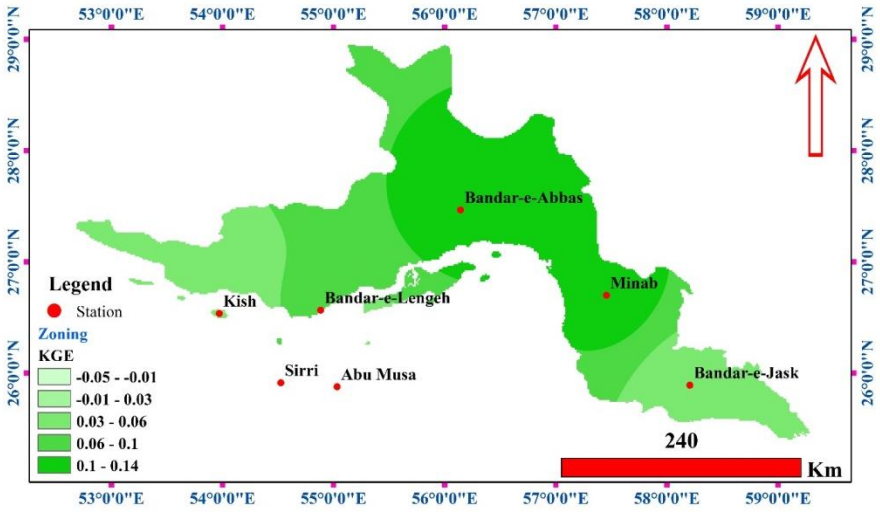


Figure 5. Spatial zoning map of Hormozgan Province based on the KGE of the best-performing model for the period 1985–2014

کم‌ترین میزان کارایی مدل (مقادیر نزدیک به صفر و منفی) در مناطق جنوبی و پهنه‌های جزیره‌ای، به‌ویژه در ایستگاه‌های ابوموسی و سیری، مشهود است. این تباین مکانی نشان می‌دهد که عملکرد مدل‌های CMIP6 در مناطق جزیره‌ای و دور از توده خشکی اصلی، احتمالاً به‌دلیل پیچیدگی‌های فرایندی در تعاملات جو–اقیانوس و عدم قطعیت در بازنمایی رطوبت و سیستم‌های همرفتی خُردمقیاس، با چالش‌های جدی‌تری مواجه است. به‌عبارت دیگر، اگرچه مدل در نواحی ساحلی متصل به خشکی (مانند بندرعباس) عملکردی بهینه داشته، اما در پهنه‌های دریایی و جزیره‌ای، نفوذ رطوبت و ویژگی‌های اقلیم دریایی منجر به تضعیف دقت شبیه‌سازی نسبت به نواحی متصل به توده خشکی اصلی شده است.

آنچه مسلم است تنها ابزار انسان در پژوهش‌های تغییر اقلیم برای بررسی رفتار متغیرهای مهم جوّی نظیر بارش و دما، مدل‌های اقلیمی گردش عمومی هستند و این مدل‌ها نیز دارای کاستی بوده و خود IPCC در ارائه آن‌ها هیچ طبقه‌بندی مبنی بر برتری برخی از مدل‌های سه‌بعدی جوی اقیانوسی بیان نکرده است. در نتیجه برای داشتن نتایج دقیق در مطالعات در این حوزه باید مدل‌ها موردارزیابی قرار گیرند و برترین مدل ملاک پژوهش باشد. از طرفی، طبق این پژوهش و برخی پژوهش‌های دیگر، مدل همادی همیشه نمی‌تواند مدل برتر منطقه موردمطالعه برای شبیه‌سازی و پیش‌نگری بارش باشد.

۴. نتیجه‌گیری

نتایج این مطالعه نشان داد که روش تصحیح اریبی نگاشت چارک تجربی عملکرد مناسبی برای برون‌داد بارشی مدل‌های منطقه موردمطالعه داشته است، از طرفی با توجه به محاسبات استفاده مستقیم داده‌های خام مدل‌ها بدون ریزگردانی با اریبی همراه بوده و انجام مقیاس‌کاهی الزامی است. براساس نتایج پژوهش از چهار مدل منتخب BCC-CSM2-MR، MPI-ESM1-2-HR، CESM2-WACCM و GFDL-ESM4 برای شبیه‌سازی بارش استان هرمزگان در دوره زمانی ۳۰ ساله (۲۰۱۴–۱۹۸۵)، بهترین کارایی را مدلGFDL-ESM4 در همه هفت ایستگاه همدیدی نماینده منطقه موردمطالعه داشت. هم‌چنین نتایج نشان داد که از بین چهار مدل مذکور برای شبیه‌سازی بارش استان هرمزگان، ضعیف‌ترین عملکرد در هر هفت ایستگاه توسط مدل MPI-ESM1-2-HR بوده است. مطابق نتایج حاصل‌شده بهترین دقت مدل برتر (GFDL-ESM4) در منطقه مذکور، در بخش مرکزی و در ایستگاه‌های بندرعباس و میناب رخ داده است. نتایج حاکی از آن است که به‌طورکلی کارکرد چهار مدل اقلیمی موردمطالعه در این پژوهش در دو ایستگاه کیش و بندرلنگه نسبتاً قابل‌قبول و در ایستگاه ابوموسی ضعیف رؤیت شد. نتایج مطالعه گویای آن است که مدل همادی در مقایسه با مدل برتر (GFDL-ESM4) برای شبیه‌سازی بارش استان هرمزگان در سه دهه، مدل بهینه نبوده و مدل برتر دقت بهتری را نشان داده است. نتایج پژوهش حاضر از نظر عملکرد مناسب روش نگاشت چندک تجربی با یافته‌های Azad & Ahmadi (2024) همخوانی دارد. آنان نیز برتری روش نگاشت چندک را نسبت به روش‌های ساده‌تر تصحیح اریبی، ازجمله مقیاس‌گذاری خطی، در شبیه‌سازی بارش ایران گزارش کردند. نتایج این مطالعه با یافته‌های پژوهش Ershadfath *et al.* (2025) از بابت این‌که در سراسر ایران، شبیه‌سازی توزیع مکانی–زمانی بارش طی دوره پایه ۲۰۱۴–۱۹۸۵ مدل MPI را به‌عنوان برترین مدل تعیین کرده همسو نیست. هم‌چنین نتایج این مطالعه، نتایج پژوهش انجام‌شده توسط Odunmorayo *et al.* (2025) در زمینه عملکرد بهتر مدل GFDL-ESM4 در شبیه‌سازی بارش در مطالعه عملکرد ۳۰ مدل CMIP6 و میانگین چندمدلی (GCM_Ensemble) را تأیید می‌کند. نتایج این پژوهش با نتایج مطالعه انجام گرفته توسط Shahi & Salahi ((2025) در زمینه این‌که مدل همادی تشکیل‌شده از چند مدل، همواره نمی‌تواند از مدل برتر منفرد عملکرد بهتر داشته باشد در یک راستاست. نتایج این پژوهش در خصوص عملکرد مدل‌های CMIP6 در استان هرمزگان با یافته‌های Esfandeh *et al.* (2024) همسو است. آن‌ها در مطالعه‌ای بر روی سواحل جنوبی ایران نشان دادند که مدل‌های نسل ششم (CMIP6) با وجود بهبودهای ساختاری، هنوز در بازنمایی دقیق بارش‌های این منطقه با چالش مواجه بوده و در برخی ایستگاه‌ها، عملکردی ضعیف‌تر از نسل پنجم (CMIP5) از خود نشان می‌دهند. این امر مؤید نتایج حاضر مبنی بر مقادیر پایین و گاه منفی شاخص KGE در ایستگاه‌های ساحلی و جزیره‌ای استان هرمزگان است. یافته‌های این پژوهش درباره شناسایی مدل دارای بهترین عملکرد در ایستگاه بندرعباس، از نظر روش‌شناختی با مطالعه Rahnama & Yaghoobzadeh (2025) قابل‌مقایسه است. هر دو پژوهش بر اهمیت اعتبارسنجی دقیق و ارزیابی اختصاصی مدل‌های CMIP6 در مقیاس محلی تأکید دارند، زیرا استفاده از خروجی این مدل‌ها در منطقه بندرعباس باید پس از سنجش عملکرد آن‌ها در برابر داده‌های دیده‌بانی و با درنظرگرفتن ویژگی‌های اقلیمی محلی انجام شود. بر این اساس، ثبت بیشینه مقدار KGE در بندرعباس، اهمیت انتخاب مدل متناسب با شرایط محلی را برای بازنمایی بارش این ناحیه نشان می‌دهد. نتایج این پژوهش با یافته‌هایShahi & Salahi (2025) در حوضه آبریز دریاچه ارومیه از دو جنبه هم‌راستاست. نخست، هر دو مطالعه نشان می‌دهند که برون‌داد خام مدل‌های CMIP6 دارای اریبی قابل‌توجهی است و بدون اعمال مقیاس‌کاهی و تصحیح اریبی، امکان استفاده مستقیم از آن‌ها برای شبیه‌سازی بارش وجود ندارد. دوم، کاربرد سنجه KGE در هر دو پژوهش، امکان مقایسه کمّی عملکرد مدل‌ها را در مقیاس ایستگاهی فراهم کرده است. با این‌حال، تفاوت رتبه‌بندی مدل‌ها در دو مطالعه– از جمله عملکرد متفاوت مدل‌های مشترک– بیانگر آن است که برتری یا ضعف یک مدل، به‌طور ذاتی ثابت نیست و به شرایط اقلیمی

منطقه و ویژگی‌های ایستگاه‌های موردمطالعه وابسته است. این موضوع بر ضرورت اعتبارسنجی اختصاصی مدل‌ها در هر منطقه پیش از کاربرد آن‌ها تأکید می‌کند؛ رویکردی که در پژوهش حاضر نیز با ارزیابی ایستگاه‌محور مدل‌های منتخب در استان هرمزگان دنبال شده است.

۵. پی‌نوشت‌ها

1. Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6)
2. Root Mean Square Error (RMSE)
3. Climate Model data for hydrologic modeling (CMhyd)
4. Atmospheric and Oceanic General Circulation Models (AOGCM)
5. Kling-Gupta Efficiency (KGE)
6. Nash–Sutcliffe efficiency (NSE)
7. Empirical Quantile Mapping (EQM)

۶. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافعی توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷. منابع

Abbaszadeh, M., Bazrafshan, O., Katipoğlu, O. M., Sherif, M., & El-Sawy-Busfiha, A. M. (2025). Harnessing artificial intelligence for streamflow predictions under climate change scenarios in arid region. *Theoretical and Applied Climatology*, 156(1), Article 231. https://doi.org/10.1007/s00704-025-05451-w

Azad, N., & Ahmadi, A. (2024). Assessment of CMIP6 models and multi-model averaging for temperature and precipitation over Iran. *Scientific reports*, *14*(1), 24165. https://doi.org/10.1038/s41598-024-74789-4

Cai, S., Niu, K., Mu, X., Yang, X., & Pirotti, F. (2023). Spatiotemporal Changes in Extreme Precipitation in China's Pearl River Basin during 1951–2015. *Water*, 15(14), 2634. https://doi.org/10.3390/w15142634

Chanie, F. M. (2026). Evaluation of CMIP6 model performance and future climate projections over the Genale Dawa River Basin, Ethiopia. *Scientific Reports*, 16, 361. https://doi.org/10.1038/s41598-025-29498-x

Chen, W., Jiang, Z., & Li, L. (2011). Probabilistic projections of climate change over China under the SRES A1B scenario using 28 AOGCMs. *Journal of Climate*, 24(17), 4741-4756. https://doi.org/10.1175/2011JCLI4102.1

Ershadfath, F., Davarpanah, R., Sa'adi, Z., Piniewski, M., Trolle, D., & Olesen, J. E. (2025). Selecting CMIP6 precipitation models by integrating relative importance metrics, compromise programming index, and Jenks optimized classification. *The Science of the total environment*, 1006, 180935. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.180935

Esfandeh, S., Danehkar, A., Salmanmahiny, A., Alipour, H., Kazemzadeh, M., Marcu, M. V., & Sadeghi, S. M. M. (2024). Climate change projection using statistical downscaling model over southern coastal Iran. *Heliyon*, 10(8). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e29416

Ge, F., Zhu, S., Luo, H., Zhi, X., & Wang, H. (2021). Future changes in precipitation extremes over Southeast Asia: insights from CMIP6 multi-model ensemble. *Environmental Research Letters*, 16(2), 024013. http://dx.doi.org/10.1088/1748-9326/abd7ad

Gudmundsson, L., Bremnes, J.B., Haugen, J.E., & Engen-Skaugen, T. (2012). Technical Note: Downscaling RCM precipitation to the station scale using statistical transformations-a comparison of methods. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16, 3383-3390.

Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modeling. *Journal of Hydrology*, 377, 80–91. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003

Javadi, S., Yousefi, H., Moridi, A., Khajehpour, H., & Fathi, T. (2023). Determination of crisis areas of precipitation in Iran for period of 2021-2040 by climate change. *Water and Irrigation Management*, 13(2), 311-322. doi: 10.22059/jwim.2021.325229.881. (In Persian)

Kazora, J., Zhu, W., Oo, K.T., Akimana, D., Paul, K.J., Ayugi, B.O., & Gahigi, A.. (2025). Evaluation of CMIP6 models for rainfall simulation in Central Eastern Africa using extreme precipitation indices. *Discover Atmosphere, 3*, 40. https://doi.org/10.1007/s44292-025-00066-2

Lafferty, D.C., & Sriver, R.L. (2023). Downscaling and bias-correction contribute considerable uncertainty to local climate projections in CMIP6. *npj Climate and Atmospheric Science*, 6, 158. https://doi.org/10.1038/s41612-023-00486-0

Lehner, F., Nadeem, I., & Formayer, H. (2023). Evaluating skills and issues of quantile-based bias adjustment for climate change scenarios. Advances in Statistical Climatology, *Meteorology and Oceanography*, 9, 29–44. https://doi.org/10.5194/ascmo-9-29-2023

Nemati Shishehgaran, N., Babaeian, F., & Mianabadi, H. (2024). Uncertainty assessment of monthly precipitation using multiple GCMs and quantile mapping bias correction methods. *Water and Irrigation Management*, 14(2), 463-486. doi: 10.22059/jwim.2024.369044.1121. (In Persian)

Odunmorayo, M. T., & Adefisan, E. A. (2025). Evaluating the performance of Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) models in simulating rainfall characteristics over West Africa. *Discover Environment*, 3, 221. https://doi.org/10.1007/s44274-025-00406-4

Rahnama, S., & Yaghoobzadeh, M. (2025). Assessing climate change effects on meteorological drought in the extra-arid climate of Bandar Abbas, Iran, using CMIP6 and a multivariable standard precipitation index (MSPI). *Journal of Water and Climate Change*, 16(12), 3751-3776. https://doi.org/10.2166/wcc.2025.202

Seraj Ebrahimi, R., Zareian, M. J., & Dehban, H. (2024). Evaluation of the Performance of CMIP6 Models in Estimating Temperature and Precipitation in the Sefidrood Basin. *Water and Irrigation Management*, 14(2), 277-289. doi: 10.22059/jwim.2024.374623.1155. (In Persian)

Shahi, A., & Salahi, B. (2025). Evaluation of the accuracy of CMIP6 models based on Taylor diagram for simulating precipitation in the southern part of the Aras River Basin. *Researches in Earth Sciences*. Advance online publication. https://doi.org/10.48308/esrj.2025.239764.1274. (In Persian)

Shahi, A., Salahi, B., & Najafi, M. S. (2025). Projection of Heavy Rainfall in Northwestern Iran using the Statistical Downscaling Scaling of the Output of Selected CMIP6 Models by CMHyd Software. *Journal of the Earth and Space Physics*, 51(2), 453-476. doi: 10.22059/jesphys.2025.394471.1007687. (In Persian)

Shahi, A., & Salahi, B. (2025). Forecasting of Drought in the Southern Part of the Aras River Basin based on the CMIP6 Multi-Model Output. *Nivar*, 49(130-131), 237-254. doi: 10.30467/nivar.2025.521168.1334. (In Persian)

Shahi, A & Salahi, B. (2025). Forecasting Precipitation in the Northern Half of Iran Based on the Output of Selected CMIP6 Models. *Climate Change Research*, 6(23), 77-94. doi: 10.30488/ccr.2025.522854.1284 (in Persian)

Shahi, A & Salahi, B. (2025). Evaluation of the Accuracy of CMIP6 Models based on the KGE Statistical Index for Simulating Precipitation in the Urmia Lake Basin. *Hydrophysics*, 10(2), 1-13. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.24767131.1403.10.2.1.5. (In Persian)

Shoja, F., Hamidianpour, M., & Barahooie, D. (2025). Forecasting climate change effects on drought using the Decadal Climate Prediction Project in arid and semi-arid regions of southeastern Iran. *Natural Hazards*, 121, 15553–15580. https://doi.org/10.1007/s11069-025-07405-x

Suo, X., Jiang, Y., Chen, G., Li, J., Lai, Y., Li, L., Lu, M., Wang, X., Fu, B., & Li, B. (2025). Spatial and temporal patterns of precipitation concentration and their associated risks. *Scientific Reports*, 15, Article 33152. https://doi.org/10.1038/s41598-025-18721-4

Taylor, K. E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. Journal of Geophysical Research: *Atmospheres*, 106(D7), 7183–7192. https://doi.org/10.1029/2000JD900719

Yahyavi Dizaj, A., Akbari Azirani, T., Khaledi, S., & Javan, K. (2023). Seasonal Analysis of Reference Evapotranspiration and Its Sensitivity to Meteorological Elements in IRAN. *Water and Soil*, 37(4), 643-657. doi: 10.22067/jsw.2023.83328.1307 (In Persian)

Zareian, M. (2022). Effects of Climate Change on Temperature and Precipitation in Yazd Province Based on Combined Output of CMIP6 Models. *Jwss*, 26 (2), 91-105. http://dx.doi.org/10.47176/jwss.26.2.31501. (In Persian)

Zareian, M. J., Dehban, H., & Gohari, A. (2023). Evaluation of the Accuracy of CMIP6 Models in Estimating the Temperature and Precipitation of Iran Based on a Network Analysis. *Water and Irrigation Management*, 12(4), 783-797. doi: 10.22059/jwim.2022.345975.1006. (In Persian)