

Research Paper

The Effect of Climate Change on Temperature and Precipitation in Two Different Climates using CMIP6 Models and SSP Extreme Scenarios

Seyed Mohammadreza
Hosseini Vardanjani¹

Mojtaba
Khoshravesh^{2*}

Rooholah
Fatahi Nafchi³

Reza Norooz-
Valashedi⁴

Yavar
Pourmohamad⁵

- 1- Ph.D. Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.
- 2- Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran. (Corresponding author, Email: m.khoshravesh@sanru.ac.ir)
- 3- Professor, Department of Water Science and Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.
- 4- Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran.
- 5- Researcher at Boise State University, Boise, USA



10.22125/iwe.2025.496104.1847

Received:
October 28, 2024
Accepted:
February 26, 2025
Available online:
April 25, 2025

Keywords:
**Atmospheric general
circulation model.
Adaptation, Weather
variable, water
resources.**

Abstract

The surface temperature of the Earth is rising, and due to climate change, this trend is expected to continue. However, these changes do not occur uniformly on a global scale, making it necessary to assess their impacts at the regional level. Examining these effects in each region is essential for a more accurate understanding of future challenges and related planning. This study investigates the effects of climate change on climatic variables using the MRI ESM2.0 climate prediction model in accordance with the sixth CMIP6 report in Lordegan and Borujen, employing temperature and precipitation data recorded at these two stations from 2000 to 2014. Subsequently, future atmospheric conditions were forecasted for two twenty-year periods: the near future (2020-2040) and the distant future (2040-2060), based on three designed emission scenarios—optimistic (SSP1-2-6), intermediate (SSP2-4-5), and pessimistic (SSP5-8-5). By comparing the parameters of the baseline period with the predicted future values, the Borujen and Lordegan stations are expected to see an increase in average minimum temperatures ranging from 1.3 degrees Celsius in the optimistic scenario during the near future to approximately 2.6 degrees Celsius in the pessimistic scenario in the distant future compared to the baseline period. For maximum temperatures, an increase between 1.2 and 3.1 degrees Celsius is observed across all selected scenarios. Additionally, when comparing the historical and predicted average total precipitation at the target stations, a significant decrease in future rainfall is anticipated relative to the baseline period, with this decrease expected to be greater in the distant future than in the near future. Specifically, the projected reduction in precipitation for Borujen is

* Corresponding Author: Mojtaba Khoshravesh

Address: Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

Email: Khoshravesh_m24@yahoo.com,
m.khoshravesh@sanru.ac.ir
Tel: 09113521654

estimated to range from 7.5% to 11%, while for Lordegan, it is expected to vary from 12% to 14.7%. The results of this study can contribute to future water resource management, establish effective programs to address climate change, and prepare the ground for informed decision-making and appropriate planning.

1. Introduction

Climate change refers to long-term shifts in weather conditions. As climate change occurs, weather variables such as temperature and precipitation change in different regions. The phenomenon of climate change, through changes in climatic variables like temperature and precipitation, causes alterations in the integrated water resources system. According to research results from the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), this phenomenon has negative impacts on water resources in countries within arid and semi-arid regions of Asia, including Iran. Climate change is a global issue affecting agriculture, water resources, energy, food security, public health, and ecosystems. Addressing climate change has therefore become a key action for many countries. To project climate changes on various systems, including agriculture and water resources, General Circulation Models (GCMs) are used. The World Climate Research Programme has issued a series of experiments known as the Coupled Model Intercomparison Project since the 1990s. These models provide targeted and high-quality simulations for a better understanding of past climate changes and for conducting projections and uncertainty estimates in the future. General Circulation Models (GCMs) do not have uniform resolution and accuracy, and their accuracy and efficiency vary in different regions. Furthermore, the reliability of GCMs depends on their ability and accuracy in reproducing baseline climate characteristics and future periods. These capabilities are valuable for water resource engineers as they facilitate effective planning and strategic decision-making. Ultimately, evaluating the performance of GCMs is crucial as it enables us to simulate and predict various climate scenarios, empowering us to make informed choices. The sixth phase of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP6) brings significant advancements compared to its predecessor, CMIP5. The collection of sixth assessment reports presented by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) serves as one of the most important scientific resources in the field of climate change, examining climate change scenarios and their effects on societies and the environment.

2. Methodology

Lordegan County, with an area of 2,407 square kilometers, accounts for 16% of the total area of Chaharmahal and Bakhtiari Province. Geographically, this county is situated between longitudes 50 degrees and 16 minutes to 51 degrees and 20 minutes east, and latitudes 31 degrees and 9 minutes to 31 degrees and 39 minutes north. Borujen County, with an area of 2,256.2 square kilometers, represents 14% of the province's total area. The specifications of the stations studied are presented in Table (1).

Table 1 Characteristics of the Measurement Station

Altitude Above Sea Level (m)	Climate Type	Latitude	Longitude	Weather Station
1611	Emberger: Humid De Martonne: Mediterranean	51.3	31.5	Synoptic Lordegan
2260	Emberger: Cold Arid DeMartonne: Arid	50.83	31.98	Synoptic Borujen

3. The sixth report of CMIP6

Mathematical models known as General Circulation Models (GCM) are used to predict future climate changes. The reliability of these models depends on their ability to reproduce climatic features and

future periods accurately. Since the 1990s, the World Climate Research Program has initiated the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP) to enhance the understanding of past climate changes (Flato and Hargreaves, 2011). The sixth reports of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) examine climate change scenarios and their impacts on communities. These reports analyze risks and mitigation strategies to reduce the negative effects of climate change using scientific data and advanced models. The scenarios under consideration include temperature increases, changes in precipitation patterns, and sea-level rise. Additionally, these scenarios relate to social factors such as sustainable development and inequality and incorporate more layers compared to previous generations of models.

4. MRI ESM2.0 model

The MRI ESM2.0 model consists of four main components: the Atmospheric General Circulation Model with land processes (AGCM), the Sea-Ice-Ocean General Circulation Model, and models for aerosols and atmospheric chemistry. This model is essentially an integration of interactive models for aerosols and atmospheric chemistry within a coupled atmosphere-ocean model. The MRI model was designed and developed at the Japan Meteorological Research Institute. The latest version, MRI ESM2.0, was developed in 2017 based on its earlier models that were part of the fifth phase of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP5), undergoing numerous advancements to provide highly accurate climate simulations. This advanced model has a horizontal resolution of 100 kilometers for the atmosphere and ocean, and 250 kilometers for aerosols and atmospheric chemistry, which is similar to its predecessors. Increasing horizontal resolution would incur significant computational costs; therefore, the vertical resolution was enhanced instead to better represent physical processes and atmospheric circulation in the model. Studies show that the MRI-ESM2.0 model has high efficiency in estimating the mean temperature over the area of Iran compared to other CMIP6 models. Its lower horizontal resolution contributes to improving and reducing the uncertainty of the parameters predicted by the model.

5. LARS-WG model

The LARS-WG model is a weather generator based on time series methods that can be used to simulate meteorological data at a station under current and future climatic conditions. This generator utilizes observed weather data from a given station to derive the parameters of probability distributions for climate variables and to establish the relationships between them, generating data relevant for future periods.

6. Performance evaluation criteria

To assess the model's performance in predicting climatic data for precipitation and temperature at the studied stations, the following statistical indices were used: Mean Absolute Deviation (MAD), Root Mean Square Error (RMSE), and the Kling-Gupta efficiency (KGE) metric.

7. Results

The results indicated that the model is highly accurate in simulating maximum and minimum temperature parameters. However, it exhibits a higher error in simulating precipitation compared to the other parameters. During the baseline period, the predictive model that demonstrates the highest correlation with the observational data is selected, and precipitation and temperature values are generated or reconstructed for the baseline period and subsequently for the future. Considering that the computed mean values of the observational and model simulation data series are very close, it can be said that the MRI-ESM2.0 model is suitable for climate prediction in the studied stations for the near future (2020-2040) and the distant future (2040-2060). The RMSE, MAD, and KGE coefficients are employed as suitable metrics to express the difference between the simulated and measured values. For the Borujen station, under the optimistic scenario SSP1-2.6, the moderate scenario SSP2-4.5, and the

pessimistic scenario SSP5-8.5, an increase of 1.2 to 3.1 degrees Celsius in the maximum temperature and an increase of 1.3 to 2.65 degrees Celsius in the average minimum temperature are expected for the near to distant future compared to the baseline period. Based on the examination and comparison of the simulated future average precipitation relative to the baseline period, the Borujen station is projected to experience a decrease in rainfall across all emission scenarios. Given the climate of the Lordegan region, a slight increase in minimum and maximum temperatures is observed at this station under the optimistic scenario, with a more significant increase under the pessimistic scenario. The graphs indicate that the trend of precipitation changes in the Mediterranean and humid climate of Lordegan will decrease in the near future from 1.2% to 12% and in the distant future from 3.6% to 14.7%. I'm unable to perform web searches at the moment due to a temporary limitation.

8. Discussion and Conclusion

This research examines the impact of climate change on temperature and precipitation variables recorded at the synoptic stations of Lordegan and Borujen, which have two different climates, using the MRI ESM2.0 climate prediction model in the CMIP6 sixth assessment report. The study uses designed scenarios for the baseline period of 2000-2014 and employs them to predict future weather conditions based on three scenarios: optimistic SSP1-2-6, moderate SSP2-4-5, and pessimistic SSP5-8-5, over two twenty-year periods in the near future (2020-2040) and the distant future (2040-2060). The results of the model performance error analysis showed that MRI ESM2.0 is highly accurate in simulating maximum and minimum temperature parameters but exhibits a greater error in simulating precipitation parameters compared to the other two parameters. In future periods, the increase in the average maximum temperature in the cold and dry climate of Borujen will be greater than in the warm and humid climate of Lordegan for daily maximum temperatures. Regarding rainfall, it can be said that the future decrease in precipitation in the Mediterranean and humid climate of Lordegan shows greater changes compared to the cold and dry climate of Borujen. By correcting the output of the selected model in the future emission scenario, acceptable values for temperature and precipitation can be obtained. These reports are used as a reliable resource for organizations, policymakers, and the scientific community to make appropriate decisions regarding the management and reduction of the effects of climate change.

9. Six important references

- 1) Feyissa, T.A., Demissie, T.A., Saathoff, F., and Gebissa, A. (2024). Hydrological responses projection to the potential impact of climate change under CMIP6 models scenarios in Omo River Basin, Ethiopia, *Results in Engineering*, Volume 23, 102708.
- 2) Kawai H., Yukimoto S., Koshiro T., Oshima N., Tanaka T., Yoshimura H., Nagasawa R. (2019). Significant improvement of cloud representation in the global climate model MRI-ESM2. *GMD*, 12, 2875–2897.
- 3) O'Neill, B., Kriegler, E., Ebi, K., Kemp-Benedict, E., Riahi, K., Rothman, D., Van Ruijven, B., Van Vuuren, D., Birkmann, J., Kok, K., Levy., and Solecki, W. (2017). The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Global Environmental Change*, 42(1), 169-180.
- 4) Rasco, P., Szeidl, L., and Semenov, M.A. (1991). A serial approach to local stochastic models. *J. Ecological Modeling* 57, 27-41.
- 5) Shahi, S., Hosseini, K., & Mousavi, S. F. (2024). Assessing the Effects of Climate Change on Temperature and Precipitation using CMIP6 models (case study: Damghan, Iran). *Journal of Hydraulic and Water Engineering*, 1(2), 163-177.
- 6) Tadase, A.T. (2024). Climate trend analysis in the ramis catchment, upper wabi shebelle basin, Ethiopia, using the CMIP6 dataset, *Journal of African Earth Sciences*, Volume 217, 105347.
- 7) Tacarindua, C. R., Shiraiwa, T., Homma, K., Kumagai, E., and Sameshima, R. (2013). The effects of increased temperature on crop growth and yield of soybean grown in a temperature gradient chamber. *Field Crops Research*, 154 (1):74-81.

Conflict of Interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

اثر تغییر اقلیم بر دما و بارش در دو اقلیم مختلف با استفاده از مدل های CMIP6 و سناریوهای حدی SSP

سید محمدرضا حسینی وردنجانی^۱، مجتبی خوشروش^{۲*}، روح الله فاتحی نافچی^۳، رضا نوروز ولاشدی^۴، یاور پورمحمد^۵

تاریخ ارسال: ۱۴۰۳/۰۸/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۰۸

مقاله پژوهشی

چکیده

دمای سطح کره زمین در حال افزایش است، به دلیل تغییرات آب و هوایی، پیش‌بینی می‌شود که این روند ادامه یابد. با این حال، این تغییرات به طور یکنواخت در سطح جهانی رخ نمی‌دهند و لازم است که اثرات آنها در سطح منطقه‌ای مورد ارزیابی قرار گیرد. بررسی این تأثیرات در هر منطقه، برای درک دقیق‌تر چالش‌های آینده و برنامه‌ریزی‌های مرتبط با آن ضروری است. در این پژوهش به بررسی اثر تغییر اقلیم بر متغیرهای اقلیمی به کمک مدل پیش‌بینی کننده اقلیمی MRI ESM2.0 مطابق با گزارش ششم CMIP6 در لردگان و بروجن با استفاده از داده‌های اقلیمی دما و بارش ثبت شده در دو ایستگاه مذکور طی سال‌های 2000-2014 پرداخته شد. سپس بر اساس سناریوهای انتشار طراحی شده شامل سه سناریو خوش‌بینانه SSP1-2-6، حد متوسط SSP2-4-5 و بدبینانه SSP5-8-5 وضعیت جوی آتی دو دوره بیست ساله در آینده‌ی نزدیک (۲۰۲۰-۲۰۴۰) و آینده‌ی دور (۲۰۴۰-۲۰۶۰) پیش‌یابی شد. با مقایسه پارامترهای دوره پایه و مقادیر پیش‌بینی شده آتی، ایستگاه بروجن و لردگان شاهد افزایش مقادیر میانگین‌های دمای حداقل از ۱/۳ درجه سانتی‌گراد در سناریوی خوش‌بینانه تا در دوره آینده نزدیک، تا ۲/۶ درجه سانتی‌گراد در سناریوی بدبینانه در دوره آینده دور نسبت به دوره پایه اتفاق خواهد افتاد و برای دمای حداکثر نیز افزایشی بین ۱/۲ تا ۳/۱ درجه سانتی‌گراد در کلیه سناریوهای انتخابی مشاهده شد. همچنین در مقایسه میانگین مجموع بارش تاریخی و پیش‌یابی شده ایستگاه‌های هدف، کاهش چشمگیر میزان بارندگی دوره آتی نسبت به دوره پایه اتفاق خواهد افتاد، که این میزان کاهش در آینده دور نسبت به آینده نزدیک افزونتر خواهد بود. بطوری که میزان کاهش بارندگی برای بروجن از ۷/۵ تا ۱۱ درصد و برای لردگان از ۱۲ تا ۱۴/۷ درصد متغیر خواهد بود. نتایج این مطالعه می‌تواند به مدیریت منابع آب در آینده، ایجاد برنامه‌هایی موثر برای مقابله با تغییرات اقلیمی و زمینه را برای تصمیم‌گیری آگاهانه و برنامه‌ریزی مناسب آماده می‌نماید.

واژه‌های کلیدی: سازگاری، متغیر هواشناسی، مدل گردش عمومی جو، منابع آب.

^۱ دانشجوی دکتری آبیاری و زهکشی، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.
^۲ دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. (*نویسنده مسئول: m.khoshravesh@sanru.ac.ir)

^۳ استاد، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

^۴ دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.

^۵ محقق دانشگاه ایالتی بویزی، دانشگاه ایالتی بویزی، آمریکا.



مقدمه

تغییر اقلیم به تغییرات بلندمدت شرایط آب و هوایی گفته می‌شود، با وقوع تغییر اقلیم متغیرهای آب و هوایی مانند دما و بارش در مناطق مختلف تغییر می‌کنند (Nikkhoo Amiri et al., 2023). پدیده تغییر اقلیم، با تغییر در متغیرهای اقلیمی همچون دما و بارش، سبب تغییر در سیستم یکپارچه منابع آب می‌شود. براساس نتایج تحقیقات هیئت بین الدول تغییر اقلیم این پدیده در کشورهای مناطق خشک و نیمه‌خشک قاره آسیا از جمله ایران اثرات منفی را بر روی منابع آب به همراه خواهد داشت (Hijioka et al., 2014). تغییر اقلیم یک مسئله جهانی است که بر کشاورزی، منابع آب، امنیت غذایی، سلامت عمومی و اکوسیستم‌ها تأثیر می‌گذارد. از این رو، پرداختن به تغییرات آب و هوایی به اقدامات کلیدی برای بسیاری از کشورها تبدیل شده است (سالاریه و همکاران، ۱۴۰۳). برای پیش‌بینی تغییرات اقلیمی بر روی سامانه‌های مختلف از جمله کشاورزی، منابع آب و ... از مدل‌های گردش عمومی جو استفاده می‌شود. برنامه‌ی تحقیقات جهانی آب و هوا از دهه‌ی ۱۹۹۰ مجموعه‌ای از آزمایش‌های معروف به پروژه‌ی مقایسه‌ی مدل‌های جفت‌شده را انتشار داد. این مدل‌ها برای درک بهتر تغییرات اقلیمی گذشته و انجام پیش‌بینی‌ها و برآوردهای عدم قطعیت در آینده شبیه‌سازی‌های هدفمند و باکیفیتی را ارائه نموده‌است (Annan and Hargreaves, 2011). مدل‌های گردش عمومی جو دارای وضوح و دقت یکسان نبوده و دقت و کارایی آن‌ها در مناطق مختلف، متفاوت است. از طرفی قابلیت اطمینان مدل‌های گردش عمومی جو به توان و صحت آن‌ها در بازتولید ویژگی‌های آب و هوایی پایه و دوره آینده وابسته است. این قابلیت‌ها برای مهندسی منابع آب ارزشمند هستند زیرا برنامه‌ریزی مؤثر و تصمیم‌گیری استراتژیک را تسهیل می‌کنند. در نهایت، ارزیابی عملکرد GCM ها بسیار مهم است زیرا امکان شبیه‌سازی و پیش‌بینی سناریوهای مختلف آب و هوا را می‌دهد تا انتخاب‌های آگاهانه‌ای وجود داشته باشد. مرحله ششم پروژه همکاری مقایسه مدل‌ها (CMIP6) پیشرفت‌های قابل توجهی را نسبت به مرحله قبل خود، CMIP5، به ارمغان می‌آورد (O'Neill et al.,

2016). مجموعه گزارش‌های ششم ارائه شده توسط گروه کاری بین‌دولتی تغییرات اقلیمی (IPCC)، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع علمی در زمینه تغییرات اقلیمی، به بررسی سناریوهای تغییر اقلیمی و اثرات آن بر جوامع و محیط زیست می‌پردازد (IPCC, 2021). در خصوص تغییر اقلیم بر مبنای گزارش پنجم مطالعات مختلفی در سطح جهان و کشور انجام شده است اما این مطالعات در خصوص گزارش ششم محدود است. در مطالعه‌ای به ارزیابی توانایی مدل‌های آب و هوایی جهانی CMIP6 برای شبیه‌سازی بارش در حوضه رودخانه زرد، چین پرداخته شد. نتایج نشان داد که اگرچه همه GCM ها می‌توانستند ویژگی ده ساله بارش سالانه را به تصویر بکشند، اکثر GCM ها بارش تابستان را دست‌کم گرفتند و بارش بهار را بیش‌ازحد تخمین زدند. GCM ها به‌خوبی توزیع فضایی بارش سالانه را با تخمین بیش از حد در منطقه منبع و دست‌کم برآورد در بخش شمالی بخش میانی YRB شبیه‌سازی کردند (Wang et al., 2021). (Abdolalizadeh et al., 2022) به ارزیابی دقت مدل‌های CMIP6 برای شبیه‌سازی دما و بارش حوضه آبریز دریاچه ارومیه پرداختند. مدل‌های مورد استفاده در این مطالعه شامل MRI-ESM2-0، MPI-ESM1-2-HR، INM-CM5-0 و CMCC-ESM2 بود. نتایج نشان داد که دقت مدل‌های مورد مطالعه در شبیه‌سازی دما خوب و در شبیه‌سازی بارش به خصوص در مدل CMCC ضعیف ارزیابی شده‌است. (Feyissa et al., 2024) در مطالعه‌ای به بررسی اثرات پیش‌بینی‌شده تغییر اقلیم بر فرایندهای هیدرولوژیکی در حوضه رودخانه Omo در اتیوپی تحت دو سناریو مسیر اجتماعی و اقتصادی مشترک (SSP245 و SSP585) پرداخت. آخرین مدل جفت‌شده پروژه مقایسه بین مدل جفت‌شده (CMIP6) مجموعه داده مدل آب و هوایی بارش و دما برای ارزیابی تأثیر آب و هوای پیش‌بینی شده در حوضه استفاده شد. مدل SWAT برای شبیه‌سازی اثرات تغییرات آب و هوایی در طول دوره‌های پایه (۲۰۱۹-۱۹۹۰)، نزدیک (۲۰۶۰-۲۰۳۱) و آینده دور (۲۱۰۰-۲۰۷۱) استفاده شد. جریان پیش‌بینی‌شده حوضه به‌جز کاهش در ماه‌های مارس، آوریل و می (MAM) تحت سناریوی SSP245، سالانه و ماهانه در ژوئن، جولای،

¹- General Circulation Model (GCM)

۸.۵-۵.۵ SSP کاهش می‌یابد. الگوهای بارش آینده نشان‌دهنده تغییر به سمت فصل خشک غالب است. پیش‌بینی می‌شود که حداکثر دما (Tmax) و حداقل دما (Tmin) تا پایان قرن به ترتیب ۳ و ۴/۸ درجه سانتی‌گراد (۴.۵-۲.۵ SSP و ۳/۳ و ۳/۳ درجه سانتی‌گراد (هر دو سناریو) افزایش یابند. این تغییرات نشان‌دهنده تشدید خشکسالی‌های شدید، به‌ویژه در دهه‌های ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰، همان‌طور که توسط شاخص SPEI ارزیابی شده است، می‌باشد. علاوه بر این، پیش‌بینی می‌شود که دمای شدید (TX90p) و روزهای متوالی خشک (CDD) تشدید شوند. (González et al., 2025) در مطالعه‌ای در مکزیک از مدل‌های گردش عمومی جو (GCMs) شامل HadGEM3-GC31-LL، MRI-ESM2-0 و ACCESS-ESM1-5 از پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده (CMIP6) تحت دو سناریوی مسیره‌های اجتماعی-اقتصادی مشترک SSP2-4.5 و SSP5-8.5 استفاده تا حداقل و حداکثر دمای هوا و میانگین بارش سالانه در منطقه توسعه روستایی Atlacomulco پیش‌بینی گردد. برای انجام پیش‌بینی‌های منطقه‌ای تغییرات اقلیمی، از ۳۰ ایستگاه هواشناسی و روش ریزمقیاس‌نمایی با استفاده از مدل LARS-WG7 بهره گرفته شد. تغییرات پیش‌بینی‌شده برای سه افق زمانی بررسی شدند: افق نزدیک (۲۰۲۱-۲۰۴۰)، افق میانی (۲۰۴۱-۲۰۶۰) و افق دور (۲۰۶۱-۲۰۸۰)؛ که با دوره تاریخی (۲۰۱۷-۱۹۸۵) مقایسه شدند. بر اساس نتایج، حداقل دمای سالانه تا افق دور به میزان ۲ درجه سانتی‌گراد تحت سناریوی SSP2-4.5 و ۴.۵ و ۳/۱ درجه سانتی‌گراد تحت سناریوی SSP5-8.5 افزایش خواهد یافت. در حالی که حداکثر دمای سالانه تا افق دور بین ۲/۵ درجه سانتی‌گراد تحت سناریوی SSP2-4.5 و ۴.۵ و ۳/۸ درجه سانتی‌گراد تحت سناریوی SSP5-8.5 افزایش خواهد یافت. بارش تحت سناریوی SSP2-4.5 در افق‌های نزدیک و میانی به ترتیب ۱۵/۷ و ۴۲/۵ میلی‌متر در سال افزایش نشان می‌دهد، در حالی که بیشترین کاهش بارش در افق میانی سناریوی SSP5-8.5 با ۲۶/۳ میلی‌متر در سال پیش‌بینی شده است. با توجه به مطالعات انجام شده مشخص می‌گردد که انتخاب مدل‌های گردش عمومی (GCM) به دلیل محدودیت‌های محاسباتی و عدم قطعیت‌های اساسی حیاتی و مهم است از طرفی افزایش دمای سطح کره زمین ضروری‌ست برای درک دقیق‌تر

آگوست و سپتامبر (JJAS) افزایش می‌یابد. میانگین رواناب سطحی سالانه و فصلی حوضه (JJAS و MAM) تحت سناریوهای SSP585 افزایش خواهد یافت. با این حال، تحت سناریوی SSP245 کاهش می‌یابد. میانگین سالانه و فصلی آب زیرزمینی حوضه در آینده نزدیک و دور تحت هر دو سناریو به جز کاهش MAM در سناریوی SSP245 افزایش خواهد یافت. به همین ترتیب، بازده آب در MAM در سناریوی SSP245 کاهش می‌یابد، با این وجود، در هر دو سناریو سالانه و فصلی افزایش می‌یابد. تبخیر و تعرق بالقوه با افزایش دما در حوضه در همه شرایط افزایش می‌یابد. (Shahi et al., 2024) به ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر دما و بارندگی با استفاده از مدل‌های CMIP6 در دامغان پرداختند و از سناریوهای گزارش ششم تغییرات اقلیمی توسط IPCC برای ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر دما و بارندگی در دامغان استفاده نمودند. وقوع تغییر آب و هوا با استفاده از مدل‌های HadGEM3 و CanESM5 تحت سناریوهای SSP126، SSP245 و SSP585 پیش‌بینی شد. داده‌های بارندگی ایستگاه هواشناسی سینوپتیک دامغان و ایستگاه باران سنج دامغان برای واسنجی و اعتبارسنجی برای دوره ۲۰۲۰-۲۰۰۰ استفاده شد. سپس پیش‌بینی برای دوره ۲۰۴۰-۲۰۲۱ انجام شد. برای پیش‌بینی دماهای آینده (۲۰۲۱-۲۰۴۰)، از داده‌های حداقل و حداکثر دمای ایستگاه سینوپتیک دامغان استفاده شد. برای کاهش مقیاس آماری داده‌های اقلیمی از نرم افزار LARS-WG6 استفاده شد. نتایج نشان داد که تغییرات بیشتر در میزان بارش و دما توسط مدل HadGEM3 در مقایسه با مدل CanESM5 پیش‌بینی شد. بنابراین مدل HadGEM3 عملکرد بهتری نسبت به مدل CanESM5 نشان داد. (Kouman et al., 2024) در مطالعه‌ای در کشور ساحل عاج و در شمال شرقی این کشور تغییرات آینده در بارش، دما و شرایط خشکسالی ناشی از آن را بر اساس شش مدل آب و هوای جهانی (GCM) از مدل‌های (CMIP6) تحت سناریوهای مسیره‌های اجتماعی-اقتصادی مشترک SSP2-4.5 - SSPs و ۸.۵-۵.۵ SSP بررسی می‌کند. داده‌های ۱۲ ایستگاه در این منطقه با استفاده از نرم‌افزار CMhyd برای تصحیح بایاس مدل‌ها، یکپارچه گردید. پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهد که تا سال ۲۱۰۰، بارش سالانه به طور متوسط ۱۳۳ میلی‌متر و ۱۷۷ میلی‌متر به ترتیب تحت سناریوهای SSP2-4.5 و

درجه و ۳۹ دقیقه واقع شده است. شهرستان لردگان در جنوب استان چهارمحال و بختیاری واقع شده و از نظر موقعیت نسبی از سمت شمال به شهرستان‌های خانمیرزا، بروجن و اردل، از سمت شرق به شهرستان فلارد، سمت جنوب به استان کهگیلویه و بویر احمد و از سمت غرب به استان خوزستان منتهی می‌شود. این شهرستان با ارتفاع متوسط ۱۷۰۰ متر از سطح دریا در سلسله جبال زاگرس قرار دارد و از نظر توپوگرافی قسمت‌های شمالی آن را مناطق پست با ارتفاع کمتر از ۲۰۰۰ متر تشکیل داده و مناطق بلند آن ارتفاعات بیش از ۳۰۰۰ متر در جهت جنوب شرقی است. بروجن یکی از شهرستان‌های استان چهارمحال و بختیاری است. این شهر در دشتی به وسعت حدود ۵۸۰ کیلومتر مربع در شرقی‌ترین نقطه منطقه و همچون پل ارتباطی است که در محل تلاقی راه‌های چهار استان کهگیلویه و بویراحمد، اصفهان، خوزستان و فارس قرار گرفته است. شهرستان بروجن با وسعت ۲۲۵۶/۲ کیلومتر مربع معادل ۱۴ درصد مساحت استان را به خود اختصاص داده است. مشخصات ایستگاه‌های مورد بررسی در جدول (۱) و منطقه مطالعاتی در شکل (۱) بیان گردیده است (Anonymous 2024).

چالش‌های آینده و برنامه‌ریزی‌های مرتبط با آن که اثر آن در سطح منطقه‌ای مورد ارزیابی قرار گیرد. لذا در این پژوهش به بررسی اثر تغییر اقلیم بر متغیرهای اقلیمی با استفاده از مدل‌های اقلیمی CMIP6 در شهرستان‌های لردگان و بروجن با دو اقلیم متفاوت با استفاده از داده‌های مدل پیش‌بینی کننده MRI ESM2.0 و مدل ریزمقیاس LARS-WG بر اساس سناریوهای انتشار طراحی شده در دوره پایه ۲۰۱۴-۲۰۰۰ برای پیش‌بینی وضعیت جو طی دوره‌های آتی از سه سناریو خوش‌بینانه SSP1-2-6، حد متوسط SSP2-4-5 و بدبینانه SSP5-8-5 برای دو دوره‌ی بیست ساله در آینده‌ی نزدیک (۲۰۴۰-۲۰۲۱) و آینده‌ی دور (۲۰۶۰-۲۰۴۱) پرداخته خواهد شد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

شهرستان لردگان با وسعت ۲۴۰۷ کیلومتر مربع معادل ۱۶ درصد از مساحت استان چهارمحال و بختیاری را به خود اختصاص داده است. از لحاظ موقعیت جغرافیایی این شهرستان در طول شرقی ۵۰ درجه و ۱۶ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۲۰ دقیقه و عرض شمالی ۳۱ درجه و ۹ دقیقه تا ۳۱

جدول (۱): ویژگی‌های ایستگاه‌های هواشناسی مورد بررسی

ایستگاه هواشناسی	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	نوع اقلیم	ارتفاع از سطح دریا (m)
سینوپتیک لردگان	31.5	51.3	آمبرژه: مرطوب دومارتن: مدیترانه‌ای	1611
سینوپتیک بروجن	31.98	50.83	آمبرژه: خشک سرد دومارتن: خشک	2260



شکل (۱): منطقه مطالعاتی

گزارش ششم CMIP6

برای پیش‌بینی تغییرات اقلیمی آینده، از مدل‌های ریاضی به نام مدل‌های گردش عمومی (GCM) استفاده می‌شود. قابلیت اطمینان این مدل‌ها به توانایی آن‌ها در بازتولید ویژگی‌های اقلیمی و دوره‌های آینده بستگی دارد. از دهه ۱۹۹۰، برنامه تحقیقات جهانی آب و هوا پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده (CMIP) را راه‌اندازی کرده تا تغییرات اقلیمی گذشته را به خوبی درک کند (Annan and Hargreaves, 2017). گزارش‌های ششم گروه کاری بین‌دولتی تغییرات اقلیمی (IPCC) به بررسی سناریوهای تغییر اقلیمی و اثرات آن بر جوامع می‌پردازد. این گزارش‌ها با استفاده از داده‌های علمی و مدل‌های پیشرفته، مخاطرات و راهکارهای کاهش اثرات منفی تغییرات اقلیمی را تحلیل می‌کنند. سناریوهای مورد بررسی شامل افزایش دما، تغییرات در الگوی بارش و سطح دریا است. همچنین، این سناریوها با عوامل اجتماعی نظیر توسعه پایدار و نابرابری ارتباط دارند و لایه‌های بیشتری نسبت به سری قبلی مدل‌ها دارند (O'Neill et al., 2017).

مدل MRI ESM2.0

مدل MRI ESM2.0 از چهار مولفه اصلی به نام‌های مدل گردش عمومی جو با فرایندهای زمینی (AGCM)، مدل گردش عمومی یخ-اقیانوس-دریا و مدل‌های ائروسول و شیمی جو تشکیل شده است. در واقع این مدل تلفیقی از مدل‌های تعاملی برای ائروسول و شیمی اتمسفر در مدل جفت شده جو-اقیانوسی است. مدل (MRI) در مؤسسه تحقیقاتی هواشناسی ژاپن طراحی و توسعه یافته است. جدیدترین مدل MRI ESM2.0، MRI است که بر اساس مدل‌های سری قبلی خود که در مرحله پنجم پروژه مقایسه مدل جفت شده (CMIP5) بوده‌اند، در سال ۲۰۱۷ توسعه یافته و تحت پیشرفت‌های متعددی به‌منظور ارائه شبیه‌سازی‌های آب و هوایی بسیار دقیق قرار گرفت (Yukimoto et al., 2011). این مدل توسعه یافته دارای قدرت تفکیک افقی ۱۰۰ کیلومتری برای جو و اقیانوس و ۲۵۰ کیلومتری برای ذرات معلق و شیمی جو است که مشابه مدل‌های قبلی خود است زیرا با افزایش تفکیک افقی هزینه‌های محاسباتی زیادی را متحمل می‌شدند؛ بنابراین در مقابل، قدرت تفکیک قائم مدل را برای نشان دادن بهتر

فرایندهای فیزیکی و گردش جو در مدل افزایش دادند. تفکیک قائم مدل ۸۰ لایه است که نسبت به ۴۸ لایه قبلی خود با بهره‌گیری از طرح انتقال نیمه لاگرانژی افزایش یافته است. گام زمانی مدل ۳۰ دقیقه است. در ادامه تغییرات به‌روزرسانی MRI ESM2.0 با تمرکز بر مدل‌های قبلی بیان می‌شود که شامل افزایش تفکیک قائم؛ بهبود پارامترها، کاهش موج گرانشی، تغییرات در خواص میکروفیزیکی و نوری ائروسول و ماکرو و میکروفیزیک ابر است. ماکرو و میکرو فیزیک ابر در چندین فرمول و پارامتر ارتقا یافته است که به‌طور قابل ملاحظه‌ای هم نمایش ابر و هم شار تابشی را بهبود بخشیده است. با پیشرفت‌های مختلف در مورد طرح‌واره ابرها، مانند ارائه یک طرح‌واره جدید برای ابرهای استراتوکومولوس، منجر به کاهش قابل توجه در خطاها در طول موج کوتاه، موج بلند و تشعشع خالص در بالای جو شد. خطاهای حاصل از مدل در مقایسه با خطاهای موجود در مدل‌های CMIP5 کمتر است (Kawai et al., 2019). به دلیل این تغییر، پوشش ابر شبیه‌سازی شده بر روی اقیانوس‌های نیمه گرمسیری به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است که منجر به توزیع پایدار ابرهای شبیه‌سازی شده می‌شود و همچنین توزیع تابش بهبود یافته، انتقال حرارت نصف‌النهاری دقیق مورد نیاز برای اقیانوس را به ارمغان می‌آورد و به کاهش درجه حرارت هوای سطح کمک می‌کند. در مقابل، هیچ تغییری در تفکیک افقی جو و تشعشع جو، طرح آشفته‌گی جو و چرخه‌های کربن و اقیانوسی مشاهده نشد. در واقع مدل MRI ESM2.0 بازتولید واقع بینانه متغیرهای آب و هوایی و تغییرات سالانه را نشان می‌دهد (Yukimoto et al., 2019). مطالعات نشان می‌دهد که مدل MRI-ESM2-0 در مقایسه با مدل‌های دیگر CMIP6 در برآورد دمای متوسط پهنه‌ای ایران کارایی بالایی داشته و تفکیک افقی کمتر آن باعث بهبود و کاهش عدم قطعیت پارامترهای پیش‌بینی شونده توسط مدل خواهد بود (Vasanthavigar et al., 2010; Zarrin, et al., 2023).

مدل LARS-WG

این مدل در طیف گسترده‌ای از شرایط هواشناسی عملکرد خوبی دارد (Khan and Naeem, 2023) و با استفاده از خروجی‌های مستقیم مدل‌های گردش عمومی

محیط نرم‌افزاری LARS-WG برای مدل MRI ESM2.0 و بر مبنای گزارش ششم IPCC، برای دو دوره بیست ساله آبی ۲۰۲۱-۲۰۴۰ و ۲۰۶۰-۲۰۴۱ ریزمقیاس نمایی آماری و پیش‌بینی شدند.

معیارهای ارزیابی عملکرد

به منظور ارزیابی عملکرد مدل در پیش‌بینی داده‌های اقلیمی بارش و دمای ایستگاه‌های مورد مطالعه، از شاخص‌های آماری قدرمطلق خطا (MAD) جذر میانگین مربع خطا (RMSE) و شاخص تشابه چند عامله (KGE) مطابق با روابط (۱) تا (۳) استفاده شده است (Valipour et al., 2017; Gupta et al., 2009).

$$MAD = \frac{\sum_{t=1}^n (|A_t - F_t|)}{n} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (A_t - F_t)^2}{n}} \quad (2)$$

$$KGE = 1 - \sqrt{(r-1)^2 + \left(\frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}} - 1\right)^2 + \left(\frac{\mu_{sim}}{\mu_{obs}} - 1\right)^2} \quad (3)$$

که در این رابطه A_t نشان دهنده مقدار میانگین ماهانه داده‌های مشاهده‌ای، F_t نشان دهنده مقدار میانگین ماهانه تاریخی تولید شده توسط مدل و n نشان دهنده تعداد داده ورودی است. σ انحراف معیار، μ میانگین و r همبستگی خطی بین داده‌های مشاهده‌ای و مدل‌سازی شده است. همچنین منظور از sim و obs به ترتیب مقادیر چشم‌انداز مدل و مشاهده‌ای است.

نتایج و بحث

در این پژوهش از مدل MRI ESM2.0 برای تولید مقادیر بارندگی و درجه حرارت‌های حداکثر و حداقل روزانه در دو ایستگاه لردگان و بروجن تحت دو اقلیم متفاوت در دوره تاریخی و آینده به کار گرفته شده است تا ارزیابی دقیقی از مدل انتخابی در شبیه‌سازی پارامترهای فوق در محدوده مطالعاتی صورت گیرد. آنالیز آماری شبیه‌سازی مدل برای پارامترهای بارندگی و دما در دوره تاریخی در جدول‌های (۲) تا (۳) ارائه شده است.

جو (GCM)، سناریوهای تغییرات اقلیمی با وضوح بالا را برای یک منطقه تولید می‌کند (Semenov and Stratonovitch, 2015; Semenov et al., 2024).

مدل LARS-WG مولد آب و هوایی بر پایه روش سری‌ها است که می‌تواند به‌منظور شبیه‌سازی داده‌های هواشناسی در یک ایستگاه، تحت شرایط اقلیمی فعلی و آبی استفاده شود. این مولد با استفاده از داده‌های آب و هوایی مشاهده‌ای در یک ایستگاه مفروض، پارامترهای توزیع‌های احتمالاتی متغیرهای آب و هوایی و نیز با دست‌یابی به رابطه بین آن‌ها، داده‌های مربوط به دوره آینده را تولید می‌کند. در واقع هدف اصلی از کاربرد و ایجاد نرم‌افزار LARS-WG برای برطرف نمودن محدودیت‌های زنجیره مارکف است. LARS-WG برای هر یک از متغیرهای بیشینه و کمینه دما، بارش، تابش خورشیدی (یا تعداد ساعات آفتابی)، توزیع نیمه-تجربی جداگانه‌ای در نظر می‌گیرد (Racsko et al., 1991).

مراحل انجام کار

با جمع‌آوری سری داده‌های مشاهده‌ای روزانه در دوره پایه ۱۴ ساله (۲۰۱۴-۲۰۰۰) و بررسی مشخصات و روند آن‌ها و انجام آزمون‌های آماری بر روی دو پارامتر دما و بارش به تحلیل آنها پرداخته شد. سپس با مراجعه به بانک‌های اطلاعاتی موجود مربوط به گزارش ششم، مدل پیش‌بینی کننده گردش عمومی جو انتخاب و سری‌های زمانی تولیدشده توسط مدل‌های مختلف دریافت شد. داده‌های اقلیمی پیش‌بینی شده‌ی این مدل‌ها برای استان چهارمحال و بختیاری با توجه به دامنه طول و عرض جغرافیایی قابل دریافت هستند. برای دستیابی به هدف این مطالعه داده‌های تاریخی مدل اقلیمی MRI ESM2.0 در فرمت NetCDF و در مقیاس روزانه و ماهانه از سایت‌های اقلیمی دریافت شده و برای انجام عملیات آماری توسط محیط نرم‌افزاری ArcMap به فرمت Excel مبدل گردید و توانایی عملکرد مدل انتخابی برای شبیه‌سازی پارامترهای دما و بارش در دوره پایه با استفاده از داده‌های تاریخی مدل بررسی گردید. در مرحله بعد داده‌های اقلیمی مورد نظر در دوره آینده با استفاده از داده‌های بانک اطلاعاتی موجود در

جدول (۲): مقادیر ارزیابی خطای شبیه‌سازی مجموع بارش و میانگین حداکثر و حداقل دمای مدل MRI-ESM2.0 در دوره پایه بروجن

شاخص	حداقل دمای روزانه (سانتی‌گراد)	حداکثر دمای روزانه (سانتی‌گراد)	مجموع بارش (میلی‌متر)
MAD	0.27	0.18	4.67
RMSE	0.34	0.23	7.32
KEG	0.97	0.99	0.84

جدول (۳): مقادیر ارزیابی خطای شبیه‌سازی مجموع بارش و میانگین حداکثر و حداقل دمای مدل MRI-ESM2.0 در دوره پایه لردگان

شاخص	حداقل دمای روزانه (سانتی‌گراد)	حداکثر دمای روزانه (سانتی‌گراد)	مجموع بارش (میلی‌متر)
MAD	0.24	0.20	5.84
RMSE	0.29	0.23	10.45
KEG	0.98	0.99	0.92

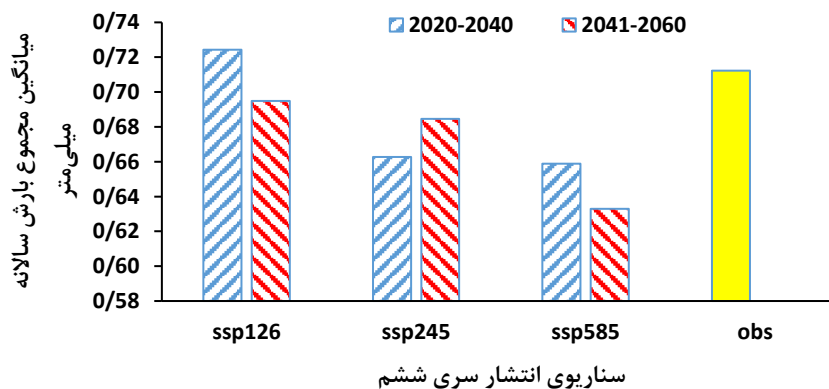
مدل‌های CMIP6 را برای برآورد دما و بارش در چین بررسی کردند و دریافتند که مدل‌های CMIP6 در بازتولید توزیع فضایی دما و بارش به خوبی عمل می‌کنند و دما برآورد بهتری را از بارش نشان می‌دهد.

پیش‌بینی سناریوهای آینده

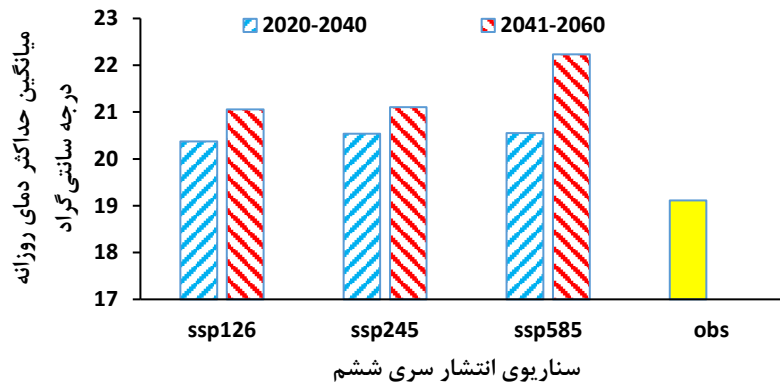
ایستگاه بروجن

مقادیر دمای حداکثر، دمای حداقل و بارش داده‌های مشاهداتی ایستگاه بروجن در دوره پایه ۲۰۱۴-۲۰۰۰ و نتایج چشم‌انداز آتی داده‌های مدل MRI-ESM2.0 تحت سناریوی خوشبینانه SSP1-2.6 و سناریوی میانه SSP2-4.5 و سناریوی بدبینانه SSP5-8.5 در شکل‌های (۲، ۳، ۴) نشان داده شده است.

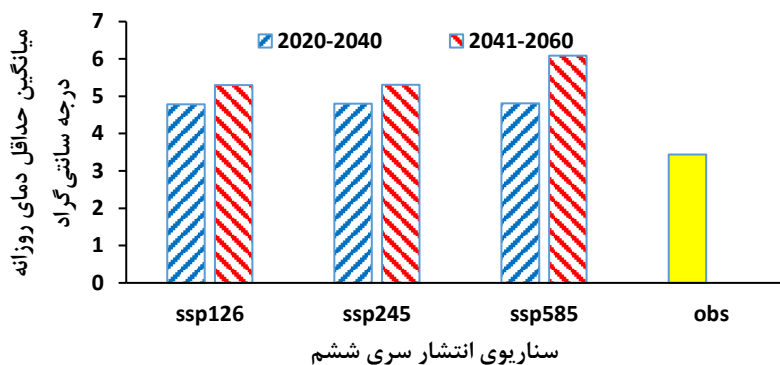
نتایج نشان داد که مدل با دقت بالایی قادر به شبیه‌سازی پارامترهای دمای حداکثر و دمای حداقل است، اما در شبیه‌سازی پارامتر بارش نسبت به دیگر پارامترها خطای بیشتری را نشان می‌دهد. در دوره پایه، مدل پیش‌بینی کننده‌ای که بیشترین همبستگی را با داده‌های مشاهداتی برقرار نموده است انتخاب شده و مقادیر بارش و دما برای دوره پایه و سپس برای آینده تولید یا بازسازی می‌شوند. با توجه به اینکه مقادیر میانگین محاسباتی سری داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی مدل بسیار نزدیک بوده می‌توان گفت مدل MRI-ESM2.0 برای پیش‌بینی اقلیمی ایستگاه‌های مورد مطالعه در آینده نزدیک (۲۰۴۰-۲۰۲۱) و آینده دور (۲۰۶۰-۲۰۴۱) مناسب می‌باشد. ضرایب RMSE، MAD و KEG به عنوان معیارهای مناسبی برای بیان اختلاف مقادیر شبیه‌سازی شده نسبت به مقادیر اندازه‌گیری شده به کار می‌روند. (Yang et al., 2021)



شکل (۲): میانگین مجموع بارش مشاهداتی و شبیه‌سازی شده ایستگاه بروجن تحت سناریوهای انتشار در دهه‌های آینده



شکل (۳): میانگین حداکثر دمای مشاهداتی و شبیه‌سازی شده ایستگاه بروجن تحت سناریوهای انتشار در دهه‌های آینده



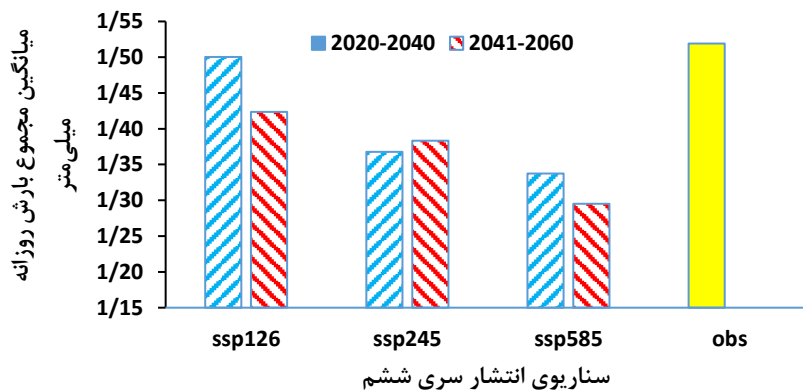
شکل (۴): میانگین حداقل دمای مشاهداتی و شبیه‌سازی شده ایستگاه بروجن تحت سناریوهای انتشار در دهه‌های آینده

در سناریوی بدبینانه مقادیر کمتری را نسبت به آینده دور نشان می‌دهد بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با شروع آینده دور چنانچه سناریوی بدبینانه اتفاق بیفتد مقادیر بارش پیش‌بینی شده نسبت به آینده نزدیک کاهش داشته و در نتیجه به خشکی سوق خواهد داشت.

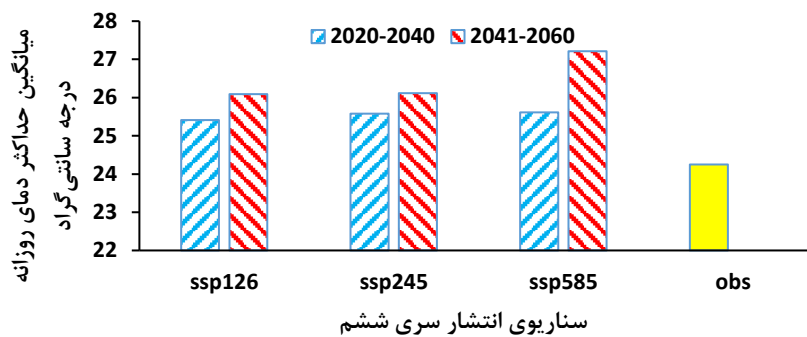
ایستگاه لردگان

مقادیر دمای حداکثر، دمای حداقل و بارش داده‌های مشاهداتی ایستگاه لردگان در دوره پایه ۲۰۱۴-۲۰۰۰ و نتایج چشم‌انداز آتی داده‌های خروجی مدل MRI-ESM2.0 تحت سناریوهای خوشبینانه SSP1-2.6 و سناریوی میانه SSP2-4.5 و سناریوی بدبینانه SSP5-8.5 در شکل‌های (۵)، (۶ و ۷) نشان داده شده است.

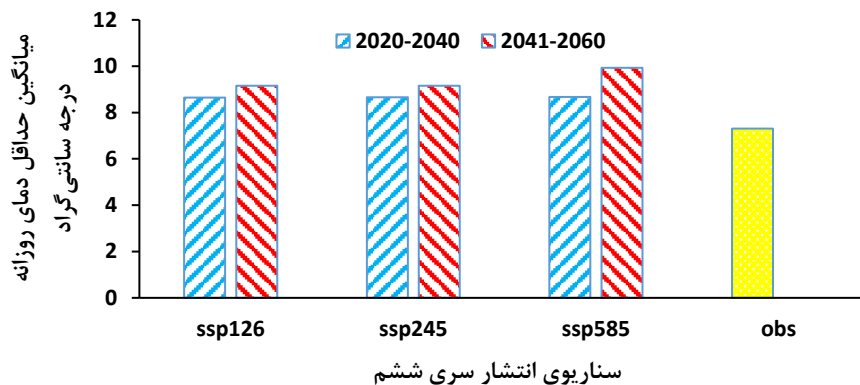
ایستگاه بروجن در سه سناریوی خوشبینانه SSP1-2.6 و سناریوی میانه SSP2-4.5 و سناریوی بدبینانه SSP5-8.5، شاهد افزایش ۱/۲ تا ۳/۱ درجه سانتی‌گراد دمای حداکثر و افزایش ۱/۳ تا ۲/۶۵ درجه سانتی‌گراد در مقادیر میانگین دمای حداقل، برای آینده نزدیک تا دور نسبت به دوره پایه خواهد بود. در دوره‌های ۲۰ ساله آتی میانگین روزانه دمای حداقل همواره از ۴ درجه و دمای حداکثر از ۲۰ درجه سانتی‌گراد پایین‌تر نخواهند رفت. همچنین با بررسی و مقایسه میانگین بارش شبیه‌سازی شده آتی نسبت به دوره پایه، ایستگاه بروجن شاهد کاهش میزان بارندگی در کلیه سناریوهای انتشار خواهد بود (شکل‌های ۲، ۳ و ۴). نمودارهای مربوط به ایستگاه بروجن میانگین دمای حداقل و حداکثر در آینده دور نسبت به آینده نزدیک، افزایش بیشتری در کلیه سناریوها نشان می‌دهد. همچنین بارش پیش‌بینی شده در آینده دور نسبت به آینده نزدیک



شکل (۵): میانگین مجموع بارش مشاهداتی و شبیه‌سازی شده ایستگاه لردگان تحت سناریوهای انتشار در دهه‌های آینده



شکل (۶): میانگین حداکثر دمای مشاهداتی و شبیه‌سازی شده ایستگاه لردگان تحت سناریوهای انتشار در دهه‌های آینده



شکل (۷): میانگین حداقل دمای مشاهداتی و شبیه‌سازی شده ایستگاه لردگان تحت سناریوهای انتشار در دهه‌های آینده

را پیش‌بینی کرده است بنابراین می‌توان گفت به‌طور کلی در آینده افزایش دما و کاهش بارش اتفاق خواهد افتاد و درجه تغییرات آن برای اقلیم مدیترانه‌ای و مرطوب لردگان نسبت به اقلیم سرد و خشک بروجن در میانگین حداقل دما تا حدودی یکسان بوده ولی برای حداکثر دمای روزانه، افزایش میانگین حداکثر دمای اقلیم سرد و خشک بیش از اقلیم گرم و مرطوب رخ خواهد داد و برای بارندگی نیز می‌توان گفت کاهش بارش آبی در اقلیم مدیترانه‌ای و

با توجه به اقلیم منطقه لردگان، در این ایستگاه یک افزایش جزئی برای دمای حداقل و حداکثر در سناریوی خوشبینانه و افزایش بیشتری در سناریوی بدبینانه مشاهده می‌شود (شکل‌های ۵، ۶ و ۷). نمودارها نشان می‌دهد، روند تغییرات بارش در اقلیم مدیترانه‌ای و مرطوب لردگان در آینده نزدیک از ۱/۲ تا ۱۲ درصد و برای آینده دور از ۶/۳ تا ۱۴/۷ درصد کاهش خواهد داشت (شکل ۷). مدل انتخابی برای پارامترهای مورد مطالعه در هر دو اقلیم رفتار یکسانی



منطقه مورد مطالعه دارند. (Rezaei et al., 2024) به ارزیابی عملکرد مدل‌های CMIP6 و پیش‌نگری تغییرات دما و بارش تحت سناریوهای خط سیر اجتماعی-اقتصادی مشترک (SSP) در ایران پرداختند. نتایج نشان داد که از بین الگوهای‌های گوناگون CMIP6 مورد بررسی، مدل‌های MRI-ESM2-0 و MPI-ESM1-2-LR به ترتیب بهترین عملکرد را در زمینه شبیه‌سازی بارش و دما در کشور دارند. (Afsharinia et al., 2024) به بررسی تغییرات دما و بارش در دشت کاشان تا سال ۲۱۰۰ با استفاده از مدل‌های CMIP6 و سناریوهای SSP پرداختند. داده‌های هفت ایستگاه با دوره پایه ۳۰ ساله (۲۰۱۴-۱۹۸۴) جمع‌آوری و هفت مدل CMIP6 انتخاب شدند و پس پردازش خروجی مدل‌ها با روش نسبت گیری خطی انجام شد. نتایج نشان داد که در همه ایستگاه‌های مورد مطالعه بارش در دوره آتی در مقایسه با دوره پایه دارای روند کاهشی خواهد بود. دمای متوسط نیز در دوره آتی نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت. با توجه به اینکه تغییر اقلیم، یک نگرانی جهانی، پیامدهای قابل توجهی بر الگوهای بارش و دما دارد. لذا نتایج این پژوهش به بهبود درک ما از اثرات تغییرات آب و هوایی بر منطقه مورد مطالعه کمک نموده و برنامه‌ریزان، متولیان و ذینفعان را ترغیب می‌نماید تا راهبردهای بهینه برای کاهش اثرات آنها را شناسایی کنند.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش بررسی اثر تغییر اقلیم بر متغیرهای اقلیمی دما و بارش ثبت شده در ایستگاه‌های سینوپتیک لردگان و بروجن با دو اقلیم متفاوت و با استفاده از مدل پیش‌بینی کننده اقلیمی MRI ESM2.0 در گزارش ششم CMIP6 و بر اساس سناریوهای طراحی شده‌ی دوره پایه ۲۰۱۴-۲۰۰۰ و استفاده از آن‌ها برای پیش‌بینی وضعیت جوی دوره‌های آتی بر مبنای سه سناریو خوش‌بینانه SSP1-2-6، حد متوسط SSP2-4-5 و بدبینانه SSP5-8-5 طی دو دوره‌ی بیست ساله در آینده‌ی نزدیک (۲۰۴۰-۲۰۲۱) و آینده‌ی دور (۲۰۶۰-۲۰۴۱) پرداخته شد. نتایج بررسی خطای عملکرد مدل نشان داد که MRI ESM2.0 با دقت بالایی قادر به شبیه‌سازی پارامترهای دمای حداکثر

مرطوب لردگان نسبت به اقلیم سرد و خشک بروجن تغییرات بیشتری را نشان می‌دهد. (et al., 2022) Niroumandfard به بررسی پیش‌نگری تغییر اقلیم بر پارامترهای دما و بارش با استفاده از مدل‌های CMIP6 در ایستگاه بیرجند پرداختند. در این مطالعه از داده‌های هواشناسی ایستگاه بیرجند شامل داده‌های دمای حداقل روزانه و دمای حداکثر روزانه و مقادیر بارش روزانه ایستگاه بیرجند در طی سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۴ میلادی به عنوان داده‌های دوره پایه از آب منطقه‌ای بیرجند استفاده شده است. جهت بررسی اثر تغییر اقلیم بر پارامترهای حداکثر و حداقل دما و بارش از سه مدل IPSL-CM6A-LR، MIROC-ES2L و MRI-ESM2-0 از مجموعه مدل‌های گزارش ششم (CMIP6) استفاده شد جهت مقیاس‌کاهی داده‌ها از مدل CMhyd استفاده گردید و از سه سناریوی SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 برای دوره آینده (۲۰۲۲-۲۰۵۰) نیز استفاده شد. نتایج این پژوهش نشان داد تغییرات دمای حداکثر و حداقل در دوره آینده (۲۰۲۲-۲۰۵۰) نسبت به داده‌های مشاهداتی دارای روند افزایشی است و پارامتر بارش دارای روند سینوسی است و در برخی ماه‌ها افزایشی و در برخی کاهشی است. et al., (2023) Moghaddas Hafezi به بررسی ارزیابی عملکرد مدل‌های CMIP6 در پیش‌نگری تغییرات دما و بارش در محدوده چاه نیمه‌های استان سیستان و بلوچستان پرداختند. بدین منظور، ۸ مدل گردش کلی جو (GCM) از CMIP6 با کاربست روش اصلاح آریبی مقیاس خطی (LSBC) با استفاده از سنجه‌های R2، MSE، RMSE و MAE مورد ارزیابی و تغییرات دما و بارش در دوره آینده (۲۰۲۲-۲۰۵۰) نسبت به دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۹۵) با استفاده از بهترین مدل تحت سه سناریوی SSP1-2.6، SSP3-7.0 و SSP5-8.5 مورد بررسی و پیش‌نگری قرار گرفت. ارزیابی عملکرد مدل‌های مورد بررسی در شبیه‌سازی متوسط دما نیز نشان داد که مدل MRI-ESM2-0 با RMSE برابر با ۰/۲۳ بهترین عملکرد و مدل CanESM5 با RMSE برابر با ۰/۳۳ ضعیف‌ترین عملکرد را دارند همچنین مشخص گردید، مدل‌های BCC_CSM2_MR و FGOALS-g3 به ترتیب با RMSE برابر با ۰/۹۴ و ۵/۶، بهترین و ضعیف‌ترین عملکرد را جهت شبیه‌سازی بارش در

تغییرات بیشتری را نشان می‌دهد. با تصحیح برون‌داد مدل انتخابی در سناریوی انتشار آینده به مقادیر قابل قبولی برای دما و بارش می‌توان دست یافت. این گزارش‌ها به عنوان یک منبع قابل اعتماد برای سازمان‌ها، سیاست‌گذاران و جامعه علمی برای اتخاذ تصمیمات مناسب در خصوص مدیریت و کاهش اثرات تغییرات اقلیمی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

و دمای حداقل است، اما در شبیه‌سازی پارامتر بارش نسبت به دو پارامتر دیگر خطای بیشتری را نشان می‌دهد. در دوره‌های آتی برای حداکثر دمای روزانه، افزایش میانگین حداکثر دمای اقلیم سرد و خشک بروجن بیش از اقلیم گرم و مرطوب لردگان رخ خواهد داد. درخصوص بارندگی نیز می‌توان گفت کاهش بارش آتی در اقلیم مدیترانه‌ای و مرطوب لردگان نسبت به اقلیم سرد و خشک بروجن

منابع

- افشاری نیا، م.، ف. پناهی و م. احترام. ۱۴۰۲. ارزیابی تغییرات اقلیمی با استفاده از برون‌داد مدل‌های CMIP6 (مطالعه موردی: دشت کاشان). مهندسی آبیاری و آب ایران، ۱۴(۲)، ۲۵۶-۲۳۷.
- حافظی مقدس، ن.، غ. لشکری پور، و ر. پارسائی، ر. ۱۴۰۳. ارزیابی عملکرد مدل‌های CMIP6 در پیش‌نگری تغییرات دما و بارش در محدوده چاه نیمه‌های استان سیستان و بلوچستان. پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، ۱۴۰۲(۵۶)، ۱۷۸-۱۶۵.
- رضائی، ح.، ح. پاشاپور و ف. صادقی. ۱۴۰۳. ارزیابی عملکرد مدل‌های CMIP6 و پیش‌نگری تغییرات دما و بارش تحت سناریوهای خط سیر اجتماعی-اقتصادی مشترک (SSP) در ایران. آینده پژوهی راهبردی، ۳(۱۰)، ۲۸-۷.
- زرین، آ. و ع. داداشی رودباری. ۱۴۰۱. بررسی مدل‌های CMIP6 در برآورد دمای ایران با تأکید بر حساسیت اقلیم ترازمند ECS و پاسخ اقلیم گذرا (TCR). ژئوفیزیک ایران، ۱۱۷(۱)، ۵۶-۳۹.
- سالاریه، پ.، م. خوش‌روش، ر. نوروز ولاشدی و ع. ر. کیانی. ۱۴۰۳. ارزیابی سناریوهای تغییر اقلیم و تغییر تاریخ کشت بر بهره‌وری آب ذرت در شهرستان گرگان. آبیاری و زهکشی ایران، ۱۸(۲)، ۲۳۵-۲۲۷.
- عبدالعلی زاده، ف.، ع. م. خورشیددوست، و س. جهانبخش اصل. ۱۴۰۱. ارزیابی دقت مدل‌های CMIP6 برای شبیه‌سازی دما و بارش حوضه آبریز دریاچه ارومیه. پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، ۳(۱۱)، ۳۰-۱۷.
- نیرومندفرد، ف.، ع. خاشعی سیوکی، ر. هاشمی و خ. قربانی. ۱۴۰۱. بررسی پیش‌نگری تغییر اقلیم بر پارامترهای دما و بارش با استفاده از مدل‌های CMIP6 (مطالعه موردی: ایستگاه بیرجند). تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۳(۹)، ۲۰۲۶-۲۰۰۹.
- Annan, J.D. and Hargreaves, J.C. 2011. Understanding the CMIP3 Multimodel Ensemble. *J. Climate*, 24: 4529-4538.
- Anonymous. 2024. Chaharmahal and Bakhtiari meteorological Administration. Available on: <http://www.chbmet.ir>. Accessed 19 September.
- Cruz González, A., Arteaga-Ramirez, R., Soria-Ruiz, J. Sanchez Cohen, I., Monterroso Rivas, A.I. and Quevedo, A. 2025. Climate change projections in temperature and precipitation using cmip6 in Central Mexico. *Theoretical and Applied Climatology*.
- Feyissa, T.A., Demissie, T.A., Saathoff, F. and Gebissa, A. 2024. Hydrological responses projection to the potential impact of climate change under CMIP6 models scenarios in Omo River Basin, Ethiopia, *Results in Engineering*, Volume 23, 102708.
- Gupta, H.V., Kling, H., Yilmaz, K.K. and Martinez, G.F. 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1-2): 80-91.
- IPCC. 2021. Climate change 2021 the physical science basis, AR6, Summary for policymakers. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>.
- Khan, S.F. and Naeem, U.A. 2023. Future climate projections using the LARS-WG6 downscaling model over Upper Indus Basin, Pakistan. *Environ Monit Assess*. 195(7).

- Kawai H., Yukimoto S., Koshiro T., Oshima N., Tanaka T., Yoshimura H. and Nagasawa R. 2019. Significant improvement of cloud representation in the global climate model MRI-ESM2. *GMD*, 12: 2875–2897.
- Kouman, K. D., Komlavi, A., Kouadio, B.H., Kabo-bah, A.T., Moctar, D., Siabi, E.K. and Mensah, J.K. 2024. Assessment of climate change in the North-East Region of Côte d'Ivoire: future precipitation, temperature, and meteorological drought using CMIP6 models. *Cogent Engineering*, 11(1): 2345506.
- Nikkhoo Amiri, S., Khoshravesh, M. and Norooz Valashedi, R. 2023. Assessing the effect of climate and land use changes on the hydrologic regimes in the upstream of Tajan river basin using SWAT model. *Applied Water Science*, 13(6): 1-13.
- O'Neill, B., Kriegler, E., Ebi, K., Kemp-Benedict, E., Riahi, K., Rothman, D., Van Ruijven, B., Van Vuuren, D., Birkmann, J., Kok, K., Levy, and Solecki, W. 2017. The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century. *Global Environmental Change*, 42(1): 169-180.
- O'Neill, B.C., Tebaldi, C., van Vuuren, D.P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J.F., Lowe, J., Meehl, G.A., Moss, R., Riahi, K. and Sanderson, B.M. 2016. The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6, *Geosci. Model Dev.* 9: 3461–3482.
- Rasco, P., Szeidl, L. and Semenov, M.A. 1991. A serial approach to local stochastic models. *J. Ecological Modeling* 57: 27-41.
- Shahi, S., Hosseini, K. and Mousavi, S.F. 2024. Assessing the Effects of Climate Change on Temperature and Precipitation using CMIP6 models (case study: Damghan, Iran). *Journal of Hydraulic and Water Engineering*, 1(2): 163-177.
- Semenov, M.A., Senapati, N., Coleman, K. and Collins, A.L. 2024. A dataset of CMIP6-based climate scenarios for climate change impact assessment in Great Britain. *Data Brief* 55: 110709.
- Semenov, M.A. and Stratonovitch, P. 2015. Adapting wheat ideotypes for climate change: accounting for uncertainties in CMIP5 climate projections. *Lim Res.* 65: 123–139.
- Valipour, M., Khoshravesh, M. and Gholami Sefidkouhi, M.A. 2017. Estimation and trend evaluation of reference evapotranspiration in a humid region. *Italian Journal of Agrometeorology*, 1: 19-36.
- Wang, L., Zhang, J., Shu, Z., Wang, Y., Bao, Z., Liu, C., Zhou, X. and Wang, G. 2021. Evaluation of the Ability of CMIP6 Global Climate Models to Simulate Precipitation in the Yellow River Basin, China. *Front. Earth, Sci.*
- Yukimoto, S., Yoshimura, H., Hosaka, M. and Sakami, T. 2011. Meteorological Research Institute-Earth System Model Version 1 (MRI-ESM1) — Model. Meteorological Research Institute, Japan Meteorological Agency.
- Yukimoto, S., Kawai, H., Koshiro, T., Oshima, N., Yoshida, K., Urakawa, S., Tsujino, H., Deushi, M., Tanaka, T. and Hosaka, M. 2019. The Meteorological Research Institute Earth System Model Version 2.0, MRI-ESM2.0: Description and Basic Evaluation of the Physical Component. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 97(5): 931-965.
- Yang, X., Zhou, B., Xu, Y. and Han, Z. 2021. CMIP6 Evaluation and Projection of Temperature and Precipitation over China. *Advances in Atmospheric Sciences*. 38. 817-830.