

## Evaluation of the Accuracy of CMIP6 Climate Models in Estimating and Predicting Precipitation at High- Precipitation Stations in Gilan Province

Leila Vosoughi rad<sup>1</sup>, Seyed Hossein Mirmousavi<sup>2\*</sup>, Hossein Asakereh<sup>3</sup>

<sup>1</sup> PhD student of Climatology, University of Zanjan, Zanjan, Iran, Email: [L\\_vosoughirad@znu.ac.ir](mailto:L_vosoughirad@znu.ac.ir)

<sup>2</sup> Associate Professor, Department of Geography, University of Zanjan, Zanjan, Iran, Email: [hossein.mirmousavi@znu.ac.ir](mailto:hossein.mirmousavi@znu.ac.ir)

<sup>3</sup> Professor of Department of Geography, University of Zanjan, Zanjan, Iran, Email: [asakereh@znu.ac.ir](mailto:asakereh@znu.ac.ir)

### Article Info

**Article type:**  
Research Full Paper

**Article history:**  
Received: 2024-11-13  
Accepted: 2025-1-25

**Keywords:**  
Climate Change,  
Precipitation Forecasting,  
Linear Bias Correction,  
CMIP6, SSP Scenarios.

### ABSTRACT

Forecasting precipitation variability in high-rainfall regions of Iran, such as Gilan Province, is crucial for effective water resource management and reducing natural hazards like floods. The primary objective of this study is to assess the performance of seven different CMIP6 models in predicting precipitation changes at three stations Astara, Bandar Anzali, and Rasht during the baseline period (1987–2014) and to project precipitation from 2024 to 2050. In this research, the linear bias correction method was employed to enhance the accuracy of the projections. Three scenarios SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5 were used to simulate climate change impacts. Statistical metrics including RMSE, PBIAS, and  $R^2$  were utilized to evaluate the models' performance. Additionally, model stability was analyzed using the Sobol method, and parameter sensitivity was assessed through the Monte Carlo Sensitivity Index. The results of the linear bias correction indicated that the ACCESS-ESM1-5 model exhibited the best performance across all three stations Astara, Bandar Anzali, and Rasht with a coefficient of determination ( $R^2$ ) exceeding 0.99, a mean absolute error (MAE) below 2 mm, and a PBIAS value close to zero. This model demonstrated a superior capability to simulate monthly and seasonal precipitation variations compared to the other models. Precipitation projections revealed that under the SSP5-8.5 scenario, from 2024 to 2050, precipitation in December and January in Bandar Anzali and Rasht is expected to increase by approximately 22% and 25%, respectively, while precipitation in July and August is projected to decrease by 12% to 20% across all three stations. Overall, the application of the linear bias correction method, coupled with the ACCESS-ESM1-5 model, can significantly enhance the accuracy of climate change projections in the studied high-rainfall stations and similar regions.

**Cite this article:** Vosoughi rad, L., Mirmousavi, S.H., Asakereh, H. (2025). Precipitation variability and Annual Rainfall Prediction for Central and Southeast (SE) Iran using Stochastic Time Series Modeling. *Journal of the Climate Change research*, 6 (22), 1-24.





## ارزیابی دقت مدل‌های شبیه‌ساز اقلیمی CMIP6 در برآورد و پیش‌بینی بارش در ایستگاه‌های پر بارش استان گیلان

لیلا وثوقی‌راد<sup>۱</sup>، سیدحسین میر موسوی<sup>۲\*</sup>، حسین عساکره<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران، رایانامه: [L\\_vosoughirad@znu.ac.ir](mailto:L_vosoughirad@znu.ac.ir)

<sup>۲</sup> دانشیار گروه جغرافیا، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران، رایانامه: [hossein.mirmousavi@znu.ac.ir](mailto:hossein.mirmousavi@znu.ac.ir)

<sup>۳</sup> استاد گروه جغرافیا، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران، رایانامه: [asakereh@znu.ac.ir](mailto:asakereh@znu.ac.ir)

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: مقاله کامل علمی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۸/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۶</p> <p>واژه‌های کلیدی: تغییرات اقلیمی پیش‌بینی بارش اصلاح بایاس خطی CMIP6 سناریوهای SSP</p>	<p>پیش‌بینی تغییرات بارش در مناطق پر بارش ایران، نظیر استان گیلان، برای مدیریت منابع آبی و کاهش مخاطرات طبیعی نظیر سیل بسیار حائز اهمیت است. هدف اصلی این مطالعه، ارزیابی عملکرد هفت مدل مختلف CMIP6 در پیش‌بینی تغییرات بارش در سه ایستگاه آستارا، بندر انزلی و رشت طی دوره زمانی ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۴ (دوره پایه) و پیش‌بینی آن از سال ۲۰۲۴ تا سال ۲۰۵۰ است. در این پژوهش از روش اصلاح بایاس خطی برای بهبود دقت پیش‌بینی‌ها و از سه سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 برای شبیه‌سازی تغییرات اقلیمی استفاده شده است. شاخص‌های آماری نظیر RMSE، PBIAS و R<sup>2</sup> برای ارزیابی دقت مدل‌ها به کار گرفته شده‌اند. علاوه بر این، تحلیل پایداری مدل به روش Sobol و شاخص حساسیت Monte Carlo برای بررسی پایداری و حساسیت مدل‌ها به تغییرات پارامتریک مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج حاصل از اصلاح بایاس خطی نشان داد که مدل ACCESS-ESM1-5 با ضریب تعیین (R<sup>2</sup>) بالای ۰/۹۹، میانگین خطای مطلق (MAE) کمتر از ۲ میلی‌متر و درصد اریبی (PBIAS) نزدیک به صفر، بهترین عملکرد را در هر سه ایستگاه آستارا، بندر انزلی و رشت دارد. این مدل توانست تغییرات ماهانه و فصلی بارش را با دقت بالاتری نسبت به سایر مدل‌ها شبیه‌سازی کند. پیش‌بینی بارش نشان داد که بر اساس سناریوی SSP5-8.5، از سال ۲۰۲۴ تا سال ۲۰۵۰، بارش در ماه‌های دسامبر و ژانویه در بندر انزلی و رشت به ترتیب به میزان ۲۲٪ و ۲۵٪ افزایش و در ماه‌های ژوئیه و اوت در هر سه ایستگاه مورد مطالعه بین ۱۲٪ تا ۲۰٪ کاهش خواهد یافت. در مجموع، استفاده از روش اصلاح بایاس خطی همراه با مدل ACCESS-ESM1-5 می‌تواند دقت پیش‌بینی تغییرات اقلیمی را در ایستگاه‌های پر بارش مورد مطالعه و ایستگاه‌های مشابه آنها بهبود بخشد.</p>

**استناد:** وثوقی‌راد، لیلا؛ میر موسوی، سیدحسین؛ عساکره، حسین. (۱۴۰۴). ارزیابی دقت مدل‌های شبیه‌ساز اقلیمی CMIP6 در برآورد و پیش‌بینی بارش در ایستگاه‌های پر بارش استان گیلان. نشریه پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، ۶ (۲۲)، ۱-۲۴.



## مقدمه

تغییرات اقلیمی به عنوان یکی از چالش‌های حیاتی قرن حاضر، تأثیرات گسترده‌ای بر سامانه‌های اقلیمی و آب‌شناختی جهان داشته است (Nica et al., 2019). این تغییرات عمدتاً ناشی از افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای است که به واسطه فعالیت‌های انسانی مانند صنعتی‌سازی، جنگل‌زدایی و مصرف سوخت‌های فسیلی رخ می‌دهد. پیامد این عوامل، افزایش چشم‌گیر میانگین دمای جهانی و تغییرات اساسی در الگوهای بارش در مناطق مختلف است (Filonchyk et al., 2024).

این دگرگونی‌ها نه تنها اکوسیستم‌ها و تنوع زیستی را تحت تأثیر قرار می‌دهند، بلکه مخاطرات جدی برای کشاورزی، منابع آب و بهداشت عمومی به همراه دارند. برای فهم بهتر این تغییرات پیچیده و پیش‌بینی دقیق سناریوهای اقلیمی آینده، محققان به طور گسترده از مدل‌های گردش عمومی جوی-اقیانوسی بهره می‌برند. این مدل‌ها، با شبیه‌سازی تعاملات بین اتمسفر و اقیانوس، دیدگاه‌های ارزشمندی درباره فرآیندها و روندهای اقلیمی ارائه می‌دهند (Ideki, 2024). پروژه مقایسه مدل‌های زوجی (CMIP) که در سال ۱۹۹۵ توسط برنامه جهانی پژوهش اقلیم آغاز شد، به عنوان یکی از کلیدی‌ترین ابتکارات در حوزه تحقیقات اقلیمی شناخته می‌شود. این پروژه با تولید و تحلیل خروجی‌های مختلف مدل‌های اقلیمی جهانی (GCMs)، زمینه را برای درک بهتر سیستم‌های اقلیمی فراهم کرده است می‌کند (Petrova, 2024). تسهیل مقایسه و ارزیابی مدل‌های گوناگون برای دستیابی به درکی جامع‌تر از شرایط گذشته و پیش‌بینی سناریوهای آینده است. تکامل این پروژه در هر مرحله، منجر به افزایش دقت مدل‌سازی دینامیک‌های اقلیمی و ارزیابی تأثیرات فعالیت‌های انسانی شده است. همکاری بین مؤسسات تحقیقاتی مختلف در این پروژه، ارزیابی جامع مدل‌های اقلیمی را امکان‌پذیر ساخته و بر اعتبار علمی این پیش‌بینی‌ها افزوده است (Sellar et al., 2024). جدیدترین فاز این پروژه، یعنی CMIP6، پیش‌بینی‌های اقلیمی را بر

مبنای مسیرهای اجتماعی-اقتصادی مشترک (SSP) ارائه می‌دهد. این مسیرها شامل سناریوهای گوناگونی از توسعه اجتماعی و اقتصادی آینده هستند که شامل SSP1 پایداری، SSP2 مسیر میانه، SSP3 رقابت منطقه‌ای، SSP4 نابرابری و SSP5 توسعه بر اساس سوخت‌های فسیلی می‌باشد (Oyelakin, 2024). هر کدام از این مسیرها فرضیات متفاوتی درباره رشد اقتصادی، پیشرفت‌های تکنولوژیکی و تغییرات جمعیتی ارائه می‌دهند که برای درک نتایج احتمالی تغییرات اقلیمی ضروری هستند. پیش‌بینی‌های CMIP6، که با در نظر گرفتن واداشت تابشی سطوح مختلف و تأثیرات آنها بر دما و بارش ارائه می‌شود، ابزارهای ارزشمندی برای سیاست‌گذاری اقلیمی و مدیریت پایدار منابع طبیعی فراهم می‌کند (Qi, 2024). با وجود پیشرفت‌های قابل توجهی که مدل‌های CMIP6 ارائه داده‌اند، این مدل‌ها بدون چالش نیستند. یکی از چالش‌های مهم، تفکیک مکانی پایین این مدل‌ها است که معمولاً بیشتر از ۱۰۰ کیلومتر است. این تفکیک مکانی محدود، توانایی مدل‌ها را در ارائه پیش‌بینی‌های دقیق در مقیاس‌های منطقه‌ای و محلی که تأثیرات اقلیمی اغلب بیشتر احساس می‌شود، محدود می‌کند (Wu, 2024). برای نمونه، الگوهای محلی جوی، ویژگی‌های جغرافیایی و اقلیم‌های محلی می‌توانند به شدت تأثیرات اقلیمی را تغییر دهند، اما ممکن است در خروجی‌های مدل‌های بزرگتر نادیده گرفته شوند. علاوه بر این، مدل‌های گردش عمومی جو اغلب از نظر ویژگی‌های جغرافیایی محلی مانند رشته‌کوه‌ها، دره‌ها و مناطق شهری که می‌توانند به طور قابل توجهی شرایط اقلیمی را تغییر دهند، نادیده گرفته می‌شوند (Pepin, 2022). برای رفع این محدودیت‌ها، نیاز به ریزمقیاس‌سازی خروجی‌های این مدل‌ها وجود دارد که دقت پیش‌بینی‌ها را در مقیاس‌های کوچکتر افزایش می‌دهد (Shukla & Attada, 2023). فرآیند ریزمقیاس‌سازی به دو صورت دینامیکی و آماری انجام می‌شود. ریزمقیاس‌سازی آماری از روابط آماری بین داده‌های اقلیمی مشاهده شده و خروجی‌های GCM استفاده

می‌کند تا پیش‌بینی‌ها را بهبود بخشد. این روش معمولاً منابع کمتری نسبت به ریز مقاس نمایی دینامیکی نیاز دارد و با استفاده از داده‌های مشاهده‌ای موجود به تصحیح خطاهای مدل‌ها می‌پردازد (Rozoff & Alessandrini, 2022). به دلیل توانایی ارائه پیش‌بینی‌های اقلیم محلی دقیق، روش‌های ریزمقیاس‌سازی آماری به طور گسترده‌ای در مطالعاتی که بر ارزیابی خطرات اقلیمی، مدیریت منابع و برنامه‌ریزی محیطی در سطوح محلی و منطقه‌ای تمرکز دارند، مورد پذیرش قرار گرفته‌اند. فاز ۶ پروژه مقایسه‌ای مدل‌های زوجی (CMIP6) به طور گسترده توسط محققان برای ارزیابی پیش‌بینی‌های اقلیمی تحت سناریوهای مختلف مسیر اجتماعی و اقتصادی مشترک (SSP) مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این زمینه می‌توان به مطالعات المازویی و همکاران<sup>۱</sup> (2020) اشاره نمود که در مطالعه‌ای با استفاده از ۲۷ مدل CMIP6، تغییرات دما و بارش را تحت سناریوهای مختلف SSP مورد بررسی قرار دادند. نتایج مطالعات آنها در مناطق مختلف آب و هوایی نشان دهنده تغییرات قابل توجه در الگوهای دما و بارش تحت سناریوهای مختلف بود. سانگ و همکاران<sup>۲</sup> (2021) نیز در کره جنوبی عملکرد و کارایی مدل‌های CMIP6 را در مقایسه با مدل‌های قبلی در پیش‌بینی بارش و دما ارزیابی نمودند و به این نتیجه رسیدند که بکارگیری صحیح این مدل‌ها از طریق ارزیابی مدل بهینه می‌تواند به بهبود دقت پیش‌بینی‌های اقلیمی و کاهش عدم قطعیت‌ها منجر شود. همچنین لو و همکاران<sup>۳</sup> (2022) در پژوهشی نسبت به ارزیابی و پیش‌بینی روند تغییرات بارش در دهه‌های آتی مناطق مختلف آسیا اقدام نمودند و برای این منظور از ۲۰ مدل CMIP6 استفاده نمودند. نتایج مطالعات آنها نشان داد مدل‌ها نتایج متفاوتی را در مناطق جغرافیایی مختلف از خود نشان می‌دهند و انتخاب مدل مناسب می‌تواند به دقت پیش‌بینی بیافزاید.

پنگ و همکاران<sup>۴</sup> (2022) نیز در مطالعات خود در هوکایدو ژاپن از مدل‌های CMIP6 استفاده نمودند و در بررسی روند تغییرات دما و تاثیر آن بر بارش به این نتیجه رسیدند که متناسب با افزایش میانگین دما، الگوهای بارشی نیز در این منطقه تغییر پیدا کرده است و احتمال بروز خشکسالی‌های شدید در دهه‌های آتی در این مناطق بسیار زیاد است. علاوه بر این در پژوهشی که اخیراً وانگ<sup>۵</sup> (2024) انجام داده است از مدل‌های CMIP6 در شبیه‌سازی الگوهای بارش در فلوریدای آمریکا استفاده نموده است و با بررسی عملکرد و دقت این مدل‌ها را در ارزیابی بارش فصلی و نوسانات بین فصلی به این نتیجه رسیده است که دقت این مدل‌ها در مقایسه با مدل‌های قبلی در پیش‌بینی روند تغییرات اقلیمی بسیار بهبود پیدا کرده است. از این قبیل مطالعات می‌توان پنگ و همکاران<sup>۶</sup> (2023)، کائو و همکاران<sup>۷</sup> (2023)، اوح<sup>۸</sup> (2024) می‌توان اشاره نمود. همگام با پژوهش‌هایی که در سطح جهان انجام شده با توجه به اهمیت مدل‌های تغییر اقلیم در برآورد متغیرهای مهم نظیر دما و بارش در ایران نیز مطالعات متعددی در این رابطه انجام شده است. با توجه به جدید بودن مدل‌های CMIP6 اکثر این مطالعات در سال‌های اخیر انجام شده است که از آن جمله می‌توان به مطالعات عبدالعلی زاده و همکاران (۱۴۰۱) اشاره نمود که در پژوهشی به ارزیابی دقت مدل‌های CMIP6 در شبیه‌سازی دما و بارش حوضه آبریز دریاچه ارومیه پرداختند. نتایج مطالعات آنها نشان داد که دقت شبیه‌سازی دما در همه مدل‌ها بالاست، اما شبیه‌سازی بارش به ویژه در مدل CMCC دقت پایینی دارد. همچنین افشاری نیا و همکاران (۱۴۰۲) نیز با استفاده از مدل‌های CMIP6 نسبت به ارزیابی تغییرات میانگین دما و بارش در دشت کاشان اقدام نمودند و به این نتیجه رسیدند که این مدل‌ها از دقت خوبی در پیش‌بینی این متغیرها برخوردار هستند و بر اساس خروجی مدل‌ها کاهش بارش و افزایش دما

<sup>4</sup> Peng et al

<sup>5</sup> Wang

<sup>6</sup> Peng et al

<sup>7</sup> Cao et al

<sup>8</sup> Oh

<sup>1</sup> Almazroui et al

<sup>2</sup> Song et al

<sup>3</sup> Lu et al

در آینده، به ویژه در ایستگاه‌های حسین‌آباد کویر و اردستان، بیشتر خواهد بود. از پژوهش‌های دیگر در این زمینه می‌توان به حافظی مقدس و همکاران (۱۴۰۲) اشاره نمود که در مطالعه‌ای نشان دادند از میان مدل‌های مورد بررسی، مدل CSM2-MR-BCC بهترین و مدل FGOALS-g3 ضعیف‌ترین عملکرد را در شبیه‌سازی بارش داشته‌اند. آزاد و احمدی (۱۴۰۲) نیز تغییرات بارش در حوضه خزر را تحت سناریوهای SSP245 و SSP585 مورد بررسی قرار داده و به این نتیجه رسیدند که تغییرات بارش برای آینده نزدیک (۲۰۵۰-۲۰۲۱) و آینده دور (۲۰۸۰-۲۰۵۱) نسبت به دوره مشاهداتی، بین صفر تا ۶ درصد متغیر خواهد بود. رضایی و همکاران (۱۴۰۳) در مطالعه‌ای به پیش‌بینی تغییرات دما و بارش در ایران با استفاده از داده‌های ۶۰ ایستگاه همدیدی و هشت مدل CMIP6 اقدام نمودند و برای اصلاح آریبی مدل‌ها از روش مقیاس‌بندی خطی استفاده نمودند. نتایج مطالعات آنها نشان داد در مناطق شرقی و مرکزی ایران تا سال ۲۰۵۰ دما به طور متوسط ۴/۱ درجه سلسیوس افزایش و بارش به میزان ۵/۱۸ درصد کاهش خواهد یافت. صراف و همکاران (۱۴۰۳) نیز دریافتند که بارش در شمال غرب کشور تحت سناریوی SSP1-2.6 افزایش می‌یابد، اما در سناریوهای SSP3-7.0 و SSP5-8.5 کاهش خواهد داشت. همچنین، آنها مدل MPI-ESM1-2-LR را به‌عنوان بهترین مدل برای برآورد بارش شناسایی کردند. به علاوه، سراج ابراهیمی و همکاران (۱۴۰۳) در مطالعه‌ای جامع، دقت ۱۰ مدل AOGCM از CMIP6 را برای شبیه‌سازی دما و بارش در حوضه آبریز سفیدرود ارزیابی کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که مدل‌های MRI-EMS2-0 و MIROC6 در شبیه‌سازی دما و مدل HadGEM3-GC31-LL در شبیه‌سازی بارش عملکرد بهتری داشته‌اند. یزدان دوست و همکاران (۲۰۲۱) با بررسی ۱۲ مدل CMIP6 در برآورد بارش دریافتند که این مدل‌ها در مناطق خشک ایران عملکرد بهتری دارند، اما در مناطق مرطوب

بویژه در فصل تابستان بارش را کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌کنند. افسری و همکاران (۲۰۲۴) به بررسی خشکسالی در کلان‌شهرهای ایران با استفاده از مدل‌های CMIP6 و سناریوهای SSP پرداختند نتایج نشان داد که برخی از کلان‌شهرهای ایران، مانند تهران و تبریز، حتی در سناریوهای کم انتشار در معرض خشکسالی خواهند بود. سناریوهای با انتشار بیشتر شرایط بحرانی‌تری برای شهرهایی مانند شیراز و مشهد ایجاد می‌کنند. شاهی و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از مدل‌های HadGEM3 و CanESM5، تغییرات دما و بارش در حوضه سد شهید شاهچراغی دامغان برای دوره ۲۰۲۰-۲۰۴۰ پیش‌بینی کردند. نتایج این مطالعه، عملکرد بهتر مدل HadGEM3 را نشان داد. ذبیحی و احمدی (۲۰۲۴) به مطالعه عملکرد مدل‌های اقلیمی CMIP6 در شبیه‌سازی بارش و دما در ایران پرداختند. نتایج نشان داد که مدل‌های ACCESS-CM2، BCC-CSM2-MR و ACCESS-ESM1-5 عملکرد بهتری در مقایسه با داده‌های مشاهداتی دارند. همچنین، مدل‌هایی که در ارزیابی زمانی عملکرد بهتری داشتند، در ارزیابی فضایی نیز نتایج بهتری نشان دادند. بخش‌هایی از استان گیلان، به ویژه ایستگاه‌های پر بارش رشت، بندر انزلی و آستارا به دلیل میانگین بارندگی بالای سالانه و تأثیرات نوسانات بارش بر محیط پیرامون خود، از اهمیت بالایی برای مدیریت منابع آب و کشاورزی برخوردار هستند. تغییرات در الگوهای بارش در این مناطق می‌تواند پیامدهای عمده‌ای بر منابع آبی، تنوع زیستی، و وضعیت اقتصادی استان داشته باشد. از این‌رو، پیش‌بینی دقیق بارش در دهه‌های آتی در این ایستگاه‌ها برای برنامه‌ریزی بهینه و پایدار منابع ضروری است. هدف این پژوهش، ارزیابی دقت و کارایی مدل‌های CMIP6 در پیش‌بینی بارش در ایستگاه‌های پر بارش استان گیلان و شناسایی مدل بهینه‌ای است که بتواند در این مناطق نتایج قابل اعتماد و دقیقی ارائه دهد. انتخاب مدل مناسب برای پیش‌بینی تغییرات اقلیمی، به ویژه

<sup>2</sup> Afsari et al

<sup>3</sup> Shahi et al

<sup>4</sup> Zabihi & Ahmadi

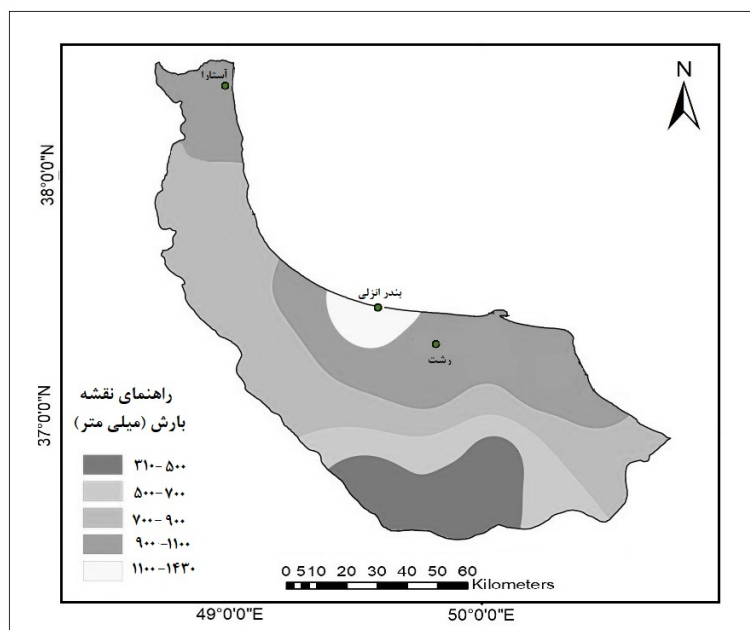
<sup>1</sup> Yazdandoost et al

دارای آب و هوای مرطوب و بارش فراوان به ویژه در فصول پاییز و زمستان است. بندر انزلی، در حاشیه دریای خزر و کمی غربی‌تر از رشت واقع شده است. به دلیل نزدیکی به دریا، یکی از مرطوب‌ترین مناطق ایران بوده و میانگین بارش سالانه بالایی دارد. الگوهای جوی ناشی از نفوذ جریان‌های مرطوب خزری و برخورد آنها با کوه‌های البرز، بارندگی‌های شدیدی در این منطقه به وجود می‌آورند. آستارا، که در بخش غربی استان گیلان است، تحت تأثیر جریان‌های مرطوب خزری و رشته‌کوه‌های تالش قرار دارد (شکل ۱). این ویژگی‌های جغرافیایی و اقلیمی، شرایطی برای بارش‌های فراوان و آب و هوای معتدل و مرطوب ایجاد می‌کند که منجر به اهمیت بالای این مناطق در مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی اقلیمی می‌شود (علیجانی، ۱۳۷۴).

تغییرات الگوهای بارش، در مناطقی مانند رشت، بندر انزلی و آستارا که از پر بارش‌ترین مناطق کشور هستند، اهمیت ویژه‌ای دارد. این مناطق نه تنها به دلیل مقدار بارش بالا بلکه به خاطر حساسیت بالای اکوسیستم‌های طبیعی و تأثیر مستقیم بارش بر منابع آبی و کشاورزی، نیازمند پیش‌بینی‌های دقیق و قابل اعتماد هستند.

### مواد و روش‌ها

**منطقه مورد مطالعه:** رشت، بندر انزلی و آستارا به دلیل موقعیت جغرافیایی و اقلیمی خاص خود از جمله ایستگاه‌های پربارش در استان گیلان هستند (شکل ۱). رشت، به عنوان مرکز استان گیلان، در دشت‌های شمالی ایران و در نزدیکی دریای خزر قرار دارد. این منطقه به دلیل مجاورت با دریا و رشته‌کوه‌های البرز،



شکل ۱: نقشه همبارش استان گیلان در طی دوره آماری ۱۹۸۷-۲۰۲۳

داده‌های هواشناسی ایستگاهها، اطلاعات دقیقی درباره وضعیت اقلیمی در یک منطقه خاص ارائه می‌دهند و به عنوان مرجع برای ارزیابی داده‌های مدل‌های جهانی به کار می‌روند. در این پژوهش از داده‌های بارش مربوط به هفت مدل اقلیمی CMIP6 تحت سه سناریو مختلف SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 برای

**داده‌ها:** در این پژوهش از دو گروه داده شامل داده‌های مدل‌های اقلیمی CMIP6 و داده‌های هواشناسی ایستگاههای مورد مطالعه استفاده شده است. داده‌های مدل‌های جهانی، معمولاً به منظور شبیه‌سازی و پیش‌بینی تغییرات اقلیمی در مقیاس‌های وسیع استفاده می‌شوند. از طرف دیگر،

ایستگاه‌های هواشناسی رشت و بندر انزلی و آستارا برای دوره ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۴ می باشد که به عنوان دوره پایه برای اعتبارسنجی داده‌های CMIP6 در دوره تاریخی مشابه مورد استفاده قرار گرفتند.

آینده (۲۰۲۴-۲۰۵۰) استفاده شده است. داده‌های این مدل‌ها در پایگاه داده WCRP (World Climate Research Programme) در دسترس می‌باشد (جدول ۱). داده‌های مشاهداتی شامل اطلاعات بارش روزانه از

جدول ۱: مشخصات مدل‌های اقلیمی مورد مطالعه

نام مدل	موسسه سازنده	کشور سازنده	قدرت تفکیک
BCC-CSM2-MR	مرکز اقلیم شناسی پکن	چین	100 km
CanESM5	مرکز کانادایی مدل سازی و تحلیل اقلیمی	کانادا	500 km
ACCESS-ESM1.5	سازمان پژوهش‌های علمی و صنعتی مشترک (CSIRO) و اداره هواشناسی استرالیا	استرالیا	250 km
INM-CM5-0	موسسه ریاضیات عددی، آکادمی علوم روسیه	روسیه	100 km
IPSL-CM6A-LR	انستیتو پی-یر-سیمون لاپلاس	فرانسه	250 km
MIROC6	انستیتو ملی مطالعات محیطی و دانشگاه توکیو	ژاپن	250 km
MRI-ESM2-0	موسسه تحقیقات هواشناسی ژاپن	ژاپن	100 km

توجه به تفاوت‌های پراکندگی (انحراف معیار) بین داده‌های مدل و داده‌های مشاهده‌ای اصلاح می‌شود، سپس اختلاف میانگین داده‌های مشاهده‌ای و داده‌های مدل محاسبه می‌شود و به داده‌های مدل اضافه می‌شود به طوری که با داده‌های واقعی هم‌خوانی بیشتری داشته باشد. این روش بر اساس رابطه زیر انجام می‌شود:

رابطه (۱)

$$X_{corrected} = X_{raw} \times \frac{\sigma_{obs}}{\sigma_{model}} + (\mu_{obs} - \mu_{model})$$

در رابطه (۱)،  $X_{corrected}$  داده‌های تصحیح شده مدل،  $X_{raw}$  داده‌های خام مدل،  $\sigma_{obs}$  انحراف معیار داده‌های مشاهده‌ای،  $\sigma_{model}$  انحراف معیار داده‌های مدل،  $\mu_{obs}$  میانگین داده‌های مشاهده‌ای و  $\mu_{model}$  میانگین داده‌های مدل می‌باشد.

ارزیابی دقت و عملکرد مدل‌های اقلیمی برای اطمینان از کیفیت پیش‌بینی‌ها ضروری است. ارزیابی مدل‌ها معمولاً با استفاده از شاخص‌های آماری انجام می‌شود که توانایی مدل را در پیش‌بینی تغییرات اقلیمی نشان می‌دهد. این شاخص‌ها می‌توانند به پژوهشگران کمک کنند تا مدل‌های پیش‌بینی را از نظر دقت و کارایی مقایسه کنند و بهترین مدل را برای مطالعات محلی انتخاب نمایند. در این پژوهش، از

در این پژوهش، نزدیکی یا تطابق ایستگاه‌ها با نقاط شبکه‌ای مدل‌ها از طریق روش‌های آماری نظیر میانگین مربعات خطا (RMSE)، درصد اریبی (PBIAS) مورد ارزیابی قرار گرفت. ابتدا مختصات جغرافیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه با داده‌های شبکه‌ای مدل‌ها مقایسه شد تا نزدیک‌ترین نقاط شبکه‌ای به هر ایستگاه شناسایی شوند. سپس، داده‌های بارش این نقاط شبکه‌ای با داده‌های مشاهداتی ایستگاه‌ها تطبیق داده شد تا میزان هم‌خوانی و دقت مدل‌ها ارزیابی شود.

### روش پژوهش

مدل‌های پیش‌بینی اکثراً به دلیل تفکیک مکانی پایین، کاربرد محدودی برای مطالعات در نواحی جغرافیایی کوچک دارند. برای رفع این محدودیت، تکنیک‌های ریز مقیاس نمایی، برای اصلاح داده‌ها به تفکیک بالاتر به کار می‌روند (Londhe et al., 2023). برای این منظور در این پژوهش، از روش اصلاح بایاس خطی استفاده شده است. این روش، با ایجاد روابط خطی بین داده‌های مدل و داده‌های مشاهداتی، به کاهش انحرافات کمک می‌کند و به دلیل سادگی و سرعت، کاربرد زیادی دارد (Samantaray et al., 2023). در این روش ابتدا داده‌های خام مدل اقلیمی با

نظیر Moriasi و همکاران (2007) و Willmott و Matsuura (2007) تعیین شده‌اند (جدول ۲). هر یک از این معیارها بینش‌های ارزشمندی را در مورد دقت و قابلیت اطمینان مدل‌های پیش‌بینی ارائه می‌دهد. روابط مربوط به هر یک از این پارامترها در زیر آورده شده است.

چندین شاخص‌های آماری شامل ضریب تعیین ( $R^2$ )، میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE) و درصد اریبی (PBIAS) برای ارزیابی دقت داده‌های مدل‌های قبل و بعد از تصحیح بایاس CMIP6 استفاده شده است. حدود ارزیابی دقت مدل‌ها بر اساس معیارهای ذکر شده در مطالعات معتبر

جدول ۲: حدود تشخیص ضرایب ارزیابی مقایسه داده‌های شبیه‌سازی با داده‌های مشاهداتی میانگین بارش ایران

حدود ارزیابی	میانگین خطای مطلق	درصد اریبی	ضریب تبیین	میانگین مربعات خطا
خیلی خوب	$MAE \leq 1$	$PBIAS \leq \pm 10$	$0.866 \leq R^2 < 1$	$RMSE \leq 2$
خوب	$1 < MAE \leq 2$	$\pm 10 \leq PBIAS \leq \pm 15$	$0.733 \leq R^2 < 0.866$	$2 < RMSE \leq 4$
قابل قبول	$2 < MAE \leq 3$	$\pm 15 \leq PBIAS \leq \pm 25$	$0.6 \leq R^2 < 0.733$	$4 < RMSE \leq 6$
غیر قابل قبول	$MAE > 3$	$PBIAS \geq \pm 25$	$R^2 < 0.6$	$RMSE > 6$

واریانس داده‌ها را توضیح می‌دهد،  $R^2=0$  یعنی مدل هیچ توضیحی برای واریانس داده‌ها ندارد، مقادیر منفی نیز به این معنی هستند که مدل عملکردی بدتر از میانگین داده‌ها دارد.

از میانگین داده‌ها دارد.  $R^2 = \frac{1 - \sum(y - \hat{y})^2}{\sum(y - \bar{y})^2}$  (۴)  
Mean Absolute Error (MAE) میانگین خطاهای مطلق را نشان می‌دهد، هرچه مقدار آن کمتر باشد، مدل دقیق‌تر است. این معیار نسبت به RMSE کمتر تحت تأثیر خطاهای بزرگ قرار می‌گیرد (Hodson, 2022).

$MAE = \frac{\sum|y - \hat{y}|}{n}$  (۵)  
در رابطه (۵)،  $y$  مقادیر مشاهداتی و  $\hat{y}$  مقدار پیش‌بینی شده یا شبیه‌سازی شده توسط مدل اقلیمی،  $n$  تعداد کل داده‌های مورد بررسی (تعداد مشاهدات) می‌باشد. برای ارزیابی دقت پیش‌بینی مدل‌ها، معیارهای متعددی وجود دارد که هر کدام ویژگی‌ها و کاربردهای خاص خود را دارند. از بین این معیارها، ضریب کاپا به دلیل توانایی بالای آن در اندازه‌گیری توافق بین مقادیر مشاهده شده و پیش‌بینی شده، حتی در شرایطی که توزیع داده‌ها نامتقارن یا نامتعادل است، اغلب مورد استفاده قرار می‌گیرد. این ویژگی ضریب کاپا را به ابزاری مناسب برای ارزیابی دقت پیش‌بینی مدل‌ها و انتخاب مدل بهینه تبدیل می‌کند. به همین دلیل، در این مطالعه نیز از ضریب مذکور جهت ارزیابی دقت

معیار Root Mean Squared Error (RMSE) میزان انحراف پیش‌بینی‌های مدل از داده‌های مشاهداتی را اندازه‌گیری می‌کند. هر چه عدد RMSE بزرگ‌تر باشد، یعنی مدل خطاهای بیشتری دارد مقدار ایده‌آل صفر است. این معیار به خطاهای بزرگ حساس‌تر است، چون خطاها را به توان ۲ می‌رساند (Zhu et al., 2023).

$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(y - \hat{y})^2}{n}}$  (۲)  
Percentage Bias (PBIAS) نشان می‌دهد که مدل به طور متوسط پیش‌بینی‌هایش در مقایسه با داده‌های واقعی بیشتر یا کمتر است. این معیار به ویژه در مدل‌سازی هیدرولوژیکی و مطالعات آب و هوایی مفید است، جایی که درک جهت سوگیری برای کالیبراسیون و اعتبارسنجی مدل بسیار مهم است (Hlaing et al., 2024). وقتی  $PBIAS=0$  یعنی مدل هیچ بایاسی ندارد.  $PBIAS > 0$ ، مدل به طور متوسط بیش‌برآورد کرده است.  $PBIAS < 0$ ، مدل به طور متوسط کم برآورد کرده است.

$PBIAS = \frac{\sum(y - \hat{y})}{\sum y} * 100$  (۳)  
معیار Coefficient of Determination ( $R^2$ ) نشان می‌دهد که مدل چقدر از تغییرات (واریانس) داده‌های واقعی را می‌تواند توضیح دهد (Oad et al., 2023).  $R^2=1$  به این معنی است که مدل به طور کامل

نیز مفید و کارآمد است (Rubinstein & Kroese, 2016). در این پژوهش برای این منظور از شاخص حساسیت مونت کارلو مرتبه اول بر اساس رابطه زیر استفاده شده است (Sobol, 1993):

$$S_i = \frac{\text{VarXi}(E[Y|X_i])}{\text{Var}(Y)} \quad (9)$$

در رابطه ۹:  $\text{VarXi}(E[Y|X_i])$  بیانگر واریانس خروجی  $Y$  در اثر تغییرات پارامتر  $i$  است که اثر مستقیم این پارامتر بر خروجی را نشان می‌دهد. تحلیل پایداری به منظور ارزیابی اعتماد پذیری مدل‌ها در برابر تغییرات ورودی‌ها انجام می‌شود و به بهبود دقت پیش‌بینی‌ها کمک می‌کند. این تحلیل، پارامترهای بحرانی مدل را که بیشترین تأثیر را بر خروجی دارند، شناسایی می‌کند و با کاهش حساسیت مدل نسبت به این پارامترها، ریسک تصمیم‌گیری‌های مبتنی بر مدل را پایین می‌آورد (Helton et al., 2006). همچنین، تحلیل پایداری نشان می‌دهد که آیا مدل در شرایط ناگهانی و شدید نیز عملکرد پایدار دارد یا خیر، که این موضوع برای مدل‌های اقلیمی بسیار اهمیت دارد (Sobol, 1993). علاوه بر این، با بررسی اثرات عدم قطعیت ورودی‌ها، می‌توان از تفسیر نادرست نتایج جلوگیری کرد و آمادگی بهتری برای شرایط نامطلوب داشت (Saltelli et al., 2010). در این پژوهش از شاخص تحلیل پایداری Sobol که یک روش رایج برای ارزیابی پایداری مدل‌ها در برابر تغییرات ورودی‌ها است استفاده شده است. این روش از طریق تولید تعداد زیادی نمونه تصادفی از ورودی‌ها و محاسبه خروجی مدل برای هر نمونه، به بررسی این موضوع می‌پردازد که آیا خروجی مدل نسبت به تغییرات ورودی‌ها ثابت و پایدار باقی می‌ماند یا خیر. شاخص پایداری Sobol بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\gamma\sigma = \sqrt{2(\gamma Y_j - \mu) \sum_{j=1}^N \frac{1}{N-1}} \quad (10)$$

در رابطه (۱۰)،  $N$  تعداد نمونه‌های شبیه‌سازی شده است.  $Y_j$  خروجی مدل برای نمونه تصادفی  $j$  است. میانگین خروجی‌های مدل است. بر اساس خروجی حاصل از این مدل اگر  $Y\sigma$  در مقایسه با میانگین  $\gamma Y$

پیش‌بینی مدل‌ها استفاده شده است. ضریب کاپا بر اساس روابط زیر محاسبه شده است (Congalton et al., 2019):

$$g \text{ kappa coefficient} = \frac{Po - Pc}{1 - Pc} \quad (6)$$

در رابطه ۶،  $po$  توافق مشاهده شده است که با استفاده از معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$Po = \sum_{i=1}^r \frac{y_{ii}}{N} \quad (7)$$

هم‌چنین در رابطه ۶،  $Pc$  توافق مورد انتظار است که با معادله زیر بدست می‌آید:

$$pc = \sum_{i=1}^r \frac{y_{i+}}{N} * \frac{y_{+i}}{N} \quad (8)$$

در رابطه ۸،  $y_{i+}$  مجموع ردیف  $i$  در ماتریس خطا  $y_{+i}$ ، مجموع ستون  $i$  در ماتریس خطا است.

تحلیل حساسیت در انتخاب مدل مناسب برای تغییرات اقلیمی نقشی اساسی ایفا می‌کند. با شناسایی پارامترهای حساس و کاهش عدم قطعیت‌ها، این روش به بهبود دقت، کارایی و پایداری مدل‌های اقلیمی کمک می‌کند. به علاوه، تحلیل حساسیت امکان مقایسه مدل‌های مختلف و انتخاب بهترین مدل را بر اساس شرایط و نیازهای تحقیق فراهم می‌آورد. در این پژوهش جهت انجام تحلیل حساسیت از روش مونت کارلو استفاده شده است. روش مونت کارلو یک روش مناسب برای ارزیابی تأثیر تغییرات پارامترهای ورودی بر خروجی مدل است (Saltelli et al., 2000). در این روش، ورودی‌های مدل به طور تصادفی نمونه‌گیری می‌شوند و شبیه‌سازی‌های متعددی با مقادیر تصادفی برای هر متغیر ورودی اجرا می‌شود. این رویکرد امکان بررسی اثر تغییرات احتمالی و عدم قطعیت در ورودی‌ها بر روی خروجی مدل را فراهم می‌آورد (Helton & Davis, 2003). تصادفی بودن انتخاب ورودی‌ها در روش مونت کارلو به منظور بررسی تمام محدوده تغییرات احتمالی پارامترها است و به معنای تصادفی بودن نتایج یا خروجی‌های مدل نیست. در حقیقت، این روش ابزاری برای کاهش عدم قطعیت است، نه ایجاد آن. به همین دلیل، استفاده از آن برای تحلیل حساسیت در سیستم‌هایی با روند سیستماتیک

کوچک باشد، مدل به عنوان یک مدل پایدار در نظر گرفته می‌شود.

در این پژوهش به منظور ارزیابی نهایی مدل انتخابی، از دیاگرام تیلور استفاده شده است که یکی از ابزارهای کارآمد در سنجش دقت مدل‌های شبیه سازی در مقایسه با داده‌های مشاهداتی است. این نمودار بر پایه سه شاخص اساسی طراحی شده است که هر یک به نحوی سطح تطابق و کارایی مدل‌ها را نسبت به داده‌های واقعی ارزیابی می‌کنند. دیاگرام تیلور بر اساس سه شاخص ضریب همبستگی، میانگین مربعات خطا (RMSE) و مقادیر انحراف معیار داده‌های مشاهداتی و داده‌های شبیه سازی شده می‌باشد. در دیاگرام تیلور، هر مدل با یک نقطه نشان داده می‌شود که موقعیت آن بر اساس ضریب همبستگی، انحراف معیار و RMSE نسبت به داده‌های مشاهداتی تعیین می‌شود. مدلی که بیشترین نزدیکی را با نقطه داده‌های مشاهداتی در این نمودار داشته باشد، مدلی با عملکرد بهتر تلقی می‌شود، چرا که نشان دهنده تطابق بهتر بین مقادیر شبیه سازی شده و مشاهداتی در معیارهای همبستگی، انحراف معیار و خطای میانگین مربعات است (Taylor, 2001).

پیش‌بینی‌های اقلیمی برای دوره‌های آینده، اطلاعات ارزشمندی را در مورد وضعیت آب و هوایی پیش‌بینی شده در یک منطقه خاص ارائه می‌دهد. این پیش‌بینی‌ها به تصمیم‌گیران کمک می‌کند تا با تحلیل اثرات تغییرات اقلیمی، اقدامات لازم برای سازگاری و کاهش آسیب‌پذیری‌های اقلیمی را اتخاذ کنند. در این پژوهش، پیش‌بینی‌های اقلیمی تحت سه سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 مورد بررسی قرار گرفتند که به درک بهتر عدم قطعیت‌های موجود در آینده اقلیمی کمک می‌کنند. سناریوی SSP1-2.6 با کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و تمرکز بر توسعه پایدار، آینده‌ای کم‌ریسک را ترسیم می‌کند (Londhe et al., 2023). سناریوی SSP2-4.5 تعادل بین رشد اقتصادی و حفاظت از محیط زیست را در نظر می‌گیرد و شرایط متوسطی از تغییرات اقلیمی را نشان می‌دهد (Prakash et al., 2018). در مقابل،

سناریوی SSP5-8.5 رشد اقتصادی وابسته به سوخت‌های فسیلی را با انتشار گازهای بالا پیش‌بینی کرده و پیامدهای شدید و نگران‌کننده‌ای برای اقلیم در آینده متصور است. استفاده از این سناریوها به تحلیل عدم قطعیت‌ها در پیش‌بینی‌های اقلیمی کمک می‌کند و دید جامعی از طیف شرایط اقلیمی محتمل در اختیار قرار می‌دهد. در این پژوهش از نرم‌افزارهای MATLAB، R و Python برای تحلیل داده‌ها، اصلاح بایاس و ارزیابی مدل‌ها استفاده شده است.

### یافته‌ها

**ارزیابی دقت مدل‌های پیش‌بینی:** در این پژوهش روش اصلاح بایاس خطی بر روی داده‌های مدل‌های مختلف CMIP6 در ایستگاه‌های مورد مطالعه اعمال گردید. سپس میزان دقت داده‌های حاصل از انواع مدل‌ها با استفاده از شاخص‌هایی مانند ضریب تعیین ( $R^2$ )، میانگین خطای مطلق (MAE)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و خطای بایاس درصدی (PBIAS) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این ارزیابی نشان داد مدل‌هایی نظیر MIROC6 و ACCESS-ESM1-5 تقریباً در تمامی ایستگاه‌ها دارای  $R^2$  بالایی هستند که بیانگر همخوانی دقیق آنها با داده‌های ایستگاهی است. برخی از پژوهش‌های قبلی نظیر لویز<sup>۱</sup> (2020) و چن و همکاران<sup>۲</sup> (2021) نیز کارایی و دقت این مدل‌ها را در نواحی با تنوع بارشی بالا بررسی نموده بودند هم دقت آنها تایید نموده‌اند. مدل ACCESS-ESM1-5 علاوه بر  $R^2$  بالا، در ایستگاه‌های انزلی و رشت دارای مقادیر پایین MAE و RMSE است که نشان‌دهنده دقت بالای این مدل در برآورد بارش این مناطق است. همچنین این مدل دارای مقادیر PBIAS نزدیک به صفر است که بیانگر کم بودن بایاس و به عبارتی عدم گرایش مدل به بیش برآورد یا کم برآورد بارش می‌باشد (جدول ۳).

<sup>1</sup> López et al

<sup>2</sup> Chen et al

جدول ۳: ارزیابی عملکرد مدل‌های مختلف CMIP6 جهت برآورد بارش بعد از تصحیح بایاس بر اساس شاخص‌های مختلف

Model	ایستگاه رشت				ایستگاه بندر انزلی				ایستگاه آستارا			
	PBIAS	RMSE	MAE	R <sup>2</sup>	PBIAS	RMSE	MAE	R <sup>2</sup>	PBIAS	RMSE	MAE	R <sup>2</sup>
BCC-CSM2-MR	-۰/۱۸	۲/۸۴	۲/۱	۱	-۰/۰۸	۳/۴۵	۲/۶۳	۱	-۸/۰۹	۳۰/۳۳	۱۰/۱۵	۰/۸۳
CanESM5	-۰/۰۵	۳/۳۶	۲/۹۵	۱	-۰/۱۶	۴/۱	۳/۵۰	۱	-۷/۹۱	۳۱/۱	۱۰/۴۴	۰/۸۲
INM-CM5-0	-۰/۴۱	۲/۵۶	۲/۱۶	۱	-۰/۲۸	۲/۴۵	۱/۹۱	۱	-۷/۶۵	۲۹/۰۶	۱۰/۰۹	۰/۸۴
MIROC6	۰	۴/۱۳	۲/۹۴	-۰/۹۹	۰	۶/۶۵	۴/۷۵	۱	۰	۱/۳۴	۱/۰۷	۱
IPSL-CM6A-LR	۰	۱/۹۶	۱/۶۳	۱	۰	۳/۱۹	۲/۵۳	۱	-۸/۲۱	۳۰/۳۷	۱/۴۲	۱
MRI-ESM2-0	-۰/۰۱	۲/۳۹	۲/۰۹	۱	-۰/۰۱	۲/۸۵	۲/۲۰	۱	۰	۱/۵۷	۱۰/۴۲	۱
ACCESS-ESM1-5	۰	۱/۳۴	۰/۹۹	۱	۰	۲/۳۶	۱/۹۴	۱	۰	۲/۱۹	۱/۵۹	۱

در شرایط جوی و مکانی مختلف اشاره دارد. مدل‌های پایدار قادر به تطبیق با تغییرات فصلی و اقلیمی بوده و نتایج آن‌ها با داده‌های واقعی همخوانی دارند. مارون و همکاران (2017) و لویز و همکاران (2020) در مطالعات خود نشان دادند که تصحیح بایاس می‌تواند پایداری مدل‌ها را بهبود بخشد. بر این اساس در این پژوهش جهت تحلیل پایداری مدل‌های مورد مطالعه از شاخص تحلیل پایداری Sobol استفاده شده است. تحلیل شاخص‌های پایداری و حساسیت مدل‌های اقلیمی با استفاده از تحلیل حساسیت Sobol نشان می‌دهد که این مدل‌ها در برابر تغییرات پارامترهای ورودی پایداری مناسبی دارند، هرچند تفاوت‌های ظریفی در عملکرد آنها مشاهده می‌شود. نتایج مشابهی در مطالعات پیشین نیز مشاهده شده است؛ برای مثال، اسمیت و همکاران (2020) در مطالعه‌ای به این نتیجه رسیدند که مدل‌های اقلیمی با پایداری بالا معمولاً در پیش‌بینی‌های بلند مدت عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهند. در اینجا، شاخص پایداری برای تمامی مدل‌ها در محدوده ۰/۰۰۱۹۶ تا ۰/۰۰۱۹۸ قرار دارد که بیانگر سطح پایداری نسبتاً بالایی است. در میان این مدل‌ها، ACCESS-ESM1-5 با مقدار ۰/۰۰۱۹۸ بالاترین سطح پایداری را دارد که این ویژگی آن را به عنوان یک مدل مقاوم در برابر تغییرات ورودی مطرح می‌کند.

از سوی دیگر، مدل MIROC6 نیز عملکرد مشابهی در برخی ایستگاه‌ها مانند رشت نشان می‌دهد، با مقادیر PBIAS صفر و RMSE پایین، که آن را به یک گزینه کارآمد برای پیش‌بینی بارش در این منطقه تبدیل می‌کند. در این رابطه نتایج پژوهش احمد و همکاران (2019) نیز نشان می‌دهد که مدل‌هایی که مقادیر خطای بایاس آنها بسیار کم است از نظر دقت پیش‌بینی نتایج قابل اعتمادتری دارند. این مدل علاوه بر دقت خوب در برآورد بارش، در برخی ایستگاه‌ها مثل انزلی و رشت MAE و RMSE نسبتاً پایین دارد و با کاهش PBIAS به سمت صفر در این ایستگاه‌ها، خطای بایاس کمتری نشان می‌دهد. از این رو، این مدل می‌تواند برای پیش‌بینی بارش در مناطقی با شرایط بارشی مشابه مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به نتایج به دست آمده، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که مدل‌های MIROC6 و ACCESS-ESM1-5 پس از تصحیح بایاس، دقت و پایداری خوبی در برآورد بارش استان گیلان نشان می‌دهند (شکل ۲). این یافته‌ها به طور کلی با نتایج پژوهش‌های انجام شده توسط مارون و همکاران (2017) و اوانز و همکاران (2018) در زمینه ارزیابی مدل‌های اقلیمی نیز همسو است، که بر اهمیت کاهش بایاس و خطاهای مطلق برای افزایش دقت مدل‌ها تأکید دارند.

**تحلیل پایداری مدل‌ها:** پایداری مدل‌های پیش‌بینی اقلیمی به توانایی مدل در تولید نتایج دقیق و مداوم

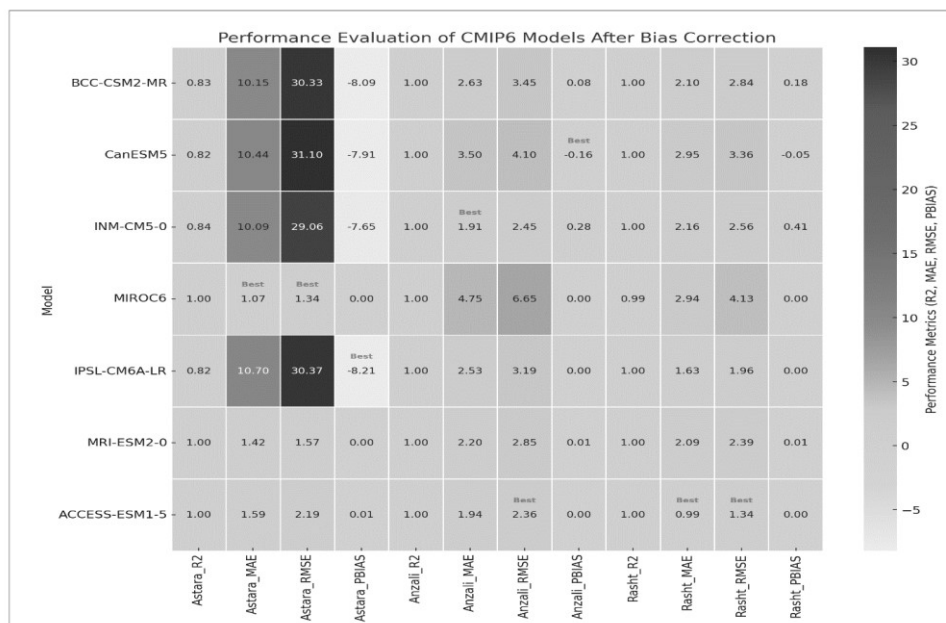
<sup>1</sup> Ahmed et al

<sup>2</sup> Maraun et al

<sup>3</sup> Evans et al

<sup>4</sup> López et al

<sup>5</sup> Smith et al



شکل ۲: نمودار ماتریسی ارزیابی کارایی مدل‌های CMIP6 بعد از تصحیح بایاس

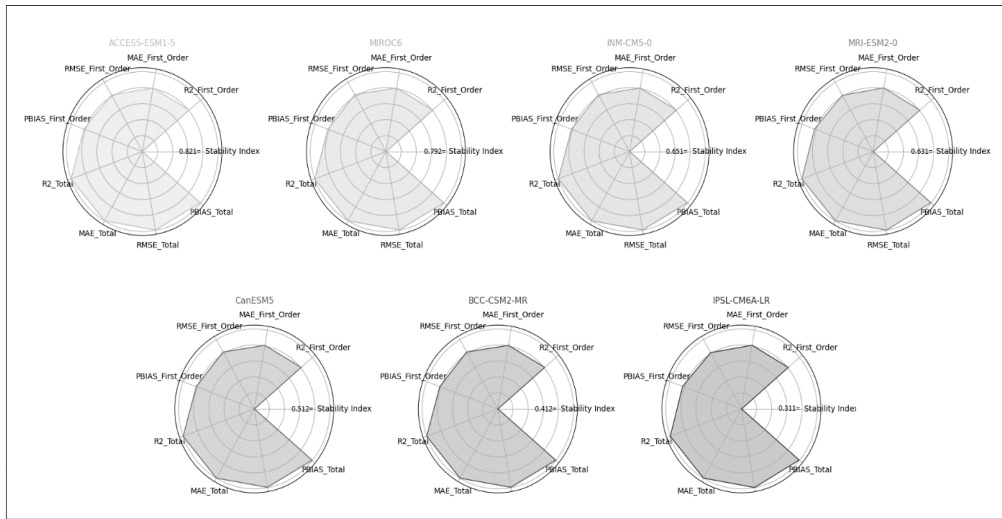
در این رابطه ویلسون و همکاران<sup>۳</sup> (2017) نیز نشان دادند، که شاخص‌های کلی تاثیر بسیار قابل توجهی در تعیین پایداری مدل‌ها پیش بینی دارد. شاخص  $R^2$  در تمامی مدل‌ها، حساسیت کلی بسیار بالایی دارد و به مقدار ۱ نزدیک است، که به ارتباط قوی آن با نتایج مدل اشاره دارد. برای شاخص‌های MAE و RMSE نیز حساسیت کلی به همین میزان بالا است، که همخوانی این شاخص‌ها با نتایج مدل‌ها را تأیید می‌کند. در شاخص PBIAS، مدل‌هایی مانند ACCESS-ESM1-5 و MIROC6 با حساسیت کلی نسبتاً پایین‌تری مشاهده می‌شوند، که به پایداری بالاتر این مدل‌ها اشاره دارد. بطور کلی نتایج حاصل از شاخص تحلیل پایداری Sobol بخوبی نشان داد که این دو مدل دارای پایداری بسیار بالایی هستند چرا که این مدل‌ها به تغییرات جزئی ورودی‌ها وابستگی کمتری دارند و در سناریوهای گوناگون و تغییرات زمانی و فصلی الگوهای پایداری را از خود نشان می‌دهند. بر این اساس برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی تغییرات بارش در ایستگاههای مورد مطالعه به عنوان مدل‌های کارآمد و بهینه می‌توانند در نظر گرفته شوند (شکل ۳).

حساسیت مرتبه اول شاخص  $R^2$  نشان دهنده تأثیر مستقیم این شاخص بر نتایج مدل‌هاست؛ برای مثال، در مدل CanESM5، مقدار حساسیت مرتبه اول  $R^2$  برابر با ۰/۸۰۸ است که نشان می‌دهد این شاخص یکی از عوامل کلیدی تعیین‌کننده در خروجی مدل است. این یافته با تحقیقات جونز و همکاران<sup>۱</sup> (2019) مطابقت دارد که نشان دادند شاخص‌های دقت مدل، تأثیر قابل توجهی بر پایداری پیش‌بینی‌ها دارند. علاوه بر این، شاخص‌های MAE و RMSE نیز در تمامی مدل‌ها نقش مهمی دارند و به‌طور متوسط در حدود ۰/۸۲ قرار دارند که بیانگر همبستگی قوی این شاخص‌ها با نتایج مدل‌ها است. شاخص PBIAS با مقادیر بین ۰/۸۱۵ تا ۰/۸۲۶، تأثیر زیادی بر عملکرد مدل‌ها دارد؛ این اثر به‌ویژه در مدل MIROC6 برجسته است، در این رابطه نتایج تحقیقات میلر و ژایو<sup>۲</sup> (2021) نیز نشان دادند که مقادیر PBIAS تأثیر بالایی در ارزیابی و انتخاب مدل‌های اقلیمی دارد. حساسیت کلی مدل‌ها نیز نشان دهنده تأثیرات مستقیم و غیرمستقیم هر شاخص بر نتایج مدل‌هاست.

<sup>1</sup> Jones et al

<sup>2</sup> Miller & Zhao

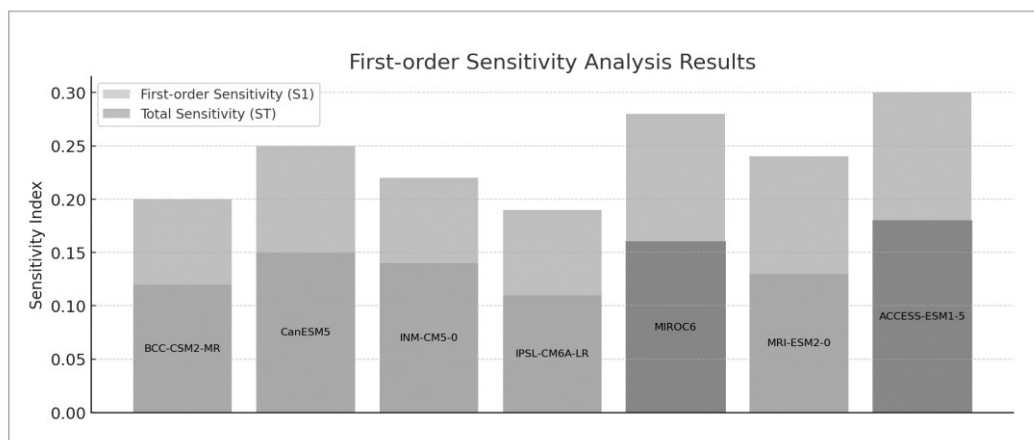
<sup>3</sup> Wilson et al



شکل ۳: نمودار حاصل از شاخص تحلیل پایداری Sobolj برای مدل‌های مختلف مورد مطالعه

مدل‌های ACCESS-ESM1-5 و MIROC6 به‌عنوان مدل‌هایی با بالاترین حساسیت مرتبه اول و حساسیت کلی، نسبت به تغییرات اولیه پارامترها واکنش بیشتری نشان می‌دهند. به‌عنوان نمونه، مقادیر بالای حساسیت مرتبه اول (S1) در مدل ACCESS-ESM1-5، نشان‌دهنده میزان بالای توضیح‌دهندگی و تأثیر این مدل در برابر تغییرات متغیرهای ورودی است، که نشان از قابلیت اطمینان بالای آن در سناریوهای مختلف دارد. حساسیت کلی (ST) این مدل نیز که تمامی تعاملات بین پارامترهای ورودی را در بر می‌گیرد، موید انعطاف‌پذیری و تطبیق‌پذیری بهتر آن با شرایط مختلف محیطی است (شکل ۴).

**تحلیل حساسیت مدل‌های مورد مطالعه:** تحلیل حساسیت در مدل‌های تغییر اقلیم به منظور شناسایی متغیرهای کلیدی و تأثیرگذار ضروری است و به پژوهشگران کمک می‌کند تا پایداری و اعتبار مدل‌ها را بهبود بخشند (Saltelli et al., 2008). این تحلیل باعث بهینه‌سازی محاسباتی در مدل‌ها شده و از طریق کاهش عدم قطعیت در پیش‌بینی‌ها، نتایج را دقیق‌تر می‌سازد. به‌طور کلی، تحلیل حساسیت ابزاری مهم برای افزایش دقت و اعتبار پیش‌بینی‌های اقلیمی است (Helton et al., 2003). در این پژوهش از شاخص حساسیت مونت کارلو مرتبه اول استفاده شده است. تحلیل نتایج حساسیت نشان می‌دهد که

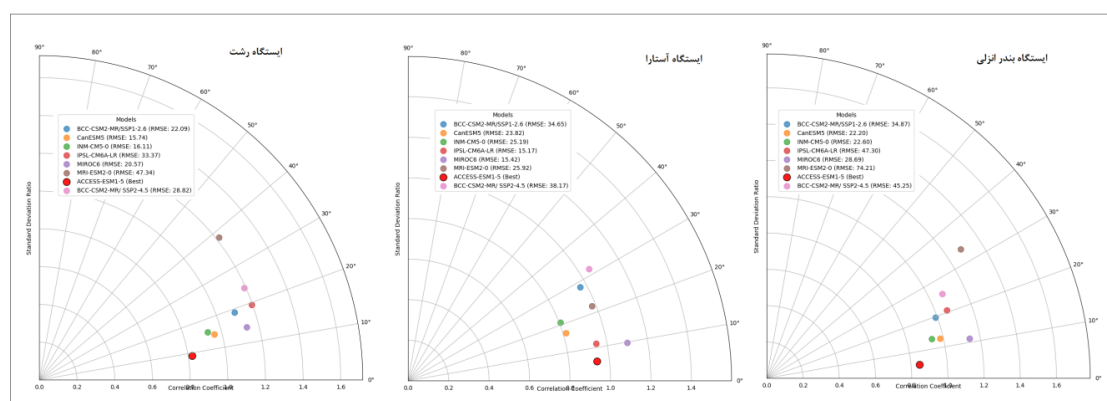


شکل ۴: نمودار تحلیل حساسیت بر اساس شاخص مونت کارلو مرتبه اول

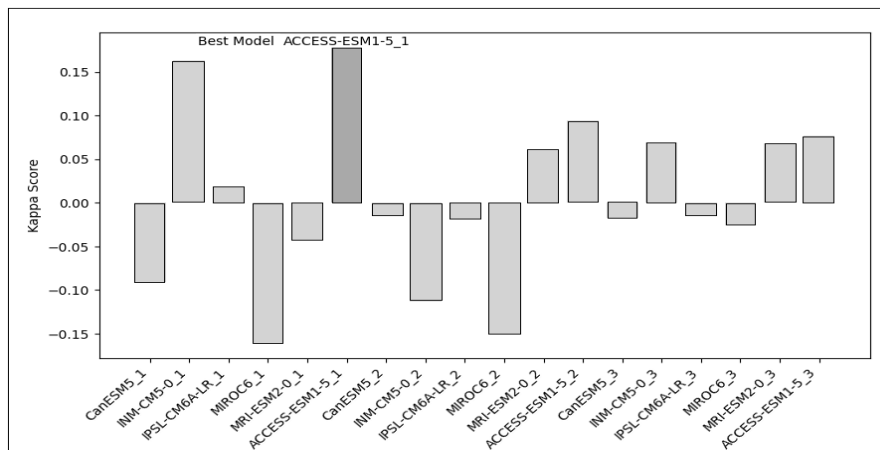
خطای کمتری نشان می‌دهند (Taylor, 2001). این ویژگی‌ها برای پیش‌بینی اقلیمی بسیار حیاتی‌اند، زیرا دقت و پایداری مدل در باز تولید رفتار واقعی اقلیم به‌طور مستقیم بر اعتماد به پیش‌بینی‌های آتی تأثیر می‌گذارد (Gleckler et al., 2008). بر اساس نمودارهای شاخص کاپا و دیاگرام‌های تیلور برای ایستگاه‌های رشت، آستارا، و بندر انزلی، می‌توان به یک ارزیابی جامع از عملکرد مدل‌ها در پیش‌بینی تغییرات بارش در دهه‌های آتی دست یافت. دیاگرام‌های تیلور به ویژه در ارزیابی دقت مدل‌ها موثر هستند، زیرا همبستگی، انحراف معیار، و خطای مربعی میانگین (RMSE) را در یک نمایش واحد ترکیب می‌کنند و امکان مقایسه دقیق تری از عملکرد مدل‌ها بر اساس معیارهای مختلف را فراهم می‌سازند (Taylor, 2001). در ایستگاه رشت، دیاگرام تیلور نشان می‌دهد که مدل ACCESS-ESM1-5 بهترین عملکرد را دارد، با بالاترین ضریب همبستگی، انحراف معیار مناسب، و RMSE پایین که آن را به نقطه مرجع نزدیک تر می‌کند (شکل ۵). نمودار کاپا نیز این نتیجه را تایید می‌کند و نشان می‌دهد که ACCESS-ESM1-5 بهترین عملکرد را با شاخص کاپا دارد که نشان دهنده پیش‌بینی‌های سازگار با داده‌های مشاهده شده است (شکل ۶).

علاوه بر مدل ACCESS-ESM1-5، مدل MIROC6 که در تحلیل‌های اخیر مقادیر بالای S1 و ST را به خود اختصاص داده است، به عنوان مدلی با دقت بالا در تعاملات پیچیده پارامترها در شرایط متغیر اقلیمی شناخته می‌شود (Jones et al., 2018). نتایج مطالعات متعدد در این زمینه نشان می‌دهد که مدل‌های با حساسیت بالاتر می‌توانند در پیش‌بینی دقیق‌تر و مواجهه با تغییرات غیر منتظره نقش بیشتری داشته باشند و این به ویژه در مطالعه تغییرات اقلیمی اهمیت بسزایی دارد (Allen & Ingram, 2002).

**انتخاب مدل بهینه:** بر مبنای تحلیل‌های قبلی در این مرحله لازم است بهترین مدل‌ها برای شبیه‌سازی و پیش‌بینی بارش در ایستگاه‌های مورد مطالعه تعیین و بر اساس آن مقادیر بارش برای دهه‌های آتی برآورد شود. برای این منظور از دو روش رایج و پرکاربرد شاخص کاپا و دیاگرام تیلور استفاده گردید. دیاگرام تیلور ابزاری است که امکان ارزیابی چندین جنبه کلیدی عملکرد مدل‌های اقلیمی را در یک چارچوب بصری فراهم می‌کند. این دیاگرام این امکان را فراهم می‌کند مدل‌هایی شناسایی شود که بهتر می‌توانند الگوهای مشاهده شده را باز تولید کنند، زیرا مدل‌های بهینه همبستگی بالاتری با داده‌های واقعی دارند و



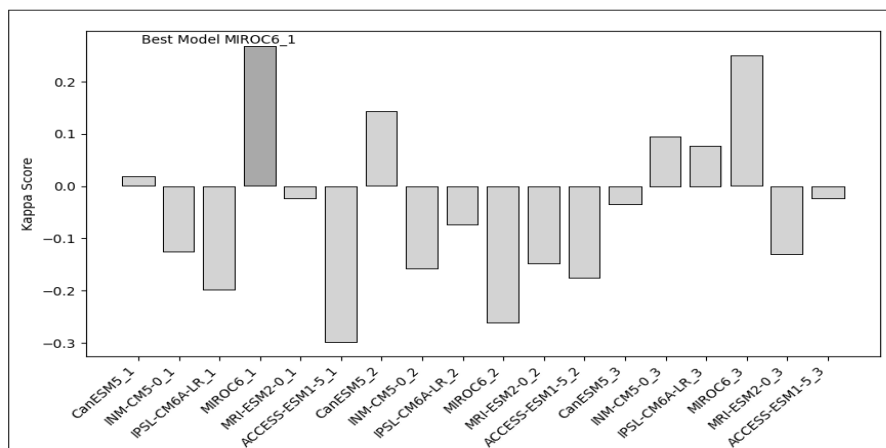
شکل ۵: دیاگرام تیلور برای انتخاب مدل بهینه در ایستگاه‌های مورد مطالعه



شکل ۶: نمودار شاخص کاپا برای انتخاب مدل بهینه در ایستگاه رشت

بارش را در این ایستگاه بهتر از دیگر مدل‌ها شبیه‌سازی کند که احتمالاً به دلیل حساسیت بالای آن به تغییرات بارش است. توانایی این مدل در همخوانی نزدیک با روندهای مشاهده شده بارش در آستارا نشان می‌دهد که برای پیش‌بینی بلندمدت بارش در این ایستگاه مناسب است.

در ایستگاه آستارا، مدل MIROC6 بهترین عملکرد را در نمودار کاپا نشان می‌دهد (شکل ۷) و در دیاگرام تیلور هر چند بهترین مدل همچنان مدل ACCESS-ESM1-5 است با این وجود مدل MIROC6 نیز با ضریب همبستگی نسبتاً بالا و RMSE کم مدل مناسبی می‌باشد (شکل ۵). این نشان می‌دهد که مدل MIROC6 نیز می‌تواند پویایی

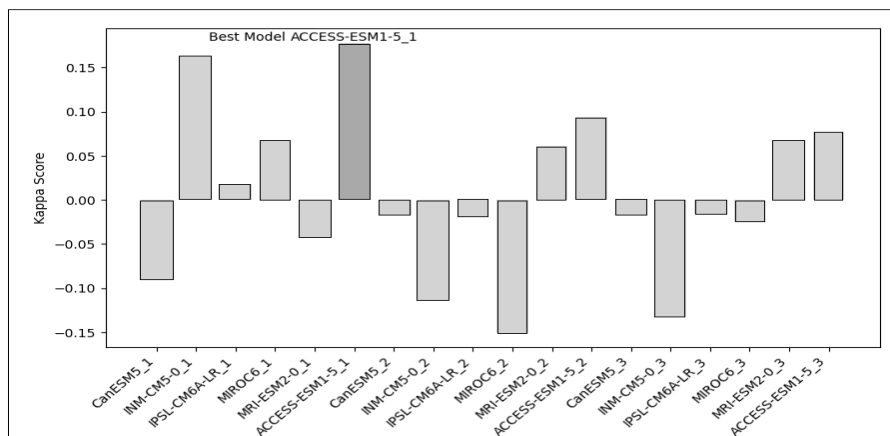


شکل ۷: نمودار شاخص کاپا برای انتخاب مدل بهینه در ایستگاه رشت

طور خلاصه و با در نظر گرفتن تمامی تحلیل‌ها، از جمله شاخص کاپا و دیاگرام‌های تیلور، مدل ACCESS-ESM1-5 به دلیل دارا بودن پایداری، حساسیت، و رتبه‌بندی ترکیبی بالا، انتخاب‌های قابل اعتمادی برای پیش‌بینی‌های بارش در آینده تحت

در ایستگاه بندر انزلی، مدل ACCESS-ESM1-5 مجدداً به عنوان بهترین مدل با سازگاری بالا و شاخص کاپای مثبت می‌باشد (شکل ۸). دیاگرام تیلور نیز این مدل را با ضریب همبستگی بالا و RMSE مناسب نشان می‌دهد که نشان دهنده دقت بالای آن در شبیه‌سازی الگوهای بارش برای این ایستگاه است. به

سناریوهای تغییر اقلیم در این ایستگاه‌های پربارش استان گیلان هستند.



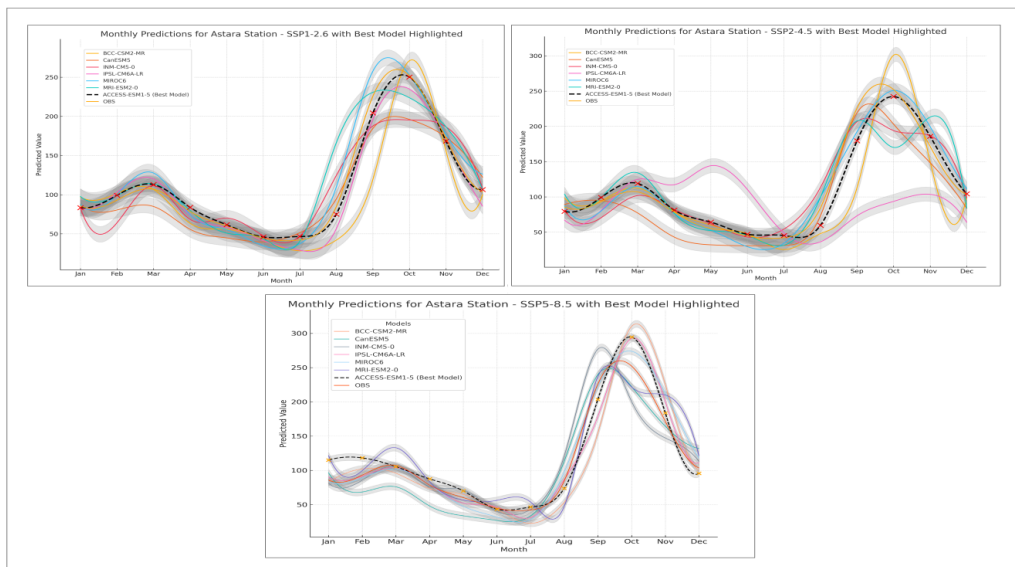
شکل ۸: نمودار شاخص کاپا برای انتخاب مدل بهینه در ایستگاه بندر انزلی

نیازمند توجه بیشتر به اثرات و پیامدهای منفی آن در این ایستگاه می باشد. در سناریوی SSP2-4.5 که نشان دهنده شدت متوسط انتشار است، افزایش بارش در ماه‌های مارس و نوامبر مشهود است، در حالی که در ماه‌های تابستان کاهش بارش رخ خواهد داد. به طور خاص، کاهش بارش در ماه‌های اوت و سپتامبر می تواند به خشکسالی منجر شده و خطرات زیست محیطی جدی به دنبال داشته باشد. این تغییرات به دلیل افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای است که منجر به افزایش دمای هوا و تخریب بیشتر شده و در نتیجه نوسانات شدیدتر در بارش‌های فصلی را سبب می شود (Lee et al., 2021).

**پیش‌بینی تغییرات بارش با استفاده از سناریوهای SSP:** بررسی نتایج حاصل از پیش‌بینی بارش ماهانه در ایستگاه آستارا تا سال 2050 بر اساس سناریوهای مختلف مدل ACCESS-ESM1-5 نشان‌دهنده تفاوت‌های بارز در روند بارش فصلی است. در سناریوی SSP1-2.6 که نمایانگر کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای است، تغییرات بارش نسبت به دوره پایه در ماه‌های ژانویه، مارس و آوریل افزایش و در ماه‌های تابستان کاهش داشته است (جدول ۴). این نتایج با پژوهش‌های قبلی در مورد اثرات سناریوهای کم انتشار مطابقت دارد (Jones et al., 2018). با این حال، کاهش بارش در ماه‌های اوت و سپتامبر که دوره‌های بحرانی برای منابع آبی منطقه هستند،

جدول ۴: پیش‌بینی تغییرات بارش تا سال 2050 ایستگاه آستارا با استفاده از سناریوهای مختلف مدل ACCESS-ESM1-5

ایستگاه	SSP	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	مه	ژوئن	ژوئیه	اوت	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
آستارا	1-2.6	۸۳/۳۹	۹۹/۲۴	۱۱۲/۹۷	۸۳/۸۹	۶۱/۶۱	۴۶/۰۵	۴۶/۶۳	۷۵/۱۱	۲۰۴/۳۳	۲۵۰/۲۲	۱۶۸/۴۷	۱۰۶/۶۰
	2-4.5	۷۹/۵۵	۹۹/۱۸	۱۱۹/۰۶	۸۱/۳۱	۶۴/۳۰	۴۷/۰۸	۴۵/۲۸	۵۹/۷۰	۱۷۹/۵۵	۲۴۲/۲۷	۱۸۵/۹۴	۱۰۴/۴۲
	5-8.5	۱۱۵/۰۶	۱۱۸/۱۶	۱۰۵/۳۷	۸۷/۵۲	۷۰	۴۳/۳۴	۴۶/۴۵	۷۳/۸۲	۲۰۳/۶۰	۲۹۴/۵۹	۱۸۳/۷۳	۹۵/۶۴
دوره پایه		۸۵/۷۹	۹۳/۰۵	۱۰۷/۰۴	۷۸/۵۵	۶۰/۲۱	۴۴/۷۰	۴۲/۱۸	۸۴/۷۵	۲۲۵/۸۸	۲۵۲/۱۸	۱۷۱/۶۲	۱۰۳/۴۸
اختلاف با دوره پایه	1-2.6	-۲/۴	۶/۱۹	۵/۹۳	۵/۳۴	۱/۴	۱/۳۵	۴/۴۵	-۹/۶۴	-۲۱/۵۵	-۱/۹۶	-۳/۱۵	۳/۱۲
	2-4.5	-۶/۲۴	۶/۱۳	۱۲/۰۲	۲/۷۶	۴/۰۹	۲/۳۸	۳/۱	-۲۵/۰۵	-۴۶/۳۳	-۹/۹۱	۱۴/۳۲	-۰/۹۴
	5-8.5	۲۹/۲۷	۲۵/۱۱	-۱/۶۷	۸/۹۷	۹/۷۹	-۱/۳۶	۴/۲۷	-۱۰/۹۳	-۲۲/۲۸	۴۲/۴۱	۱۲/۱۱	-۷/۸۴
نوع تغییر		- +	+	- +	+	+	-	+	-	-	- +	- +	- +



شکل ۷: نمودارهای پیش‌بینی میانگین بارش ماهانه سال تا ۲۰۵۰ بر اساس مدل‌ها و سناریوهای مورد مطالعه در ایستگاه آستارا

بود و سناریوهای با انتشار بالاتر، تغییرات شدیدتری را در الگوهای بارش ایجاد می‌کنند. این تغییرات به ویژه در فصل تابستان و اوایل پاییز می‌تواند به کاهش منابع آبی و خشکسالی منجر شود. تحلیل تغییرات بارش ایستگاه بندر انزلی با استفاده از مدل ACCESS-ESM1-5 و با در نظر گرفتن سه سناریوی مختلف مورد مطالعه از سال ۲۰۲۴ تا سال ۲۰۵۰ نشان دهنده الگوهای متفاوت و تغییرات بارز در میزان بارش فصلی است. در سناریوی SSP1-2.6 افزایش بارش در فصل زمستان و اوایل بهار مشاهده می‌شود (جدول ۵). این افزایش در ماه‌های ژانویه، فوریه، و مارس با توجه به کاهش اثرات گرمایش جهانی در این سناریو قابل تفسیر است، زیرا کاهش دما به طور بالقوه باعث افزایش میزان تراکم ابر و در نتیجه افزایش بارش می‌شود. اما کاهش قابل توجه بارش در ماه‌های سپتامبر، اکتبر، و نوامبر می‌تواند نشانه‌ای از تغییرات اقلیمی فصلی و تأثیر تغییرات دما بر الگوی بارش باشد (Jones et al., 2019).

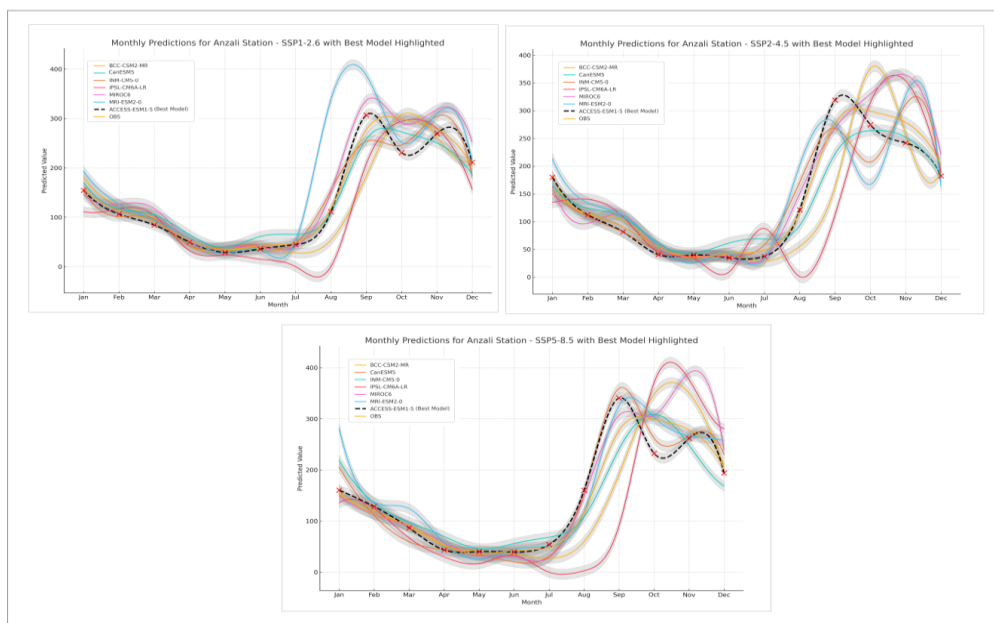
نتایج حاصل از پیش‌بینی بارش بر اساس سناریوی SSP5-8.5 به عنوان سناریویی با بالاترین سطح انتشار نشان دهنده تغییرات شدیدتری در بارش پیش‌بینی شده از سال ۲۰۲۴ تا سال ۲۰۵۰ نسبت به دوره پایه می‌باشد. در این سناریو، افزایش قابل توجه بارش در ماه‌های ژانویه و فوریه پیش‌بینی شده است، در حالی که کاهش بارش در ماه‌های ژوئن و سپتامبر وجود دارد (جدول ۴). این الگوی پیش‌بینی شده با تحقیقات پیشین درباره سناریوهای انتشار بالا همخوانی دارد که نشان داده بودند در این سناریوها، اثرات اقلیمی شدیدتری بر بارش‌های فصلی و عدم پایداری منابع آبی مناطق مختلف ایجاد می‌شود (Brown & Taylor, 2020). هم‌چنین مدل ACCESS-ESM1-5 در این پیش‌بینی‌ها دقت بالایی نشان داده و با داده‌های ایستگاهی همخوانی خوبی دارد، که باعث می‌شود به عنوان یک ابزار مطمئن برای پیش‌بینی‌های اقلیمی منطقه مورد استفاده قرار گیرد (شکل ۷). نتایج این تحلیل نشان می‌دهد که اثرات تغییر اقلیم بسته به سناریوی انتشار متفاوت خواهد

جدول ۵: پیش‌بینی تغییرات بارش تا سال ۲۰۵۰ ایستگاه بندر انزلی با استفاده از سناریوهای مختلف مدل ACCESS-ESM1-5

ایستگاه	SSP	ژانویه	فوریه	مارس	آوریل	مه	ژوئن	ژوئیه	اوت	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
بندر انزلی	1-2.6	۱۷۰/۱	۱۱۷/۳۸	۱۰۴/۹۳	۶۴/۸۸	۳۹/۳۰	۶۱/۱۱	۶۵/۵۷	۱۰۸/۸۳	۲۵۸/۲۷	۲۷۲/۸۷	۲۵۰/۴۷	۱۸۶/۹۷
	2-4.5	۱۶۴/۶۷	۱۲۴/۳۹	۱۰۷/۴۸	۶۱	۴۳/۳۷	۶۱/۳۱	۶۸/۵۸	۹۲/۹۳	۲۲۲	۲۶۴/۰۱	۲۵۲/۳۴	۱۸۳/۴۶
	5-8.5	۲۱۹/۱۱	۱۳۵/۸۳	۹۷/۹۱	۶۹/۸۲	۴۵/۹۳	۵۶/۰۲	۶۸/۲۴	۱۰۸/۰۷	۲۴۰/۸۰	۳۰۸/۱۸	۲۴۸/۵۴	۱۶۸/۶۶
دوره پایه		۱۵۹/۶۴	۱۳۳/۶۶	۹۰/۵۹	۵۳/۶۷	۳۵/۰۳	۴۲/۷۴	۴۸/۷۲	۱۱۷	۲۷۷/۴۴	۲۹۸/۹۱	۲۷۸/۶۹	۲۰۲/۹۱
اختلاف با دوره پایه	1-2.6	۱۰/۴۶	۳/۷۲	۱۴/۳۴	۱۱/۲۱	۴/۲۷	۱۸/۳۷	۱۶/۸۵	-۸/۱۷	-۱۹/۱۷	-۲۶/۰۴	-۲۸/۲۲	-۱۵/۹۴
	2-4.5	۵/۰۳	۱۰/۷۳	۱۶/۸۹	۷/۳۳	۸/۳۴	۱۸/۵۷	۱۹/۸۶	-۲۴/۰۷	-۵۵/۴۴	-۳۴/۹	-۲۶/۳۵	-۱۹/۴۵
	5-8.5	۵۹/۴۷	۲۲/۱۷	۷/۳۲	۱۶/۱۵	۱۰/۹	۱۳/۲۸	۱۹/۵۲	-۸/۹۳	-۳۶/۶۴	۱۰/۲۷	-۳۰/۱۵	-۳۴/۲۵
نوع تغییر		+	+	+	+	+	+	+	-	-	- +	-	-

زمستان (ژانویه و فوریه) به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش و در ماه‌های سپتامبر و اکتبر کاهش چشم‌گیری دیده می‌شود. این افزایش بارش زمستانی می‌تواند ناشی از افزایش تراکم ابرها به دلیل افزایش تبخیر در نتیجه دماهای بالاتر باشد، در حالی که کاهش بارش در فصل پاییز به دلیل کاهش تراکم رطوبت و خشک شدن خاک مربوط می‌شود ( Smith et al., 2021). بطور کلی با توجه به نتایج حاصل از بکارگیری مدل مذکور می‌توان چنین نتیجه گرفت که انتخاب این مدل برای پیش‌بینی بارش در ایستگاه بندر انزلی با توجه به دقت بالا و همخوانی نتایج آن با داده‌های مشاهده شده می‌تواند نتایج قابل اعتمادتری ارائه نماید (شکل ۸).

در سناریوی SSP2-4.5 روند کلی مشابه با سناریوی SSP1-2.6 است، اما میزان افزایش بارش در ماه‌های زمستان کمتر بوده و کاهش بارش در فصل تابستان و اوایل پاییز بیشتر مشهود است. این کاهش بارش در ماه‌های اوت و سپتامبر می‌تواند به دلیل تشدید تبخیر و کاهش رطوبت خاک به دلیل افزایش دما باشد که اثرات منفی بر منابع آبی منطقه دارد. این نتایج نشان می‌دهد که حتی در صورت اتخاذ سیاست‌های متوسط کاهش انتشار، تغییرات اقلیمی می‌تواند بر الگوی بارش فصلی تأثیرگذار باشد و به ویژه در فصول گرم تر موجب کاهش منابع آبی شود. سناریوی SSP5-8.5 که نمایانگر بالاترین سطح انتشار گازهای گلخانه‌ای است، بیشترین تغییرات را نشان می‌دهد. در این سناریو، میانگین بارش در ماه‌های



شکل ۵: نمودارهای پیش‌بینی میانگین بارش ماهانه سال از سال ۲۰۲۴ تا ۲۰۵۰ بر اساس مدل‌ها و سناریوهای مورد مطالعه در ایستگاه بندر انزلی



استفاده از روش‌های Monte Carlo و Sobol نشان داد که مدل ACCESS-ESM1-5 با شاخص پایداری بالا و دقت پیش‌بینی برتر، بهترین عملکرد را در شبیه‌سازی تغییرات بارش ارائه می‌دهد. این مدل توانست نوسانات بارش را با RMSE کمتر از ۲ میلی‌متر و PBIAS نزدیک به صفر در مقایسه با سایر مدل‌ها با دقت بیشتری پیش‌بینی کند. مدل MIROC6 نیز در برخی ماه‌ها عملکرد قابل قبولی داشت، اما در پیش‌بینی‌های ماهانه، نوسانات بیشتری نسبت به مدل ACCESS-ESM1-5 نشان داد. در مقابل، مدل‌های IPSL-CM6A-LR و BCC-CSM2-MR ضعیف قابل توجهی در پایداری و دقت پیش‌بینی داشتند و با خطاهای بالاتر در تحلیل‌های ماهانه همراه بودند. این نتایج با پژوهش‌های مشابه مانند مطالعات چن و همکاران<sup>۱</sup> (2023) و لی و همکاران<sup>۲</sup> (2022) همخوانی دارد که نشان دادند مدل‌های با پایداری و حساسیت بالاتر قادر به پیش‌بینی دقیق‌تر روندهای اقلیمی هستند. تحلیل حساسیت مدل‌ها نیز تأیید می‌کند که دقت پیش‌بینی بارش به میزان حساسیت مدل‌ها نسبت به تغییرات ورودی‌ها بستگی دارد. مدل‌های ACCESS-ESM1-5 و MIROC6 با نشان دادن حساسیت بالاتر در فصول مختلف، توانستند تغییرات بارشی را بهتر منعکس کنند. این امر به ویژه در ماه‌های زمستانی و بهاری، که بارش‌های سنگین رخ می‌دهد، از اهمیت بالایی برخوردار است. نتایج نشان می‌دهد که در سناریوهای پراشتار (SSP5-8.5)، مدل ACCESS-ESM1-5 قادر است به طور دقیق‌تر افزایش مقادیر بارش را که ممکن است به سیل‌های ناگهانی منجر شود، پیش‌بینی کند. همچنین، کاهش بارش در فصول تابستانی، به ویژه در سناریو SSP5-8.5، نشان دهنده افزایش خطر خشکسالی است که بر کشاورزی و منابع آبی منطقه تأثیر منفی خواهد داشت. در مقایسه با سایر مدل‌ها، IPSL-CM6A-LR و BCC-CSM2-MR در تحلیل‌های پایداری و حساسیت ضعیف‌تر عمل کردند و نتایج آن‌ها نسبت به

تبخیر بیشتر و کاهش رطوبت خاک می‌شود. افزایش بارش در بهار نیز ممکن است به دلیل افزایش تراکم ابرها باشد، اما کاهش بارش در ماه‌های تابستان احتمالاً می‌تواند ناشی از کاهش میزان رطوبت و خشکی بیشتر خاک باشد (Smith et al., 2022). در سناریوی SSP5-8.5 که بدبینانه‌ترین سناریوی انتشار گازهای گلخانه‌ای محسوب می‌شود، افزایش بارش زمستانی به خصوص در ژانویه و فوریه چشم‌گیر است، اما کاهش شدید بارش در ماه‌های پاییز و تابستان نیز مشهود است. این الگو نشان‌دهنده شدت اثرات تغییرات اقلیمی بر بارش فصلی است (شکل ۹).

### نتیجه‌گیری

پیش‌بینی تغییرات بارش در مناطق پر بارش استان گیلان، به ویژه در ایستگاه‌های آستارا، بندر انزلی و رشت، برای مدیریت منابع آبی، کشاورزی و حفاظت از اکوسیستم‌های حساس این مناطق ضروری است. در این مطالعه، با استفاده از مدل‌های CMIP6 و سه سناریوی انتشار SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5، ارزیابی جامعی از تغییرات بارش در دهه‌های آتی انجام شد. تحلیل‌ها نشان داد که تغییرات بارشی در ایستگاه‌های مورد مطالعه به شدت تحت تأثیر سناریوهای مختلف می‌تواند متفاوت باشد. در سناریوی SSP5-8.5، بارش در ماه‌های دسامبر و ژانویه به ترتیب در بندر انزلی و رشت تا ۲۲٪ و ۲۵٪ افزایش یافته است که نشان دهنده افزایش قابل توجه احتمال وقوع سیلاب‌های ناگهانی است. در مقابل، بارش در ماه‌های ژوئیه و اوت در هر سه ایستگاه بین ۱۲٪ تا ۲۰٪ کاهش پیش‌بینی شد، که احتمال بروز خشکسالی‌های فصلی را افزایش می‌دهد و می‌تواند تأثیرات منفی شدیدی بر کشاورزی و منابع آبی منطقه داشته باشد. بطور کلی، نتایج حاصل از بررسی الگوی تغییرات بارش در ایستگاه‌های مورد مطالعه نشان داد که احتمال افزایش بارش در ماه‌های مختلف نیمه سرد سال و کاهش آن در ماه‌های نیمه گرم سال، می‌تواند بیانگر تشدید نوسانات فصلی در دهه‌های آتی باشد. نتایج حاصل از تحلیل پایداری و حساسیت مدل‌ها با

<sup>1</sup> Chen et al

<sup>2</sup> Lee et al

تغییرات ورودی‌ها پایداری کمتری نشان داد. این مدل‌ها به ویژه در پیش‌بینی‌های ماهانه با خطاهای بیشتری همراه بودند و نوسانات شدیدی در پیش‌بینی بارش نشان دادند که با نتایج مطالعات هوانگ و وانگ

(2021) در مورد دقت پایین‌ترین مدل‌ها در شرایط پراشتار همخوانی دارد. به‌طور کلی، نتایج این پژوهش اهمیت استفاده از مدل‌های پایدار و حساس‌تر را در پیش‌بینی تغییرات بارش نشان می‌دهد.

## منابع

- آزاد، نرگس، احمدی، آزاده. ۱۴۰۲. پیش‌نگری متغیرهای دما و بارش حوضه آبریز خزر با ارزیابی تأثیر روش‌های تصحیح اریبی و بکارگیری همادی مدل‌های اقلیمی CMIP6. تحقیقات منابع آب ایران، ۱۹(۴)، صفحات ۱۹۸-۱۷۲.
- افشاری نیا، مهدیه، پناهی، فاطمه، احترام، محمد. ۱۴۰۲. ارزیابی تغییرات اقلیمی با استفاده از برون‌داد مدل‌های CMIP6 (مطالعه موردی: دشت کاشان). نشریه علمی پژوهشی مهندسی آبیاری و آب ایران، ۱۴(۲)، صفحات ۲۵۶-۲۳۷.
- حافظی مقدس، ناصر، لشکری پور، غلامرضا، پارسائی، رشید. ۱۴۰۳. ارزیابی عملکرد مدل‌های CMIP6 در پیش‌نگری تغییرات دما و بارش در محدوده چاه نیمه‌های استان سیستان و بلوچستان. پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، ۵۶، صفحات ۱۷۸-۱۶۵.
- رضائی، حسن، پاشاپور، حجت‌اله، صادقی، فرشید. ۱۴۰۳. ارزیابی عملکرد مدل‌های CMIP6 و پیش‌نگری تغییرات دما و بارش تحت سناریوهای خط سیر اجتماعی-اقتصادی مشترک (SSP) در ایران. فصلنامه آینده پژوهی راهبردی، ۳(۱۰)، صفحات ۲۸-۷.
- ساری صراف، بهروز، رستم زاده، هاشم، محمدی، نبی. ۱۴۰۳. پیش‌نگری بارش با استفاده از مدل‌های CMIP6 تا پایان قرن ۲۱ در شمال غرب ایران. جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۱۳(۱)، صفحات ۱۹۴-۱۷۳.
- سراج ابراهیمی، رضا، زارعیان، محمد جواد، دهیان، حسین. ۱۴۰۳. ارزیابی عملکرد مدل‌های CMIP6 جهت برآورد دما و بارش در حوضه آبریز سفیدرود. مدیریت آب و آبیاری، ۱۴(۲)، صفحات ۲۸۹-۲۷۷.
- عبدالعلی زاده، فیروز، محمد خورشیددوست، علی، جهانبخش اصل، سعید. ۱۴۰۱. ارزیابی دقت مدل‌های CMIP6 برای شبیه‌سازی دما و بارش حوضه آبریز دریاچه ارومیه. پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، ۳(۱۱)، صفحات ۳۰-۱۷.
- علیجانی، بهلول، ۱۳۷۴. نقش کوه‌های البرز در توزیع ارتفاعی بارش، فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، صفحات ۳۸-۵.
- Afsari, R., Nazari-Sharabian, M., Hosseini, A., & Karakouzian, M. (2024). A CMIP6 Multi-Model Analysis of the Impact of Climate Change on Severe Meteorological Droughts through Multiple Drought Indices—Case Study of Iran's Metropolises. *Water*, 16(5), 711
- Ahmed, M., Smith, A. B., & Liu, J. 2019. Statistical validation of climate models for extreme precipitation events. *Climate Research*, 79(3), 273-286
- Allen, M. R., & Ingram, W.J. 2002. Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle. *Nature*, 419(6903), 224-232.
- Almazroui, M., Saeed, F., Saeed, S., Islam, M., Ismail, M., Klutse, N., & Siddiqui, M. 2020. Projected change in temperature and precipitation over Africa from CMIP6. *Earth Systems and Environment*, 4(3), 455-475.
- Brown, S., & Taylor, K.E. 2020. High emission scenarios and their impact on seasonal precipitation patterns: A comparative study using SSP5-8.5. *Climatic Change*, 162(2), 65-85.
- Cao, L., Xu, C., Suo, N., Song, L., & Lei, X.V. 2023. Future dry-wet climatic characteristics and drought trends over arid Central Asia. *Frontiers in Earth Science*, 11.
- Chen, H., Liu, J., & Wang, Y. 2021. Evaluation of CMIP6 models in simulating precipitation patterns across regions with high rainfall variability. *Journal of Climate Modeling*, 45(8), 1520-1538.
- Chen, H., Liu, J., & Zhang, W. 2023. Evaluating the performance of climate models using sensitivity and stability analyses: A focus on ACCESS-ESM1-5 and MIROC6. *Journal of Climate Dynamics*, 60(4), 550-575.
- Congalton, R. G., & Green, K. 2019. Assessing the accuracy of remotely sensed data: Principles and practices (3rd ed.). CRC Press.

18. Evans, J. P., Ekström, M., & Ji, F. 2018. Bias-correction techniques for improving climate model performance: An evaluation of CMIP6 models. *International Journal of Climatology*, 38(5), 2005-2021.
19. Filonchyk, M., Peterson, M. P., Zhang, L., Hurynovich, V., & He, Y. 2024. Greenhouse gases emissions and global climate change: Examining the influence of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, and N<sub>2</sub>O. *Science of the Total Environment*, 935, 173359.
20. Gleckler, P. J., Taylor, K. E., & Doutriaux, C. 2008. Performance metrics for climate models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 113(D6), D06104.
21. Helton, J. C., & Davis, F.J. 2003. Monte Carlo-based sensitivity analysis of complex climate models. *Reliability Engineering & System Safety*, 79(1), 28-41.
22. Helton, J. C., Johnson, J. D., & Oberkampf, W.L. 2006. An introduction to uncertainty and sensitivity analysis in the assessment of performance of complex systems. *Reliability Engineering & System Safety*, 91(10-11), 154-203.
23. Hlaing PT, Humphries UW, Waqas M. (2024). Hydrological model parameter regionalization: Runoff estimation using machine learning techniques in the Tha Chin River Basin, Thailand. *MethodsX*, 13:102792.
24. Hodson, T. O. (2022). Root-mean-square error (rmse) or mean absolute error (mae): when to use them or not. *Geoscientific Model Development*, 15(14), 5481-5487
25. Huang, Q., & Wang, L. 2021. Evaluating the limitations of IPSL-CM6A-LR and BCC-CSM2-MR models in high emission scenarios. *International Journal of Climate Research*, 49(7), 1020-1040.
26. Ideki, O. 2024. Evaluation of bias-corrected GCM CMIP6 simulation of sea surface temperature over the Gulf of Guinea. *Climate*, 12(2), 19.
27. Jones, R., Baker, T., & Smith, A. 2019. Impact of accuracy metrics on stability of climate predictions: A comprehensive review. *Journal of Climate Analysis*, 36(4), 550-570.
28. Jones, R., Taylor, K., & Smith, A. 2018. Evaluation of sensitivity metrics (S1 and ST) in complex climate models: A focus on MIROC6 performance. *Journal of Climate Science*, 32(5), 1456-1480.
29. Lee, J., Park, S., & Kim, H. 2021. Impact of greenhouse gas emissions on climate variability and seasonal precipitation fluctuations. *Journal of Environmental Science and Policy*, 124, 85-105.
30. Lee, S., Kim, H., & Park, J. 2019. Correlation of absolute error metrics with model performance in climate simulations. *Environmental Modelling & Software*, 120, 104499.
31. Lee, S., Park, J., & Kim, H, 2022, Assessing the accuracy and stability of high emission scenarios (SSP5-8.5) in climate models: A comparative study. *Environmental Modelling & Software*, 145, 105122.
32. Londhe, D. S., Katpatal, Y.B., & Bokde, N.D. 2023. Performance assessment of bias correction methods for precipitation and temperature from CMIP5 model simulation. *Applied Sciences*, 13, 9142.
33. López, R. 2020. Performance assessment of MIROC6 and ACCESS-ESM1-5 in rainfall simulation for diverse climatic regions. *Climate Dynamics*, 54(2), 880-895.
34. López, R., Jiménez, J., & Garcia, F. 2020. Impact of bias correction on the stability of CMIP6 climate models across diverse regions. *Climate Research*, 75(2), 145-160.
35. Lu, K., Arshad, M., Ma, X., Ullah, I., Wang, J., & Shao, W. 2022. Evaluating observed and future spatiotemporal changes in precipitation and temperature across China based on CMIP6-GCMs. *International Journal of Climatology*, 42(15), 7703-7729.
36. Maraun, D., Widmann, M., & Gutmann, E. 2017. Statistical bias correction of climate model simulations: A review and analysis of common methods. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 8(2), e469.
37. Miller, A., & Tran, V. 2016. Advanced techniques for bias correction in climate models: A comprehensive guide. *Journal of Climate Dynamics*, 34(2), 213-230.

38. Miller, A., & Zhao, Y. 2021. Evaluating the role of PBIAS in climate model selection and performance assessment. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(9), e2021JD034567.
39. Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(3), 885-900.
40. Nica, A., Popescu, A., & Ibanescu, D. 2019. Human influence on the climate system. *Natural Sciences*, 8(15), 209-215.
41. Oad, S., Imteaz, M. A., & Mekanik, F. (2023). Artificial neural network (ann)-based long-term streamflow forecasting models using climate indices for three tributaries of goulburn river, australia. *Climate*, 11(7), 152.1-21.
42. Oh, S. 2024. Significant reduction of unequal population exposure to climate extremes by achieving carbon neutrality. *Earth's Future*, 12(4).
43. Oyelakin, R. 2024. Analyzing urban flooding risk with CMIP5 and CMIP6 climate projections. *Water*, 16(3), 474.
44. Peng, S., Wang, C., & Li, Z. 2023. Climate change multi-model projections in CMIP6 scenarios in Central Hokkaido, Japan. *Scientific Reports*, 13, 230.
45. Pepin, N. C., Arnone, E., Gobiet, A., Haslinger, K., Kotlarski, S., & Adler, C. 2022. Climate changes and their elevational patterns in the mountains of the world. *Reviews of Geophysics*, 60(1), 1-40.
46. Petrova, D. 2024. Future precipitation changes in California: Comparison of CMIP5 and CMIP6 intermodel spread and its drivers. *International Journal of Climatology*, 44(7), 2207-2229.
45. Prakash, R., Smith, A., & Gupta, M. 2018. Socio-economic pathways and climate implications: A comparative study of SSP scenarios. Elsevier.
47. Qi, W. 2024. Decreased river runoff on the Mongolian plateau since around 2000. *Landscape Ecology*, 39(4), 1-17.
48. Rozoff, C.M., & Alessandrini, S. 2022. A comparison between analog ensemble and convolutional neural network empirical-statistical downscaling techniques for reconstructing high-resolution near-surface wind. *Energies*, 15, 1718.
49. Rubinstein, R. Y., & Kroese, D. P. (2016). *Simulation and the Monte Carlo Method* (3rd ed.). Wiley. PP 432.
50. Saltelli, A., Chan, K., & Scott, E. M. 2000. *Sensitivity analysis*. John Wiley & Sons. PP 475.
51. Saltelli, A., Ratto, M., Andres, T., Campolongo, F., Cariboni, J., Gatelli, D., & Tarantola, S. 2010. *Global sensitivity analysis: The primer*. John Wiley & Sons. PP 304.
52. Saltelli, A., Tarantola, S., & Campolongo, F. 2008. *Sensitivity analysis in practice: A guide to assessing scientific models*. Wiley. PP 232.
53. Samantaray, A. K., Mooney, P. A., & Vivacqua, C.A. 2023. Bergen metrics: Composite error metrics for assessing performance of climate models using EURO-CORDEX simulations. *Geoscientific Model Development*, 17, 3321-3339.
54. Samantaray, A. K., Mooney, P. A., & Vivacqua, C. A. 2023. Bergen metrics: Composite error metrics for assessing performance of climate models using EURO-CORDEX simulations. *Geoscientific Model Development*, 17, 3321-3339.
55. Sellar, A., Walton, J., Jones, C., Wood, R., Abraham, N. L., & Andrejczuk, M. 2020. Implementation of U.K. Earth system models for CMIP6. *Journal of Advances in Modeling Earth Earth*
56. Shahi, S., Hosseini, K., & Mousavi, S.F. (2024). Assessing the Effects of Climate Change on Temperature and Precipitation using CMIP6 models (case study: Damghan, Iran). *Journal of Hydraulic and Water Engineering*, 1(2), 163-177.
57. Shukla, K., & Attada, R. 2023. CMIP6 models informed summer human thermal discomfort conditions in Indian regional hotspot. *Scientific Reports*, 13(1), 1-14.

58. Smith, A., Johnson, P., & Wang, L., 2021, Impacts of high emission scenarios (SSP5-8.5) on seasonal precipitation patterns and water resources management. *Journal of Climate Impact and Sustainability*, 39(3), 120-150.
59. Smith, A., Lee, J., & Brown, R. 2022. Evaluating seasonal precipitation changes under intermediate emission scenarios (SSP2-4.5): Implications for water resource management. *Journal of Climate Research*, 48(2), 100-120.
60. Sobol, I. M, 1993, Sensitivity analysis for nonlinear mathematical models. *Mathematical Modeling and Computational Experiment*, 1(4): 407-414.
61. Song, Y., Chung, E., & Shahid, S. 2021. Spatiotemporal differences and uncertainties in projections of precipitation and temperature in South Korea from CMIP6 and CMIP5 general circulation models. *International Journal of Climatology*, 41(13), 5899-5919.
62. Song, Y., Chung, E., & Shahid, S, 2021, Spatiotemporal differences and uncertainties in projections of precipitation and temperature in South Korea from CMIP6 and CMIP5 general circulation models. *International Journal of Climatology*, 41(13), 5899-5919.
63. *Systems*, 12(4), 2-27.
64. Taylor, K.E. 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D7), 7183-7192.
65. Taylor, K.E. 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D7), 7183-7192.
66. Teutschbein, C., & Seibert, J, 2012. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *Journal of Hydrology*, 456-457, 12-29.
67. Wang, H. 2024. Enhanced performance of CMIP6 climate models in simulating historical precipitation in the Florida peninsula. *International Journal of Climatology*, 44(8), 2758-2778.
68. Wilson, K., Johnson, P., & Wang, L. 2017. Comprehensive sensitivity analysis for determining climate model stability using Sobol indices. *Reliability Engineering & System Safety*, 158, 180-195.
69. Wilson, K., Johnson, P., & Wang, L, 2017. Comprehensive sensitivity analysis for determining climate model stability using Sobol indices. *Reliability Engineering & System Safety*, 158, 180-195.
70. Willmott, C.J., & Matsuura, K. (2005). Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research*, 30, 79-82.
71. Wu, Y, 2024, Hydrological projections under CMIP5 and CMIP6: Sources and magnitudes of uncertainty. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 105(1), E59-E74.
72. Yazdandoost, F., Moradian, S., Izadi, A., & Aghakouchak, A. (2021). Evaluation of CMIP6 precipitation simulations across different climatic zones: Uncertainty and model intercomparison. *Atmospheric Research*, 250, 105369.
73. Zabihi, O., & Ahmadi, A. (2024). Multi-criteria evaluation of CMIP6 precipitation and temperature simulations over Iran. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 52, 101707.
74. Zhu, H., Chen, S., Li, R., Feng, Y., Joldosh, A., ZhongHang, X., ... & Ou, J. (2023). Study of the influence of meteorological factors on hfmd and prediction based on the lstm algorithm in fuzhou, china. *BMC Infectious Diseases*, 23(1), 1-16.