Shahid Chamran University of Ahvaz

Irrigation Sciences and Engineering (JISE)
Vol. 49, No. 2, Summer 2026, p. 51-72

Journal homepage: https://jise.scu.ac.ir

Research Paper

EXTENDED ABSTRACT

Evaluation of the accuracy of LarsWG models and precipitation forecasting in the Karkheh Basin

M. AryaSadr[1] and D. Rahimi[2]*

1- Ph.D. Graduate of Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Geographical Sciences and Planning, University of Isfahan, Isfahan, Iran

2- Corresponding Author, Professor, Department of Physical Geography, Faculty of Geographical Sciences and Planning, University of Isfahan, Isfahan, Iran (d.rahimi@geo.ui.ac.ir)*

ARTICLE INFO

Artlcle history:
Received: 18 January 2025
Revised: 2 June 2025
Accepted: 30 June 2025
Available online: 05 August 2026

Keywords:
Estimator Converter, Validation, Karkheh catchment, Global Warming.

TO CITE THIS ARTICLE:

Aryasadr, M., Rahimi, D. 2026. 'Evaluation of the accuracy of LarsWG models and precipitation forecasting in the Karkheh Basin', *Irrigation Sciences and Engineering*, 49(2), pp. 51-72. doi: 10.22055/jise.2025.48808.2153.

Abstract

Recent droughts have significantly reduced river discharge and increased the vulnerability of water resources, making reliable precipitation projections under climate change essential for sustainable water resources management. However, climate simulations are inherently uncertain, and evaluating model performance is a prerequisite for producing reliable future projections. This study aimed to identify the most accurate climate models for simulating precipitation and to assess future precipitation changes in the Karkheh River Basin, Iran. Daily precipitation records from three representative weather stations located in the upstream (Kermanshah), middle (Khorramabad), and downstream (Bostan) sections of the basin were analyzed for the baseline period (1991–2021) using the LARS-WG8 weather generator and outputs from multiple CMIP6 global climate models. Model performance was evaluated using the correlation coefficient (r), Root Mean Square Error (RMSE), and Normalized Root Mean Square Error (NRMSE), and precipitation was projected for the period 2021–2100 under the SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5 scenarios. The results showed that ACCESS-ESM1 consistently achieved the highest performance across all stations, while CNRM-CM6-1, GFDL-ESM4, and MRI-ESM2-0 also demonstrated high predictive accuracy. Future projections indicate considerable spatial and temporal variability in precipitation, with generally increasing precipitation in parts of the central basin but declining trends in the upstream and downstream regions under most scenarios. The observed north-to-south precipitation gradient is expected to persist, while drought frequency and severity are projected to increase, particularly in the northwestern and southern parts of the basin. These findings provide valuable information for climate adaptation planning and sustainable water resources management in the Karkheh River Basin.

Introduction

The Karkheh catchment, which includes more than half of the provinces of Lorestan and Kermanshah and parts of the provinces of Kurdistan, Hamadan, Ilam, and Khuzestan, Its area is 50,768 square

kilometers, of which 17,094 square kilometers are occupied by plains and foothills, and the rest by highlands. In this catchment, precipitation is one of the climatic parameters whose spatial and temporal variability is noteworthy. The average rainfall in the northern part is 300 to 650 millimeters, while the southern part has an average rainfall of 180 to 300 millimeters; precipitation directly affects water resources. Under the influence of global warming, two-thirds of the world's population will face water stress by 2025 (Mahato et al., 2022). Therefore, predicting precipitation changes for future water resource management in light of climate change is a challenge. The aim of the present study is to evaluate the accuracy of the best model in estimating precipitation and predicting changes in precipitation in the Karkheh River catchment. The accuracy of models is one of the most important stages in predicting random data and the uncertainty of models.The results of the studies indicated that in Sari, the ACCESS-CM2 model has high accuracy in predicting precipitation and temperature. According to this model, temperature and precipitation will increase (Roshani and Hamidi, 2021). At the Tangab station in Fars Province, the NCARCCSM3, GFDLCM2.1, and INMCM3 models have the highest accuracy and weight in modeling precipitation and temperature (Ajam Zadeh and Mollaeinia, 2016). The results of the studies by Jahangir et al. (2020) indicated that precipitation in the Hamdideh stations of Islamabad-e Gharb, Bastan, Ravansar, and Malayer will increase, while in Kangavar it will decrease, and in Khorramabad, it will increase in the A2 scenario (realistic) and decrease in the A1B (pessimistic) and A1 scenarios. The results of researchers' studies showed that in different regions, a specific GCM model cannot be used uniformly. Furthermore, climate data simulations always have uncertainties, and ignoring them negatively affects the accuracy of the results; therefore, the use of models that can accurately forecast the effects of climate change is essential, as it is experiencing significant changes in precipitation patterns due to climate change. The study aims to evaluate the accuracy of different models in predicting rainfall changes, which is crucial for effective water resource management in the region.

Methodology

For the research, daily precipitation data from 1991-2021 was used as the observational period, and the output of the LARSWG8 estimator based on the scenarios of the Sixth Assessment Report in the SSP1-2.6, SSP2-4.5, and SSP5-8.5 scenarios for the years 2021-2040 was used as the future period. Based on observational data from 1991-2021, at each station representing the upstream, midstream, and downstream of the catchment, precipitation changes on monthly, seasonal, and annual scales were projected for the future period of 2021-2040. Finally, the frequency and probability of drought occurrence in the future were calculated based on the Standardized Precipitation Index (SPI). To determine the uncertainty and accuracy of the models, the indices R, RMSE, and NRMSE were used.

LARS-WG8

A micro-scale weather generator known for its high resolution and ability to simulate daily precipitation and temperature. LARS-WG8 is designed to generate weather data at a local scale, making it suitable for regional climate studies. The specifications of the models of this converter are listed in Table (1).

Table 1- Specifications of the models LarsWG8

Model name	Separation	Institute	Country
ACCESS-ESM1-5	1.875×1.25	Simulator of the Australian Community Climate and Earth System	Australia
CNRM-CM6-1	2.8 × 2.8	National Center for Meteorological Research	France
GFDL-ESM4	1.25 × 1.00	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	America
HadGEM3-GC31-LL	1.88 × 1.25	Hadley Centre for Climate Prediction and Research, Exeter, Devon, United Kingdom	England
MRI-ESM2-0	1.13 × 1.12	Institute of Meteorological Research for Earth System Models	Japan
MPI-ESM1-2-LR	~1.8 × 1.8	Max Planck Institute for Meteor	Japan, Germany, and South Korea

Source: (Nguyen-Duy et al., 2023)

Results and Discussion

1. The models predict varying trends in rainfall for the period 2021-2040:

1-1- Kermanshah: Expected to see a decrease in rainfall under optimistic and pessimistic scenarios, with an increase in the realistic scenario.

1-2- Khorramabad: Predicted increases in rainfall under optimistic and realistic scenarios, with a decrease in the pessimistic scenario.

1-3- Bostan: Forecasts indicate a decrease in rainfall across all scenarios, highlighting the potential for increased drought conditions.

According to the findings, the probability of drought occurrence during the observational period in Kermanshah was 54.8%, in Khorramabad 64.5%, and in Bastan 48.4%. The probability of drought occurrence during the 2021-2040 period in Kermanshah will be 55-60%, in Khorramabad 35-40%, and in Bastan 35-45%. The probability of drought occurring is higher at Kermanshah station.

2. Assessing the accuracy of the best model:

2-1- ACCESS-ESM1: This model demonstrated high accuracy in predicting future rainfall at Kermanshah and Bostan stations. It achieved excellent RMSE values (less than 10) in various scenarios, indicating its reliability for future rainfall predictions.

2-2- GFDL-ESM4: GFDL-ESM4 was particularly effective at Khorramabad, showing good predictive capabilities across different scenarios. The model's RMSE values were categorized as good (10-20) in realistic and pessimistic scenarios, making it a viable option for rainfall forecasting.

2-3- CNRM-CM6-1: Best for Bostan: This model was identified as the most accurate for predicting rainfall at Bostan station, with strong correlations to observed data.

2-4- HadGEM3-GC31-LL: Generally performed poorly across all stations, often overestimating rainfall. The accuracy of this model is poor with RMSE (16-22).

The results of this research are in line with the findings of the studies by Roshani and Hamidi (2021), Ajam Zadeh and Mollaeinia (2024), and Jahangir et al. (2020).

Conclusions

The evaluation of rainfall forecasting models in the Karkheh catchment reveals that in the observational period, the northern part of the Karkheh catchment is rainy, while the southern part is less rainy. In the future period, the occurrence of drought in the northwestern and southern regions of the catchment will increase and ACCESS-ESM1, CNRM-CM6-1, and GFDL-ESM4 are the most reliable for predicting future rainfall at the Kermanshah, Khorramabad, and Bostan stations. Based on the realistic scenario (SSP2-4.5) and according to the RMSE index, the accuracy of the models at the Kermanshah station is 8.5, 11.7, and 13.3, respectively; at the Khorramabad station, 12.5, 10.2, and 12, respectively; and at the Bastan station, 5.9, 4.6, and 5.6, respectively. Each model exhibits unique strengths, with LARS-WG8 being particularly effective in local-scale predictions. The findings underscore the importance of using multiple models to account for uncertainties in climate data and improve the accuracy of future rainfall forecasts.
There is no long-term, common statistical data to select a larger number of stations, faced with site access restrictions.

This literature review highlights the critical role of model selection in climate studies, particularly in regions vulnerable to climate change impacts. Further research is recommended to enhance model accuracy and adapt water resource management strategies accordingly.

Conflict of Interest

The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article. Confirmation.

Funding

The authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Data Availability Statements

The datasets generated and/or analyzed during the current study are available from the corresponding author on reasonable request.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct. Confirmation.

Declaration of Generative AI and AI-assisted technologies in the writing process

The authors state that they have not used generative AI or AI-assisted technologies in their manuscript.

Author Contributions

First Author: Maryam Arya Sadr, She contributed to data collection, questionnaire administration, and field investigations. She also prepared the initial draft of the manuscript and incorporated the revisions and corrections suggested by the academic supervisor.

Second Author: Dariush Rahimi, The initial research idea and formulation of the research problem were developed by the corresponding author. She/he also contributed to the calculations, analysis and interpretation of the results, as well as the scientific editing and revision of the manuscript and incorporation of the final revisions.

Acknowledgment

Appreciates are extended to the Ministry of Energy (Iran) for data providing and the Vice Chancellor for Research and Technology at the University of Isfahan for the financial support.

Reference

1- Ajam Zadeh, A., Mollaeinia, M. 2016. 'Assessment of Impact of Climate Change on Firoozabad River Runoff with Downscaling of Atmospheric Circulation Models Output by SDSM and LARS-WG Softwares', Iran-Water Resources Research, 12(1), pp. 95-109. SID. https://sid.ir/paper/100449/fa (In Persian).

2- Jahangir, M. H., Asadi, A., Noroozi, E., Talei, M. 2020. 'Forecasting of Precipitation in Karkheh Catchment Area through LARS-WG Model', *Journal of Ecohydrology*, 7(4), pp. 981-992. doi: 10.22059/IJE.2020.302480.1328.

3- Mahato, A., Upadhyay, S. and Sharma, D., 2022. Global water scarcity due to climate change and its conservation strategies with special reference to India: a review. Plant Archives (09725210), 22(1). http://dx.doi.org/10.51470/PLANTARCHIVES.2022.v22.no1.009.

4- Nguyen-Duy, T., Ngo-Duc, T. and Desmet, Q., 2023. Performance evaluation and ranking of CMIP6 global climate models over Vietnam. Journal of Water and Climate Change, 14(6), pp.1831-1846. https://doi.org/10.2166/wcc.2023.454.

5- Roshani, A., and Mehdi, H., 2021. Forecasting the effects of climate change scenarios on temperature and precipitation based on CMIP6 models (case study: Sari station). *Water and Irrigation Management*, 11(4), pp. 781-795. 10.22059/JWIM.2022.330603.920 (In Persian)

© 2026 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

علوم و مهندسی آبیاری جلد ۴۹، شماره‌ی۲، تابستان ۱۴۰۵، مقاله پژوهشی، ص. ۷۲-۵۱

ارزیابی دقت مدل‌های مولد LarsWG و پیش بینی بارش در حوضه آبریز کرخه

مریم آریاصدر[۱] و داریوش رحیمی[۲*]

۱-دانش آموخته دکتری آب و هواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

۲*- نویسنده مسئول، استاد، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران (d.rahimi@geo.ui.ac.ir)

دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۲۹ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۱۲ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۰۹ انتشار: ۱۴۰۵/۰۵/۱۴

چکیده

از پیامدهای خشکسالی‌های اخیر، کاهش جریان رودخانه و افزایش آسیب‌پذیری منابع آب بوده است. از این رو، پیش‌بینی تغییرات بارش به‌منظور مدیریت منابع آب در آینده با توجه به تغییراقلیم یک چالش است؛ ارزیابی دقت مدل‌ها، از مهم‌ترین مراحل پیش‌بینی داده‌های تصادفی است. مدل‌سازی داده‌های اقلیمی همواره دارای عدم قطعیت هستند و نادیده گرفتن آن، بر صحت نتایج اثر منفی دارد. هدف پژوهش حاضر، ارزیابی دقت بهترین مدل در برآورد بارش و پیش‌بینی تغییرات بارش در حوضه آبریز کرخه است. از این رو، از داده‌های روزانه‌ی بارش ایستگاه‌های همدید در سراب (کرمانشاه)، میان آب (خرم آباد) و پایاب (بستان) در دوره‌ی پایه ۲۰۲۱-۱۹۹۱ بر اساس خروجی مولد ریزمقیاس LarsWG8 استفاده شد. برای تعیین میزان عدم قطعیت مدل‌ها نیز از شاخص‌های r, RMSE, NRMSE استفاده و میزان بارش در دوره ۲۱۰۰-۲۰۲۱ پیش‌نگری شد. نتایج نشان داد علاوه بر مدل ACCESS-ESM1 در هر سه ایستگاه، مدل‌های CNRM-CM6-1، GFDL-ESM4 و MRI-ESM2-0 بالاترین دقت را در پیش‌بینی بارش دارند. بر اساس سناریوی واقع‌بینانه (SSP2-4.5) و بر اساس شاخص RMSE دقت مدل‌ها در کرمانشاه به‌ترتیب ۸.۵، ۱۱.۷، ۱۳.۳ و ۹.۷، در خرم آباد ۱۲/۵، ۱۰/۲، ۱۲ و ۹/٤ و در بستان ۵/۹، ٤/٦، ٥/٦و ۷ است. بررسی دوره‌ی آتی در قالب چهار دوره‌ی ۲۰ ساله انجام شد. تغییرات بارش دوره نخست (۲۰٤۰-۲۰۲۱)، در ایستگاه کرمانشاه کاهش ۳٤/۹ میلی‌متری در سناریوی SSP1-2.6، افزایش ٤/۱ میلی‌متری در سناریوی SSP2-4.5 و کاهش ٦/٥ میلی‌متری در سناریوی SSP5-8.5 خواهد داشت، در ایستگاه خرم آباد در سناریوی SSP1-2.6 و SSP2-4.5 به‌ترتیب ۳/۸ و ٤۲/٥ میلی‌متر افزایشی و در سناریوی SSP5-8.5 35.5 میلی‌متر کاهشی و در ایستگاه بستان در سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 ۱۷/۰۷، ٤/۰٤و ۰/۳ میلی‌متر کاهشی خواهد بود، در دوره مشاهداتی بخش شمالی حوضه کرخه، پر بارش و بخش جنوبی کم بارش است. در دوره آتی وقوع خشکسالی در نواحی شمال غرب و جنوب حوضه افزایش خواهد یافت.

کلید واژه‌ها: حوضه آبریز کرخه، مبدل برآوردگر، صحت‌سنجی، گرمایش جهانی، پیش نگری.

مقدمه

طبق گزارش IPCC (2022) گرمایش زمین و افزایش تبخیر به‌دلیل افزایش مصرف CO_2 است. گرمایش جهانی به‌عنوان یک بازخورد اقلیمی باعث ذوب تدریجی یخچال قطبی شده است. همچنین افزایش دما با تغییر ضخامت جو، تغییر میزان رطوبت، و الگوی گردش عمومی جو باعث تغییر زمانی- مکانی بارش شده است. نتایج مطالعه Eskani (2017) نشان داد میانگین دمای زمین تا سال ۲۱۰۰ به میزان ۱/۱ تا ۴/۶ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد و با کاهش ۲۰ درصدی در بارش منطقه خاورمیانه، تنش آبی ایجاد می‌شود (Khosravi et al., 2010). در جهت پیشبرد اهداف مدیریت ریسک، پیش‌بینی وضعیت اقلیمی در آینده حائز اهمیت است. برای انجام پیش‌نگری از مدل‌های CMIP6 و مولد ریزمقیاس LarsWG به‌دلیل وضوح بالا در مقیاس منطقه‌ای استفاده می‌شود. اغلب این مدل‌ها، دقت ضعیفی برای شبیه‌سازی بارش، به‌ویژه در مقیاس فصلی دارند در صورتی که در شبیه‌سازی دما نسبت به بارش بهتر عمل می کنند. ریز مقیاس‌نمایی منطقه‌ای خروجی‌های GCM اغلب با استفاده از مدل‌های آب و هوایی منطقه‌ای (RCMs) برای دست‌یابی به وضوح فضایی بالاتر انجام می‌شود، که برای ثبت ویژگی‌ها و تنوع آب و هوای محلی ضروری است (Xie et al., 2024; Bucchignani et al., 2016). این فرآیند کاهش مقیاس، دقت شبیه‌سازی آب و هوا را به‌ویژه در نمایش رویدادهای آب و هوایی شدید و پدیده‌های اقلیمی منطقه‌ای بهبود می‌بخشد (Almazroui et al., 2016). مطالعه‌های بسیاری در خصوص کارایی مدل های CMIP6 و مولد ریزمقیاس LarsWG در جهان و ایران انجام شده است: یافته‌های صحت

DOI: 10.22055/jise.2025.48808.2153

سنجی مدل‌های جفت شده‌ی مرحله شش (CMIP6) نشان داد عملکرد شاخص‌ها متفاوت بوده و بارش در حوضه رودخانه پیرل چین افزایش خواهد یافت (He et al., 2023). این شرایط در حوضه رودخانه ایشیکاری ژاپن نشان داد مدل‌هایMIROC6 و MRI-ESM-2.0ارتباط معنی داری با دما و عملکرد ضعیفی در شبیه‌سازی بارش دارند به‌طوری که بارندگی کاهش بیشتری در سناریوی SSP5-8.5 نسبت به سناریوی SSP1-1.9 خواهد داشت (Peng et al., 2023). پیش‌بینی خشکسالی جنوب آسیا در دوره‌های آتی با روش متوسط مجموع چند مدلی ازCMIP6 نشان داد بخش شمال غرب محدوده مطالعاتی آسیب‌پذیرترین بخش در مقابل خشکسالی است (Zhai et al., 2020). شبیه‌سازی داده‌های بارش شدید در همه مدل‌های CMIP6 به‌طور یکسان انجام نمی‌شود از لحاظ فضایی در شبیه‌سازی بارندگی شدید حوضه رودخانه آواش، مدل GFDL-ESM4 مقادیر مدل‌سازی بارش را بسیار زیاد، مدل ACCESS-ESM1-5 مقادیر برآوردی را بسیار کم و مدل MIDROC6 شبیه‌سازی بارش شدید را به خوبی نشان داده است (Sime and Dibaba, 2023). در شبیه‌سازی الگوهای فضایی میانگین حداکثر و حداقل دما و بارش موسمی و سالانه در پاکستان مدل‌های NORESM1-M، MIROC5، BCC-CSM1-1 و ACCESS1-3 بهترین مدل GCM بوده و نسبت به بارش، مدل‌سازی دما بالاترین شباهت را با داده‌های مشاهداتی داشته است (Ahmed et al., 2019). نتایج مدل‌سازی بارش حوضه رودخانه بار نشان داد، مدل‌های GFDL-CM4, INM-CM5-0 و INM-CM4-8 بهترین مدل‌ها از خروجی مدل CMIP6 بوده و بارش سالانه افزایش شش درصد تحت سناریوی SSP2-4.5 و ۱۶/۴۶ درصد تحت سناریوی-SSP5 8.5خواهد داشت (Gebisa et al., 2023). نتایج مدل‌سازی بارش در کوه‌های قلیان چین، نشان داد همه‌ی ۲۱ مدل از سری مدل‌های CMIP6 می‌توانند روند تغییر بارش آینده را همانند مجموعه داده‌های مشاهداتی، مدل‌سازی کنند (Yang et al., 2023). یافته‌ها نشان داد CMCC-CMS بهترین مدل برای مدل‌سازی دما و مدل MRI-CGCM3 عالی‌ترین برای پیش‌بینی بارش ایران هستند (Abbasian et al., 2019). بارش حوضه‌های آبریز ایران با استفاده از شش مدل MIROC6، BCC-CSM2-MR، CNRM-CM6-1، CESM2، MRI-ESM2-0، HadGEM3-GC31-LL با عملکرد بالا، ارزیابی شده است تغییر بارش بین ۱۹+ تا ۱۲− خواهد بود و بیشترین کاهش بارش در نواحی غربی کشور پیش بینی شده است (Ansari et al., 2022). نتایج ارزیابی مدل ها در مناطق مختلف ایران نشان داد؛ در استان یزد مدل CanEsMs و-BCC CSM2-MR عملکرد بالایی در مدل‌سازی بارش و دما دارند. دما بین ۰/۲ ° c تا ۰/۶ ° c افزایش و بارش بین ۲/۹ تا ۱۳/۷ mm کاهش خواهد یافت (Zareian, 2022). در ساری، مدل ACCESS-CM2 دقت بالایی در پیش نگری بارش و دما داشته، طبق این مدل، دما ۰/۷°c تا ۱/۸°c و بارش ۲–۱۲ درصد افزایش خواهد یافت (Roshani and Mehdi, 2021). در دریاچه ارومیه، مدل‌های MPI-ESM1-2-HR، CMCC-ESM2، INM-CM5-0، MRI-ESM2-0 دقت بالایی در مدل‌سازی دما و عملکرد ضعیفی در مدل‌سازی بارش دارند (Abdolalizadeh et al., 2022). در ایستگاه تنگاب استان فارس، مدل‌هایNCARCCSM3 ، GFDLCM2.1، INMCM3 بالاترین دقت و وزن را در مدل‌سازی بارش و دما دارند.(Ajam Zadeh and Mollaeinia, 2016)

Jahangir et al., (2020) با مدل داده‌های CMIP4 و مولد LarsWG به پیش‌بینی بارش حوضه آبریز کرخه تحت سناریوی A1B ، A2 و B1 پرداختند نتایج نشان داد بارش در ایستگاه‌های همدید اسلام آباد غرب، بستان، روانسر و ملایر افزایشی، در کنگاور کاهشی و خرم آباد در سناریوی A2 (واقع‌بینانه) افزایشی و در سناریوی A1B (بدبینانه) و A1 کاهشی خواهد بود. روند تغییرات بارش در اغلب ایستگاه‌های حوضه کرخه کاهشی است در ایستگاه خرم‌آباد و سنندج روند کاهشی معنادار است (Rahimiani Iranshahi et al., 2022). در بخش‌های غربی و جنوبی حوضه کرخه تغییرات بارش کاهشی و معنی‌دارتر است (Zohrabi et al., 2016). در این حوضه تغییرات زمانی بارش مشهود است، فصل زمستان دریافت بارش کاهش یافته در حالی‌که فصول پاییز و بهار بیشتر است (Khorshiddoust et al., 2016). تداوم خشکسالی هواشناسی در حوضه کرخه باعث خشکسالی هیدرولوژی شده است. خشکسالی کوتاه مدت در برخی زیرحوضه‌ها (زیرحوضه کشکان) سریع‌تر بهبود می یابند اما در برخی دیگر از زیرحوضه (زیرحوضه سیمره) بارندگی باید بیشتر از متوسط بلندمدت رخ دهد تا جریان رودخانه را بهبود بخشد (Shafiei et al., 2018).

Mesgari et al., (2022) با استفاده از ۱۱ مدل گردش عمومی جو (GCMs) از CMIP6 با تمرکز بر شبیه‌سازی بارش در خاورمیانه را ارزیابی کردند، نتایج نشان داد، مدل MPI-ESM1-2-HR بهترین عملکرد را داشت ($R^2 = 0.6$، RMSE = 18.9)، مدل‌های دیگر، مانند ACCESS-CM2 و GISS-E2-1-G، به‌دلیل مناسب بودن در مناطق خاصی مانند عراق مورد توجه قرار گرفتند (Salman et al., 2022). پیش‌بینی بارش حاکی از کاهش قابل توجهی در بارندگی، به‌ویژه در کشورهای خاورمیانه، با تغییرات بین ۷۷/۳− و ۵۱/۱+ میلی‌متر است، در حالی که مناطقی مانند دریای سیاه و مدیترانه ممکن است شاهد افزایش باشند (Mesgari et al., 2022). انتظار می‌رود شبه جزیره عربستان با شرایط خشکسالی تشدید شده مواجه شود، با پیش‌بینی می‌شود که خشکسالی‌های آینده تحت سناریوهای بالاتر SSP به‌طور قابل توجهی افزایش یابد (Saharwardi et al., 2025). طبق مدل‌های ACCESS-CM2، BCC-CSM2-MR، MIROC6 در میانه و غرب عراق برای دوره آتی (۲۰۲۳–۲۰۵۰)

در سناریوی SSP2-4.5، بارش سالانه ممکن است ۳/۵۶-۳/۸۷ درصد افزایش یابد، در حالی که در سناریوی SSP5-8.5، ممکن است از ۷/۲۲ درصد به ۱۲/۶۱ درصد افزایش یابد (Mukheef et al., 2024). با استفاده از هشت مدل GCMs پیش بینی می شود که لیبی، الجزایر، تونس، سوریه، اردن، مراکش و موریتانی با کاهش ۲۵ درصدی بارندگی و افزایش پنج درصدی PET مواجه شوند که منجر به آب و هوای خشک‌تر می‌شود و در مقابل تفاوت‌های منطقه‌ای در کشورهایی مانند سودان، عربستان سعودی، اردن، امارات، عراق، سوریه، یمن و عمان ممکن است تا ۵۰ درصد افزایش بارندگی را تجربه کنند. در تضاد با روندهای خشک‌تر در کشورهای دیگر پیش‌بینی می‌شود که منطقه خاورمیانه و شمال آفریقا (MENA) از شرایط خشک به نیمه خشک تبدیل شود و زمین‌های کشاورزی قابل توجهی در معرض خطر به‌دلیل این تغییرات باشد (Hamed et al., 2024).

بارش از جمله پارامترهای اقلیمی است که تغییرپذیری مکانی و زمانی آن قابل توجه بوده و به‌طور مستقیم بر منابع آب اثرگذار است. تحت تأثیر گرمایش جهانی تا سال ۲۰۲۵ دو سوم جمعیت جهان با تنش آبی مواجه خواهند بود (Mahato et al., 2022). یافته‌ها حاکی از آن است تا سال ۲۰۲۵ حوضه آبریز کرخه به‌دلیل انجام فعالیت های کشاورزی، در معرض خطر خشکسالی قرار خواهد گرفت. کاهش ۴۴ درصد دسترسی به آب شیرین و افزایش ۲۵ درصد دوره خشکی در بخش جنوبی و افزایش سیل در بخش شمالی و غربی حوضه کرخه پیش بینی شده است (Ashraf Vaghefi et al. 2014). نتایج مطالعه‌ها نشان داد که مدل‌های CMIP6 و مولد LarsWG ابزارهای قدرتمندی برای پیش‌بینی تغییر اقلیمی هستند، اما دقت آن‌ها در شبیه‌سازی بارش (به‌ویژه در مقیاس فصلی) کمتر از دما است. همچنین در مناطق مختلف جهان، مدل‌های مختلفی برای شبیه‌سازی دما و بارش مورد استفاده قرار گرفته‌اند که عملکرد آن‌ها بسته به منطقه متفاوت است. در مناطق مختلف نمی‌توان از یک مدل خاص GCMs به‌طور یکسان استفاده کرد و نیاز به صحت‌سنجی دقیق و تنظیم منطقه‌ای دارند. مقایسه‌ی پژوهش‌ها نشان داد مدل‌های ACCESS-CM2، MRI-ESM2-0، BCC-CSM2-MR، MIROC6 و MPI-ESM1-2-HR در ایران و خاورمیانه بهترین عملکرد را در پیش‌بینی بارش دارند. همچنین بررسی مطالعه‌ها نشان داد که تغییر اقلیمی در آینده تجزیه و تحلیل نشان‌دهنده روند کلی کاهش بارندگی در اکثر مناطق، به‌ویژه در خاورمیانه است، در حالی که برخی از مناطق مثل مدیترانه ممکن است افزایش و در ایران در نواحی غربی کشور کاهش و در نواحی شمالی کشور افزایش را تجربه کنند. که نیازمند برنامه‌ریزی دقیق برای مدیریت منابع آب و کاهش خطرات اقلیمی است.

حوضه آبریز کرخه نیز در معرض خطر تغییر اقلیمی و خشکسالی قرار دارد. این پژوهش بر آن است، دقت عملکرد مدل‌های ریزمقیاس LarsWG8 را برای پیش‌نگری بارش و خشکسالی در حوضه مذکور ارزیابی و برآورد کند. مدل‌ها در پیش‌بینی بارش عملکرد متفاوتی دارند و همواره دارای عدم قطعیت هستند، نادیده گرفتن عدم قطعیت در داده‌های اقلیمی، بر صحت نتایج اثر منفی دارد. از این رو، استفاده از مدلی که بتواند اثر تغییر اقلیم را با دقت مناسب آینده نگری کنند، الزامی است.

منطقه مطالعاتی

حوضه آبریز کرخه در محدوده جغرافیایی ۲۵′ ۳۳° و ۳۴′ ۵۶° عرض شمالی و ۰۷′ ۴۶° و ۱۱′ ۴۹° طول شرقی قرار دارد و شامل بیش از نیمی از استان‌های لرستان و کرمانشاه و بخش‌هایی از استان‌های کردستان، همدان، ایلام و خوزستان است. آبراهه‌ی اصلی حوضه، رود کرخه است که به‌عنوان یکی از رودهای بزرگ ایران، از ارتفاعات الوند و ملایر و همدان توسط یکی از سرشاخه‌های مهم خود یعنی گاماسیاب سرچشمه گرفته و از به هم پیوستن رودهای سیمره و زال در جنوب پلدختر تشکیل شده است. بخش وسیعی از زاگرس میانی را زهکش نموده، وارد هورالهویزه و از آن‌جا وارد خلیج فارس می‌شود. وسعت حوضه آبریز ۵۰۷۶۸ کیلومتر مربع است که ۱۷۰۹۴ کیلومتر مربع آن را دشت و مناطق کوهپایه‌ای و بقیه را ارتفاعات اشغال می‌کند، موقعیت ایستگاه‌های همدید در حوضه آبریز کرخه و موقعیت این حوضه در ایران در شکل (۱) نشان داده شده است. حوضه آبی کرخه با رژیم هیدرولوژیکی و بارش خاص(بارش غالب مایع) به‌دلیل نوسان‌های شدید بارش و خشکسالی‌ها متوالی و افزایش دما یکی از حوضه‌های آسیب‌پذیر در مقابل تغییر اقلیم است که سیاست‌های توسعه‌ی مدیریت منابع آب و آسیب‌پذیری منابع آب در مقابل تغییر اقلیم افزایش داده است. حداکثر دریافت بارش با سه پهنه‌ی پربارش در شرق، غرب و شمال غرب و حداقل بارش در جنوب حوضه دریافت می‌شود. به‌طور کلی دریافت بارش بخش شمالی حوضه دارای متوسط بارش ۳۰۰ تا ۶۵۰ میلی‌متر و بخش جنوبی دارای متوسط بارش ۱۸۰-۳۰۰ میلی‌متر است.

DOI: 10.22055/jise.2025.48808.2153

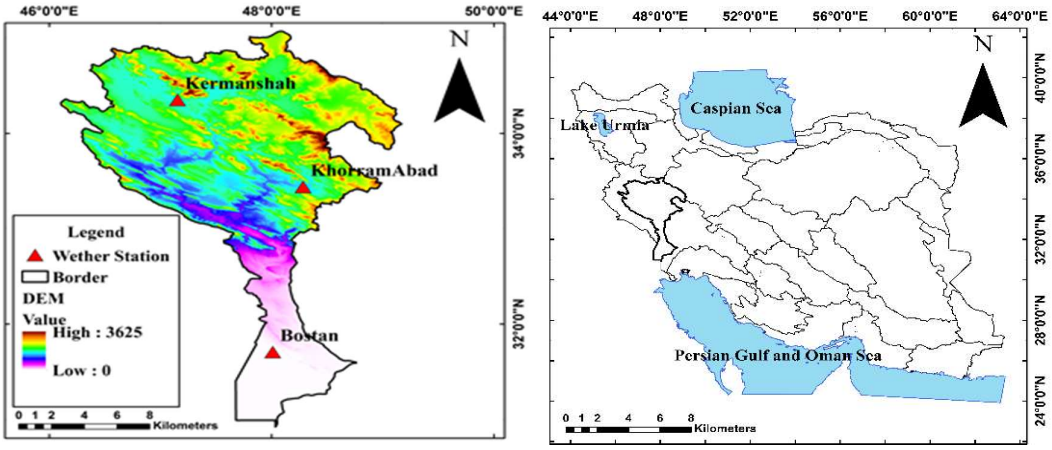


Fig. 1- Geographical location of the Karkheh watershed in Iran

شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز کرخه در ایران(نگارنده)

مواد و روش‌ها

برای ارزیابی دقت بهترین مدل و پیش‌بینی تغییر اقلیم در حوضه کرخه از متغیر بارش روزانه‌ی ایستگاه های همدید کرمانشاه، خرم‌آباد و بستان که دارای دوره آماری مشترک حداقل ۳۰ سال در دوره مشاهداتی (۲۰۲۱- ۱۹۹۱) بوده‌اند استفاده شد (جدول ۱). پیش نگری مبتنی بر سناریوهای گزارش ششم تغییر اقلیم با مدل آماری LarsWG8 در دوره آتی (۲۱۰۰-۲۰۲۱) و بر اساس سناریوهای انتشار SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 است. بر اساس داده‌های مشاهداتی ۲۰۲۱-۱۹۹۱، در هر ایستگاه که نماینده سراب، میان آب و پایاب حوضه بوده‌اند، تغییرات سری زمانی بارش در مقیاس سالانه برای دوره‌ی آتی در سال‌های ۲۱۰۰-۲۰۲۱ (با تقسیم این دوره به چهار دوره‌ی ۲۰ ساله) پیش نگری شده و ضریب تغییرات بارش اندازه گیری شد.

همچنین، فراوانی و احتمال رخداد خشکسالی در آینده بر اساس شاخص استاندارد شده بارش (SPI) محاسبه شد.

با شاخص‌های ضریب همبستگی (r)، مجذور میانگین مربعات خطا (RMSE) و مجذور میانگین مربعات خطا نرمال شده (NRMSE)، اقدام به ارزیابی داده‌های تولید شده توسط مدل و داده‌های واقعی (مشاهداتی) آنالیز حساسیت و عدم قطعیت انجام شد (روابط ۱ و ۲ و ۳).

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \overline{x}).(y_i - \overline{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \overline{x})^2 . \sum_{i=1}^{n}(y_i - \overline{y})^2}} \qquad (۱)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=n}^{n}(xi - yi)^2}{n}} \qquad (۲)$$

$$NRMS = \frac{RMSE}{\max(\mathrm{Xi}) - \min(\mathrm{Yi})} \qquad (۳)$$

که X_i مقادیر مشاهداتی، Y_i مقادیر برآورد شده می‌باشد. بر اساس رابطه ضریب همبستگی (رابطه ۱)، هر چه عدد محاسبه شده نزدیک به یک باشد، نشان دهنده‌ی شبیه‌سازی بهتر مدل می‌باشد. چنانچه شاخص‌های راست آزمایی رابطه (۲) مقادیر کمتر از ۱۰ درصد باشند برآورد مدل عالی؛ بین ۱۰ تا ۲۰ درصد خوب؛ بین ۲۰ تا ۳۰ درصد ضعیف؛ و چنانچه بیش از ۳۰ درصد باشد داده‌های مدل غیر قابل اعتماد می‌باشند (Habibi and Kolahi, 2022؛ Hasheminasab et al., 2022).

مولد LARS-WG

LARS-WG یکی از مشهورترین مدل‌های مولد داده‌ها تصادفی وضع هوا و یکی از مدل‌های گردش عمومی‌جو (GCM) است. کاربرد بسیاری در پیش‌آگاهی تغییرات اقلیمی آینده دارد برای شبیه‌سازی متغیرهای هواشناسی توزیع‌های آماری پیچیده‌ای را به‌کار می‌برد. در حقیقت ابزار واسطی است که برای حرکت از پیش‌بینی‌کننده‌های بزرگ مقیاس به پیش‌بینی‌شونده‌ها در مقیاس محلی به‌کار می‌رود. مبنای آن طول دوره‌ی خشک و تر، بارش روزانه و سری‌های تابش؛ توزیع نیمه تجربی می‌باشد (Semenov, 2008). جهت کاهش مقیاس داده‌های اقلیمی در مقیاس کلان (AOGCM, GCM)، پیش‌بینی مناسبی از داده‌ها در مقیاس منطقه‌ای ارائه می‌دهد (Semenov and Stratonovitch, 2015).

LARS-WG8 از شش مدل GCM و سه سناریوی انتشار خوش‌بینانه (SSP1-2.6)، واقع‌بینانه (SSP2-4.5) و بدبینانه (SSP5-8.5) برای دوره‌های ۲۰۲۱ تا ۲۱۰۰ بهره می‌گیرد. این مدل ریزمقیاس، نیاز به داده های مشاهداتی زیاد به‌منظور راستی آزمایی دارد. مشخصات مدل‌های برآوردگر LARS-WG8 در جدول (۲) مندرج شده است.

جدول۱- موقعیت جغرافیایی ایستگاه های همدید در حوضه آبریز کرخه

Table 1- Geographical location of synoptic stations in the Karkheh watershed

Name of the synoptic stations	latitude	Longitude	Height above the sea	study period
Kermanshah	34.352	47.15	1318.5	1991-2021
Khorram Abad	33.438	47.28	1147.8	1991-2021
Bostan	31.707	48.01	7.8	1991-2021

جدول ۲- مشخصات مدل های LarsWG8

Table 2- Specifications of LarsWG8 models

Model name	Separation	Institute	Country
ACCESS-ESM1-5	1.875×1.25	Simulator of the Australian Community Climate and Earth System	Australia
CNRM-CM6-1	2.8 × 2.8	National Center for Meteorological Research	France
GFDL-ESM4	1.25 × 1.00	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory	America
HadGEM3-GC31-LL	1.88 × 1.25	Hadley Centre for Climate Prediction and Research, Exeter, Devon, United Kingdom	England
MRI-ESM2-0	1.13 × 1.12	Institute of Meteorological Research for Earth System Models	Japan
MPI-ESM1-2-LR	~1.8 × 1.8	Max Planck Institute for Meteor	Japan, Germany, and South Korea

Ref: (Nguyen-Duy et al., 2023)

نتایج و بحث

آینده نگری بارش سالانه: سری زمانی بلندمدت سالانه داده‌های بارش در دوره پایه ۲۰۲۱-۱۹۹۱ و در دوره‌ی آتی ۲۱۰۰-۲۰۲۱ برای ایستگاه‌های سراب، میان آب و پایاب حوضه‌ی آبریز کرخه در شکل‌های (۲) تا (۴) ترسیم شده است. متوسط بارش بلندمدت سالانه‌ی ایستگاه های نماینده در دوره پایه (۲۰۲۱-۲۰۱۹) و دوره آینده به تفکیک چهار دوره‌ی ۲۰ ساله (با کسر دوره‌ی آتی از دوره‌ی پایه) مقایسه و در جدول (۳) مندرج شده است، روند تغییرات بارش بلندمدت سالانه در دوره مشاهداتی نسبت به دوره پایه نشان داد که طی دوره ۲۰۴۰-۲۰۲۱ ایستگاه کرمانشاه در سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 بارش کمتر دریافت خواهد کرد. کاهش ۳۴/۹ میلی‌متری در سناریوی خوش بینانه (SSP1-2.6)، افزایش ۴/۱ میلی‌متری در سناریوی واقع‌بینانه (SSP2-4.5) و کاهش ۶/۵ میلی‌متری در سناریوی بدبینانه (SSP5-8.5) پیش‌نگری شده است. در دوره‌ی ۲۰۶۰-۲۰۴۱ در سناریوی SSP1-2.6 کاهش ۳۳/۵ میلی‌متری، در سناریوی SSP2-4.5 افزایش ۵۹/۳ میلی‌متری و در سناریوی SSP5-8.5 افزایش ۶۷/۳ میلی‌متری را خواهد داشت. تغییرات در دوره‌ی ۲۱۰۰-۲۰۶۰ در تمام سناریوها افزایشی پیش‌نگری شده است، تغییرات بارش در دوره‌ی ۲۰۸۰-۲۰۶۱، به‌میزان ۳۰/۳ (در سناریوی SSP1-2.6)، ۳۷/۸ (در سناریوی SSP2-4.5) و ۴۷/۹۶ (در سناریوی SSP5-8.5) میلی‌متر و در دوره‌ی ۲۱۰۰-۲۰۸۱ میزان ۴۷/۴ (در سناریوی SSP1-2.6)، ۵۱/۳ (در سناریوی SSP2-4.5) و ۳۲/۳ (در سناریوی SSP5-8.5) میلی‌متر افزایشی خواهد بود (شکل ۲ و جدول ۳).

تغییرات بارش در ایستگاه همدید خرم آباد در دوره‌ی آتی (۲۰۴۰-۲۰۲۱) در سناریوی SSP1-2.6 و SSP2-4.5 افزایشی پیش‌بینی شده است. در سناریوی خوشبینانه ۳/۸ و در سناریوی واقع‌بینانه ۴۲/۵ میلی‌متر افزایش و در سناریوی بدبینانه ۳۵/۵ میلی‌متر کاهش دریافت بارش، برآورد شده است. این تغییرات در دوره‌ی ۲۰۶۰-۲۰۴۱ در سناریوی SSP1-2.6 ۷۲/۹ میلی‌متری و در سناریوی SSP2-4.5 ۳۵/۲ میلی‌متری افزایش و در سناریوی SSP5-8.5 ۲۵/۹ میلی‌متری کاهش خواهد یافت. در دوره‌ی ۲۰۸۰-۲۰۶۱ در سناریوهای خوش‌بینانه، واقع‌بینانه و بدبینانه ۳/۵ میلی‌متر کاهش، ۱۶/۴ و ۳۹/۵ میلی‌متر افزایش خواهد یافت. تغییرات پیش‌نمایی شده طی دوره‌ی ۲۱۰۰-۲۰۸۱ کاهشی بوده و در سناریوهای خوش‌بینانه، واقع‌بینانه و بدبینانه به ترتیب ۴/۰۱، ۳۵/۲ و ۲/۳ میلی‌متر در میزان بارش دریافتی کاهش رخ خواهد داد (شکل ۳ و جدول ۳).

تغییرات بارش متوسط بلندمدت سالانه در دوره آتی نسبت به دوره پایه نشان می‌دهد که در دوره آتی (۲۰۴۰-۲۰۲۱) روند بارش در ایستگاه همدید بستان، کاهشی خواهد بود. سناریوی خوشبینانه ۱۷/۰۷میلی‌متر، واقع بینانه ۴/۰۴و سناریوی بدبینانه ۰/۳کاهش خواهد یافت. در دوره ۲۰۶۰- ۲۰۴۱ افزایش بارش پیش‌بینی‌شده است (به ترتیب ۹/۷، ۴۸/۹۶ و ۲۶/۵ میلی‌متر). در دوره ۲۰۸۱-۲۰۶۱ میزان بارش در سناریو خوش‌بینانه کاهشی (۵/۹) و در سناریوهای واقع‌بینانه و بدبینانه (۱۴/۳ و ۲۵/۶ میلی‌متر) افزایشی پیش‌بینی شده است. میزان بارش در دوره‌ی ۲۱۰۰-۲۰۸۱ افزایشی خواهد بود (به ترتیب در سناریوهای خوش‌بینانه، واقع‌بینانه و بدبینانه ۲۹/۲، ۳۸/۶۵ و ۱۲/۳ میلی‌متر خواهد بود) (شکل ۳ و جدول ۳).

DOI: 10.22055/jise.2025.48808.2153

ضریب تغییرات بارش در دوره پایه (۲۰۲۱-۱۹۹۱) و دوره آتی (۲۱۰۰-۲۰۲۱) در ایستگاه‌های منتخب حوضه آبریزکرخه در جدول (۴) مندرج است. طبق این جدول، ضریب تغییرات بارش در ایستگاه کرمانشاه طی دوره‌ی مشاهداتی (۲۰۲۰-۱۹۹۱) ۲۶/۳ درصد است و میزان تغییرات بارش دریافتی طبق مدل ACCESS-ESM1 برای دوره‌ی آتی (۲۱۰۰-۲۰۲۱) به ترتیب در سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 ۲۷/۷ درصد، ۲۶/۴ درصد و ۲۶/۹۸ درصد برآورد شده است. تغییر بارش در ایستگاه خرم‌آباد طی دوره‌ی مشاهداتی ۳۰/۳ درصد و طبق مدل GFDL-ESM4 در دوره آتی در سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 ضریب تغییر بارش به‌ترتیب ۲۷/۰۳ درصد، ۲۸/۳ درصد و ۲۷/۲ درصد خواهد بود. تغییر در ایستگاه بستان در دوره مشاهداتی ۴۱/۶ درصد است و این تغییرات برای دوره آتی طبق مدل ACCESS-ESM1 در سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 به‌ترتیب ۴۱/۹، ۴۱/۰۵ و ۳۸/۷ پیش‌بینی شده است (جدول ۴). مقادیر کاهشی ضریب تغییر بارش در ایستگاه‌های خرم آباد و بستان در دوره آتی نشان می‌دهد این دو ایستگاه نسبت به دوره‌ی مشاهداتی بارش کمتری دریافت خواهند کرد. درصد تغییر بارش ایستگاه کرمانشاه در آینده در سناریوهای خوشبینانه و واقع بینانه جزئی ولی در سناریوی بدبینانه افزایشی خواهد بود؛ علاوه بر این، بررسی ضریب تغییرات بارش در ایستگاه‌های منتخب حوضه آبریز کرخه نشان می دهد در دوره مشاهداتی، میزان بارش دریافتی در ایستگاه کرمانشاه یکنواخت و میزان بارش دریافتی در ایستگاه بستان نامنظم است.

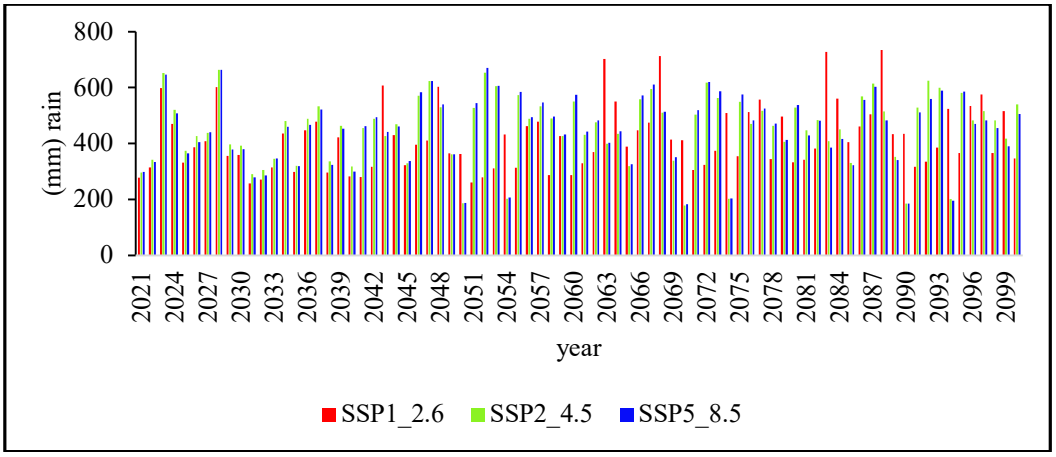


Fig. 2- Forecast of long-term yearly changes in precipitation in the Kermanshah station in the future period (2021-2100), based on the ACCESS-ESM1 model

شکل ۲- پیش‌نگری تغییرات بلندمدت سالانه بارش ایستگاه کرمانشاه، در دوره آینده (۲۱۰۰-۲۰۲۱) بر اساس مدل ACCESS-ESM1

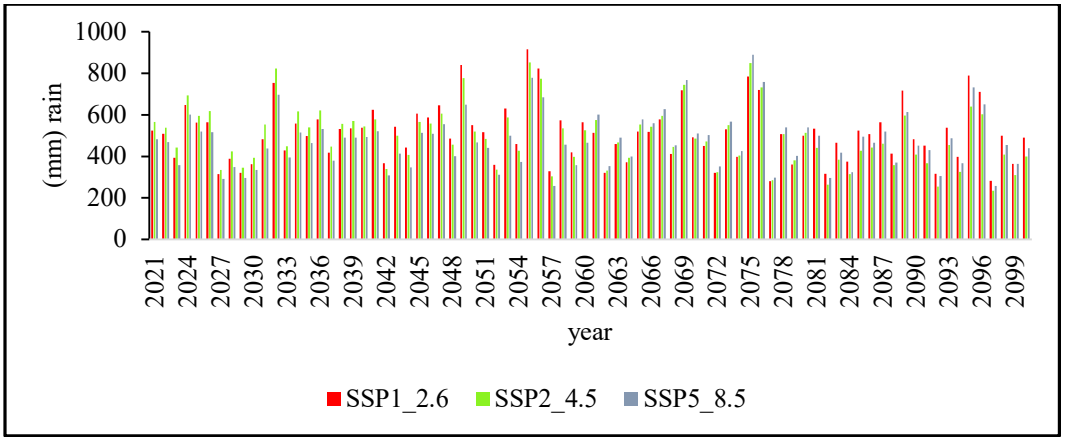


Fig. 3- Forecast of long-term yearly changes in precipitation in the Khorramabad station in the future period (2021-2100), based on the GFDL-ESM4 model

شکل ۳- پیش‌نگری تغییرات بلندمدت سالانه بارش ایستگاه خرم‌آباد، در دوره آینده (۲۱۰۰-۲۰۲۱) بر اساس مدل GFDL-ESM4

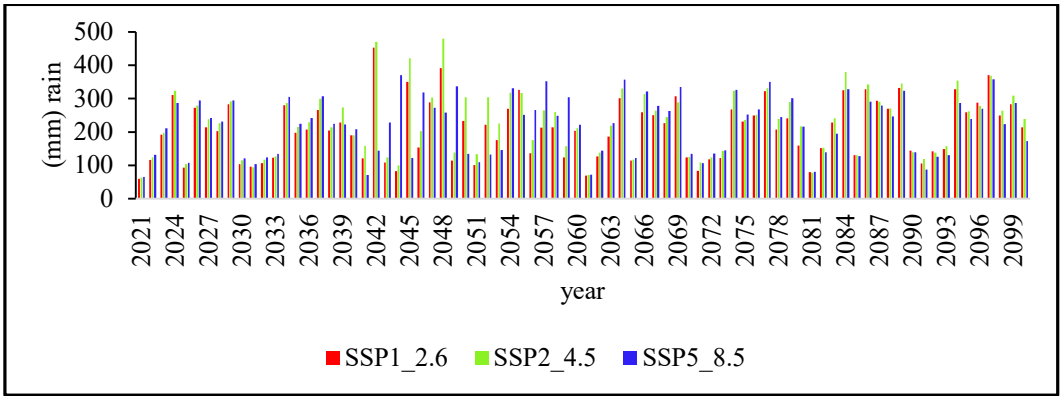


Fig. 4- Forecast of long-term yearly changes in precipitation in the Bostan station in the future period (2021-2100), based on the ACCESS-ESM1 model

شکل ٤- پیش‌نگری تغییرات بلندمدت سالانه بارش ایستگاه بستان، در دوره آینده (۲۱۰۰-۲۰۲۱) بر اساس مدل ACCESS-ESM1

جدول۳- پیش‌نگری تغییرات بارش در حوضه کرخه در دوره آینده (۲۱۰۰-۲۰۲۱) در مولد اقلیمی LarsWG8

Table 3- Forecast of changes in precipitation in the Karkheh Basin in the future period (2021-2100) in the LarsWG8 climate generator

future period	Kermanshah (ACCESS-ESM1)			Khorramabad (GFDL-ESM4)			ACCESS-ESM1 (Bostan)		
	SSP1_2.6	SSP2_4.5	SSP5_8.5	SSP1_2.6	SSP2_4.5	SSP5_8.5	SSP1_2.6	SSP2_4.5	SSP5_8.5
2021-2040	-34.9	4.1	-6.5	3.8	42.5	-35.5	-17.07	-4.04	0.3
2041-2060	-33.5	59.3	67.3	72.9	35.2	-25.9	9.7	48.96	-26.5
2061-2080	30.3	37.8	47.96	-3.5	16.4	39.5	-5.9	14.3	-25.6
2081-2100	47.4	51.3	32.2	-4.0	-35.2	-2.3	29.2	38.65	-12.3

جدول ٤- ضریب تغییرات بارش در دوره پایه (۲۰۲۱-۱۹۹۱) و دوره آتی (۲۱۰۰-۲۰۲۱) در ایستگاه‌های منتخب حوضه آبریز کرخه

Table 4- Precipitation change coefficient in the observation period (1991-2021) and the future period (2021-2100) at selected stations in the Karkheh watershed

Station	observation period (%)	future period		
		SSP1-2.6 (%)	SSP2-4.5 (%)	SSP5-8.5 (%)
Kermanshah	26.3	27.7	26.4	26.98
Khorramabad	30.3	27.03	28.3	27.2
Bostan	41.6	41.9	41.05	38.7

مقایسه خروجی لارس و اطلاعات بانک جهانی: نتایج حاصل از پیش بینی آب و هوا با خروجی داده های CMIP6 بانک جهانی با مدل multi-model و با وضوح ۲/۵ × ۲/۵ درجه، نشان داد: میزان بارش در حوضه آبریز کرخه، در دوره آتی (۲۱۰۰-۲۰۲۱) نسبت به دوره مشاهداتی (۲۰۱۴-۱۹۵۰) افزایش خواهد یافت. افزایش ۸/۴ میلی‌متری، کاهش ۴ میلی‌متری و ۴/۵ میلی‌متری به ترتیب در سناریوی خوشبینانه SSP1-2.6 ، واقع بینانه SSP2-4.5 و بدبینانه SSP5 پیش بینی شده است (جدول۵).

شاخص بارش استاندارد شده (SPI): نمودار SPI بیان‌گر وضعیت ترسالی و خشکسالی در ایستگاه های منتخب است (شکل ۷). نتایج ارزیابی شاخص SPI نشان داد فراوانی رخداد سال‌های خشک طی دوره آتی (۲۱۰۰-۲۰۲۱) در سناریوی SSP1-2.6، SPP2-4.5 و SSP5-8.5، ایستگاه‌های کرمانشاه ۴۵، ۳۵ و ۳۵ بار، خرم آباد ۳۴ ، ۳۴ و ۳۸ بار و بستان، ۳۷، ۳۹ و ۳۲ بار در ۱۰۰ سال آتی خواهد بود.

طبق سناریو واقع‌بینانه تا سال ۲۱۰۰، احتمال رخداد خشکسالی در کرمانشاه ۴۳/۷درصد، در خرم آباد ۴۲/۵درصد و در بستان ۴۸/۷درصد خواهد بود (شکل ۷).

DOI: 10.22055/jise.2025.48808.2153

جدول۵- پیش‌نگری متوسط بلندمدت بارش سالانه حوضه آبریز کرخه با مدلmulti-model طی ۲۱۰۰-۲۰۲۱ (بانک جهانی)

Table 5- Long-term average annual precipitation forecast for the Karkheh watershed using the multi-model model in 2021-2100 (World Bank, 2022)

observation	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP5-8.5
506.59	515	502.6	502.1

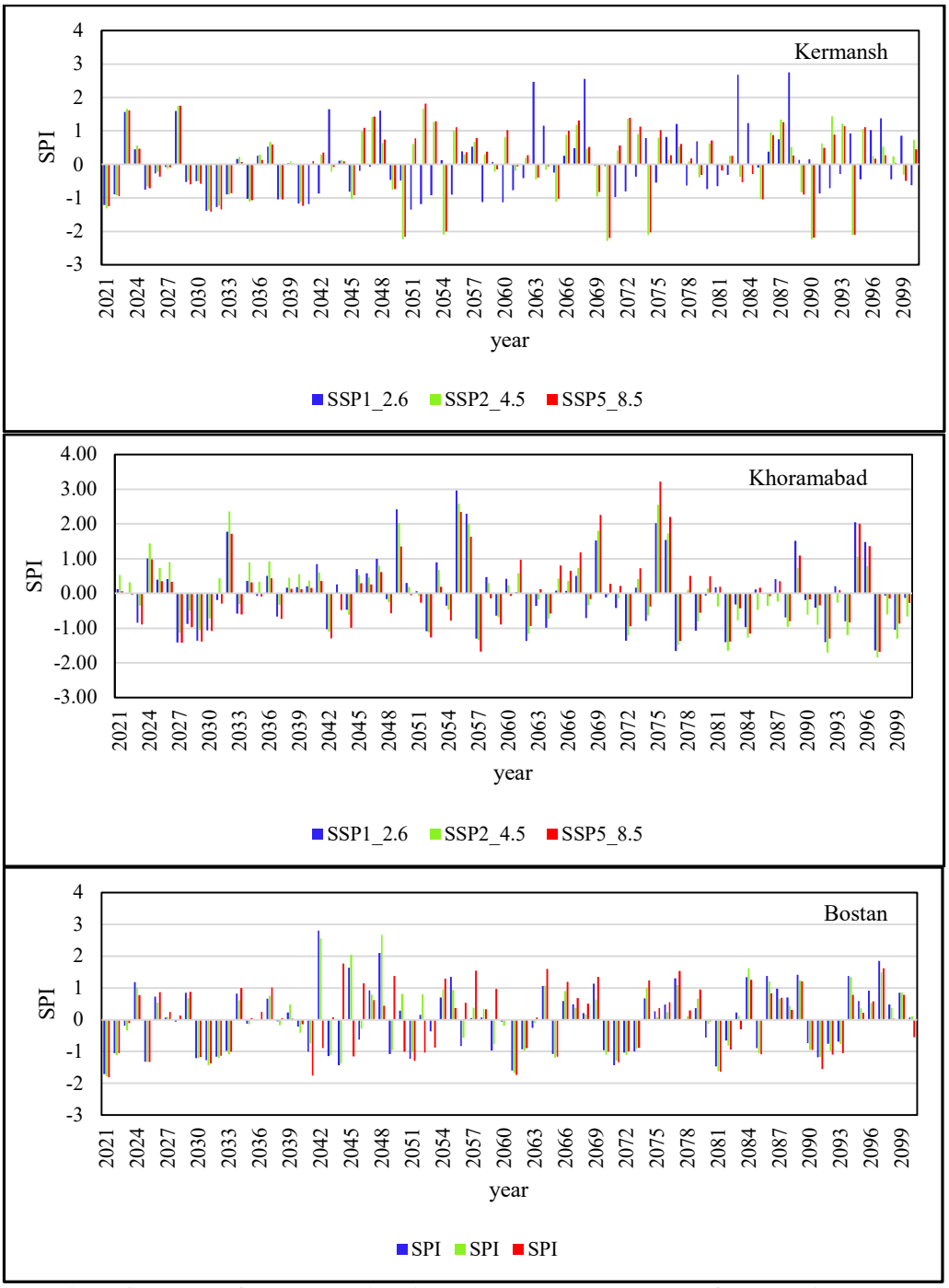


Fig. 7- SPI chart of selected stations in the Karkheh watershed the future period

شکل۷- نمودار SPI ایستگاه های منتخب حوضه آبریز کرخه در دوره آتی

صحت سنجی

میزان دقت (Accurancy) مدل‌ها یکی از مهم‌ترین مراحل پیش بینی داده‌های تصادفی و عدم قطعیت مدل‌ها است. برای تعیین میزان عدم قطعیت و دقت مدل‌ها از شاخص‌های r, RMSE, NRMSE در دوره پایه (۲۰۲۱-۱۹۹۱) استفاده شد. نتایج آزمون‌های صحت‌سنجی برآورد بارش ایستگاه کرمانشاه نشان داد در سه سناریوی SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5 همبستگی قوی بین مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده وجود دارد (مقادیر ضریب همبستگی به تفکیک هر مدل در جدول (۶) مندرج است). مقادیر RMSE در سه سناریوی در مدل‌های، ACCESS-ESM1، MRI-ESM2-0 و MPI-ESM1-2-LR عالی (کمتر از ۱۰) صحت‌سنجی شده است. دقت مدل HadGEM3-GC31-LL در سه سناریو با مقادیر RMSE ضعیف (۳۰-۲۰) برآورد شده است. دقت مدل GFDL-ESM طبق مقادیر RMSE در سناریو خوش‌بینانه عالی (۰ تا ۱۰) و سناریوهای واقع‌بینانه و بدبینانه خوب (۱۰ تا ۲۰) و دقت مدل CNRM-CM6-1 در سناریوهای خوش بینانه و واقع‌بینانه خوب و در سناریو بدبینانه عالی است. در بین مدل‌های مولد LARSWG8 در ایستگاه همدید کرمانشاه بالاترین دقت برای پیش‌بینی بارش در آینده را مدل ACCESS-ESM1 و کم‌ترین دقت را مدل HadGEM3-GC31-LL دارد (جدول ۶).

جدول ٦- صحت سنجی بارش کرمانشاه در سناریوهای انتشار در دوره‌ی آتی (۲۱۰۰-۲۰۲۱)

Table 6- Kermanshah precipitation validation in 2021-2100 emission scenarios

model	year	SSP1-2.6			SSP2-4.5			SSP5-8.5		
		NRMSE	RMSE	r	NRMSE	RMSE	r	NRMSE	RMSE	R
ACCESS-ESM1	2021-2040	12	8.3	0.96	12	8.5	0.95	9	6.7	0.97
	2041-2060	10.7	14	0.94	9	6.9	0.98	10	7.5	0.98
	2061-2080	10	7.5	0.96	8	6	0.98	9	6.7	0.98
	2081-2100	9	6.9	0.97	10	7.3	0.97	14	10.6	0.94
CNRM-CM6-1	2021-2040	14	10.2	0.94	16	11.7	0.91	14	9.7	0.94
	2041-2060	13	9.4	0.94	9	6.3	0.97	11	8.4	0.95
	2061-2080	14	10.4	0.92	13	9.76	0.95	13	9.9	0.93
	2081-2100	11	8.3	0.95	12	8.5	0.95	15	10.9	0.92
GFDL-ESM4	2021-2040	12	8.7	0.95	19	13.3	0.89	14	10.2	0.93
	2041-2060	12	9.05	0.94	10	7.6	0.96	15	10.9	0.94
	2061-2080	14	10.1	0.95	12	8.8	0.95	10	7.6	0.96
	2081-2100	14	9.97	0.96	17	12.7	0.94	16	11.6	0.92
HadGEM3-GC31-LL	2021-2040	24	16.9	0.88	30	21.1	0.86	30	21.1	0.90
	2041-2060	26	19.3	0.93	21	15.5	0.90	23	16.95	0.94
	2061-2080	27	19.6	0.89	19	13.96	0.92	35	25.4	0.86
	2081-2100	28	20.2	0.96	21	15.2	0.95	34	24.8	0.95
MPI-ESM1-2-LR	2021-2040	13	9.2	0.94	14	9.7	0.94	14	9.8	0.94
	2041-2060	14	9.96	0.95	18	13.3	0.93	14	10.4	0.97
	2061-2080	12	8.7	0.95	11	8.03	0.96	21	15.1	0.94
	2081-2100	15	11.4	0.96	17	12.3	0.94	18	13.06	0.92
MRI-ESM2-0	2021-2040	13	9.4	0.93	14	9.7	0.93	9	6.3	0.97
	2041-2060	9	6.8	0.97	8	5.8	0.98	10	7.2	0.97
	2061-2080	10	7.7	0.96	12	8.6	0.95	10	7.7	0.96
	2081-2100	16	11.4	0.91	11	8.4	0.96	11	8.4	0.97

DOI: 10.22055/jise.2025.48808.2153

نتایج آزمون‌های میزان صحت سنجی در برآورد بارش ایستگاه خرم آباد نشان داد که بر اساس مقادیر r در سه سناریوی SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5 همبستگی قوی جدول (۷) بین مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده وجود دارد. مقادیر RMSE در سناریوی SSP1-2.6، در مدل های GFDL-ESM4، ACCESS-ESM1 و MRI-ESM2-0 عالی (کمتر از ۱۰) و سایر مدل‌ها صحت‌سنجی مدل خوب (۲۰-۱۰) است. مقادیر RMSE در سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در مدل های GFDL-ESM4 و ACCESS-ESM1 و CNRM-CM6-1 و MRI-ESM2-0 و MPI-ESM1-2-LR خوب (۲۰-۱۰) ارزیابی شده است. دقت مدل HadGEM3-GC31-LL در سناریوی SSP1-4.6 و SSP2-4.5 با مقادیر RMSE خوب (۲۰-۱۰) و در سناریوی SSP5-8.5 ضعیف (۳۰-۲۰) است. در بین مدل‌های مولد LARSWG8 در ایستگاه همدید خرم آباد بالاترین دقت برای پیش‌بینی بارش در آینده را مدل GFDL-ESM4 و ACCESS-ESM1 و کم ترین دقت مدل HadGEM3-GC31-LL دارند (جدول ۷).

نتایج آزمون‌های دقت سنجی مدل‌ها در برآورد بارش ایستگاه همدید بستان نشان داد مقادیر R در سه سناریوی SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP5-8.5 همبستگی قوی جدول (۸) بین مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی‌شده وجود دارد. مقادیر RMSE در سه سناریوی انتشار، همه‌ی شش مدل مولد LARSWG8 در ایستگاه همدید بستان دقت عالی (کمتر از ۱۰) برای آینده نگری بارش دارند. در مقابل مدل CNRM-CM6-1 و ACCESS-ESM1 بالاترین میزان دقت و مدل HadGEM3-GC31-LL کم‌ترین دقت را در پیش‌بینی بارش بستان دارد (جدول ۸).

جدول۷- صحت سنجی بارش خرم آباد در سناریوهای انتشار در دوره‌ی آتی (۲۱۰۰-۲۰۲۱)

Table 7- Validation of Khorramabad precipitation in 2021-2100 emission scenarios

model	year	SSP1-2.6			SSP2-4.5			SSP5-8.5		
		NRMSE	RMSE	r	NRMSE	RMSE	r	NRMSE	RMSE	R
ACCESS-ESM1	2021-2040	12	9.7	0.96	15	12.5	0.95	14	11.4	0.95
	2041-2060	11	9.3	0.96	21	18.05	0.96	18	15.5	0.96
	2061-2080	17	14.5	0.96	17	14.6	0.96	19	16.4	0.96
	2081-2100	23	19.4	0.95	20	17.2	0.96	23	19.5	0.92
CNRM-CM6-1	2021-2040	17	13.9	0.95	12	10.2	0.96	14	11.7	0.96
	2041-2060	15	12.9	0.95	16	13.5	0.95	18	15.1	0.94
	2061-2080	18	15.03	0.93	17	14.3	0.95	22	18.8	0.92
	2081-2100	16	13.5	0.95	17	14.2	0.94	16	13.5	0.94
GFDL-ESM4	2021-2040	12	9.6	0.96	14	12	0.95	12	10.3	0.96
	2041-2060	18	15.4	0.93	16	13.8	0.93	19	16.09	0.89
	2061-2080	17	15	0.91	17	14.6	0.92	18	15.3	0.91
	2081-2100	15	13.3	0.93	19	16.1	0.93	17	14.2	0.92
HadGEM3-GC31-LL	2021-2040	19	16	0.96	28	24	0.95	31	26	0.96
	2041-2060	25	21.3	0.92	24	20.5	0.89	34	28.9	0.90
	2061-2080	27	23.5	0.91	29	24.6	0.90	42	35.8	0.86
	2081-2100	34	29.07	0.95	26	21.97	0.93	45	38.6	0.94
MPI-ESM1-2-LR	2021-2040	13	11.2	0.95	12	10.1	0.96	15	12.5	0.94
	2041-2060	15	12.9	0.95	17	14.8	0.93	17	14.6	0.93
	2061-2080	15	12.9	0.93	16	13.5	0.93	22	18.5	0.92
	2081-2100	17	14.2	0.94	18	15.1	0.92	22	19.05	0.86
MRI-ESM2-0	2021-2040	12	9.9	0.96	11	9.4	0.96	17	14.3	0.96
	2041-2060	14	11.7	0.95	11	9.2	0.96	13	11.03	0.95
	2061-2080	13	11	0.95	13	10.8	0.95	13	10.9	0.95
	2081-2100	13	11.3	0.95	17	14.3	0.92	16	13.3	0.93

جدول۸- صحت سنجی بارش بستان در سناریوهای انتشار در دوره‌ی آتی (۲۱۰۰-۲۰۲۱)

Table 8- Validation of Bostan precipitation in 2021-2100 emission scenarios

model	year	SSP1-2.6			SSP2-4.5			SSP5-8.5		
		NRMSE	RMSE	r	NRMSE	RMSE	r	NRMSE	RMSE	R
ACCESS-ESM1	2021-2040	14	5.8	0.94	14	5.9	0.93	13	5.2	0.94
	2041-2060	13	5.8	0.93	15	6.4	0.96	17	7.3	0.94
	2061-2080	20	8.6	0.85	16	6.9	0.91	16	6.7	0.92
	2081-2100	19	8.1	0.90	18	7.8	0.91	23	10.2	0.81
CNRM-CM6-1	2021-2040	13	5.7	0.94	11	4.6	0.96	12	4.9	0.95
	2041-2060	14	6.2	0.93	14	6.04	0.93	12	5.3	0.95
	2061-2080	13	5.8	0.94	11	4.8	0.96	16	7.03	0.92
	2081-2100	12	4.99	0.95	16	6.8	0.93	18	7.7	0.93
GFDL-ESM4	2021-2040	15	6.4	0.92	13	5.6	0.94	17	7	0.92
	2041-2060	16	6.8	0.91	18	7.6	0.88	17	7.3	0.91
	2061-2080	16	7.01	0.91	16	7.001	0.92	14	5.9	0.93
	2081-2100	18	7.8	0.90	16	7.1	0.94	19	8.03	0.88
HadGEM3-GC31-LL	2021-2040	14	5.8	0.94	19	7.8	0.93	19	7.8	0.95
	2041-2060	17	7.2	0.93	14	6.3	0.94	22	9.4	0.95
	2061-2080	15	6.5	0.92	18	8.02	0.95	25	10.8	0.96
	2081-2100	24	10.5	0.92	19	8.3	0.95	29	12.6	0.95
MPI-ESM1-2-LR	2021-2040	16	6.7	0.92	18	7.5	0.92	20	8.3	0.88
	2041-2060	21	9.21	0.86	17	7.2	0.92	19	8.05	0.94
	2061-2080	17	7.4	0.91	20	8.5	0.92	22	9.6	0.89
	2081-2100	19	8.3	0.91	17	7.2	0.92	16	7.03	0.92
MRI-ESM2-0	2021-2040	14	5.8	0.93	17	7	0.91	13	5.4	0.94
	2041-2060	13	5.7	0.95	12	5.4	0.95	18	7.8	0.90
	2061-2080	15	6.7	0.92	12	5.3	0.96	13	5.8	0.94
	2081-2100	17	7.3	0.95	14	5.96	0.95	13	5.6	0.95

DOI: 10.22055/jise.2025.48808.2153

بعد از انجام صحت‌سنجی، نمودار متوسط بلند مدت بارش مدل‌های LarsWG8 در دوره پایه (۲۰۲۱-۱۹۹۱) و دوره‌ی آتی (۲۱۰۰-۲۰۲۱) ترسیم و مقایسه شدند. بر اساس اعتبارسنجی انجام شده برای شبیه‌سازی بارش، دقیق‌ترین مدل جهت آینده‌نگری بارش در ایستگاه همدید کرمانشاه ACCESS-ESM1، MRI-ESM2-0 و MPI-ESM1-2-LR شکل (۸)، دقیق‌ترین مدل برای شبیه‌سازی بارش ایستگاه همدید خرم‌آباد GFDL-ESM4، MRI-ESM2-0 و ACCESS-ESM1 شکل (۹)، و عالی‌ترین آن برای پیش‌نگری بارش در ایستگاه همدید بستان CNRM-CM6-1 و ACCESS-ESM1 هستند شکل (۱۰). مقایسه مدل‌ها نشان می‌دهد در ایستگاه‌های خرم‌آباد و کرمانشاه مدل HadGEM3-GC31-LL دارای بیش برآوردی در مدل‌سازی بارش بوده و در ایستگاه بستان هر چند این مدل اعتبار عالی دارد ولی مقدار RMSE آن نسبت به سایر مدل‌ها بیشتر بوده و برای آینده‌نگری مناسب نیست.

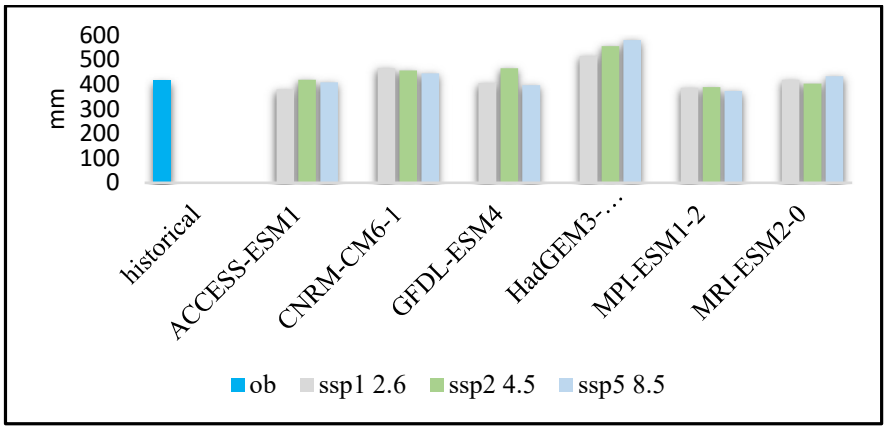


Fig. 8- Comparison of LarsWG8 models in the observation period and the future period in the long-term mean annual precipitation estimate of the Kermanshah synoptic station

شکل ۸- مقایسه‌ی مدل‌های LarsWG8 در دوره پایه و دوره آتی در برآورد متوسط بلندمدت بارش سالانه ایستگاه همدید کرمانشاه

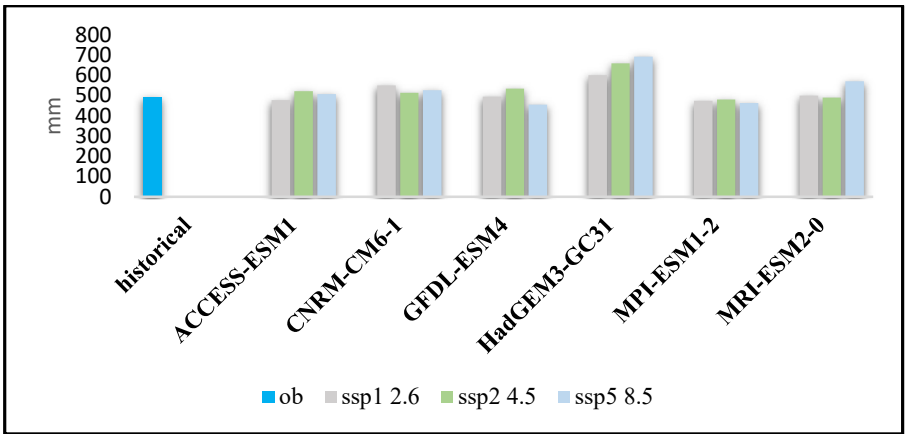


Fig. 9- Comparison of LarsWG8 models in the observation period and the future period in the long-term mean annual precipitation estimate of the Khorramabad synoptic station

شکل۹- مقایسه‌ی مدل‌های LarsWG8 در دوره پایه و دوره آتی در برآورد متوسط بلندمدت بارش سالانه ایستگاه همدید خرم‌آباد

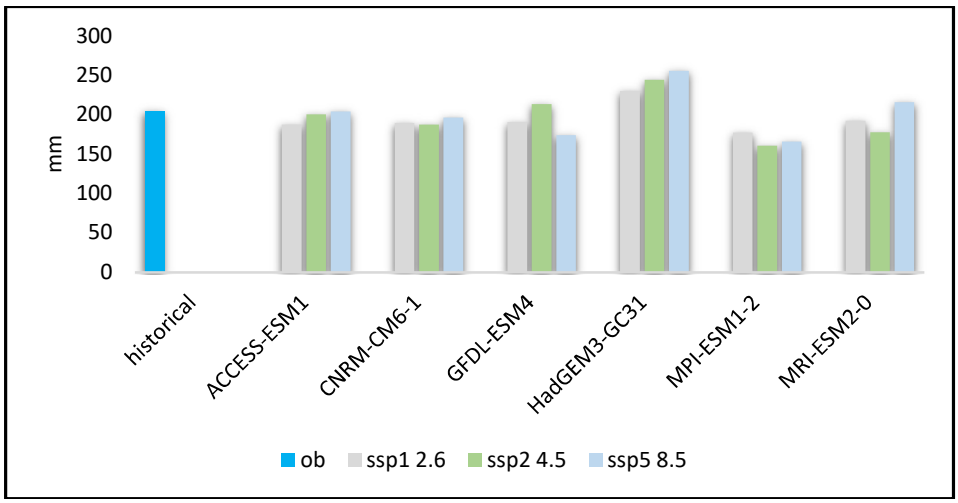


Fig. 10- Comparison of LarsWG8 models in the observation period and the future period in the long-term mean annual precipitation estimate of the Bostan synoptic station

شکل ۱۰- مقایسه‌ی مدل‌های LarsWG8 در دوره پایه و دوره آتی در برآورد متوسط بلندمدت بارش سالانه ایستگاه همدید بستان

نتایج و بحث

بررسی نمودارهای تغییرات بلندمدت فصلی بارش بیانگر جا به جایی فصلی دریافت بارش در حوضه کرخه طی دوره آتی است. به‌طوری‌که، فصول کم بارش در دوره‌ی مشاهداتی، برای سال‌های آینده افزایشی برآورد شده است. تغییرات بارش متوسط بلندمدت سالانه در دوره آتی نسبت به دوره مشاهداتی نشان داد که در دوره آتی (۲۰۲۱-۲۱۰۰) میزان بارش در ایستگاه کرمانشاه در سناریوهای خوش‌بینانه و بدبینانه کاهشی و در سناریوی واقع بینانه افزایشی خواهد بود. در ایستگاه همدید خرم‌آباد در سناریوی بدبینانه کاهشی و در سناریوهای خوش‌بینانه و واقع بینانه افزایشی برآورد شده است. این تغییرات در ایستگاه همدید بستان در سه سناریوی انتشار کاهشی خواهد بود. یافته های حاصل از پژوهش با نتایج Jahangir et al. (2020) همسو است. نتایج نشان داد احتمال رخداد خشکسالی طی سال‌های آتی (۲۰۲۱-۲۱۰۰) در ایستگاه کرمانشاه زیاد خواهد بود با توجه به همبستگی قوی بین بارش و دبی، کاهش بارش از سراب حوضه کرخه به معنای کاهش رواناب در پایاب حوضه کرخه خواهد بود که در صورت همراه بودن با تغییر اقلیم در پایاب، منجر به تشدید تنش دسترسی به منابع آب در پایین دست حوضه خواهد شد؛ بنابراین، مدیریت ریسک و تحقق اهداف توسعه پایدار از اقدامات حائز اهمیت، برای کاهش خسارات است. نتایج مطالعه Zhai et al. (2020) بیان‌گر قابلیت بسیار بالا روش چند مدلی گزارش CMIP6 در شبیه‌سازی ویژگی‌های خشکسالی است.

میزان دقت مدل‌ها یکی از مهمترین مراحل پیش‌بینی داده‌های تصادفی است. نتایج نشان داد در سه سناریوی انتشار و با توجه به بررسی شش مدل از مدل‌های مولد LARSWG8 در ایستگاه همدید کرمانشاه بالاترین دقت برای پیش‌بینی بارش در آینده را مدل ACCESS-ESM1 ، در ایستگاه همدید خرم‌آباد بالاترین دقت برای پیش‌بینی بارش در آینده را مدل GFDL-ESM4 و ACCESS-ESM1 در مقابل در ایستگاه بستان، مدل CNRM-CM6-1 و ACCESS-ESM1بالاترین میزان دقت و مدل HadGEM3-GC31-LL کم‌ترین دقت را در پیش بینی بارش در ایستگاه‌های نماینده حوضه کرخه دارد.

Roshani و Mehdi (2021)؛ Ajam Zadeh و Mollaeinia (2016) ؛ Gebisa et al. (2023)؛ Mukheef et al. (2024) نیز دقت و اعتبار بالای این مدل‌ها را در پیش‌بینی بارش تایید می‌کنند.

نتیجه گیری

در مناطق مختلف نمی‌توان از یک مدل خاص GCMs به‌طور یکسان استفاده کرد علاوه بر این، شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی همواره دارای عدم قطعیت هستند. در پژوهش حاضر، پس از صحت سنجی و ارزیابی دقت مدل‌های مولد ریزمقیاس LarsWG8، عالی‌ترین مدل انتخاب شده و تغییرات بارش در ایستگاه‌های منتخب حوضه آبریز کرخه برای دوره ۲۱۰۰-۲۰۲۱ آینده‌نگری شد. یافته‌ها نشان داد علاوه بر مدل ACCESS-ESM1 در هر سه ایستگاه همدید نماینده حوضه کرخه، مدل CNRM-CM6-1 در ایستگاه بستان، مدل GFDL-ESM4 در ایستگاه خرم آباد و مدل MRI-ESM2-0 در ایستگاه کرمانشاه بالاترین اعتبار و دقت را برای آینده‌نگری پارامتر بارش دارند. مدل HadGEM3-GC31-LL با پایین‌ترین RMSE در میزان بارش حوضه کرخه، بیش برآوردی داشته و مدل مناسبی

DOI: 10.22055/jise.2025.48808.2153

برای آینده نگری نیست. یافته‌های این بخش از پژوهش، با یافته‌های Roshani و Mehdi (2021)، Gebisa et al (2023) و Mollaienia et al (2024) مطابقت دارد. یافته‌های این محققین نشان داد مدل‌های MIROC5 و ACCESS1-3 بهترین مدل GCM در شبیه‌سازی بارش پاکستان و مدل GFDL-CM4 بهترین مدل‌ها از خروجی مدل CMIP6 در مدل‌سازی بارش رودخانه بار و مدل‌های MRI-ESM2-0، ACCESS-CM2، GFDLCM2.1 بالاترین دقت مدل‌سازی بارش در حوضه‌های آبریز ایران، ساری و در ایستگاه تنگاب استان فارس و مدل‌های ACCESS-CM2، BCC-CSM2-MR، MIROC6 در میانه و غرب عراق برای دوره آتی (۲۰۲۳–۲۰۵۰) در سناریو SSP2-4.5، بارش سالانه ممکن است ۳/۵۶–۳/۸۷ درصد افزایش یابد، در حالی که در سناریو SSP5-8.5، ممکن است از ۷/۲۲ درصد به ۱۲/۶۱ درصد افزایش یابد (Mukheef et al., 2024). مدل MPI-ESM1-2-HR در شبیه‌سازی بارش خاورمیانه بهترین عملکرد را دارا بوده‌اند (Mesgari et al., 2022). نتایج مطالعه‌های سایر پژوهشگران در پیش‌نگری بارش خاورمیانه روند کاهشی، در مدیترانه روند افزایشی، در غرب ایران کاهشی و در شمال کشور افزایش بارش پیش‌بینی کرده‌اند. نتایج پژوهش حاضر، نشان داد طی سال‌های آتی (۲۰۴۰–۲۰۲۱) جابه‌جایی فصل بارش در حوضه کرخه رخ خواهد داد که از شواهد بارز تغییر اقلیم است Khorshiddoust et al. (2016) در تحقیق خود به نتیجه مشابه دست یافته‌اند. همچنین نتایج پیش‌نگری بارش در سه ایستگاه نماینده سراب و میاناب و پایاب حوضه آبریز کرخه تا سال ۲۱۰۰ (با تقسیم چهار دوره ۲۰ ساله) نشان داد: ایستگاه کرمانشاه طبق سناریوهای خوش‌بینانه و بدبینانه در دوره ۲۰۴۰–۲۰۲۱ کاهش بارش و در سناریوی واقع‌بینانه افزایش بارش، در دوره ۲۰۶۰–۲۰۴۱ در سناریوی واقع بینانه و بدبینانه افزایشی و در سناریو خوش‌بینانه کاهشی و از سال ۲۱۰۰–۲۰۶۰ در سناریوهای مذکور افزایش بارش رخ خواهد داد. بارش در ایستگاه خرم‌آباد طبق سناریوهای خوش‌بینانه و واقع بینانه از سال ۲۰۲۱–۲۰۶۰ افزایشی و طبق سناریوی بدبینانه کاهشی، طبق سناریو خوش‌بینانه در سال ۲۰۸۰–۲۰۶۱ کاهشی و طبق سناریوهای بدبینانه و واقع بینانه افزایشی، طبق سناریوهای مورد بررسی در طی سال‌های ۲۰۸۱–۲۱۰۰ کاهشی خواهد بود. بارش در ایستگاه بستان برای دوره اول (۲۰۴۰–۲۰۲۱) کاهشی، برای دوره دوم (۲۰۶۰–۲۰۴۱) افزایشی، برای دوره سوم (۲۰۸۰–۲۰۶۱) طبق سناریوی خوشبینانه کاهشی و طبق سناریوی واقع‌بینانه و بدبینانه افزایشی، در دوره چهارم (۲۱۰۰–۲۰۸۱) افزایشی خواهد بود. یافته‌های این بخش با یافته‌های Jahangir et al. (2020) هم جهت است.

نتایج نشان داد در دوره آتی، بخش‌های شمال غرب و جنوبی کرخه در معرض خطر خشکسالی قرار خواهند گرفت یافته‌های این بخش با یافته‌های Zohrabi et al. (2016) و Ashraf Vaghefi et al (2014) هم جهت است. همچنین نتایج حاصل از ارزیابی صحت سنجی مبدل لارس نشان داد دقت این مبدل در برآورد بارش قابل اعتماد است. علاوه بر خروجی مدل CMIP6 می‌توان از این مبدل جهت مدل‌سازی استفاده کرد. همانگونه که Jahangir et al (2020) نیز جت برآورد بارش کرخه از آن مبدل استفاده کرده است.

محدودیت تحقیق: داده‌های اقلیمی با دوره آماری مشترک و طولانی مدت، برای انتخاب تعداد بیشتر ایستگاه‌هایی که نماینده حوضه کرخه باشند، وجود ندارد و محقق برای بررسی حوضه کرخه به سه ایستگاه اکتفا نموده است. محدودیت دیگر، برای مقایسه مدل‌های آماری LarsWG8 با مدل‌های پایگاه داده‌ی CORDEX محقق با محدودیت‌های دسترسی به سایت مواجه بوده است؛ بنابراین، مدل‌های خروجی مبدل لارس با مدل‌های بانک جهانی مقایسه شده‌اند که این نوع از داده‌ها خود، در مقیاس حوضه و استان در دسترس هستند.

پیشنهاد تحقیق: طی آزمون و خطا در انجام پژوهش، یافته‌ها نشان داد با کاهش دوره مشاهداتی، دقت و صحت‌سنجی مدل‌ها کاهش می‌یابد؛ بنابراین، پیشنهاد می‌گردد به‌منظور آینده‌نگری با مولد لارس، دوره‌ی پایه افزایش یابد. با توجه به عملکرد ضعیف مدل‌ها در مدل‌سازی بارش، بهتر است دقت تمام مدل های آینده‌نگر صحت‌سنجی شده و سپس پیش‌بینی انجام شود. افزایش اقدامات مطالعاتی و اجرایی مدیریت منابع آب برای کاهش چالش دسترسی به منابع آب و افزایش ظرفیت تاب آوری ذی‌نفعان با خشکسالی پیشنهاد می‌شود. از مدل‌های LarsWG8 مورد بررسی در حوضه آبریز کرخه، مدل ACCESS-ESM1 و GFDL-ESM4 دارای دقت بالا برای پیش‌بینی خشکسالی در حوضه آبریز کرخه است و از مدل‌های پیشنهادی محقق برای مطالعه‌های بیشتر در این زمینه است.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

منابع مالی

نویسندگان هیچ گونه حمایت مالی برای تحقیق، تالیف و انتشار این مقاله دریافت نکردند.

دسترسی به داده‌ها

مجموعه داده‌های تولید شده و یا تحلیل شده در طول مطالعه حاضر، در صورت درخواست معقول، از نویسنده مسئول در دسترس هستند.

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

اعلامیه هوش مصنوعی مولد و فناوری‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در فرایند نگارش

نویسندگان در مقاله خود از هوش مصنوعی مولد و فناوریهای کمکی هوش مصنوعی استفاده نکرده اند.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: مریم آریا صدر، در جمع‌آوری داده‌ها، تکمیل پرسشنامه‌ها و انجام مطالعات میدانی مشارکت داشت. همچنین، تهیه نسخه اولیه مقاله و اعمال اصلاحات و بازنگری‌های پیشنهادی استاد راهنما توسط ایشان انجام شد.

نویسنده دوم: داریوش رحیمی، ایده و طرح اولیه پژوهش و تبیین مسئله تحقیق توسط ایشان ارائه شد. همچنین، در انجام محاسبات، تحلیل و بررسی نتایج، ویرایش و بازنگری علمی متن مقاله و اعمال اصلاحات نهایی مشارکت داشت.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه اصفهان، سازمان هواشناسی کشور و وزارت نیرو برای در اختیار قرار دادن داده‌های این پژوهش تشکر و قدردانی می‌کنند.

References

1- Abbasian, M., Moghim, S. and Abrishamchi, A., 2019. Performance of the general circulation models in simulating temperature and precipitation over Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 135, pp.1465-1483. Doi: https://doi.org/10.1007/s00704-018-2456-y.

2- Abdolalizadeh, F., Mohammad Khorshiddoust, A., Jahanbakhsh, S., 2022. 'Assessment of the performance of CMIP6 model for analysis of temperature and precipitation in Urmia Lake basin', *Climate Change Research*, 3(11), pp. 17-30. Doi: 10.30488/CCR.2022.361233.1093 (In Persian)

3- Ahmed, K., Sachindra, D.A., Shahid, S., Demirel, M.C. and Chung, E.S., 2019. Selection of multi-model ensemble of GCMs for the simulation of precipitation based on spatial assessment metrics. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23, pp.4803-4824. Doi: https://doi.org/10.5194/hess-2018-585

4- Ajam Zadeh, A., Mollaeinia, M., 2016. 'Assessment of Impact of Climate Change on Firoozabad River Runoff with Downscaling of Atmospheric Circulation Models Output by SDSM and LARS-WG Softwares', *Iran-Water Resources Research*, 12(1), pp. 95-109. SID. Doi: https://sid.ir/paper/100449/fa (In Persian)

5- Almazroui, M., Islam, M. N., Alkhalaf, A. K., Saeed, F., Dambul, R., & Rahman, M. A. 2016. Simulation of temperature and precipitation climatology for the CORDEX-MENA/Arab domain using RegCM4. *Arabian Journal of Geosciences*, *9*, 1-14. Doi: https://doi.org/10.1007/s12517-015-2045-7.

6- Ansari, S., Dehban, H., Zareian, M., Farokhnia, A., 2022. 'Investigation of temperature and precipitation changes in the Iran's basins in the next 20 years based on the output of CMIP6 model', *Iranian Water Researches Journal*, 16(1), pp. 11-24. Doi: https://doi.org/10.22034/iwrj.2022.11204 (In Persian).

7- Ashraf Vaghefi, S., Mousavi, S.J., Abbaspour, K.C., Srinivasan, R. and Yang, H., 2014. Analyses of the impact of climate change on water resources components, drought and wheat yield in semiarid regions: Karkheh River Basin in Iran. *hydrological processes*, 28(4), pp.2018-2032. https://doi.org/10.1002/hyp.9747.

8- Bucchignani, E., Mercogliano, P., Rianna, G., & Panitz, H. J. 2016. Analysis of ERA-Interim-driven COSMO-CLM simulations over Middle East–North Africa domain at different spatial resolutions. *International Journal of Climatology*, *36*(9), 3346-3369. Doi: https://doi.org/10.1002/joc.4559.

9- Eskani Kazzazi, G. H., 2017. 'Tghyyraqlym simulated effects on water on resources and disaster management of large Karun Basin (The case study: Ahwaz)', *Geography (Regional Planning)*, 6(25), pp. 235-242. Doi: 20.1001.1.22286462.1395.7.1.35.1 (In Persian).

10- Gebisa, B.T., Dibaba, W.T. and Kabeta, A., 2023. Evaluation of historical CMIP6 model simulations and future climate change projections in the Baro River Basin. *Journal of Water and Climate Change*, 14(8), pp.2680-2705. Doi: https://doi.org/10.2166/wcc.2023.032.

11- Habibi, A., and Kolahi, B., 2022. *Structural equation modeling and factor analysis*, Academic Jihad. (In Persian).

12- Hasheminasab, S., Rahimi, D., Zakerinejad, R., & Kropáček, J., 2022. Assessment of climate change impact on surface water: A case study—Karoun river Basin Iran. *Arabian Journal Of Geosciences*, 15(9), 904. https://doi.org/10.1007/s12517-022-09969-5.

13- Hamed, M. M., Sobh, M. T., Ali, Z., Nashwan, M. S., & Shahid, S., 2024. Aridity shifts in the MENA region under the Paris Agreement climate change scenarios. *Global and Planetary Change*, *238*, 104483. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2024.104483.]

14- He, M., Chen, Y., Sun, H. and 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), p.4608. Doi: https://doi.org/10.3390/rs15184608.

15- IPCC, 2022, Change, I.P.O.C., 2001. Climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability. Genebra, Suíça..

16- Jahangir, M. H., Asadi, A., Noroozi, E., Talei, M., 2020. 'Forecasting of Precipitation in Karkheh Catchment Area through LARS-WG Model', *Journal of Ecohydrology*, 7(4), pp. 981-992. Doi: 10.22059/IJE.2020.302480.1328 (In Persian).

17- Khorshiddoust, A. M., Banafsheh, M. R., Mirhashemi, H., & Kakolvand, Y., 2016. Studying the trend of changes in precipitation-discharge the Karkhe Rive Sub-Basin using non-parametric methods, case study: Kashkan Basin. *Irrigation Sciences and Engineering*, *38*(4), 177-188. (In Persian).

18- Khosravi, M., Ismailnejad, M., and Nazaripour, H., 2010. Climate change and its impact on water resources in the Middle East. *International Congress of Geographers of the Islamic World*, -(4), pp. 0-0. SID. Doi: https://sid.ir/paper/484264/fa (In Persian).

19- Mahato, A., Upadhyay, S. and Sharma, D., 2022. Global water scarcity due to climate change and its conservation strategies with special reference to India: a review. *Plant Archives (09725210),* 22(1). http://dx.doi.org/10.51470/PLANTARCHIVES.2022.v22.no1.009.

20- Mesgari, E., Hosseini, S. A., Hemmesy, M. S., Houshyar, M., & Partoo, L. G., 2022. Assessment of CMIP6 models' performances and projection of precipitation based on SSP scenarios over the MENAP region. *Journal of Water and Climate Change*, *13*(10), 3607-3619. https://doi.org/10.2166/wcc.2022.195.

21- Mollaienia, M.R., Mousavi, Z.A. and Mohammadi, M., 2024. Flood modeling in the Qarasu River catchment using four-dimensional vine copulas. *Journal of Climate Research*, *1403*(57), pp.101-118. DOI: 10.22034/jcr.2024.190468.

22- Mukheef, R. A., Hassan, W. H., & Alquzweeni, S. J. A. R., 2024. Projections of temperature and precipitation trends using CMhyd under CMIP6 scenarios: A case study of Iraq's Middle and West. *Atmospheric Research*, *306*, 107470. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2024.107470.

23- Nguyen-Duy, T., Ngo-Duc, T. and Desmet, Q., 2023. Performance evaluation and ranking of CMIP6 global climate models over Vietnam. *Journal of Water and Climate Change*, 14(6), pp.1831-1846. https://doi.org/10.2166/wcc.2023.454.

24- Peng, S., Wang, C., Li, Z., Mihara, K., Kuramochi, K., Toma, Y. and Hatano, R., 2023. Climate change multi-model projections in CMIP6 scenarios in Central Hokkaido, Japan. *Scientific Reports*, 13(1), p.230. Doi: https://doi.org/10.1038/s41598-022-27357-7.

25- Rahimiani Iranshahi, H. , Moradi, H. R. and Jalili, K., 2022. Trend of precipitation and temperature changes at different time scales in the Karkheh Watershed. *Water and Soil Management and Modelling*, *2*(2), 1-12. https://doi.org/10.22098/mmws.2022.9520.1048 (In Persian).

26- Roshani, A., and Mehdi, H., 2021. Forecasting the effects of climate change scenarios on temperature and precipitation based on CMIP6 models (case study: Sari station). *Water and Irrigation Management*, 11(4), pp. 781-795. Doi: 10.22059/JWIM.2022.330603.920 (In Persian).

27- Saharwardi, M. S., Dasari, H. P., Hassan, W. U., Gandham, H., Pathak, R., Zampieri, M., ... & Hoteit, I. (2025). Projected increase in droughts over the Arabian Peninsula and associated uncertainties. *Scientific Reports*, *15*(1), 1711. https://doi.org/10.1038/s41598-025-85863-w.

28- Salman, S. A., Hamed, M. M., Shahid, S., Ahmed, K., Sharafati, A., Asaduzzaman, M., ... & Dewan, A., 2022). Projecting spatiotemporal changes of precipitation and temperature in Iraq for different shared socioeconomic pathways with selected Coupled Model Intercomparison Project Phase 6. *International Journal of Climatology*. http://dx.doi.org/10.1002/joc.7794.

29- Semenov, M.A., 2008. Simulation of extreme weather events by a stochastic weather generator. *Climate Research*, 35(3), pp.203-212. DOI: https://doi.org/10.3354/cr00731.

29- Semenov, M.A. and Stratonovitch, P., 2015. Adapting wheat ideotypes for climate change: accounting for uncertainties in CMIP5 climate projections. *Climate Research*, 65, pp.123-139. DOI: https://doi.org/10.3354/cr01297.

30- Sime, C.H. and Dibaba, W.T., 2023. Evaluation of CMIP6 model performance and extreme precipitation prediction in the Awash basin. Heliyon, 9(11). Doi: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21578.

31- Shafiei, M., Bazrafshan, J. and Irannejad, P., 2018. Assessment of the role of rainfall in river flow drought retrieval in the Karkheh basin. *Journal of Meteorology and Atmospheric Science*, *1*(1), pp.39-52. (In Persian).

32- Xie, F., Chandan, D., & Peltier, W. R., 2024. Dynamical Downscaling of the Mid-Holocene Climate Using a Coupled Atmosphere-Ocean Model Over the Mediterranean, North Africa and Middle East Regions. *North Africa and Middle East Regions*. Doi: http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4723699.

33- Yang, X., Sun, W., Wu, J., Che, J., Liu, M., Zhang, Q., Wang, Y., Huai, B., Wang, Y. and Wang, L., 2023. Evaluation and projection of precipitation in CMIP6 models over the Qilian Mountains, China. Remote Sensing, 15(17), p.4350. Doi: https://doi.org/10.3390/rs15174350.

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

35- Zohrabi N, Massah Bavani A, Goodarzi E, Heidarnejad M., 2016. Identify Trend in the Annual Temperature and Precipitation in Karkheh River Basin. *Wetland Ecobiology*, 8 (2) :5-22 URL: http://jweb.ahvaz.iau.ir/article-1-434-fa.html (In Persian).

36- Zhai, J., Mondal, S.K., Fischer, T., Wang, Y., Su, B., Huang, J., Tao, H., Wang, G., Ullah, W. and Uddin, M.J., 2020. Future drought characteristics through a multi-model ensemble from CMIP6 over South Asia. *Atmospheric Research*, *246*, pp.105111. https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105111