



Forecasting and Trend Analysis of Precipitation in the Navrud Watershed Based on CMIP6 Climate Models

Mousa Abedini *, Tayebbeh Babaei olam¹

¹ Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 03 February 2026

Revised: 21 April 2026

Accepted: 25 April 2026

Available Online: 25 April 2026

Keywords:

CMIP6 Climate Models

Bias Correction / Statistical
Downscaling

Precipitation Projection

Water Resources
Management

SSP2-4.5 and SSP5-8.5
Scenarios

ABSTRACT

Accurate precipitation forecasting is crucial for water resource management and preparedness for climatic events. In this regard, this research utilized five selected CMIP6 models to project the behavior of daily precipitation for stations within the Navrud watershed. The model data were downscaled using three bias correction methods (Local Intensity Scaling, Distribution Mapping, and Power Transformation) in the CMhyd software. During the evaluation of these methods' accuracy based on statistical indices (R^2 , RMSE, MAE, MSE, and NSE), the Local Intensity Scaling method demonstrated the best performance in reproducing the observed precipitation patterns. Finally, the MPI-ESM1-2-HR, MRI-ESM2-0, MIROC6, CNRM-CM6-1, and EC-Earth3-Veg models were chosen as the top-performing models and were employed in an ensemble model to predict precipitation for the next 30-year period (2025–2054) under SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios. The results indicated that the spatial pattern of precipitation in the Navrud watershed during the baseline period (1985–2014) decreased from east (Kharjagil station) to west (Nav station), and the ensemble model successfully simulated this spatial precipitation pattern. However, the ensemble model's projection for the future period (2025–2054), while maintaining the overall precipitation distribution pattern, showed that according to the SSP2-4.5 scenario, precipitation at Khelian, Kharjgil, and Nav stations will decrease by 10.9, 9.3 and 5.5% respectively, and according to the SSP5-8.5 scenario, it will decrease by 8.3%, 8.01%, and 3.4% compared to the baseline period. Furthermore, drought periods are expected to intensify from May to October. Trend analysis using the modified Mann-Kendall test and Sen's slope estimator indicated the absence of a statistically significant trend in the daily precipitation of the stations.

* Corresponding author: Mousa Abedini

E-mail address: Abedini@uma.ac.ir

How to cite this article: Abedini, M., & Babaei olam, T. (2026). Forecasting and Trend Analysis of Precipitation in the Navrud Watershed Based on CMIP6 Climate Models. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 15(2), 229-251. <https://doi.org/10.22067/geoe.h.2026.97677.1647>



©2026 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Extended Abstract

Introduction

Climate change, as one of the most significant global challenges, has widespread impacts on the environment, human livelihoods, and economic sustainability. This phenomenon can particularly lead to social and economic instability in regions whose economies depend on climate-sensitive sectors such as agriculture. Therefore, understanding past, present, and future climate trends, variability, and changes is essential for designing strategies to mitigate the adverse effects of this phenomenon. Among the various climate elements, precipitation, as a key hydro-climatic variable, plays a vital role in agricultural production and water resources management, directly influencing the social, economic, and environmental sustainability of regions. Climate change can cause significant fluctuations in precipitation patterns, resulting in floods, droughts, and landslides. These fluctuations also affect drinking water supply, groundwater and surface water resources, and agricultural productivity, posing challenges to water resources management. Accordingly, accurate and long-term precipitation projections form a fundamental basis for water resource planning, agricultural infrastructure design, natural disaster risk management, and the development of mitigation policies.

Material and Methods

In this study, daily precipitation data from three rain gauge stations Khalian, Kharejgil, and Nav were obtained from the Gilan Regional Water Company. To simulate future precipitation, five models from the CMIP6 ensemble, including MPI-ESM1-2-HR, MRI-ESM2-0, MIROC6, CNRM-CM6-1, and EC-Earth3-Veg, were selected from the ESGFDL database. Daily precipitation simulations for the historical period were then conducted using the outputs of the selected models and three bias-correction methods Local Intensity Scaling, Distribution Mapping, and Power Transformation implemented in the CMhyd software. After applying these methods, the optimal bias-correction technique and the best-performing models were identified based on evaluation metrics, including the coefficient of determination (R^2), mean absolute error (MAE), mean squared error (MSE), root mean squared error (RMSE), and Nash–Sutcliffe efficiency (NSE). Subsequently, to integrate the results of the selected models and reduce uncertainty, the Homadi model was applied using a rank-based approach and weighting of the top-performing models. Future precipitation projections for a 30-year period (2025–2054) were then generated based on the Homadi model outputs under two climate change scenarios: SSP2-4.5 and SSP5-8.5. To analyze the spatiotemporal variations in precipitation, mean monthly precipitation graphs for the studied stations were plotted, and annual precipitation totals were spatially mapped. Finally, the significance of precipitation trends during the baseline period and future horizon was assessed using the modified Mann Kendall test and Sen's slope estimator.

Results and Discussion

In this study, precipitation simulation and projection for the Navrud watershed were carried out using five selected CMIP6 climate models and three bias-correction methods. To evaluate model performance, network-averaged statistical error metrics derived from station observations were employed. The results indicated that the Local Intensity Scaling bias-correction method outperformed the Power Transformation and Distribution Mapping approaches in terms of accuracy. Accordingly, the MPI-ESM1-2-HR, MRI-ESM2-0, MIROC6, CNRM-CM6-1, and EC-Earth3-Veg models, when corrected using the Local Intensity Scaling method, showed the highest consistency with observed data and were subsequently incorporated into the Homadi ensemble model based on their respective ranks and assigned weights for further analyses. Analysis of the spatial distribution of mean annual precipitation during the baseline period (1985–2014) revealed a decreasing gradient from east to west across the watershed, with the Kharejgil station identified as the wettest location and the Nav station as the driest. The Homadi model successfully reproduced this spatial pattern for the historical period with acceptable accuracy. Future precipitation projections for the period 2025–2054 under the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios indicate that, although the spatial pattern of precipitation is largely preserved, the absolute values of annual

precipitation are expected to decline at all stations. Notably, the reduction is projected to be slightly more pronounced under the intermediate scenario than under the pessimistic scenario. Such changes may have significant implications for regional water resources and intensify water stress in the study area. The analysis of monthly precipitation suggests a relative stability in the seasonal precipitation regime across all three stations. Autumn months, particularly October and November, continue to contribute the largest share of annual precipitation, whereas summer months—especially July and August remain the driest period of the year. Nevertheless, month-to-month variations differ depending on the climate scenario, and a relative increase in precipitation is projected for some colder months. The results of the modified Mann–Kendall test applied to daily precipitation at all three stations indicate that no statistically significant increasing or decreasing trends are evident in either the historical or future periods. The very small Sen's slope values, Z-statistics close to zero, and high p-values suggest that precipitation variability is largely random and does not follow a distinct climatic trend. Overall, the findings confirm the effectiveness of the Homadi model in representing precipitation patterns and highlight the necessity of climate-adaptive planning to ensure sustainable water resource management in the Navrud watershed.

Conclusion

Analysis of climatic data for the Navrud watershed during the period 2005–2024 indicates that the region has experienced notable changes in precipitation, temperature, and soil moisture. The spatial pattern of precipitation reveals a concentration of rainfall in the eastern and northern parts of the watershed, with decreasing amounts toward the central and southwestern areas. Temporally, precipitation exhibited an increasing trend up to approximately 2020, followed by a marked decline in recent years. In contrast, temperature shows a consistent and sustained upward trend across the entire watershed, with an average increase of approximately 2.76 °C. This warming has been more pronounced in the eastern part of the basin, intensifying evapotranspiration processes and contributing to a reduction in soil moisture. Despite a relative increase in mean soil moisture, its interannual variability has been considerable, particularly during low-precipitation years. The De Martonne aridity index further characterizes the climate of the watershed as ranging from arid to semi-arid in the central and eastern regions, while indicating relatively more humid conditions in the northwestern part of the basin. The results of precipitation simulations using CMIP6 models demonstrate that the Local Intensity Scaling bias-correction method provides the best performance, and that the selected models are capable of accurately reproducing the spatial precipitation pattern of the baseline period. Projections for the future period (2025–2054) suggest that, although the overall precipitation pattern is preserved, a gradual decline in precipitation is expected at all stations, with a more pronounced reduction under the SSP2-4.5 scenario. The modified Mann–Kendall test further confirms the absence of statistically significant trends in daily precipitation. Overall, while the seasonal precipitation regime is largely maintained, reductions in summer precipitation and shifts in seasonal distribution may pose serious challenges for water resources management and climate change adaptation in the Navrud watershed.



دسترسی آزاد

نشریه علمی جغرافیا و مخاطرات محیطی

DOI: 10.22067/GEOEH.2026.97677.1647

مقاله پژوهشی



پیش‌نگری و روند بارش‌های حوضه آبخیز ناورود بر اساس مدل‌های اقلیمی CMIP6

موسی عابدینی^{۱*}، طیبه بابایی اولم^۱^۱ گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۱۴ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۰۵	پیش‌بینی دقیق بارش برای مدیریت منابع آبی و آمادگی در برابر رویدادهای اقلیمی، امری حیاتی است. در همین راستا، این پژوهش به منظور پیش‌نگری رفتار بارش روزانه ایستگاه‌های موجود در حوضه آبخیز ناورود، از پنج مدل منتخب CMIP6 بهره گرفته شد. داده‌های مدل‌ها با بهره‌گیری از سه روش تصحیح اریبی (Local Intensity Scaling، Distribution Mapping و Power Transformation) در نرم‌افزار CMhyd مقیاس‌کاهی شدند. در ارزیابی دقت این روش‌ها بر اساس شاخص‌های آماری R^2، RMSE، MAE، MSE و NSE روش Local Intensity Scaling بهترین عملکرد را در بازتولید الگوی مشاهداتی بارش نشان داد. در نهایت، مدل‌های MPI-ESM1-2-HR، MRI-ESM2-0، MIROC6، EC-Earth3-Veg و CNRM-CM6-1 به عنوان مدل‌های برتر انتخاب و در ترکیب مدل همادی برای پیش‌بینی بارش دوره ۳۰ سال آینده (۲۰۲۵-۲۰۵۴) تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به کار گرفته شدند. نتایج نشان داد الگوی مکانی بارش در حوضه آبخیز ناورود طی دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۸۵) از شرق (ایستگاه خرجگیل) به سمت غرب (ایستگاه ناو) کاهش یافته است و مدل همادی نیز توانست این الگوی مکانی بارش را به خوبی شبیه‌سازی نماید. اما پیش‌نگری مدل همادی برای دوره آینده (۲۰۲۵-۲۰۵۴)، ضمن حفظ الگوی کلی توزیع بارش، نشان داد بر اساس سناریوی SSP2-4.5، بارش در ایستگاه‌های خلیان، خرجگیل و ناو به ترتیب ۱۰/۹، ۳/۹ و ۵/۵ درصد و طبق سناریوی SSP5-8.5 به میزان ۸/۳، ۸/۰۱ و ۳/۴ درصد نسبت به دوره پایه کاهش خواهد یافت. همچنین انتظار می‌رود دوره‌های کم‌آبی از اردیبهشت تا مهر شدت بیشتری پیدا کنند. تحلیل روند تغییرات با آزمون‌های من-کندال اصلاح شده و شیب سن نیز حاکی از عدم وجود روند معنادار آماری در بارش روزانه ایستگاه‌ها است.
کلمات کلیدی: مدل‌های اقلیمی CMIP6 اصلاح بایاس / ریزمقیاس‌نمایی آماری پیش‌بینی بارش مدیریت منابع آب سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5	

مقدمه

تغییرات اقلیمی یکی از چالش‌های اساسی جهانی است که تأثیرات گسترده‌ای بر محیط زیست، معیشت انسان‌ها و پایداری اقتصادی دارد (Qazizade, Omidvar, Mozaffari & Mazidi, 2025). این پدیده به ویژه در مناطقی که اقتصادشان به بخش‌های وابسته به شرایط اقلیمی مانند کشاورزی متکی است، می‌تواند منجر به ناپایداری اجتماعی و اقتصادی شود. بنابراین، درک روندها، نوسانات و تغییرات اقلیمی گذشته، حال و آینده برای طراحی راهکارهای کاهش اثرات منفی این پدیده حیاتی است (Baycan, Sonmez & Tuncer Evcil, 2025). در میان عناصر مختلف اقلیمی، بارش به عنوان مهم‌ترین پدیده هیدرو-اقلیمی، نقش کلیدی در تولیدات کشاورزی و مدیریت منابع آب ایفا می‌کند و تأثیر مستقیمی بر پایداری اجتماعی، اقتصادی و محیط‌زیستی مناطق دارد. تغییر اقلیم می‌تواند الگوهای بارش را دچار نوسانات شدید کرده و منجر به وقوع سیلاب‌ها، خشکسالی‌ها و زمین‌لغزش‌ها شود (Maleki Morsht, Salahi & Saber, 2025). این نوسانات همچنین بر تأمین آب آشامیدنی، منابع آب زیرزمینی و سطحی و تولیدات کشاورزی اثر گذاشته و مدیریت منابع آب را با چالش مواجه می‌سازد (Vosoughi Rad, Mirmousavi & Asakereh, 2025). در نتیجه، پیش‌بینی دقیق و بلندمدت بارش، پایه‌ای اساسی برای برنامه‌ریزی مدیریت منابع آب، طراحی زیرساخت‌های کشاورزی، مدیریت ریسک بلایای طبیعی و تدوین سیاست‌های کاهش آسیب فراهم می‌آورد (Ayugi, Tan, Gnitou, Ojara & Ongoma, 2020). یک سیستم پیش‌بینی مطمئن بارش بلندمدت می‌تواند در تصمیم‌گیری‌های سرمایه‌گذاری، مدیریت ریسک و تدوین سیاست‌های کاهش آسیب در بخش‌های مختلف مؤثر باشد و امکان طراحی راهکارهای کارآمد برای مقابله با اثرات تغییر اقلیم را میسر سازد. شناخت دقیق روندها و نوسانات بارش بلندمدت، اطلاعات لازم برای مدیریت پایدار منابع آب، برنامه‌ریزی کشاورزی و کاهش آسیب‌های ناشی از رویدادهای شدید اقلیمی را فراهم می‌آورد و مبنایی برای ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر هیدرولوژی و اکوسیستم‌ها محسوب می‌شود (Wang et al., 2021; Fan, Duan, Shen, Wu & Xing, 2022).

مدل‌های اقلیمی، به ویژه مدل‌های جهانی گردش عمومی^۱ (GCMs) که در قالب پروژه‌های مقایسه مدل‌های جفت‌شده^۲ (CMIP) توسعه یافته‌اند، ابزارهای کلیدی برای پیش‌بینی تغییرات اقلیم آینده به شمار می‌روند. با این حال، دقت پیش‌بینی‌های این مدل‌ها تا حد زیادی به توانایی آن‌ها در شبیه‌سازی اقلیم تاریخی وابسته است، زیرا سوگیری‌های سیستماتیک می‌تواند باعث پیش‌بینی‌های نادرست رخدادهای شدید اقلیمی شود (Oduro et al., 2022; Bian et al., 2025). مدل‌های CMIP در فازهای مختلف، از جمله CMIP6، با هدف بهبود دقت پیش‌بینی‌ها و رفع محدودیت‌های فازهای قبلی توسعه یافته‌اند (Kim, Shin, Lee, Park & Sung, 2025).

CMIP6 علاوه بر تغییر سال مرجع و تابش ارسالی، شامل سناریوهای اجتماعی-اقتصادی مشترک^۳ (SSPs) است که با سناریوهای تابش رادیواکتیو قبلی^۴ (RCPs) ترکیب شده‌اند (Yang & Li, 2025). مطالعات نشان داده‌اند که مدل‌های CMIP6 در شبیه‌سازی دما، بارش و نوسانات فصلی نسبت به مدل‌های پیشین بهبود یافته‌اند و توانایی بهتری در بازتولید ویژگی‌های میان‌مدت و بلندمدت اقلیمی دارند (Duong, Song & Chhin, 2023). با این حال، خروجی‌های GCM غالباً از نظر مکانی و زمانی دارای وضوح پایین هستند و نیاز به کاهش مقیاس آماری دارند تا با مقیاس محلی همخوانی پیدا کنند به عبارتی دیگر کاهش مقیاس آماری بر پایه روابط تجربی بین داده‌های مشاهده شده اقلیمی و پیش‌بینی‌کننده‌های بزرگ‌مقیاس مدل‌ها است و امکان شبیه‌سازی دقیق‌تر بارش ماهانه و روزانه را فراهم می‌کند (Oyelakin, Yang & Krebs, 2024).

1- General Circulation Models (GCMs)

2- Coupled Model Intercomparison Project (CMIP)

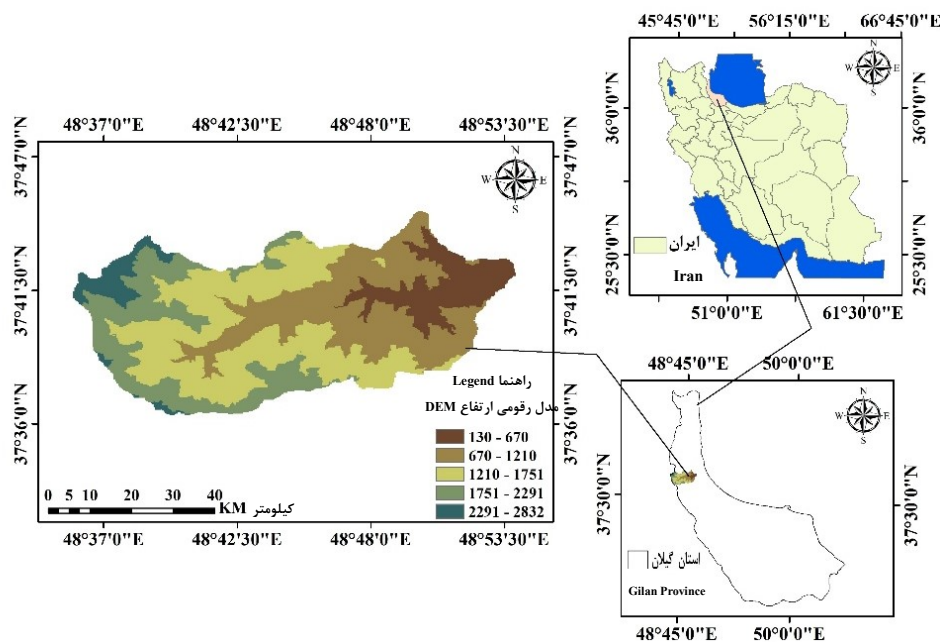
3- Shared Socioeconomic Pathways (SSPs)

4- Representative Concentration Pathways (RCPs)

پژوهش‌های انجام گرفته در ایران بیانگر روند کاهشی بارش، روند افزایش دما و کاهش منابع آبی تحت اثر تغییر اقلیم است (Fallah Ghalhari, Yousefi, Hosseinzadeh, Alimardani & Reyhani, 2019; Zarrin, & Dadashi-Rudbari, 2020; Sharafati, 2025; Nabaei & Shahid, 2020; Shahi & Salahi, 2025). از سنجه‌های آماری که دارای تنوع زیادی هستند، برای ارزیابی و اعتبارسنجی مدل‌های اقلیمی استفاده می‌شود؛ مقادیر سنجه‌های R^2 , R , NSE , KGE هرچه به عدد یک نزدیک باشند از قابلیت بالای مدل است در مقابل MAE و $RMSE$ هر چه به عدد صفر نزدیک باشند از دقت و توانایی بالای مدل برخوردار هستند (Shahi & Salahi, 2025; Hamidianpour & Shoja, 2022). بنابراین در این خصوص تاکنون مطالعاتی در داخل و خارج از کشور انجام شده است برای مثال در ایران، بابائیان و همکاران (Babaeian et al., 2023)، چشم‌انداز بارش ایران در قرن ۲۱ را با به کارگیری مقیاس کاهی آماری برون‌داد مدل‌های منتخب CMIP6 توسط نرم‌افزار CMHyd مورد مطالعه قرار داده‌اند. جهانبخش اصل و همکاران (Jahanghbaksh-Asl, 2023; Rezaei-Banafsh, Khorshiddust, Rostamzadeh & Ostadi, 2023)، پیش‌نگری بارش در شمال غرب ایران را بر اساس پروژه مقایسه متقابل مدل‌های جفت‌شده فاز ششم پرداخته‌اند. رضائی و همکاران (Rezaei, Pashapour & Sadeghi, 2024)، به ارزیابی عملکرد مدل‌های CMIP6 و پیش‌نگری تغییرات دما و بارش در ایران پرداخته‌اند. ساری‌صراف و همکاران (Sari-Sarraf, 2024; Rostamzadeh & Mohammadi, 2024)، پیش‌نگری بارش در شمال غرب ایران را با استفاده از مدل‌های CMIP6 مورد مطالعه و بررسی قرار داده‌اند. شاهی و صلاحی (Shahi & Salahi, 2025)، پیش‌بینی بارش در شمال ایران را بر اساس مدل‌های منتخب CMIP6 مورد ارزیابی و مطالعه قرار داده‌اند. ملکی‌مرشت و همکاران (Maleki Morsht et al., 2025)، پیش‌نگری دمای بیشینه دوره‌های آبی در شمال غرب ایران را براساس برون‌داد مدل‌های اقلیمی CMIP6 بررسی کرده‌اند. در پژوهشی دیگر وثوقی‌راد و همکاران (Vosoughi Rad et al., 2025)، جهت ارزیابی دقت مدل‌های شبیه‌ساز اقلیمی CMIP6 با هدف پیش‌بینی بارش در ایستگاه‌های پربارش استان گیلان پرداخته‌اند. نوحانی و همکاران (Nohani, Babaali & Dehghani, 2025)، ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر دبی رودخانه با را با استفاده از مدل CMIP6 در ایستگاه هیدرومتری کشکان پرداخته‌اند. در خارج نیز وانگ (Wang, 2024)، از مدل‌های CMIP6 به منظور شبیه‌سازی الگوهای بارش در فلوریدای آمریکا بهره گرفته و مورد بررسی قرار داده است. کیم و همکاران (Kim et al., 2025)، به منظور بررسی تغییرات الگوهای بارش آینده کره جنوبی از مدل‌های CMIP6 استفاده کرده‌اند. همچنین از این قبیل مطالعات می‌توان، هی و همکاران (He, Chen, Sun & Liu, 2023)، در رودخانه مروارید چین، یانگ و همکاران (Yang et al., 2023)، در منطقه گیلیان چین، دونگ و همکاران (Duong et al., 2023)، در کشور کامبوج، انیو و همکاران (Enyew, Sahl, 2024; Tarekegn, Hama & Debele, 2024)، در حوضه نیل آبی علیا، اتیوپی، یانگ و لی (Yang & Li, 2025) در چین، بیان (Bian et al., 2025)، در جنوب غربی چین، بایجان (Baycan et al., 2025)، در منطقه مدیترانه اشاره کرد. برآیند مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که مدل‌های اقلیمی نسل ششم نقش کلیدی در شبیه‌سازی و پیش‌نگری تغییرات آبی بارش و دما ایفا می‌کنند و نتایج آن‌ها بیانگر تغییرپذیری قابل توجه مکانی و زمانی این متغیرها در مقیاس‌های منطقه‌ای است. الگوهای پیش‌بینی شده حاکی از آن است که شدت، فراوانی و توزیع بارش در آینده به صورت یکنواخت تغییر نخواهد کرد و در بسیاری از مناطق، افزایش عدم قطعیت، به ویژه در مقیاس‌های محلی، قابل مشاهده است. همچنین ارزیابی عملکرد مدل‌ها نشان می‌دهد که دقت شبیه‌سازی به شدت وابسته به شرایط اقلیمی منطقه، انتخاب مدل مناسب و به کارگیری روش‌های مؤثر مقیاس کاهی است. در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که هر چند مدل‌های CMIP6 توانایی مناسبی در بازنمایی روندهای کلی اقلیم آینده دارند، اما استفاده کاربردی از آن‌ها مستلزم ارزیابی منطقه محور، کاهش عدم قطعیت و تلفیق نتایج چندمدلی به منظور دستیابی به پیش‌نگری‌های قابل اتکاءتر برای مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی سازگاری با تغییرات اقلیمی است. بر این اساس، هدف اصلی پژوهش حاضر پیش‌نگری تغییرات بلندمدت بارش در حوضه آبخیز ناورود استان گیلان با استفاده از برون‌داد مدل‌های اقلیمی نسل ششم و تحلیل الگوهای زمانی و مکانی آن در دوره‌های آبی است.

منطقه مورد مطالعه

حوضه آبخیز ناورود (شکل ۱) با مساحت ۲۷۴ کیلومتر مربع واقع در کوه‌های تالش است که بین ۴۸ درجه و ۳۵ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۵۴ دقیقه شرقی و ۳۷ درجه و ۳۶ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۴۵ دقیقه شمالی قرار گرفته است. این حوضه، دارای مساحت حدود ۲۷۰ کیلومتر مربع بوده و پوشش گیاهی آن از دو تیپ جنگل و مرتع تشکیل شده است. حوضه آبخیز ناورود به دلیل قرار گرفتن در دامنه شمالی رشته کوه‌های البرز و نیز موقعیت کوهستانی آن دارای بارندگی‌های نسبتاً خوبی در طول سال است که میانگین بارش سالانه در کل حوضه ۸۳۶ میلی‌متر و متوسط درجه حرارت سالانه ۱۰/۷ درجه سانتی‌گراد می‌باشد اسدی و همکاران (Asadi, Jafari, Ashrafzadeh & Sharifi, 2018).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز ناورود در استان گیلان و ایران

Fig.1. Geographic location of the Navrud watershed in Gilan Province, Iran

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، ابتدا داده‌های بارش روزانه سه ایستگاه باران‌سنجی موجود در حوضه آبخیز ناورود شامل (خلیان، خرجگیل و ناو) برای دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۱۴) از شرکت آب منطقه‌ای استان گیلان دریافت شد. این داده‌ها به عنوان مرجع مشاهداتی جهت ارزیابی عملکرد مدل‌های اقلیمی مورد استفاده قرار گرفتند. سپس، به منظور شبیه‌سازی بارش آینده، پنج مدل از مجموعه مدل‌های اقلیمی CMIP6 شامل EC-Earth3-Veg و CNRM-CM6-1، MIROC6، MRI-ESM2-0، MPI-ESM1-2-HR شامل CMIP6 پیشین مرتبط با پیش‌بینی بارش، عملکرد قابل قبولی از خود نشان داده و به عنوان مدل‌های برتر شناخته شده بودند از پایگاه داده ESGFDL^۱ انتخاب گردید. در گام بعد، در نرم‌افزار CMhyd داده‌های مدل‌های اقلیمی در قالب فایل‌های متنی و NetCDF فراخوانی شدند و بر اساس مختصات جغرافیایی هر ایستگاه فرآیند مقیاس‌کاهی آماری و تصحیح اریبی با استفاده از سه روش Local Intensity، Scaling، Distribution Mapping و Power Transformation بر روی داده‌های مدل‌های مورد مطالعه اجرا گردید. در نرم‌افزار مذکور، ابتدا داده‌های دیدبانی به همراه فایل‌های متادیتا شامل موقعیت جغرافیایی، ارتفاع و شناسه ایستگاه وارد شده، سپس داده‌های

1- <https://aims2.llnl.gov/search/cmip6/>

مدل‌های اقلیمی در پوشه‌های مجزا مربوط به دوره تاریخی و سناریوهای آینده سازمان‌دهی، و فرآیند تصحیح اریبی بر روی داده‌های استخراج شده از سلول‌های مدل اجرا شد. پس از ذخیره نتایج هر ایستگاه، داده‌های مقیاس‌کاهی شده با داده‌های مشاهداتی مقایسه شدند تا کارایی هر مدل در بازتولید بارش روزانه ارزیابی گردد. برای سنجش عملکرد مدل‌ها، شاخص‌های آماری شامل ضریب تعیین (R^2)، میانگین قدر مطلق خطا (MAE)، میانگین مربعات خطا (MSE)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و کارایی نش-ساتکلیف (NSE) به کار گرفته شدند و بهترین روش تصحیح اریبی انتخاب و بر حسب آن مدل‌های برتر نیز بر اساس شاخص‌های ارزیابی خطا تعیین شدند. در گام بعد، به منظور ترکیب نتایج مدل‌های منتخب و کاهش عدم قطعیت، مدل همادی با رویکرد مبتنی بر رتبه و بر اساس وزن‌دهی مدل‌های برتر اجرا شد. سپس، پیش‌نگری بارش برای یک دوره ۳۰ ساله آینده (۲۰۲۵-۲۰۵۴) بر اساس برون‌داد مدل همادی و تحت دو سناریوی تغییر اقلیم SSP2-4.5 و SSP5-8.5 انجام گرفت. نتایج در قالب نمودارهای میانگین ماهانه بارش و نقشه‌های پهنه‌بندی با روش IDW بارش سالانه تحلیل گردید تا تغییرات مکانی و زمانی بارش در افق آینده ارزیابی شود. در پایان، روند معناداری بارش در دوره پایه و آینده با بهره‌گیری از آزمون من-کندال اصلاح‌شده و شیب سن سنجیده شد.

مدل CMHyd

نرم‌افزار CMHyd که توسط رستجنز و همکاران (Rathjens, Bieger, Srinivasan, Chaubey & Arnold, 2016)، در دانشگاه پردو و در محیط پایتون توسعه یافته، ابزاری برای مقیاس‌کاهی و تصحیح اریبی داده‌های مدل‌های گردش کلی اقلیم (GCMs) با هدف به‌کارگیری در مدل‌سازی‌های هیدرولوژیکی است. این نرم‌افزار از هشت روش تصحیح اریبی استفاده می‌کند که شامل پنج روش برای بارش و چهار روش برای دما (بیشینه و کمینه) است و تصحیح اریبی در آن لزوماً به معنای تغییر تفکیک مکانی داده‌ها نیست. CMHyd از دو بخش اصلی تشکیل شده است: بخش پردازش (Processing) و بخش ترسیم (Plot)؛ در بخش پردازش، مراحل مختلفی از جمله ورود داده‌های دیدبانی (با فرمت ASCII) و شامل متادیتا مانند موقعیت جغرافیایی و ارتفاع ایستگاه‌ها، ورود داده‌های مدل اقلیمی (در قالب متنی یا NetCDF)، انتخاب مسیر خروجی داده‌های مقیاس‌کاهی شده و در نهایت اجرای فرآیند مقیاس‌کاهی و کنترل کیفیت داده‌ها انجام می‌شود. در این نرم‌افزار، برای هر دوره یا سناریوی اقلیمی باید دایرکتوری جداگانه‌ای شامل فایل‌های تاریخی و سناریو ایجاد شود و در تمام مراحل، پیام‌های خطا و هشدارها به صورت خودکار نمایش داده می‌شوند. از مزایای CMHyd می‌توان به سرعت بالا، ساختار منظم، قابلیت انتخاب روش‌های مختلف و کنترل دقیق داده‌ها اشاره کرد. با وجود آن‌که تمرکز نرم‌افزار بر بارش و دماست، با دقت کافی می‌توان از آن برای متغیرهای دیگر نیز استفاده کرد. همچنین باید توجه داشت که داده‌های تاریخی و آینده باید در سال‌های کبیسه شامل ۳۶۶ روز باشند، زیرا در غیر این صورت، داده‌ها در پیش‌نگری‌های بلندمدت دچار جابه‌جایی زمانی می‌شوند (Babaeian et al., 2023). در جدول ۱ به ترتیب روش‌های اختصاصی مقیاس‌کاهی آماری برای بارش و دما در نرم‌افزار CMHyd ارائه شده است.

تصحیح اریبی

خروجی‌های خام مدل‌های اقلیم جهانی معمولاً در میانگین و دامنه پیش‌بینی‌های خود دارای انحراف یا خطا هستند؛ از این رو، در بسیاری از پژوهش‌ها برای بهبود دقت نتایج و کاهش این خطاها از روش‌های تصحیح اریبی به عنوان بخشی از فرایند پس‌پردازش داده‌ها استفاده می‌شود فروتن و همکاران (Frotan, Salahi, Zeinali & Mesgari, 2025). در پژوهش حاضر از سه روش تصحیح اریبی استفاده شده که در ادامه هر کدام شرح داده می‌شود.

جدول ۱- روش‌های اختصاصی مقیاس‌کاهی آماری برای بارش و دما در نرم‌افزار CMHyd

Table 1- Specific statistical downscaling methods for precipitation and temperature implemented in the CMHyd software (Babaeian et al., 2023; Rathjens et al., 2016)

ردیف	روش مقیاس‌کاهی	بارش	دما
Row	Dimensionality Reduction Method	Precipitation	Temperature
۱	Linear Scaling (LS) (multiplicative) مقیاس‌بندی خطی (به صورت ضربی)	*	
۲	Linear Scaling (LS) (additive) مقیاس‌بندی خطی (به صورت افزایشی)		*
۳	Delta-Change (DC) correction (multiplicative) تصحیح دلتا (به صورت ضربی)	*	
۴	Delta-Change (DC) correction (additive) تصحیح دلتا (به صورت افزایشی)		*
۵	Precipitation Local Intensity (LI) scaling مقیاس‌بندی شدت محلی بارش	*	
۶	Power Transformation (PT) of precipitation تبدیل توانی بارش	*	
۷	Variance Scaling (VS) of temperature مقیاس‌بندی واریانس دما		*
۸	Distribution Mapping (DM) of precipitation and temperature نگاشت توزیع بارش و دما	*	*

روش مقیاس‌بندی شدت محلی بارش^۱

روش Local با اصلاح فراوانی وقوع و شدت بارش‌ها، به ویژه در داده‌هایی که دارای تعداد زیادی روزهای بارش سبک هستند، موجب بهبود کیفیت داده‌های خام می‌شود. این روش معمولاً در دو گام انجام می‌گیرد: در گام نخست، آستانه‌ای برای روزهای بارانی در هر ماه m (P_{thres,m}) از داده‌های خام تعیین می‌شود تا فراوانی مقادیر بالاتر از این آستانه با فراوانی روزهای بارانی در داده‌های مشاهده شده مطابقت داشته باشد. در گام دوم، ضریب مقیاس‌گذاری (sm) محاسبه می‌شود تا میانگین بارش پس از تصحیح با میانگین بارش مشاهده شده برابر گردد (رابطه‌های ۱ و ۲).

$$S_m = \frac{\mu(p_{obs.m,d} | p_{obs.m,d} > 0)}{\mu(p_{his.m,d} | p_{his.m,d} > P_{thres,m})} \quad (1)$$

(۲)

$$P_{*his/scemd} = \{ P_{his/scemd} * S_m \text{ } P_{hismd} > P_{thresm} \text{ } 0 \text{ } P_{hismd} < P_{thresm} \}$$

در این روابط، نماد μ بیانگر میانگین است، obs به داده‌های مشاهده شده، his به داده‌های تاریخی مدل و sce به داده‌های پیش‌بینی‌شده آینده در ماه و روز مورد نظر اشاره دارد (Frotan et al., 2025).

روش تبدیل توانی بارش^۲

روش تبدیل توان یک شیوه تصحیح اریبی غیرخطی با فرم نمایی x^b است که به منظور تنظیم واریانس سری‌های زمانی بارش به کار می‌رود. در این روش، پارامتر b که گونه‌ای تعیین می‌شود که ضریب تغییرات CV داده‌های شبیه‌سازی‌شده تصحیح شده با ضریب تغییرات داده‌های مشاهده شده برابر گردد. مقدار این پارامتر برای هر ماه m با استفاده از رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

$$f(b_m) = CV_m(X_{obs}(d)) - CV_m(X_{sim}^b(d)) \quad (3)$$

1- Precipitation Local Intensity Scaling

2- Power Transformation of Precipitation

در رابطه (۳) نماد obs به داده‌های مشاهده شده و sim به داده‌های شبیه‌سازی شده مدل اشاره دارد. متغیر d بیانگر بارش روزانه است و CV نسبت انحراف معیار σ به میانگین μ را نشان می‌دهد. پس از تعیین پارامتر b برای هر ماه، مقادیر تصحیح شده بارش روزانه با استفاده از رابطه (۴) محاسبه می‌شوند:

$$X_{sim.m}^*(d) = X_{sim}^{bm}(d) * \frac{\mu_m(X_{obs}(d))}{\mu_m(X_{sim}^{bm}(d))} \quad (4)$$

این فرمول باعث می‌شود میانگین بارش‌های تصحیح شده با میانگین داده‌های مشاهده‌ای هماهنگ شود (Frotan et al., 2025).

روش نگاشت توزیع بارش و دما^۱

یکی از روش‌های تصحیح اریبی آماری است که با تطبیق توزیع داده‌های خام مدل با داده‌های مشاهده شده، میانگین، انحراف معیار و صدک‌ها را تنظیم می‌کند، در حالی که مقادیر حدی را حفظ می‌نماید. محدودیت اصلی این روش، فرض تشابه توزیع داده‌های خام و مشاهده‌ای است که در صورت نادرستی این فرض، می‌تواند باعث ایجاد اریب جدید شود. در مورد بارش، معمولاً از توزیع گاما با پارامتر شکل (β) و پارامتر مقیاس (α) استفاده می‌شود که کارایی آن در مطالعات مختلف تأیید شده است. این روش علاوه بر بهبود دقت داده‌ها، موجب کاهش تعداد روزهای بارش سبک در خروجی مدل‌های اقلیمی می‌شود. در این روش، داده‌های تاریخی و آینده بر اساس رابطه (۵) محاسبه می‌شوند (Frotan et al., 2025).

$$f_r(x|\alpha, \beta) = x^{\alpha-1} * \frac{1}{\beta^\alpha} * e^{\frac{-x}{\beta}}; x \geq 0, \alpha, \beta > 0 \quad (5)$$

مدل‌های گزارش ششم هیئت بین‌الدول CMIP6

مجموعه مدل‌های خروجی اقلیمی، با همکاری میان نهادهای گوناگون، برای یکسان‌سازی طراحی مدل‌های گردش عمومی جو و انتشار مدل‌های شبیه‌سازی شده به کار گرفته شده است؛ این مجموعه به یکی از اجزای کلیدی در پیشبرد تحقیقات آب و هوایی در مقیاس جهانی بدل گردیده است. هدف اصلی CMIP6، پاسخگویی به سه پرسش اساسی است: چگونگی پاسخ سیستم زمین به نیروهای متنوع، منشأ و پیامدهای مدل‌های سازمان یافته، و همچنین کمی‌سازی تغییرات اقلیمی و عدم قطعیت‌های مرتبط با سناریوها. تعداد لایه‌های عمودی در مدل‌های CMIP6 نسبت به CMIP5 ارتقا یافته که از مزایای آن، می‌توان به شبیه‌سازی دقیق‌تر لایه استراتوسفر اشاره کرد. علاوه بر این، دامنه سناریوهای آینده مورد بررسی به طور چشمگیری گسترش یافته است (Roshani & Hamidi, 2021). پنج مدل اقلیمی CMIP6 مورد استفاده در پژوهش حاضر در جدول ۲ ذکر شده است.

سناریوهای SSP

سناریوهای مرتبط با CMIP6، تحت عنوان واداشت‌های تابشی SSPها عرضه شده‌اند. سناریوهای اجتماعی-اقتصادی (SSP) بخشی از چارچوب نوینی به شمار می‌روند که جامعه علمی حوزه تغییرات اقلیمی آن را پذیرفته است تا تحلیل‌های یکپارچه‌ای از اثرات آب و هوایی، آسیب‌پذیری‌ها، سازگاری و تلاش‌های کاهش‌دهنده آینده بر پایه SSPها را ممکن سازد. این کمیت‌ها بر پایه IAM و IAV مشترک میان انجمن‌های مختلف بنا شده و در جلسات سلسله‌وار، مجموعه‌ای محدود از پنج خط داستانی اصلی را تعیین کرده‌اند. خطوط داستانی SSP، ویژگی‌های هر SSP را ترسیم می‌کنند؛ SSPهای اصلی، مسیرهای توسعه آتی را مشخص می‌سازند و برای گسترش کمیت‌های این داستان‌ها، می‌توان از ابزارهای متنوع مدل‌سازی بهره برد، از جمله عوامل جمعیتی، پیشرفت اقتصادی، کاربری زمین و الگوی مصرف انرژی. پنج سناریوی موجود، به ترتیب از SSP1 تا SSP5، عبارتند از: گذر از راه سبز، مسیر میانه، راه ناهموار، راه پراکنده و افول نهایی (Hafezi-Moghaddas, Lashkaripour & Parsaei, 2024). در این پژوهش از دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به ترتیب بیانگر حالت متوسط و بدبینانه استفاده شد.

جدول ۲- مشخصات مدل‌های مورد مطالعه از CMIP6

Table 2- Characteristics of the CMIP6 models considered in this study (Source: official CMIP6 website)

Model	مؤسسه توسعه‌دهنده (Developing Institution)	وضوح فضایی جو (درجه) Atmospheric spatial (resolution (degrees)
CNRM-CM6-1	مرکز ملی تحقیقات هواشناسی فرانسه (The French National Centre for Meteorological Research)	1.4 * 1.4
MIROC6	کنسرسیومی از دانشگاه توکیو، مؤسسه ملی مطالعات محیطی و آژانس ژاپن برای علوم و فناوری دریایی - زمینی (A consortium of the University of Tokyo, the National Institute for Environmental (Studies, and the Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)	1.4 * 1.4
MPI-ESM1-2-HR	مؤسسه ماکس پلانک برای هواشناسی، آلمان (Max Planck Institute for Meteorology, Germany)	0.9 * 0.9
MRI-ESM2-0	مؤسسه تحقیقات هواشناسی ژاپن (Meteorological Research Institute of Japan)	1.125 * 1.125
EC-Earth3-Veg	کنسرسیومی از مؤسسات هواشناسی و اقلیمی اروپایی (A consortium of European meteorological and climate institutions)	0.7 * 0.7

ارزیابی معیارهای خطا

در این پژوهش، جهت بررسی و تحلیل عملکرد مدل‌های CMIP6، از شاخص‌های، R^2 (رابطه ۶)، MSE (رابطه ۷)، RMSE (رابطه ۸)، MAE (رابطه ۹)، و NSE (رابطه ۱۰) استفاده شده است.

$$R^2 = \left(\frac{\sum (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2 - \sum (Q_{sim} - \bar{Q}_{sim})^2}{\sum (Q_{obs} - \bar{Q}_{obs})^2} \right) \quad (۶)$$

در رابطه فوق Q_{obs} مقدار مشاهداتی، Q_{sim} مقدار شبیه‌سازی شده، $\bar{Q}_{obs}$ میانگین مشاهداتی، $\bar{Q}_{sim}$ میانگین شبیه‌سازی شده است (Abdollahi, Bayati & Nasr Esfahani, 2019).

$$MSE = \frac{\sum_{k=1}^n (Y_k - \hat{Y}_k)^2}{n} \quad (۷)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (Y_k - \hat{Y}_k)^2}{n}} \quad (۸)$$

$$MAE = \frac{\sum_{k=1}^n |Y_k - \hat{Y}_k|}{n} \quad (۹)$$

در روابط فوق، Y_k ارزش مشاهدات، $\hat{Y}_k$ ارزش‌های پیش‌بینی شده، $\bar{Y}_k$ میانگین مجموع مشاهدات و n اعداد مشاهدات است. این سه رابطه (۷، ۸ و ۹) مربوط به میانگین خطای استاندارد هستند (Frotan et al., 2025).

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_{Si} - X_{O_i})^2}{\sum_{i=1}^n (X_{O_i} - \bar{X}_o)^2} \quad (۱۰)$$

در رابطه فوق NS ضریب نشت‌ناک، X_{O_i} داده مشاهداتی، $\bar{X}_o$ میانگین داده‌های مشاهداتی، X_{S_i} داده شبیه‌سازی شده داده نام است (Sanei-Thaless, Ghasemiyeh, Soltani & Jafari, 2024).

رویکرد همادی مبتنی بر رتبه

به منظور حصول برآوردی دقیق تر و کاهش عدم قطعیت در پیش‌بینی بارش‌های آتی، رویکردی نوین مبتنی بر ترکیب وزنی مدل‌های اقلیمی بر اساس رتبه‌بندی عملکرد آن‌ها اتخاذ گردید. برای پیشبرد این هدف عملکرد هر یک از پنج مدل منتخب CMIP6 با استفاده از شاخص‌های آماری R^2 ، RMSE، MAE، MSE و NSE مشخص، مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس نتایج این ارزیابی، مدلی که بیشترین دقت را در بازتولید داده‌های تاریخی از خود نشان داده بود، رتبه ۵ (بالاترین رتبه) را کسب کرد و سایر مدل‌ها به ترتیب رتبه‌های پایین‌تر (۱، ۲، ۳، ۴) را دریافت نمودند. این رتبه‌بندی، مبنای تعیین وزن نهایی هر مدل در فرآیند ترکیب قرار گرفت. وزن نهایی (W_i) برای هر مدل (i) با استفاده از رتبه کسب شده توسط آن مدل (R_i) و مجموع رتبه‌های تمامی مدل‌ها محاسبه گردید. این فرآیند از طریق فرمول (۱۱) که اطمینان حاصل می‌کند مجموع وزن تمامی مدل‌ها برابر با یک باشد، انجام شد:

$$W_i = \frac{R_i}{\sum_{i=1}^n R_i} \quad (11)$$

در این رابطه مقدار R_i رتبه نهایی هر مدل حاصل از رتبه‌بندی بوده و W_i وزن هر مدل است (Frotan et al., 2025). این وزن‌دهی تضمین می‌کند که مدل‌های دقیق‌تر، سهم بیشتری در برآورد نهایی خواهند داشت. در مرحله نهایی، داده‌های بارش روزانه مربوط به هر ایستگاه، ابتدا با وزن نرمال شده مدل مربوطه (W_i) ضرب می‌شود. سپس، مجموع نتایج حاصل برای تمامی پنج مدل، مقدار نهایی بارش همادی برای آن روز به دست می‌آید.

آزمون من-کندال

آماره آزمون من-کندال (S) که برآیندی از نشانه‌های تفاوت‌های متوالی مشاهدات در سری داده‌هاست، طبق رابطه (۱۲) تعریف می‌شود.

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(X_j - X_i) \quad (12)$$

که X_j مقدار زام داده، n تعداد داده‌ها و $\text{sgn}(\theta)$ تابع علامت است که بر اساس رابطه (۱۳) تعریف می‌گردد:

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } x > 0 \\ 0 & \text{if } x = 0 \\ -1 & \text{if } x < 0 \end{cases} \quad (13)$$

وقتی $n \geq 10$ باشد، آماره S تقریباً از توزیع نرمال پیروی می‌کند و دارای میانگین صفر و انحراف معیار زیر است (رابطه ۱۴):

$$V(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^n t_i(t_i-1)(t_i-5)}{18} \quad (14)$$

که t_i تعداد داده‌های یکسان در گروه i ام است. آماره آزمون من-کندال (Z -MK)، که از توزیع نرمال استاندارد با میانگین صفر و واریانس ۱ پیروی می‌کند، بر پایه رابطه صفر تعریف می‌گردد (رابطه ۱۵).

$$Z = \begin{cases} \frac{s+1}{\sqrt{\text{var}(s)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{s-1}{\sqrt{\text{var}(s)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (15)$$

وجود یک روند آماری معنادار با بهره‌گیری از مقدار Z ارزیابی می‌گردد. مقدار مثبت (منفی) Z بیانگر روند صعودی (نزولی) است. آماره Z از توزیع نرمال پیروی می‌کند. فرضیه صفر (فقدان روند) در سطح معناداری α قابل رد شدن است اگر $|Z| \geq Z_{1-\frac{\alpha}{2}}$ که از جدول توزیع نرمال تجمعی استاندارد استخراج می‌شود (Abbasi, Aalami & Faraji, 2022).

آزمون من-کندال اصلاح شده

در این رویکرد، تمام الگوهای خود همبستگی موجود در سری‌های زمانی مد نظر قرار می‌گیرد و واریانس تعدیل‌شده $(V(S)^*)$ برای تعیین آماره Z من-کندال بر اساس رابطه (۱۶ و ۱۷) به دست می‌آید.

$$V(S)^* = V(S) \frac{n}{n^*} \quad (۱۶)$$

$$\frac{n}{n^*} = 1 + \frac{2}{n(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^{n-1} (n-i)(n-i-1)(n-i-2)ri \quad (۱۷)$$

که در آن، $V(S)$ طبق معادله ارائه شده برای روش من-کندال استاندارد محاسبه می‌گردد. حامد و راو (Hamed & Rao, 1998) اثبات کردند که این رویکرد در شناسایی روندها به مراتب مؤثرتر از روش من-کندال کلاسیک عمل می‌کند، بدون آنکه قدرت آزمون کاهش یابد (Abbasi et al., 2022).

تخمین شیب خط روند با شیب سن

علاوه بر این، برای تخمین دقیق شیب خط روند، از روش شیب سن استفاده گردید مقدار شیب خط روند (β) بر پایه رابطه (۱۸) قابل تعیین است.

$$\beta = \text{median} \left[\frac{X_j - X_i}{j - i} \right] \quad (۱۸)$$

مقادیر مثبت β بیانگر شیب صعودی (روند افزایشی) و مقادیر منفی آن حاکی از شیب نزولی (روند کاهشی) است (Abbasi et al., 2022).

نتایج و بحث

به منظور شبیه‌سازی و پیش‌نگری بارش با استفاده از داده‌های تصحیح شده اریبی پنج مدل منتخب CMIP6، رتبه‌بندی مدل‌ها بر اساس معیارهای آماری خطای میانگین شبکه‌ای ایستگاه‌ها انجام گرفت. مقایسه نتایج مدل‌های مورد مطالعه، نشان داد که روش تصحیح اریبی Local Intensity Scaling نسبت به دو روش دیگر عملکرد مناسب‌تری داشته است و در رتبه‌های بعدی به ترتیب روش‌های Power Transformation و Distribution Mapping قرار گرفتند. بر این اساس، مدل‌های اقلیمی به ترتیب MPI-ESM1-2-HR، MIROC6، MRI-ESM2-0، CNRM-CM6-1 و EC-Earth3-Veg با استفاده از روش Local، تطابق بهتری با داده‌های مشاهداتی در شبیه‌سازی بارش نشان دادند. بنابراین، در اجرای مدل همدادی، این مدل‌ها بر اساس رتبه و وزن اختصاص‌یافته به آن‌ها به‌کار گرفته شدند. نتایج شاخص‌های آماری خطا برای برونداد مدل‌های CMIP6 تحت سه روش تصحیح اریبی مورد بررسی، در جدول ۳ ارائه شده است. بر این اساس، مدل‌های برتر با توجه به عملکرد آماری مطلوب‌شان انتخاب و برای مراحل بعدی تحلیل استفاده شدند.

مطابق شکل ۲-الف، بررسی پهنه‌بندی میانگین بارش سالانه بر اساس داده‌های مشاهداتی در دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۱۴) نشان می‌دهد که توزیع مکانی بارش در حوضه آبخیز ناورود از شرق به غرب کاهش می‌یابد. در این الگو، ایستگاه خرجیل در شرق حوضه با میانگین سالانه ۱۲۴۹/۹۴ میلی‌متر به عنوان پربارش‌ترین بخش منطقه شناسایی می‌شود. در مقابل، ایستگاه ناو در غرب حوضه با ۶۶۴/۱۱ میلی‌متر کم‌ترین میانگین بارش سالانه را دریافت کرده است. ایستگاه خلیان که در بخش مرکزی منطقه واقع شده، میانگین بارش سالانه‌ای معادل ۷۸۲/۵۱ میلی‌متر را ثبت کرده و نقش حد میانی را در الگوی بارش ایفا می‌کند. این توزیع مکانی، که کاهش تدریجی بارش را از شرق به سمت غرب حوضه نشان می‌دهد، به طور قابل توجهی تحت تأثیر عوامل توپوگرافیک منطقه، مانند ارتفاع

و جهت‌گیری کوهستان‌ها، و همچنین موقعیت جغرافیایی نسبت به منبع رطوبتی دریای خزر قرار دارد. این عوامل باعث افزایش بارش در این مناطق می‌شود، در حالی که نواحی غربی که در سایه کوهستان قرار می‌گیرند، بارش کمتری دریافت می‌کنند.

جدول ۳- نتایج عملکرد مدل‌های تصحیح‌شده اریبی CMIP6 برای میانگین شبکه ایستگاه‌ها در دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۱۴)

Table 3- Performance results of bias-corrected CMIP6 models for the mean of the station network during the baseline period (1985–2014)

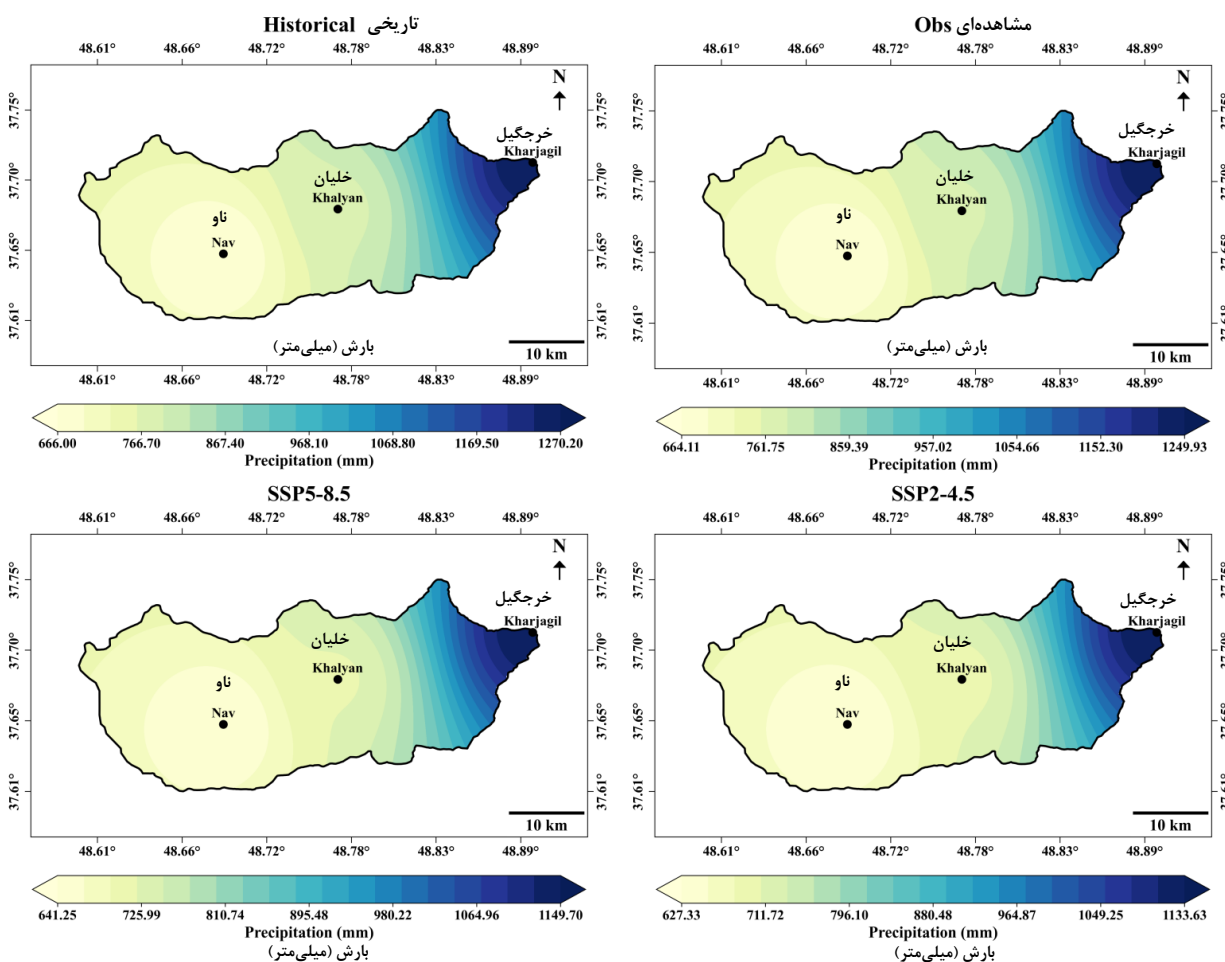
ضریب کارایی نش- (NSE) ساتکلیف	میانگین قدر مطلق خطا (MAE)	ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)	میانگین مربعات خطا (MSE)	ضریب تعیین (R^2)	مدل‌ها (Models)	تصحیح اریبی (Bias Correction)
0.999	1.054	0.647	1.054	0.999	MPI-ESM1-2-HR	مقیاس‌کاهی شدت محلی (Local Intensity Scaling)
0.999	1.057	0.649	1.057	0.999	MRI-ESM2-0	
0.999	1.057	0.649	1.057	0.999	MIROC6	
0.999	1.058	0.649	1.058	0.999	CNRM-CM6-1	
0.999	1.057	0.649	1.057	0.999	EC-Earth3-Veg	
0.997	3.628	1.698	3.628	0.997	CNRM-CM6-1	نگاشت توزیع (Distribution Mapping)
0.996	4.055	1.824	4.055	0.996	MIROC6	
0.998	6.889	2.189	6.889	0.998	EC-Earth3-Veg	
0.987	14.073	3.429	14.073	0.987	MRI-ESM2-0	
0.985	26.572	4.704	26.572	0.985	MPI-ESM1-2-HR	
0.999	1.054	0.648	1.054	0.999	CNRM-CM6-1	تبدیل توانی (Power Transformation)
0.999	1.056	0.648	1.056	0.999	MPI-ESM1-2-HR	
0.999	1.055	0.65	1.055	0.999	MRI-ESM2-0	
0.999	1.057	0.65	1.057	0.999	EC-Earth3-Veg	
0.999	1.059	0.65	1.059	0.999	MIROC6	

نتایج شبیه‌سازی مدل همادی برای دوره تاریخی (شکل ۲، ب) نیز الگوی مشابهی را تأیید می‌کند. برآورد مدل، مقادیر بارش ایستگاه‌ها را با دقت قابل قبولی باز تولید کرده است؛ به طوری که میانگین بارش ایستگاه خلیان تقریباً برابر با داده‌های مشاهداتی بوده و بیشینه و کمینه بارش سالانه به ترتیب برای ایستگاه‌های خرجگیل (۱۲۷۰/۲۱ میلی‌متر) با اختلاف ۱/۶ درصد افزایش بارش نسبت به داده‌های مشاهداتی و ناو با کاهش خیلی جزئی ۰/۲۸ درصد (۶۶۶ میلی‌متر) به دست آمده است. این هم‌خوانی بین داده‌های مشاهده‌ای و نتایج مدل، نشان‌دهنده کارایی مناسب مدل همادی در بازنمایی الگوی بارش منطقه است. در دوره آینده (۲۰۲۵-۲۰۵۴) و بر اساس سناریوی SSP2-4.5، (شکل ۲، ج) انتظار می‌رود علی‌رغم حفظ الگوی کلی توزیع مکانی بارش، مقادیر مطلق بارش سالانه در همه ایستگاه‌ها کاهش یابد. ایستگاه خرجگیل همچنان با میانگین ۱۱۳۳/۶۴ میلی‌متر پر بارش‌ترین ایستگاه باقی می‌ماند، اما نسبت به دوره پایه کاهش ۱۱۶/۳۰ میلی‌متری (۹/۳۰ درصد) را تجربه خواهد کرد. ایستگاه ناو نیز با ۶۲۷/۳۳ میلی‌متر بارش سالانه، کم‌بارش‌ترین ایستگاه منطقه خواهد بود که نسبت به دوره پایه ۳۶/۷۸ میلی‌متر (۵/۵۳ درصد) کاهش نشان می‌دهد. بارش سالانه در ایستگاه خلیان نیز با رسیدن به ۶۹۷/۱۵ میلی‌متر، حدود ۳۶/۸۵ میلی‌متر (۱۰/۹۰ درصد) کاهش خواهد یافت. این تغییرات که در تمامی ایستگاه‌ها، به ویژه ایستگاه‌های با بارش بالاتر، محسوس است، حاکی از کاهش تدریجی منابع رطوبتی و احتمال افزایش تنش آبی در آینده است. تحلیل فضایی این کاهش‌ها نشان می‌دهد که نواحی شرقی و مرتفع‌تر که در دوره پایه بارش بیشتری داشتند، کاهش مطلق بیشتری را تجربه خواهند کرد، که این امر می‌تواند بر منابع آب سطحی و زیرزمینی این نواحی تأثیرگذار باشد. در سناریوی SSP5-8.5 (شکل ۲، د) نیز روند کاهش بارش حفظ می‌شود، هر چند شدت آن نسبت به سناریوی میانه (SSP2-4.5)

کم‌تر است. در این سناریو نیز ایستگاه خرجگیل با ۱۱۴۹/۷۱ میلی‌متر و ایستگاه ناو با ۶۴۱/۲۵ میلی‌متر به ترتیب بیشینه و کمینه بارش سالانه را خواهند داشت. کاهش بارش در این دو ایستگاه به ترتیب ۱۰۰/۲۳ و ۲۲/۸۶ میلی‌متر به عبارتی ۸/۰۱ و ۳/۴۴ درصد برآورد می‌شود. ایستگاه خلیان نیز با میانگین ۷۱۷/۱۰ میلی‌متر، کاهش قابل توجهی معادل ۶۵/۴۱ میلی‌متر (۸/۳۵ درصد) را تجربه می‌کند. در مجموع، تحلیل داده‌ها نشان می‌دهد که اگر چه ساختار کلی الگوی مکانی بارش در آینده حفظ خواهد شد، اما کاهش تدریجی بارش در تمامی ایستگاه‌ها، به ویژه در مناطق پر بارش شرقی، می‌تواند پیامدهای هیدرولوژیکی و مدیریتی مهمی برای منابع آب منطقه به همراه داشته باشد.

بر اساس شکل ۳-الف، میانگین بارش ماهانه در ایستگاه خلیان طی دوره پایه نشان می‌دهد که بیشترین میزان بارش در ماه‌های نوامبر و اکتبر رخ داده است؛ به طوری که مقادیر بارش در این دو ماه به ترتیب ۱۰۲/۴۳ و ۱۰۱/۲۰ میلی‌متر ثبت شده‌اند. این الگوی بارشی، که اوج بارش را در پاییز نشان می‌دهد، می‌تواند تحت تأثیر سامانه‌های بارشی مدیترانه‌ای باشد. این الگو در شبیه‌سازی مدل همادی نیز با دقت بالا باز تولید شده و برای ماه‌های نوامبر و اکتبر تقریباً همان مقادیر مشاهده شده برآورد گردیده است. مدل همادی در ماه‌های بهمن تا تیر و مهر و آبان اندکی کم‌برآوردی و در سایر ماه‌ها بیش‌برآوردی ناچیز (کمتر از یک میلی‌متر) نشان داده است. بر اساس پیش‌بینی مدل همادی برای آینده، در سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5، ماه اکتبر همچنان یکی از پر بارش‌ترین ماه‌های سال باقی خواهد ماند و مقادیر بارش آن به ترتیب ۱۰۶/۳۵ و ۱۰۹/۳۷ میلی‌متر پیش‌بینی شده است. در مقابل، ماه جولای با میانگین ۳۳ میلی‌متر کم‌بارش‌ترین ماه سال بوده و مدل همادی نیز آن را به عنوان خشک‌ترین بازه زمانی سال تأیید می‌کند. پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که در آینده، در هر دو سناریو اقلیمی، کاهش قابل توجهی در بارش این ماه رخ خواهد داد.

به طور کلی، در سناریوی میانه (SSP2-4.5) افزایش بارش عمدتاً در ماه‌های فوریه، مارس، آوریل (بهمن تا فروردین) و نوامبر (آبان) پیش‌بینی می‌شود، در حالی که سایر ماه‌ها با کاهش بارش، به ویژه در تابستان و اوایل پاییز (مهر) همراه هستند؛ به گونه‌ای که در ماه مهر کاهش بارش با اختلاف ۲۸/۴ میلی‌متر نسبت به دوره پایه مشاهده می‌شود. در سناریوی بدبینانه (SSP5-8.5) نیز افزایش بارش تنها در ماه‌های آوریل (فروردین)، نوامبر (آبان) و دسامبر (آذر) به ترتیب با مقادیر افزایشی ۱/۲، ۶/۹ و ۱۰/۶ میلی‌متر پیش‌بینی شده است. در سایر ماه‌ها، کاهش بارش به ویژه در فصل تابستان مشهود است و ماه مرداد با اختلاف ۲۵/۸ میلی‌متر نسبت به دوره پایه بیشترین افت را نشان می‌دهد. بر اساس شکل ۳-ب، میانگین بارش ماهانه در ایستگاه خرجگیل طی دوره پایه نشان می‌دهد که ماه اکتبر (مهر) با میانگین ۱۸۸/۴۷ میلی‌متر پر بارش‌ترین ماه سال بوده است. این الگو در شبیه‌سازی مدل همادی نیز به خوبی بازنمایی شده و در سناریوی بدبینانه SSP5-8.5 ماه اکتبر همچنان به عنوان پر بارش‌ترین ماه سال با مقادیر ۱۸۹/۹۰ و ۱۷۷/۸۶ میلی‌متر شناسایی شده است. در مقابل، در سناریوی میانه SSP2-4.5 بیشینه بارش سالانه به ماه نوامبر (آبان) با مقدار ۱۵۶/۳۸ میلی‌متر اختصاص دارد. در سوی دیگر، ماه ژوئن (خرداد) در دوره پایه کم‌بارش‌ترین ماه سال بوده و مقادیر ثبت شده بر اساس داده‌های مشاهده‌ای ۶۴/۲۹ میلی‌متر و در خروجی مدل همادی ۶۵/۸۳ میلی‌متر برآورد شده است. با این حال، در دوره آینده و بر اساس پیش‌نگری مدل همادی، ماه جولای به عنوان خشک‌ترین ماه سال شناخته می‌شود؛ به طوری که میانگین بارش آن در سناریوی میانه ۴۳/۱۰ و در سناریوی بدبینانه ۴۵/۳۶ میلی‌متر پیش‌بینی شده است. به طور کلی، شبیه‌سازی مدل همادی برای دوره پایه در تمامی ماه‌های سال اندکی بیش‌برآوردی در محدوده ۱ تا ۳ میلی‌متر نشان داده است.

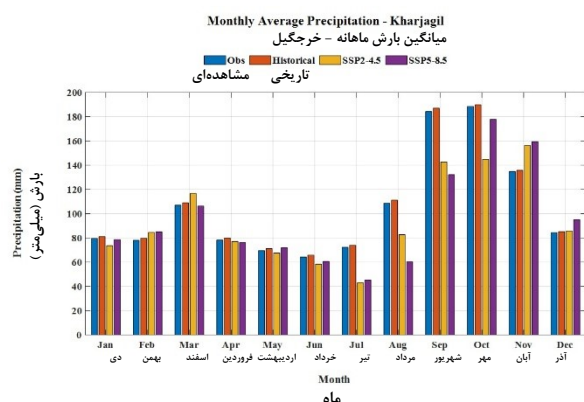


شکل ۲- الف) نقشه پراکنش میانگین بارش سالانه حوضه آبخیز ناورود بر اساس داده‌های ایستگاهی در دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۱۴)، ب) برون‌داد مدل همادی برای داده‌های تاریخی دوره پایه، ج) پیش‌نگری مدل همادی بر پایه خروجی سناریوی SSP2-4.5 در دوره آینده (۲۰۲۵-۲۰۵۴)، د) پیش‌نگری مدل همادی بر پایه خروجی سناریوی SSP5-8.5 در دوره آینده (۲۰۲۵-۲۰۵۴)

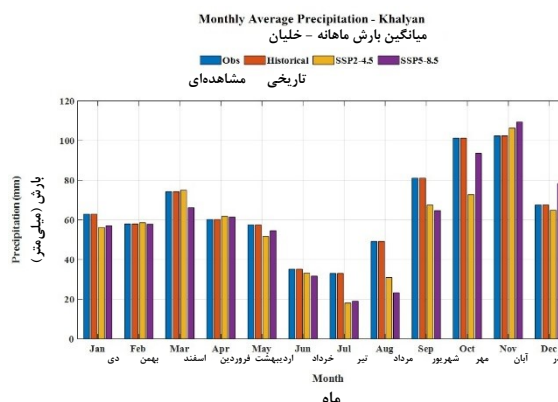
Fig.2. (a) Spatial distribution of mean annual precipitation in the Navrud watershed based on station data during the baseline period (1985–2014); (b) Homogeneous (Homadi) model output for historical data of the baseline period; (c) future projection of the Homadi model based on the SSP2-4.5 scenario for the future period (2025–2054); (d) future projection of the Homadi model based on the SSP5-8.5 scenario for the future period (2025–2054)

با توجه به سناریوی SSP2-4.5 انتظار می‌رود افزایش بارش در ماه‌های فوریه (بهمن)، مارس (اسفند)، نوامبر (آبان) و دسامبر (آذر) رخ دهد، به‌ویژه در ماه آبان که میزان افزایش بارش نسبت به دوره پایه به حدود ۲۱/۵ میلی‌متر می‌رسد. در مقابل، سایر ماه‌ها به ویژه در تابستان و اوایل پاییز (مهر) با کاهش بارش همراه هستند و در ماه مهر اختلاف ۴۳/۵ میلی‌متر کاهش نسبت به دوره پایه مشاهده می‌شود. در سناریوی SSP5-8.5 نیز افزایش بارش عمدتاً در ماه‌های فوریه، می، نوامبر و دسامبر پیش‌بینی شده است، در حالی که در سایر ماه‌ها به ویژه در تابستان و ماه شهریور کاهش محسوسی با اختلاف ۵۲ میلی‌متر در مقایسه با دوره پایه انتظار می‌رود. بر اساس شکل ۳-ج، الگوی میانگین بارش ماهانه ایستگاه ناو نشان می‌دهد که ماه نوامبر در دوره پایه بیش‌ترین مقدار بارش را داشته و در دوره آینده نیز همچنان به عنوان پر بارش‌ترین ماه سال باقی خواهد ماند. بر اساس داده‌های مشاهداتی، میانگین بارش ماه نوامبر ۸۷/۹۰ میلی‌متر بوده و مدل همادی نیز مقدار مشابهی برابر با ۸۷/۰۳ میلی‌متر را شبیه‌سازی کرده است. در سناریوی SSP2-4.5 میزان بارش این ماه به ۹۷/۹۵ میلی‌متر و در سناریوی بدبینانه SSP5-8.5 به ۱۰۰/۷۷ میلی‌متر افزایش می‌یابد.

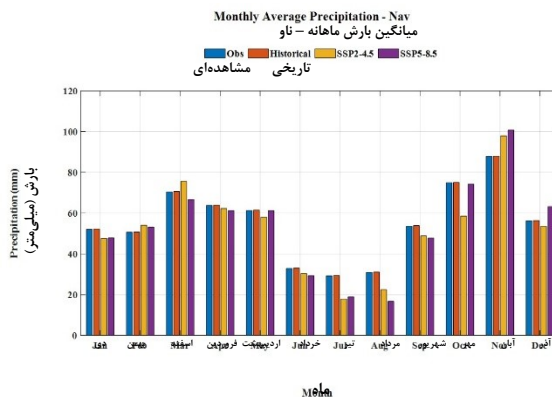
این روند نشان می‌دهد که نوامبر نقش کلیدی خود را در رژیم بارشی منطقه حفظ می‌کند و حتی انتظار تقویت بارش در آینده نیز وجود دارد. در مقابل، ماه جولای در داده‌های مشاهداتی، خروجی مدل همادی و سناریوی میانی به ترتیب با مقادیر ۲۹/۳۸، ۲۹/۲۶ و ۱۷/۹۰ میلی‌متر، کم‌بارش‌ترین ماه سال بوده است. در سناریوی بدبینانه SSP5-8.5، این نقش به ماه آگوست منتقل می‌شود که با مقدار ۱۶/۷۳ میلی‌متر خشک‌ترین ماه سال پیش‌بینی شده است. به طور کلی، در این ایستگاه نیز همانند ایستگاه خرجگیل، شبیه‌سازی مدل همادی برای همه ماه‌ها بیش‌برآوردی نشان داده است، با این تفاوت که این مقدار بیشتر از یک میلی‌متر نبوده و اختلاف‌ها ناچیز بوده‌اند. همچنین برای این ایستگاه پیش‌بینی می‌شود که در سناریوی SSP2-4.5، افزایش بارش عمدتاً در ماه‌های فوریه (بهمن)، مارس (اسفند) و نوامبر (آبان) رخ دهد و ماه‌های تیر تا مهر اوج کم‌بارشی‌ها باشد. در سناریوی SSP5-8.5، افزایش بارش نسبت به دوره پایه در ماه‌های فوریه، نوامبر و دسامبر (آذر) محدود خواهد بود و سایر ماه‌ها با کاهش بارش مواجه می‌شوند. به طوری که ماه مرداد با ۱۴/۲ میلی‌متر اختلاف بارش نسبت به دوره پایه، از وضعیت خشک‌تری برخوردار خواهد بود.



(B) ب



(A) الف

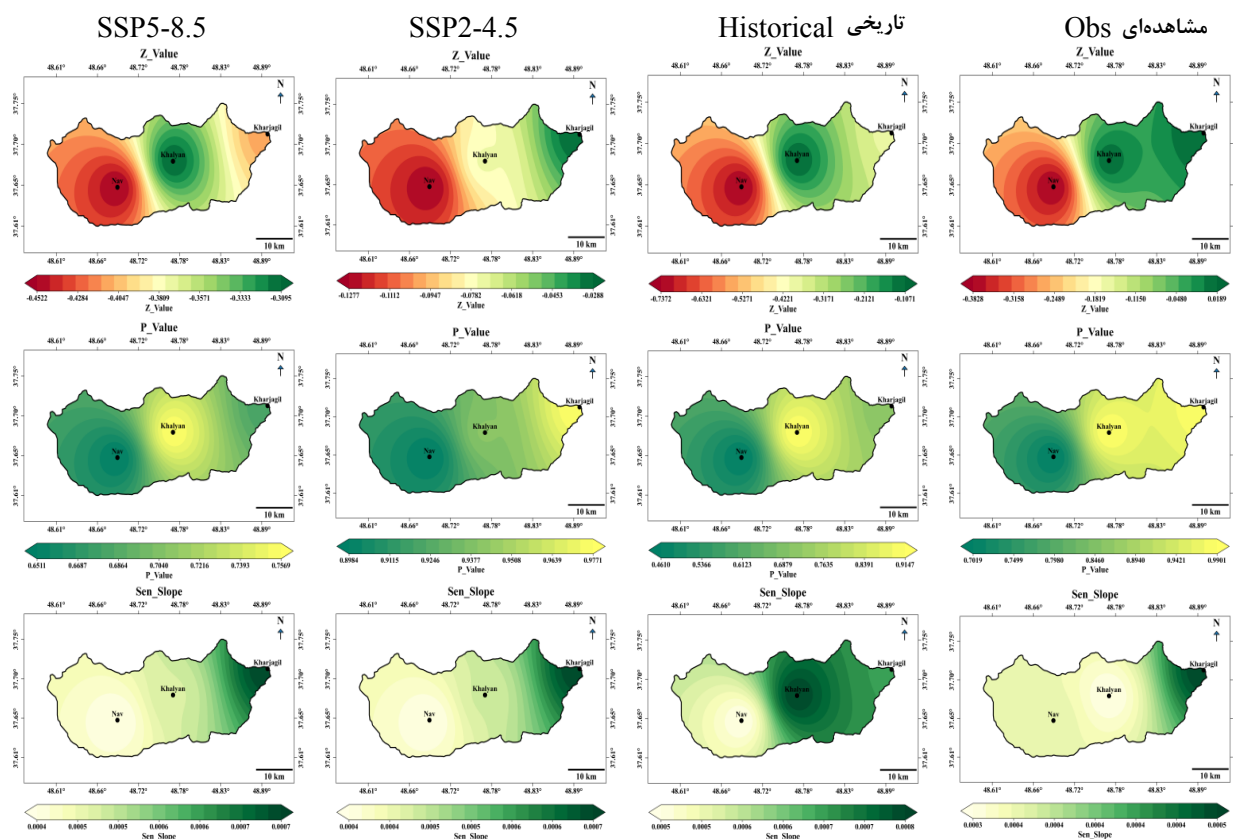


(C) د

شکل ۳- الف) نمودار میانگین بارش ماهانه ایستگاه‌های خلیان، ب) خرجگیل، ج) ناو، طبق داده‌های مشاهداتی و برون‌داد مدل همادی در دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۱۴) و سناریوهای SSP برای دوره آینده (۲۰۲۵-۲۵۴)

Fig.3. Mean monthly precipitation of the (A) Khalian, (B) Kharejgil, and (C) Nav stations based on observed data and the Homadi model output during the baseline period (1985–2014), and under SSP scenarios for the future period (2025–2054)

نتایج آزمون من-کندال اصلاح شده برای دوره پایه و بر اساس داده‌های مشاهداتی (شکل ۴)، نشان می‌دهد که در هیچ یک از ایستگاه‌های مورد بررسی، شامل ایستگاه ناو در غرب منطقه، خلیان در مرکز و خرگیل در شرق منطقه، روند معنادار آماری در بارش روزانه مشاهده نمی‌شود. در هر سه ایستگاه، مقادیر شیب سن بسیار کوچک و نزدیک به صفر بوده و آماره Z نیز در محدوده بی طرف (1 ± 96) قرار دارد. همچنین مقادیر P-value به طور معنی داری بزرگ‌تر از سطح خطای ۰/۰۵ هستند که بیانگر عدم معناداری آماری تغییرات بارش در این دوره است. این نتایج نشان می‌دهد که علی‌رغم تفاوت موقعیت مکانی ایستگاه‌ها در گستره غربی تا شرقی منطقه، الگوی تغییرات بارش در دوره پایه ماهیتی پراکنده و فاقد جهت‌گیری مشخص داشته و نوسانات مشاهده شده را نمی‌توان به عنوان روند اقلیمی پایدار تفسیر کرد. بررسی نتایج شبیه‌سازی مدل همدادی در دوره پایه نیز الگوی مشابهی را نسبت به داده‌های مشاهداتی نشان می‌دهد. در هر سه ایستگاه ناو، خلیان و خرگیل، اگرچه در برخی موارد مقدار شیب سن اندکی نسبت به داده‌های مشاهداتی افزایش یافته است، اما این افزایش بسیار ناچیز بوده و از نظر آماری معنادار نیست. مقادیر آماره Z در تمامی ایستگاه‌ها همچنان نزدیک به صفر باقی مانده و مقادیر P-value بالاتر از سطح اطمینان ۹۵ درصد قرار دارند. این موضوع نشان می‌دهد که مدل همدادی توانسته است رفتار کلی بارش در دوره پایه را بدون ایجاد روند مصنوعی یا جهت‌دار شبیه‌سازی کند.



شکل ۴- روند بارش ایستگاه‌های حوضه آبخیز ناورد بر حسب داده‌های مشاهداتی و برونداد مدل همدادی برای دوره پایه و دوره آینده طبق

سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5

Fig.4. Precipitation trends of the Navrud watershed stations based on observational data and ensemble model outputs for the baseline period and future period under the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios

همچنین، نبود تفاوت معنادار در نتایج ایستگاه‌های غربی، مرکزی و شرقی منطقه حاکی از آن است که مدل همدادی تغییرپذیری مکانی بارش را به صورت یکنواخت و پایدار بازنمایی کرده است. نتایج آزمون روند برای دوره آینده تحت سناریوهای میانی SSP2-4.5 و شدید SSP5-8.5 نشان می‌دهد که الگوی کلی تغییرات بارش در منطقه نسبت به دوره پایه تغییر محسوسی نخواهد داشت. در هر سه ایستگاه ناو (غرب)، خلیان (مرکز) و خرچگیل (شرق)، مقادیر شیب سن در هر دو سناریو بسیار کوچک باقی مانده و از نظر بزرگی تفاوت معناداری با دوره پایه ندارند. آماره Z در تمامی موارد در محدوده بی‌طرف قرار گرفته و مقادیر P-value همگی بالاتر از ۰/۰۵ هستند که بیانگر عدم شکل‌گیری روند افزایشی یا کاهشی معنادار در آینده است. اگر چه در برخی ایستگاه‌ها گرایش‌های جزئی افزایشی یا کاهشی مشاهده می‌شود، اما این تغییرات فاقد پایداری مکانی بوده و از نظر آماری قابل اتکا نیستند. به طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که حتی تحت سناریوهای شدید تغییر اقلیم، بارش روزانه در منطقه مورد مطالعه همچنان تحت تأثیر نوسانات تصادفی کوتاه مدت قرار داشته و تغییر اقلیمی جهت‌دار و معناداری در مقیاس زمانی بررسی شده بروز نخواهد کرد.

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از شبیه‌سازی و پیش‌نگری بارش در حوضه آبخیز ناورود با بهره‌گیری از مدل‌های منتخب CMIP6 و به کارگیری روش‌های مختلف تصحیح اریبی نشان داد در میان روش‌های ارزیابی‌شده، روش Local Intensity Scaling با کاهش مؤثر خطای میانگین و باز تولید مناسب الگوی بارش مشاهداتی، عملکرد بهتری نسبت به دو روش Power Transformation و Distribution Mapping نشان داد. بر این اساس، مدل‌های اقلیمی EC-CMR6-1، MIROC6، MRI-ESM2-0، MPI-ESM1-2-HR و Earth3-Veg به عنوان مدل‌های برتر انتخاب و در ترکیب مدل همدادی مورد استفاده قرار گرفتند. وضعیت الگوی فضایی بارش در دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۱۴) نشان داد بیش‌ترین میزان بارش با ۱۲۴۹/۹۳ میلی‌متر در ایستگاه خرچگیل در شرق حوضه و کم‌ترین مقدار در ایستگاه ناو در غرب آن با ۶۶۴/۱۱ میلی‌متر رخ داده است. شبیه‌سازی مدل همدادی نیز این الگوی مکانی را به خوبی بازتولید نمود و برای هر سه ایستگاه همانند داده‌های مشاهداتی مقادیر P-value بزرگتر از ۰/۰۵ عدم وجود روند جهت‌دار در تغییرات بارش را تأیید کرد. نتایج پیش‌نگری برای دوره آینده (۲۰۲۵-۲۰۵۴) نیز بیانگر حفظ این الگوی کلی، اما همراه با کاهش تدریجی بارش سالانه در تمامی ایستگاه‌ها است. به طوری که در سناریوی SSP2-4.5 بارش ایستگاه‌های خرچگیل، خلیان و ناو به ترتیب ۹/۳۰، ۱۰/۹ و ۵/۵۳ درصد کاهش می‌یابد و در سناریوی SSP5-8.5 نیز کاهش‌ها به ترتیب به ۸/۰۱، ۸/۳۵ و ۳/۴۴ درصد می‌رسد. از سوی دیگر، نتایج آزمون من-کندال و شیب سن برای داده‌های پیش‌نگری شده نشان داد که روند معنادار آماری در تغییرات بارش روزانه در هیچ یک از ایستگاه‌ها مشاهده نمی‌شود. اگرچه رژیم فصلی بارش در مجموع حفظ می‌شود، اما شدت و توزیع آن دستخوش تغییر خواهد شد؛ بدین ترتیب که در سناریوی میانی (SSP2-4.5) افزایش بارش نسبت به دوره پایه بیش‌تر در ماه‌های زمستانی و اواخر پاییز (به ویژه فوریه، مارس، آوریل، نوامبر و دسامبر) پیش‌نگری می‌شود، در حالی که در سایر ماه‌ها بخصوص تابستان و اوایل پاییز کاهش محسوسی انتظار می‌رود. در سناریوی بدبینانه (SSP5-8.5) نیز تغییرات مشابه ولی با دامنه کمتر رخ داده و افزایش بارش عمدتاً به ماه‌های فوریه، می، نوامبر و دسامبر محدود می‌شود.

یافته‌های این پژوهش با نتایج مطالعات پیشین همخوانی دارد. مطالعه شاهی و صلاحی (Shahi & Salahi, 2025) برتری مدل همدادی را در نواحی شمالی ایران تأیید کرده و کاهش بارش در حدود ۷۸ درصد ایستگاه‌ها را تحت سناریوی متوسط گزارش نموده است. همچنین نتایج جهانبخش اصل و همکاران (Jahanghbaksh-Asl et al., 2023)، ساری صراف و همکاران (Sari-Sarraf et al., 2024) و رضائی و همکاران (Rezaei et al., 2024) عملکرد بهتر مدل‌های خانواده MPI-ESM در پیش‌بینی بارش شمال‌غرب و کل ایران را تأیید می‌کنند. در ارتباط با کاهش کلی بارش سالانه در حوضه ناورود، این نتیجه با روندهای کاهشی گزارش‌شده در مطالعات رضایی و همکاران (Rezaee, Nahtaj, Moghadamniya, Abkar & Rezaee, 2015) در حوضه بار نیشابور و کریمی احمدآباد و نبی‌زاده (Karimi Ahmad abad & Nabizadeh, 2018) در حوضه آبریز ارومیه همسو است. این در حالی است که سرکار و چیچولیکار

(Sarkar & Chicholikar, 2015) عدم روند معنادار در تغییرات بارش گجرات و بابائیان و همکاران (Babaeian et al., 2023) نیز عدم وجود روند معنادار در ۷۸ درصد ایستگاه‌های ایران را گزارش کرده‌اند. در تحلیل الگوهای فصلی، چن و همکاران (Chen et al., 2013) روند کاهشی در ماه‌های ژوئن، جولای و آگوست و روند افزایشی در ماه‌های سپتامبر، نوامبر و اکتبر گزارش کرده‌اند؛ یاسین و همکاران (Yassin, Nadhir, Mawada, Sadeq & Sven, 2014) کاهش بارش را در ماه‌های مارس، آوریل و می در عراق مرکزی پیش‌بینی نموده‌اند. صلاحی و شاهی (Salahi & Shahi, 2025) بیش‌ترین کاهش ماهانه بارش در ناحیه خزری را مربوط به ماه ژوئن دانسته‌اند و وثوقی‌راد و همکاران (Vosoughi Rad et al., 2025) افزایش بارش در ماه‌های دسامبر و ژانویه و کاهش در ماه‌های جولای و آگوست برای مناطق بندر انزلی و رشت پیش‌بینی کرده‌اند.

این پژوهش با وجود ارائه تصویری روشن از تغییرات آبی بارش، با عدم قطعیت‌های ذاتی مدل‌های اقلیمی و سناریوهای انتشار گازهای گلخانه‌ای همراه است که لزوم توجه به دامنه وسیعی از پیش‌بینی‌ها را گوشزد می‌کند. کاهش پیش‌بینی شده بارش، به ویژه در فصول گرم، می‌تواند پیامدهای قابل توجهی بر منابع آب سطحی و زیرزمینی، افزایش تنش‌های آبی در بخش کشاورزی و تشدید احتمال وقوع خشکسالی داشته باشد، در حالی که تغییرات فصلی ممکن است مدیریت سیلاب در فصول پر باران را چالش برانگیزتر کند. لذا، تحقیقات آتی می‌تواند بر تحلیل دقیق‌تر پیامدهای هیدرولوژیکی و اکولوژیکی این تغییرات، ارزیابی اثرگذاری روش‌های سازگاری در بخش‌های ذینفع (مانند کشاورزی و مدیریت منابع آب)، و همچنین بسط این مطالعات با استفاده از مدل‌های اقلیمی نسل جدید و داده‌های جامع‌تر تمرکز نماید.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

سپاسگزاری

مقاله، مستخرج از رساله دکتری می‌باشد. بدین سبب از دانشگاه محقق اردبیلی بابت همکاری‌هایشان تقدیر و تشکر می‌نمایم.

References

- Abbasi, H., Aalami, M. T., & Faraji, M. (2022). Trend analysis of discharge and sediment load of Mardoqchay River using non-parametric tests. *Hydrogeomorphology*, 9(32), 87–104. [In Persian] <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23833254.1401.9.32.5.3>
- Abdollahi, K., Bayati, S., & Nasr Esfahani, M. A. (2019). Spatial distribution of runoff and groundwater recharge across land use and slope classes in the Vank watershed. *Watershed Management and Engineering*, 11(4), 866–878. [In Persian] <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2018.120332.1431>
- Anvari-Rostami, A., Azar, A., & Norouzi, M. (2014). EPS forecast modeling using neuro-fuzzy networks. *Financial Accounting and Auditing Research*, 6(23), 1–15. [In Persian] <https://doi.org/20.1001.1.23830379.1393.6.23.1.5>
- Asadi, H., Jafari, M., Ashrafzadeh, A., & Sharifi, A. (2018). Prediction of climate change effects on soil erosion hazard in the Navorud watershed. *Water and Soil Conservation*, 25(2), 235–250. [In Persian] <https://doi.org/10.22069/jwsc.2018.12223.2679>
- Asadi, M. (2025). Comparison of the outcomes of the CMIP5 and CMIP6 reports on the trends of climatic parameters affecting almond growth: A case study in Birjand County. *Journal of Geography and Planning*, 29(92), 332–313. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/gp.2024.61686.3262>
- Ayugi, B., Tan, G., Gnitou, G. T., Ojara, M., & Ongoma, V. (2020). Historical evaluations and simulations of precipitation over East Africa from Rossby Centre Regional Climate Model. *Atmospheric Research*, 232, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104698>

- Babaeian, I., Modirian, R., Khazanedari, L., Karimian, M., Kouzegaran, S., Kouhi, M., ... & Malbusi, S. (2023). Projection of Iran's precipitation in 21st Century using downscaling of selected CMIP6 Models by CMHyd. *Journal of the Earth and Space Physics*, 49(2), 431–449. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/jesphys.2023.332410.1007436>
- Baycan, A., Sonmez, O., & Tuncer Evcil, G. (2025). Climate change effects on precipitation and streamflow in the Mediterranean region. *Water*, 17(17), 2556. <https://doi.org/10.3390/w17172556>
- Bian, C., Liang, X., Li, B., Hu, Z., Min, X., & Yue, Z. (2025). The future climate change projections for the Hengduan Mountain region based on CMIP6 models. *Sustainability*, 17(12), 5306. <https://doi.org/10.3390/su17125306>
- Chen, H., Guo, J., Zhang, Z., & Xu, Ch-Y. (2013). Prediction of temperature and precipitation in Sudan and South Sudan by using LARS-WG in future. *Theoretical and Applied Climatology*, 113, 363–375.
- Duong, S., Song, L., & Chhin, R. (2023). Precipitation projection in Cambodia using statistically downscaled CMIP6 models. *Climate*, 11(12), 245. <https://doi.org/10.3390/cli11120245>
- Enyew, F. B., Sahlul, D., Tarekegn, G. B., Hama, S., & Debele, S. E. (2024). Performance evaluation of CMIP6 climate model projections for precipitation and temperature in the Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Climate*, 12(11), 169. <https://doi.org/10.3390/cli12110169>
- Fallah Ghalhari, G. A., Yousefi, H., Hosseinzadeh, A., Alimardani, M., & Reyhani, E. (2019). Assessment of climate change in Bojnourd Station in 2016–2050 using downscaling models LARS-WG and SDSM. *Iranian Journal of Ecohydrology*, 6(1), 99–109. <https://doi.org/10.22059/ije.2018.265918.952>
- Fan, X., Duan, Q., Shen, C., Wu, Y., & Xing, C. (2022). Evaluation of historical CMIP6 model simulations and future projections of temperature over the Pan-Third Pole region. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 26214–26229. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-18704-5>
- Frotan, M., Salahi, B., Zeinali, B., & Mesgari, E. (2025). Drought trend analysis and forecasting in the Moghan Plain using the SPI index and CMIP6 climate models. *Water and Soil Management and Modelling*, 5(3), 230–260. [In Persian] <https://doi.org/10.22098/mmws.2025.17356.1594>
- Hafezi-Moghaddas, N., Lashkaripour, G. R., & Parsaei, R. (2024). Performance evaluation of CMIP6 models in projecting temperature and precipitation changes in Chah-Nimeh, Sistan and Baluchestan. *Climatology Research*, 14(56), 165–178. [In Persian] https://clima.irimo.ir/article_192161
- Hamed, K. H., & Rao, A. R. (1998). A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology*, 204(1-4), 182-196. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00125-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00125-X)
- Hamidianpour, M., & Shoja, F. (2022). *Introduction to methods and techniques of climate and climate change modeling*. Sistan and Baluchestan: University of Sistan and Baluchestan Press. [In Persian]
- He, M., Chen, Y., Sun, H., & Liu, J. (2023). Projected changes in precipitation based on the CMIP6 optimal multi-model ensemble in the Pearl River Basin, China. *Remote Sensing*, 15(18), 4608. <https://doi.org/10.3390/rs15184608>
- Ignacio Reardon, S. J. I., & Luo, J. (2023). Evaluation of the performance of CMIP6 climate models in simulating rainfall over the Philippines. *Atmosphere*, 14(9), 1459. <https://doi.org/10.3390/atmos14091459>
- Jahanghbaksh-Asl, S., Rezaei-Banafsh, M., Khorshiddust, A. M., Rostamzadeh, H., & Ostadi, E. (2023). Precipitation projection in northwestern Iran based on outputs of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6). *Climatology Research*, 14(56), 1–14. [In Persian] https://clima.irimo.ir/article_187666.html
- Karimi Ahmad abad, M., & Nabizadeh, A. (2018). Assessment of climate change impacts on climate parameters of Urmia Lake basin during 2011-2040 years by using LARS-WG model. *Journal of Geography and Planning*, 22(65), 265-285. https://geoplanning.tabrizu.ac.ir/article_8251.html
- Kim, S., Shin, J.-Y., Lee, G., Park, J., & Sung, K. (2025). Future changes in precipitation extremes over South Korea based on observations and CMIP6 SSP scenarios. *Water*, 17(11), 1702. <https://doi.org/10.3390/w17111702>

- Maleki-Morsht, R., Salahi, B., & Saber, M. (2025). Projection of future maximum temperature in northwestern Iran based on CMIP6 climate model outputs. *Natural Hazards and Environmental Risks*, 14(43), 1–18. [In Persian] <https://doi.org/10.22111/jneh.2024.47321.2006>
- Nohani, E., Babaali, H., & Dehghani, R. (2025). Assessing the effects of climate change on river discharge using the CMIP6 model (Case study: Kashkan hydrometric station). *Hydrogeomorphology*, 13(46), 138-159. [In Persian] https://hyd.tabrizu.ac.ir/article_20755.html?lang=en
- Oduro, C., Shuoben, B., Ayugi, B., Beibei, L., Babaousmail, H., Sarfo, I., ... & Ngoma, H. (2022). Observed and Coupled Model Intercomparison Project 6 multimodel simulated changes in near-surface temperature properties over Ghana during the 20th century. *International Journal of Climatology*, 42, 3681–3701. <https://doi.org/10.1002/joc.7568>
- Oyelakin, R., Yang, W., & Krebs, P. (2024). Analysing urban flooding risk with CMIP5 and CMIP6 climate projections. *Water*, 16(3), 474. <https://doi.org/10.3390/w16030474>
- Qazizada, A. A., Omidvar, K., Mozaffari, G. A., & Mazidi, A. (2025). Detection of Climate Change Impacts on Precipitation and Temperature Parameters in the Kabul River Basin, Afghanistan Using the LARS-WG08 Model. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(2), 68-87. [10.22067/geoh.2025.88181.1488](https://doi.org/10.22067/geoh.2025.88181.1488)
- Rathjens, H., Bieger, K., Srinivasan, R., Chaubey, I., & Arnold, J. G. (2016). CMhyd user manual: Documentation for preparing simulated climate change data for hydrologic impact studies User manual, 1–17.
- Rezaee, M., Nahtaj, M., Moghadamniya, A., Abkar, A., & Rezaee, M. (2015). Comparison of Artificial Neural Network and SDSM Methods in the Downscaling of Annual Rainfall in the HadCM3 Modelling (Case study: Kerman, Ravar and Rabor). *Water Resources Engineering*, 8(1), 25–40. [In Persian] <https://dorl.net/dor/20.1001.1.20086377.1394.8.24.3.9>
- Rezaei, H., Pashapour, H., & Sadeghi, F. (2024). Evaluation of CMIP6 model performance and projection of temperature and precipitation changes under Shared Socioeconomic Pathways (SSP) scenarios in Iran. *Strategic Foresight*, 3(10), 7–30. [In Persian] <https://doi.org/20.1001.1.28212592.1403.3.10.1.5>
- Roshani, A., & Hamidi, M. (2021). Prediction of climate change scenario impacts on temperature and precipitation based on CMIP6 models (Case study: Sari station). *Water and Irrigation Management*, 11(4), 781–795. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/jwim.2022.330603.920>
- Salahi, B., & Shahi, A. (2025). Ensemble Forecasting of Precipitation in The Caspian Region based on CMIP6 Multi-Model Output. *Journal of Geography and Planning*. [In Persian] https://geoplanning.tabrizu.ac.ir/article_20100.html?lang=en
- Sanei-Thaless, F., Ghasemiyeh, H., Soltani, S., & Jafari, R. (2024). Evaluation of PDIR-Now satellite-based precipitation data in Chaharmahal and Bakhtiari province. *Modeling and Management of Water and Soil*, 4(4), 151–166. [In Persian] <https://doi.org/10.22098/mmws.2023.13436.1337>
- Sari-Sarraf, B., Rostamzadeh, H., & Mohammadi, N. (2024). Precipitation projection using CMIP6 models until the end of the 21st century in northwestern Iran. *Geography and Environmental Hazards*, 13(49F), 173–194. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/geoh.2022.76646.1223>
- Sarkar, J., & Chicholikar, J. R. (2015). Climate Change Scenario in the Gujarat Region—Analyses based on LARS-WG (Long Ashton Research Station-Weather Generator) Model. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, 12(2), 31-41. https://doi.org/10.3233/AJW-2015-12_2_05
- Shahi, A., & Salahi, B. (2025). Precipitation parameter prediction in northern Iran based on selected CMIP6 models. *Climate Change Research*, 6(23), 77–94. [In Persian] <https://doi.org/10.30488/ccr.2025.522854.1284>
- Sharafati, A., Nabaei, S., & Shahid, S. (2020). Spatial assessment of meteorological drought features over different climate regions in Iran. *Climatology*, 40(3), 1864–1884. <https://doi.org/10.1002/joc.6328>
- Vosoughi-Rad, L., Mirmousavi, S. H., & Asakereh, H. (2025). Evaluation of CMIP6 climate simulator models in estimating and forecasting precipitation at high-precipitation stations in Gilan province. *Climate Change Research*, 6(22), 1–22. [In Persian] <https://doi.org/10.30488/ccr.2025.488561.1255>

- Wang, H. (2024). Enhanced performance of CMIP6 climate models in simulating historical precipitation in the Florida peninsula. *Climatology*, 44(8), 2758–2778. <https://doi.org/10.1002/joc.8495>
- Wang, L., Zhang, J., Shu, Z., Wang, Y., Bao, Z., Liu, C., ... & Wang, G. (2021). Evaluation of the ability of CMIP6 global climate models to simulate precipitation in the Yellow River Basin, China. *Frontiers in Earth Science*, 9, 1–12. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.689392>
- Yang, H., & Li, Z. (2025). Prediction and influencing factors of precipitation in the Songliao River Basin, China: Insights from CMIP6. *Sustainability*, 17(5), 2297. <https://doi.org/10.3390/su17052297>
- Yang, X., Sun, W., Wu, J., Che, J., Liu, M., Zhang, Q., ... & Wang, L. (2023). Evaluation and projection of precipitation in CMIP6 models over the Qilian Mountains, China. *Remote Sensing*, 15(17), 4350. <https://doi.org/10.3390/rs15174350>
- Yassin, O., Nadhir, A., Mawada, A., Sadeq, B. A., & Sven, K. (2014). Expected Future Precipitation in Central Iraq Using LARS-WG Stochastic Weather Generator. *Scientific Research*, 6, 948-959.
- Zarrin, A., & Dadashi-Rudbari, A. A. (2020). Long-term future temperature outlook of Iran based on CMIP6 model outputs. *Earth and Space Physics*, 46(3), 583–602. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/jesphys.2020.304870.1007226>