



Projection of the future outlook of temperature and precipitation in Urmia Lake basin by the CMIP6 models

Firooz Abdolizadeh ¹✉ , Ali Mohammad Khorshiddoust ² , Saeed Jahanbakhsh Asl ³ 

1. Department of Climatology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Email: f.abdolizadeh@tabrizu.ac.ir

2. Department of Climatology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Email: khorshid@tabrizu.ac.ir

3. Department of Climatology, Faculty of Planning and Environmental Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Email: s_jahan@tabrizu.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article History:

Received:

2 February 2023

Received in revised form:

31 March 2023

Accepted:

6 May 2023

Keywords:

Temperature,

Precipitation,

CMIP6 Models,

Quantile Mapping,

Urmia Lake Basin

ABSTRACT

In this research, the climatic variables of temperature and precipitation of Urmia Lake catchment area were evaluated and projected using CMIP6 models under two scenarios SSP1-2.6 and SSP5-8.5 in the future periods (2031-2055 and 2071-2095). First, the accuracy of the models for the base period (1990-2014) was evaluated using Taylor diagram and RMSE and NRMSE indices after downscaling with different methods of quantile mapping, and among the models, the MRI-ESM2-0 for temperature and INM-CM5-0 for precipitation using the SSPLIN downscaling method were selected to project the future climate, then the future temperature and precipitation data were produced. The results of comparing the temperature and precipitation of the future periods with the base period showed that the average annual temperature of the basin will increase under all scenarios. The average annual temperature increase of the basin in the near future in the optimistic and pessimistic scenarios will be 1.5 and 1.8 degrees Celsius, respectively, and in the far future, 1.4 and 4 degrees Celsius respectively. The average annual precipitation will decrease in all scenarios, in the near future it will decrease by 19.9 and 21.6 percent in the optimistic and pessimistic scenarios, respectively, and by 12 and 28.6 percent in the far future, respectively. Based on the spatial distribution of changes in temperature and precipitation in the future periods, the greatest increase in temperature and the greatest decrease in precipitation will occur in the northern areas of the basin.

Cite this article: Abdolizadeh, F., Khorshiddoust, A. M., & Jahanbakhsh Asl, S. (2023). Projection of the future outlook of temperature and precipitation in Urmia Lake basin by the CMIP6 models. *Physical Geography Research Quarterly*, 55 (1), 95-112

<http://doi.org/10.22059/JPHGR.2023.352727.1007737>



© The Author (s).

DOI: [10.22059/JPHGR.2023.352727.1007737](https://doi.org/10.22059/JPHGR.2023.352727.1007737)

Publisher: University of Tehran Press

Extended Abstract

Introduction

Currently, the World Climate Research Program (WCRP) has launched the sixth phase of CMIP models. These models have higher spatial resolution and improved parameterization schemes for the main physical and biogeochemical processes of the climate system. To project future climate, CMIP6 models use emission scenarios based on common socio-economic pathways (SSP). These scenarios are developed based on the emission and land use routes, which are somewhat different from the RCP scenarios. The advantage of SSP scenarios is that they have a clear description of the socio-economic evolution of the future society (Zhou et al., 2021). The sixth assessment report of the IPCC states that global warming will continue and addressing the challenges caused by human-induced climate change has become the main issue of the 21st century (IPCC, 2021). Due to environmental and geographical factors in different regions of the world, these regions will face different challenges. Therefore, regional climate change studies are vital (Liu et al., 2022).

The outputs of atmospheric general circulation models in terms of temporal and spatial resolution are about tens of kilometers on a daily and monthly scale, which are large scale compared to climatic and hydrological processes. In addition, GCM simulations in both spatial and temporal scales have uncertainty in the parameterization of processes, so the output of these models cannot be directly used in climate change studies. Therefore, downscaling and bias correcting of GCM simulations is necessary to obtain information at the appropriate scale (Wood et al., 2004). The reason for using models with a higher ranking in terms of simulation skill is that the models have different skills in different regions and periods (Bağçacı et al., 2021) and using the average of several different models are effective in reducing the uncertainty of the results of Simulations.

Several studies have been conducted in the field of climate change forecasting and

GCM models. Based on these studies, it can be seen that the changes in climatic parameters in different regions have different characteristics and effects, and the reason for that is the different climatic and geographical characteristics of those regions. On the other hand, the use of different downscaling models and methods has been effective in the obtained results. Therefore, in studying and forecasting the climate of each region, the use of new models, validation of models, selection of the most appropriate models, and the use of appropriate downscaling methods increase the validity of the research and its results. It can be used in different fields.

Methodology

Urmia Lake basin with an area of about 52,000 km² is located in the northwest of Iran and includes parts of East Azerbaijan, West Azerbaijan and Kurdistan provinces.

In order to project the future temperature and precipitation using CMIP6 models, first the accuracy and performance of the models for simulating the base period in comparison with the observational data were evaluated by using downscaling statistical methods.

For this purpose, the output of GCM models for the base period was divided into two periods: 1990-2004 for calibration and 2005-2014 for validation. In the calibration phase, the statistical correlation between the observational data and the model were determined, and assuming that the resulting relationships were established for the future period, the data for the future period (2005-2014) were generated. In the validation phase, the accuracy of the data produced by the downscaling model compared to the observational data was evaluated using the graphs of the monthly average values of the variables, the Taylor diagram, and the RMSE and NRMSE indices. After evaluating the accuracy of the models, the model with the least error in simulating temperature and precipitation, was used to project the future climate.

Results and Discussion

The average monthly temperature of the basin will increase in most months of the year under all scenarios; the highest increase in temperature will occur in the months of September and October and the lowest increase in spring. Rainfall changes will be different in different months. In April and May (spring season) and October and November (autumn season) in all scenarios, the rainfall of the basin will decrease. The highest percentage of precipitation reduction will be in the autumn season.

The average annual temperature increase of the basin in the near future will be 1.5 and 1.4 T C in the optimistic and pessimistic scenarios, and 1.8 and 4 T C in the far future. Therefore, the temperature increase in the pessimistic scenario is more than the optimistic scenario. The amount of annual precipitation will decrease in all scenarios, in the near future in the optimistic and pessimistic scenarios by 19.9 and 21.6 percent respectively, and in the far future in the optimistic and pessimistic scenarios will decrease by 12 and 28.6 percent respectively.

Conclusion

According to the results of the present research, in the catchment area of Urmia Lake, the temperature will generally increase and precipitation will decrease in the future periods. The results of the increase in temperature and decrease in rainfall are in line with most of the previous studies in different regions. Some previous studies have been conducted in relation to the projecting of temperature and precipitation in the catchment area of Urmia Lake. Karimi and Nabizadeh (2017) using the HadCM3 model have projected an increase in temperature and a decrease in precipitation, and Zarin and Dadashi (2019) have projected an increase in temperature for the catchment area of Urmia Lake using CMIP6 models, and the results of the aforementioned studies are in accordance with the results of the present research and confirm each other's results.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to all the scientific consultants of this paper.

پیش‌نگری چشم‌انداز آبی دما و بارش حوضه آبریز دریاچه ارومیه مبتنی بر مدل‌های CMIP6

فیروز عبدالعلی‌زاده^۱✉، علی محمد خورشیددوست^۲، سعید جهانبخش اصل^۳

- ۱- نویسنده مسئول، گروه آب‌هواشناسی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: abdolalizadeh@tabrizu.ac.ir
۲- گروه آب‌هواشناسی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: khورشid@tabrizu.ac.ir
۳- گروه آب‌هواشناسی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: s_jahan@tabrizu.ac.ir

چکیده

در تحقیق حاضر متغیرهای اقلیمی دما و بارش حوضه آبریز دریاچه ارومیه با استفاده از مدل‌های CMIP6 تحت دو سناریوی SSP1-2.6 و SSP5-8.5 در بازه‌های زمانی آینده (۲۰۳۱-۲۰۵۵ و ۲۰۹۵-۲۰۷۱) مورد پیش‌نگری و ارزیابی قرار گرفتند. ابتدا دقت مدل‌ها برای دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۹۰) پس از ریزمقیاس‌نمایی با روش‌های مختلف نداشت چندک با استفاده از نمودار تیلور و شاخص‌های RMSE و NRMSE مورد ارزیابی قرار گرفت و از بین مدل‌ها، مدل MRI-ESM2-0 برای دما و مدل INM-CM5-0 برای بارش با روش ریزمقیاس‌نمایی SSPLIN جهت پیش‌نگری اقلیم آینده انتخاب شدند، سپس داده‌های دما و بارش آینده تولید گردیدند. نتایج مقایسه دما و بارش دوره‌های آینده با دوره پایه نشان دادند که دمای متوسط سالانه حوضه تحت همه سناریوها افزایش خواهد داشت. میزان افزایش دمای متوسط سالانه حوضه در آینده نزدیک در سناریوهای خوش‌بینانه و بدبینانه به ترتیب ۱/۵ و ۱/۸ درجه سلسیوس و در آینده دور به ترتیب ۱/۴ و ۴ درجه سلسیوس خواهد بود. بارش متوسط سالانه در تمامی سناریوها کاهش خواهد یافت، در آینده نزدیک در سناریوهای خوش‌بینانه و بدبینانه به ترتیب ۱۹/۹ و ۲۱/۶ درصد و در آینده دور به ترتیب ۱۲ و ۲۸/۶ درصد کاهش خواهد یافت. بر اساس توزیع مکانی تغییرات دما و بارش در دوره‌های آبی بیشترین افزایش دما و بیشترین کاهش بارش در مناطق شمالی حوضه اتفاق خواهد افتاد.

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۱/۱۱/۱۳

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۱/۰۱/۱۱

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۱/۰۲/۱۶

واژگان کلیدی:

دما، بارش،
مدل‌های CMIP6،
روش نداشت چندک،
حوضه آبریز دریاچه ارومیه

استناد: عبدالعلی‌زاده، فیروز؛ خورشیددوست، علی محمد و جهانبخش اصل، سعید. (۱۴۰۲). پیش‌نگری چشم‌انداز آبی دما و بارش حوضه آبریز دریاچه ارومیه مبتنی بر مدل‌های CMIP6. *مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۵ (۱)، ۹۵-۱۱۲.

<http://doi.org/10.22059/JPHGR.2023.352727.1007737>

ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران

DOI: 10.22059/JPHGR.2023.352727.1007737

© نویسنده‌گان



مقدمه

بر اساس ارزیابی‌های ارائه‌شده در گزارش ششم روشن است که دخالت انسان باعث گرم شدن جو، اقیانوس و زمین شده است. تغییرات گسترده و سریع در آب‌وهوا رخ داده است. افزایش گازهای گلخانه‌ای از حدود سال ۱۷۵۰ به بعد به‌طور آشکار ناشی از فعالیت انسانی است. از سال ۲۰۱۱ غلظت گازهای گلخانه‌ای در جو در حال افزایش بوده‌اند و در سال ۲۰۱۹ به میانگین سالانه ۴۱۰ ppm برای CO₂، ۱۸۶۶ ppm برای متان و ۳۳۲ ppm برای N₂O رسیده‌اند. هر یک از چهار دهه گذشته از سال ۱۸۵۰ گرم‌تر از دهه قبل بوده‌اند. دمای جهانی سطح زمین در دو دهه اول قرن ۲۱ (۲۰۰۱-۲۰۲۱) ۰/۹۹ درجه سانتی‌گراد بیشتر از دوره ۱۹۰۰-۱۸۵۰ بوده است (IPCC^۱, 2021: 6,11).

توسعه و تکوین مدل‌های گردش عمومی جو این امکان را به وجود آورده است تا محققان بتوانند ویژگی‌های اقلیمی را در مقیاس‌های زمانی بلندمدت بررسی نمایند. مدل‌های گردش عمومی ابزاری جهت شبیه‌سازی رفتار سیستم اقلیمی در زمان و مکان هستند که هدف نهایی آن‌ها شناخت فرآیندهای اصلی فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی موجود در اقلیم است. با شناخت سیستم اقلیمی امکان دستیابی به تصویر واضح از اقلیم گذشته از طریق مقایسه با مشاهدات تجربی و پیش‌بینی اقلیم آینده فراهم خواهد شد (صی محمدی و همکاران، ۱۴۰۰؛ ۴).

در حال حاضر برنامه تحقیقات جهانی آب‌وهوا (WCRP^۲)، فاز ششم مدل‌های CMIP را راه‌اندازی کرده است. این مدل‌ها دارای وضوح مکانی بالاتر و طرح‌واره‌های پارامتر سازی بهبودیافته برای فرآیندهای اصلی فیزیکی و بیوژئوشیمیایی سیستم آب‌وهوا هستند. برای پیش‌بینی آب‌وهوا در آینده، مدل‌های CMIP6 از سناریوهای انتشار بر اساس مسیرهای اقتصادی-اجتماعی مشترک (SSP) استفاده می‌کنند. این سناریوها بر اساس مسیرهای انتشار و کاربری زمین توسعه داده شده‌اند که تا حدودی با سناریوهای RCP متفاوت هستند. مزیت سناریوهای SSP این است که توصیف روشنی از تکامل اجتماعی-اقتصادی جامعه آینده دارند (Zhu et al., 2021: 2). ششمین گزارش ارزیابی IPCC بیان می‌کند که گرمایش جهانی ادامه خواهد داشت و پرداختن به چالش‌های ناشی از تغییرات آب‌وهوایی ناشی از تأثیر انسان به موضوع اصلی قرن بیست و یکم تبدیل شده است (IPCC, 2021; 11). با توجه به عوامل محیطی و جغرافیایی در مناطق مختلف جهان، این مناطق با چالش‌های متفاوتی مواجه خواهند شد. بنابراین، مطالعات منطقه‌ای تغییر اقلیم حیاتی می‌باشد (Liu et al., 2022: 1).

خروجی‌های مدل‌های گردش عمومی جو از نظر تفکیک‌پذیری زمانی و مکانی، در حدود دهه‌ها کیلومتر در مقیاس روزانه و ماهانه هستند که در مقایسه با فرآیندهای اقلیمی و هیدرولوژیکی بزرگ مقیاس هستند. علاوه بر این، شبیه‌سازی‌های GCM در هر دو مقیاس مکانی و زمانی دارای عدم قطعیت در پارامتر سازی فرآیندها هستند، بنابراین نمی‌توان به‌طور مستقیم از خروجی این مدل‌ها در مطالعات تغییر اقلیم استفاده کرد. لذا ریزمقیاس‌نمایی و تصحیح اریبی شبیه‌سازی‌های GCM برای به دست آوردن اطلاعات در مقیاس مناسب ضروری است (Wood et al., 2004). همچنین مطالعات برای پیش‌بینی اقلیم آینده با استفاده از میانگین مدل‌هایی که دارای مهارت بالاتری در شبیه‌سازی اقلیم دوره پایه هستند، انجام می‌گیرد. دلیل استفاده از مدل‌های با رتبه بالاتر از نظر مهارت شبیه‌سازی این است که مدل‌ها مهارت‌های متفاوتی در مناطق و دوره‌های مختلف دارند (Bagcaci et al., 2021: 2) و استفاده از میانگین چندین مدل مختلف در کاهش عدم قطعیت نتایج شبیه‌سازی‌ها مؤثر است.

1. Intergovernmental Panel on Climate Change
2. World Climate Research Program

ساموئل و همکاران^۱ (۲۰۱۳) به بررسی اثرات تغییرات اقلیمی بر دما، بارش، منابع آب و کشاورزی آفریقای جنوبی پرداختند. نتایج حاکی از افزایش مقادیر حدی در دوره‌های آبی بودند به طوری که در آینده طوفان‌های سهمگین به همراه سیلاب افزایش داشته و تغییر اقلیم تأثیر منفی بر منابع آب و کشاورزی خواهد داشت. هوآنگ و همکاران^۲ (۲۰۱۴)، دمای حوضه رودخانه مکنون چین را با استفاده از مدل‌های CMIP5 شبیه‌سازی و پیش‌یابی کردند. نتایج نشان دادند که عملکرد مدل‌ها در مکان دقیق‌تر از زمان است اما دقت شبیه‌سازی به اندازه کافی خوب نیست، لذا روش میانگین‌گیری چند مدلی می‌تواند دقت شبیه‌سازی دمای سالانه و دهه‌ای را در مقایسه با نتایج تک مدل بهبود بخشد. فنگ و همکاران^۳ (۲۰۱۴)، تغییر رژیم آب‌وهوایی را بر اثر گرمایش جهانی با استفاده از مجموعه مدل‌های CMIP5 شبیه‌سازی کردند. نتایج نشان دادند که تحت سناریوی RCP8.5، مدل‌ها گرمایش جهانی (قاره‌ها) را بین ۳ تا ۱۰ درجه تا پایان قرن ۲۱ پیش‌بینی کردند؛ همچنین مدل‌ها افزایش بارش در عرض‌های بالای نیمکره شمالی و کاهش بارش در مدیترانه، جنوب غرب آمریکای شمالی، شمال و جنوب آفریقا و استرالیا را پیش‌بینی کردند. سو و همکاران^۴ (۲۰۱۶)، از طریق ریزمقیاس‌نمایی خروجی مجموعه مدل‌های گردش عمومی سری CMIP5 تغییر اقلیم حوضه رودخانه ایندوس را بررسی کردند. نتایج پیش‌بینی‌ها نشان دادند که دمای متوسط سالانه در کل حوضه نسبت به دوره پایه (۲۰۰۵-۱۹۸۶)، با بیشترین تغییر در بالادست حوضه، افزایش می‌یابد؛ و در تمام سناریوهای افزایش بارش‌های موسمی رخ خواهد داد و به جز برای RCP2.6، روند نزولی در بارش‌های بهاری و زمستانی پیش‌بینی شد. لی و همکاران^۵ (۲۰۲۰)، بارش آینده رودخانه یانگ تسه در چین را با استفاده از ۱۸ مدل CMIP6 مورد ارزیابی قرار دادند. بر اساس نتایج تحقیق، میزان بارش در دوره ۲۰۹۹-۲۰۱۵ تحت سناریوی SSP1-2.6 به میزان ۱۴/۷۶ میلی‌متر و تحت سناریوی SSP5-8.5 به میزان ۲۲/۴۷ میلی‌متر افزایش خواهد داشت. برین و همکاران^۶ (۲۰۲۱)، متوسط دمای سطح در شرق آفریقا را با استفاده از مدل‌های CMIP6 مورد بررسی و پیش‌یابی قرار دادند. برای پیش‌یابی دما، پنج مدل CMIP6 (مدل‌ها بر اساس رتبه آن‌ها در شبیه‌سازی متوسط دمای دوره تاریخی انتخاب شدند) تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج مجموعه مدل‌های منتخب نشان‌دهنده تغییرات زیاد دما در دوره ۲۱۰۰-۲۰۸۰ به میزان ۲/۴ درجه در SSP2-4.5 و ۴/۴ درجه سانتی‌گراد در SSP5-8.5 بودند. سونگ و همکاران^۷ (۲۰۲۱)، تغییر اقلیم قرن ۲۱ را با استفاده از مدل NIMS-KMA از سری مدل‌های CMIP6 پیش‌یابی کردند. شبیه‌سازی‌ها برای دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۹۵) بیانگر دقت بالای عملکرد مدل‌ها در میانگین و تغییرپذیری اقلیم هستند که قابلیت اطمینان مدل‌های اقلیمی را نشان می‌دهد. نتایج پیش‌یابی آینده نشان دادند که دمای جهانی به میزان ۱/۹۲ تا ۵/۲ درجه سانتی‌گراد نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد، میانگین بارش جهانی ۵ تا ۱۰ درصد افزایش و وسعت یخ دریا در قطب‌های شمال و جنوب کاهش خواهد یافت. کریمی و نبی‌زاده (۱۳۹۷)، اثرات تغییر اقلیم بر متغیرهای اقلیمی حوضه دریاچه ارومیه را طی سال‌های ۲۰۴۰-۲۰۱۱ با استفاده از مدل گردش عمومی HadCM3 و مدل ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG پیش‌نگری و ارزیابی کردند. نتایج پژوهش حاکی از کاهش بارش و افزایش دما طی دوره آینده می‌باشد. جهانگیر و همکاران (۱۳۹۹)، وضعیت خشک‌سالی برای دوره آبی (۱۳۹۷-۱۴۴۳) در ایستگاه شیراز را با استفاده از مدل LARS-WG پیش‌نگری کردند. پیش‌نگری با

1. Samue
2. Huang
3. Feng
4. Su
5. Li
6. Brian
7. Sung

استفاده از مدل HadCM3 تحت دو سناریوی A2 و A1B انجام گرفت. نتایج نشان دادند که متوسط بارش سالانه در دوره آتی در هر دو سناریو افزایش خواهد یافت. زرین و داداشی (۱۳۹۹)، با استفاده از سه مدل از مدل‌های CMIP6 دمای آینده ایران را مورد پیش‌نگری قرار دادند. نتایج پژوهش بیانگر بی‌هنجاری مثبت دما در ایران (متوسط سالانه کل کشور برای سناریوی SSP2-4.5، ۲/۱۵ درجه و برای سناریوی SSP5-8.5، ۳/۳۴ درجه سلسیوس) در تمام ماه‌های سال تا پایان قرن ۲۱ است. بر اساس این تحقیق، در حوضه دریاچه ارومیه افزایش دما در سناریوی SSP585 تا ۵ درجه سلسیوس نیز خواهد رسید. فلاح کلاکی و همکاران (۱۴۰۰)، اثرات تغییر اقلیم بر رواناب حوضه طشک-بختگان را با استفاده از مدل‌های CMIP5 و CMIP6 برای دوره ۲۰۲۱-۲۰۵۰ ارزیابی کردند. نتایج نشان دادند که در دوره آینده دما افزایش (۱/۵ تا ۲/۹ درجه سلسیوس) و بارش کاهش (۱۱/۱۵-۰/۰۵ درصد) خواهند یافت. شبیه‌سازی هیدرولوژیک نشان داد رواناب تحت سناریوهای SSP کاهش و تحت سناریوهای RCP افزایش خواهد یافت. صی محمدی و همکاران (۱۴۰۰)، اثرات تغییر اقلیم بر دما و بارش شهرستان کرمانشاه را با استفاده از مدل HadCM3 و روش ریزمقیاس نمایی SDSM برای سه دوره سی‌ساله آینده بررسی کردند. نتایج نشان دادند که در آینده بارش روند کاهشی و دما روند افزایشی خواهند داشت.

با توجه به پیشینه ارائه‌شده، مطالعات متعددی در زمینه پیش‌نگری تغییر اقلیم و مدل‌های GCM انجام‌گرفته است. بر اساس این مطالعات، مشاهده می‌شود تغییر متغیرهای اقلیمی در مناطق مختلف دارای خصوصیات و تأثیرات متفاوتی هستند و دلیل آن ویژگی‌های اقلیمی و جغرافیایی متفاوت آن مناطق است. از سوی دیگر، استفاده از مدل‌ها و روش‌های ریزمقیاس نمایی مختلف در نتایج به‌دست‌آمده تأثیرگذار بوده است. بنابراین در مطالعه و پیش‌بینی اقلیم هر منطقه استفاده از مدل‌های جدید، صحت‌سنجی مدل‌ها، انتخاب مناسب‌ترین مدل‌ها و استفاده از روش ریزمقیاس نمایی مناسب بر اعتبار تحقیق می‌افزاید و نتایج آن را می‌توان در زمینه‌های مختلف مورد استفاده قرار داد. لذا در تحقیق حاضر، برای پیش‌بینی دما و بارش حوضه آبریز دریاچه ارومیه از جدیدترین مدل‌های GCM (CMIP6) پس از صحت‌سنجی و انتخاب مدل‌های مناسب استفاده گردید.

روش پژوهش

در تحقیق حاضر داده‌های مشاهداتی شامل دما و بارش روزانه ایستگاه‌های سینوپتیک (تبریز، سراب، مراغه، ارومیه، تکاب، مهاباد و سقز) برای دوره ۲۰۱۴-۱۹۹۰ هستند. ایستگاه‌ها به‌گونه‌ای انتخاب شده‌اند که داده‌های آن‌ها در دوره مورد مطالعه موجود بوده و توزیع ایستگاه‌ها سطح منطقه را به‌طور مناسبی پوشش دهند. داده‌های مذکور از سازمان هواشناسی کشور اخذ شده‌اند. دسته دوم داده‌های مدل‌های GCM از سری مدل‌های CMIP6 هستند (جدول ۱). این داده‌ها شامل مقادیر روزانه دمای متوسط و بارش برای سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 طی بازه زمانی دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۹۰)، آینده نزدیک (۲۰۳۱-۲۰۵۵) و آینده دور (۲۰۷۱-۲۰۹۵) می‌باشند که از پایگاه برنامه جهانی تحقیقات اقلیمی (<https://esgf-node.llnl.gov>) استخراج شده‌اند. مدل‌ها به‌گونه‌ای انتخاب شده‌اند که دارای وضوح مکانی بالا بوده و داده‌های آن‌ها برای سناریوهای مورد مطالعه موجود باشند. با توجه به اینکه دوره پایه ۲۵ سال می‌باشد بازه زمانی دوره‌های آینده نزدیک و دور نیز ۲۵ سال در نظر گرفته شد.

جدول ۱. مشخصات مدل‌های گردش عمومی جو

مدل	کشور ارائه‌دهنده	رزولوشن (خشکی)	سال انتشار	واریانت
MRI-ESM2-0	ژاپن	۱۰۰ کیلومتر	۲۰۱۷	rlilplfl
MPI-ESM1-2-HR	آلمان	۱۰۰ کیلومتر	۲۰۱۷	rlilplfl
INM-CM5-0	روسیه	۱۰۰ کیلومتر	۲۰۱۶	rlilplfl
CMCC-ESM2	ایتالیا	۱۰۰ کیلومتر	۲۰۱۷	rlilplfl
NorESM2-MM	نروژ	۱۰۰ کیلومتر	۲۰۱۷	rlilplfl

به‌منظور پیش‌نگری دما و بارش آینده با استفاده از مدل‌های CMIP6، ابتدا دقت و کارایی مدل‌ها برای شبیه‌سازی دوره پایه نسبت به داده‌های مشاهداتی با استفاده از روش‌های آماری ریزمقیاس‌نمایی مورد ارزیابی قرار گرفت. بدین منظور خروجی مدل‌های GCM برای دوره پایه به دوره ۲۰۰۴-۱۹۹۰ برای کالیبراسیون و دوره ۲۰۱۴-۲۰۰۵ برای صحت‌سنجی تقسیم شدند. در مرحله کالیبراسیون روابط آماری بین داده‌های مشاهداتی و مدل تعیین گردید و با فرض برقراری روابط حاصل برای دوره آینده، داده‌های دوره آینده (۲۰۱۴-۲۰۰۵) تولید شدند. در مرحله صحت‌سنجی دقت داده‌های تولیدشده توسط مدل ریزمقیاس‌نمایی نسبت به داده‌های مشاهداتی با استفاده از نمودارهای مقادیر متوسط ماهانه متغیرها، نمودار تیلور و شاخص‌های RMSE و NRMSE مورد ارزیابی قرار گرفت. پس از ارزیابی دقت مدل‌ها، مدلی که دارای کمترین خطا به عبارتی دارای بالاترین دقت در شبیه‌سازی دما و بارش بود برای پیش‌نگری اقلیم آینده مورد استفاده قرار گرفت.

ریزمقیاس‌نمایی: یکی از روش‌های ریزمقیاس‌نمایی استفاده از تبدیل‌های آماری^۱ است که به روش نگاشت چندک (QM)^۲ موسوم است. این روش تلاش می‌کند تابعی (h) بیابد که متغیر مدل‌سازی شده (x_m) را طوری تبدیل کند که توزیع جدید آن با توزیع متغیر مشاهداتی (x_o) یکی باشد. این تبدیل در حالت کلی به فرم زیر می‌باشد (Piani et al, 2010):

$$x_o = h(x_m) \quad (۱)$$

اگر توزیع متغیر موردنظر مشخص باشد، تبدیل به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$x_o = F_o^{-1}(F_m(x_m)) \quad (۲)$$

در رابطه فوق F_m تابع توزیع تجمعی x_m و F_o^{-1} معکوس تابع توزیع تجمعی x_o هستند. معکوس تابع توزیع تجمعی با عنوان تابع نگاشت چندک نیز شناخته می‌شود. برای حل رابطه ۲ از توابع مختلف پارامتریک و نا پارامتریک استفاده می‌شود. روش‌های مورد استفاده در تحقیق حاضر به شرح زیر می‌باشند:

توابع تبدیل پارامتریک (PTF): در این روش از توابع تبدیل پارامتریک برای تشکیل روابط چندک-چندک استفاده می‌شود. بدین منظور توابع تبدیل از پیش تعریف شده پیشنهاد شده‌اند که توابع مورد استفاده در این تحقیق طبق روابط زیر می‌باشند:

$$p_o = bp_m \quad (۳)$$

$$p_o = a + bp_m \quad (۴)$$

$$p_o = bp_m^c \quad (۵)$$

$$p_0 = (a + bp_m)(1 - e^{\frac{-(p_m - \gamma)}{\tau}}) \quad (۶)$$

در روابط فوق p_0 و p_m احتمال متغیرهای مشاهداتی و مدل‌سازی شده هستند. a ، b ، c و τ پارامترهای مرتبط با روش هستند که در مرحله کالیبراسیون تعیین می‌شوند (Piani et al, 2010; Maraun et al., 2010). هر یک از روابط (۳) تا (۶) روش‌های مختلف PTF هستند که نام‌گذاری آن‌ها بدین صورت می‌باشد: رابطه-۳: scale، رابطه-۴: linear، رابطه-۵: power، رابطه-۶: expasympt.x0 (exponential tendency to an asymptote).

توابع تبدیل نا پارامتریک: الف) چنک‌های تجربی قوی (RQUANT^۱): یک روش نا پارامتریک روش نگاشت چنک‌ها است که از رگرسیون خطی حداقل مربعات معمولی^۲ برای تخمین مقادیر مرتبط با چنک سری‌های زمانی مشاهداتی و مدل‌سازی شده استفاده می‌کند. در این روش چنک‌های غیرقابل دسترس با استفاده از درون‌یابی تخمین زده می‌شوند (Villani et al., 2015).

ب) اسپلاین همواری (SSPLIN^۳): اسپلاین همواری روشی نا پارامتریک برای برازاندن یک منحنی به داده‌ها است. در این روش از اسپلاین همواری برای برازش منحنی‌های چنک-چنک سری‌های زمانی مشاهداتی و مدل‌سازی شده استفاده می‌شود (Enayati et al., 2021).

نمودار تیلور: در این نمودار ارزش داده مشاهده شده به عنوان نقطه مرجع بر روی محور افقی مشخص می‌شود. بُعد شعاعی نشان‌دهنده انحراف استاندارد و بعد زاویه‌ای نشان‌دهنده همبستگی مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی شده است. خطوط رنگی به صورت نیم‌دایره نیز بیانگر خطای CRMSD^۴ هستند (شکل ۲).

شاخص‌های RMSE و NRMSE: شاخص RMSE ریشه میانگین مربعات خطا می‌باشد و میزان خطای مدل را نسبت به مقادیر مشاهداتی نشان می‌دهد (رابطه ۷). برای مقایسه چندین مدل از حالت استاندارد شده RMSE یعنی ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) استفاده می‌شود (رابطه ۸).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (M_i - O_i)^2} \quad (۷)$$

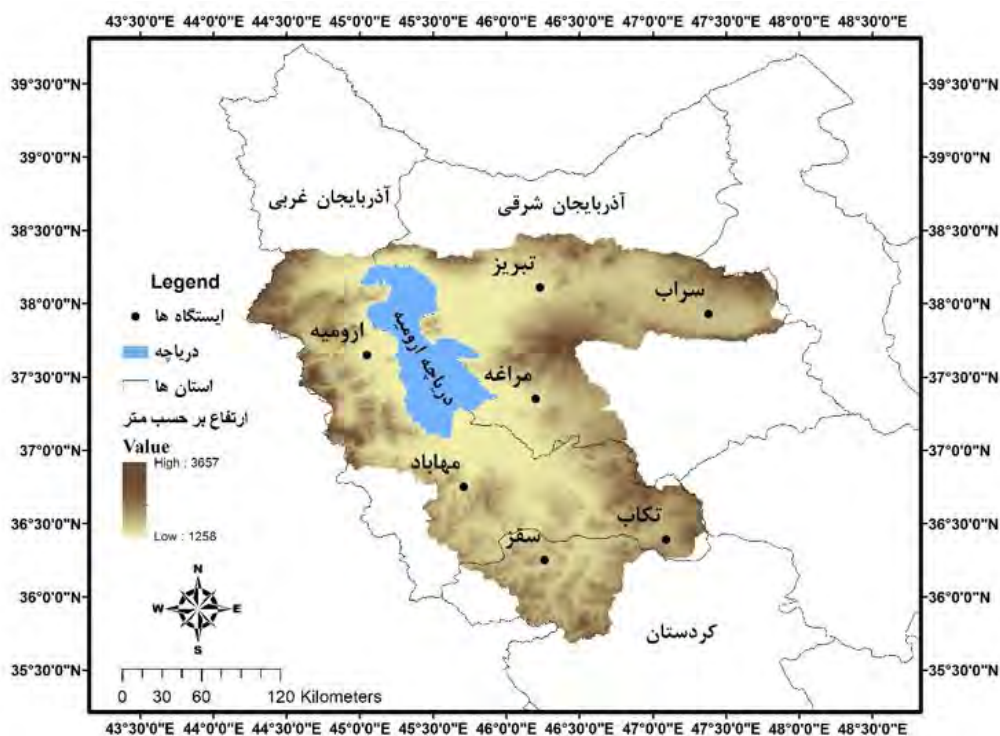
$$NRMSE = \frac{RMSE}{O_{max} - O_{min}} \quad (۸)$$

در روابط فوق M_i و O_i مقادیر مدل و مشاهداتی و n تعداد کل داده‌ها هستند.

محدوده مورد مطالعه

حوضه آبریز دریاچه ارومیه با مساحت حدود ۵۲۰۰۰ کیلومتر مربع در شمال غرب ایران واقع شده است و شامل بخش‌هایی از استان‌های آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی و کردستان می‌باشد (شکل ۱). این حوضه توسط دامنه‌های شمالی زاگرس، دامنه‌های جنوبی کوه سبلان و کوه سه‌سهند احاطه شده است. شهرهای پرجمعیت و مهمی همچون تبریز و ارومیه در این حوضه قرار دارند. دریاچه ارومیه واقع در این حوضه به عنوان بزرگ‌ترین دریاچه داخلی ایران و یکی از بارزترین اکوسیستم‌های آبی ایران به شمار می‌رود.

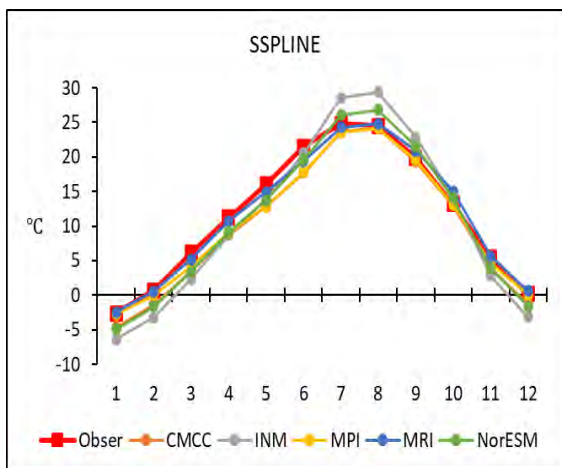
1. Robust Empirical Quantile
2. Linear least squares regression
3. Smoothing Splines
4. Centered RMS Difference



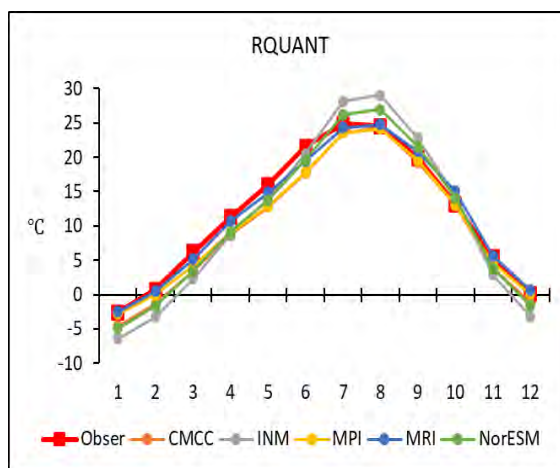
شکل ۱. نقشه موقعیت جغرافیایی و وضعیت توپوگرافی حوضه آبریز دریاچه ارومیه و ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه

یافته‌ها

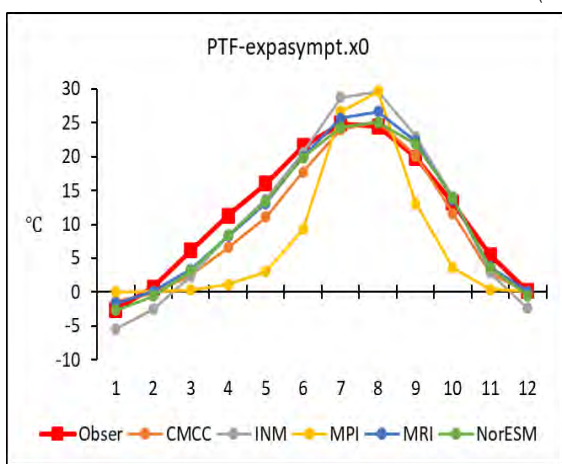
برای ارزیابی دقت مدل‌ها در شبیه‌سازی دوره پایه، در روش‌های مختلف ریزمقیاس‌نمایی طی دوره ۱۹۹۰-۲۰۰۴ برای مدلی کالیبره شده و برای دوره ۲۰۰۵-۲۰۱۴ داده‌های ریزمقیاس‌شده مدل‌های GCM تولید گردیدند. برای بررسی دقت داده‌های تولیدشده در دوره صحت‌سنجی ابتدا نمودارهای میانگین‌های ماهانه مدل‌ها همراه با داده‌های مشاهداتی برای شش روش ریزمقیاس‌نمایی ترسیم شدند (شکل‌های ۲ و ۳). نمودارهای شکل ۲ نشان می‌دهند اکثر مدل‌ها دمای متوسط ماهانه را نسبتاً خوب شبیه‌سازی کرده‌اند. با دقت در نمودارها مشاهده می‌شود که مدل MRI-ESM2-0 در بیشتر روش‌های ریزمقیاس‌نمایی به‌ویژه در روش‌های پارامتریک (SSPLIN و RQUANT) نزدیک‌ترین منحنی به منحنی داده‌های مشاهداتی است. برای بارش، نمودارهای میانگین ماهانه (شکل ۳) بیانگر عدم شبیه‌سازی مناسب در اکثر مدل‌ها می‌باشند. شبیه‌سازی بارش فقط در دو حالت نسبتاً مناسب برآورد شده است که در روش SSPLIN مدل INM-CM5-0 و در روش RQUANT مدل MRI-ESM2-0 می‌باشند.



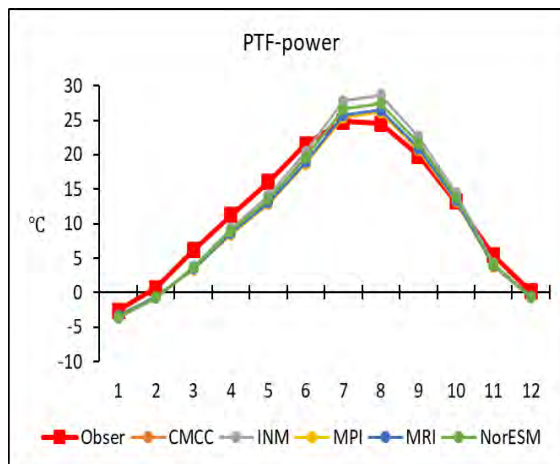
(الف)



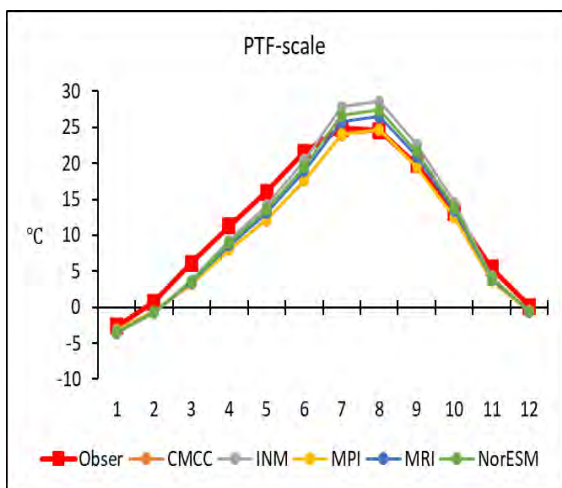
(ب)



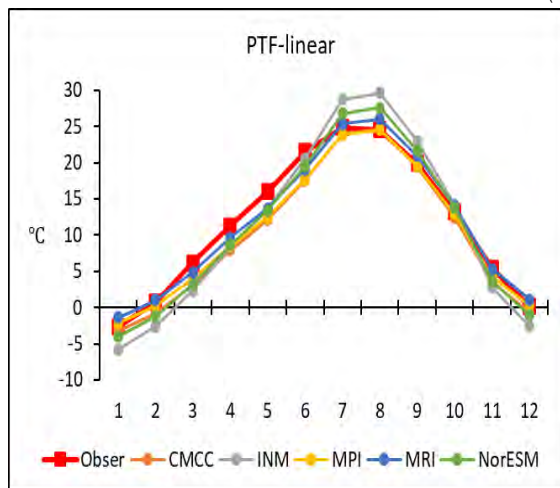
(پ)



(ت)

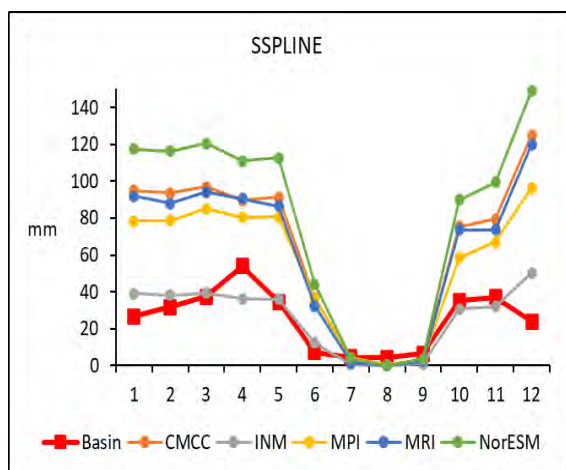


(ث)

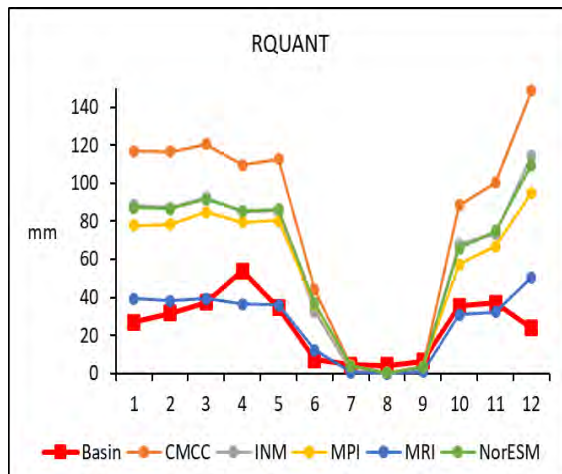


(ج)

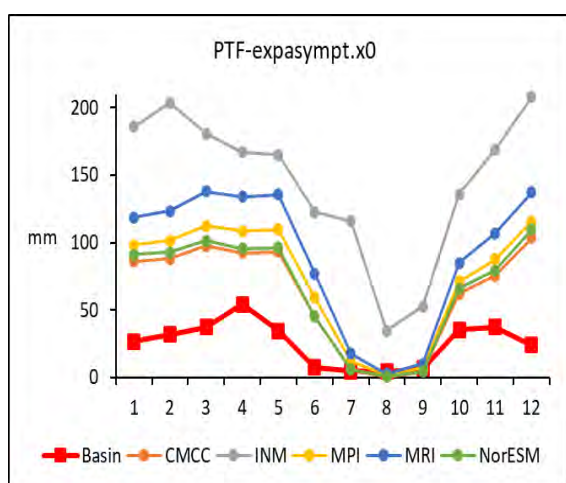
شکل ۲. مقادیر متوسط ماهانه دمای حوضه برای مدل‌های GCM ریزمقیاس شده توسط روش‌های مختلف مورد مطالعه در مقایسه با داده‌های مشاهداتی در دوره پایه



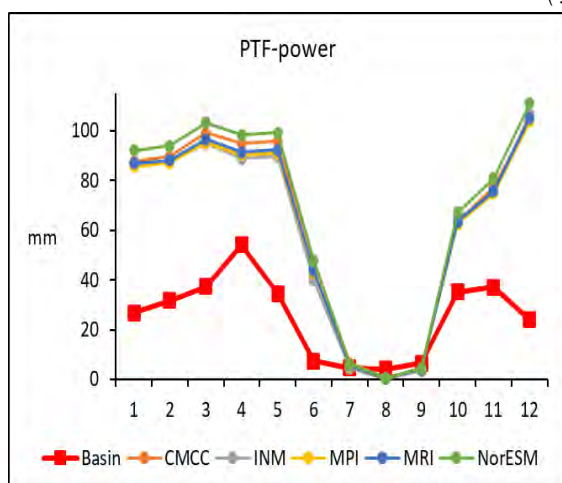
(الف)



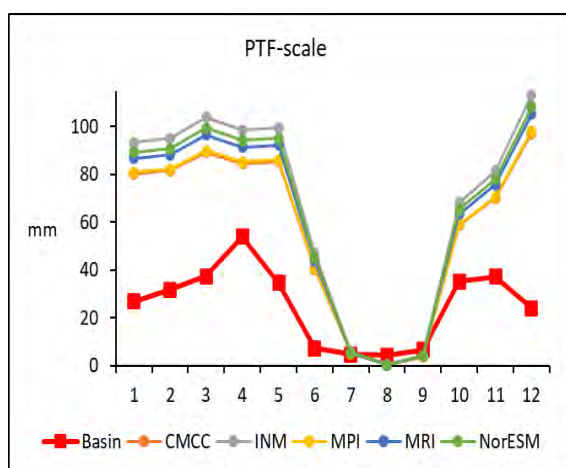
(ب)



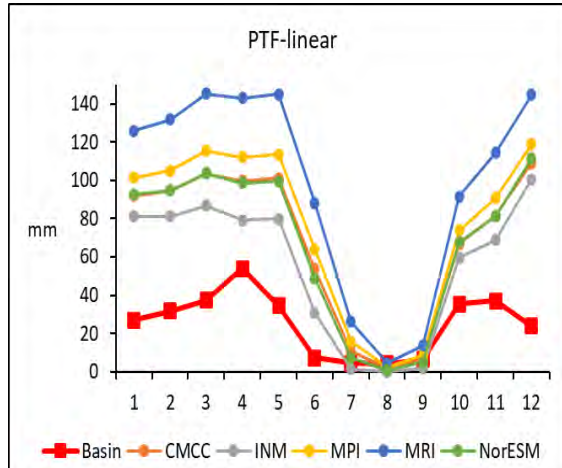
(پ)



(ت)



(ث)

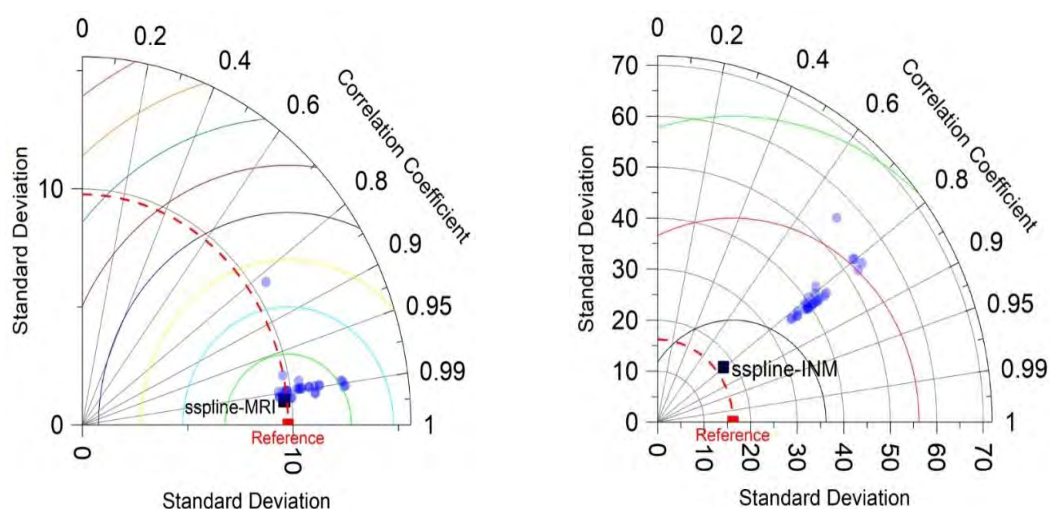


(ج)

شکل ۳. مقادیر متوسط ماهانه بارش حوضه برای مدل‌های GCM ریزمقیاس شده توسط روش‌های مختلف مورد مطالعه در مقایسه با داده‌های مشاهداتی در دوره پایه

برای ارزیابی دقیق‌تر مدل‌ها و انتخاب بهترین مدل از نمودارهای تیلور و شاخص‌های RMSE و NRMSE استفاده شد. نمودار تیلور دما (شکل ۴-الف) نشان می‌دهد نزدیک‌ترین مدل به نقطه مرجع مدل MRI-ESM2-0 با روش

ریزمقیاس نمایی SSPLIN است که دارای همبستگی بیش از ۰/۹۹، خطای CRMSD حدود ۱ و انحراف استاندارد ۱۰ می‌باشد. مراجعه به جدول ۲ نشان می‌دهد مدل MRI-ESM2-0 در روش‌های SSPLIN و RQUANT دارای خطای RMSE برابر ۱ و خطای NRMSE برابر ۳/۷ درصد در شبیه‌سازی دمای متوسط ماهانه می‌باشد که کمترین خطا را در بین مدل‌های مختلف دارد. لذا، مدل MRI-ESM2-0 با روش ریزمقیاس نمایی SSPLIN به‌عنوان مناسب‌ترین مدل برای شبیه‌سازی دمای آینده انتخاب شد. نمودار تیلور بارش در شکل ۴-ب نشان می‌دهد مدل INM-CM5-0 با روش ریزمقیاس نمایی SSPLIN نزدیک‌ترین مدل به نقطه مرجع با همبستگی حدود ۰/۸، خطای CRMSD برابر ۱۰/۵ و انحراف استاندارد ۱۸ می‌باشد. از طرفی با مراجعه به جدول ۳، مشاهده می‌شود کمترین خطا متعلق به مدل INM-CM5-0 با روش SSPLIN می‌باشد که در آن خطای RMSE برابر ۱۰/۶ میلی‌متر و NRMSE برابر ۲۱/۲ درصد می‌باشد. بنابراین برای شبیه‌سازی بارش آینده، مدل INM-CM5-0 با روش ریزمقیاس نمایی SSPLIN انتخاب گردید.



(الف)

(ب)

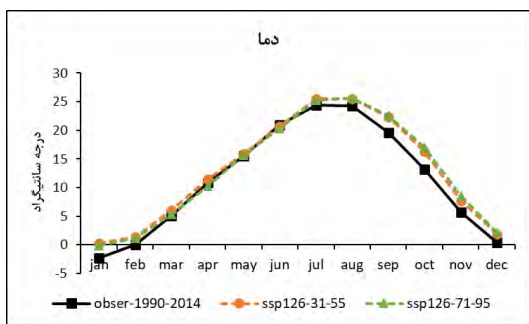
شکل ۴. نمودار تیلور مدل‌های GCM در مقابل داده‌های مشاهداتی کل حوضه برای دمای میانگین و بارش (نزدیک‌ترین مدل به نقطه مرجع با رنگ مشکی مشخص شده است)

جدول ۲. شاخص‌های RMSE و NRMSE برای ارزیابی دقت مدل‌های GCM بر اساس روش‌های مختلف ریزمقیاس نمایی (برای دما)

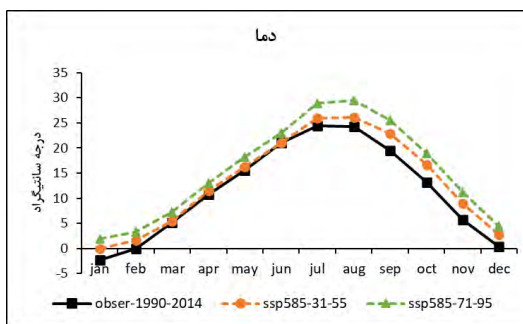
روش	شاخص	CMCC	INM-CM5-0	MPI	MRI-ESM2-0	NorESM
SSPLINE	RMSE	۲/۱	۳/۲	۱/۷	۱	۲
	NRMSE	۷/۷	۱۱/۶	۶/۳	۳/۷	۷/۳
RQUANT	RMSE	۲/۱	۳/۱	۱/۷	۱	۲
	NRMSE	۷/۷	۱۱/۴	۶/۳	۳/۷	۷/۳
PTF-xpasympt.x0	RMSE	۲/۷	۳/۱	۷/۴	۱/۹	۱/۸
	NRMSE	۹/۸	۱۱/۲	۲۷	۷	۶/۵
PTF-power	RMSE	۱/۹	۲/۱	۱/۹	۱/۹	۱/۹
	NRMSE	۶/۹	۷/۸	۶/۹	۶/۸	۶/۹
PTF-scale	RMSE	۲/۲	۲/۱	۲/۲	۱/۹	۱/۹
	NRMSE	۸	۷/۸	۷/۹	۶/۸	۶/۹
PTF-linear	RMSE	۲/۲	۳/۱	۱/۹	۱/۴	۲/۱
	NRMSE	۸/۲	۱۱/۴	۶/۸	۵/۱	۷/۷

جدول ۳. شاخص‌های RMSE و NRMSE برای ارزیابی دقت مدل‌های GCM بر اساس روش‌های مختلف ریزمقیاس‌نمایی (برای بارش)

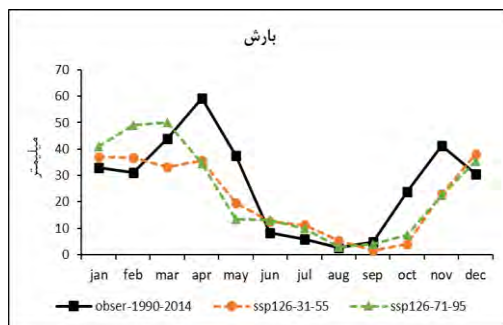
روش	شاخص	CMCC	INM-CM5-0	MPI	MRI-ESM2-0	NorESM
SSPLINE	RMSE	۵۰/۸	۱۰/۶	۳۸/۲	۴۷/۸	۶۸/۱
	NRMSE	۱۰۲/۱	۲۱/۲	۷۶/۷	۹۵/۹	۱۳۶/۷
RQUANT	RMSE	۶۷/۷	۴۵/۳	۳۷/۶	۱۰/۷	۴۴/۵
	NRMSE	۱۳۶	۹۱	۷۵/۶	۲۱/۴	۸۹/۴
PTF-expasympt.x0	RMSE	۴۵/۸	۱۲۷/۶	۵۷/۱	۷۵/۷	۴۹/۱
	NRMSE	۹۱/۹	۲۵۶/۳	۱۱۴/۷	۱۵۲	۹۸/۶
PTF-power	RMSE	۴۷/۳	۴۵/۳	۴۴/۹	۴۵/۸	۵۰/۶
	NRMSE	۹۴/۹	۹۰/۹	۹۰/۱	۹۲	۱۰۱/۶
PTF-scale	RMSE	۴۰/۵	۵۱/۴	۴۱	۴۵/۸	۴۸
	NRMSE	۸۱/۳	۱۰۳/۲	۸۲/۳	۹۲	۹۶/۳
PTF-linear	RMSE	۵۱/۲	۳۹/۳	۶۰/۱	۸۲/۸	۵۱
	NRMSE	۱۰۲/۸	۷۹	۱۲۰/۷	۱۶۶/۳	۱۰۲/۴



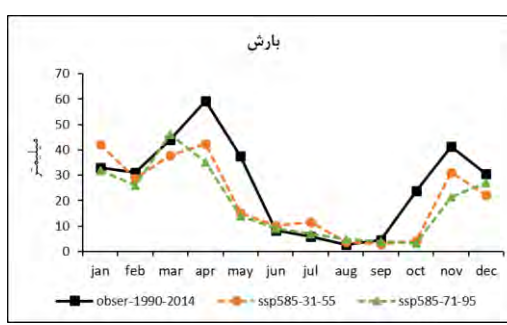
(الف)



(ب)



(پ)

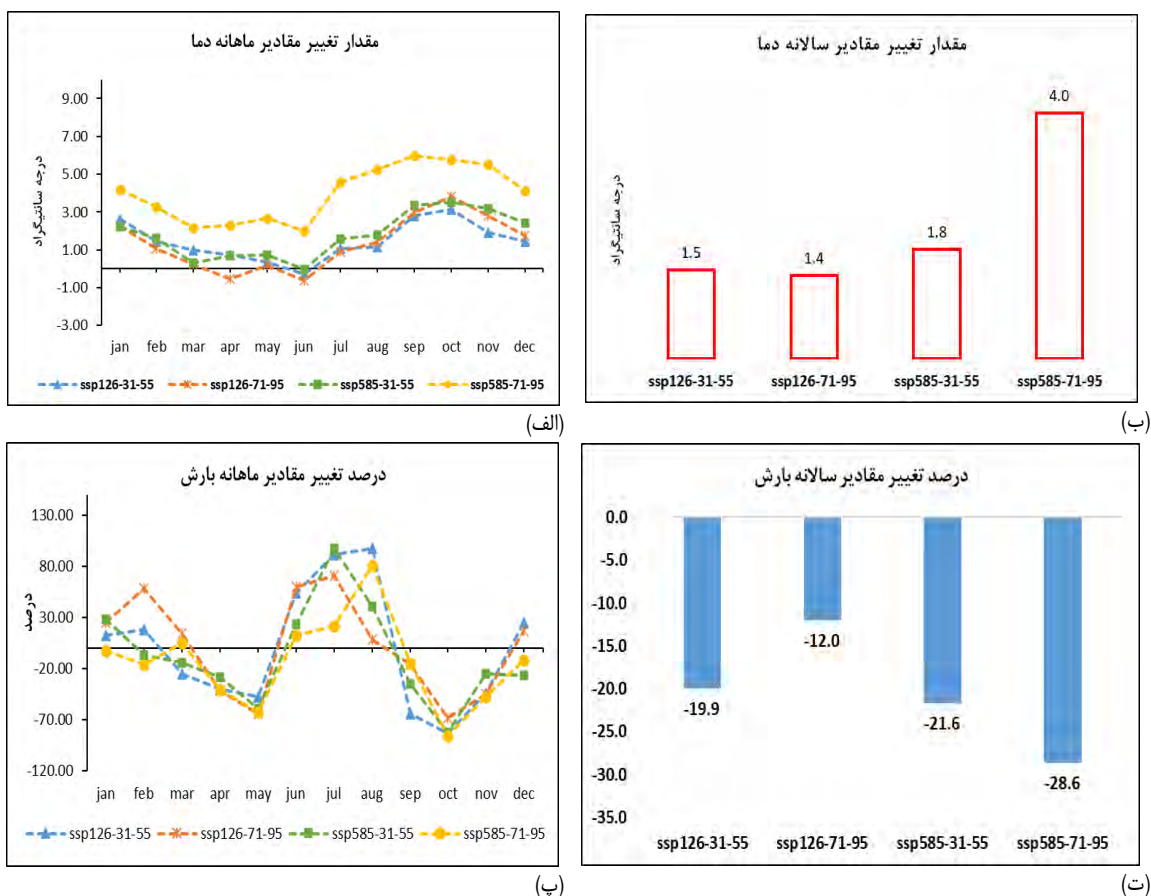


(ت)

شکل ۵. متوسط ماهانه دما و بارش دوره‌های آینده همراه با دوره پایه تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5

پس از انتخاب مدل‌های مناسب برای شبیه‌سازی اقلیم آینده، دما با استفاده از خروجی‌های مدل MRI-ESM2-0 و بارش با استفاده از خروجی‌های مدل INM-CM5-0 تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 و روش ریزمقیاس‌نمایی SSPLIN برای دوره‌های آینده نزدیک (۲۰۳۱-۲۰۵۵) و آینده دور (۲۰۷۱-۲۰۹۵) برای ایستگاه‌های مورد مطالعه تولید شده و به صورت میانگین‌های ماهانه و سالانه با دما و بارش دوره پایه (۱۹۹۰-۲۰۱۴) مورد مقایسه قرار گرفتند. نمودارهای متوسط ماهانه دما (شکل ۵-الف و ب) نشان می‌دهند تحت هر دو سناریو در بیشتر ماه‌ها به‌ویژه در شش ماهه دوم سال دما افزایش خواهد داشت و میزان افزایش در سناریوی SSP5-8.5 بیشتر از سناریوی SSP1-2.6 خواهد بود. در شکل ۵-پ و ت) نمودارهای بارش نشان می‌دهند تغییرات بارش در ماه‌های مختلف به یک شکل نیست در برخی ماه‌ها شاهد افزایش و در برخی ماه‌ها شاهد کاهش بارش هستیم. در حالت کلی کاهش بارش بیشتر از افزایش آن است.

در هر دو سناریو و در هر دو دوره آینده نزدیک و دور در ماه‌های آوریل و می (بهار) و ماه‌های اکتبر و نوامبر (پاییز) بارش حوضه کاهش می‌یابد.



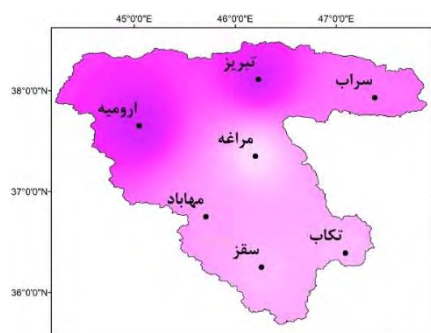
شکل ۶. مقدار تغییرات ماهانه و سالانه دما و بارش حوضه در سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5

در شکل ۶ تغییرات ماهانه و سالانه دما بر حسب درجه سلسیوس و بارش بر حسب درصد طی دوره‌های آینده نسبت به دوره پایه ارائه شده‌اند. نمودار تغییرات ماهانه دما (شکل ۶-الف) نشان می‌دهد بیشترین افزایش دما در نیمه دوم سال به‌ویژه در ماه‌های سپتامبر و اکتبر و کمترین افزایش دما در ماه‌های آوریل، می و جون (فصل بهار) خواهد بود و حتی در برخی سناریوها در ماه‌های آوریل و جون کاهش دما نیز مشاهده می‌شود. تغییرات متوسط سالانه دما در تمامی سناریوها مثبت است (شکل ۶-ب). تحت سناریوی SSP1-2.6 میزان تغییرات دما در دوره‌های آینده نزدیک و دور تفاوت زیادی ندارد به طوری که دما در آینده نزدیک ۱/۵ درجه و در آینده دور ۱/۴ درجه سلسیوس افزایش خواهد یافت، اما در سناریوی SSP5-8.5 علاوه بر اینکه میزان افزایش دما نسبت به سناریوی SSP1-2.6 بیشتر است، افزایش در دوره آینده دور نسبت به آینده نزدیک قابل توجه است، به طوری که افزایش دما متوسط حوضه تحت سناریوی SSP5-8.5 در آینده نزدیک ۱/۸ درجه و در آینده دور ۴ درجه سلسیوسی خواهد بود. در شکل ۶-پ تغییرات بارش متوسط ماهانه نشان می‌دهد در تمامی سناریوها طی ماه‌های آوریل، می، سپتامبر، اکتبر و نوامبر بارش کاهش می‌یابد و در ماه‌های جون، جولای و اگوست افزایش خواهد داشت. بر اساس این شکل به‌طور تقریبی می‌توان گفت بارش در فصل‌های بهار و پاییز کاهش و در فصل تابستان افزایش خواهد داشت و در فصل زمستان در برخی سناریوها افزایش و در برخی کاهش نشان

داده می‌شود. با توجه به اینکه بیشترین بارش منطقه مورد مطالعه در فصول بهار و پاییز رخ می‌دهد (شکل ۳ نمودار قرمز رنگ برای دوره پایه) انتظار بر این است که بارش سالانه حوضه کاهش داشته باشد. مراجعه به نمودار درصد تغییرات بارش سالانه (شکل ۶-ت) بحث مذکور را مورد تأیید قرار می‌دهد. در تمامی سناریوها تغییرات بارش منفی است. کمترین درصد کاهش بارش حوضه تحت سناریوی SSP1-2.6 در آینده دور به میزان ۱۲ درصد و بیشترین کاهش تحت سناریوی SSP5-8.5 در آینده دور خواهد بود.

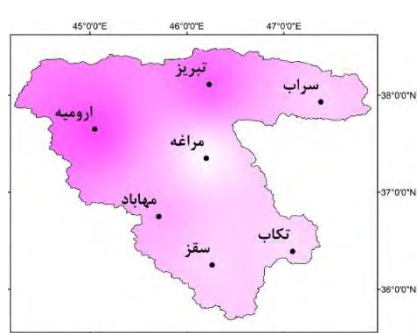
برای بررسی توزیع مکانی تغییرات دما و بارش دوره‌های آینده نسبت به دوره پایه در حوضه آبریز، تغییرات سالانه پارامترهای مذکور در سناریوهای مختلف به صورت نقشه‌های درون‌یابی شده ترسیم گردیدند (شکل‌های ۷ و ۸). شکل ۷ نشان می‌دهد در هر دو سناریو دما در تمامی ایستگاه‌ها افزایش می‌یابد. میزان افزایش در همه ایستگاه‌ها در سناریوی SSP5-8.5 بیشتر از سناریوی SSP1-2.6 است (شکل ۷). در سناریوی SSP1-2.6 در همه ایستگاه‌ها میزان افزایش دما در آینده‌های نزدیک و دور اختلاف زیادی ندارد و حتی در آینده دور نسبت به آینده نزدیک اندکی کاهش دما (در برخی ایستگاه‌ها ۰/۱ و در برخی ۰/۲ درجه سلسیوس) مشاهده می‌شود. تحت این سناریو کمترین افزایش دما در ایستگاه مراغه به میزان ۱/۲ درجه سلسیوس طی آینده دور و بیشترین افزایش دما در ایستگاه‌های تبریز و ارومیه طی آینده نزدیک به میزان ۱/۷ درجه سلسیوس خواهد بود (شکل ۷-الف و ب). تحت سناریوی SSP5-8.5 در همه ایستگاه‌ها آینده دور گرم‌تر از آینده نزدیک و در نتیجه بسیار گرم‌تر از دوره پایه خواهد بود (شکل ۷-پ و ت). تحت سناریوی مذکور کمترین افزایش دما به میزان ۱/۷ درجه سلسیوس در ایستگاه‌های سراب و تکاب طی آینده نزدیک و بیشترین افزایش دما به میزان ۴/۴ درجه سلسیوس در ایستگاه ارومیه طی آینده دور رخ خواهد داد. به‌طور کلی، با توجه به توزیع مکانی تغییرات دمایی در سطح حوضه، مناطق شمالی (تبریز و ارومیه) بیشترین افزایش دما و مناطق مرکزی (مراغه) کمترین افزایش دما را تجزیه خواهند کرد.

نقشه‌های توزیع مکانی تغییرات بارش بیانگر متفاوت بودن تغییرات بارش در مناطق مختلف حوضه می‌باشند. در اکثر مناطق حوضه به‌جز مناطق مرکزی (مراغه) بارش کاهش خواهد یافت. میزان کاهش بارش در مناطق شمالی حوضه به‌ویژه در ایستگاه سراب از شدت بیشتری برخوردار خواهد بود. در اکثر مناطق دارای کاهش، بارش تحت SSP5-8.5 نسبت به SSP1-2.6 کاهش بیشتری دارد.



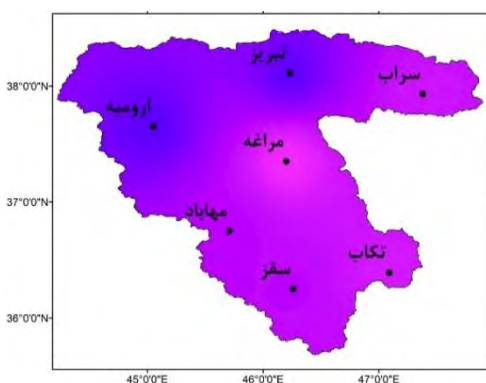
SSP1-2.6(2031-2055)

(الف)



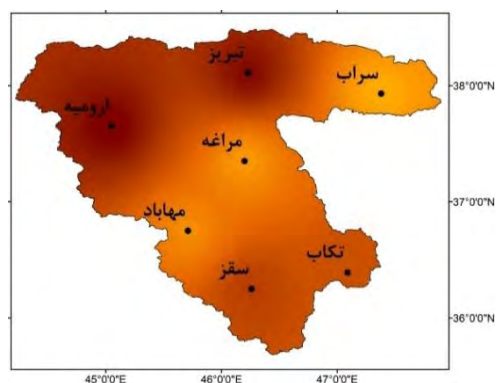
SSP1-2.6(2071-2095)

(ب)



SSP5-8.5 (2031-2055)

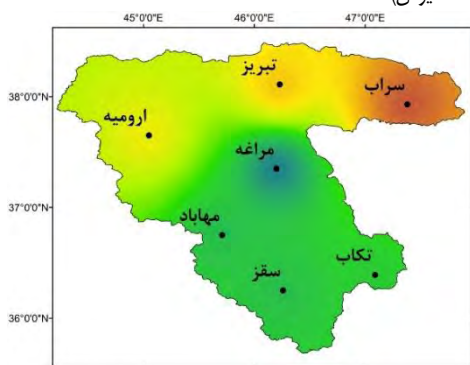
(پ)



SSP5-8.5(2071-2095)

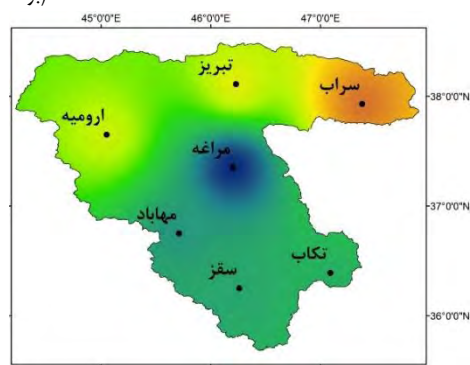
(ت)

شکل ۷. توزیع مکانی تغییرات دمای متوسط سالانه حوضه آبریز دریاچه ارومیه تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 در دوره‌های آینده نزدیک و دور (برحسب درجه سلسیوس)



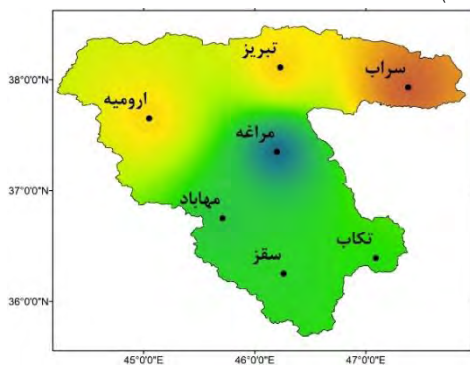
SSP1-2.6(2031-2055)

(الف)



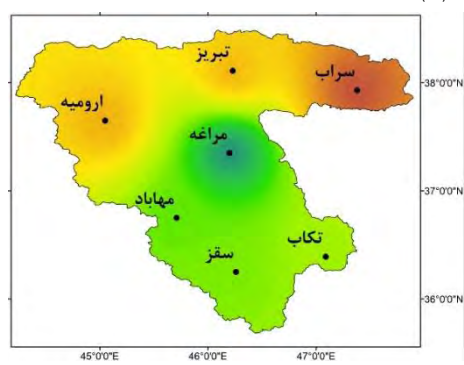
SSP1-2.6(2071-2095)

(ب)



SSP5-8.5(2031-2055)

%



SSP5-8.5(2071-2095)

شکل ۸. توزیع مکانی درصد تغییرات بارش سالانه حوضه آبریز دریاچه ارومیه بر اساس سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 در دوره‌های آینده نزدیک و دور

نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر متغیرهای اقلیمی دما و بارش آینده حوضه آبریز دریاچه ارومیه را با استفاده از مدل‌های CMIP6 مورد پیش‌نگری قرار داد. ابتدا دقت و کارایی مدل‌های GCM ی مراحل کالیبراسیون و صحت‌سنجی با استفاده از نمودارهای مقادیر ماهانه، نمودار تیلور و شاخص‌های RMSE و NRMSE مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس ارزیابی‌های انجام‌گرفته، مدل MRI-ESM2-0 برای دما و مدل INM-CM5-0 برای بارش مبتنی بر روش ریزمقیاس‌نمایی SSPLINN به‌عنوان مدل‌های مناسب جهت پیش‌نگری اقلیم آینده انتخاب شدند. سپس برای هفت ایستگاه مورد مطالعه داده‌های دمای متوسط و بارش روزانه تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSPP5-8.5 برای دوره‌های آینده نزدیک و دور تولید گردیدند. پس از تولید داده‌های دوره‌های آینده، میانگین‌های ماهانه و سالانه متغیرهای دما و بارش در سناریوهای مختلف محاسبه گردید و با مقادیر دوره پایه با استفاده از نقشه‌ها و نمودارها مورد مقایسه قرار گرفت و تغییرات اقلیم آینده نسبت به دوره پایه مشخص گردید. نتایج نشان دادند که:

- دمای متوسط ماهانه حوضه در اکثر ماه‌های سال تحت تمامی سناریوها افزایش خواهد یافت، میزان افزایش دما در شش‌ماهه دوم سال بیشتر از شش‌ماهه اول خواهد بود؛ بیشترین افزایش دما در ماه‌های سپتامبر و اکتبر و کمترین افزایش در ماه‌های فصل بهار رخ خواهد داد. تغییرات بارش در ماه‌های مختلف متفاوت خواهد بود. در ماه‌های آوریل و می (فصل بهار) و ماه‌های اکتبر و نوامبر (فصل پاییز) در تمامی سناریوها بارش حوضه کاهش خواهد یافت. بیشترین درصد کاهش بارش در فصل پاییز خواهد بود.

- دمای متوسط سالانه در تمامی سناریوها افزایش خواهد یافت. میزان افزایش دمای متوسط سالانه حوضه در آینده نزدیک در حالت‌های خوش‌بینانه و بدبینانه به ترتیب ۱/۵ و ۱/۴ درجه سلسیوس و در آینده دور ۱/۸ و ۴ درجه سلسیوس خواهد بود. بنابراین میزان افزایش دما در سناریوی بدبینانه بیشتر از سناریوی خوش‌بینانه می‌باشد. میزان بارش سالانه در تمامی سناریوها کاهش خواهد یافت، در آینده نزدیک در حالت‌های خوش‌بینانه و بدبینانه به ترتیب ۱۹/۹ و ۲۱/۶ درصد و در آینده دور در حالت‌های خوش‌بینانه و بدبینانه به ترتیب ۱۲ و ۲۸/۶ درصد کاهش خواهد یافت.

- توزیع مکانی تغییرات دمای سالانه در سطح حوضه بیان می‌کند که افزایش دما در تمامی مناطق اتفاق می‌افتد اما در برخی مناطق به‌ویژه مناطق شمالی حوضه میزان افزایش بیشتر خواهد بود و مناطق مرکزی نسبت به سایر مناطق افزایش دمای کمتری را تجربه خواهند کرد. تحت سناریوی خوش‌بینانه آینده دور گرم‌تر از آینده نزدیک نیست و حتی در برخی ایستگاه‌ها تا ۰/۲ درجه سلسیوس کاهش دما رخ خواهد داد، اما در سناریوی بدبینانه آینده دور در همه ایستگاه‌ها بسیار گرم‌تر از آینده نزدیک خواهد بود. توزیع مکانی تغییرات بارش سالانه در سطح حوضه بیانگر این است که تحت تمامی سناریوها بارش در مناطق مختلف به‌جز مراغه کاهش خواهد یافت و بیشترین کاهش در مناطق شمالی حوضه رخ خواهد داد، همچنین در هر دو دوره آینده نزدیک و دور کاهش بارش در سناریوی بدبینانه بیشتر است.

با توجه به نتایج حاصل از تحقیق حاضر، در حوضه آبریز دریاچه ارومیه طی دوره‌های آبی به‌طور کلی دما افزایش و بارش کاهش خواهد یافت. نتایج حاصل مبنی برافزایش دما همسو با اکثر مطالعات پیشین در مناطق مختلف می‌باشد (سو و همکاران (۲۰۱۶)، برین و همکاران (۲۰۲۱)، سونگ و همکاران (۲۰۲۱)، فلاح کلاکی و همکاران (۱۴۰۰) و صی محمدی و همکاران (۱۴۰۰))، همچنین نتایج حاصل مبنی بر کاهش بارش همسو با مطالعات فنگ و همکاران (۲۰۱۴)، فلاح کلاکی و همکاران (۱۴۰۰) و صی محمدی و همکاران (۱۴۰۰) می‌باشد. برخی مطالعات پیشین در رابطه با پیش‌نگری دما و بارش حوضه آبریز دریاچه ارومیه انجام‌گرفته‌اند (کریمی و نبی‌زاده (۱۳۹۷) در رابطه با دما و بارش و

زرین و داداشی (۱۳۹۹) در رابطه با دما). کریمی و نبی‌زاده (۱۳۹۷) با استفاده از مدل HadCM3 افزایش دما و کاهش بارش و زرین و داداشی (۱۳۹۹) با استفاده از مدل‌های CMIP6 افزایش دما را برای حوضه آبریز دریاچه ارومیه پیش‌بینی کرده‌اند که نتایج مطالعات مذکور مطابق با نتایج تحقیق حاضر می‌باشند و نتایج یکدیگر را مورد تأیید قرار می‌دهند.

تقدیر و تشکر

بنا به اظهار نویسنده مسئول، این مقاله حامی مالی نداشته است.

منابع

- ۱) جهانگیر، محمدحسین؛ جهان پناه، مریم و ابوالقاسمی، مهناز. (۱۳۹۹). پیش‌بینی وضعیت خشک‌سالی برای دوره‌های آتی با استفاده از مدل LARS-WG (مطالعه موردی: ایستگاه شیراز). *محیط‌زیست و مهندسی آب*، ۶ (۱)، ۶۹-۸۲.
- ۲) زرین، آذر و داداشی رودباری، عباسعلی. (۱۳۹۹). پیش‌نگری چشم‌انداز بلندمدت دمای آینده ایران مبتنی بر برون‌داد پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده فاز ششم (CMIP6). *مجله فیزیک زمین و فضا*، ۴۶ (۳)، ۵۸۳-۶۰۲.
- ۳) صی محمدی، سمیره؛ توکلی، محسن؛ زرافشانی، کیومرث؛ مهدی‌زاده، حسین و امیری، فرزاد. (۱۴۰۰). پیش‌بینی اثرات تغییرات اقلیمی بر دما و بارش با استفاده از مدل‌های گردش عمومی جو، راهکاری برای کشاورزی پایدار (مطالعه موردی: شهرستان کرمانشاه). *علوم و تکنولوژی محیط‌زیست*، ۲۳ (۶)، ۱۵-۳۱.
- ۴) فلاح کلاکی، محمد؛ شکری کوچک، وحید و رضانی اعتدالی، هادی. (۱۴۰۰). شبیه‌سازی اثرات تغییر اقلیم با استفاده از مدل‌های اقلیمی CMIP5 و CMIP6 بر رواناب با استفاده از مدل هیدرولوژیکی SWAT (مطالعه موردی: حوضه آبریز طشک-بختگان). *تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۷ (۳)، ۳۴۵-۳۵۹.
- ۵) کریمی، مصطفی و نبی‌زاده، عادل. (۱۳۹۷). ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر پارامترهای اقلیمی حوضه آبریز دریاچه ارومیه طی سال‌های ۲۰۱۱-۲۰۴۰ با استفاده از مدل LARS-WG. *فصلنامه جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۲۲ (۶۵)، ۲۶۵-۲۸۵.

References

- 1) Bağçacı, S. Ç., Yucel, I., Duzenli, E., & Yilmaz, M. T. (2021). Intercomparison of the expected change in the temperature and the precipitation retrieved from CMIP6 and CMIP5 climate projections: A Mediterranean hot spot case, Turkey. *Atmospheric Research*, 256, 105576. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105576>
- 2) Brian, A., Hamida, N., Hassen, B., Rizwan, K., Vedaste, I., Kenny, T.C., Lim, K. S., & Victor, O. (2021). Evaluation and projection of mean surface temperature using CMIP6 models over East Africa. *Journal of African Earth Sciences*, 181, 104226. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2021.104226>
- 3) Enayati, M., Bozorg-Haddad, O., Bazrafshan, J., Hejabi, S., & Chu, X. (2021). Bias correction capabilities of quantile mapping methods for rainfall and temperature variables. *Journal of Water and Climate Change*, 12(2), 401-419. <https://doi.org/10.2166/wcc.2020.261>
- 4) Feng, S., Hu, Q., Huang, W., Ho, C. H., Li, R., & Tang, Z. (2014). Projected climate regime shifts under future global warming from multi-model, multi-scenario CMIP5 simulations. *Global and Planetary Change*, 112, 41-52. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2013.11.002>
- 5) Huang, Y., Wang, F., Li, Y., & Cai, T. (2014). Multi-model ensemble simulation and projection in the climate change in the Mekong River Basin. Part I: temperature. *Environmental monitoring and assessment*, 186, 7513-7523. <https://doi.org/10.1007/s10661-014-3944-x>

- 6) IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. *Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, In press*, <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- 7) Li, Y., Yan, D., Peng, H., & Xiao, S. (2021). Evaluation of precipitation in CMIP6 over the Yangtze River Basin. *Atmospheric Research*, 253, 105406. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105406>
- 8) Liu, L. Y., Wang, X. J., Gou, X. H., Yang, M. X., & Zhang, Z. H. (2022). Projections of surface air temperature and precipitation in the 21st century in the Qilian Mountains, Northwest China, using REMO in the CORDEX. *Advances in Climate Change Research*, 13(3), 344-358. <https://doi.org/10.1016/j.accre.2022.03.003>
- 9) Maraun, D., Wetterhall, F., Ireson, A. M., Chandler, R. E., Kendon, E. J., Widmann, M., & Thiele Eich, I. (2010). Precipitation downscaling under climate change: Recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user. *Reviews of geophysics*, 48(3). <https://doi.org/10.1029/2009RG000314>
- 10) Samuel, K., Michele, L., Warburton, E., Archer van, G., Graham P.W. (2013). Impacts of climate change on water resources in southern Africa: A review study of Vernonia, Oregon, USA. *Applied Geography*, 46, 137–146.
- 11) Su, B., Huang, J., Gemmer, M., Jian, D., Tao, H., Jiang, T., & Zhao, C. (2016). Statistical downscaling of CMIP5 multi-model ensemble for projected changes of climate in the Indus River Basin. *Atmospheric Research*, 178, 138-149. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2016.03.023>
- 12) Sung, H.M., Kim, J., & Shim, S. (2021). Climate Change Projection in the Twenty-First Century Simulated by NIMS-KMA CMIP6 Model Based on New GHGs Concentration Pathways. *Asia-Pacific J Atmos Sci*, 57, 851–862.
- 13) Villani, V., Rianna, G., Mercogliano, P. & Zollo, A. L., (2015), Statistical approaches versus weather generator to downscale RCM outputs to slope scale for stability assessment: a comparison of performances. *Electron. J. Geotech. Eng.* 20 (4), 1495–1515. <https://doi.org/10.4090/juee.2014.v8n2.142-154>
- 14) Wilks D.S. (2011). Statistical methods in the atmospheric sciences (Vol. 100), *Academic Press*.
- 15) Wood, A.W., Leung, L. R. Sridhar, V. & Lettenmaier, D. P. (2004). Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs. *Climatic Change*, 62(1-3), 189–216. <https://doi.org/10.1023/B:CLIM.0000013685.99609.9e>
- 16) Zhu, H., Jiang, Z., & Li, L. (2021). Projection of climate extremes in China, an incremental exercise from CMIP5 to CMIP6. *Science Bulletin*, 66(24), 2528-2537. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2021.07.026>
- 17) Fallah Kalaki, M., Shokri Kuchak, V., & Ramezani Etedali, H. (2021). Simulating the Effects of Climate Change on Runoff Using the CMIP5 and CMIP6 Climate Models by SWAT Hydrological Model (Case Study: Tashk-Bakhtegan Basin). *Iran-Water Resources Research*, 17(3), 345-359. doi: 20.1001.1.17352347.1400.17.3.20.5 [In Persian]
- 18) Jahangir, M. H., Jahanpanah, M., & Abolghasemi, M. (2020). Drought Forecasting for Future Periods Using LARS-WG Model (Case Study: Shiraz Station). *Environment and Water Engineering*, 6(1), 69-82. doi: 10.22034/jewe.2020.215515.1343 [In Persian]
- 19) Karimi Ahmadabad, M., & Nabizadeh, A. (2018). assessment of climate change impacts on climate parameters of Urmia Lake basin during 2011-2040 years by using LARS-WG model. *Geography and Planning*, 22(65), 265-285 [In Persian]

- 20) Seymohammadi, S., Tavakoli, M., Zarafshani, K., Mahdizadeh, H., & Amiri, F. (2021). Prediction Impact of Climate Change on the Temperature & Precipitation by General Circulation Model, a Strategy for Sustainable Agriculture: (Case of Kermanshah Township). *Journal of Environmental Science and Technology*, 23(6), 15-31.
doi: 10.30495/jest.2018.22114.3137 [In Persian]
- 21) Zarrin, A., & Dadashi Roudbari, A. A. (2020). Projection the Long-Term Outlook Iran Future Temperature Based on the Output of the coupled model intercomparison project phase 6 (CMIP6). *Journal of the Earth and Space Physics*, 46(3), 583-602.
doi: 10.22059/jesphys.2020.304870.1007226 [In Persian]