

## Assessing the effects of climate change on droughts in the coming decades in Aras watershed under the CMIP6 model

Fatemeh Vatanparast Ghaleh Juq<sup>1</sup> and Bromand Salahi<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Ph.D. Student of Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

<sup>2</sup> Professor of climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

Received: 23 April 2024

Accepted: 15 October 2024

### Extended abstract

#### Introduction

Human life is constantly affected by various natural hazards, some of which result from climate events and global warming. This issue is so significant that the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) was established to study climate change on a global scale and assess the role of human activity in this matter. One of the consequences of climate change is the occurrence of extreme events such as drought. In fact, with climate change, the intensity and frequency of droughts are becoming more complex. Given the vital role of water in human life, agricultural production, and the environment, it is crucial to assess its adverse effects on the occurrence and severity of droughts. The primary cause of droughts is fluctuations in climatic components, such as decreased precipitation and increased temperature.

#### Materials and methods

This study aimed to predict drought conditions in Ardabil, Ahar, Parsabad, Jolfa, Khoi, and Maku stations, located within the Aras River watershed. To achieve this, the accuracy of the General Circulation Models (GCMs) from the IPCC's CMIP6 dataset was evaluated. The climate models used for forecasting precipitation in the future period (2024–2043) include CanESM5, NorESM2-MM, and MPI-ESM1-2-HR under both optimistic (SSP1-2.6) and pessimistic (SSP5-8.5) emission scenarios. Then, using the Standardized Precipitation Index (SPI), drought characteristics on an annual scale during the historical period (1985–2014) were compared with those in the future period. Model validation was performed using  $R^2$ , RMSE, and NSE parameters. Finally, the SPI drought index was analyzed in terms of intensity and frequency based on the generated precipitation data.

#### Results and discussion

Model evaluation using different error metrics indicated that the CanESM5 model outperformed the others in simulating precipitation for the studied stations. A comparison of the models and scenarios revealed that, according to the MPI-ESM1-2-HR model, drought severity is projected to increase, while the CanESM5 model suggests a rise in drought frequency. The results also indicate that under the most pessimistic scenario, both the number and intensity of dry periods will increase compared to the optimistic scenario. Furthermore, normal conditions are expected to decrease, while the number and frequency of dry periods will rise due to the consequences of climate change in the study area. Additionally, the frequency and intensity of wet years have shown a slight increase compared to the historical period. Overall, climate change is expected to have a significant impact on the future drought conditions in the Aras River watershed.

#### Conclusion

In summary, understanding changes in precipitation and water resources is crucial due to their various applications in agriculture, drinking water supply, and industry. The accuracy of future climate models varies depending on the climate of each region, the month, and the predicted climate variable. The Aras River Basin is facing a decline in water resources due to agricultural activities exceeding capacity and high water consumption in different agricultural sectors. This study aimed to assess the impact of climate change on drought severity and frequency in the Aras River Basin, providing insights for developing intelligent policies for sustainable water and land resource management. The findings confirm the occurrence of

\* Corresponding author: salahi@uma.ac.ir

climate change and, in particular, the recurrence of droughts in the studied stations. Using multiple climate models, as the most reliable tool for generating climate scenarios, not only allows for more accurate forecasts but also helps evaluate uncertainties in future climate conditions. These insights assist planners and decision-makers in better monitoring the adverse effects of drought on water resources and agriculture, enabling proactive planning to mitigate regional losses before a crisis occurs.

**Keywords:** Aras River Valley, Climate, GCM Models, Global Warming, SPI Drought Index

Cite this article: Vatanparast Ghaleh Juq, F., Salahi, B., 2025. Assessing the effects of climate change on droughts in the coming decades in aras watershed under the CMIP6 model. *Water. Eng. Manag.* 17(1), 44-63.

© 2025, The Author(s). Published by Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)



# ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر خشکسالی‌های دهه‌های آتی در حوزه آبخیز ارس تحت مدل CMIP6

فاطمه وطن‌پرست قلعه‌جوق<sup>۱</sup> و برومند صلاحی<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران  
<sup>۲</sup> استاد آب و هواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۲۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۴

## چکیده مبسوط

### مقدمه

حیات انسانی دائماً تحت تأثیر انواع مخاطرات طبیعی قرار دارد که برخی از آن‌ها برآمده از پیشامدهای آب و هوایی و گرمایش جهانی است. ارزشمندی این مسئله به اندازه‌ای است که هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم تأسیس شده تا دگرگونی‌های اقلیمی را در سطح جهانی مطالعه کند و نقش فعالیت بشر را در این مورد ارزیابی کند. یکی از پیامدهای تغییر اقلیم، وقوع رخداد‌های حدی نظیر خشکسالی است. در واقع با رخداد تغییر اقلیم، شدت و فراوانی خشکسالی نیز پیچیده‌تر می‌شود و به دلیل نقش حیاتی آب در زندگی انسان، تولیدات کشاورزی و محیط‌زیست، ارزیابی تأثیرات سوء آن بر وقوع و شدت خشکسالی‌ها اهمیت زیادی دارد. دلیل اصلی پدید آمدن خشکسالی‌ها نیز نوسانات در مؤلفه‌های اقلیمی از جمله کمبود بارش و افزایش دما است.

## مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر با هدف پیش‌بینی خشکسالی در ایستگاه‌های اردبیل، اهر، پارس‌آباد، جلفا، خوی و ماکو واقع در حوزه آبخیز رودخانه ارس انجام شده است. برای این منظور، دقت مدل گردش عمومی هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (CMIP6) مورد ارزیابی قرار گرفت. مدل‌های اقلیمی مورد استفاده در این پژوهش برای پیش‌نگری داده بارش طی دوره آینده (۲۰۲۴-۲۰۴۳) شامل مدل‌های CanESM5، NorESM2-MM و MPI-ESM1-2-HR تحت سناریوهای انتشار خوش‌بینانه (SSP1-2.6) و بدبینانه (SSP5-8.5) هستند. آنگاه با استفاده از شاخص بارش استاندارد شده (SPI)، ویژگی‌های خشکسالی در مقیاس سالانه طی دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۸۵) با دوره آینده مورد سنجش قرار گرفت. سپس صحت‌سنجی مدل‌ها با استفاده از سنج‌های  $R^2$ ، RMSE و NSE انجام و در نهایت با داده‌های تولید شده بارش، شاخص خشکسالی SPI از لحاظ شدت و فراوانی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

## نتایج و بحث

ارزیابی مدل‌ها با سنج‌های خطاسنجی مختلف نشان داد که در شبیه‌سازی بارش ایستگاه‌های مورد مطالعه، مدل CanESM5 بهترین عملکرد را نسبت به سایر مدل‌ها دارد. مقایسه مدل‌ها و سناریوهای استفاده شده در این پژوهش نشان داد که بر مبنای خروجی مدل MPI-ESM1-2-HR، شدت خشکسالی‌ها و تحت مدل CanESM5، فراوانی

خشکسالی‌ها نسبت به سایر مدل‌ها بیشتر شده است. همچنین نتایج نشان داد که در بدبینانه‌ترین حالت ممکن، تعداد و شدت دوره‌های خشک نسبت به سناریوی خوش‌بینانه افزایش خواهد داشت. طبق نتایج حاصل از این پژوهش، دوره‌های دارای وضعیت نرمال کاهش یافته و به تعداد و فراوانی دوره‌های دارای وضعیت خشک افزوده شده که ناشی از پیامدهای تغییر اقلیم در محدوده مورد بررسی است. همچنین، فراوانی و شدت ترسالی‌ها هم به مقدار اندکی نسبت به دوره مورد نظارت افزایش داشته است. بنابراین، تغییرات اقلیمی تا اندازه قابل قبولی بر وضعیت خشکسالی حوزه رود ارس در آینده اثر دارد.

### نتیجه‌گیری

در مجموع می‌توان بیان کرد، آگاهی از میزان تغییرات بارش و منابع آب به دلیل مصارف گوناگون آن برای کشاورزی، شرب و صنعت از ارزشمندی فراوانی برخوردار است. در حالت کلی می‌توان اظهار داشت که قدرت مدل‌های اقلیمی دوره آینده بنا به آب و هوای هر گستره، ماه و متغیر اقلیمی پیش‌نگری شده مختلف است. حوضه رود ارس، به‌علت انجام فعالیت‌های کشاورزی بیش از ظرفیت و مصرف آب در بخش‌های مختلف کشاورزی در معرض کاهش منابع آبی قرار گرفته است. بنابراین، پژوهش حاضر تلاشی به‌منظور بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر شدت و فراوانی خشکسالی حوزه رود ارس بود که می‌تواند سیاست‌های هوشمندانه در مورد مدیریت با پابرجا منابع آب و زمین را ساده نماید. نتایج این پژوهش بر مبنای مدل‌های اقلیمی مورد استفاده، وقوع تغییر اقلیم و به‌خصوص تکرار خشکسالی‌ها را در ایستگاه‌های مورد بررسی تأیید می‌کند. استفاده از مدل‌های اقلیمی متعدد، به‌عنوان معتبرترین ابزار تولید سناریوهای اقلیمی، پیش‌بینی‌ها و مهم‌تر از آن عدم قطعیت‌ها را در شرایط اقلیمی آینده بهتر ارزیابی می‌کند و به برنامه‌ریزان و تصمیم‌گیران کمک می‌کند تا برای مقابله با اثرات سوء خشکسالی در بخش‌های مختلف منابع آب و کشاورزی نظارت بهتری داشته باشند و نیز برنامه‌ریزی‌های قبل از وقوع بحران جهت کاهش خسارات در منطقه را آسان‌تر می‌کند.

### واژه‌های کلیدی: اقلیم، دره رود ارس، شاخص خشکسالی SPI، گرمایش جهانی، مدل‌های GCM

#### مقدمه

یکی از مهم‌ترین کشمکش‌های پیش روی بشریت موضوع تغییر اقلیم است (Esmaeilzadeh et al., 2023). ارزشمندی این مسئله به اندازه‌ای است که هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم<sup>۱</sup> تأسیس شده تا دگرگونی‌های اقلیمی را در سطح جهانی مطالعه کند و نقش فعالیت بشر را در این مورد ارزیابی کند (Pedersen et al., 2022).

عمده‌ترین عوامل تأثیرگذار بر خشکسالی‌های آینده، نیز همین تغییر اقلیم است که می‌تواند از طریق تغییر در ظرفیت نگهداشت آب، الگوهای گردشی و خشکسالی‌های هواشناسی را کنترل کند و سبب کاهش فوری جریان‌های سطحی، کاهش مخازن زیرزمینی، فرسایش آبی و بادی خاک، دگرگونی وضعیت منابع آب‌و خاک، ازدیاد استحصال از آب‌های زیرزمینی و

فرونشست زمین شود (Salahi; Asgari et al., 2023). در واقع خشکسالی حالتی از کمبود بارش و افزایش دما در طی یک دوره معین و در سطح گسترده است (Hajjabad et al., 2020) که اثرات سوء وسیعی بر منابع آبی، محیط‌زیست و کشاورزی دارد (Davoudi et al., 2022; Salehpour jam et al., 2015). شاخص بارش استاندارد شده<sup>۲</sup> یکی از نمایه‌های ارزیابی دوره‌های خشکسالی است که در آن مقیاس زمانی مورد توجه واقع می‌شود (McKee et al., 1993). این شاخص یکی از پر استفاده‌ترین شاخص‌ها برای تحلیل شدت، مدت و فراوانی خشکسالی هواشناسی است (Hayes et al., 2011). خشکسالی هواشناسی زمانی اتفاق می‌افتد که بارندگی سالانه، فصلی و ماهانه به کمتر از میانگین طولانی‌مدت آن برسد و زمانی که مقدار رطوبت موجود در ریشه گیاه به اندازه‌ای کاهش

<sup>2</sup> Standardized Precipitation Index (SPI)

<sup>1</sup> Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

نشان داد، بیشترین افزایش بارش سالانه در ایستگاه نیر به اندازه نه درصد تحت سناریوی RCP4.5 اتفاق افتاده است.

پژوهش (Kouhi (2021)، در رابطه با پیش‌بینی خشکسالی آتی (۲۰۵۰-۲۰۲۱) ایران نشان داد شدت خشکسالی در سناریو RCP8.5 نسبت به دوره پایه افزایش خواهد داشت که پژوهش Hosseini and Azizian (2023)، برای آینده (۲۰۸۰-۲۰۲۱) با مدل اقلیمی GFDL-ESM2M از یافته ایشان پشتیبانی می‌کند. Javan (2021) ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم بر خشکسالی هواشناسی ایستگاه ارومیه در دوره پایه (۲۰۰۵-۱۹۸۶) و آینده (۲۰۷۰-۲۰۳۱) با مدل گزارش پنجم CanESM2 نشان داد مقادیر SPI در دوره طولانی مدت شدت خشکسالی بیشتری را به دنبال دارد. در پژوهش Ashrafzade et al., (2022)، بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر خشکسالی هواشناسی حوزه آبخیز حبله‌رود با مدل HADCM3 و شاخص‌های SPI و DI در دوره پایه (۲۰۱۰-۱۹۹۵) و دوره آتی (۲۰۴۰-۲۰۱۱) بیانگر کاهش وقوع خشکسالی شدید در دهه‌های آتی است. Koochi et al., (2022) اثر تغییر اقلیم بر وضعیت خشکسالی تحت سناریوهای SSP3 و SSP5 در حوزه آبخیز کارون را طی دوره پایه ۲۰۱۴-۱۹۹۱ و آینده ۲۰۹۹-۲۰۲۰ ارزیابی کردند. نتایج حاکی از وجود روند افزایشی دوره‌های خشک و کاهش دوره‌های تر است.

تحلیل اثرات تغییر اقلیم بر بارش و خشکسالی آینده در پژوهش Rajaei (2022) برای ایستگاه قراخیل با خروجی سه مدل CanESM2، CNRM-CM5، CESM1-WACCM تحت سناریوهای انتشار RCP8.5 و RCP2.6 و شاخص بارش استاندارد (SPI) طی دوره پایه (۲۰۰۵-۱۹۸۵) و دوره آینده (۲۰۴۰-۲۰۲۰) نشان داد بارش فصلی تحت هر دو سناریو در بهار کاهش می‌یابد. بررسی اثر تغییر اقلیم بر شدت، مدت و مقدار خشکسالی در پژوهش Delghandi et al., (2023) برای منطقه سمنان طی دوره ۲۰۹۹-۲۰۱۰ نشان داد در سناریوی RCP8.5 در مقایسه با سناریوی RCP4.5،

بباید که سبب پژمردگی و درنهایت کاهش تولید محصولات کشاورزی شود خشکسالی کشاورزی رخ می‌دهد (Zarghami et al., 2013).

تاکنون مطالعات متعددی در رابطه با پیش‌بینی تغییرات خشکسالی برای دوره‌های آینده انجام گرفته است. بررسی تغییرات خشکسالی در شرق رومانی به‌وسیله Dascalu et al., (2016)، با استفاده از سناریوهای RCP4.5 و RCP8.5 و شاخص پالمر<sup>۱</sup> نشان داد تغییرات خشکسالی در وضعیت آینده کم خواهد بود. در پژوهش Kim et al., (2016)، تحلیل فراوانی و مقادیر حدی خشکسالی با استفاده از شاخص SPEI<sup>۲</sup> و سناریو RCP8.5 در کره جنوبی نشان داد میانگین شدت این پدیده در دهه‌های آتی افزایش می‌یابد.

در پژوهشی دیگر Oguntunde et al., (2016)، نشان دادند اثر تغییر اقلیم بر خشکسالی هیدرولوژیکی حوزه ولتا در غرب آفریقا افزایش وسعت خشکسالی‌ها را بین ۲۴ تا ۳۴ درصد برای آینده در پی دارد. در مطالعات Lee et al., (2017)، بررسی اثر تغییر اقلیم بر خشکسالی‌های آتی دشت هوانگهای کره شمالی با شاخص SPEI افزایش شدت خشکسالی از ۱/۲۱ در دوره پایه را به ۱/۳۹ در دهه آتی ۲۰۸۰ نشان داد. نتایج پژوهش Zhai et al., (2020)، نشان داد فراوانی و میانگین شدت خشکسالی طی دوره آتی (۲۰۹۹-۲۰۲۰) در جنوب آسیا بر حسب برآورد مدل CMIP6 افزایش می‌یابد. در مطالعات Dukat et al., (2022)، تحلیل روند خشکسالی اروپا طی دوره زمانی ۲۰۱۵-۱۹۵۱ با استفاده از شاخص‌های SPEI و SPI، افزایش شدت خشکسالی در مقیاس شش ماهه را به دنبال داشت.

Javan and Erfanian, (2020) به تحلیل اثر تغییر اقلیم بر وضعیت خشکسالی ایستگاه تبریز با استفاده از شاخص SPI، DI و مدل HADCM2 تحت سناریوهای RCP در دوره پایه (۲۰۱۶-۱۹۸۷) و آتی (۲۰۸۰-۲۰۲۱) پرداختند. نتایج بیانگر کاهش تعداد خشکسالی در هر سه سناریو نسبت به دوره پایه بود. Sadeqi and Dinpashoh, (2020)، به تحلیل نوسانات بارش در حوضه رود ارس تحت مدل‌های GCM پرداختند. نتایج

<sup>2</sup> Standardized Precipitation Evapotranspiration Index

<sup>1</sup> Palmer Drought Severity Index (PDSI)

احتمالی تغییرات در فراوانی و شدت خشکسالی همراه با تغییر اقلیم در آن است.

همچنین، بر اساس بررسی‌های صورت گرفته تاکنون در کمتر مطالعه‌ای به تأثیر تغییر اقلیم بر وقوع خشکسالی‌های حوضه رود ارس پرداخته شده است و مطالعات پیشین بیشتر معطوف به گزارش پنج تغییر اقلیم هست. بنابراین، پیش‌نگری تغییرات بارش این حوضه در آینده برای طرح‌ریزی و حل مشکلات مدیریت منابع آبی منطقه از ارزشمندی بسیاری برخوردار است. لذا، پژوهش پیش رو باهدف پیش‌بینی اثرات آینده تغییرات آب و هوایی بر وقوع خشکسالی‌های حوضه رود ارس به‌وسیله مدل اقلیمی گزارش ششم ارزیابی هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم (CMIP6) مورد ارزیابی قرار گرفته است.

### مواد و روش‌ها

حوزه آبخیز رود ارس بین مختصات جغرافیایی ۴۴ درجه و ۰۳ دقیقه تا ۴۸ و ۴۱ دقیقه طول شرقی و ۳۷ درجه و ۴۷ دقیقه تا ۳۹ درجه و ۴۶ دقیقه عرض شمالی قرار دارد. بلندترین نقطه آن قله سبلان با ۴۸۱۱ متر و پست‌ترین نقطه با ارتفاع ۲۰ متر در محل خروجی رودخانه ارس واقع در مرز ایران و جمهوری آذربایجان است. شکل ۱، موقعیت جغرافیایی حوضه و پراکنش ایستگاه‌ها را نشان می‌دهد.

**مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری SDSM:** مدل SDSM یکی از پرستفاده‌ترین شیوه‌های آماری ریزگردانی است. این مدل رابطه آماری بین کنش‌های بزرگ‌مقیاس NCEP (با ۲۶ متغیر به‌عنوان پیش‌نگری‌کننده‌ها) و کوچک‌مقیاس (پیش‌نگری شونده‌ها) را بر مبنای شیوه رگرسیون خطی چندگانه برقرار می‌کند. در واقع تلفیقی از دو روش تولید داده‌های آب و هوایی نامعین با رگرسیون خطی است (Hejazizadeh et al., 2022).

در این پژوهش، به‌منظور بررسی شاخص خشکسالی شش ایستگاه هم‌دید اردبیل، اهر، پارس‌آباد، خوی، جلفا و ماکو از داده‌های بارش روزانه در دوره آماری ۲۹ ساله (۲۰۱۴-۱۹۸۵) به‌عنوان مرجع داده‌های مشاهداتی و از مدل‌های اقلیمی CanESM5، NorESM2-MM و MPI-ESM1-2-HR برای دوره تاریخی استفاده شده است. این مجموعه داده به‌عنوان بخشی از مجموعه

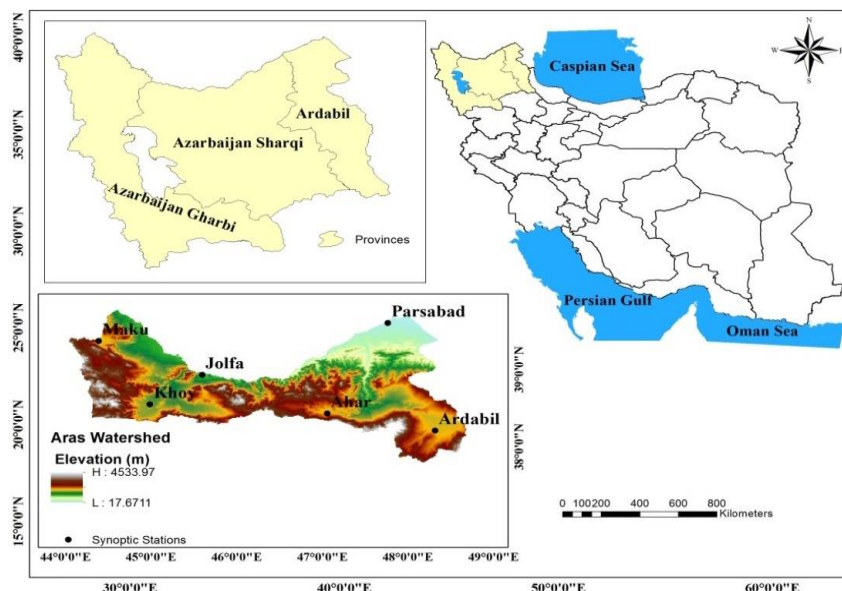
دوره‌های ترسالی و خشکسالی بیشتری وجود خواهد داشت.

پژوهش Seraj Ebrahimi et al., (2023) در ارتباط با بررسی اثر تغییر اقلیم و خشکسالی بر روی آب زیرزمینی در مناطق مرطوب و نیمه مرطوب دشت تالش تحت سناریوهای RCP افزایش میزان بارندگی را نشان داد. نتایج ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر خشکسالی تهران در بررسی‌های Mohammadi and Hedjazizadeh, (2023) طی دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۷۹) و دوره آتی (۲۰۲۴-۲۰۵۹) با مدل CanESM5 تحت سناریو SSP5 با خشکسالی شدید همراه بود. نتایج پژوهش Rahvareh et al., (2023) در بررسی اثر تغییر اقلیم بر خشکسالی‌های حوزه آبخیز زرینه‌رود، بر حسب برآورد شاخص بارش (SPI) و مدل گردش عمومی HADGEM2-ES تحت سناریوهای RCP2.6 و RCP8.5 طی دوره آینده ۲۰۲۵-۲۰۴۹ افزایش تحت RCP 2.6 و کاهش بارش سالانه تحت RCP 8.5 را نسبت به دوره پایه (۲۰۱۸-۱۹۹۰) نشان داد.

ازجمله پژوهش‌های دیگر انجام شده در این زمینه بررسی تغییرات زمانی و مکانی خشکسالی ایران تحت سناریوهای RCP و شاخص SPI به‌وسیله Ghaemi et al., (2022) بود که نتایج آن نشانگر افزایش تغییرات در شدت خشکسالی بود. ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر خشکسالی آینده حوزه آبخیز گرگان رود به‌وسیله (Asgari et al., 2023) با استفاده از شاخص SPEI و مدل CMIP6 تحت دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در دوره ۲۰۲۵-۲۱۰۰ وضعیت نزدیک به نرمال را نشان داد. بررسی شاخص‌های خشکسالی در ایستگاه زابل تحت مدل‌های GCM و سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 در دوره ۲۰۲۵-۲۰۸۴ در پژوهش Forouzan Mehr et al., (2023) مدل CanESM5 را جهت پیش‌بینی مناسب نشان داد. رودخانه ارس یکی از با ارزش‌ترین و پرآب‌ترین رودخانه‌های مرزی ایران است که در تأمین آب کشاورزی، آب آشامیدنی و صنعت مناطق گسترده‌ای از شمال غرب کشور نقش بسیار مهمی را ایفا می‌کند که کاهش آب قابل‌دسترس و از دست رفتن زمین‌های کشاورزی، افزایش دما و تبخیر و تعرق و تأثیر بر محیط‌زیست از پیامدهای

مورد پژوهش به‌وسیله دیگر پژوهشگران و همچنین عملکرد بهتر آنها در شبیه‌سازی بارش محدوده مورد بررسی بود.

مدل‌های ارائه شده در گزارش ششم تغییر اقلیم (CMIP6) تحت سناریوهای SSP است. که انتخاب آنها بر مبنای تکمیل بودن داده‌های تاریخی و سناریوهای مورد احتیاج و عدم مطالعه آنها در منطقه



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های مورد مطالعه

Fig 1. Geographical location of the studied stations

جهت پیش‌بینی تغییرات بارش در ایستگاه‌های همدان به جهت عملکرد بهتر استفاده کرده‌اند. هیئت بین‌الدول تغییر اقلیم در تدوین گزارش ششم خود از سناریوهای جدیدی به نام مسیرهای اجتماعی و اقتصادی مشترک<sup>۱</sup> استفاده می‌کند که با نماینده خطوط سیر غلظت پروژه گزارش پنجم<sup>۲</sup> گازهای گلخانه‌ای تلفیق شده است (Eyring et al., 2015). در پژوهش حاضر دو سناریو خوش‌بینانه (SSP1-2.6) و بدبینانه (SSP5-8.5) به‌علت کاربرد بیشتر مورد استفاده قرار گرفته است.

مدل‌های اقلیمی به‌عنوان ابزار اساسی در مطالعات تغییر اقلیم هستند و تأثیر به‌سزایی در دقت و صحت پیش‌نگری‌ها دارند. به‌دلیل عملکرد متفاوت این مدل‌ها و زیاد بودن تعداد آنها در پیش‌بینی متغیرهای اقلیمی برای نقاط مختلف دنیا قبل از استفاده از خروجی این مدل‌ها، توانایی آنها مورد ارزیابی قرار گرفت. در همین راستا، برای انتخاب مدل‌های مناسب، میانگین داده‌های ماهانه تاریخی (۲۰۱۴-۱۹۸۵) مدل‌های ریزمقیاس

مدل CanESM5 یک مدل جهانی است که برای شبیه‌سازی تغییرات اقلیمی و توسعه پیش‌بینی‌های فصلی و دهه‌ای گسترش داده شده است. این مدل در پژوهش (Mohammadi et al., 2024) کارایی بهتری را در شبیه‌سازی بارش حوزه آبخیز طالقان نشان داد. همچنین، در پژوهش (Salahi and Foroutan, 2024) برای شهرستان اردبیل دو مدل CanESM5 و NorESM2-MM عملکرد بهتری را در تخمین بارش نشان دادند.

(Babaeian et al., 2021) در ایران، (2022) et al., Abdolalizadeh در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه و (2024) Maleki Meresht et al., در شمال غرب ایران، (2023) Babaeian et al., در ایران، (2023) Salahi et al., در حوزه دریاچه ارومیه، (2023) در دشت اردبیل مدل MPI-ESM1-2-HR را به جهت کارایی بهتر برای بررسی تغییرات بارش به‌کار برده‌اند. (2022) ErshFath et al., نیز مدل NorESM2-MM را

<sup>2</sup> Representative Concentration Pathway (RCP)

<sup>1</sup> Shared Socioeconomic Pathways (SSP)

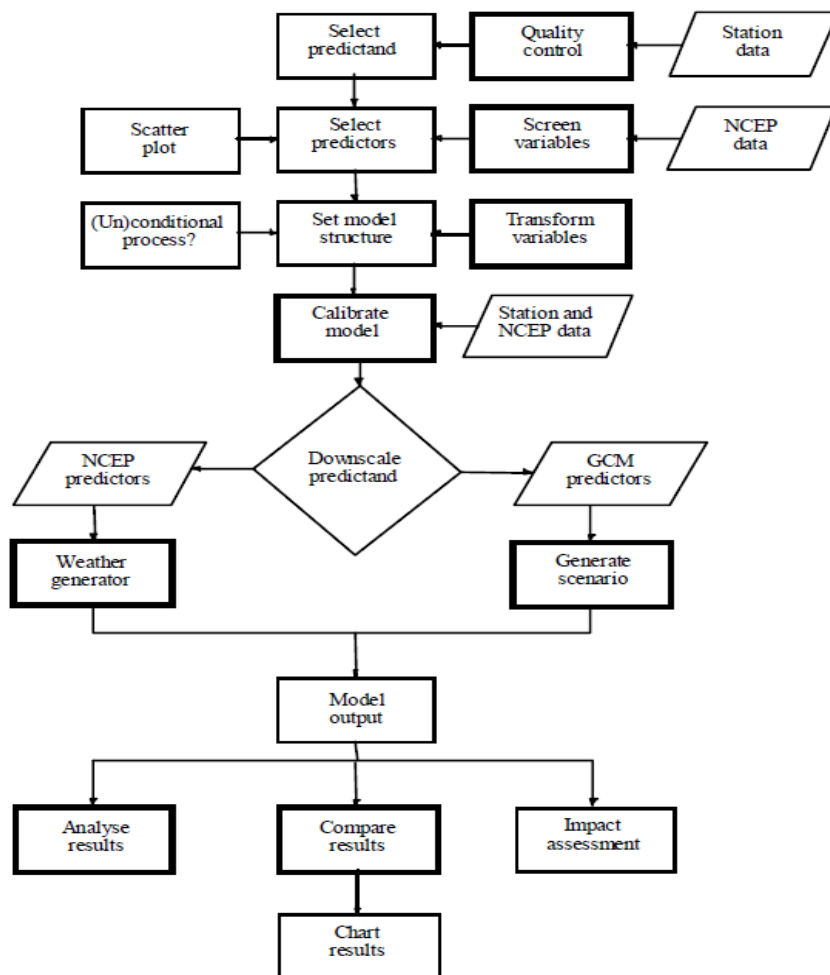
در نهایت، از بین مدل‌های موجود، سه مدل مذکور در دو دوره آینده (۲۰۲۴-۲۰۴۳) و پایه برای آنالیز داده‌ها و تولید سناریو انتخاب شد. در جدول ۱، اطلاعات کلی مدل‌ها و در شکل ۲ مراحل ریزمقیاس‌نمایی با مدل SDSM ارائه شده است.

نمایی شده در برابر میانگین داده‌های ماهانه مشاهداتی ایستگاه‌ها قرار گرفت. در واقع دوره تاریخی انتخاب شده برای داده‌های مشاهداتی با توجه به مشترک بودن داده‌های هواشناسی و داده‌های مدل‌های تاریخی و سناریوهای منتخب IPCC تعیین شده است که

جدول ۱- مشخصات مدل‌های CMIP6 مورد استفاده در پژوهش

Table 1. Specifications of CMIP6 models used in the research

Model name	Institution/Country	Resolution (km)
CanESM5	CCC/Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis/Canada	500
NorESM2-MM	NCC/NorESM Climate Modeling Consortium/Norway	100
MPI-ESM1-2-HR	MPI-M/Max Planck Institute Meteorology/Germany	100



شکل ۲- دارنمای مراحل ریزمقیاس‌نمایی با مدل SDSM (Robert and Wilby, 2004)

Fig 2. The representation of exponential Downscaling steps with the SDSM model (Robert and Wilby, 2004)

نشان‌دهنده میزان خطای مدل است و بهترین مقدار آن برابر صفر است و این نمایه از طریق رابطه (۲) محاسبه می‌شوند (Sedaqat Kerdar and Fatahi, 2008).

به منظور ارزیابی دقت مدل‌ها از سه نمایه استفاده شد. نمایه ضریب تعیین  $R^2$  که معیاری بدون بعد است و بهترین مقدار آن برابر با یک در نظر گرفته می‌شود (رابطه ۱). نمایه مجذور میانگین مربعات خطا که



در هر رویداد خشکسالی، فراوانی ارزش‌های محدود در طبقات شدت خشکسالی به‌عنوان فراوانی آن طبقه از شدت خشکسالی مشخص می‌شود. در جدول ۲، طبقات خشکسالی SPI قابل مشاهده است (Raziei et al., 2007; Teymouri Yeganeh et al., 2021). فراوانی خشکسالی به درصد رخداد خشکسالی هم اشاره دارد (رابطه ۶) (Torabinezhad et al., 2023). در رابطه (۶)، DS شدت خشکسالی، DM بزرگی خشکسالی و DL طول دوره خشکسالی است.

$$DM = \frac{DS}{DL} \quad (۶)$$

جدول ۲- مقیاس طبقه‌بندی مقادیر SPI

**Table 2.** Classification scale of SPI values

Drought Classification	SPI Range
Extremely Wet	>2
Very Wet	1.5 to 1.99
Moderately Wet	1 to 1.49
Near Normal	0.99 to -0.99
Moderately Dry	-1 to -1.49
Severely Dry	-1.5 to -1.99
Extremely Dry	< -2

در پژوهش حاضر پس از تهیه داده‌های مشاهداتی و همچنین مدل‌های اقلیمی و منطقه‌ای کردن داده‌های بزرگ‌مقیاس و ریزگردانی این داده‌ها با مدل SDSM، اقدام به محاسبه شاخص SPI برای سه مدل مذکور شد و شرایط خشکسالی و تغییرات آن در دوره آینده (۲۰۲۴-۲۰۴۳) نسبت به دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۸۵) با استفاده از روش درون‌یابی معکوس فاصله (IDW) پهنه‌بندی و مورد ارزیابی قرار گرفتند.

شاخص SPI می‌تواند برای بررسی و پیش‌خشکسالی از نظر شدت و فراوانی مفید باشد که برای هر منطقه بر اساس بارندگی‌های بلندمدت ثبت شده آن محاسبه می‌شود. در واقع شاخص‌های خشکسالی روش‌هایی هستند که با خلاصه نمودن اطلاعات مربوط به خشکسالی به‌صورت دوره‌ای، اطلاعات رطوبتی موجود در منطقه را نشان می‌دهند (Dastourani et al., 2024). به‌منظور محاسبه این شاخص ابتدا داده‌های بارندگی ماهانه استخراج و سری‌های زمانی آنها تشکیل می‌شود. سپس میانگین و انحراف معیار سری‌های زمانی موردنظر محاسبه شده و مقدار SPI تعیین می‌شوند (Farmanara et al., 2020). برای مطالعه خشکسالی شاخص نمره Z بر اساس رابطه (۷) انتخاب شد (Raziei et al., 2003).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N X_{0i} X_{si}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N X_{0i}^2 \sum_{i=1}^N X_{si}^2}} \quad (۱)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_{0i} - X_{si})^2}{N}} \quad (۲)$$

نمایه ناش-ساتکلیف (NSE) یک نمایه بدون بعد است که هرچه به یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده هماهنگی بیشتر بین داده‌های مشاهداتی است. اگر این نمایه بیش از ۰/۷۵ باشد، نتایج شبیه‌سازی مدل خوب و اگر بین ۰/۳۶ تا ۰/۷۵ باشد، نتایج قابل قبول است و با رابطه (۳) محاسبه می‌شود (Abedini et al., 2022; Babolhakami et al., 2019).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (X_{0i} - X_{si})^2}{\sum_{i=1}^n (X_{0i} - \bar{X}_s)^2} \quad (۳)$$

محاسبه شاخص خشکسالی: برای ارزیابی و پیش‌خشکسالی معمولاً چندین ویژگی خشکسالی قابل شناسایی است که در پژوهش حاضر مشخصه‌های شدت و فراوانی از شاخص استاندارد شده بارندگی (SPI) استخراج شد. برای استخراج مشخصه‌های گوناگون خشکسالی از تئوری ران (RUN) استفاده می‌شود (Yevjevich, 1967). بر مبنای این تئوری طول دوره خشکسالی یا تداوم آن (DD)، عبارت است از زمانی که مقدار شاخص خشکسالی به پایین‌تر از آستانه مربوطه (به‌طور مثال -۱) برسد (رابطه ۴) (Masoompoor et al., 2024). samakoosh et al., 2024 خشکسالی زمانی شروع می‌شود که مقادیر SPI منفی باشد، خشکسالی زمانی شروع می‌شود و زمانی پایان خواهد یافت که SPI به مقادیر مثبت برسد. شدت هر دوره خشکسالی شروع در ماه i ام طبق رابطه (۵) بیان می‌شود. به‌بیان‌دیگر، شدت خشکسالی، مدت یا زمان تداوم خشکسالی به‌عنوان دوره کسری بارش در زمان مشخص، یا تعداد ماه‌هایی که یک رویداد خشکسالی به طول می‌انجامد، شناخته می‌شود (Mozaffari et al., 2021).

$$DL = t_f - t_i + 1 \quad (۴)$$

در رابطه (۴)، DL طول دوره خشکسالی،  $t_i$  و  $t_f$  ترتیب زمان پایان و شروع خشکسالی است.

$$DS = \sum_{i=1}^n |X_c - X_i| \quad (۵)$$

در رابطه (۵)، DS شدت خشکسالی، dl تعداد کل ماه‌های همراه با خشکسالی،  $X_0$  نقطه آستانه خشکسالی و  $X_t$  ماه رویداد است.

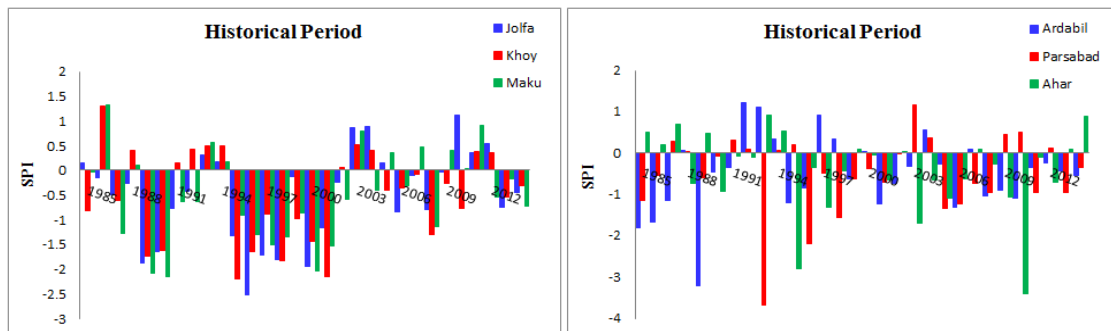
وضعیت نزدیک به نرمال و وضعیت ترسالی متوسط تا خیلی شدید در یک دوره سالانه بررسی شد. شکل ۳، سری زمانی بارش و روند شاخص SPI سالانه ایستگاه‌های واقع در حوزه رود ارس را طی دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۱۴) نشان می‌دهد. مطابق شکل روند کلی شاخص در سه ایستگاه اردبیل، پارس‌آباد و اهر با مقیاس سالانه برای بیشتر سال‌ها مقادیر کمتر از صفر دارد که نشان‌دهنده شدت بیشتر خشکسالی در این ایستگاه‌ها است. در ایستگاه‌های جلفا، خوی و ماکو دوره مورد مطالعه به دو بخش تقسیم شده از سال ۱۹۸۵ تا سال ۲۰۰۰، شدت وقوع خشکسالی خیلی شدید بوده است، در حالی که از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۲ ایستگاه‌ها بیشتر در وضعیت نزدیک به نرمال تا خیلی مرطوب قرار گرفته‌اند.

$$Z = \frac{(P-\mu)}{\delta} \quad (7)$$

که در آن  $Z$ ، شاخص نمره استاندارد،  $P$  مقدار بارش هر ماه،  $\mu$  میانگین جامعه و  $\delta$  انحراف معیار جامعه است.

### نتایج و بحث

دامنه تغییرات خشکسالی ایستگاه‌ها از نظر شدت و فراوانی با استفاده از شاخص SPI در دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۱۴): مقیاس‌های زمانی مختلف می‌تواند روند ترسالی و خشکسالی را در هر دوره نشان دهد. در این پژوهش از آمار بارش شش ایستگاه واقع در حوزه رود ارس استفاده شد و وضعیت خشکسالی و ترسالی در این ایستگاه‌ها از نظر شدت و فراوانی (نسبت میانگین بلندمدت خشکسالی ایستگاه‌های مورد مطالعه بر تعداد آنها) برای سه طبقه خشکسالی متوسط تا خیلی شدید،



شکل ۳- سری زمانی شاخص SPI سالانه ایستگاه‌های واقع در حوزه رود ارس در دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۱۴)

Fig 3. Time series of the annual SPI index of the stations located in the Aras River watershed in the base period (1985-2014)

به سایر مدل‌ها بر حسب کمترین مقدار RMSE و بیشترین مقدار NSE و همبستگی است که هم‌راستا با نتایج پژوهش Babolhakami et al., (2019) و Ashrafzade et al., (2022) است.

ارزیابی عملکرد مدل CMIP6: نمودار مقایسه آماری داده‌های مشاهداتی و توانایی داده‌های دوره تاریخی مدل‌ها در تخمین و برآورد بارش دوره پایه مطابق جدول ۳، نشان‌دهنده دقت بیشتر و خطای کمتر مدل CanESM5 در شبیه‌سازی پارامتر بارش ماهانه نسبت

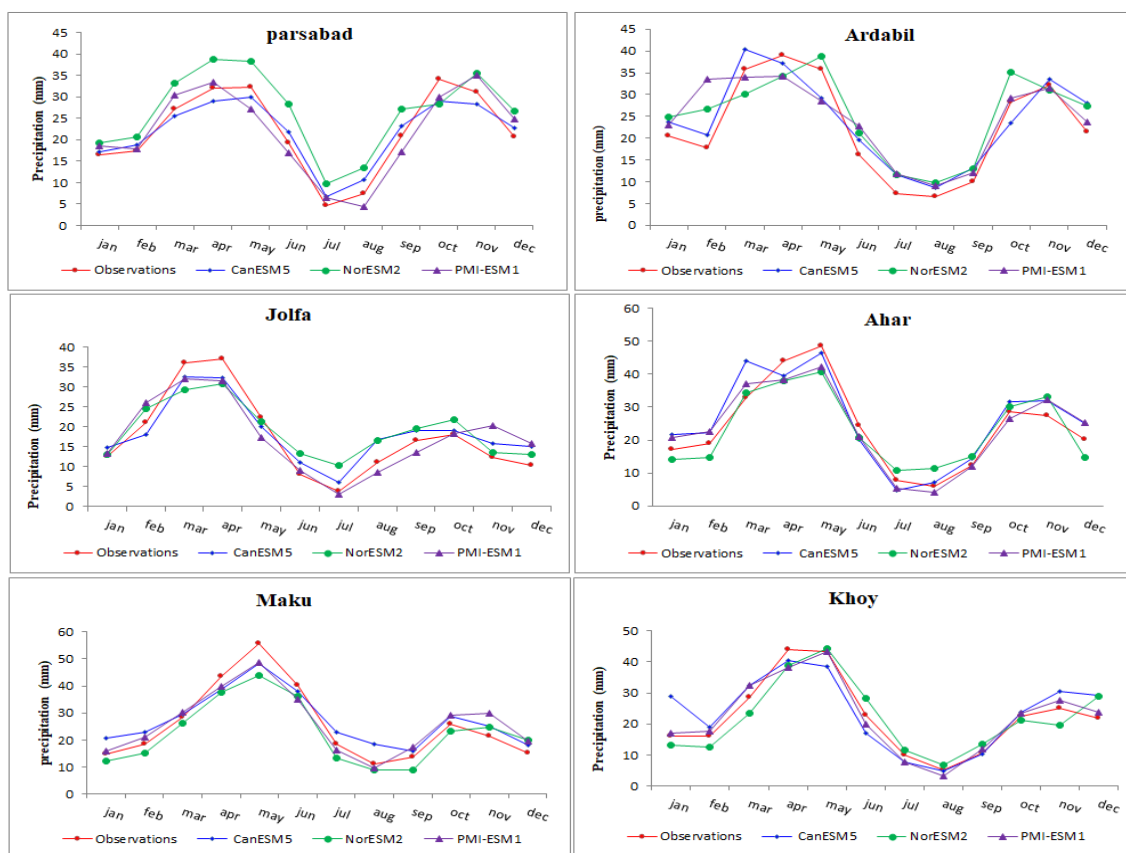
جدول ۳- سنج‌های آماری جهت ارزیابی عملکرد مقادیر مشاهداتی و پیش‌بینی شده بارش برای ایستگاه‌های منتخب طی دوره آماری (۱۹۸۵-۲۰۱۴)

Table 3. Statistical measures to evaluate the performance of observed and predicted precipitation values for selected stations during the statistical period (1985-2014)

Station	NSE			R <sup>2</sup>			RMSE		
	CanESM5	NorESM2	PMI-ESM1	CanESM5	NorESM2	PMI-ESM1	CanESM5	NorESM2	PMI-ESM1
Ardabil	0.86	0.78	0.71	0.88	0.86	0.75	4.125	5.11	5.89
Parsabad	0.92	0.60	0.87	0.97	0.89	0.89	2.61	5/84	3.22
Khoy	0.90	0.87	0.94	0.81	0.90	0.95	2.33	4.09	2.65
Maku	0.89	0.85	0.89	0.98	0.92	0.92	4.52	5.03	4.24
Ahar	0.86	0.86	0.85	0.88	0.87	0.88	4.76	4.57	4.80
Jolfa	0.87	0.80	0.82	0.95	0.92	0.83	3.46	4.40	4.18

ایستگاه‌های جلفا و ماکو طی ماه‌های آوریل و می ضعف‌هایی دیده می‌شود و کم برآوردی نسبت به مقادیر دیده‌بانی شده را نشان می‌دهد و با پژوهش Fatai et al., (2016) هم‌راستا است. در ایستگاه پارس‌آباد نیز تحت مدل NorESM2-MM طی ماه‌های می تا ژوئن بیش برآورد نسبت به دوره تاریخی دیده می‌شود و در باقی ماه‌ها تفاوت مقدار دو سری ناچیز است و علی‌رغم اختلاف در برخی ماه‌ها، الگوی تغییرات بارش به‌خوبی مدل شده است (شکل ۴).

برای واسنجی و صحت سنجی مدل، داده‌های مشاهداتی با داده‌های تولید شده توسط مدل‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد اختلاف معنی‌داری در میانگین داده‌های مشاهداتی و دوره ارزیابی و تنظیم مدل‌ها در داده تولید شده وجود ندارد که این به معنای همخوانی بیشتر متغیر بارش بین داده‌های مشاهداتی و خروجی سه مدل اقلیمی در دوره تاریخی است. همچنین، در توانمندی مدل‌ها برای مدل‌سازی بارش



شکل ۴- مقایسه بارش ماهانه مشاهداتی و شبیه‌سازی شده ایستگاه‌های واقع در حوزه رود ارس با استفاده از مدل CanESM5 طی دوره آماری (۲۰۱۴-۱۹۸۵)

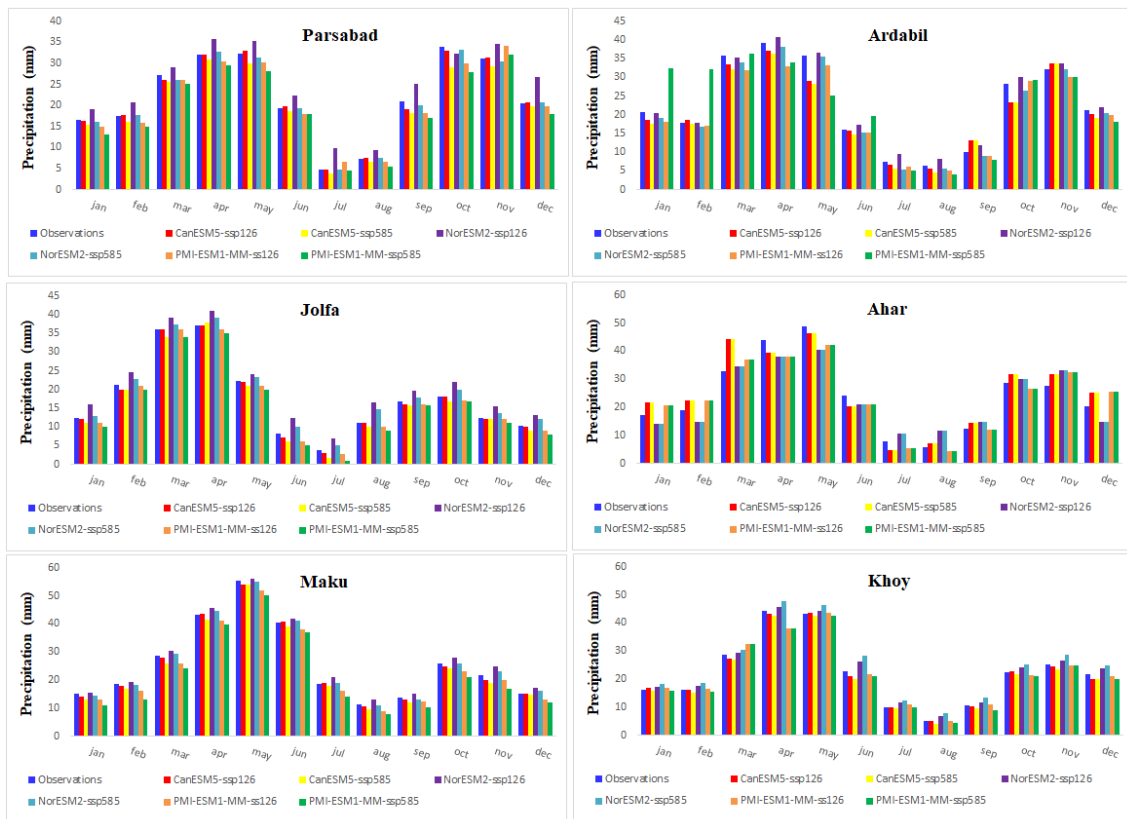
Fig 4. Comparison of observed and simulated monthly precipitation of the stations located in the Aras River watershed by the CanESM5 model during the statistical period (1985-2014)

بارش متوسط در تمامی ماه‌ها و برای تمام سناریوها و مدل‌ها سیر کاهشی را نشان می‌دهد و متوسط بارندگی در سناریوی SSP5-8.5 نسبت به سناریوی خوش‌بینانه با کاهش بیشتری روبه‌رو بوده است. پیش‌نگری مدل NorESM2-MM از دو مدل دیگر مقادیر عددی بیشتر و پیش‌بینی بیشتری را نشان می‌دهد و در آن بارش

پس از اطمینان از صحت مدل‌ها در برآورد بارش، شبیه‌سازی تغییرات بارش برای دوره آتی (۲۰۴۳-۲۰۲۴) با مدل‌های CanESM5، NorESM2-MM و MPI-ESM1-2-HR تحت دو سناریو SSP1-2.6 و SSP5-8.5 نسبت به دوره پایه انجام شد. بر این اساس با توجه به نمودارهای رسم شده (شکل ۴) پیش‌نگری تمام مدل‌ها تقریباً شبیه به هم هستند و نتایج بررسی

ایستگاه‌ها با ماه‌های آوریل و می همراه بوده است.

حدود پنج میلی‌متر بیشتر نسبت به دوره پایه قابل مشاهده است و بیشترین مقدار بارندگی ماهانه



شکل ۴- مقایسه تغییرات متوسط بارش ماهانه ایستگاه‌ها در دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۸۵) و دوره آینده (۲۰۲۴-۲۰۴۳) برای سه مدل و دو سناریوی اقلیمی

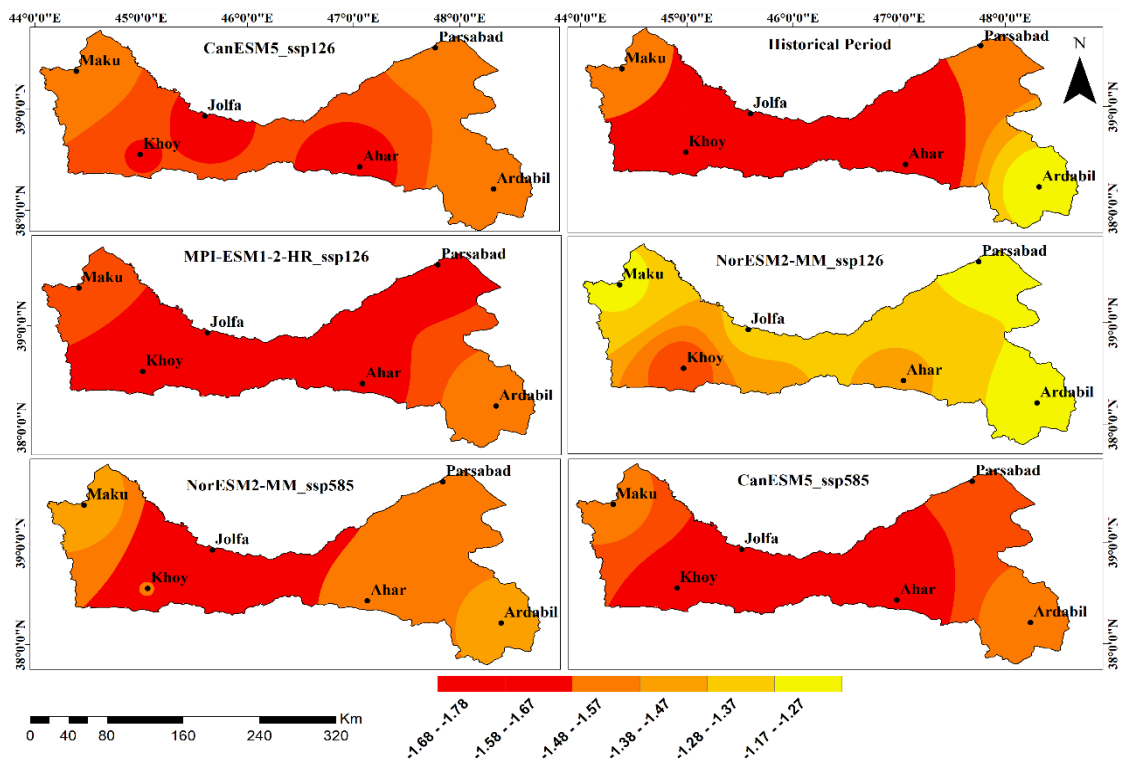
Fig 4. Comparison of the average monthly precipitation changes of the stations in the base period (1985-2014) and the future period (2024-2043) for three models and two climate scenarios

را در دوره آینده با دامنه بین مقدار ۱/۱۷- تا ۱/۷۸- نسبت به دوره پایه نشان می‌دهد. در بدبینانه‌ترین حالت ممکن بیشینه و اوج خشکسالی‌های مشاهده شده در ایستگاه‌های خوی، اهر و جلفا قابل مشاهده است. تنها در مدل NorESM2-MM تحت سناریوی SSP126 شدت دوره خشکسالی کوتاه اما تعداد رویدادها زیاد است.

در حالت کلی برآورد دو سناریو در برخی سال‌ها هماهنگ باهم و گاهی متفاوت از هم هستند و در کل افت‌وخیز سال‌به‌سال خشکسالی در هر دو سناریو زیاد است. دلیل اینکه دامنه تغییرات در سناریو بدبینانه نسبت به سناریو خوش‌بینانه بیشتر است، می‌تواند نشان‌دهنده عدم قطعیت بیشتر سناریو بدبینانه نسبت به سناریوی دیگر در برآورد شاخص SPI باشد که همساز با پژوهش Yaghoobzadeh et al., (2018) است.

شکل (۶) شدت وقوع خشکسالی ایستگاه‌ها را به‌وسیله سه مدل اقلیمی CanESM5، NorESM2- و MPI-ESM1-HR برحسب شاخص SPI و سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 برای دو دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۹۵) و دوره آینده (۲۰۲۴-۲۰۴۳) نشان می‌دهد. مطابق شکل، با مبنا قرار دادن شدت خشکسالی‌های دوره پایه ایستگاه‌های مورد مطالعه مشاهده می‌شود که شدت خشکسالی‌ها در تمام قسمت‌های محدوده مورد بررسی تحت سناریوی SSP1-2.6 دو مدل CanESM5 و MPI-ESM1-HR نسبت به دوره پایه افزایش داشته است که این موضوع احتمال وقوع خشکسالی‌های شدید را برای دوره آتی اطلاع می‌دهد.

نتایج سناریوی SSP5-8.5 نسبت به سناریو حد پایین در سه مدل مقادیر بالاتری از شدت خشکسالی‌ها



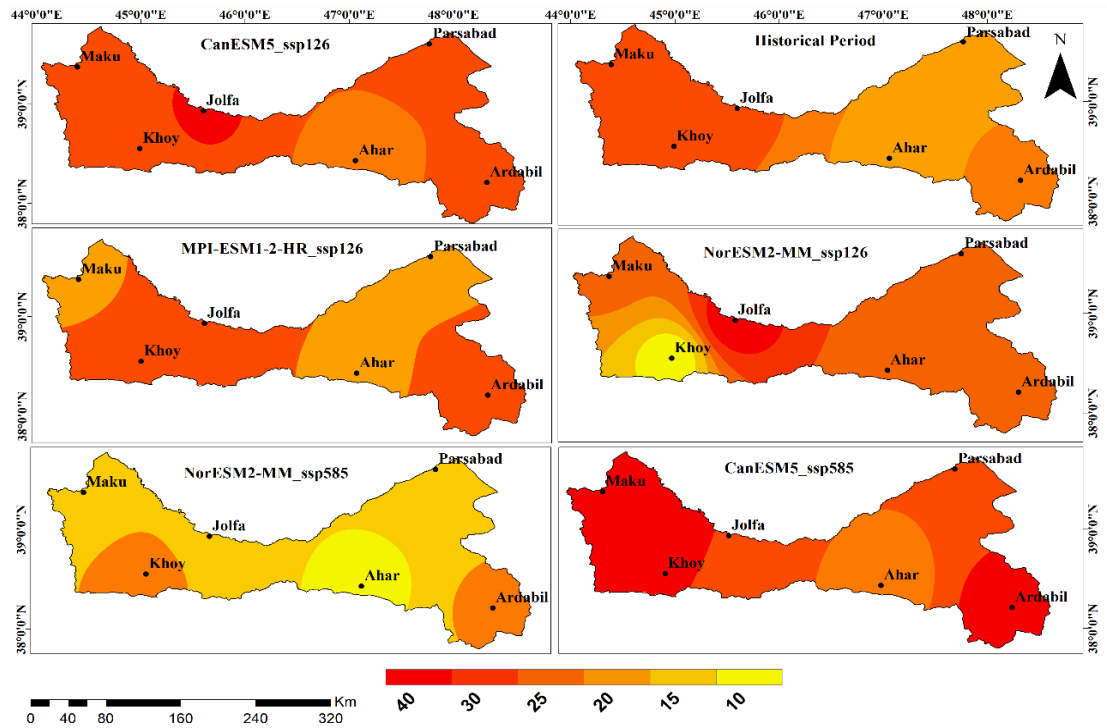
شکل ۶- تغییرپذیری مکانی ویژگی‌های شدت خشکسالی‌های سالانه ایستگاه‌های واقع در حوزه رود ارس در طول دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۱۴) و تغییرات آن در آینده (۲۰۲۴-۲۰۴۳)

Fig 6. Spatial variability of the characteristics of the intensity of annual droughts of the stations located in the Aras River watershed during the base period (1985-2014) and its changes in the future (2024-2043)

پایه افزایش داشته است که با پژوهش Delghandi et al., (2023) نامساز است.

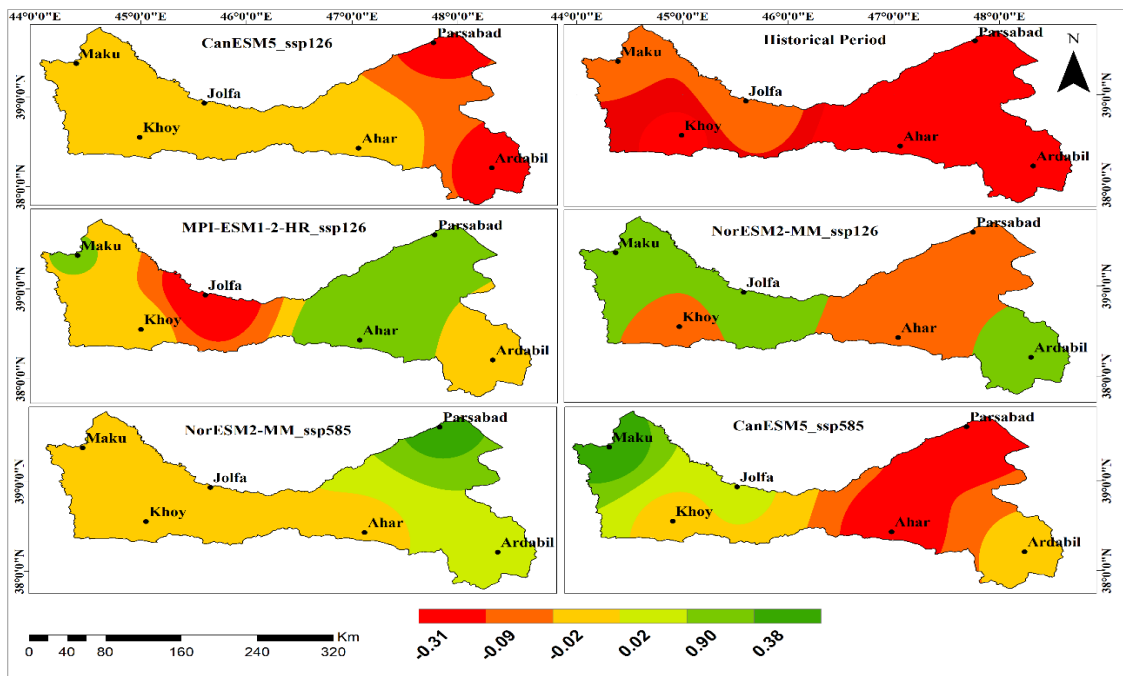
شکل ۸، شدت طبقه نزدیک به نرمال را برای ایستگاه‌های مورد بررسی نشان می‌دهد. در دوره پایه دامنه تغییرات طبقه نزدیک به نرمال در تمام ایستگاه‌ها بین ۰/۳۸ تا ۰/۳۱- بوده است که بیشترین آن مربوط به ایستگاه‌های اهر، جلفا و خوی و کمترین آن مربوط به ایستگاه‌های ماکو و اردبیل است. دامنه تغییرات منفی دوره نزدیک به نرمال دوره آینده تحت دو سناریو مورد بررسی نسبت به دوره پایه افزایش پیدا کرده و تمایل به سمت خشکسالی متوسط داشته است. این تغییرات در سناریو بدبینانه نسبت به سناریوی دیگر بیشتر بوده است که دامنه تغییرات آن بین ۰/۳۸ تا ۰/۳۱- بوده و تفاوت فراوانی را با دوره پایه نشان می‌دهد و در بین ایستگاه‌ها مقدارهای اوج تغییرات منفی در ایستگاه جلفا شدیدتر است.

به‌منظور بررسی بیشتر شرایط خشکسالی در دوره آینده و پایه، فراوانی وقوع خشکسالی‌ها برحسب درصد (نسبت تعداد روزهای وقوع خشکسالی بر تعداد کل روزها در ایستگاه‌های منتخب) نیز بررسی شد. با توجه به شکل ۷، می‌توان بیان کرد، در دوره پایه فراوانی وقوع خشکسالی ایستگاه‌ها بین ۱۵ تا ۳۰ درصد متغیر بوده است. درحالی‌که بر اساس مقادیر SPI تولید شده توسط مدل‌ها برای سناریوهای SSP حد پایین و حد بالا، افزایش تعداد فراوانی وقوع خشکسالی‌ها روی داده است. به‌عبارت‌دیگر، بر فراوانی وقوع خشکسالی‌ها در دوره آینده افزوده شده که این افزایش با رسیدن به سناریو حد بالا نسبت به سناریو حد پایین از مقدار چشمگیرتری برخوردار شده است و با نتایج پژوهش Zarrin and Dadashi-Roudbari (2021) که نشان دادند شدت و فراوانی خشکسالی‌های ایران طی دوره آتی رو به افزایش خواهد بود همسو است. به‌طورکلی شدت و فراوانی پیش‌بینی شده توسط شاخص SPI تحت سناریوی SSP5-8.5 در دوره آتی نسبت به دوره



شکل ۷- تغییرپذیری مکانی ویژگی‌های درصد فراوانی خشکسالی‌های سالانه ایستگاه‌های واقع در حوزه رود ارس در طول دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۸۵) و تغییرات آن در آینده (۲۰۲۴-۲۰۴۳)

Fig 7. The spatial variability of the characteristics of the frequency (%) of annual droughts of the stations located in the Aras River watershed during the base period (1985-2014) and its changes in the future (2024-2043)

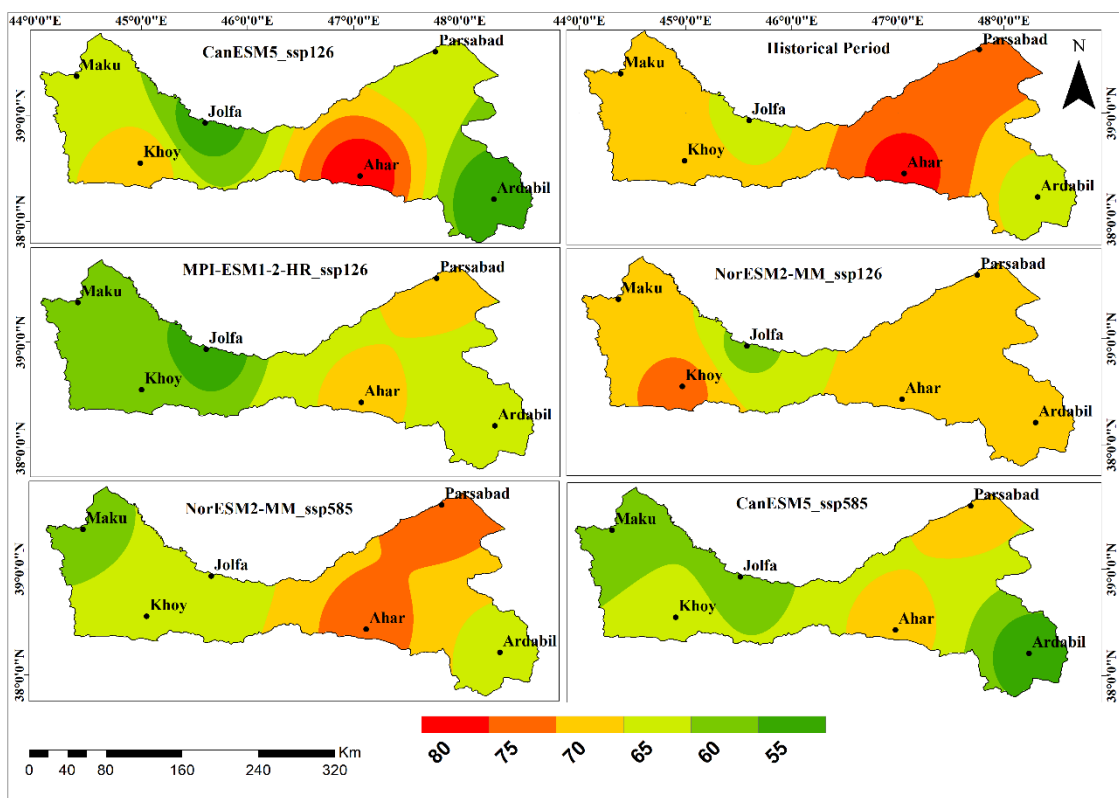


شکل ۸- تغییرپذیری مکانی ویژگی‌های شدت طبقه نزدیک به نرمال سالانه ایستگاه‌های واقع در حوزه رود ارس در طول دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۸۵) و تغییرات آن در آینده (۲۰۲۴-۲۰۴۳)

Fig 8. The spatial variability of the characteristics of the near-normal annual layer intensity of the stations located in the Aras river watershed during the base period (1985-2014) and its changes in the future (2024-2043)

است. با مدنظر قرار دادن دوره پایه، این درصد به‌غیر از مدل NorESM2-MM در دو مدل دیگر در دوره آتی کاهش پیدا کرده است. به‌طوری‌که از ۸۰ درصد در ایستگاه اهر طی دوره پایه به مقدار بین ۷۰ تا ۷۵ درصد در سناریو بدبینانه کاهش پیدا کرده است (شکل ۹).

درصد فراوانی وقوع در طبقه نزدیک به نرمال نشان می‌دهد هم در دوره پایه و هم در دوره آینده در هر سه مدل بیشترین فراوانی‌ها مربوط به طبقه نرمال بوده است و با افزایش و کاهش شدت طبقات ترسالی و خشکسالی، فراوانی آنها نیز کاهش یافته که با پژوهش Javan., (2021) و Ashrafzade et al., (2022) همساز



شکل ۹- تغییرپذیری مکانی ویژگی‌های درصد فراوانی طبقه نزدیک به نرمال سالانه ایستگاه‌های واقع در حوزه رود ارس در طول دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۱۴) و تغییرات آن در آینده (۲۰۲۴-۲۰۴۳)

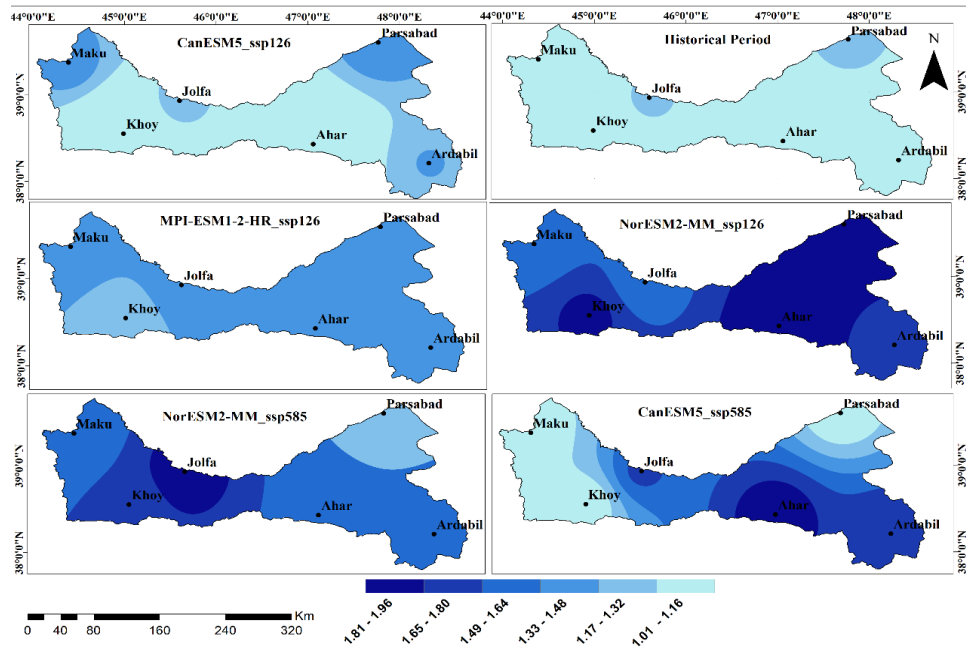
Fig 9. Spatial variability of the frequency (%) characteristics of the class close to the annual normal of the stations located in the Aras river watershed during the base period (1985-2014) and its changes in the future (2024-2043)

در مدل اقلیمی MPI-ESM1-MM تحت سناریوی SSP5-8.5 طبقه خشکسالی از لحاظ شدت نسبت به سناریوی حد پایین کاهش داشته ولی مدت آن افزایش یافته است. در طبقه نزدیک به نرمال هم شدت و هم مدت آن افزایش داشته درحالی‌که در طبقه ترسالی از شدت و مدت ترسالی کاسته شده است (شکل ۱۲). در حالت کلی مقادیر SPI حاصل از روش ریزمقیاس نمایی توسط مدل اقلیمی CanESM5 با در نظر گرفتن دو سناریو خوش‌بینانه (SSP1-2.6) و بدبینانه (SSP5-8.5) در مقیاس زمانی سالانه نشان داد، در تمامی ایستگاه‌های مورد بررسی به‌ترتیب وضعیت نزدیک به

مطابق با شکل (۱۰ و ۱۱) شدت و فراوانی دوره ترسالی در ایستگاه‌های مورد بررسی چندان چشمگیر نبوده است. به‌عبارت‌دیگر ناهمساز با پژوهش Mafi Madani et al., (2013) در همه ایستگاه‌های مورد بررسی طبقه ترسالی در دهه آتی پیش‌بینی شده نسبت به دوره پایه افزایش داشته است که در مدل NorESM2-MM بیشترین تعداد افزایش در شدت طبقه ترسالی دیده می‌شود. در مقابل تحت مدل CanESM5 در هر دو سناریو شدت فراوانی دوره‌های ترسالی نسبت به دوره پایه افزایش و مدت آن کاهش یافته است.

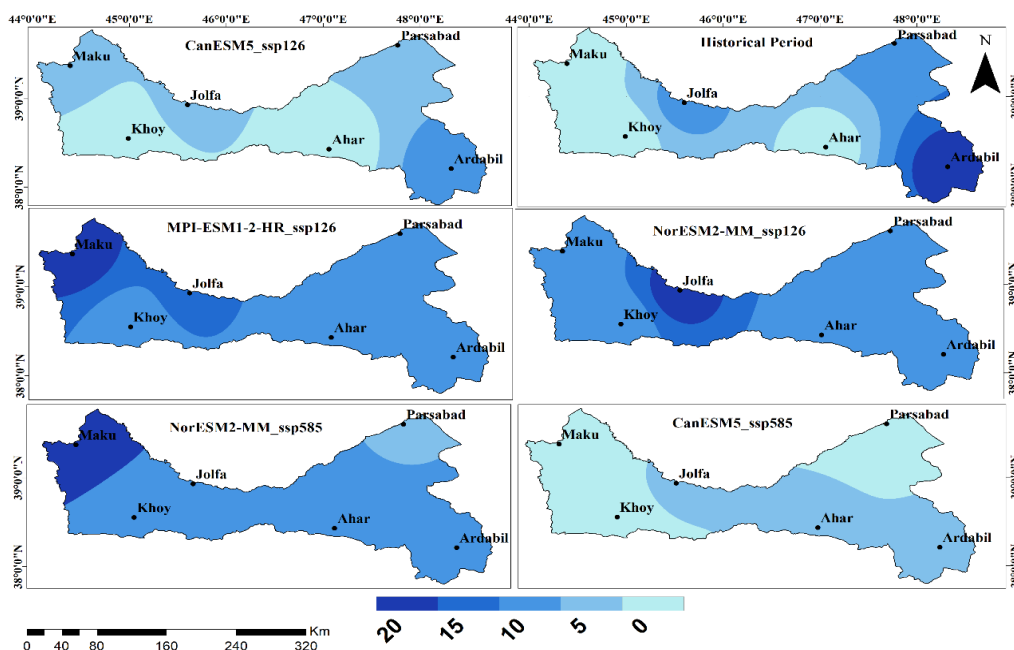
به صورت خشکسالی خیلی شدید و در حدود ۷ درصد موارد خشکسالی به صورت خیلی شدید بوده است و تنها در چهار درصد باقی مانده شرایط نیمه مرطوب مشاهده می شود.

نرمال، خشکسالی متوسط و خشکسالی خیلی شدید بیشترین تکرار را داشته اند. در کل ایستگاه های مورد بررسی در ۶۰ درصد موارد طبقه نزدیک به نرمال، در ۱۶ درصد موارد خشکسالی متوسط، در ۱۳ درصد موارد



شکل ۱۰- تغییرپذیری مکانی ویژگی های شدت ترسالی های سالانه ایستگاه های واقع در حوزه رود ارس در طول دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۱۴) و تغییرات آن در آینده (۲۰۲۴-۲۰۴۳)

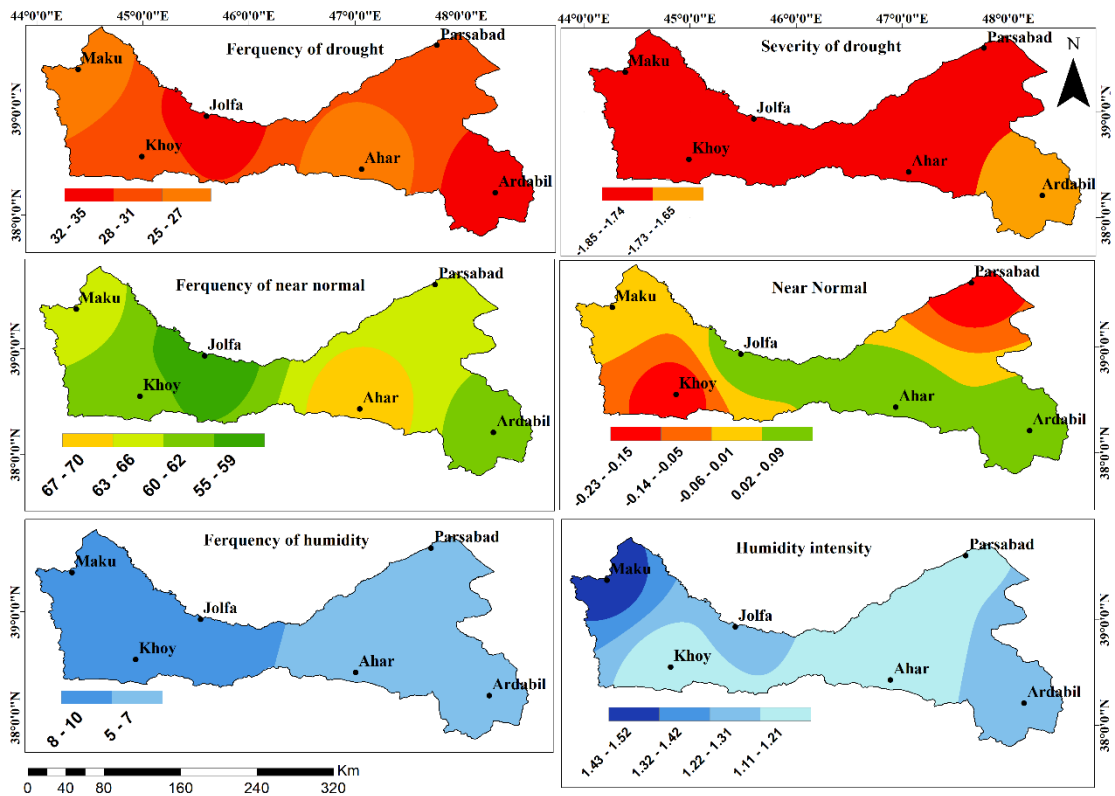
Fig 10. Spatial variability of the characteristics of the annual wet intensity of the stations located in the Aras River watershed during the base period (1985-2014) and its changes in the future (2024-2043)



شکل ۱۱- تغییرپذیری مکانی ویژگی های درصد فراوانی ترسالی های سالانه ایستگاه های واقع در حوزه رود ارس در طول دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۱۴) و تغییرات آن در آینده (۲۰۲۴-۲۰۴۳)

Fig. 11. Spatial variability of the frequency (%) characteristics of the annual wet of the stations located in the Aras River watershed during the base period (1985-2014) and its changes in the future (2024-2043)





شکل ۱۲- تغییرپذیری مکانی ویژگی‌های خشکسالی سالانه ایستگاه‌های واقع در حوزه رود ارس در طول دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۱۴) و تغییرات آن در آینده (۲۰۲۴-۲۰۴۳) توسط مدل MPI-ESM1-MM تحت سناریوی SSP585

Fig. 12. Spatial variability of annual drought characteristics of the stations located in the Aras River watershed during the base period (1985-2014) and its changes in the future (2024-2043) by the PMI-ESM1 model under the SSP585 scenario

### نتیجه‌گیری

آگاهی از میزان تغییرات بارش و منابع آب به دلیل مصارف گوناگون آن برای کشاورزی، شرب و صنعت از ارزشمندی فراوانی برخوردار است. در حالت کلی می‌توان اظهار داشت که قدرت مدل‌های اقلیمی دوره آینده بنا به آب و هوای هر گستره، ماه و متغیر اقلیمی پیش‌نگری شده مختلف است. حوزه رود ارس، به‌علت انجام فعالیت‌های کشاورزی بیش از ظرفیت و مصرف آب در بخش‌های مختلف کشاورزی در معرض کاهش منابع آبی قرار گرفته است. بنابراین، پژوهش حاضر تلاشی به‌منظور بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر شدت و فراوانی خشکسالی حوزه رود ارس بود که می‌تواند سیاست‌های هوشمندانه در مورد مدیریت با پابرجا منابع آب و زمین را ساده نماید. نتایج ارزیابی اولیه عملکرد مدل‌های CanESM5، NorESM2-MM و MPI-ESM1-2-HR در دوره تاریخی (۱۹۸۵-۲۰۱۴) نشان داد که مدل‌ها به‌طور کلی عملکرد قابل قبولی در شبیه‌سازی بارش داشتند و این موضوع در باب برآورد

بارش دوره آتی دارای ارزشمندی بسیاری است. نتایج بررسی ویژگی‌های خشکسالی‌های حوزه رود ارس (شدت و فراوانی وقوع خشکسالی) در دوره پایه و تغییرات آنها توسط مدل‌های گردش عمومی تحت سناریوهای انتشار SSP1-2.6 و SSP5-8.5 برای افق (۲۰۲۴-۲۰۴۳) نسبت به دوره پایه در مقیاس سالانه نشان داد، بهترین مدل برای محدوده مورد بررسی مدل CanESM5 است. نتایج حاصل از شاخص استاندارد بارندگی SPI در مقیاس سالانه نشان داد در شرایط فعلی دو دوره متفاوت خشکسالی (۱۹۹۱-۱۹۸۵ و ۲۰۱۴-۱۹۹۴) در ایستگاه‌های اردبیل، پارس‌آباد و اهر وجود دارد که شدت و فراوانی خشکسالی در دوره دوم نسبت به دوره اول بیشتر است. در افق آینده نیز شدت خشکسالی نسبت به دوره پایه در هر سه مدل اقلیمی به‌جز سناریوی حد پایین مدل NorESM2-MM (Javan and Erfanian, 2020) افزایش می‌یابد که با پژوهش (Javan and Erfanian, 2020) ناهم‌ساز است. تغییرپذیری زیاد طبقات خشکسالی با مدل MPI-ESM1-2-HR همراه است.



- Ebrahimi, N., Zarrin, A., Mofidi, A., Dadashi-Roudbari, A., 2023. Projected precipitation extremes in Lake Urmia Basin under climate change. *Water Soil* 37(5), 769-785.
- Ershadfath, F., Raeini Sarjaz, M., Shahnazari, A., Eivind Olesen, J., 2022. Application of linear scaling post-processing method for bias correction of climate models retrieved from CMIP6. *Iran-Water Resour. Res.* 18(3), 131-144 (in Persian).
- Esmailzadeh, Z., Salahi, B., Saber, M., 2023. Revealing the relationship between the changes of some relative humidity indices of the southern coasts of Iran with Indian Ocean teleconnection patterns. *Amphibious Sci. Technol.* 4(3), 59-78 (in Persian).
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G.A., Senior, C.A., Stevens, B., Stouffer, R.J., Taylor, K.E., 2015. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geosci. Model Dev.* 9, 1937-1958.
- Farmanara, S., Bakhtiari, B., Sayari, N., 2020. Meteorological drought characteristics analysis under climate change effect using copula in Fars Province. *Water Soil* 34(5), 1157-1173 (in Persian).
- Fatai, A., Azizi, A., Seyed Safaviyan, T., Imani, A., Ojaghi, A., Farhadi, H., 2016. Prediction of the changes in some climate variables in Darehrood River of Aras Basin over next decades using of GCM Models. *Sci. Quart. Environ. Geol. Res.* 11(29), 1-12 (in Persian).
- Forouzan Mehr, M., Dastourani, M., Yaghoobzadeh, M., Hoseinabadi, S., 2023. Forecasting the risk of drought in Zabol synoptic station based on the output of CMIP6 climate models. *Irriga. Sci. Engineer.* 46(3), 69-84 (in Persian).
- Ghaemi, A., Hashemi Monfared, S.A., Bahrpeyma, A., Mahmoudi, P., Zounemat-Kermani, M., 2022. Spatiotemporal variation of projected drought characteristics of Iran under the climate change scenarios. *J. Meteorol. Atmosph. Sci.* 5(1), 68-80 (in Persian).
- Hajiabadi, F., Hassanpour, F., Yaghoobzadeh, M., Hammami, H., 2020. Projection of agricultural drought using fifth IPCC assessment report data, case study: Birjand Region. *J. Agricul. Meteorol.* 8(1), 51-61 (in Persian).
- Hayes, M., Svoboda, M., Wall, N., Widhalm, M., 2011. The lincoln declaration on drought indices: universal meteorological drought index recommended. *J. Am. Meteorol. Soc.* 92(4), 485-488.
- Hejazizadeh, Z., Akbari, M., Sasanpour, F., Hosseini, A., Mohammadi, N., 2022. Investigating the effects of climate change on torrential rains in Tehran Province. *Water Soil Manage. Model.* 2(2), 87-105 (in Persian).
- Hosseini, M., Azizian, A., 2023. Studying the effect of climate change on drought conditions and climate regions of Iran using aridity index. *J. Water Soil Resour. Conserv.* 13(49), 111-129 (in Persian).
- Javan, K., 2021. Investigation of meteorological drought in Urmia using SPI under climate change scenarios (RCP). *Climate Change Res.* 2(5), 81-94 (in Persian).
- Javan, K., Erfanian, M., 2020. Assessing the impact of climate change on the drought status in Tabriz station during future periods using LARS-WG. *Iran. Water Res. J.* 14(3), 97-106 (in Persian).
- Kim, B.S., Chang, I.G., Sung, J.H., Han, H.J., 2016. Projection in future drought hazard of South Korea based on RCP climate change scenario 8.5 using SPEI. *Adv. Meteorol.* 4148710.
- Koohi, S., Azizian, A., Mazandarani Zadeh, H., 2022. The effects of climate change on drought conditions using fuzzy logic under SSP3 and SSP5 scenarios. *Iran-Water Resour. Res.* 18(3), 1-17 (in Persian).
- Kouhi, M., 2021. Projection of future drought characteristics under RCPs scenarios in the four climate zones of Iran. *J. Climatol. Res.* 12(47), 55-33 (in Persian).
- Lee, S., Yoo, S., Choi, J., Bae, S., 2017. Assessment of the impact of climate change on drought characteristics in the Hwanghae Plain, North Korea using time series SPI and SPEI: 1981-2100. *Water*, 9(8), 579.
- Maleki Meresht, R., Salahi, B., Saber, M., 2024. Analyzing the changes in precipitation in northwest Iran during the coming decades based on the GCM Models. *J. Geograph. Plan* (in Persian).
- Masoompour Samakosh, J., Miri, M., Rezaei, S., 2024. Analysis of drought characteristics (severity, duration, magnitude) in Iran based on multivariate standardized drought index. *Advanc. Technol. Water Efficie.* 4(1), 82-98 (in Persian).
- McKee, T.B., Doesken Kleist, N.J., 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Preprints 8th Conference on Applied Climatology, Anaheim, CA.* 170-184.
- Moafi Madani, S.F., Mousavi Baygi, M., Ansari, H., 2012. Prediction of drought in the Khorasan Razavi Province during 2011-2030 by using statistical downscaling of HADCM3 model output. *J. Geograph. Environ. Hazards* 1(3), 21-38 (in Persian).
- Mohammadi, N., Hedjazizadeh, Z., 2024. The effects of climate change on increasing the risk of drought in Tehran using CMIP6 scenarios. *Water Soil Manage. Model.* 4(2), 133-148 (in Persian).
- Mohammadi, P., Malekian, A., Salajegheh, A., Nouri, M., Rafiei, H., 2024. Simulation of climate change scenarios using the CMIP6 models, case study: Taleqan Watershed. *Integrat. Watershed Manage.* (in Persian).

- Mozaffari, E., Moradi, N., Bazrafshan, O., 2021. Spatio-temporal variability of characteristics of meteorological drought in Iran under climate change scenarios. *Desert Manage.* 8(16), 153-163 (in Persian).
- Oguntunde, P.G., Abiodun, B.J., Lischeid, G., 2017. Impacts of climate change on hydro meteorological drought over the Volta Basin, West Africa. *Global Planet Change* 155, 121-132.
- Pedersen, J.T.S., Vuuren, D., Gupta, J., Santos, F.D., Jae Edmonds, J., Swart, R., 2022. IPCC emission scenarios: How did critiques affect their quality and relevance 1990–2022?. *Global Environ. Chang.* 75(102538).
- Rahvareh, M., Motamedvaziri, B., Moghaddamnia, A., Moridi, A., 2023. Investigating meteorological and hydrological drought in Zarrineh River basin. *Desert Ecosys. Engineer.* 11(37), 15-26 (in Persian).
- Rajaei, F., 2022. Drought forecasting under the approach of future climate change, case study: Qarakhil. *J. Environ. Sci. Studies* 7(2), 4990-5001 (in Persian).
- Raziei, T., Daneshkar Arasteh, P., Akhtari, R., Saghafian, B., 2007. Investigation of meteorological droughts in the Sistan and Baluchestan Province, using the standardized precipitation index and markov chain model. *Iran-Water Resour. Res.* 3(1), 25-35 (in Persian).
- Raziei, T., Shokouhi, A., Saghafian, B., 2003. Forecasting the intensity, duration and frequency of drought using probabilistic methods and time series, case study of Sistan and Baluchistan Province. *Desert* 8(2), 310 -292 (in Persian).
- Robert, L., Wilby, W., 2004. Using SDSM Version 3.1 - A decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. A Consortium for the Application of Climate Impact Assessments (ACACIA), Canadian Climate Impacts Scenarios (CCIS) Project, Environment Agency of England and Wales.
- Sadeqi, A., Dinpashoh, Y., 2020. Fluctuations analysis of rainfall and runoff in aras border basin under climate change conditions. *Protection Water Soil Resour.* 10(2), 83-96 (in Persian).
- Salahi, B., Foroutan, M., 2024. Monitoring and modeling the precipitation of Ardabil Plain in the coming decades based on the output of some GCMs. *Hydrogeomorphol.* 11(39), 99-81 (in Persian).
- Salahi, B., Moradi, M., 2024. Downscaling and investigation of climate change and its effect on temperature and precipitation in some western and coastal stations of Iran (Ahvaz, Bushehr, and Bandar-Lengeh). *Amphibi. Sci. Technol.* 5(1), 14-27 (in Persian).
- Salahi, B., Saber, M., Vatanparast Ghaleh Juq, F., 2023. Simulating and predicting the effects of climate change using some new scenarios of SSP and CMIP6 models on rainfall changes in Ardabil County. *J. Geograph. Environ. Studies*, 51(13) (in Persian).
- Salehpour Jam, A., Karimpour Reihan, M., Mohseni Saravi, M., Bazrafshan, J., Khalighi Sigaroudi, S., 2017. Investigation of climate change effect on drought characteristics in the future period using the HadCM3 model, case study: Khoy Station, Northwest of Iran. *Desert* 22(1), 43-50 (in Persian).
- Sedaghat Kerdar, A., Fatahi, E., 2008. Drought early warning methods over Iran. *Geograph. Develop.* 6(11), 59-76 (in Persian).
- Seraj Ebrahimi, R., Eslamian, S., Zareian, M.J., 2023. Investigation of the effects of climate change and meteorological drought on groundwater drought in wet and semi-humid areas, case study: Talesh plain. *Water Resour. Engineer.* 16(56), 54-68 (in Persian).
- Teymouri Yeganeh, M., Teymouri Yeganeh, L., 2021. Evaluating the trend of rainfall and temperature changes and their effects on meteorological drought in Kermanshah Province. *J. Environ. Res. Technol.* 6(10), 123-134 (in Persian).
- Torabinezhad, N., Zarrin, A., Dadashi-Roudbari, A., 2023. Analysis of different types of droughts and their characteristics in Iran using the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI). *Water Soil* 37(3), 473-486 (in Persian).
- Yaghoobzadeh, M., Amirabadizadeh, M., khozaymehnezhad, H., Zeraatkar, Z., 2018. The evaluation of the three downscaling methods in Meteorological droughts forecasting under the effects of climate change. *Iran. Jo. Irriga. Drain.* 12(2), 323-334 (in Persian).
- Yevjevich, V.M., 1967. Objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts. An Doctoral dissertation, Colorado State University.
- Zarghami, M., Babaian, I., Hassanzadeh, Y., Kanani, K., 2013. Study of climate change and its effects on drought, case study: East Azerbaijan Province. *Watershed Sci. Engineer. Quart.* 18, 61-76 (in Persian).
- Zarrin, A., Dadashi-Roudbari, A., 2021. Drought risk management in a changing climate: the role of national policies and the Drought Management Plan (DMP). *J. Water Sustain. Develop* 8(1), 107-112 (in Persian).
- Zhai, J., Mondal, S.K., Fischer, T., Wang, Y., Su, B., Huang, J., Tao, H., Wang, G., Ullah, W., Uddin, M.J., 2020. Future drought characteristics through a multi-model ensemble from CMIP6 over South Asia. *J. Atmospheric Res.* 246(105111).