



Forecasting and Trending of Precipitation in Selected Cities of the Northern Half of Iran Using ACCESS and CNRM Models

Roghayeh Maleki Meresht ¹, Bromand Salahi ^{2*}, Mahnaz Saber ³

^{1& 3} Postdoctoral Researcher in Climatology, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

²Professor in Climatology, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 16 April 2025

Revised: 16 June 2025

Accepted: 10 July 2025

Available Online: 10 July 2025

Keywords:

Forecasting

Precipitation

Northern Half of Iran

ACCESS

CNRM

ABSTRACT

Climate change has led to alterations in the temporal and spatial distribution of precipitation across the globe. The present study aimed to identify trends and project future precipitation in selected cities of northern Iran. To achieve this goal, the 30-year precipitation trend (1994–2023) for each city was first examined using the Mann-Kendall test and Sen's slope estimator. In the second phase, by employing the LARS-WG8 weather generator, the latest version of this software, precipitation in the study area was projected for the next 20 years under two scenarios: SSP2-4.5 and SSP5-8.5, using the ACCESS-ESM1-5 and CNRM-CM6-1 models. The outputs of both models were then evaluated and compared using validation indices (R^2 , MAPE, and RMSE) to select the most suitable model. Trend analysis results indicated that over the past 30 years (1994-2023), the precipitation pattern in all stations in the region has changed and has had a significant decreasing trend at the 99% confidence level. This decrease has been greater in the cities of Qazvin, Ardabil, and Zanzan and less in Rasht and Gorgan. According to the prediction made based on the scenarios of the two models ACCESS-ESM1-5 and CNRM-CM6, over the next 20 years (2040-2060), the entire study area will face a decrease in precipitation in most months of the year. The decrease in precipitation in the northwest will be more than 60% in some months of the year. Also, some cities will experience an increase in precipitation of the warm seasons. This increase will be more evident in cities with low precipitation such as Semnan. Finally, the comparison of the total annual precipitation of the observed and forecast periods confirmed a significant decrease in precipitation in the entire study area compared to the base period. The research findings indicate temporal and spatial anomalies in precipitation, confirm the effects of climate change on the region, and emphasize the need to adopt efficient management policies to deal with, optimize water resource consumption, and develop methods for adapting to climate change.

* Corresponding author: Dr. Bromand Salahi

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

How to cite this article: Maleki Meresht, R., Salahi, B., & Saber, M. (2025). Forecasting and Trending of Precipitation in Selected Cities of the Northern Half of Iran Using ACCESS and CNRM Models. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, ?(?), ?-?. <https://doi.org/10.22067/geoeh.2025.93054.1565>



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Climate change has caused changes in the temporal and spatial distribution of precipitation and its intensity throughout the world. Precipitation description and modeling are among the challenging issues in climate research and indicate its complex and irregular temporal and spatial structure. In this regard, several modeling methods have been developed to deal with this complexity (Sánchez et al, 2011). Reducing the number of rainy days and increasing the intensity of precipitation during limited days can lead to an increase in the probability of flooding in areas such as coastal cities of the Caspian Sea, soil erosion and reduced water infiltration into groundwater resources.

Methods and Material

In the present study, the trending and forecasting of precipitation in selected cities in northern Iran (Ardabil, Tabriz, Bojnourd, Mashhad, Gorgan, Semnan, Zanjan, Tehran, Urmia, Gorgan, Rasht, Sanandaj) was investigated. In order to trend the total annual precipitation, the data of the last 30 years (1994-2023) of the precipitation of the selected cities were received from the Iranian Meteorological Organization and the age slope test, which is a non-parametric method for estimating the slope of the regression line in data trend analysis, was used. This test includes the following steps:

$$Qi = \frac{X_t - X_s}{t - s}, i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

Where x_t and x_s are the data at times $t > s$ and $N = (n(n-1))/2$, respectively.

$$C\alpha = Z_{1-\frac{\alpha}{2}} = \sqrt{\text{Var}(A)} \quad (2)$$

In the above equation, Z is the quantile of the standard normal distribution (Salmi et al, 2002).

$$\begin{aligned} M1 &= \frac{N - C\alpha}{2} \\ M2 &= \frac{N + C\alpha}{2} \end{aligned} \quad (3)$$

Where N is the number of slopes calculated in section a.

To determine the significance of the trend, the Mann-Kendall test was used. In this test, the null hypothesis implies randomness and the absence of a trend. In this method, first the difference between each observation and all subsequent observations is calculated and the parameter S is obtained based on equation (4):

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (4)$$

In the above equation n is the number of observations in the series X_j and X_k are the k th and j th data of the series, respectively.

Next step, the variance s was calculated using equation (5).

$$\text{var}(s) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (5)$$

Where n is the number of sequences in which at least one data is repeated. Finally, the z statistic was obtained based on equation (6).

$$S = \frac{s-1}{\sqrt{\text{var}(s)}} \quad (6)$$

Assuming two ranges of the trend test, the null hypothesis is accepted if the following condition (relation 7) holds:

$$|Z| < Z_{\alpha/2} \quad (7)$$

In the above relationship, Z is the significance level and Z_{α} is the standard normal distribution statistic at the significance level. In the present study, this test has been used for the 99% and 95% confidence levels, and if the Z statistic is positive, the trend of the data series is upward and if it is negative, the trend is downward.

In order to examine the confidence limits, in equation (1), which is arranged from small to large, $M1$ th and $M2+1$ th slopes are obtained. If the number zero is in the range between the two obtained slopes, the null hypothesis is confirmed and the time series is without trend (ghorbani et al, 2012). In the next part of the research, in order to predict future precipitation, first the base period data during the years (1980-2010) were simulated in the LARS-WG8 microcomputer. Then, the precipitation forecast for the next 20 years (years 2041 to 2060) was carried out using the two ACCESS-ESM1-5 and CNRM-CM6-1 models under the scenarios (SSP2-4.5) and (SSP5-8.5). Finally, to examine the accuracy of the two mentioned models in predicting future precipitation of the stations, three error indicators were used; (R^2), (RMSE) and (MAPE) were used (relations 8 to 10):

$$R^2 = \frac{\sum_{t=1}^n A_t F_t}{\sqrt{\sum_{t=1}^n A_t^2 \sum_{t=1}^n F_t^2}} \quad (8)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^N (A_t - F_t)^2}{n}} \quad (9)$$

$$\text{MAPE} = \frac{\sum_{t=1}^n \left| \frac{A_t - F_t}{A_t} \right|}{n} \times 100 \quad (10)$$

In the above equations, A_t is the observational data, F_t is the simulated data and N is the number of data.

Results and Discussion

According to the results of trend analysis, during the statistical period under study (1994-2023) in all stations, the Q statistic (Sen's slope estimator) and Z (Mann-Kendall test) were negative and the total annual precipitation in all 12 cities had a decreasing trend. The highest Q was in Qazvin -81.8, Ardabil -63.8 and Zanzan -45.8, and the highest Z values were in Sanandaj, Zanzan and Qazvin cities -4.62, -4.57 and -4.42, respectively, and the lowest value was in Rasht with -2.98. Was negative and the total annual precipitation in all 12 cities had a decreasing trend. The highest Z values were related to the Sanandaj, Zanzan and Qazvin cities and were 4.62, -4.57, -4.42 respectively, and the lowest value was related to the Rasht station with the figure of -2.98; however, considering that the Z score in all cities is less than -2.58, therefore, the existence of a significant downward trend in precipitation in the last 30 years is accepted in the entire study area at a confidence level of 99%. In the second part of the study, after evaluating the accuracy of the LARS-WG micro-rotor software, in simulating the precipitation of the base period (1980-2010), two ACCESS-ESM1-5 and CNRM-CM6-1 models were used to predict the future precipitation of the cities under the (SSP2-4.5) and (SSP5-8.5) scenarios. According to the results, over the next 20 years, Urmia city will experience a decrease in precipitation in all months of the year under both model scenarios. The cities

of Tehran, Tabriz, Ardabil, Gorgan, and Rasht will experience a significant decrease in precipitation in most months of the year under both model scenarios, and a very slight increase in precipitation (less than 20 percent) in some months under one of the scenarios. The cities of Zanzan, Sanandaj, Qazvin, Mashhad, Bojnourd, and Semnan will experience a 50 percent increase in precipitation in at least one of the final months of spring and summer under one of the scenarios. Overall, the predictions made based on the scenarios of both ACCESS-ESM1-5 and CNRM-CM6-1 models show that all 12 cities studied will witness a significant decrease in precipitation compared to the long-term average in most months of the year over the next 20 years.

Finally, the accuracy of the two models studied in predicting precipitation was examined based on three error indicators: R2, MAPE and RMSE. According to the results, although the error rate was relatively high in both models, each of the cities had the lowest error and highest accuracy in one model, which was considered as the selected model for that station. Therefore, the CNRM model was selected for the four cities of Sanandaj, Ardabil, Tehran, and Gorgan, and the ACCESS model was selected for the other cities.

Conclusion

The aim of the present study was forecasting and trending precipitation in selected cities in northern half of Iran using GCMs models to reveal the extent of the impact of precipitation in different climatic regions of this part of the country on climate change. For this purpose, the precipitation of the last 30 years (1994-2023) of selected cities in the northern half of Iran was trended based on the Sen's slope estimator and Mann-Kendall tests, and its possible changes over the next 20 years (2041-2060) were predicted using the two ACCESS and CNRM models. Based on the results of the two Mann-Kendall tests and Sen's slope estimator, over the past 30 years (1994-2023), the precipitation pattern in all cities in the region has changed and has had a significant decreasing trend at the 99% confidence level. The decreasing trend has been greater in the cities of Qazvin, Ardabil, and Zanzan, which are considered mountainous cities in the northwest, and less in Rasht and Gorgan, which are rainy and humid coastal areas. According to the predictions made based on the scenarios of the two ACCESS and CNRM models, the precipitation patterns in the study area will undergo significant changes. Over the next 20 years (2040-2060), the entire study area will face a decrease in precipitation in most months of the year. The decrease in precipitation in cities located in the northwest will be more than 60% in some months of the warm season. Also, some cities in the region will experience an increase in precipitation in the warm months of the year (late spring to late winter), at least based on the prediction of one of the two model scenarios, which will be more evident in cities with low precipitation such as Semnan. According to the explanations provided and considering that the highest percentage of increase and decrease in precipitation in the entire region is related to the warm months of the year. Therefore, it is expected that during the forecast period (2040-2060) the precipitation in the warm seasons will undergo more changes and fluctuations. Finally, a comparison of the total annual precipitation of the observation period and the forecast based on the scenarios of both models confirmed a significant decrease in precipitation in all 12 cities studied compared to the base period, with the highest predicted decrease in precipitation compared to the observation period in Rasht and the lowest in Semnan. The aforementioned results indicate temporal and spatial anomalies in the precipitation of the region.



روند یابی و پیش‌نمایی بارش در شهرهای منتخب شمال ایران با بهره‌گیری از مدل‌های CNRM و ACCESS

رقیه ملکی مرشت^۱، برومند صلاحی^{۲*}، مهناز صابر^۳

^۱ پژوهشگر پسا دکتری آب و هواشناسی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
^۲ استاد آب و هواشناسی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۷ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۱۹	تغییر اقلیم، موجب تغییر در توزیع زمانی و مکانی بارش‌ها در سراسر جهان شده است. مطالعه‌ی حاضر، باهدف پیش‌نگری و روند یابی بارش شهرهای منتخب نیمه شمالی ایران انجام گرفت. در راستای هدف پژوهش، نخست، روند بارش ۳۰ ساله (۱۹۹۴-۲۰۲۳) هریک از شهرها بر اساس آزمون من-کندال و تخمین گر Sen بررسی گردید. در مرحله دوم با بهره‌گیری از ریز گردان LARS-WG8 که به‌روزترین نسخه‌ی این نرم‌افزار است، بارش منطقه مورد مطالعه تحت سناریوهای (SSP2-4.5) و (SSP5-8.5)، دو مدل ACCESS-ESM1-5 و CNRM-CM6-1 برای ۲۰ سال آینده (۲۰۴۱-۲۰۶۰) پیش‌نگری شد. سپس خروجی‌های دو مدل با استفاده از شاخص‌های اعتبار سنجی R2، RMSE، MAPE جهت انتخاب مناسب‌ترین مدل، بررسی و مقایسه گردید. نتایج حاصل از آزمون شیب سن و من-کندال، نشان داد که طی ۳۰ سال اخیر (۱۹۹۴-۲۰۲۳)، الگوی بارش در همه‌ی ایستگاه‌های منطقه، دستخوش تغییر شده و روند کاهشی معنادار در سطح اطمینان ۹۹ درصد داشته است. این کاهش در شهرهای قزوین، اردبیل، زنجان بیشتر و در رشت و گرگان کمتر بوده است. طبق پیش‌نگری انجام‌شده بر اساس سناریوهای دو مدل ACCESS-ESM1-5 و CNRM-CM6-1 طی ۲۰ سال آتی (۲۰۴۰-۲۰۶۰) کل منطقه مورد مطالعه در اغلب ماه‌های سال با کاهش بارش مواجه خواهند شد. میزان کاهش بارندگی در شمال غرب در برخی ماه‌های سال بیش از ۶۰٪ خواهد بود. همچنین برخی شهرها در ماه‌های فصول گرم سال، افزایش بارش تجربه خواهند کرد. این افزایش در شهرهای کم بارش همچون سمنان، مشهد و تهران خواهد بود. در نهایت مقایسه مجموع بارش سالانه دوره مشاهداتی و پیش‌نگری شده، کاهش محسوس بارش را در کل منطقه مورد مطالعه نسبت به دوره پایه تأیید نمود. یافته‌های پژوهش، حاکی از ناهنجاری‌ها زمانی و مکانی بارش بوده، آثار تغییر اقلیم بر منطقه را تأیید می‌نماید و بر ضرورت اتخاذ سیاست‌های مدیریتی کارآمد جهت بهینه‌سازی مصرف منابع آب و توسعه روش‌های سازگاری با تغییرات اقلیمی تأکید دارد.

مقدمه

تغییر اقلیم، به نوسانات کلی و وسیع آب و هوای یک منطقه گفته می‌شود و گرمایش کره زمین، جزء آثار تغییر اقلیم محسوب می‌شود (Hajarpour, Yousefi & Kamkar, 2014). این پدیده، به همراه افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از فعالیت انسان، سبب افزایش دمای کره زمین به میزان ۱ درجه سانتی‌گراد شده است (Bekele, Alamirew, Kebede, Zeleke & Melesse, 2019). تغییر اقلیم، تأثیر قابل توجهی بر پارامترهای اقلیمی داشته و نهایتاً سایر اجزا یک سیستم همچون؛ منابع آب‌و خاک را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد (Sarabi, Dastorani & Zarrin, 2020). همچنین، موجب تغییر در توزیع زمانی و مکانی بارش‌ها و شدت آن‌ها در سراسر جهان شده است. توصیف بارش و مدل‌سازی آن، جزء مسائل چالش‌برانگیز پژوهش‌های اقلیمی بوده و حاکی از ساختار پیچیده و نامنظم زمانی و مکانی آن است. در این راستا، چندین روش مدل‌سازی به‌منظور مقابله با این پیچیدگی ابداع گردیده است (Sánchez et al., 2011). یکی از روش‌های مناسب جهت واکاوی آثار تغییر اقلیمی بر الگوهای بارش، بهره‌گیری از مدل‌های گردش عمومی (GCM) است. در این راستا، پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده گزارش ششم هیأت‌های بین دولتی تغییر اقلیم (CMIP6)، از سناریوهای جدید SSP که با سناریوهای RCP پروژه گزارش پنجم IPCC ترکیب شده است استفاده می‌کند (Eyring et al., 2016). سناریوهای جدید اضافه شده در CMIP6 شامل SSP1-1.9، SSP4-3.4، SSP7-7.0 هستند و چهار سناریوی SSP2-4.5، SSP1-2.6، SSP5-8.5، SSP4-6.0 نیز به‌روز شده سناریوهای RCP2.6، RCP4.5 و RCP8.5 موجود در CMIP5 می‌باشند (Gupta, Singh & Jain, 2020). مدل‌های آب و هوایی فعلی قوی‌تر از مجموعه‌های قبلی CMIP هستند و در بازتولید الگوهای بزرگ‌مقیاس متغیرهای آب و هوایی، پیشرفت‌های مؤثری داشته‌اند (Chen et al., 2020).

در میان متغیرهای اقلیمی، بارش به دلیل اهمیتی که در مدیریت پایدار آب، کشاورزی و اکولوژی دارد، بیشتر مورد مطالعه قرار گرفته است (Diress & Bedada, 2021). نوسانات شدید بارش، پراکنش نامناسب زمانی و مکانی نزولات جوی، افزایش تبخیر و تفرق، وقوع خشکسالی و سیل‌های مکرر، از اثرات تغییر در چرخه آب است تغییر در چرخه آب. مهم‌ترین پاسخ زمین به گرمایش جهانی است (Pachauri et al., 2014). کاهش تعداد روزهای بارانی و افزایش شدت بارش طی روزهای محدود، می‌تواند به افزایش احتمال وقوع سیلاب در مناطقی همچون؛ شهرهای ساحلی دریای خزر، فرسایش خاک و کاهش نفوذ آب به منابع زیرزمینی منجر شود. کاهش بارش‌های زمستانی در مناطق کوهستانی البرز، ارتفاعات شمال شرق و شمال غرب کشور و تغییر زمان بارندگی‌ها در این مناطق سبب کاهش روان آب‌ها و ذخایر آبی در فصول گرم، اختلال در فصل زراعی، کاهش محصولات کشاورزی، آسیب به اکوسیستم‌های طبیعی همچون؛ جنگل‌ها، مراتع و تالاب‌ها، کاهش تنوع زیستی و حتی نابودی زیستگاه‌های شمال ایران می‌شود. با توجه به این‌که بارش، جزء مهم‌ترین منابع تأمین آب برای مصارف شرب، کشاورزی و صنعت است، بررسی تغییرات و پیش‌بینی الگوهای این پارامتر مهم اقلیمی در نیمه شمالی ایران، امکان برنامه‌ریزی جهت مدیریت منابع آب در این منطقه را فراهم می‌سازد. این پیش‌بینی‌ها همچنین به کشاورزان کمک می‌کند تا با انتخاب زمان و روش‌های مناسب کاشت و برداشت، با خسارات ناشی از بارش‌های نامنظم یا ناکافی مقابله کنند و سیاست‌گذاران را یاری می‌کند تا در راستای مقابله با پیامدهای تغییر اقلیم در منطقه مورد مطالعه، برنامه‌های جامع‌تری تنظیم نمایند.

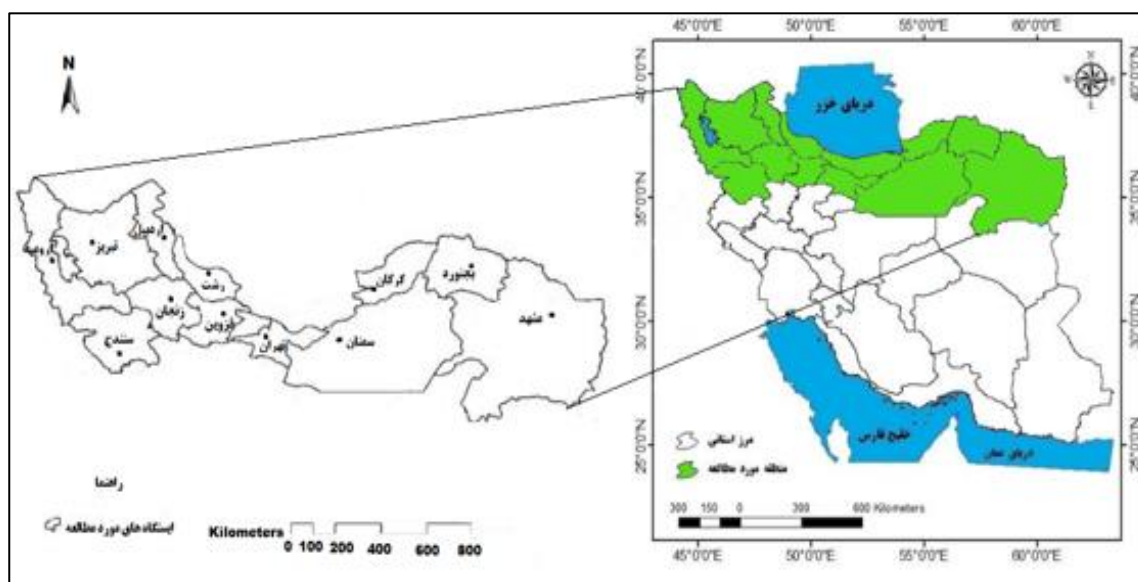
با توجه به اهمیت آثار تغییر اقلیم بر بارش و پیامدهای ناشی از آن، مطالعات زیادی با روش‌های مختلف در داخل و خارج از کشور در این زمینه انجام گرفته است: شفر (Shiferaw, Gebremedhin, Gebretsadkan & Zenebe, 2018) به شبیه‌سازی شرایط اقلیمی آینده در شمال اتیوپی پرداختند. یافته‌های آنان، عدم تغییر قابل توجه بارش را نشان داده است. نیلوار و وایکار (Nilawar & Waikar, 2019) تغییرات دما و بارش هند را با دو سناریوی RCP بررسی نمودند. طبق یافته‌های آنان میزان دما و بارش این منطقه تحت هر دو سناریو افزایش خواهد یافت. فونج و همکاران (Phuong, Luan, Dong & Khanh, 2020) به پیش‌بینی آثار تغییر اقلیم بر داده‌های اقلیمی حوزه رودخانه ووجیا سوبون در کشور ویتنام پرداختند و به این نتیجه دست یافته‌اند که میزان بارش تا سال

۲۰۹۹ تا ۱۷/۶۸٪ کاهش پیدا می‌کند. نگوما و همکاران (Ngoma et al., 2021) به شبیه‌سازی بارش اوگاندا با مدل‌های CMIP6 پرداختند. آنان برای این کار از ۱۶ مدل GCM استفاده کردند. طبق پیش‌بینی انجام شده با اکثر مدل‌ها، بارش طی ماه‌های سپتامبر تا نوامبر افزایش خواهد یافت. مسگری و همکاران (Mesgari, Hosseini, Hemmesy, Houshyar & Partoo, 2022) به پیش‌بینی بارش منطقه‌ی MENAP بر اساس سناریوهای SSP پرداختند و یافته‌های آنان نشان داد که میزان بارش به‌جز مناطقی مانند: دریای سیاه، مدیترانه، نواحی ساحلی دریای سرخ و مناطق کوهستانی و مرتفع، در سایر نقاط محدوده مورد مطالعه آنان عمدتاً کاهش خواهد یافت که بیشترین میزان کاهش بارش در کشورهای خاورمیانه رخ خواهد داد. کامروزم و همکاران (Kamruzzaman et al., 2023) تحت سناریوهای SSP مدل‌های GCM به پیش‌بینی بارش، دمای حداکثر و حداقل بنگلادش پرداختند. یافته‌های آنان نشان داده است که دما و بارش دوره‌ی آتی در این منطقه روند افزایشی خواهد داشت. مو و همکاران (Mo et al., 2023) روند خشک‌سالی حوضه رودخانه چنگبی تحت سناریوهای SSP مدل‌های GCM را بررسی نمودند. نتایج پژوهش آنان حاکی از افزایش بارش در دوره‌های آتی بود. دسترنج و رستمی (Dastranj & Rostami, 2020) به ارزیابی و پیش‌بینی تغییرات اقلیم در دهه‌های آینده در ایستگاه‌های بابلسر، گرگان، رامسر، رشت، قزوین، تهران و زنجان با استفاده از مدل‌های GCMs پرداختند. طبق نتایج پژوهش آنان دمای حداکثر، حداقل و میانگین طی دهه‌های آتی نسبت به گذشته افزایش خواهد یافت اما بارش در دوره ۲۰۲۰-۲۰۴۹ و ۲۰۹۹-۲۰۷۰ نسبت به دوره مشاهداتی روند افزایشی خواهد داشت اما در دوره ۲۰۷۰-۲۰۹۹ نسبت به دوره ۲۰۲۰-۲۰۴۹ روند بارش کاهشی خواهد بود. کونانی و همکاران (Kounani, Ildoromi, Zenivand & Nouri, 2021) جهت ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر رواناب حوضه آبریز رحیم‌آباد لرستان، از مدل HadCEM3 و دو ریز گردان LARS-WG و SDSM استفاده کرده‌اند. نتایج هر دو مدل، حاکی از افزایش دما و کاهش بارش در منطقه مورد مطالعه بوده است. محمدی و همکاران (Mohammadi, Khalili & Mohammadi, 2022) به پیش‌نگری تغییرات دما و بارش با استفاده از LARS-WG در زاگرس جنوبی پرداختند. نتایج پژوهش آنان حاکی از روند افزایشی دما و روند کاهشی بارش بوده است. حشمتی و رمضانی (Heshmati & Ramezani Etedali, 2021) تغییر اقلیم آتی کرمانشاه را بر اساس مدل LARS-WG و سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 پیش‌بینی کردند. آنان ضمن تأیید عملکرد مناسب مدل LARS-WG، افزایش دمای حداکثر، دمای حداقل و تغییر الگوی بارش آینده را در منطقه پیش‌بینی نموده‌اند. انصاری و همکاران (Ansari, 2022) به بررسی تغییرات دما و بارش در حوضه‌های آبریز ایران طی سال‌های (۲۰۳۹-۲۰۲۰) بر اساس خروجی مدل CMIP6 و تحت سناریوهای SSP پرداختند. طبق یافته‌های آنان، نواحی غربی ایران بیشترین کاهش بارش را طی ۲۰ سال آتی تجربه خواهند کرد. رزمخواه و همکاران (Razmkhah, Masoudi, Rostami Ravari & Fararouie, 2023) آثار تغییر اقلیم در ایستگاه آواده را با بهره‌گیری از مدل LARS-WG ارزیابی نمودند. طبق یافته‌های آنان، بارش در این منطقه افزایش خواهد یافت.

بررسی یافته‌های پژوهشگران نشان می‌دهد که در نقاط مختلف جهان، الگوها و روندهای متنوعی برای بارش ارائه شده است که این امر، عدم قطعیت در رابطه با آثار تغییر اقلیم را تشدید نموده و لزوم مطالعه حوزه‌ای و منطقه‌ای آثار تغییر اقلیم بر پارامترهای آب و هوایی را تقویت می‌نماید. با توجه به این که در اغلب مطالعات انجام شده، پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی برای آینده دور و در محدوده کوچک (به وسعت یک شهر یا استان) صورت گرفته که این امر احتمال خطای پیش‌بینی را افزایش می‌دهد، لذا در پژوهش حاضر سعی شد تا پیش‌بینی برای آینده نزدیک و برای منطقه‌ای وسیع انجام شود تا امکان ارائه نقشه پراکندگی بارش آینده و مقایسه آن با بارش گذشته فراهم گردد.

منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در این پژوهش، مراکز استان‌های نیمه شمالی ایران است که بالاتر از ۳۵ درجه عرض جغرافیایی واقع شده‌اند. استان‌های نیمه شمالی ایران به جهت داشتن موقعیت جغرافیایی خاص، توپوگرافی منحصربه‌فرد، وجود کوه‌ها و قله مرتفع نظیر البرز، سبلان و سهند، وجود دریاچه وسیع خزر و سایر دریاچه‌های داخلی، دارای تنوع اقلیمی فراوان می‌باشد. در شکل ۱ نقشه محدوده مورد مطالعه ارائه شده است.



شکل ۱- نقشه محدوده مورد مطالعه

Fig.1. Map of the study area

مواد و روش‌ها

در پژوهش حاضر، به روند یابی و پیش‌نمایی بارش شهرهای منتخب نیمه شمالی ایران (اردبیل، تبریز، بجنورد، مشهد، گرگان، سمنان، زنجان، تهران، ارومیه، گرگان، رشت، سنندج)، با بهره‌گیری از مدل‌های ACCESS و CNRM پرداخته شد. به‌منظور روند یابی مجموع بارش سالانه، داده‌های دوره‌ی آماری ۳۰ سال اخیر (۱۹۹۴-۲۰۲۳) بارش ایستگاه‌های منتخب، از سازمان هواشناسی کشور دریافت و از آزمون‌های من-کندال و شیب سن که جزء روش‌های نا پارامتریک هستند استفاده شد. چراکه در تعیین معناداری روند، زمانی که سری زمانی توزیع نرمال ندارد، به‌منظور تأیید صحت نتایج، بهتر است، از آزمون‌های نا پارامتری استفاده شود. جهت برآورد شیب واقعی روند در یک سری زمانی، استفاده از روش نا پارامتریک سنس^۱ می‌تواند یک روش مناسب باشد. این روش از تحلیل تفاوت بین مشاهدات یک سری زمانی بهره می‌گیرد و در مواقعی که داده‌های گم‌شده وجود دارد یا توزیع داده‌ها نرمال نیست، به‌راحتی قابل استفاده است (Serrano, Mateos & Garcia, 1999). اساس برآوردگر شیب سن، بر محاسبه‌ی یک شیب میانه برای سری زمانی و قضاوت نمودن در مورد معناداری شیب حاصل در سطوح اعتماد مختلف می‌باشد (Maleki, Solaimame, Jaedaei & Shater, 2012).

این آزمون شامل مراحل زیر است:

مرحله اول: محاسبه شیب بین هر جفت داده (رابطه ۱).

$$Q_i = \frac{X_t - X_s}{t-s}, i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

که X_t و X_s به ترتیب داده در زمان‌های $t > s$ و $N = \frac{n(n-1)}{2}$ می‌باشد. با اعمال این رابطه برای هر دو جفت داده، یک سری زمانی از شیب‌های محاسبه شده به دست خواهد آمد که از محاسبه میانه این سری زمانی، برآورد شیب سن مربوط به خط روند، حاصل می‌شود. مقدار مثبت این شیب صعودی بودن روند و مقدار منفی آن نزولی بودن روند را نشان می‌دهد. مرحله دوم: محاسبه‌ی پارامتر $C \alpha$ برای سطح اطمینان موردنظر (رابطه ۲).

$$C \alpha = Z_{1-\frac{\alpha}{2}} = \sqrt{\text{Var}(A)} \quad (2)$$

در رابطه‌ی فوق، Z چندک توزیع نرمال استاندارد می‌باشد (Salmi, 2002). مرحله سوم: محاسبه حدود اطمینان بالا و پایین با ضریب $(1-\alpha)$ می‌باشد که ابتدا مقادیر $M1$ و $M2$ با رابطه (۳) محاسبه می‌شود:

$$M1 = \frac{N-C\alpha}{2} \quad M2 = \frac{N+C\alpha}{2} \quad (3)$$

که N تعداد شیب‌های محاسبه شده در بند الف است. مرحله چهارم: به‌منظور بررسی حدود اطمینان، در رابطه (۱) که از کوچک به بزرگ مرتب می‌گردد، $M1$ امین و $M2 + 1$ امین شیب به دست می‌آید. در صورتی که عدد صفر در دامنه بین دو شیب به‌دست‌آمده قرار گیرد، فرض صفر تأیید و سری زمانی بدون روند می‌باشد (Ghorbani, Vali & Zarepour, 2019).

به منظور تعیین معناداری روند، از آزمون من- کندال بهره گرفته شد. در این آزمون، فرض صفر، دلالت بر تصادفی بودن و نبود روند دارد. در این روش، نخست اختلاف بین هر مشاهده با تمامی مشاهدات بعد از آن محاسبه می‌گردد و پارامتر S بر اساس رابطه (۴) به دست می‌آید:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (4)$$

در رابطه فوق n تعداد مشاهدات سری x_k و x_j به ترتیب داده‌های k ام و j ام سری هستند. در گام بعدی، واریانس s با رابطه (۵) محاسبه شد.

$$\text{var}(s) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (5)$$

که n تعداد دنباله‌هایی است که در آن‌ها دست‌کم یک داده تکراری است. در نهایت آماره Z بر اساس رابطه (۶) حاصل گردید.

$$S = \frac{s-1}{\sqrt{\text{var}(s)}} \quad (6)$$

با فرض دو دامنه‌ی آزمون روند، فرض صفر در صورتی پذیرفته می‌شود که شرط زیر (رابطه ۷) برقرار باشد:

$$|Z| < Z_{\alpha/2} \quad (7)$$

در رابطه فوق، Z سطح معناداری و Z_{α} آماره توزیع نرمال استاندارد در سطح معناداری است. در پژوهش حاضر از این آزمون برای سطح اعتماد ۹۹٪ و ۹۵٪ بهره گرفته شده است که در صورت مثبت بودن آماره Z ، روند سری داده‌ها صعودی و در صورت منفی بودن آن، روند نزولی می‌باشد (Kendall, 1962).

در بخش بعدی پژوهش، جهت پیش‌نگری بارش آینده، ابتدا داده‌های دوره پایه طی سال‌های (۱۹۸۰-۲۰۱۰) در ریز گردان LARS-WG8، شبیه‌سازی شد. (نسخه ۸ نرم‌افزار LARS-WG به‌عنوان جدیدترین نسخه‌ی این نرم‌افزار، به داده‌های گزارش ششم (CMIP6) استناد می‌کند و مشکلات و محدودیت‌های موجود در نسخه‌های قبلی را ندارد و ۱۵ مدل از سری مدل‌های CMIP6 را شامل می‌شود). بعد از شبیه‌سازی بارش دوره پایه، پیش‌بینی بارش ۲۰ سال آتی (سال‌های ۲۰۴۱ تا ۲۰۶۰) با بهره‌گیری از دو مدل ACCESS-ESM1-5 و CNRM-CM6-1 تحت سناریوهای (SSP2-4.5) و (SSP5-8.5) انجام گرفت. در جدول ۱، مشخصات مدل‌های استفاده‌شده در این پژوهش ارائه گردیده است.

جدول ۱- مشخصات مدل‌های GCM مورد استفاده در پژوهش (Shahinejad, Yonesi, Kakavand & Yousefi Sohzabi, 2023)

Table 1- Specifications of GCM models used in the research		
مدل Model	مؤسسه یا کشور Institution or Country	رزولوشن Resolution
ACCESS-ESM1-5	Australia	1.875° × 1.25°, L38
CNRM-CM6-1	France	1.4° × 1.4°, L31

LARS-WG جزء مولدهایی است که از توزیع نیمه تجربی استفاده می‌کند و نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهد. این مولد برای متغیرهای دمای حداقل و دمای حداکثر روزانه، بارش روزانه و ساعات آفتابی روزانه از توزیع نیمه تجربی بهره می‌گیرد (رابطه ۸).

$$EMP = \{a_0, a_i, h_i, \dots, i = 0, 1, 2, \dots, 10\} \quad (8)$$

که در آن EMP^1 هیستوگرامی با ۱۰ بازه با شدت‌های مختلف بارش است (رابطه ۹).

$$[a - 1, a_i] \quad a_i - 1 < a_i \quad (9)$$

این توزیع نیاز به ۲۱ پارامتر دارد و بر نسخه‌های پیشین برتری دارد. چراکه در نسخه‌های قبلی، سری خشک و تر با تعداد پارامترهای کمتری نشان داده می‌شد (Razmkhah et al., 2023).

در نهایت جهت بررسی دقت دو مدل ACCESS-ESM1-5 و CNRM-CM6-1 در پیش‌بینی بارش آینده ایستگاه‌ها، از سه شاخص خطا سنجی؛ ضریب تبیین (R^2)، ریشه میانگین مربع خطا (RMSE) و میانگین درصد خطای مطلق (MAPE) استفاده شد. شاخص‌های مذکور در روابط (۱۰ تا ۱۲) ارائه شده‌اند:

$$R^2 = \frac{\sum_{t=1}^n A_t F_t}{\sqrt{\sum_{t=1}^n A_t^2 \sum_{t=1}^n F_t^2}} \quad (10)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (A_t - F_t)^2}{n}} \quad (11)$$

$$MAPE = \frac{\sum_{t=1}^n \left| \frac{A_t - F_t}{A_t} \right|}{n} \times 100 \quad (12)$$

در معادلات فوق، A_t داده‌های مشاهداتی، F_t داده‌های شبیه‌سازی‌شده و N تعداد داده‌ها می‌باشد.

نتایج و بحث

نتایج روند یابی بارش ۳۰ سال اخیر (۱۹۹۴-۲۰۲۳) بر اساس تخمین گر Sen و Mann-Kendall

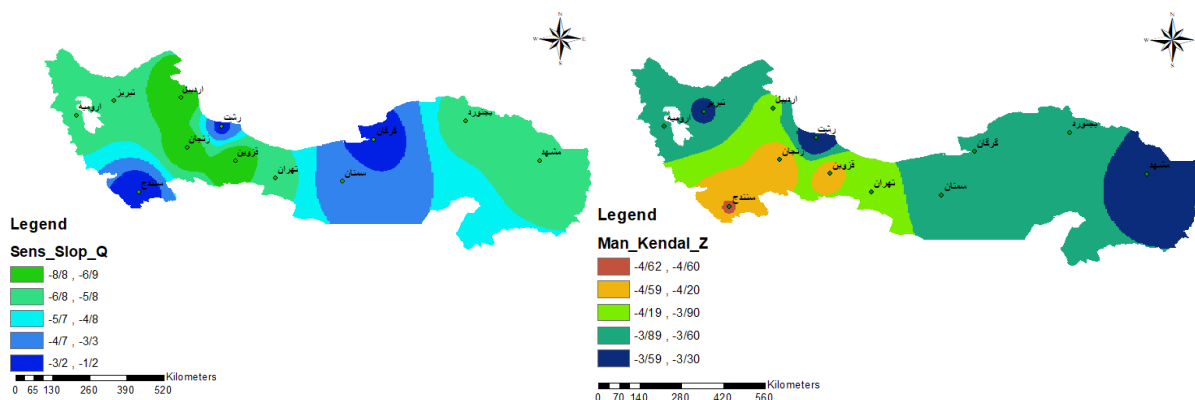
نتایج تحلیل روند مجموع بارش ایستگاه‌های مورد مطالعه بر مبنای سری‌های زمانی بلندمدت در مقیاس سالانه بر اساس شیب سن (جدول ۲) نشان داد که طی دوره آماری مورد مطالعه (۱۹۹۴-۲۰۲۳) در همه ایستگاه‌ها، آماره Q (برآوردگر شیب سن) و Z (آزمون من-کندال) منفی بوده و با توجه به این که تمام مقادیر Z در این جدول به غیر از ایستگاه رشت برای سایر ایستگاه‌ها محدوده مورد سه ستاره بوده (سطح اطمینان ۹۹٪)، بنابراین در همه ایستگاه‌ها روند بارش سالانه در ۳۰ سال گذشته به صورت معنادار کاهش یافته است. در ستون Q (Sen's Slope) مقادیر منفی تأیید می‌کنند که در همه ایستگاه‌ها، میزان بارش سالانه به طور متوسط در حال کاهش است. طبق داده‌های ارائه شده در این ستون از جدول ۲ بالاترین میزان کاهش‌ها به ترتیب در قزوین ۸۱/۸-، اردبیل ۶۳/۸- و زنجان ۴۵/۸- بوده است. لذا این سه شهر که جزء شهرهای کوهستانی شمال غرب محسوب می‌شوند، بیشترین کاهش سالانه بارش را در مقایسه با سایر ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه تجربه کرده‌اند. کمترین روند کاهشی بارش طی ۳۰ سال اخیر نیز مربوط به دو شهر گرگان و رشت بوده است که جزء شهرهای مرطوب سواحل دریای خزر هستند. شهرهای مشهد، بجنورد، تبریز، ارومیه، تهران و سمنان نیز روند کاهشی کم تا متوسط را تجربه کرده‌اند. طبق نتایج آزمون من-کندال، بالاترین مقادیر Z مربوط به ایستگاه‌های سنندج، زنجان و قزوین و به ترتیب ۶۲/۴، ۵۷/۴-، ۴۲/۴- و کمترین مقدار آن با رقم ۹۸/۲- مربوط به ایستگاه رشت بود؛ اما با توجه به این که در همه ایستگاه‌ها نمره Z کمتر از ۵۸/۲- است، لذا وجود روند نزولی معنادار بارش ۳۰ سال اخیر، در کل منطقه مورد مطالعه در سطح اطمینان ۹۹٪ پذیرفته می‌شود (جدول ۲). نقشه پراکنش مقادیر Q و Z (جهت نمایش عینی و ملموس) در شکل ۲ ارائه شده است. نمودارهای شیب سن در شکل ۳، روند نزولی و کاهش بارش در همه ایستگاه‌های منطقه را طی ۳۰ سال اخیر (۱۹۹۴-۲۰۲۳) تأیید می‌نماید.

جدول ۲- نتایج واکاوی تغییرات مجموع بارش سالانه ایستگاه‌ها بر اساس شیب سن (۱۹۹۴-۲۰۲۳)

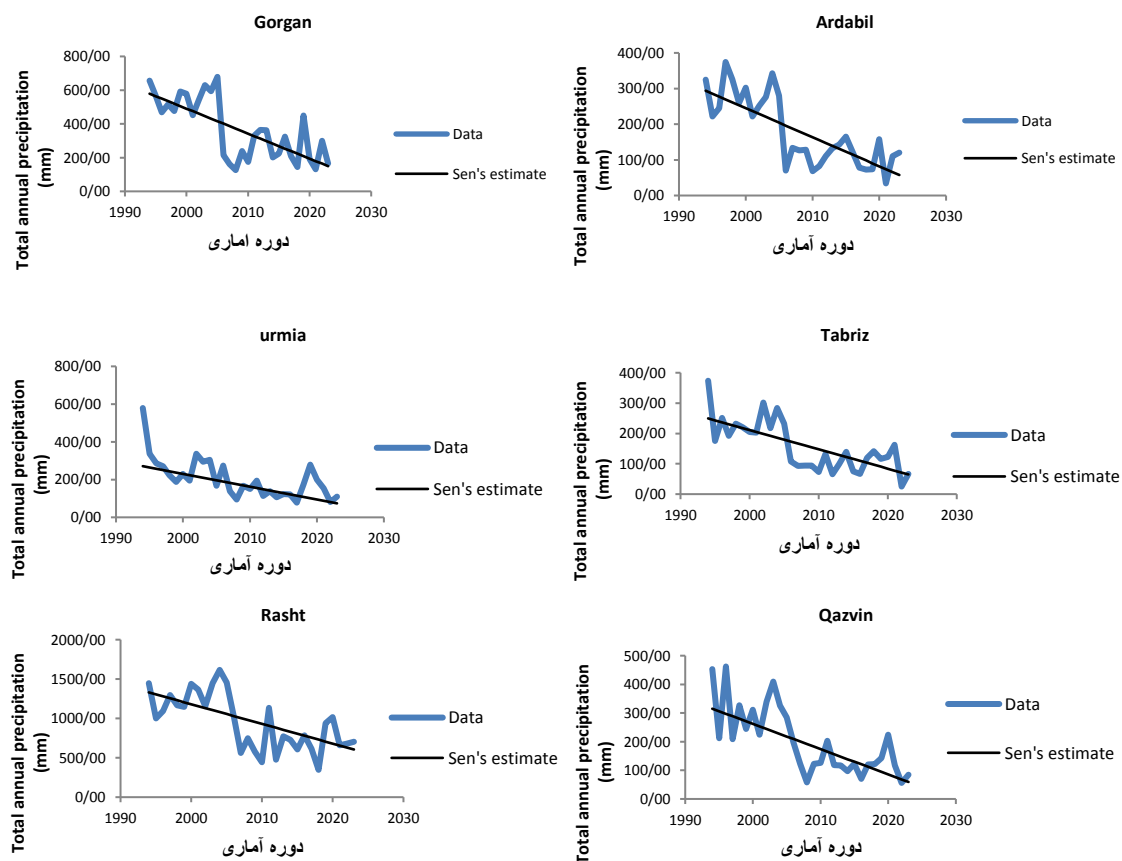
Table 2- Results of analysis of changes in total annual precipitation of stations based on Sen's slope (1994-2023)

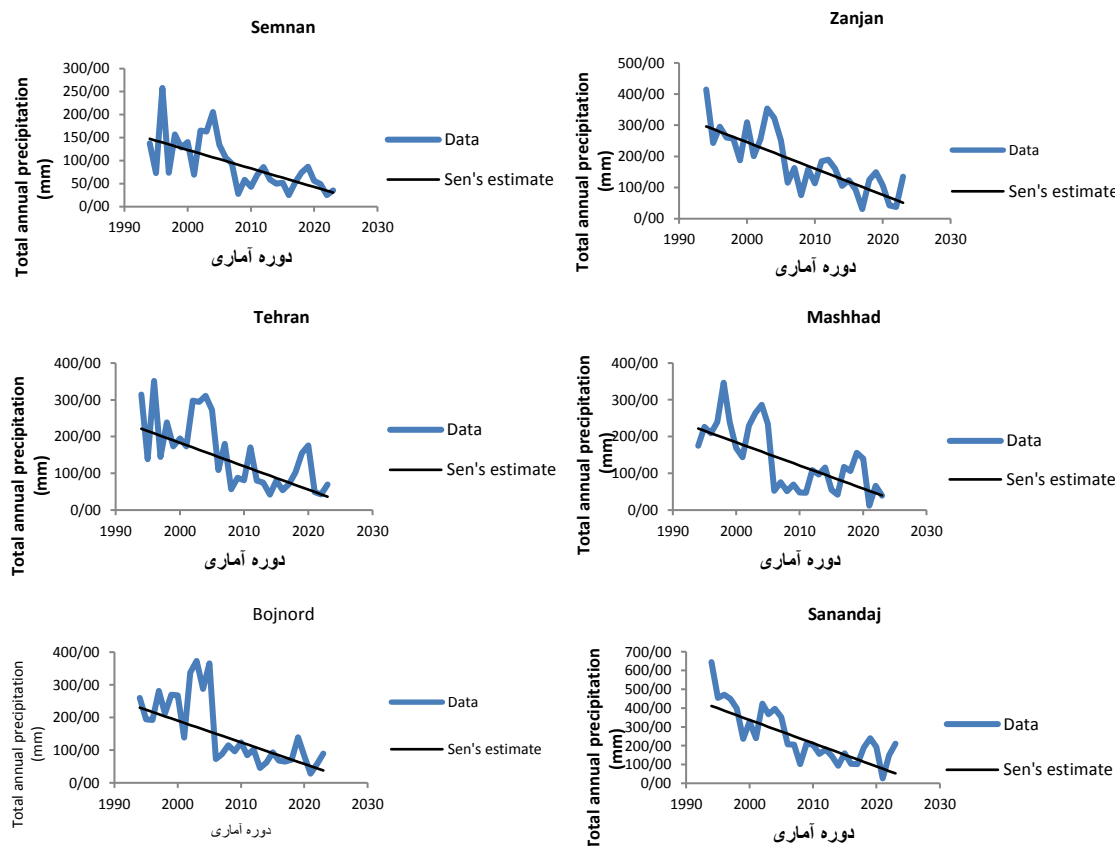
Stations	Z	Significant	Q	Qmin99	Qmax99	B	Bmin99	Bmax99
Bojnourd	-3.85	***	-6.63	-1.10	-2.91	4.55	6.85	2.58
Mashhad	-3.39	***	-6.28	-1.08	-1.19	4.35	6.65	1.83
Gorgan	-3.60	***	-1.48	-2.24	-5.51	1.08	1.47	6.46
Semnan	-3.87	***	-4.03	-6.58	-1.26	2.84	4.08	1.33
Tehran	-3.91	***	-6.38	-1.09	-2.26	4.38	6.84	2.31
Rasht	-2.98	**	-2.50	-4.18	-3.84	2.18	2.97	1.15
Qazvin	-4.42	***	-8.81	-1.42	-4.00	6.15	8.90	3.59
Zanjan	-4.57	***	-8.45	-1.25	-4.88	5.83	7.98	4.11
Sanandaj	-4.62	***	-1.24	-1.86	-6.86	8.32	1.14	5.62
Ardabil	-3.91	***	-8.63	-1.27	-4.15	5.71	8.05	3.67
Tabriz	-3.53	***	-6.37	-9.72	-2.56	4.66	6.12	2.72
Urmia	-3.82	***	-6.80	-1.21	-3.21	5.02	7.71	4.55

*** و داده‌ها در سطح ۹۹ درصد معنادار است



شکل ۲- مقادیر Q و Z بارش ایستگاه‌های مورد مطالعه (۱۹۹۴-۲۰۲۳)
Fig. 2. Q and Z values for precipitation at the study area (1994-2023)





شکل ۳- تغییرات روند مجموع بارش سالانه ایستگاه‌های مورد مطالعه بر اساس شیب سن (۱۹۹۴-۲۰۲۳)

Fig.3. Changes in the trend of total annual precipitation of the studied stations based on Sen's slope (1994-2023)

نتایج شبیه‌سازی و پیش‌نگری بارش ایستگاه‌های مورد مطالعه

پس از آماده‌سازی داده‌های ورودی و اطمینان از همگنی آن‌ها، مدل LARS- WG اجرا گردید. در نخستین مرحله از اجرای این مدل، توزیع تجربی سری‌های تر و خشک به دست آمد. مقادیر آزمون نا پارامتریک کای اسکوتر و مقدار احتمال P-Value جهت مقایسه بارش مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده ایستگاه‌های مورد مطالعه (جدول ۳) نشان می‌دهد در ماه‌هایی که ارقام کای اسکوتر بزرگ‌تر از ۰/۰۵ است تفاوت چندانی بین مقادیر بارش مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده وجود ندارد؛ اما اگر این مقدار کمتر از ۰/۰۵ باشد تفاوت معنادار می‌باشد. همچنین در ماه‌هایی که رقم P-Value ایستگاه‌ها از ۰/۰۵ کمتر است، نشان‌دهنده معنادار بودن نتایج است درحالی‌که P-Value بزرگ‌تر از ۰/۰۵ حاکی از این است که نتایج کمتر معنادار هستند فلذا احتمال تصادفی بودن نتایج در چنین حالتی بیشتر است. طبق توضیحات ذکرشده، عملکرد LARS- WG در شبیه‌سازی بارش متوسط ارزیابی شد.

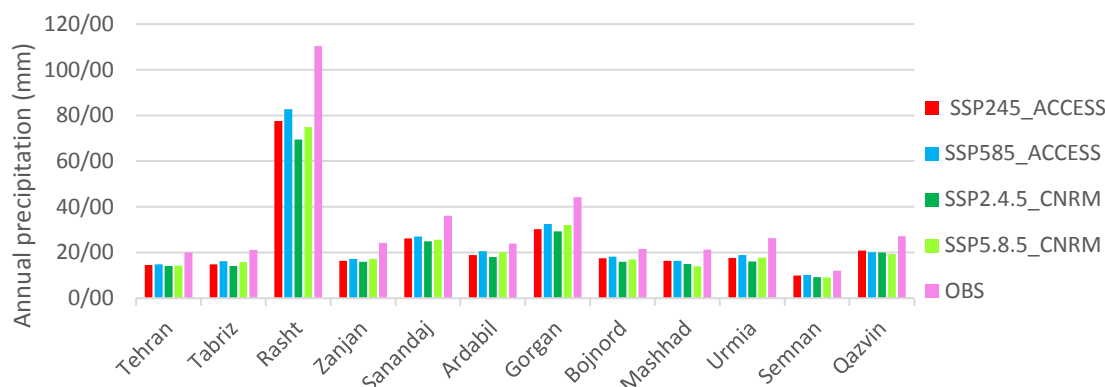
پس از ارزیابی دقت نرم‌افزار ریز گردان LARS- WG، در شبیه‌سازی بارش دوره پایه (۱۹۸۰-۲۰۱۰)، جهت پیش‌نمایی بارش آتی ایستگاه‌ها از دو مدل ACCESS-ESM1-5 و CNRM-CM6-1 تحت سناریوهای (SSP2-4.5) و (SSP5-8.5)، بهره گرفته شد. بررسی نتایج ارائه شده در نمودار مقایسه‌ای تغییرات بارش پیش‌بینی‌شده ۲۰ سال آتی (۲۰۴۱-۲۰۶۰) بر اساس سناریوهای دو مدل CNRM و ACCESS و دوره مشاهداتی (۱۹۸۰-۲۰۱۰)، (شکل ۴)، همچنین نقشه پراکندگی مجموع بارش سالانه پیش‌بینی‌شده بر

اساس سناریوهای هر دو مدل (شکل ۵) و نمودارهای درصد تغییرات بارش پیش‌بینی شده در مقایسه با دوره پایه (شکل ۶) نشان داد که در ۲۰ سال آینده کل شهرهای مورد مطالعه در اغلب ماه‌ها به ویژه ماه‌های مربوط به فصول گرم شاهد کاهش بارش خواهد بود. طبق نتایج، طی ۲۰ سال پیش‌بینی شده، ایستگاه ارومیه تحت سناریوهای هر دو مدل در تمامی ماه‌های سال کاهش بارش خواهد داشت. ایستگاه‌های تهران، تبریز، اردبیل، گرگان و رشت تحت سناریوهای هر دو مدل و در بیشتر ماه‌های سال کاهش محسوس و تحت یکی از سناریوها افزایش بسیار جزئی بارش (کمتر از ۲۰ درصد) را در برخی از ماه‌ها تجربه خواهند کرد.

جدول ۳- مقادیر K-S و P-Value توزیع بارش مشاهداتی و شبیه‌سازی شده‌ی ایستگاه‌ها (۱۹۸۱-۲۰۱۰)

Table 3- K-S and P-Values of the observed and simulated precipitation distributions of the stations (1981-2010)

ایستگاه	معیار	Criteria	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
اردبیل	K-S		0.09	0.06	0.03	0.04	0.06	0.13	0.05	0.06	0.07	0.15	0.08	0.06
Ardabil	P-Value		1	1	1	1	1	0.98	1	1	1	0.92	1	1
بجنورد	K-S		0.04	0.03	0.05	0.07	0.03	0.06	0.21	0.11	0.15	0.08	0.05	0.04
Bojnord	P-Value		1	1	1	1	1	0.60	0.99	0.92	1	1	1	1
مشهد	K-S		0.12	0.03	0.06	0.13	0.08	0.10	0.46	0.25	0.44	0.08	0.08	0.07
Mashad	P-Value		0.99	1	1	0.97	1	0.99	0.00	0.40	0.01	1	1	1
رشت	K-S		0.09	0.06	0.08	0.03	0.22	0.09	0.06	0.06	0.12	0.23	0.11	0.07
Rasht	P-Value		1	1	1	1	0.53	1	1	1	0.99	0.48	0.99	1
تهران	K-S		0.11	0.07	0.90	0.12	0.12	0.16	0.06	0.43	0.35	0.04	0.08	0.08
Tehran	P-Value		0.99	1	1	0.99	0.98	0.89	1	0.01	0.08	1	1	1
زنجان	K-S		0.04	0.04	0.91	0.10	0.11	0.09	0.05	0.17	0.21	0.10	0.08	0.06
Zanjan	P-Value		1	1	1	0.99	0.99	1	1	0.81	0.58	0.99	1	1
تبریز	K-S		0.09	0.03	0.07	0.05	0.03	0.10	0.11	0.29	0.15	0.09	0.08	0.04
Tabriz	P-Value		1	1	1	1	1	0.99	0.99	0.23	0.94	1	1	1
ارومیه	K-S		0.08	0.07	0.13	0.15	0.15	0.14	0.06	0.19	0.22	0.04	0.09	0.05
urmia	P-Value		1	1	1	1	1	0.98	1	1	1	0.92	1	1
سمنان	K-S		0.11	0.08	0.07	0.06	0.08	0.08	0.31	0.26	0.35	0.16	0.10	0.09
semnan	P-Value		0.99	1	1	1	1	1	0.16	0.35	0.08	0.89	0.99	1
قزوین	K-S		0.12	0.04	0.06	0.08	0.07	0.06	0.14	0.16	0.05	0.11	0.13	0.07
Qazvin	P-Value		0.99	1	1	1	1	1	0.95	0.89	1	0.99	0.97	1
گرگان	K-S		0.10	0.05	0.09	0.04	0.12	0.05	0.15	0.03	0.04	0.04	0.08	0.05
Gorgan	P-Value		0.99	1	1	1	0.99	1	۰/۹۱	1	1	1	1	1
سنندج	K-S		0.06	0.07	0.10	0.09	0.11	0.15	0.34	0.60	0.26	0.09	0.08	0.05
Sanandaj	P-Value		1	1	0.99	1	0.99	0.90	0.09	0	0.35	1	1	1

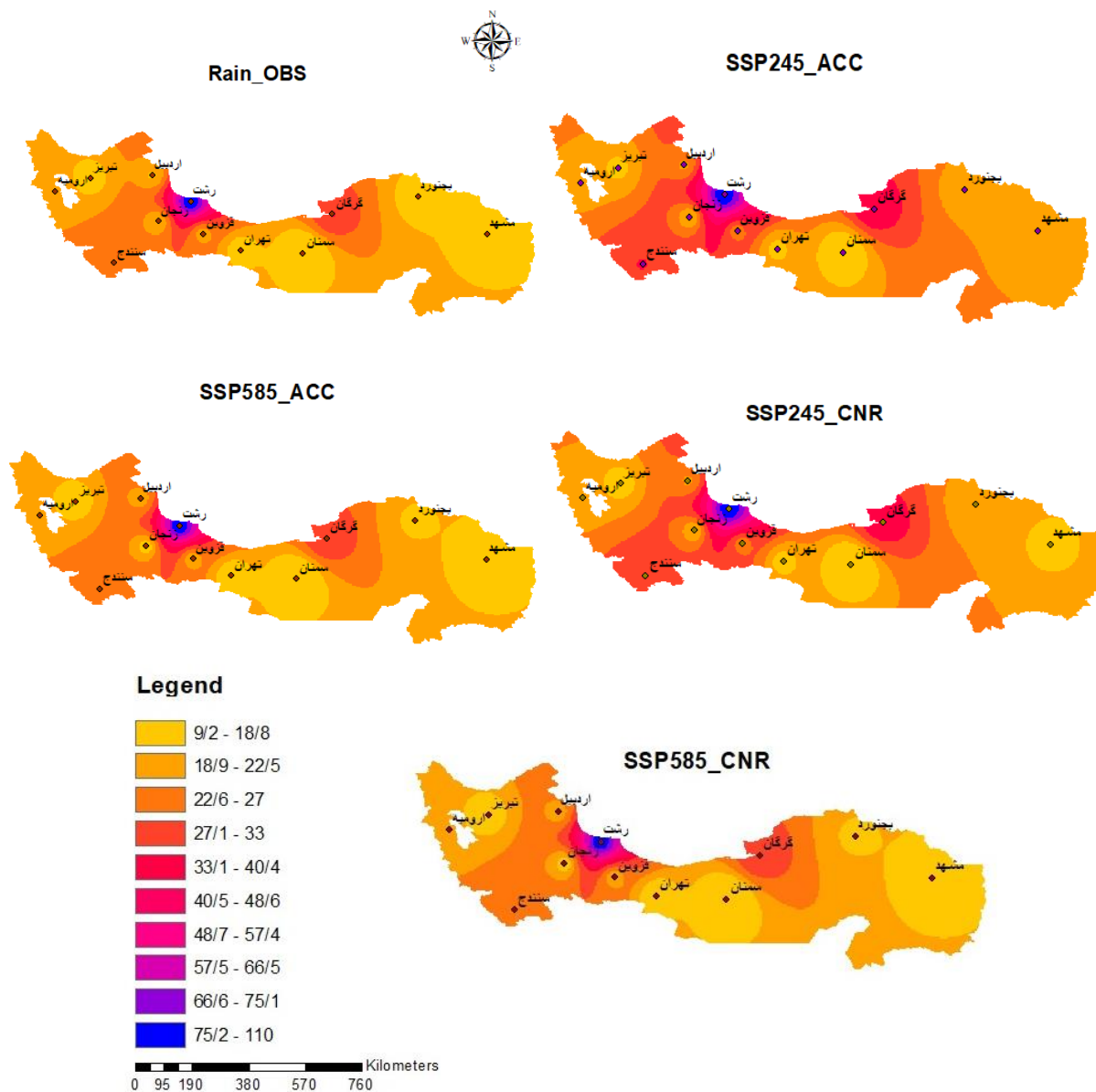


شکل ۴- نمودار مقایسه‌ای تغییرات بارش پیش‌نگری‌شده بر اساس سناریوهای دو مدل CNRM و ACCESS (۲۰۴۱-۲۰۶۰) و مشاهداتی (۱۹۸۰-۲۰۱۰)

Fig.4. Comparative chart of predicted precipitation changes based on the scenarios of the two CNRM and ACCESS models (2041-2060) and observations (1980-2010)

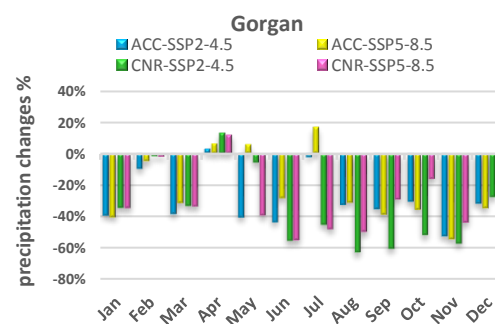
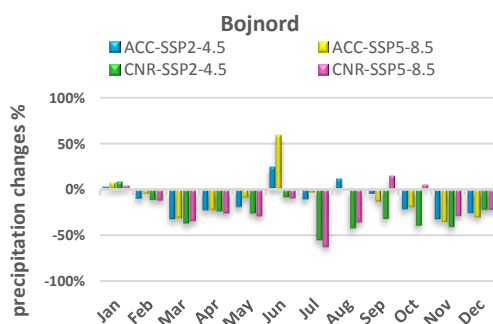
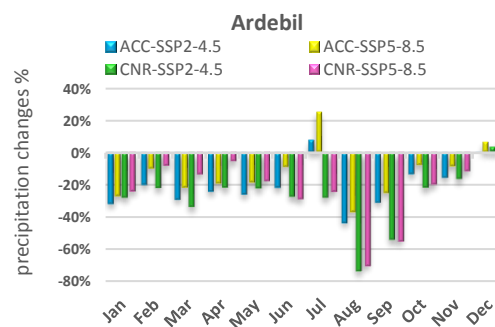
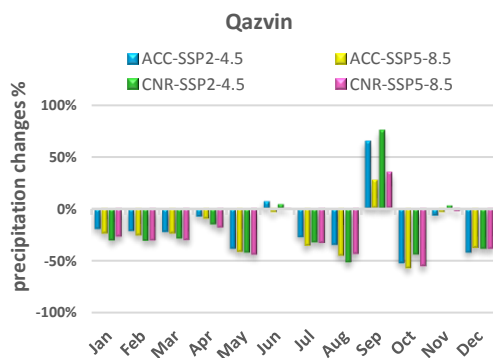
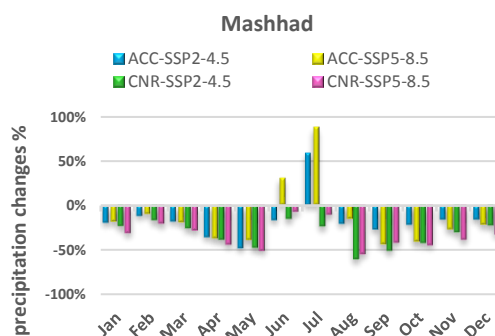
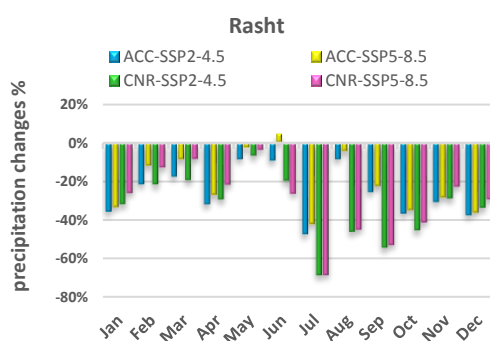
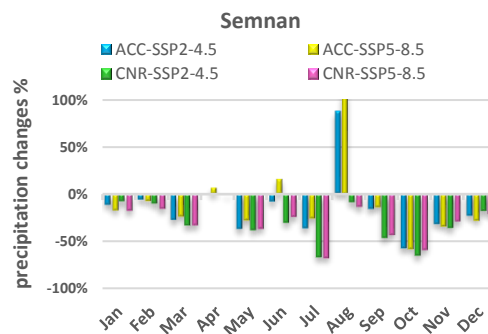
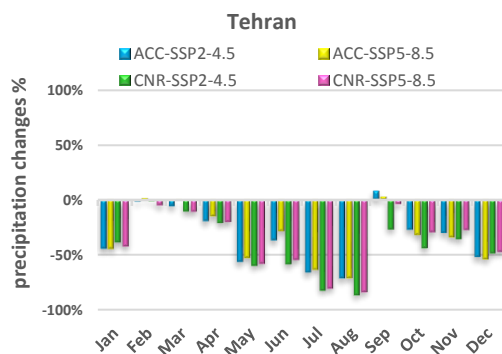
شهرهای زنجان، سنندج، قزوین، مشهد، بجنورد و سمنان دست‌کم در یکی از ماه‌های پایانی بهار و تابستان و تحت یکی از سناریوها تا ۵۰ درصد افزایش بارش خواهند داشت. در مجموع پیش‌بینی‌های انجام شده بر اساس سناریوهای هر دو مدل ACCESS-ESM1-5 و CNRM-CM6-1، نشان می‌دهد که هر ۱۲ ایستگاه مورد مطالعه طی ۲۰ سال آینده در اغلب ماه‌های سال شاهد کاهش محسوس بارش نسبت به میانگین بلندمدت خواهند بود (شکل ۶).

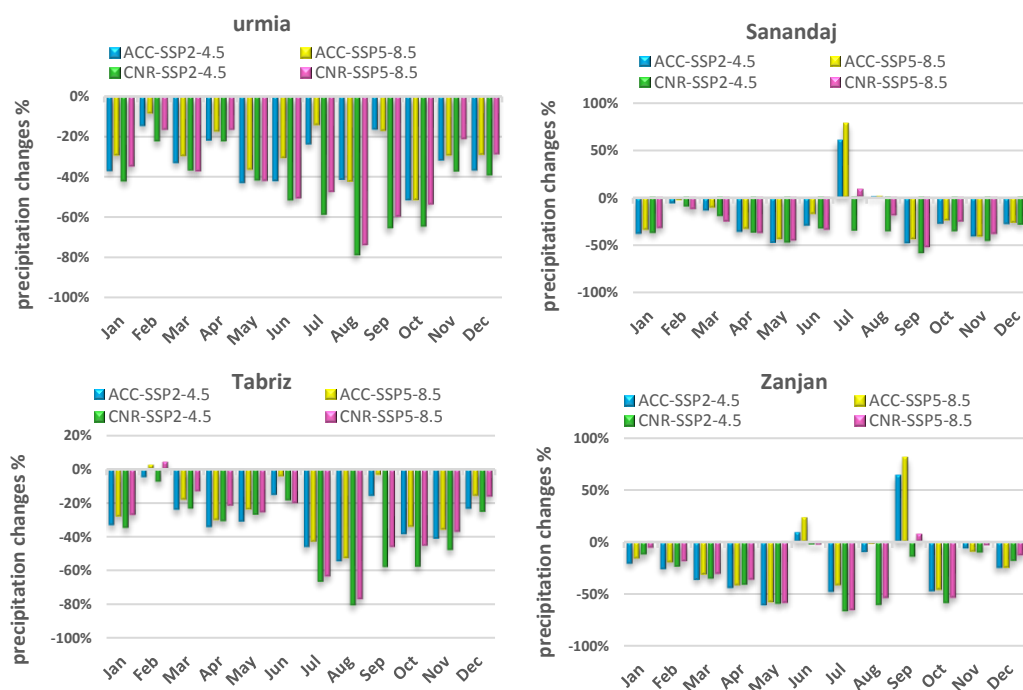
در نهایت دقت دو مدل مذکور در پیش‌نگری بارش، بر اساس سه شاخص خطا سنجی R^2 ، RMSE، MAPE بررسی شد که نتایج آن در جدول ۶ و همچنین به منظور نمایش عینی نتایج، در قالب نقشه در شکل ۷ ارائه شده است. طبق نتایج، در هر یک از دو مدل مقادیر حاصل از شاخص MAPE و RMSE به صفر نزدیک است، خطای مدل کمتر و دقت آن بیشتر است و بر اساس شاخص R^2 که دامنه‌ی آن بین ۰ و ۱ یا ۰ تا ۱۰۰ می‌باشد، هر مدلی که رقم این شاخص در آن به ۱ نزدیک است، دقت بالاتری در پیش‌بینی دارد. طبق توضیحات ارائه شده، اگرچه در هر دو مدل میزان خطا نسبتاً بالا بود اما هریک از ایستگاه‌ها در یک مدل و یک سناریو کمترین خطا و بالاترین دقت را داشتند که به‌عنوان مدل انتخابی برای آن ایستگاه در نظر گرفته شد (جدول ۷).



شکل ۵- نقشه پراکندگی مجموع بارش سالانه دوره مشاهداتی و پیش‌نگری شده بر اساس سناریوهای دو مدل CNRM و ACCESS (۲۰۶۰-۲۰۴۱)

Fig.5. Scatter map of total annual precipitation for the observed and predicted periods based on the two models scenarios: CNRM and ACCESS (2041-2060)





شکل ۶- نمودارهای درصد تغییرات بارش پیش‌بینی‌شده بر اساس سناریوهای دو مدل ACCESS و CNRM (۲۰۴۱-۲۰۶۰)

Fig.6. Graphs of percentage changes in predicted precipitation based on the scenarios of the two models CNRM and ACCESS (2041-2060)

جدول ۶- اندازه‌گیری دقت دو مدل ACCESS و CNRM در پیش‌نمایی بارش ۲۰ سال آتی (۲۰۴۱-۲۰۶۰)

Table 6- Accuracy measurement of the two ACCESS and CNRM models in predicting precipitation for the next 20 years (2041-2060)

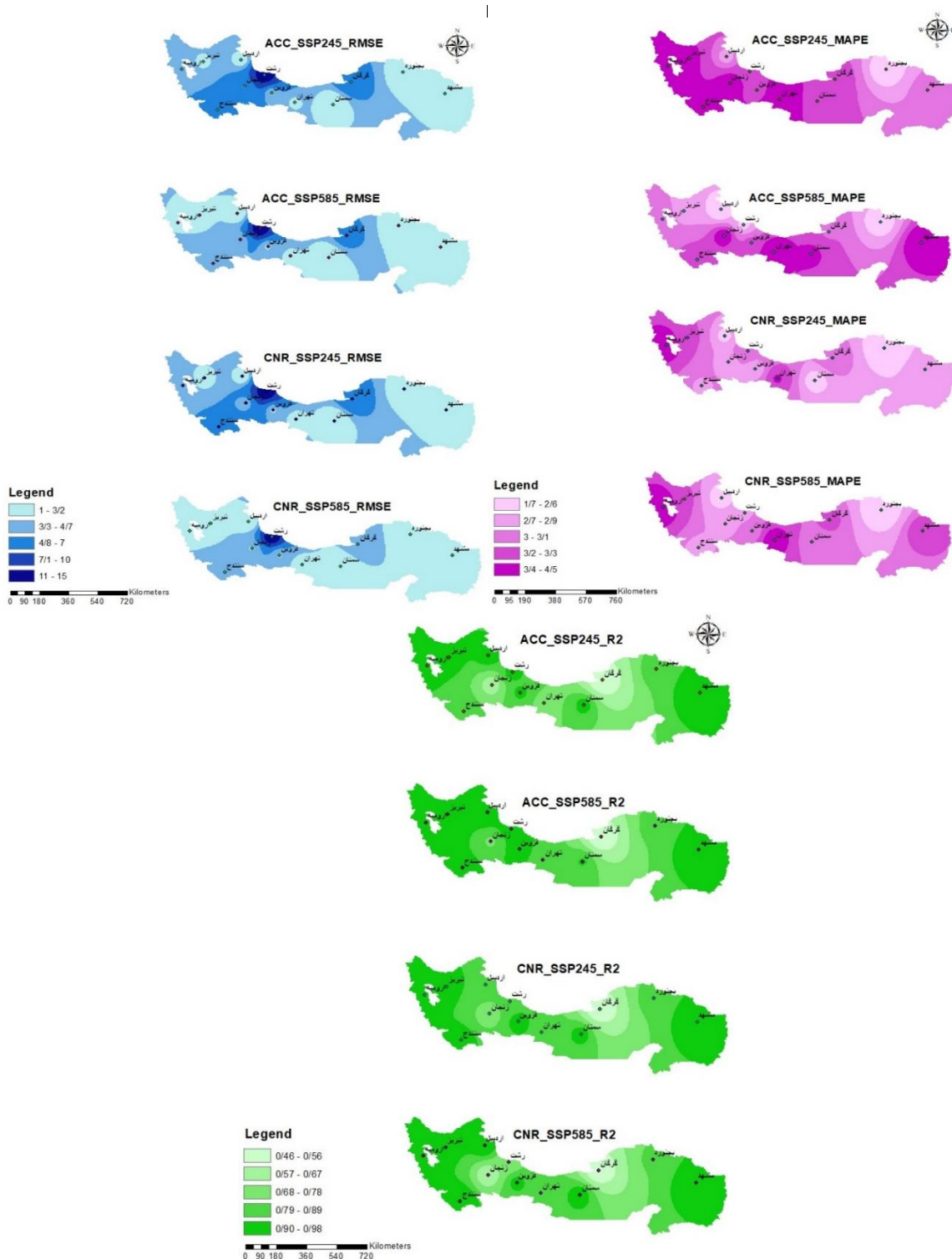
ایستگاه	سناریو	مدل	R^2	MAPE	RMSE	ایستگاه	سناریو	مدل	R^2	MAPE	RMSE
station	scenario	Model				station	scenario	Model			
بجنورد Bojnord	SSP2.4.5	ACCESS	0.93	2.7	2.6	زنجان Zanjan	SSP2.4.5	ACCESS	0.98	2.4	2.2
	SSP5.8.5	ACCESS	0.93	2.7	2.7		SSP5.8.5	ACCESS	0.96	3.1	2.2
	SSP2.4.5	CNRM	0.92	3.1	2.9		SSP2.4.5	CNRM	0.96	3.2	2.6
	SSP5.8.5	CNRM	0.93	2.9	3.1		SSP5.8.5	CNRM	0.96	3.2	2.6
مشهد Mashhad	SSP2.4.5	ACCESS	0.77	3.1	3.5	سندج Sanandaj	SSP2.4.5	ACCESS	0.60	2.8	5.3
	SSP5.8.5	ACCESS	0.80	3.1	3.2		SSP5.8.5	ACCESS	0.46	2.6	5.1
	SSP2.4.5	CNRM	0.78	3.2	3.4		SSP2.4.5	CNRM	0.49	3.6	5.9
	SSP5.8.5	CNRM	0.78	2.8	3.1		SSP5.8.5	CNRM	0.70	3.1	4.6
گرگان Gorgan	SSP2.4.5	ACCESS	0.92	2.9	4.1	اردبیل Ardabil	SSP2.4.5	ACCESS	0.91	2.7	1.0
	SSP5.8.5	ACCESS	0.92	2.8	3.9		SSP5.8.5	ACCESS	0.89	2.9	1.0
	SSP2.4.5	CNRM	0.93	3.3	4.5		SSP2.4.5	CNRM	0.92	2.9	1.1
	SSP5.8.5	CNRM	0.98	2.8	4.2		SSP5.8.5	CNRM	0.94	2.9	1.1
سمنان Semnan	SSP2.4.5	ACCESS	0.95	2.1	1.9	تبریز Tabriz	SSP2.4.5	ACCESS	0.86	3.3	2.4
	SSP5.8.5	ACCESS	0.95	1.7	1.4		SSP5.8.5	ACCESS	0.84	3.2	2.5
	SSP2.4.5	CNRM	0.89	3	2.1		SSP2.4.5	CNRM	0.89	4.1	2.4
	SSP5.8.5	CNRM	0.96	2.3	1.4		SSP5.8.5	CNRM			
تهران Tehran	SSP2.4.5	ACCESS	0.95	2.9	2.4						
	SSP5.8.5	ACCESS	0.94	2.3	2.0						
	SSP2.4.5	CNRM	0.92	3.8	2.5						

1.9	3.1	0.94		SSP5.8.5		2.3	3.7	0.90		SSP5.8.5	
3.2	3.1	0.94	ACCESS	SSP2.4.5		12.2	2.7	0.94	ACCESS	SSP2.4.5	
2.8	2.6	0.94		SSP5.8.5	ارومیه	11.1	2.0	0.92		SSP5.8.5	رشت
3.6	4.5	0.93	CNRM	SSP2.4.5	Urmia	15	3.6	0.85	CNRM	SSP2.4.5	Rasht
3	3.8	0.93		SSP5.8.5		13.1	2.8	0.83		SSP5.8.5	

جدول ۷- مدل و سناریوی انتخابی هریک از ایستگاه‌ها در پیش‌نگری بارش ۲۰ سال آتی (۲۰۴۱-۲۰۶۰)

Table 7- Selected model and scenario for each station in the precipitation forecast for the next 20 years (2041-2060)

سناریو	مدل	ایستگاه	سناریو	مدل	ایستگاه
Scenario	Model	Station	Scenario	Model	Station
SSP2.4.5	ACCESS	قزوین Gazvin	SSP2.4.5	ACCESS	بجنورد Bojnord
SSP5.8.5	ACCESS	زنجان Zanjan	SSP2.4.5	ACCESS	مشهد Mashhad
SSP5.8.5	CNRM	سنندج Sanandaj	SSP5.8.5	CNRM	گرگان Gorgan
SSP5.8.5	CNRM	اردبیل Ardabil	SSP2.4.5	ACCESS	سمنان Semnan
SSP5.8.5	ACCESS	تبریز Tabriz	SSP5.8.5	CNRM	تهران Tehran
SSP5.8.5	ACCESS	ارومیه Orumiyeh	SSP5.8.5	ACCESS	رشت Rasht



شکل ۷- نقشه‌های پراکندگی دقت سناریوهای دو مدل در پیش‌نمایی بارش ۲۰ سال آبی ایستگاه‌ها (۲۰۴۱-۲۶۰)
Fig.7. Accuracy maps of two models in precipitation forecasting, based on three indices: R2, MAPE, RMSE (2041-260)

نتیجه‌گیری

تغییر اقلیم آثار گسترده‌ای بر الگوهای بارش نقاط مختلف جهان دارد. این تغییرات می‌تواند به صورت افزایش یا کاهش بارش، تغییر در توزیع زمانی و مکانی بارش و افزایش وقوع سیل و خشکسالی نمود پیدا کند. هدف از پژوهش حاضر، روندیابی و پیش‌نمایی بارش در شهرهای منتخب نیمه شمالی ایران با بهره‌گیری از مدل‌های GCMs بود تا میزان تأثیرپذیری بارش نقاط مختلف آب و هوایی این بخش از کشور، از تغییرات اقلیمی آشکار گردد. بدین منظور بارش ۳۰ سال اخیر (۱۹۹۴-۲۰۲۳) شهرهای منتخب نیمه شمالی ایران بر اساس آزمون‌های من-کندال و شیب سن روند یابی و تغییرات احتمالی آن طی ۲۰ سال آینده (۲۰۴۱-۲۰۶۰) با بهره‌گیری از دو مدل ACCESS و CNRM، پیش‌نگری شد. در نهایت دقت مدل‌ها بر اساس سه شاخص خطا سنجی R^2 ، MAPE، RMSE بررسی گردید و برای هریک از ایستگاه‌ها، کم خطاترین مدل به عنوان مدل انتخابی در نظر گرفته شد. بر اساس نتایج حاصل از دو آزمون من-کندال و شیب سن، طی ۳۰ سال اخیر (۱۹۹۴-۲۰۲۳)، الگوی بارش در همه‌ی ایستگاه‌های منطقه، دستخوش تغییر شده و روند کاهشی معنادار در سطح اطمینان ۹۹ درصد داشته است. روند کاهشی در شهرهای قزوین، اردبیل، زنجان که جزء شهرهای کوهستانی شمال غرب محسوب می‌شوند بیشتر و در رشت و گرگان به عنوان نقاط پربارش و مرطوب ساحلی کمتر بوده است. طبق پیش‌بینی انجام شده بر اساس سناریوهای دو مدل ACCESS و CNRM الگوهای بارش در منطقه مورد مطالعه دستخوش تغییرات قابل‌توجهی خواهند شد، طی ۲۰ سال آتی (۲۰۴۰-۲۰۶۰) کل منطقه مورد مطالعه در اغلب ماه‌های سال با کاهش بارش مواجه خواهند شد. میزان کاهش بارندگی در شهرهای واقع در شمال غرب در برخی ماه‌های سال فصول گرم بیش از ۶۰٪ خواهد بود. همچنین برخی شهرهای منطقه دست‌کم بر اساس پیش‌بینی یکی از سناریوهای دو مدل، در ماه‌های گرم سال (اواخر بهار تا اواخر زمستان) افزایش بارش تجربه خواهند کرد که این افزایش در شهرهای کم بارش همچون سمنان، مشهدتر خواهد بود. طبق توضیحات ارائه شده و با توجه به این که بیشترین درصد افزایش و کاهش بارش در کل منطقه، مربوط به ماه‌های گرم سال است. لذا انتظار می‌رود طی دوره پیش‌نگری شده (۲۰۴۰-۲۰۶۰) بارش فصول گرم سال دستخوش تغییرات و نوسانات بیشتری باشد. در نهایت مقایسه‌ی مجموع بارش سالانه دوره مشاهداتی و پیش‌نگری شده بر اساس سناریوهای هر دو مدل، کاهش محسوس بارش را در هر ۱۲ ایستگاه مورد مطالعه نسبت به دوره پایه تأیید نمود که بیشترین میزان کاهش بارش پیش‌نگری شده نسبت به دوره مشاهداتی در شهر رشت و کمترین آن در شهر سمنان پیش‌نگری شد. نتایج ذکر شده، حاکی از ناهنجاری‌ها زمانی و مکانی بارش منطقه است که این تغییرات، در توزیع بارش دهه‌های اخیر و آینده، نشان دهنده به هم ریختگی اقلیمی و از آثار تغییر اقلیم در این بخش از ایران بوده و بر ضرورت اتخاذ سیاست‌های مدیریتی کارآمد جهت مقابله با نوسانات بارشی، بهینه‌سازی مصرف منابع آب و توسعه روش‌های سازگاری با تغییرات اقلیمی تأکید دارد.

با توجه به این که پژوهش حاضر کاهش بارش در برخی ایستگاه‌ها و بعضی از ماه‌های سال و افزایش آن را در برخی دیگر پیش‌بینی نمود، لذا با یافته‌های اکثر پژوهش‌گران از جمله؛ دسترنج و رستمی (Dastranj & Rostami, 2020)، کونانی و همکاران (Kounani et al., 2021)، محمدی و همکاران (Mohammadi et al., 2022)، فنوج و همکاران (Phuong et al., 2020)، مسگری و همکاران (Mesgari et al., 2022)، رزمخواه و همکاران (Razmkhah et al., 2023)، مو و همکاران (Mo et al., 2023)، نگوما و همکاران (Ngoma et al., 2021) و کامروزمن و همکاران (Kamruzzaman et al., 2023) که برخی افزایش و برخی دیگر کاهش بارش آینده را در منطقه مورد مطالعه‌ی خود پیش‌بینی نموده‌اند، همسو بود. این تفاوت در نتیجه‌گیری‌ها، حاکی از تغییرات و نوسانات بارش دهه‌های اخیر می‌باشد که تحت تأثیر تغییر اقلیم رخ داده و می‌تواند پیامدهای مهمی برای منابع آب، کشاورزی و مدیریت بحران‌های محیطی داشته باشد. فلذا به منظور کاهش آثار منفی ناشی از این تغییرات در منطقه مورد مطالعه، پیشنهاد می‌شود سیاست‌گذاری‌های مدیریت منابع آب، برنامه‌های کشاورزی و اقدامات سازگاری با تغییرات اقلیمی مورد بازبینی قرار گیرد. همچنین، در راستای ارتقای دقت در پیش‌بینی بارش آینده، بر لزوم تحقیقات بیشتر با استفاده از مدل‌های ترکیبی و داده‌های گسترده‌تر تأکید

می‌گردد. در مجموع، به‌منظور مدیریت پایدار منابع آب و توسعه‌ی منطقه‌ای در نیمه شمالی ایران، رصد دقیق تغییرات اقلیمی و تدوین راهبردهای مناسب برای این منطقه، ضروری می‌باشد.

تشکر و قدردانی

پژوهش حاضر، برگرفته از طرح پسادکتری به شماره قرارداد ۳۸۲ و تحت حمایت مالی دانشگاه محقق اردبیلی می‌باشد. لذا از زحمات معاونت محترم پژوهشی دانشگاه محقق اردبیلی و دانشکده علوم اجتماعی، تشکر و قدردانی می‌گردد.

References

- Ansari, S., Dehban, H., Zareian, M., & Farokhnia, A. (2022). Investigation of temperature and precipitation changes in the Iran's basins in the next 20 years based on the output of CMIP6 model. *Iranian Water Researches Journal*, 16(1), 11-24. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/iwrj.2022.11204>
- Bekele, D., Alamirew, T., Kebede, A., Zeleke, G., & Melesse, A. M. (2019). Modeling climate change impact on the hydrology of Keleta watershed in the Awash River Basin, Ethiopia. *Environmental Modeling & Assessment*, 24, 107-95. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10666-018-9619-1>
- Chen, Z., Zhou, T., Zhang, L., Chen, X., Zhang, W., & Jiang, J. (2020). Global land monsoon precipitation changes in CMIP6 projections. *Geophysical Research Letters*, 47(14), e2019GL086902. <https://doi.org/10.1029/2019GL086902>
- Dastranj, A., & Rostami, M. (2020). Assessment and prediction of climate change in the next decade, by downscaling General Circulation Models (GCMs). *Geography and Human Relationships*, 3(1), 252-268. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/gahr.2020.238502.1421>
- Diress, S. A., & Bedada, T. B. (2021). Precipitation and Temperature trend analysis by Mann Kendall test: The case of Addis Ababa methodological station, Addis Ababa, Ethiopia. *African Journal on Land Policy and Geospatial Sciences*, 4(4), 517-526. <https://doi.org/10.48346/IMIST.PRSM/ajlp-gs.v4i4.24086>
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G. A., Senior, C. A., Stevens, B., Stouffer, R. J., & Taylor, K. E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9(5), 1937-1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
- Ghorbani, H., Vali, A. A., & Zarepour, H. (2019) Analysis of the Climatological Drought Trend Variations Using Mann-Kendall, Sen and Pettitt Tests in Isfahan Province. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 6(2), 129-146. [In Persian] <http://dx.doi.org/10.29252/jsaeh.6.2.129>
- Gupta, V., Singh, V., & Jain, M. K. (2020). Assessment of precipitation extremes in India during the 21st century under SSP1-1.9 mitigation scenarios of CMIP6 GCMs. *Journal of Hydrology*, 590, 125422. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125422>
- Hajarpour, A., Yousefi, M., & Kamkar, B. (2014). Assessment of Weather Assimilators of CLIMGEN, LARS-WG and Weather Man in Assimilation of three Different Climatic Parameters of three Different Climate (Gorgan, Gonbad and Mashhad). *Geography and Development Iranian Journal*, 12(35), 201-216. [In Persian] <https://doi.org/10.22111/gdij.2014.1563>
- Heshmati, S., & Ramezani Etedali, H. (2021). Drought Forecasting for Future Periods Using LARS-WG Model: The Case Study of Kermanshah City. *Town and Country Planning*, 13(2), 647-669. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/jtcp.2021.332432.670263>

- Kamruzzaman, M., Wahid, S., Shahid, S., Alam, E., Mainuddin, M., Islam, H. T., ... & Thorp, K. R. (2023). Predicted changes in future precipitation and air temperature across Bangladesh using CMIP6 GCMs. *Heliyon*, 9(5), e16274. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16274>
- Kendall, M. G. (1962). *Rank Correlation Methods*. New York: Hafner Publishing Company.
- Kounani, Z., Ildoromi, A., Zenivand, H., & Nouri, H. (2021). Impact of climate change on runoff of Silakhor-Rahimabad Basin in Lorestan. *Hydrogeomorphology*, 7(25), 17-1. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/hyd.2021.32443.1474>
- Maleki, H., Solaimame, M., Jaedaei, A., & Shater, S. (2012). Analysis of the precipitation and drought trend variations using Mann-Kendall and Sen Tests in Tehran Province. *Nivar*, 37(80-81), 43-54. [In Persian] https://nivar.irimo.ir/article_13186.html
- Mesgari, E., Hosseini, S. A., Hemmesy, M. S., Houshyar, M., & Partoo, L. G. (2022). Assessment of CMIP6 models' performances and projection of precipitation based on SSP scenarios over the MENAP region. *Journal of Water and Climate Change*, 13(10), 3607-3619. <https://doi.org/10.2166/wcc.2022.195>
- Mo, C., Tang, P., Huang, K., Lei, X., Lai, S., Deng, J., ... & Xing, Z. (2023). Evolution of drought trends under climate change scenarios in karst basin. *Water*, 15(10), 1934. <https://doi.org/10.3390/w15101934>
- Mohammadi, H., Khalili, R., & Mohammadi, S. (2022). Forecasting future temperature and precipitation under the effects of climate change using the LARS-WG climate generator (Case Study: South Zagros Region of Iran). *Nivar*, 45(114-115), 137-153. [In Persian] https://nivar.irimo.ir/article_146554.html
- Ngoma, H., Wen, W., Ayugi, B., Babaousmail, H., Karim, R., & Ongoma, V. (2021). Evaluation of precipitation simulations in CMIP6 models over Uganda. *International Journal of Climatology*, 41(9), 4743-4768. <https://doi.org/10.1002/joc.7098>
- Nilawar, A. P., & Waikar, M. L. (2019). Impacts of climate change on streamflow and sediment concentration under RCP 4.5 and 8.5: A case study in Purna river basin, India. *Science of Total Environment*, 650, 2685-2696. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.334>
- O'Neill, B. C., Tebaldi, C., Van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., ... & Sanderson, B. M. (2016). The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(9), 3461-3482. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>
- Pachauri, R. K., Allen, M. R., Barros, V. R., Broome, J., Cramer, W., Christ, R., ... & Van Ypersele, J. P. (2014). *Climate change 2014: synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Geneva, Switzerland.
- Phuong, N. N. D., Luan, L. T., Dong, V. V., & Khanh, N. L. N. (2020). Examining customers' continuance intentions towards e-wallet usage: The emergence of mobile payment acceptance in Vietnam. *The Journal of Asian Finance, Economics and Business*, 7(9), 505-516. <https://doi.org/10.13106/jafeb.2020.vol7.no9.505>
- Razmkhah, H., Masoudi, A., Rostami Ravari, A., & Fararouie, A. (2023). Evaluation of the climate change effect on meteorological parameters using LARS-WG, Case study: Abadeh station. *Integrated Watershed Management*, 3(2), 16-29. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/iwm.2023.1987752.1058>
- Salmi, T. (2002). *Detecting trends of annual values of atmospheric pollutants by the Mann-Kendall test and Sen's slope estimates-the Excel template application MAKESENS*. Ilmatieteen laitos.

- Sánchez, E., Domínguez, M., Romera, R., De la Franca, N. L., Gaertner, M. A., Gallardo, C., & Castro, M. (2011). Regional modeling of dry spells over the Iberian Peninsula for present climate and climate change conditions. *Climatic Change*, 107(3-4), 625-634. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0114-9>
- Sarabi, M., Dastorani, M. T., & Zarrin, A. (2020). Investigating Impact of Future Climate Changes on Temperature and Precipitation condition (Case Study: Torogh Dam Watershed, Mashhad). *Journal of Meteorology and Atmospheric Science*, 3(1), 63-83. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/jmas.2021.278862.1129>
- Serrano, A., Mateos, V. L., & Garcia, J. A. (1999). Trend analysis of monthly precipitation over the Iberian Peninsula for the period 1921–1995. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, 24(1-2), 85-90. [https://doi.org/10.1016/S1464-1909\(98\)00016-1](https://doi.org/10.1016/S1464-1909(98)00016-1)
- Shahinejad, B., Yonesi, H. A., Kakavand, A., & Yousefi Sohzabi, H. (2023). Evaluation of Climate Change Effects on the Entering Runoff the Makhmalkoh Dam Using the IHACRES Model. *Water and Irrigation Management*, 13(3), 735-754. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22516298.1402.13.3.9.5> [In Persian]
- Shiferaw, H., Gebremedhin, A., Gebretsadkan, T., & Zenebe, A. (2018). Modelling hydrological response under climate change scenarios using SWAT model :the case of Ilala watershed, Northern Ethiopia. *Modeling Earth Systems and Environment*, 4(1), 437–449. <https://doi.org/10.1007/s40808-018-0439-8>