

Drought trend analysis and forecasting in the Moghan Plain using the SPI index and CMIP6 climate models

Mahdi Frotan ¹, Bromand Salahi ^{2*}, Batool Zeinali ³, Ebrahim Mesgari ⁴

¹ Ph.D. Student of Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohagheh Ardabili, Ardabil, Iran

² Professor of Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohagheh Ardabili, Ardabil, Iran

³ Professor of Climatology, Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohagheh Ardabili, Ardabil, Iran

⁴ Department of Physical Geography, Faculty of Geography and Environmental Planning, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

Extended Abstract

Introduction

Drought is a complex and gradual climatic phenomenon that has widespread environmental, economic, and social impacts due to long-term reductions in rainfall and the scarcity of water resources. As global climate change intensifies, resulting in warmer and drier conditions, both the frequency and severity of droughts are increasing, thereby necessitating more precise monitoring systems and comprehensive quantitative analyses. Indices such as SPI are used to identify and assess the severity and frequency of droughts. Droughts are typically categorized into three distinct types, meteorological, agricultural, and hydrological, each of which exerts unique impacts on natural resources and anthropogenic activities. Meanwhile, the Moghan Plain, as one of the country's important agricultural regions, has been severely affected by recent droughts.

Materials and Methods

This study employed the Standard Precipitation Index (SPI) and CMIP6 climate models to predict future drought conditions in the Moghan Plain. Precipitation data from 15 meteorological and rain gauge stations were obtained from the Iranian Meteorological Organization (IRIMO.IR) and the Ardabil Regional Water Company. Then, 10 valid models from the sixth CMIP6 report, which are known for their superior performance in simulating precipitation parameters based on previous studies, were selected, and their historical data were collected. The CMhyd downscaling model and four bias correction methods were used to correct data biases. In order to evaluate the efficiency of the models, the corrected data were compared with observational data, and the top five models were selected. Then, using the Hamadi weighted average method for the top models, precipitation changes were predicted for two emissions scenarios (moderate (SSP2-4.5) and pessimistic (SSP5-8.5) climate scenarios). Finally, the drought situation was examined at 6 and 12-month time scales and the trend of changes was analyzed using the modified Mann-Kendall test.

Results and Discussion

The performance of CMIP6 models with four bias correction methods showed that the linear precipitation scaling method produced the best results. The EC-Earth3 model was recognized as the most accurate model, followed by the GFDL-ESM4, EC-Earth3-Veg, MIROC6, and MRI-ESM2-0 models. Spatio-temporal analysis of annual precipitation in the Moghan Plain shows a decrease in the precipitation pattern from the southeast to the northwest. Projections indicate an increase in annual precipitation and a decrease in precipitation in warmer months under SSP2-4.5 (medium emission) and SSP5-8.5 (high emission) scenarios, which could jeopardize the sustainability of agriculture in the Moghan Plain by affecting water availability during the growing season. Analysis of the six-month SPI index during the observation period shows an increasing trend and a decrease in drought intensity in most stations. However, in the SSP2-4.5 scenario, Garmi and Zahra stations, and in SSP5-8.5, Garmi, Dasht, and Parsabad stations are projected to experience a decrease in SPI and an increase in drought. The results of the 12-month SPI analysis also confirm an increasing trend in most stations and a decrease in drought intensity during the observation period. In SSP2-4.5, no significant changes are observed, indicating a relatively stable climate. However, under SSP5-8.5, some stations such as Agha Mohammad Biglo and Dasht show a significant decreasing trend, pointing to more severe and prolonged droughts. The analysis of the frequency of the six-month SPI index (period 1985–2014) shows that the normal condition was the most frequent, followed by drought and mild and moderate wetness, while severe events were observed less frequently. In the period 2025–2050, under SSP2-4.5,

the frequency of drought and mild wetness events is expected to increase, while severe events are projected to decrease. In SSP5-8.5, despite the increase in precipitation, the concentration of mild and moderate droughts will increase in autumn. The climatic sequence during the observation period shows that the normal class has the most stable condition, and droughts are mainly short-term. In the future, long-term normal sequences will continue, but some areas of the Moghan Plain will face a higher risk of drought. In the statistical and spatial analysis of the observation period with a 12-month scale, the normal class has the highest frequency, indicating the relative stability of the climate. The stations of Qarakhan Biglo and Parsabad are known as unstable centers, and the Zahra station is known as a highly stable center. In the SSP2-4.5 scenario, the normal class continues to dominate, but seasonal fluctuations increase, especially in summer. Stations such as Oslandoz and Shourestan will have more severe fluctuations. In SSP5-8.5, similar conditions are also seen with greater intensity. The months of June and September are relatively more stable, while March and August show the peaks of drought and wetness. The drought classification time series shows that the normal class tends to persist for longer periods, especially in five-month and long-term durations. Meanwhile, short-term mild and moderate droughts are frequently observed in most stations. In the future, although the pattern of frequency and sequence will be relatively stable, the severity of extreme conditions will increase at some stations.

Conclusion

In this study, the linear precipitation scaling method was identified as the most effective technique for bias correction of CMIP6 climate models in simulating the rainfall of the Moghan Plain. The EC-Earth3 model showed superior performance and was used together with four other models to build the Hamadi model. The results of the base period (1985–2014) confirmed the spatial pattern of precipitation with a maximum in the east and southeast and a minimum in the west of the region. Climate projections for the period 2025–2050 indicate an increase in annual precipitation in most areas, especially in the west of the region, while summer precipitation is expected to decrease. The Standardized Drought Index (SPI) at six-month and twelve-month scales showed that in the SSP2-4.5 scenario, relative climate stability is maintained, but in SSP5-8.5, the probability of more severe droughts increases. Despite the continued dominance of the normal class, seasonal fluctuations and the intensity of extreme phenomena will increase at some stations.

Keywords: Meteorological Drought, CMIP6, CMhyd downscaling, SSP scenarios, Moghan Plain

Article Type: Research Article

Acknowledgement

We would like to express our sincere gratitude to the University of Mohaghegh Ardabili for its valuable academic support and research environment, which greatly facilitated the development of this work, originally derived from the author's doctoral dissertation.

Conflicts of interest

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

Data Availability Statement:

The datasets are available upon a reasonable request to the corresponding author.

Authors' contribution

Mahdi Frotan: Writing - original draft preparation; **Bromand Salahi:** Formal analysis and investigation ;**Batool Zeinali:** Visualization, Supervision; **Ebrahim Mesgari:** Conceptualization, methodology

*Corresponding Author, E-mail: salahi@uma.ac.ir

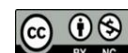
Citation: Frotan, M., Salahi, B., Zeinali, B., & Mesgari, E. (2025). Drought trend analysis and forecasting in the Moghan Plain using the SPI index and CMIP6 climate models. *Water and Soil Management and Modelling*, 5(3), 230-260.
doi: 10.22098/mmws.2025.17356.1594

Received: 02 May 2025, Received in revised form: 09 June 2025, Accepted: 09 June 2025, Published online: 23 September 2025.

Water and Soil Management and Modeling, Year 2025, Vol. 5, No. 3, pp. 230-260.

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





تحلیل روند و پیش‌نگری خشکسالی در دشت مغان با بهره‌گیری از شاخص SPI و مدل‌های اقلیمی CMIP6

مهدی فروتن^۱، برومند صلاحی^{۲*}، بتول زینالی^۳، ابراهیم مسگری^۴

^۱ دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
^۲ استاد آب و هواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
^۳ استاد آب و هواشناسی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران
^۴ دکتری اقلیم شناسی، دانشکده جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

چکیده

خشکسالی به عنوان یکی از چالش‌های مهم اقلیمی، تأثیرات گسترده‌ای بر منابع آب و کشاورزی دارد. هدف این پژوهش، پیش‌نگری وضعیت خشکسالی هواشناسی دشت مغان بر پایه تحلیل بارش در بازه‌ی ۲۰۵۰-۲۰۲۵ با استفاده از شاخص SPI و مدل‌های اقلیمی نسل ششم (CMIP6)، طبق دو سناریوی اقلیمی متوسط SSP2-4.5 و بدبینانه SSP5-8.5 است. در این مطالعه، داده‌های بارش مشاهده‌ای از ۱۵ ایستگاه هواشناسی منطقه جمع‌آوری شد. سپس، ۱۰ مدل از مدل‌های اقلیمی نسل ششم (CMIP6) انتخاب شد. با توجه به بزرگ‌مقیاس بودن خروجی مدل‌ها، فرآیند ریزمقیاس‌نمایی آماری و تصحیح ارببی با استفاده از ابزار CMhyd انجام شد. این فرآیند با بهره‌گیری از چهار روش مختلف تصحیح بایاس شامل مقیاس‌بندی خطی، مقیاس‌بندی شدت محلی بارش، تبدیل توانی و نگاشت توزیع، داده‌ها را به مقیاس ایستگاهی تبدیل و خطاهای سیستماتیک مدل‌ها را کاهش داد. کارایی مدل‌ها با معیارهای ارزیابی R^2 ، MSE، RMSE و MAE ارزیابی و از نتایج ۵ مدل برتر (EC-Earth3، GFDL-ESM4، EC-Earth3-Veg، MIROC6، MRI-ESM2-) در محاسبه میانگین وزنی همادی این مدل‌ها برای پیش‌نگری بارش دوره آینده استفاده شد و خشکسالی در مقیاس‌های ۶ و ۱۲ ماهه بررسی شد. نتایج نشان داد که روش مقیاس‌بندی خطی بارش کارآمدترین روش برای تصحیح ارببی مدل‌های CMIP6 بوده و مدل اقلیمی EC-Earth3 بهترین عملکرد را دارد. در دوره پایه، بیش‌ترین بارش در ایستگاه‌های باران‌سنجی زهرا و بيله‌سوار و کم‌ترین در بران مشاهده شد. تحلیل روند شاخص SPI با آزمون Mann-Kendall اصلاح شده نشان داد که تنها ایستگاه بران در مقیاس شش‌ماهه با افزایش معنادار خشکسالی مواجه است. در افق آینده، بر اساس سناریوی SSP2-4.5 خشکسالی در ایستگاه‌های سینوپتیک گرمی و باران‌سنجی زهرا افزایش می‌یابد و تحت سناریوی SSP5-8.5، ایستگاه‌های گرمی و پارس‌آباد با خشکسالی‌های شدیدتر روبه‌رو خواهند شد. در مقیاس ۱۲ ماهه، بهبود شاخص SPI در بیش‌تر ایستگاه‌ها مشاهده می‌شود، اگرچه در SSP5-8.5 کاهش شاخص در ایستگاه‌های متعددی پیش‌بینی شده است. با این حال، طبقه نرمال خشکسالی هم‌چنان در دوره‌های آتی حاکم خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: خشکسالی هواشناسی، CMIP6، ریزمقیاس‌نمایی CMhyd، سناریوهای SSP، دشت مغان.

نوع مقاله: کاربردی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: salahi@uma.ac.ir

استناد: فروتن، مهدی، صلاحی، برومند، زینالی، بتول و مسگری، ابراهیم (۱۴۰۴). تحلیل روند و پیش‌نگری خشکسالی در دشت مغان با بهره‌گیری از شاخص SPI و مدل‌های اقلیمی CMIP6. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۵(۳)، ۲۳۰-۲۶۰.

doi: 10.22098/mmws.2025.17356.1594

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۲، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۱۹، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۹، تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱

مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۴، دوره ۵، شماره ۳، صفحه ۲۳۰ تا ۲۶۰.

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



۱- مقدمه

خشکسالی به کاهش بلندمدت بارندگی و کمبود منابع آب گفته می‌شود که پیامدهای محیط‌زیستی و انسانی دارد (Madadgar and Moradkhani, 2013). این پدیده با گرم‌تر و خشک‌تر شدن هوا تشدید می‌شود و تقاضای آب را افزایش می‌دهد. روند افزایش خشکسالی با رشد جمعیت و توسعه بخش‌های مختلف شدت می‌گیرد. خشکسالی علاوه بر خسارت‌های طبیعی، اثرات اجتماعی و اقتصادی دارد و منابع آب زیرزمینی، کشاورزی و زیستگاه‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Deo et al, 2017). برخلاف سایر مخاطرات طبیعی نظیر سیل یا زلزله، خشکسالی پدیده‌ای تدریجی و خزنده است که به‌صورت بلندمدت شکل می‌گیرد و تشخیص زمان دقیق آغاز و پایان آن دشوار است؛ همچنین تعیین گستره جغرافیایی آن نیز همواره ساده نیست. به‌طور کلی، خشکسالی در سه دسته اصلی طبقه‌بندی می‌شود: خشکسالی هواشناسی که به کاهش بارش‌ها نسبت به میانگین بلندمدت اشاره دارد؛ خشکسالی کشاورزی زمانی رخ می‌دهد که رطوبت خاک برای رشد طبیعی گیاهان کافی نباشد؛ و خشکسالی هیدرولوژیکی، ناظر بر کاهش منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی نسبت به مقادیر نرمال است (Doostan, 2015). خشکسالی‌های بلندمدت هواشناسی می‌توانند موجب بروز سایر انواع خشکسالی و خسارات جدی به کشاورزی، اکوسیستم‌ها و منابع آب شوند. کاهش جریان‌های سطحی در این دوره‌ها، همراه با انباشت آلاینده‌ها، خطر افت شدید کیفیت آب را در دوره‌های پس از خشکسالی افزایش داده و مدیریت منابع آب را با چالش‌های اساسی مواجه می‌سازد (Afsari et al, 2024). در گذشته، پایش خشکسالی عمدتاً به‌صورت توصیفی انجام می‌شد، اما امروزه برای تحلیل کمی این پدیده، بهره‌گیری از شاخص‌هایی هم‌چون شاخص بارش استاندارد شده^۱ (SPI) ضروری تلقی می‌شود (Zarei et al, 2017). با توجه به افزایش مداوم دمای جهانی تحت تأثیر تغییرات اقلیمی و پیش‌بینی تغییرات چشمگیر در الگوهای مکانی و زمانی بارش و کاربری زمین در دهه‌های آینده، توسعه ابزارهای دقیق‌تر و کارآمدتر برای پایش خشکسالی بیش از پیش اهمیت یافته است (Jahdi, 2024). در این راستا، مدل‌های گردش عمومی جو-اقیانوس^۲ (GCMs) تحت پروژه‌های CMIP ابزارهای قدرتمندی برای پیش‌بینی ویژگی‌های اقلیمی آینده از جمله خشکسالی به‌شمار می‌آیند، هرچند تفکیک مکانی پایین و سوگیری‌های آماری آن‌ها باعث شده استفاده مستقیم از آن‌ها در

مقیاس منطقه‌ای محدودیت‌هایی داشته باشد (Shrestha et al, 2020).

مطالعات فراوانی در زمینه بررسی خشکسالی و پیش‌نگری آن در دنیا انجام گرفته است از جمله، Hasan et al. (2023) خشکسالی را در حوضه عمان-زرقاء اردن با شاخص‌های SPI و SPEI^۳ طی ۱۹۸۵ تا ۲۰۲۱ ارزیابی کردند. آن‌ها با مدل‌های ARIMA و TBATS پیش‌بینی دوره ۲۰۲۲ تا ۲۰۲۵ را انجام دادند و دریافتند که ARIMA با دقت بالاتر خشکسالی‌ها را شناسایی می‌کند، که این برتری با معیارهای عملکردی مانند ME^۴، RMSE^۵ و MAE^۶ تأیید شد. Zhang et al. (2023) استفاده از مدل‌های خروجی‌های مدل‌های اقلیمی نسل ششم پروژه میان‌مقیاسه‌ای مدل‌های اقلیمی CMIP6^۷ و شاخص SPEI، افزایش خطر خشکسالی را در حوضه رودخانه یانگ‌تسه بررسی کردند. نتایج نشان داد خشکسالی‌ها در میانه حوضه شدیدتر بوده و در سناریوهای بدبینانه، فراوانی و شدت خشکسالی در دهه‌های ۲۰۳۰ تا ۲۰۴۰ به‌ویژه در نواحی بالادست و میانه-پایین دست افزایش می‌یابد. Yuanbin et al. (2023) شاخص جدیدی به نام MMFSDI را برای ارزیابی خشکسالی در فلات تبت معرفی کردند. این شاخص با بهره‌گیری از داده‌های بارش ۲۳ مدل CMIP6 و مدل‌های ARIMA و ANN، عملکرد بهتری نسبت به SPI نشان داد و به‌عنوان جایگزین مناسبی برای تحلیل بهره‌گیری از الگوریتم‌های یادگیری ماشین و داده‌های سه مدل GCM از پروژه CMIP6، به پیش‌نگری خشکسالی سه‌ماهه SPI در مجارستان پرداختند. نتایج نشان آن‌ها داد که خشکسالی‌های شدید تا بحرانی در حال افزایش هستند و این روند تا سال ۲۰۴۰ ادامه خواهد داشت. در این میان، الگوریتم جنگل تصادفی تحت سناریوی SSP2-4.5 بهترین دقت را در پیش‌بینی‌ها داشت. Xu et al. (2024) با تحلیل شبیه‌سازی‌های پنج مدل GCM و سه سناریوی SSP^۸، اثر تغییرات اقلیمی بر خشکسالی در چین طی قرن ۲۱ را بررسی کردند. نتایج نشان داد که در سناریوهای با انتشار بالای CO₂، تنظیم روزه‌ها و تغییرات ساختار تاج درختان موجب کاهش تبخیر-تعرق و در نتیجه کاهش وقوع خشکسالی‌های شدید می‌شود.

Boroughani et al. (2022) تأثیر تغییر اقلیم بر خشکسالی سواحل دریای خزر را با استفاده از داده‌های بارش مدل

^۶ - Mean Absolute Error (MAE)

^۷ - Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6)

^۸ - Shared Socioeconomic Pathways (SSPs)

^۱ - Standardized Precipitation Index (SPI)

^۲ - General Circulation Model (GCM)

^۳ - Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)

^۴ - Mean Error (ME)

^۵ - Root Mean Squared Error (RMSE)

در اقتصاد منطقه‌ای استان اردبیل ایفا می‌کند. این دشت با دارا بودن اراضی گسترده زراعی، مراتع نسبتاً غنی و حضور پررنگ جمعیت روستایی و عشایری، منبع اصلی معیشت هزاران خانوار به‌شمار می‌رود. سهم قابل توجه بخش کشاورزی در اشتغال استان (حدود ۳۲ درصد) و وابستگی مستقیم ساکنان به منابع آب و خاک، اهمیت راهبردی این منطقه را دوچندان کرده است. با این حال، روند کاهشی بارندگی، محدودیت منابع آبی و افت پوشش گیاهی در پی خشکسالی‌های اخیر، بهره‌وری منابع طبیعی و پایداری اقتصادی منطقه را با تهدید جدی مواجه ساخته است. (گزارش سوم اقتصاد معاصر، کد: ۲۹۵۶). از این‌رو، هدف این پژوهش، تحلیل جامع روند و شدت خشکسالی در دشت مغان با استفاده از شاخص SPI و مدل‌های پیش‌بینی اقلیم (CMIP6) در بازه زمانی ۲۰۲۵ تا ۲۰۵۰ است؛ زیرا با توجه به نقش حیاتی این دشت در امنیت غذایی و اقتصاد منطقه‌ای، درک دقیق از وضعیت خشکسالی‌های گذشته و چشم‌انداز آن در آینده، ضرورتی انکارناپذیر در مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی سازگار با تغییر اقلیم محسوب می‌شود. نوآوری پژوهش حاضر در بهره‌گیری از جدیدترین نسل مدل‌های اقلیمی CMIP6 و استفاده از نرم‌افزار تخصصی CMhyd برای پردازش و ریزمقیاس‌نمایی داده‌های اقلیمی نهفته است. هم‌چنین، به‌منظور افزایش دقت نتایج، از رویکرد همادی استفاده شده است. این روش ترکیبی، امکان تحلیل دقیق‌تری از وضعیت گذشته و آینده خشکسالی را فراهم می‌سازد و می‌تواند مبنایی قابل اتکا برای تصمیم‌گیری در حوزه مدیریت منابع طبیعی، سازگاری با تغییر اقلیم و برنامه‌ریزی منطقه‌ای در یکی از مهم‌ترین قطب‌های کشاورزی کشور باشد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

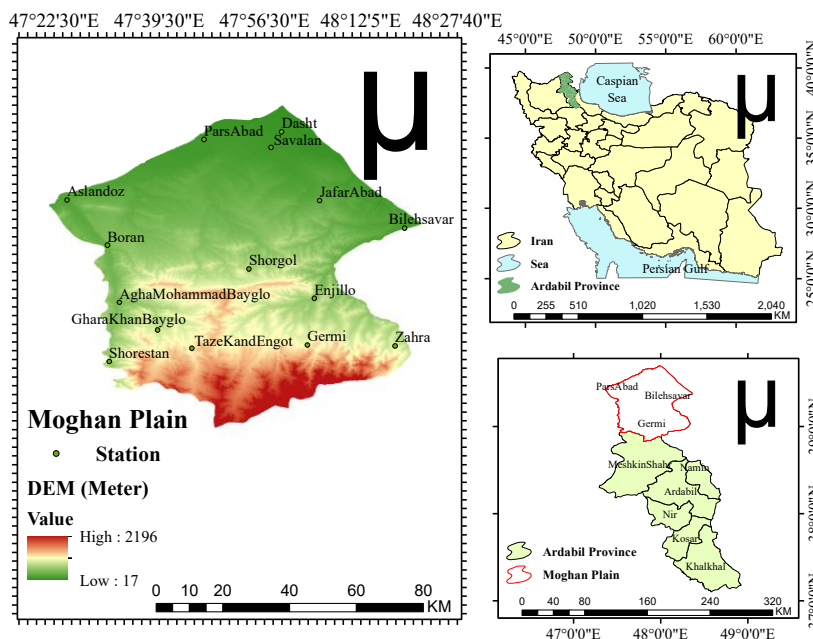
دشت مغان در مختصات طول جغرافیایی ۴۷ درجه و ۲۵ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۲۵ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۹ درجه و ۲۳ دقیقه تا ۳۹ درجه و ۴۲ دقیقه شمالی قرار دارد دشت مغان دارای آب و هوای نیمه‌خشک و معتدل است و زمستان‌های ملایم و تابستان‌های گرم از خصوصیات اقلیمی آن است. دشت مغان به طور متوسط در ارتفاعی ۵۰ تا ۶۰۰ متر از سطح دریا قرار دارد و میانگین بارندگی آن ۲۸۱ میلی‌متر گزارش شده است (Azizi et al, 2021). موقعیت جغرافیایی دشت مغان در سطح استان اردبیل و ایران در شکل ۱، به نمایش درآمده است.

HadCM3-A2 برای دوره‌های مختلف بررسی کردند. نتایج نشان داد که شدت و فراوانی خشکسالی در دهه‌های آینده افزایش می‌یابد، به‌ویژه در شرق دریای خزر که در دهه ۲۰۸۰، شدت خشکسالی سه برابر دوره تاریخی خواهد بود. Abdolalizadeh et al. (2023) اثرات تغییر اقلیم بر روند دما، بارش و خشکسالی در حوضه آبریز دریچه ارومیه را تحت سناریوهای SSP1-2.6 و SSP5-8.5 بررسی کردند. نتایج نشان داد که دمای حداکثر و حداقل در سناریوی بدبینانه افزایش خواهد یافت، بارش سالانه تغییر معنی‌داری نخواهد داشت، اما خشکسالی در سناریوی بدبینانه روند صعودی خواهد داشت. (Asgari et al. (2023) اثرات تغییر اقلیم بر خشکسالی‌های حوضه گرگانرود را تحت دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 برای دوره‌های مختلف بررسی کردند. نتایج نشان داد که دما ۲/۱ تا ۴/۴ درجه سانتی‌گراد و بارش ۲ تا ۱۱/۹ درصد افزایش خواهد یافت. در سناریوی SSP2-4.5، شرایط خشکسالی در آینده نزدیک بهبود می‌یابد، اما در دوره آینده دور طبق SSP5-8.5، خشکسالی‌ها به دلیل ازدیاد تبخیر-تعرق افزایش خواهد یافت. (Aghajanoloo and Fathi Almalou. (2024) خشکسالی و پیش‌بینی تغییرات اقلیمی در استان مازندران را بررسی کردند. در این پژوهش، شش ایستگاه هواشناسی برای جمع‌آوری داده‌های دما و بارش در دوره پایه انتخاب شدند و پیش‌بینی تغییرات اقلیمی برای دو دوره آینده با استفاده از پنج مدل گردش عمومی و مدل ریزمقیاس‌سازی LARS-WG6 انجام شد. نتایج نشان داد که ایستگاه‌های ساری و قراخیل خشکی بیش‌تری نسبت به ایستگاه‌های غرب استان تجربه کرده‌اند و همه مدل‌ها روند افزایش دما در استان را پیش‌بینی کردند. Vatanparast Ghaleh Juq and Salahi. (2025) اثرات تغییر اقلیم بر خشکسالی‌های آینده در حوضه آبخیز ارس را تحت سناریوهای SSP1-2.6، SSP2-4.5 و SSP5-8.5 بررسی کردند. نتایج نشان داد که مدل CanESM5 دقت بالایی در شبیه‌سازی بارش دارد و پیش‌بینی‌ها حاکی از افزایش شدت خشکسالی در آینده، به‌ویژه در سناریوی بدبینانه SSP5-8.5 بود. هم‌چنین، استفاده از شاخص‌های ماهواره‌ای VCI^۲ و TCI^۱ نشان داد که شاخص VCI همبستگی خوبی با SPI دارد و می‌تواند ابزاری مؤثر برای پایش خشکسالی باشد.

با توجه به نتایج مطالعات پیشین، بررسی پدیده خشکسالی در مناطق مختلف جهان از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ به‌ویژه در مناطقی با کاربری عمدتاً کشاورزی مانند دشت مغان که به‌عنوان یکی از قطب‌های اصلی کشاورزی و دامداری کشور، نقش کلیدی

^۲ - Vegetation Condition Index (VCI)

^۱ - Temperature Condition Index (TCI)



شکل ۱- نقشه موقعیت جغرافیایی دشت مغان در سطح استان اردبیل و ایران
Figure 1 - The geographical location map of the Moghan Plain in Ardabil Province and Iran

۲-۲- روش تحقیق

در این پژوهش، برای پیش‌بینی خشکسالی دشت مغان در آینده (۲۰۲۵-۲۰۵۰)، از شاخص SPI و مدل‌های اقلیمی گزارش ششم هیئت بین‌الدولی تغییر اقلیم (CMIP6) استفاده شد. ابتدا داده‌های مشاهده‌ای بارش مربوط به ۱۵ ایستگاه هواشناسی و باران‌سنجی منطقه مورد مطالعه از سازمان هواشناسی کشور و اداره آب استان اردبیل برای دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۸۵) دریافت شد. انتخاب این بازه زمانی به دلیل انطباق با دوره تاریخی مدل‌های اقلیمی نسل ششم (CMIP6) صورت گرفت. مشخصات هر کدام از ایستگاه‌های مورد مطالعه در جدول ۱، ارائه شده است. در ادامه، ۱۰ مدل برتر از گزارش ششم، که در مطالعات پیشین به عنوان مدل‌های معتبر در برآورد بارش شناخته شده‌اند، انتخاب شدند. انتخاب این مدل‌ها بر اساس فراوانی استناد به آن‌ها در منابع معتبر داخلی و خارجی بوده است، به گونه‌ای که هر یک از این مدل‌ها در ادبیات موضوع به صورت مکرر به عنوان مدل‌های برتر اقلیمی معرفی شده‌اند. داده‌های تاریخی مدل‌های منتخب از وبسایت ESGFDL^۱ جمع‌آوری شد و در جدول ۲، مشخصات هر کدام بیان شده است. با توجه به بزرگ‌مقیاس بودن داده‌های خام مدل‌ها، اصلاح اریبی این داده‌ها با استفاده از مدل مقیاس‌کاهی CMhyd و چهار روش مختلف تصحیح اریبی شامل (روش مقیاس‌بندی خطی، مقیاس‌بندی شدت محلی بارش، تبدیل توانی بارش، نگاشت توزیع

بارش و دما) انجام شد. به منظور ارزیابی کارایی این مدل‌ها در هر ایستگاه، داده‌های تصحیح‌شده اریبی مدل‌ها با داده‌های مشاهده‌ای ایستگاه‌ها بر اساس معیارهای ارزیابی خطا شامل R^{2*} ، MSE^۳، RMSE، MAE مقایسه شد. سپس برای هر مدل، شاخص‌های خطا در تمام ایستگاه‌ها به صورت جداگانه محاسبه و در ادامه، میانگین این مقادیر برای کل ایستگاه‌ها استخراج شد تا عملکرد کلی آن مدل در سطح منطقه مورد مطالعه به دست آید. بر اساس نتایج به دست آمده و با در نظر گرفتن کمترین میزان خطا و بیش‌ترین ضریب تعیین (R^2)، پنج مدل برتر انتخاب و به ترتیب از رتبه ۱ تا ۵ مرتب شدند و بر اساس رتبه هر کدام از مدل‌های برتر میانگین وزنی همادی به دست آمد. با بهره‌گیری از این روش برای دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۸۵) و دوره آینده (۲۰۲۵-۲۰۵۰) طبق دو سناریوی اقلیمی متوسط (SSP2-4.5)، و بدبینانه (SSP5-8.5) تغییرات بارش پیش‌نگری شد. در این پژوهش، سناریوی خوش‌بینانه (SSP1-2.6) مورد بررسی قرار نگرفت، چراکه تمرکز اصلی بر ارزیابی شرایط محتمل‌تر و همچنین آمادگی برای رخدادهای شدید و نامطلوب اقلیمی بوده است، که در برنامه‌ریزی‌های منطقه‌ای از اولویت بالاتری برخوردارند؛ همچنین انتخاب دوره آینده با طول ۲۵ ساله، با هدف انطباق نسبی با طول دوره پایه و نیز جلوگیری از افزایش عدم قطعیت ناشی از کمبود داده‌های مشاهداتی در برخی ایستگاه‌ها انجام گرفت. در گام بعد،

^۳ - Mean Squared Error (MSE)

^۱ - <https://aims2.llnl.gov/search/cmip6/>

^۲ - Coefficient of Determination (R^2)

با استفاده از داده‌های پیش‌نگری شده برای آینده، وضعیت خشکسالی منطقه در مقیاس‌های زمانی ۶ و ۱۲ ماهه با استفاده از شاخص SPI در نرم‌افزار متلب پیش‌نگری و روند هر یک از ایستگاه‌ها با استفاده از آزمون Mann-Kendall اصلاح شده و

شیب سن مورد بررسی قرار گرفت. این دو مقیاس زمانی به دلیل اهمیت کاربردی آن‌ها در بازتاب اثرات خشکسالی‌های فصلی و سالانه بر منابع آب و کشاورزی انتخاب شدند. همچنین، فراوانی و توالی هر یک از طبقات خشکسالی نیز تحلیل شد.

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های مورد مطالعه در دشت مغان

Table 1- Characteristics of the studied stations in the Moghan Plain

station	Station type	latitude	Longitude	elevation
Parsabad	synoptic	39.6	47.77	72.6
Bilehsavar	synoptic	39.36	48.31	101.4
Germi	synoptic	39.05	48.05	749
Aslando	Pluviometry	39.44	47.41	170
Zahra	Pluviometry	39.04	48.29	676
Shorgol	Pluviometry	39.25	47.9	644
Savalan	Pluviometry	39.58	47.95	48
Dasht	Pluviometry	39.62	47.98	65
Jafarabad	Pluviometry	39.43	48.09	180
Gharakhanbayglo	Pluviometry	39.09	47.65	590
Boran	Pluviometry	39.31	47.51	250
Aghamohammadbayglo	Pluviometry	39.16	47.55	340
Shorestan	Pluviometry	39	47.52	415
Tazekandengot	Pluviometry	39.04	47.74	790
Enjillo	Pluviometry	39.17	48.07	383

جدول ۲- مشخصات مدل‌های مورد مطالعه از CMIP6 (منبع: وب‌سایت رسمی CMIP6^۱)

Table 2- Specifications of the models studied from CMIP6 (Source: CMIP6 official website)

Model	Developing institution	Atmospheric spatial resolution (degrees)
ACCES S-CM2	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation And Australian Bureau of Meteorology	1.25 * 1.87
CNRM-CM6-1	Centre National de Recherches Météorologiques	1.4 * 1.4
EC-Earth3	A consortium of European meteorological and climate institutions	0.7 * 0.7
GFDL-ESM4	Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL), affiliated with the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), United States	1 * 1.3
MIROC6	A consortium of the University of Tokyo, the National Institute for Environmental Studies (NIES), and the Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC)	1.4 * 1.4
MPI-ESM1-2-HR	Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M), Germany	0.9 * 0.9
MRI-ESM2-0	Meteorological Research Institute (MRI), Japan	1.125 * 1.125
NorESM2-LM	Norwegian Research Centre for Climate and Environment (part of NORCE and the Bjerknes Centre for Climate Research), Norway	2.5 * 1.87
CanESM5	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CCCma), Canada	2.8 * 2.8
EC-Earth3-Veg	A consortium of European meteorological and climate institutions	0.7 * 0.7

^۱ - <https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip/wgcm-cmip6>

در شکل ۲، نمودار جریانی روش تحقیق ترسیم شده است.



شکل ۲- نمودار جریانی مراحل انجام تحقیق

Figure 2 - Flowchart of research steps

و به این دلیل در مطالعات زیادی برای پس‌پردازش نتایج مدل‌های پیش‌بینی و حذف اریبی آن‌ها از روش‌های تصحیح اریبی استفاده شده است (Jvanmard Ghassab et al, 2018).

۲-۲-۲-۱ روش مقیاس‌بندی خطی (Linear Scaling)

این روش برای تصحیح اریبی در شبیه‌سازی مدل، از یک نسبت خطی استفاده می‌کند که نسبت میانگین داده‌های مشاهده شده به میانگین داده‌های شبیه‌سازی شده را در دوره آموزش اعمال می‌کند. رابطه روش LS به صورت رابطه ۱، تعریف می‌شود (Shabanpour et al, 2021).

$$P_{cor.m.d} = P_{raw.m.d} * \left[\frac{\mu(P_{obs})}{\mu(P_{raw.m})} \right] \quad (1)$$

در عبارت فوق، مقدار تصحیح‌شده بارش برای عضو m در روز d از هر ماه، مقدار P_{raw.m.d} پیش‌بینی اولیه (تصحیح نشده) بارش برای همان عضو و روز، $\mu(P_{obs})$ میانگین بارش مشاهده شده در دوره آموزش، $\mu(P_{raw.m})$ میانگین بارش پیش‌بینی خام در دوره آموزش برای عضو m است.

۲-۲-۲-۲ روش مقیاس‌بندی شدت محلی بارش (Precipitation Local Intensity Scaling)

روش Local با اصلاح فراوانی و شدت روزهای بارانی، می‌تواند داده‌های خامی را که دارای تعداد زیادی روزهای بارش سبک

۲-۲-۱ کارایی مدل‌های CMIP6

از تفاوت‌های مهم مدل‌های فاز ششم پروژه مقایسه متقابل مدل‌های اقلیمی نسبت به مدل‌های پیشین، به‌کارگیری سناریوهای اجتماعی-اقتصادی مشترک (SSP) است؛ علاوه بر این، در CMIP6 عمدتاً از مدل‌های سیستم زمینی^۱ (ESM) به جای مدل‌های گردش کلی (GCM) استفاده شده است. مدل‌های ESM، مدل‌هایی هستند که با استفاده از مؤلفه‌های سامانه زمین، شبیه‌سازی‌های دقیق‌تری برای اقلیم دوره‌های تاریخی و آینده ارائه می‌دهند. این مدل‌ها، نسل جدید مدل‌های اقلیمی محسوب می‌شوند که به تدریج جایگزین مدل‌های GCM می‌شوند. در مدل‌های فاز ششم، از ترکیب سناریوهای اجتماعی-اقتصادی (SSP) و سناریوهای واداشت تابشی نماینده برای تحلیل پسخورهای متقابل میان تغییرات اقلیم و عوامل اجتماعی-اقتصادی نظیر رشد جمعیت جهانی، توسعه اقتصادی و پیشرفت فناوری استفاده شده است (Babaeian et al, 2023).

۲-۲-۲ تصحیح اریبی

اریبی به معنای تمایل سیستماتیک مدل در شرایط خاص به بیش‌برآورد یا کم‌برآورد متغیر مورد پیش‌بینی نسبت به داده‌های مشاهداتی است. در کل پیش‌بینی‌های خام حاصل از مدل‌های اقلیمی جهانی در میانگین و گستره پیش‌بینی‌ها دارای اریب است

¹ - Earth System Model (ESM)

تنظیم می‌کند، در حالی که مقادیر حدی را حفظ می‌نماید. محدودیت این روش فرض مشابه بودن توزیع داده‌های خام و مشاهده شده است که می‌تواند منجر به اربیی جدید شود. برای بارش، معمولاً توزیع گاما با پارامتر شکل (β) و پارامتر مقیاس (α) استفاده می‌شود که اثربخشی آن تأیید شده است. این روش به کاهش تعداد روزهای بارش سبک (drizzle) در مدل‌های شبیه‌سازی اقلیمی کمک می‌کند. در این روش داده‌های تاریخی و آینده به صورت رابطهٔ ϵ محاسبه می‌شود (Fang et al, 2015).

$$f_r(x|\alpha, \beta) = x^{\alpha-1} * \frac{1}{\beta_\alpha} * e^{\frac{-x}{\beta}}; x \geq 0, \alpha, \beta > 0 \quad (6)$$

۳-۲-۲- اردزبایه، عملکرد مدل

برای ارزیابی عملکرد مدل‌های CMIP6، داده‌های مشاهده‌ای و شبیه‌سازی‌شده در دورهٔ پایه (۲۰۱۴-۱۹۸۵) مورد مقایسه قرار گرفتند. در این پژوهش، برای بررسی و تحلیل عملکرد، از شاخص‌های زیر استفاده شده است:

۱-۳-۲-۲- ضرب تعین (R^2)

یک معیار بدون بعد است که نشان می‌دهد چه نسبتی از تغییرات در متغیر وابسته (مشاهده‌ای) توسط مدل توضیح داده شده است. مقدار R^2 هر چه به ۱ نزدیک‌تر باشد، عملکرد مدل بهتر و پیش‌بینی دقیق‌تر است و طبق رابطه ۷، به‌دست می‌آید (Salahi et al, 2016).

$$R^2 = \left| \frac{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (Q_{obs_t} - \overline{Q_{obs}}) - ((Q_{sim_t} - \overline{Q_{sim}}))}{\sigma_{obs} * \sigma_{sim}} \right|^2 \quad (Y)$$

در این روابط، Q_{sim} و Q_{obs} به ترتیب میانگین دبی‌های شبیه‌سازی شده و مشاهداتی هستند (Goodarzi et al, 2012).

۲-۳-۲- جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و میانگین مطلق خطا (MAE)

شاخص‌هایی هستند که برای سنجش دقت مدل و ارزیابی میزان خطای آن استفاده می‌شوند. در هر دو معیار مقادیر کوچک‌تر نشان‌دهنده خطای کم‌تر و عملکرد بهتر مدل است. بهترین مقدار برای این شاخص‌ها برابر با صفر است و از طریق روابط ۸ و ۹، محاسبه می‌شوند (Salahi et al, 2016).

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_o - X_s)^2}{N}} \quad (\lambda)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |X_o - X_s|}{N} \quad (9)$$

(روزهای بارانی با میزان کم بارش) هستند، بهبود بخشد. این روش معمولاً شامل دو مرحله است:

(۲) سپس، یک ضریب مقیاس گذاری (sm) محاسبه می‌شود تا میانگین بارش تصحیح شده برابر با میانگین بارش مشاهده شده باشد (ابطه ۲).

$$S_m = \frac{\mu(p_{\text{obs.m.d}}|p_{\text{obs.m.d}}^{>0})}{\mu(p_{\text{his.m.d}}|p_{\text{his.m.d}}^{>T_{\text{hres.m}}})} \quad (2)$$

$$P_{\text{his/sce,m,d}}^* = \{ P_{\text{his/sce,m,d}} \cdot S_{\text{m},P_{\text{his,m,d}}} > P_{\text{thres,m}}^0, P_{\text{his,m,d}} < P_{\text{thres,m}} \} \quad (3)$$

در روابط فوق، μ نمایانگر میانگین، obs مقادیر مشاهداتی، his مقادیر تاریخی، و sce مقادیر پیش‌بینی‌شده برای آینده در ماه و روز مورد نظر است (Fang et al, 2015).

۳-۲-۲- روش تبدیل توانی بارش (Power Transformation)

تبدیل توان یک روش تصحیح غیرخطی با شکل نمایی x_b است که برای تنظیم واریانس سری‌های زمانی بارش استفاده می‌شود. پارامتر b با یکسان‌سازی ضریب تغییرات CV شبیه‌سازی‌های اصلاح‌شده x_b و ضریب تغییرات مقادیر مشاهده شده، برآورد می‌شود. برای به‌دست آوردن پارامتر b برای ماه m ، از رابطه Z^4 ، استفاده می‌شود (Ershadfath et al, 2022).

$$f(b_m) = CV_m(X_{\text{obs}}(d)) - CV_m(X_{\text{sim}}^{b_m}(d)) \quad (4)$$

در رابطهٔ ۴، obs مربوط به مقادیر مشاهداتی، sim مربوط به مقادیر شبیه‌سازی شده است. متغیر d بارش روزانه، CV نسبت میان انحراف معیار σ و μ است. در ادامه مقادیر تصحیح‌شده بارندگی X^* با استفاده از رابطهٔ زیر به‌دست می‌آید.

$$X^*_{\text{sim.m}}(d) = X^{\text{b}_m}_{\text{sim}}(d) * \frac{\mu_m(X_{\text{obs}}(d))}{\mu_m(X^{\text{b}_m}_{\text{sim}}(d))} \quad (\delta)$$

۴-۲-۲-۲- روش نگاشت توزیع بارش و دما
(Distribution Mapping of Precipitation and Temperature)

روش نگاشت توزیع^۱ (DM) توزیع داده‌های خام را با داده‌های مشاهده شده تطبیق داده و میانگین، انحراف معیار و صدک‌ها را

¹ - Distribution Mapping

۳-۲-۳-۲- میانگین مربعات خطا (MSE)

این معیار می تواند از صفر (عملکرد عالی) تا بی نهایت تغییر کند و از رابطه ۱۰، به دست می آید (Salahi et al, 2016).

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_0 - X_s)^2 \quad (10)$$

در معادلات فوق، X_0 داده های مشاهده شده، X_s داده های شبیه سازی شده و N تعداد داده ها را نشان می دهد.

۴-۲-۲- سناریوهای SSPs

سناریوهای مربوط به CMIP6 تحت عنوان خط سیر اجتماعی-اقتصادی مشترک (SSP) ارائه شده اند. این سناریوها بخشی از یک چارچوب جدید هستند که جامعه تحقیقاتی تغییرات اقلیمی برای

تحلیل جامع اثرات اقلیمی، آسیب پذیری ها، سازگاری، و راهکارهای کاهش در آینده ایجاد کرده است. کمیت های مرتبط با SSP از همکاری مشترک بین انجمن های IAV^1 و IAM^2 شکل گرفته اند و در طی مجموعه ای از جلسات، مجموعه محدودی از پنج خط داستانی برای SSP را تعریف کرده اند. خطوط داستانی SSP ویژگی های اصلی مسیرهای توسعه آینده را مشخص می کنند و از ابزارهای مختلف مدل سازی برای کمی سازی این داستان ها استفاده می شود. عواملی مانند جمعیت، توسعه اقتصادی، کاربری زمین، و مصرف انرژی از جمله مواردی هستند که در این مدل سازی ها مورد توجه قرار می گیرند (Rezaei et al, 2024). در جدول ۳، خصوصیات سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 ذکر شده است.

جدول ۳- مشخصات سناریوهای SSP2-4.5 و SSP5-8.5 (Khadempour et al, 2025)
Table 3- Characteristics of SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios (Khadempour et al, 2025)

Characteristics	SSP2-4.5	SSP5-8.5
Development Technology	Medium development, rapid but uneven	Rapid development
Carbon Intensity	Medium	High
Energy Technology Change	Some investment in renewables, but continued reliance on fossil fuels	Shift towards fossil fuels; alternative sources not actively pursued
Economic Growth and Lifestyle	Moderate and uneven per capita growth	High per capita growth
Globalization	Semi-open globalized economy	Highly globalized, increasingly interconnected
Consumption and Diet	Material-intensive consumption, moderate meat consumption	Materialism, conspicuous consumption, tourism, and meat-rich diets
Policies and Institutions	Relatively weak international cooperation	Effective cooperation in pursuing development goals
Environmental Policy	Concern for local pollutants with moderate success	Focus on the local environment with clear welfare benefits, low concern for global issues
Policy Orientation	Weak focus on sustainability	Move towards development, free market, human capital

استخراج شد و وزن متناظر هر مدل با استفاده از رابطه ۱۱، به دست آمد.

$$W_i = \frac{R_i}{\sum_{i=1}^n R_i} \quad (11)$$

در رابطه فوق مقدار R_i رتبه نهایی هر عضو (مدل) حاصل از رتبه بندی بوده و W_i وزن هر عضو است.

۶-۲-۲- شاخص خشکسالی SPI

به منظور پایش خشکسالی، از شاخص SPI به طور وسیعی در سراسر جهان استفاده می شود؛ چراکه این شاخص، با تکیه بر داده های بارش، سادگی محاسبات، قابلیت محاسبه در مقیاس های زمانی دلخواه و توان بالای مقایسه مکانی نتایج، ابزار بسیار کارآمدی

۲-۲-۵- رویکرد همادی

برای کاهش عدم قطعیت در پیش بینی بارش، در این پژوهش یک مدل همادی ارائه شد. در این فرآیند، از میان ۱۰ مدل مورد بررسی از مجموعه CMIP6، پنج مدل برتر بر اساس عملکرد آن ها انتخاب شدند. سپس با استفاده از روشی برای میانگین گیری وزنی، سهم هر مدل برتر در پیش بینی بارش متناسب با وزن اختصاص داده شده به آن تعیین شد. این رویکرد به کاهش ضعف های ناشی از عدم قطعیت مدل های منفرد کمک می کند. در این روش، هر مدل بر اساس دقت محاسبه شده از معیارهای ارزیابی خطا رتبه بندی می شود و مدلی که دقت بیش تری داشته باشد، بالاترین وزن را در جایگاه R_i در رابطه ۱۱، به خود اختصاص می دهد (Najafi et al, 2023). برای محاسبه میانگین وزنی، رتبه هر عضو یا مدل

² - Impacts, Adaptation, and Vulnerability Community (IAM)

¹ - Integrated Assessment Modeling Community (IAV)

در روابط فوق $\hat{\alpha}$ و $\hat{\beta}$ به‌ترتیب برآوردهای α و β و n فراوانی داده‌ها است در گام بعد، تابع توزیع احتمال تجمعی بارش $F_x(x)$ برآورد می‌شود.

$$F_x(x) = \frac{1}{\beta \Gamma(\alpha)} \int_0^x \left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha-1} \exp\left(-\frac{x}{\beta}\right) dx \quad (17)$$

از آنجایی که تابع گاما برای بارش صفر میلی‌متر تعریف نشده است و توزیع بارش ممکن است دارای مقادیر صفر باشد لذا تابع احتمال تجمعی کل به صورت رابطه ۱۸، محاسبه می‌شود.

$$H_x(x) = q + (1 - q)F_x(x) \quad (18)$$

در رابطه ۱۸، q احتمال مقدار بارش صفر است اگر m تعداد داده‌های بارش باشد که مقدار آن‌ها در سری زمانی معادل صفر است، آنگاه q از رابطه ۱۹، محاسبه می‌شود.

$$q = \frac{m}{n} \quad (19)$$

پس از محاسبه تابع تجمعی کل $H_x(x)$ تغییر شکل هم‌احتمالی تابع تجمعی گاما به متغیر تصادفی نرمال استاندارد Z یا SPI با میانگین صفر و واریانس یک صورت می‌گیرد. برای دستیابی راحت‌تر به مقادیر Z یا SPI بهتر است از تقریب Abramovitz and Stegun استفاده کرد. این تقریب، احتمالات تجمعی را به متغیر تصادفی نرمال استاندارد تبدیل می‌نماید (Bazrafshan and Hejabi, 2017).

$$SPI = - \left[t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right] \quad (20)$$

$$\text{for } 0 < H_x(x) \leq 0/5 \quad (21)$$

$$SPI = + \left[t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right] \quad (22)$$

$$\text{for } 0/5 < H_x(x) \leq 1/0 \quad (23)$$

$$t = \sqrt{\ln \left| \frac{1}{1 - (H_x(x))^2} \right|} \quad (24)$$

$$\text{for } 0/5 < H_x(x) \leq 1/0$$

جدول ۴- طبقه‌بندی دوره‌های خشکسالی و ترسالی بر اساس

شاخص SPI (Mosaedi and Ghabaei Sough, 2011)

Table 4- Classification of drought and wet periods based on SPI index (Mosaedi and Ghabaei Sough, 2011)

SPI Index Classification	
Severe Wet	≥ 2
Moderate Wet	1.5 to 1.99
Mild Wet	1 to 1.49
Normal	-0.99 to 0.99
Mild Drought	-1 to -1.49
Moderate Drought	-1.5 to -1.99
Severe Drought	≤ -2

محسوب می‌شود. این شاخص تأثیرات دوره‌های کوتاه مدت ذخایر آب از جمله رطوبت خاک و تأثیرات دوره‌های طولانی مدت منابع آب از جمله ذخایر آب زیرزمینی، جریان رودخانه‌ای، سطح آب مخازن را پایش می‌نماید. برای محاسبه این شاخص طول دوره آماری و نوع توزیع فراوانی برازش یافته بر داده‌های بارش اهمیت زیادی دارد (Mosaedi and Ghabaei Sough, 2011). شاخص بارش استاندارد شده اولین بار توسط مک‌کی (۱۹۹۳)، برای پایش خشکسالی در ایالت کلرادو معرفی شد. این شاخص از داده‌های بارش ماهانه و یا هفتگی استفاده می‌کند شاخص SPI چندمنظوره بوده و امکان کاربرد آن در مقیاس‌های زمانی مختلف مانند یک تا سه ماهه وجود دارد (Bazrafshan and Hejabi, 2017). نخستین گام در محاسبه شاخص SPI برازش یک توزیع آماری مناسب بر سری زمانی داده‌های بارش است. یکی از این توزیع‌های پرکاربرد توزیع گاما است و به صورت رابطه ۱۲، تعریف می‌شود.

$$F_x(x) = \frac{\left(\frac{x}{\beta}\right)^{\alpha-1} \exp\left(-\frac{x}{\beta}\right)}{\beta \Gamma(\alpha)} \quad (12)$$

که در آن، α پارامتر شکل، β پارامتر مقیاس، x مقدار بارش و $\Gamma(\alpha)$ تابع گاما بوده و معادله آن به صورت زیر است.

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} t^{\alpha-1} e^{-t} dt \quad (13)$$

برای تخمین پارامترهای توزیع گاما بهتر است از روش بیشینه درست‌نمایی Maximum Likelihood استفاده شود و برای این منظور ابتدا آماره D ، بر اساس رابطه ۱۴، محاسبه می‌شود.

$$D = \ln(\bar{x}) - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(x_i) \quad (14)$$

سپس پارامترهای α و β از معادلات ۱۵ و ۱۶ برآورد می‌شود.

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{4D} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{4D}{3}} \right] \quad (15)$$

$$\hat{\beta} = \frac{\bar{x}}{\hat{\alpha}} \quad (16)$$

در روابط فوق، $C0=2/515517$ ، $C1=0/802853$ ، $d1=1/432788$ ، $d2=0/189269$ ، $C2=0/10328$ ، $d3=0/031308$ به‌صورت مقادیر ثابت بوده و H تابع تجمعی کل است (Bazrafshan and Hejabi, 2017).

مطابق جدول ۴، دوره‌های خشکسالی و ترسالی بر اساس شاخص SPI طبقه‌بندی شده است.

۷-۲-۲- Modified Mann-Kendall آزمون

آزمون Mann-Kendall اصلاح شده توسط حامد و راثو (۱۹۹۸) ارائه شده است. در این آزمون، تمامی ساختارهای خودهمبستگی معنادار در داده‌های سری زمانی شناسایی و حذف می‌شوند. در این روش، واریانس اصلاح شده $V(S)^*$ در محاسبات آزمون Mann-Kendall مورد استفاده قرار می‌گیرد. محاسبه آماره Z طبق روابط زیر انجام می‌شود (Zadmehr and Farrokhan Firouzi, 2022).

$$V(S)^* = V(S) \frac{n}{n^*} \quad (24)$$

$$\frac{n}{n^*} = 1 + \frac{2}{n(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^{n-1} (n-i)(n-i-1)(n-i-2)ri \quad (25)$$

و در این رابطه، ri ضرایب خودهمبستگی با تأخیر i بوده و $V(S)$ از رابطه ۲۶، تخمین زده می‌شود.

$$V(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^n t_i(t_i-1)(t_i-5)}{18} \quad (26)$$

برای محاسبه مقدار Z آزمون Mann-Kendall اصلاح شده در رابطه ۲۵، $V(S)$ با $V(S)^*$ جایگزین می‌شود.

در این روش، مقدار به‌دست آمده از آماره Z با سطح معنی‌داری α مقایسه می‌شود. اگر مقدار مطلق Z برابر یا بزرگ‌تر از $1/64$ باشد، روند سری‌ها در سطح ۱۰ درصد معنی‌دار است. اگر برابر یا بزرگ‌تر از $1/96$ باشد، در سطح ۵ درصد معنی‌دار است، و در صورتی که برابر یا بزرگ‌تر از $2/58$ باشد، روند سری‌ها در سطح ۱ درصد معنی‌دار خواهد بود.

۳- نتایج و بحث

بررسی نتایج عملکرد چهار روش تصحیح اربیی برای مدل‌های منتخب CMIP6 در دوره پایه نشان داد که روش مقیاس‌بندی خطی بارش، بر اساس شاخص‌های آماری خطا ($RMSE$, R^2), تطابق بهتری با داده‌های مشاهداتی داشت. این روش به دلیل سادگی و نیاز کم‌تر به اطلاعات آماری اضافی، به‌ویژه در مناطق با داده‌های محدود، مزیت‌هایی نسبت به سایر روش‌ها دارد و در مطالعات (Ershadfath et al, 2022) در بررسی ۸ مدل CMIP6 در شبیه‌سازی بارش در دشت همدان و (Babaeian et al, 2024) در پیش‌نگری بارش ایران عملکرد مطلوبی نشان داده است. نتایج معیارهای ارزیابی خطا برای این روش در جدول ۵ ارائه شده است. مطابق این روش مدل EC-Earth3 به‌عنوان مدل برتر شناخته شد. این مدل دارای مقادیر MSE معادل $0/17$ ، $RMSE$ برابر $0/24$ ، MAE معادل $0/15$ و ضریب تعیین R^2 برابر $0/99$

است که نشان‌دهنده دقت بالای آن در شبیه‌سازی بارش هستند. پس از این مدل، چهار مدل دیگر با عملکرد خوب شامل GFDL-ESM4، EC-Earth3-Veg، MIROC6 و MRI-ESM2-0 در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند و در محاسبات روش همدادی از داده‌های این مدل‌ها بهره گرفته شد. با مرور مطالعات پیشین، می‌توان به همسویی قابل‌توجهی میان نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق و یافته‌های سایر پژوهشگران اشاره کرد. مدل‌های EC-Earth3 و EC-Earth3-Veg در چندین مطالعه، از جمله تحقیقات (Ngo-Duc, 2022) به‌عنوان مدل‌های دقیق در بازتولید بارش در مناطق شرق و جنوب شرق آسیا معرفی شده‌اند. همچنین، عملکرد مطلوب مدل MRI-ESM2-0 در مناطق مختلف، از جمله شرق آفریقا (Ngoma et al, 2021)، بنگلادش (Kamruzzaman et al, 2021)، پاکستان (Abbas et al, 2022) و غرب ایران (Ansari-Mahabadi et al, 2022) مورد تأیید قرار گرفته است. در مورد مدل GFDL-ESM4 نیز نتایج (Ngoma et al, 2021) و (Kamruzzaman et al, 2021) دلالت بر توانمندی آن در شبیه‌سازی بارش در شرق آفریقا و جنوب آسیا دارند. تلفیق نتایج این مدل‌ها در قالب روش همدادی می‌تواند منجر به کاهش عدم قطعیت پیش‌بینی‌ها گردد، چراکه خطاهای انفرادی مدل‌ها تا حدی یکدیگر را خنثی می‌کنند. لازم به ذکر است که ارزیابی عملکرد روش‌های تصحیح اربیی بر اساس میانگین ماهانه داده‌ها در کل دوره پایه انجام گرفته است؛ به عبارتی، به‌جای بررسی سری زمانی ماهانه، تطابق میانگین ماهانه مدل‌ها با مقادیر میانگین ماهانه مشاهداتی در سطح ایستگاه‌ها مبنای مقایسه قرار گرفته است. این رویکرد با هدف ساده‌سازی تحلیل، کاهش اثر نوسانات کوتاه‌مدت و تمرکز بر تطابق کلی مدل‌ها با اقلیم بارش منطقه انتخاب شده است. در شکل (۳، الف)، توزیع مکانی بارش سالانه در دشت مغان طی دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۸۵) نشان می‌دهد که الگوی بارش به‌صورت کاهشی از جنوب شرق به شمال غرب امتداد دارد. در این دوره، ایستگاه زهرا در جنوب شرق منطقه با میانگین $397/43$ میلی‌متر پربارش‌ترین و ایستگاه بران در غرب منطقه با $260/41$ میلی‌متر کم‌بارش‌ترین نقطه بوده است. ایستگاه بيله‌سوار، واقع در شرق دشت، نیز میانگین بارشی برابر با $376/84$ میلی‌متر داشته است.

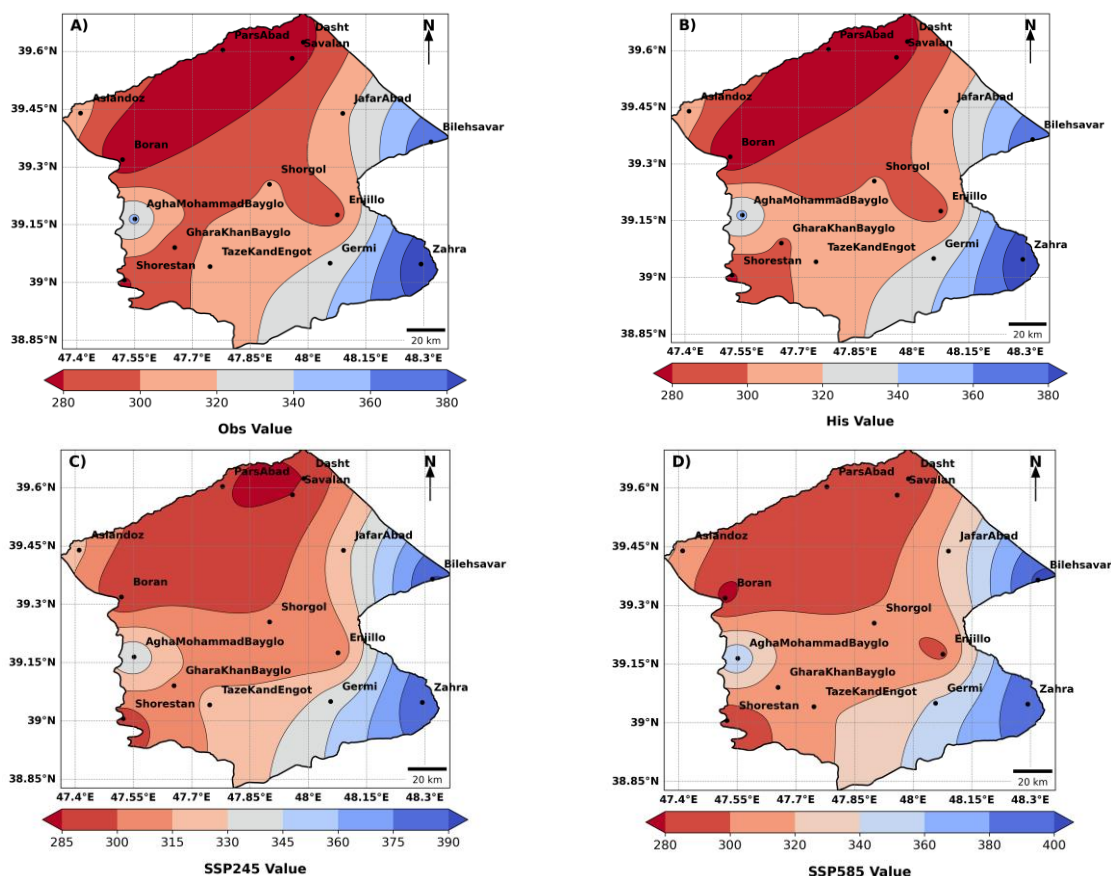
بررسی ماهانه بارش در نمودارهای شکل ۴، برای دوره مذکور نشان می‌دهد در ایستگاه زهرا، شهریور (سپتامبر) با $58/10$ میلی‌متر پربارش‌ترین و تیر (ژوئیه) با $8/37$ میلی‌متر خشک‌ترین ماه بوده است.

جدول ۵- نتایج میانگین عملکرد مدل‌های CMIP6 طبق روش مقیاس‌بندی خطی برای تمام ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره پایه
Table 5- Average performance results of CMIP6 models according to the linear scaling method for all studied stations in the base period

Model	MSE	RMSE	MAE	R ²
ACCESS-CM2	0.66	0.60	0.33	0.99
CNRM-CM6-1	0.62	0.56	0.31	0.99
CanESM5	0.72	0.64	0.35	0.99
EC-Earth3	0.17	0.24	0.15	0.99
EC-Earth3-Veg	0.39	0.38	0.21	0.99
GFDL-ESM4	0.30	0.36	0.22	0.99
MIROC6	0.44	0.50	0.29	0.99
MPI-ESM1-2-HR	0.74	0.54	0.30	0.99
MRI-ESM2-0	0.61	0.54	0.28	0.99
NorESM2-LM	0.74	0.62	0.35	0.99

بیش‌تری افزایش می‌یابد. ایستگاه بیل‌سوار با ۴۰۵/۵۱ میلی‌متر (۷/۶۱ درصد افزایش) در صدر قرار دارد. آبان با ۵۶/۸۲ میلی‌متر و تیر با ۶/۷۹ میلی‌متر به‌ترتیب بیش‌ترین و کم‌ترین میزان بارش را خواهند داشت. در ایستگاه زهرا، بارش سالانه به ۴۰۴/۲۹ میلی‌متر می‌رسد که افزایش ۱/۷۳ درصد را نشان می‌دهد. با وجود این، کاهش ۳/۳۱ میلی‌متر در شهرپور (سپتامبر) نسبت به دوره پایه دیده می‌شود. در ایستگاه بران نیز بارش سالانه به ۲۷۳/۶۷ میلی‌متر می‌رسد (افزایش ۵/۰۹ درصد)، در حالی که بارش اردیبهشت با ۱/۶۱ میلی‌متر رشد و تیر با ۴/۲۲ میلی‌متر، خشک‌ترین ماه باقی می‌ماند. به‌طور کلی، هر دو سناریوی اقلیمی، افزایش بارش سالانه در منطقه را نشان می‌دهند، اما کاهش بارندگی در ماه‌های تابستان (تیر، مرداد) می‌تواند چالشی جدی برای کشاورزی دشت مغان ایجاد کند. تمرکز افزایش بارش در ماه‌های سرد و انتقال بیشینه فصلی به آبان و اردیبهشت، نشانه‌ای از تغییر احتمالی در الگوی اقلیم منطقه است. این یافته‌ها می‌توانند مبنای مهمی برای برنامه‌ریزی منابع آب و سازگاری با تغییرات اقلیمی در این پهنه راهبردی کشور باشند. در مطالعات Niroumandfard et al. (2023) برای ایستگاه بیرجند و Bustos Usta et al. (2022) برای منطقه شمال غرب ایران نیز نتایج مشابهی به‌دست آمده و به این نتیجه دست یافتند که در سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 بارش تا سال ۲۰۵۰ نسبت به دوره پایه افزایش خواهد یافت.

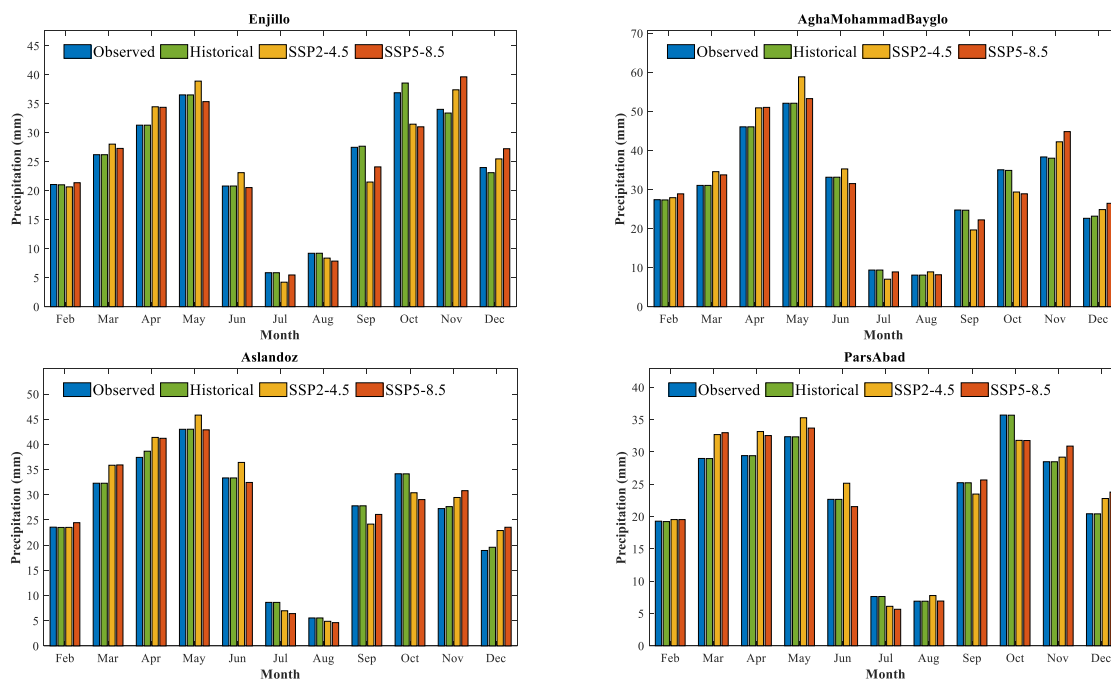
در ایستگاه بران، بیشینه بارش در اردیبهشت (مه) با ۳۸/۳۶ میلی‌متر و کمینه در مرداد (اوت) با ۴/۸۵ میلی‌متر ثبت شده است. بر اساس شکل (۳، ب) داده‌های تاریخی مدل همادی عملکرد بسیار خوبی در شبیه‌سازی میانگین بارش سالانه ایستگاه‌ها نشان داده‌اند؛ به‌طوری که میزان بارش شبیه‌سازی‌شده در زهرا ۳۹۷/۰۳، در بیل‌سوار ۳۷۶/۶۳ و در بران ۲۶۰/۳۵ میلی‌متر بوده که اختلاف آن‌ها با داده‌های مشاهده‌ای بسیار ناچیز (کم‌تر از ۰/۵ میلی‌متر) است. بر اساس شکل (۳، ج) پیش‌بینی‌های سناریوی SSP2-4.5 در بازه ۲۰۵۰-۲۰۲۵، الگوی کلی بارش نسبت به دوره پایه تغییر زیادی نخواهد داشت اما با افزایش نسبی در بیش‌تر نواحی همراه است. در این سناریو، ایستگاه بیل‌سوار (شرق منطقه) با میانگین ۳۹۶/۵۷ میلی‌متر، افزایشی معادل ۵/۲۴ درصد را نسبت به دوره پایه تجربه خواهد کرد. در این ایستگاه، آبان (نوامبر) با ۵۳/۱۸ میلی‌متر پر بارش‌ترین ماه و تیر با ۶/۹۶ میلی‌متر خشک‌ترین ماه پیش‌بینی می‌شود. ایستگاه زهرا (جنوب‌شرق) با میانگین سالانه ۳۹۳/۲۶ میلی‌متر، کاهشی معادل ۱/۰۵ درصد را نشان می‌دهد، در حالی که بارش در آبان ۴۹/۶۵ میلی‌متر (۵/۰۴ میلی‌متر بیش‌تر از پایه) و در تیر با ۲/۲۴ میلی‌متر کاهش همراه خواهد بود. در غرب منطقه، ایستگاه بران با افزایش ۵/۶۹ درصد به میانگین سالانه ۲۷۵/۲۲ میلی‌متر خواهد رسید. در این ایستگاه، اردیبهشت (مه) با ۳/۵ میلی‌متر افزایش بارش همراه بوده، اما تیر با ۴/۵۷ میلی‌متر همچنان کم‌بارش‌ترین ماه باقی خواهد ماند. بر اساس شکل (۳، د) در سناریوی بدبینانه SSP5-8.5، بارش در کل منطقه با شدت



شکل ۳- نقشه میانگین بارش سالانه دشت مغان بر اساس داده‌های مشاهداتی (a)، داده‌های تاریخی مدل همادی (b)، سناریوی متوسط

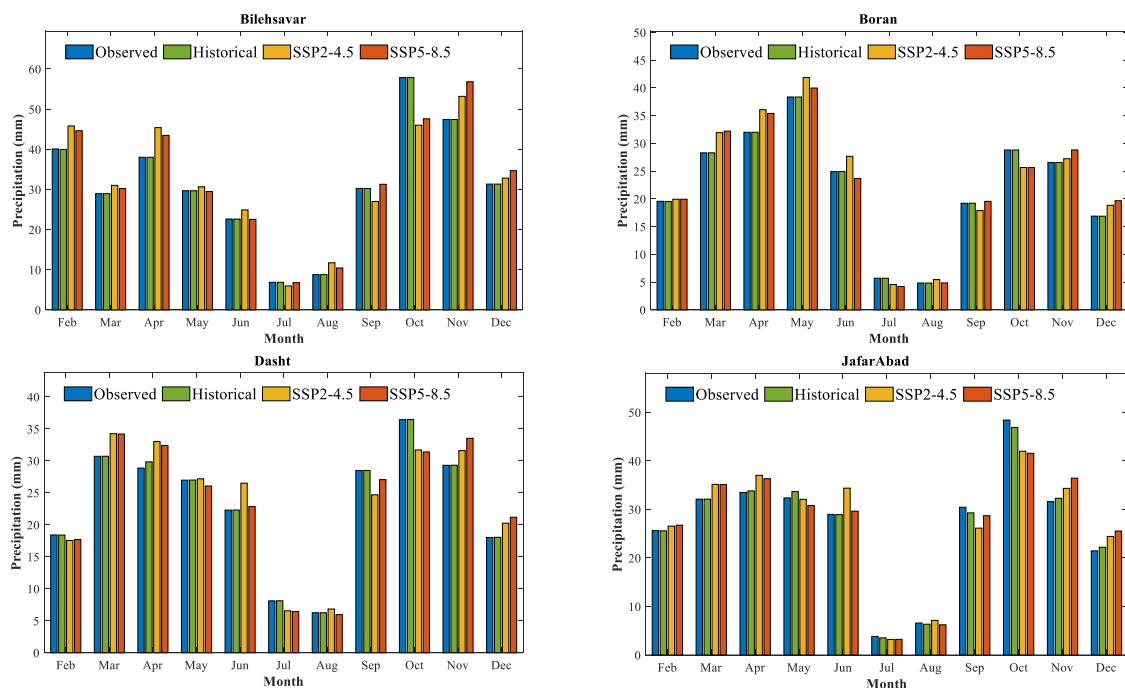
SSP2-4.5 بر اساس برونداد مدل همادی (c)، سناریوی بدبینانه SSP5-8.5 بر اساس برونداد مدل همادی (d)

Figure 3 - Annual annual map of the Moghan Plain based on observational data (a), Historical data of the Hamadi model (b), Medium scenario SSP2-4.5 based on Hamadi model output (c), and (d) Pessimistic scenario SSP5-8.5 based on Hamadi model output.



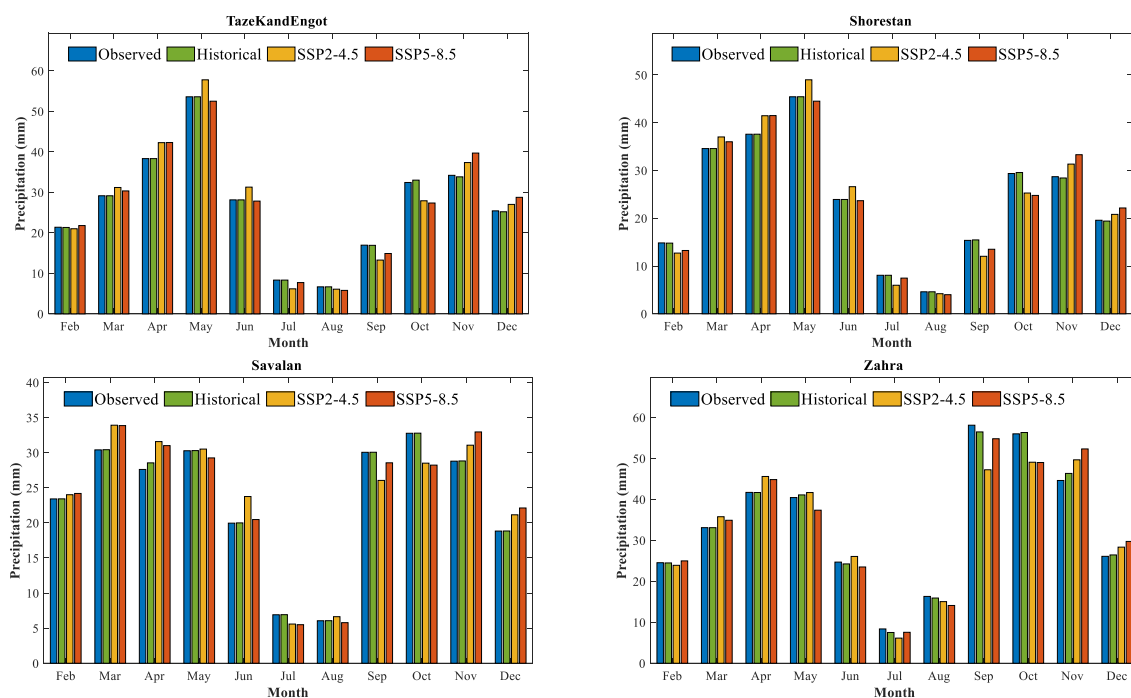
شکل ۴- نمودار میانگین ماهانه بارش مشاهداتی و برونداد تاریخی و سناریوهای SSPs مدل های همادی برای ایستگاههای مورد مطالعه

Figure 4- Graph of monthly average rainfall observations and historical output and SSPs scenarios of Hamadi models for the studied stations



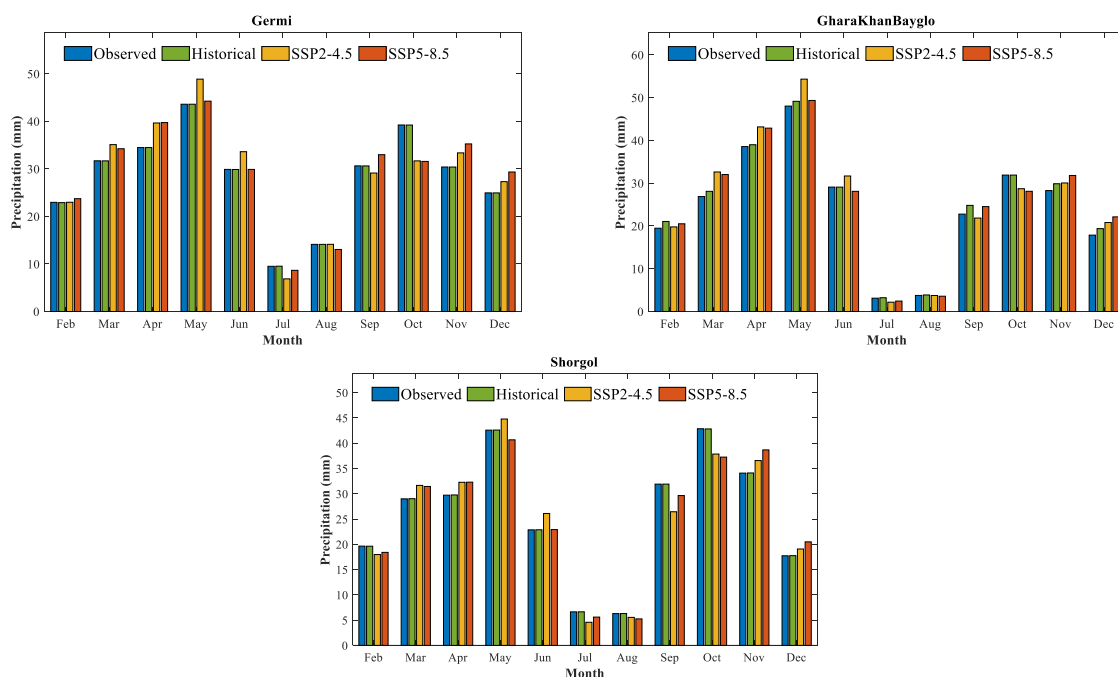
ادامه شکل ۴- نمودار میانگین ماهانه بارش مشاهداتی و برونداد تاریخی و سناریوهای SSPs مدل‌های همادی برای ایستگاه‌های مورد مطالعه

Figure 4. cont. Graph of monthly average rainfall observations and historical output and SSPs scenarios of Hamadi models for the studied stations



ادامه شکل ۴- نمودار میانگین ماهانه بارش مشاهداتی و برونداد تاریخی و سناریوهای SSPs مدل‌های همادی برای ایستگاه‌های مورد مطالعه

Figure 4. cont. Graph of monthly average rainfall observations and historical output and SSPs scenarios of Hamadi models for the studied stations



ادامه شکل ۴- نمودار میانگین ماهانه بارش مشاهداتی و برونداد تاریخی و سناریوهای SSPs مدل های همادی برای ایستگاه های مورد مطالعه

Figure 4. cont. Graph of monthly average rainfall observations and historical output and SSPs scenarios of Hamadi models for the studied stations

شش ماهه دارند. این کاهش بیانگر افزایش شدت و فراوانی خشکسالی ها در آینده تحت این سناریوی اقلیمی است. در این مناطق، کاهش بارش یا تغییر در توزیع زمانی بارش ها می تواند منجر به افزایش خشکسالی های شدید و طولانی تر شود. در مقابل، سایر ایستگاه ها روند معناداری نشان نداده اند که به طور بالقوه به تأثیرات متغیر اقلیمی و عدم وجود یک روند مشخص در تغییرات خشکسالی اشاره دارد. به طور کلی، مقایسه روندهای شاخص SPI بین دوره گذشته و دو سناریوی آینده نشان می دهد که برخی مناطق مانند گرمی و زهرا تحت هر دو سناریو روند افزایشی خشکسالی را تجربه می کنند، ولی شدت این روند در سناریوی بدبینانه بیش تر است. همچنین، برخی مناطق دیگر روندهای معناداری در دوره آینده ندارند که بیانگر پراکندگی فضایی و پیچیدگی تأثیر تغییرات اقلیمی در منطقه است. این تحلیل نشان می دهد که سناریوی بدبینانه پتانسیل ایجاد خشکسالی های شدیدتر و مکررتر را نسبت به سناریوی متوسط دارد، که اهمیت برنامه ریزی و سازگاری با شرایط اقلیمی آینده را افزایش می دهد. یافته های این بخش با نتایج مطالعه Rajaei (2022) در ایستگاه قراخیل نیز همراستا است؛ ایشان بیان داشتند که تحت هر دو سناریوی اقلیمی متوسط و بدبینانه، تعداد و تداوم دوره های خشکسالی در مقیاس های شش و ۱۲ ماهه افزایش خواهد یافت. همچنین، نتایج تحقیق حاضر با یافته های (Node Farahani et al. (2018 نیز همخوانی دارد؛ آن ها نشان دادند که در حوضه شادگان، تعداد

مطابق جدول ۶، نتایج آماره Mann-Kendall اصلاح شده و شیب سن برای SPI در مقیاس شش ماهه برای داده های مشاهداتی و برونداد سناریوهای مدل همادی نشان می دهد ایستگاه های آقامحمدبیگللو، اصلاندوز، دشت، انجیللو، گرمی، قره خان بیگللو، جعفرآباد، ساوالان، شورستان، شورگل و زهرا در دوره مشاهداتی روند معنادار افزایشی در شاخص SPI شش ماهه نشان داده اند. مقدار مثبت شیب سن و Mann-Kendall اصلاح شده با P-value کمتر از ۰/۰۵ در این ایستگاه ها بیانگر کاهش شدت خشکسالی و افزایش رطوبت نسبی در دوره پایه است. در مقابل، ایستگاه بران روند معنادار کاهشی نشان داده که بیانگر افزایش شدت خشکسالی در این منطقه در طول دوره پایه است. در سناریوی انتشار متوسط (SSP2-4.5)، ایستگاه های گرمی و زهرا روند معنادار کاهشی در SPI شش ماهه نشان داده اند. روند موجود در این ایستگاه ها حاکی از افزایش شدت خشکسالی و کاهش فراوانی دوره های ترسالی در آینده است. این روند نشان می دهد که تحت این سناریو، برخی مناطق ممکن است در معرض خشکسالی های طولانی تر و شدیدتر قرار گیرند، که می تواند منجر به کاهش منابع آب و افزایش آسیب پذیری زیست محیطی شود. سایر ایستگاه ها تحت این سناریو روند معناداری نشان نداده اند، که می تواند بیانگر نوسانات نامنظم و عدم الگوی مشخص در تغییرات خشکسالی در این مناطق باشد. در سناریوی بدبینانه (SSP5-8.5)، ایستگاه های گرمی، دشت و پارس آباد روند معنادار کاهشی در SPI

اصلا ندوز، دشت، انجیللو، گرمی، قره‌خان‌بیگلو، جعفرآباد، ساوالان، شورستان، شورگل و زهرا) روند معنادار افزایشی در شاخص SPI دوازده ماهه نشان داده‌اند، مقدار مثبت شیب سن و معناداری آماری P-value کمتر از ۰/۰۵ درصد در این ایستگاه‌ها حاکی از کاهش شدت خشکسالی و افزایش فراوانی دوره‌های ترسالی در دوره پایه است.

ماه‌های خشک در مقیاس شش‌ماهه در سناریوهای متوسط و بدبینانه نسبت به دوره پایه افزایش می‌یابد.

نتایج آماره Mann-Kendall اصلاح شده و شیب سن برای SPI در مقیاس ۱۲ ماهه برای داده‌های مشاهداتی و پرونداد سناریوهای مدل همادی طبق جدول ۷، نشان می‌دهد طبق داده‌های مشاهداتی در دوره پایه، اکثر ایستگاه‌ها (آقامحمدبیگلو،

جدول ۶- نتایج آماره Mann-Kendall اصلاح شده و شیب سن برای SPI در مقیاس شش‌ماهه طبق داده‌های مشاهداتی و پرونداد

سناریوهای مدل همادی

Table 6- Modified Mann-Kendall statistic results and Sen's slope for SPI at six-month scale according to observational data and Hamadi model scenario output

Station	Observational data			SSP2-4.5			SSP5-8.5		
	SenSlope	ZValue	PValue	SenSlope	ZValue	PValue	SenSlope	ZValue	PValue
Aghamohammadbayglo	0.02	5.27	0	0.01	-1.29	0.19	0.01	-1.16	0.24
Aslandoz	0.01	4.64	0	0.01	-0.29	0.76	0.01	-0.17	0.86
Bilehsavar	0.02	1.15	0.24	0.01	0.08	0.93	0.01	-1.85	0.06
Boran	0.008	-6.14	0	0.01	0.21	0.83	0.01	-1.34	0.17
Dasht	0.01	3.42	0.0006	0.01	0.4	0.68	0.009	-2.31	0.02
Enjillo	0.01	2.3	0.02	0.01	-1.43	0.14	0.009	-1.62	0.1
Germi	0.02	2.07	0.03	0.009	-2.65	0.008	0.009	-2.06	0.03
Gharakhanbayglo	0.008	3.19	0.001	0.01	-1.07	0.28	0.01	-0.76	0.44
Jafarabad	0.01	6.73	0	0.01	0.64	0.51	0.01	-1.58	0.11
Parsabad	0.008	1.24	0.21	0.01	0.06	0.94	0.01	-2.05	0.03
Savalan	0.01	3.07	0.002	0.01	0.22	0.82	0.009	-1.51	0.12
Shorestan	0.01	2.39	0.01	0.01	-0.68	0.49	0.01	-0.71	0.47
Shorgol	0.01	4.09	0	0.01	-1.2	0.22	0.009	-1.49	0.13
Tazekandengot	0.01	0.465	0.64	0.01	-1.18	0.23	0.01	-1.62	0.1
Zahra	0.01	2.21	0.02	0.008	-3.42	0.0006	0.009	-1.66	0.09

الگوهای بارشی تحت سناریوی SSP5-8.5 مطابقت دارد. بر این اساس، روند خشکسالی در منطقه مورد مطالعه از یک وضعیت نسبتاً مطلوب و متعادل در گذشته، به حالتی ناپایدار اما کنترل‌پذیر در سناریوی متوسط، و نهایتاً به شرایط بحرانی و تهدیدآمیز در سناریوی بدبینانه سوق می‌یابد. این تحول تدریجی اما معنادار، بر ضرورت اتخاذ سیاست‌های مؤثر در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و توسعه راهبردهای سازگاری اقلیمی در سطح منطقه‌ای تأکید می‌ورزد. این یافته‌ها با نتایج مطالعات Vatanparast et al. (2023) و Ghaleh Juq and Salahi (2025) نیز هم‌راستا هستند؛ به‌طوری‌که در هر دو پژوهش، تحت سناریوی بدبینانه، افزایش شدت و فراوانی دوره‌های خشکسالی و کاهش وقوع شرایط نرمال مورد تأکید قرار گرفته است. این هم‌خوانی بر دقت پیش‌بینی‌ها در خصوص تأثیرات منفی سناریوهای اقلیمی بدبینانه بر وضعیت خشکسالی در منطقه می‌افزاید.

در مقابل، ایستگاه بران روند کاهشی و معنادار دارد که نشان‌دهنده افزایش شدت خشکسالی در این منطقه در دوره پایه است. در سناریوی انتشار متوسط (SSP2-4.5)، تمام ایستگاه‌ها روند معناداری از نظر آماری نشان نمی‌دهند، که می‌تواند ناشی از نوسانات متغیر اقلیمی و عدم وجود یک الگوی ثابت در تغییرات خشکسالی تحت این سناریو باشد. این عدم معناداری می‌تواند بیان‌گر پایداری نسبی شرایط اقلیمی در سناریوی انتشار متوسط باشد که تغییرات شدیدی در شاخص SPI ایجاد نمی‌کند. در سناریوی بدبینانه (SSP5-8.5)، روند خشکسالی در برخی ایستگاه‌ها (آقامحمدبیگلو، دشت، بيله‌سوار، انجیللو، گرمی، جعفرآباد، پارس‌آباد، ساوالان، زهرا) معنادار و کاهشی است، این روند کاهشی در SPI بیان‌گر افزایش شدت خشکسالی در آینده تحت سناریوی انتشار بالای گازهای گلخانه‌ای است. ایستگاه‌هایی مانند دشت و جعفرآباد کاهش شدیدی در مقدار SPI ۱۲ ماهه نشان می‌دهند که حاکی از خشکسالی‌های طولانی‌تر و شدیدتر در این مناطق است. این نتایج با انتظارات ناشی از افزایش دما و تغییر در

جدول ۷- نتایج آماره Mann-Kendall اصلاح شده و شیب سن برای SPI در مقیاس ۱۲ ماهه طبق داده‌های مشاهداتی و بروداد

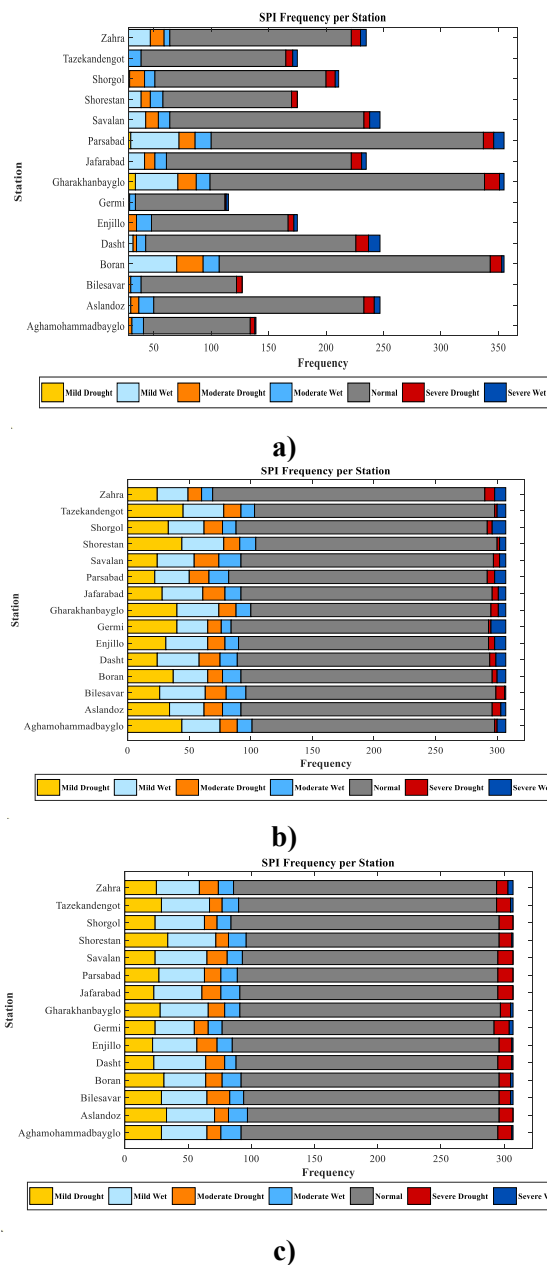
سناریوهای مدل همادی

Table 7- Modified Mann-Kendall statistic results and Sen's slope for SPI at 12-month scale according to observational data and Hamadi model scenario output

Station	Observational data			SSP2-4.5			SSP5-8.5		
	SenSlope	ZValue	PValue	SenSlope	ZValue	PValue	SenSlope	ZValue	PValue
Aghamohammadbayglo	0.01	5.8	0	0.01	-0.33	0.73	0.009	-3.03	0.002
Aslando	0.01	4.81	0	0.01	0.21	0.83	0.01	0.38	0.7
Bilehsavar	0.02	1.25	0.2	0.009	-0.03	0.97	0.009	-2.18	0.029
Boran	0.008	-8.65	0	0.01	0.62	0.53	0.01	-1.73	0.083
Dasht	0.012	6.1	0	0.01	0.55	0.57	0.01	-5.007	0
Enjillo	0.01	3.97	0	0.009	-0.56	0.57	0.009	-2.54	0.01
Germi	0.02	3.01	0.002	0.009	-0.94	0.34	0.009	-2.27	0.02
Gharakhanbayglo	0.008	6.96	0	0.01	-0.34	0.73	0.01	-1.18	0.23
Jafarabad	0.011	6.28	0	0.01	0.55	0.58	0.009	-6.02	0
Parsabad	0.008	1.34	0.17	0.01	0.37	0.7	0.01	-2.7	0.006
Savalan	0.01	3.33	0.0008	0.01	0.38	0.7	0.01	-2.98	0.002
Shorestan	0.01	3.79	0.0001	0.01	0.06	0.94	0.01	-1.38	0.16
Shorgol	0.01	5.38	0	0.01	-0.16	0.86	0.009	-1.9	0.05
Tazekandengot	0.01	0.91	0.35	0.01	-0.1	0.91	0.01	-1.9	0.05
Zahra	0.01	3.73	0.0001	0.009	-1.41	0.15	0.009	-3.54	0.0003

شدید (۱۰۶ ماه) در سطح پایین تری باقی می‌مانند. در این سناریو، بیش‌ترین خشکسالی خفیف در ایستگاه تازه‌کند انگوت و بیش‌ترین ترسالی خفیف در بیل‌سوار پیش‌بینی می‌شود؛ ایستگاه ساوالان نیز در هر دو طبقه خشکسالی و ترسالی متوسط سهم بیش‌تری خواهد داشت. ایستگاه زهرا در جنوب‌شرق نیز با افزایش در وضعیت نرمال و خشکسالی شدید، پتانسیل نوسانات بیش‌تر را نشان می‌دهد، در حالی که ایستگاه گرمی با بالاترین فراوانی ترسالی شدید، روندی متفاوت را ارائه می‌کند. در سناریوی بدبینانه SSP5-8.5، با وجود افزایش کلی بارش، وضعیت نرمال (۳۰۸۳ ماه) هم‌چنان در صدر قرار دارد، اما ترسالی خفیف با ۵۵۲ ماه نسبت به خشکسالی خفیف (۴۰۵ ماه) رشد بیش‌تری خواهد داشت. خشکسالی شدید به ۱۵۸ ماه افزایش می‌یابد، در حالی که ترسالی شدید با تنها ۱۹ ماه به‌شکل قابل توجهی کاهش می‌یابد. از منظر فضایی، ایستگاه‌های دشت و ساوالان بیش‌ترین سهم در طبقه ترسالی خفیف را دارند؛ آقامحمدیگلو در ترسالی متوسط و زهرا در ترسالی شدید پیش‌تاز هستند. در مقابل، ایستگاه‌های گرمی، جعفرآباد، پارس‌آباد و ساوالان با بیش‌ترین موارد خشکسالی شدید مواجه خواهند شد و بیل‌سوار و شورستان نیز به‌ترتیب بیش‌ترین سهم در طبقات خشکسالی متوسط و خشکسالی خفیف را خواهند داشت.

مطابق شکل ۵، براساس تحلیل شاخص (SPI) در مقیاس شش‌ماهه طی دوره آماری ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۴، وضعیت نرمال با ۲۳۲۶ ماه به‌عنوان الگوی اقلیمی غالب در دشت مغان شناسایی شد. طبقات ترسالی خفیف (۳۲۵ ماه) و خشکسالی خفیف (۲۶۵ ماه) به‌ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار دارند، در حالی که ترسالی و خشکسالی متوسط با فراوانی برابر (۱۵۴ ماه) سهم مشابهی داشته‌اند. وقوع خشکسالی شدید (۱۰۸ ماه) و ترسالی شدید (۶۱ ماه) نسبتاً محدود بوده که بیان‌گر شدت پایین رخدادهای حدی در این دوره است. در تحلیل مکانی، ایستگاه قره‌خان‌بیگلو بیش‌ترین تعداد در طبقات نرمال، خشکسالی خفیف و خشکسالی شدید را ثبت کرده است، در حالی که ایستگاه بران، در شمال‌شرق منطقه، با بیش‌ترین وقوع ترسالی متوسط، ترسالی خفیف و خشکسالی متوسط، بیش‌ترین تنوع اقلیمی را تجربه کرده است. ایستگاه دشت نیز با بیش‌ترین موارد ترسالی شدید، به‌عنوان منطقه‌ای با پتانسیل اقلیم مرطوب‌تر برجسته می‌شود. در افق آینده (۲۰۲۵-۲۰۵۰)، تحت سناریوی متوسط SSP2-4.5، طبقه نرمال با ۳۰۵۵ ماه (حدود ۶۳ درصد) هم‌چنان غالب خواهد بود، اما افزایش نسبی در خشکسالی خفیف (۴۹۶ ماه) و ترسالی خفیف (۴۶۳ ماه) حاکی از رشد نوسانات ملایم اقلیمی است. خشکسالی متوسط با ۲۲۱ و ترسالی متوسط با ۱۹۴ مورد تداوم می‌یابد، در حالی که خشکسالی شدید (۷۰ ماه) و ترسالی



شکل ۵- فراوانی طبقات خشکسالی SPI در مقیاس شش ماهه برای ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۱۴) (a)، دوره آینده (۲۰۲۵-۲۰۵۰) طبق سناریوی متوسط SSP2-4.5 (b)، دوره آینده (۲۰۲۵-۲۰۵۰) طبق سناریوی بدبینانه SSP5-8.5 (c)

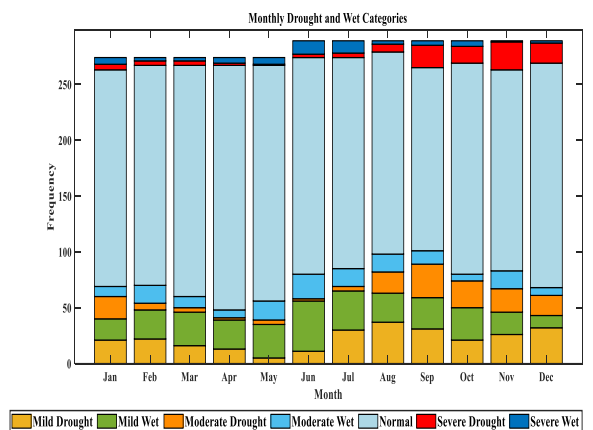
Figure 5- Frequency of SPI drought classes on a six-month scale for the study stations in the base period (1985-2014) (a), Future period (2025-2050) according to the SSP2-4.5 medium scenario (b), and Future period (2025-2050) according to the pessimistic scenario SSP5-8.5 (c)

آبان (مورد ۲۵) به اوج رسیده‌اند که بیان‌گر ضعف بارندگی در دوره گذار تابستان به پاییز است. در این میان، فروردین (آوریل) با ۲۱۹ مورد در طبقه نرمال، به‌عنوان پایدارترین ماه اقلیمی شناسایی می‌شود که با آغاز بهار و شرایط مناسب برای رشد گیاهان هم‌راستا است. در افق ۲۰۲۵-۲۰۵۰ و تحت سناریوی میانه‌رو SSP2-4.5، اوج خشکسالی‌ها به آذر (دسامبر) منتقل شده است؛ خشکسالی خفیف، متوسط و شدید در این ماه به‌ترتیب با ۱۱۷، ۶۱ و ۲۲ مورد بیش‌ترین فراوانی را نشان می‌دهند. این تغییر زمانی می‌تواند نشان‌دهنده تأخیر در آغاز بارندگی‌های پاییزی و فشردگی خشکی

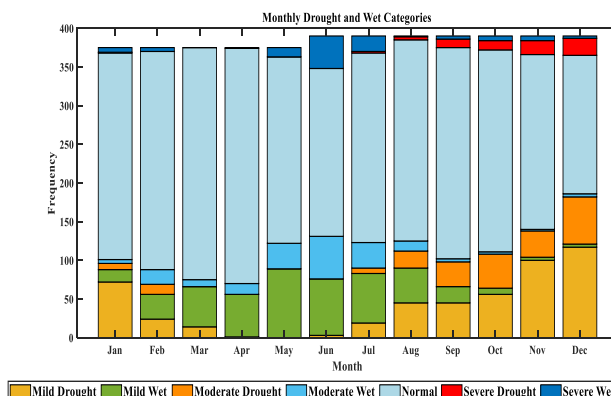
بر اساس شکل ۶، بررسی فراوانی ماهانه طبقات خشکسالی و ترسالی طی دوره مشاهداتی (۱۹۸۵-۲۰۱۴) نشان‌دهنده الگوهای زمانی مشخص در بروز ناهنجاری‌های اقلیمی در دشت مغان است. خشکسالی خفیف بیش‌ترین وقوع را در مرداد (آگوست) با ۳۷ مورد داشته که احتمالاً به حداکثر دما و تبخیر در اواخر تابستان مربوط می‌شود. در مقابل، خرداد (ژوئن) بیش‌ترین فراوانی ترسالی خفیف (۴۵ مورد)، ترسالی متوسط (۲۲ مورد) و ترسالی شدید (۱۲ مورد) را ثبت کرده که حاکی از بارش‌های مؤثر در آغاز تابستان است. خشکسالی متوسط و شدید نیز به‌ترتیب در شهریور (۳۰ مورد) و

شدید در آبان (۵۵ مورد) قرار دارد. تمرکز خشکسالی در پاییز می‌تواند تهدیدی برای آغاز فصل زراعی باشد. در سوی دیگر، اردیبهشت (۹۹ مورد در ترسالی خفیف)، خرداد (۴۴ مورد در ترسالی متوسط) و تیر (۴ مورد در ترسالی شدید) نشان می‌دهند که بهار و اوایل تابستان همچنان کانون بارش‌های مثبت باقی خواهند ماند.

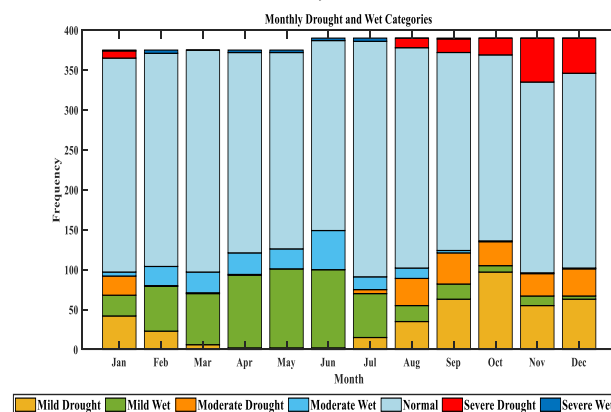
در آستانه زمستان باشد. در مقابل، اردیبهشت (می) با ۸۹ مورد در ترسالی خفیف و خرداد با بیش‌ترین موارد ترسالی متوسط و شدید، نقش مثبت خود در سامانه‌های بارشی را حفظ کرده‌اند. فروردین همچنان در طبقه نرمال با ۳۰۴ مورد، دوره‌ای باثبات اقلیمی محسوب می‌شود. در سناریوی شدیدتر SSP5-8.5، الگوی زمانی خشکسالی شدت بیش‌تری می‌یابد. اوج خشکسالی خفیف در مهر (۹۷ مورد)، خشکسالی متوسط در شهریور (۳۹ مورد) و خشکسالی



a)



b)



c)

شکل ۶- فراوانی طبقات خشکسالی SPI در مقیاس شش ماهه برای ماه‌های میلادی در دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۱۴) (a)، دوره آینده (۲۰۵۰-۲۰۵۰)

(۲۰۲۵ طبق سناریوی متوسط SSP2-4.5 (b)، دوره آینده (۲۰۲۵-۲۰۵۰) طبق سناریوی بدبینانه SSP5-8.5 (c)

Figure 6 - Frequency of SPI drought classes on a six-month scale for Gregorian months in the base period (1985-2014) (a), Future period (2025-2050) according to the SSP2-4.5 medium scenario (b), and Future period (2025-2050) according to the pessimistic scenario SSP5-8.5 (c)

خشکسالی خفیف (۲۷۰ ماه) بیش‌ترین سهم را داشتند. ایستگاه پارس‌آباد در شمال، با ۳۸ ماه خشکسالی خفیف و ۳۷ ماه خشکسالی متوسط، کانون اصلی خشکسالی منطقه است.

در مقابل، ایستگاه قره‌خان‌بیگللو با تنوع بالا در تمامی طبقات از جمله ۳۷ ماه ترسالی خفیف، ۱۳ ماه خشکسالی شدید و ۲۴۹ ماه نرمال، نوسانات اقلیمی قابل‌توجهی دارد. در آینده و تحت سناریوی SSP2-4.5، طبقه نرمال با ۲۹۸۴ ماه فراوانی بیش‌تر خواهد یافت که گویای تمایل منطقه به سمت پایداری اقلیمی است. خشکسالی خفیف (۶۰۵ ماه) و ترسالی خفیف (۳۲۴ ماه) رتبه‌های بعدی را دارند. ایستگاه قره‌خان‌بیگللو با ۴۸ ماه خشکسالی خفیف و شورستان با ۶ ماه خشکسالی شدید به‌عنوان نقاط بحرانی خشکسالی ظاهر می‌شوند.

ایستگاه زهرا با ۲۱۶ ماه نرمال، از پایداری بالا برخوردار خواهد بود. در سناریوی شدیدتر SSP5-8.5، طبقه نرمال با ۳۱۰۰ ماه هم‌چنان غالب است، ولی شدت خشکسالی و نوسانات افزایش می‌یابد. خشکسالی شدید با ۱۹۰ ماه و خشکسالی متوسط با ۲۳۴ ماه، به‌ویژه در ایستگاه زهرا (۱۷ ماه خشکسالی شدید) و اصلاندوز (۲۵ ماه خشکسالی متوسط) برجسته می‌شوند. در مقابل، شورگل با ۲۱۷ ماه نرمال و پارس‌آباد با ۳۸ ماه ترسالی خفیف، مناطق دارای تعادل یا پتانسیل بارندگی هستند.

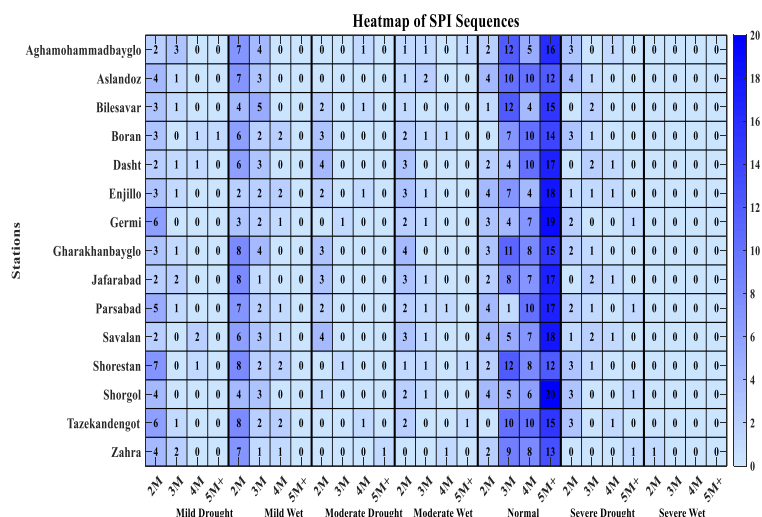
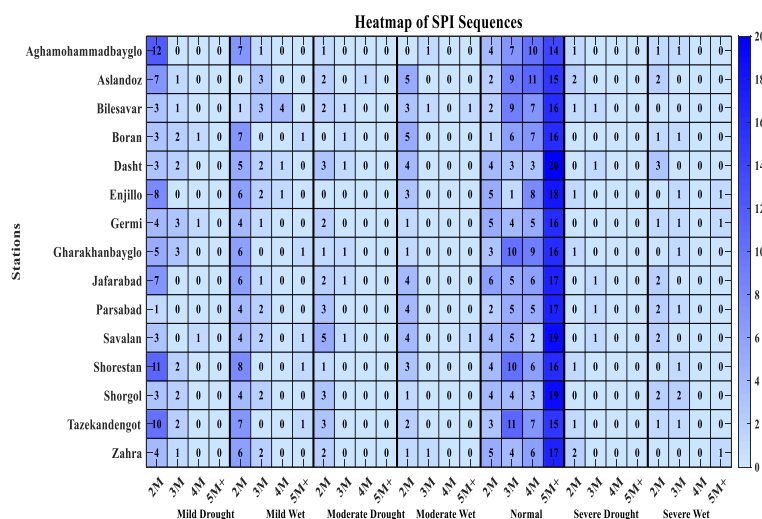
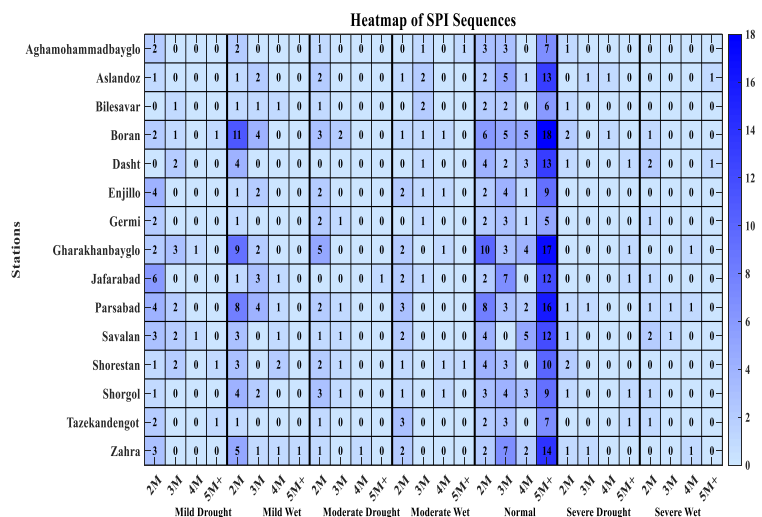
اصلاندوز نیز با حضور هم‌زمان در سه طبقه مهم اقلیمی (خشکسالی خفیف، متوسط و ترسالی شدید)، نشان‌دهنده ناپایداری بالا و آسیب‌پذیری اقلیمی مضاعف است.

مطابق شکل ۷، در دوره مشاهداتی (۱۹۸۵-۲۰۱۴)، شرایط نرمال با بیش‌ترین توالی‌های بلندمدت (۵ ماهه و بیش‌تر) و ۱۶۸ مورد تکرار، نشان‌دهنده پایداری اقلیمی در سطح دشت مغان بوده است. ایستگاه بران در غرب منطقه با ۱۸ مورد توالی نرمال، پایدارترین ناحیه شناخته می‌شود. در مقابل، توالی‌های دوماهه در خشکسالی‌ها رایج‌تر بوده و ماهیت گذرا و ناپایدار این پدیده را نشان می‌دهد: خشکسالی خفیف در ایستگاه بران (۱۱ مورد)، متوسط در قره‌خان‌بیگللو (۵ مورد) و شدید در بران و شورستان (۲ مورد) بیش‌ترین تکرار را داشته‌اند.

در ترسالی‌ها نیز توالی غالب دوماهه بوده است؛ ترسالی خفیف در بران (۱۱ مورد)، ترسالی متوسط در پارس‌آباد (۳ مورد) و ترسالی شدید در دشت و ساوالان (۲ مورد) نمایانگر الگوی رطوبتی در نواحی شمالی هستند. در دوره آینده (۲۰۲۵-۲۰۵۰) و تحت سناریوی SSP2-4.5، طبقه نرمال با ۲۵۱ مورد توالی بلندمدت هم‌چنان الگوی غالب خواهد بود. ایستگاه دشت در شمال با ۲۰ بار تکرار، نقطه تعادل اقلیم آینده است. خشکسالی‌های دوماهه بیش‌تر در آقامحمدبیگللو (۲۰ مورد، خفیف)، ساوالان (۵ مورد، متوسط) و اصلاندوز (۲ مورد، شدید) پیش‌بینی می‌شوند. در بخش ترسالی، شورستان (۸ مورد)، بران و اصلاندوز (۵ مورد)، و دشت (۳ مورد) به‌عنوان نقاط مستعد ترسالی کوتاه‌مدت ظاهر می‌شوند. در سناریوی شدیدتر SSP5-8.5 نیز طبقه نرمال با ۲۳۸ مورد توالی بلندمدت، هم‌چنان غالب است.

ایستگاه شورگل در مرکز منطقه نقش کانونی در ثبات اقلیمی دارد. خشکسالی‌های دوماهه در شورستان (۷ مورد، خفیف)، دشت و پارس‌آباد (۴ مورد، متوسط)، و اصلاندوز (۴ مورد، شدید) نشان از افزایش خشکی در جنوب‌غرب و شمال‌غرب دارد. در ترسالی‌ها، بیش‌ترین تکرار در ایستگاه‌های شورستان، قره‌خان‌بیگللو، تازه‌کند، انگوت و جعفرآباد (۸ مورد، ترسالی خفیف)، قره‌خان‌بیگللو (۴ مورد، متوسط) و زهرا (۱ مورد، شدید) مشاهده می‌شود.

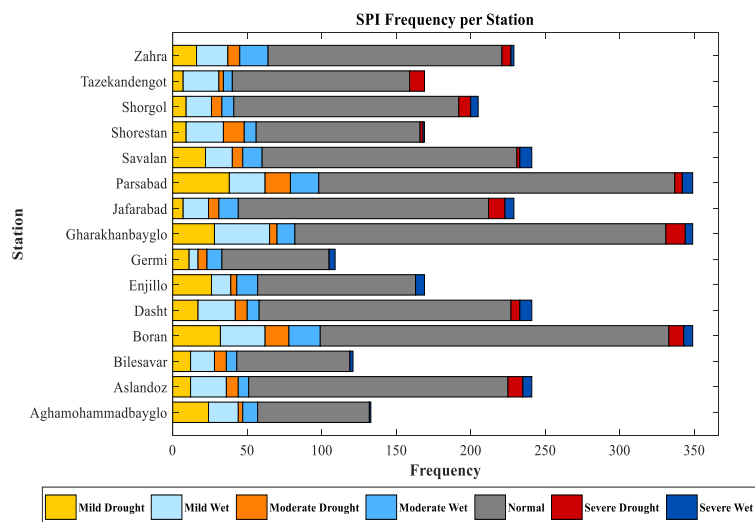
بر اساس شکل ۸، در دوره مشاهداتی (۱۹۸۵-۲۰۱۴)، طبقه نرمال با ۲۲۷۰ ماه، بیش‌ترین فراوانی را داشت و نشان‌دهنده ثبات اقلیمی غالب در منطقه بود. پس از آن ترسالی خفیف (۳۱۷ ماه) و



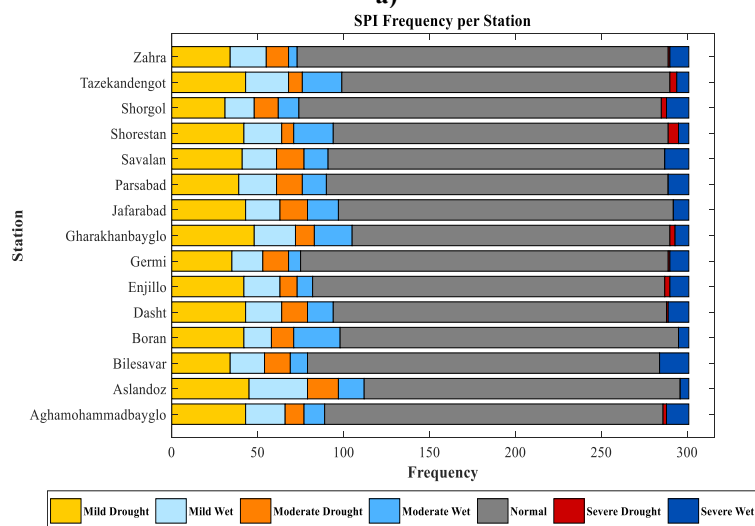
شکل ۷- فراوانی توالی طبقات خشکسالی SPI در مقیاس شش ماهه برای ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۱۴) (a)،

دوره آینده (۲۰۲۵-۲۰۵۰) طبق سناریوی متوسط SSP2-4.5 (b)، دوره آینده (۲۰۲۵-۲۰۵۰) طبق سناریوی بدبینانه SSP5-8.5 (c)

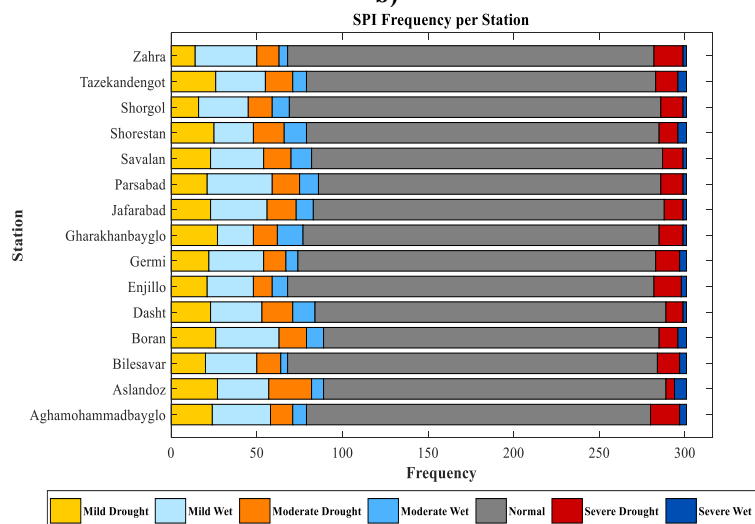
Figure 7- Frequency of SPI drought class sequences at a six-month scale for the study stations in the base period (1985-2014) (a), Future period (2025-2050) according to the SSP2-4.5 medium scenario (b), and Future period (2025-2050) according to the pessimistic scenario SSP5-8.5 (c)



a)



b)



c)

شکل ۸- فراوانی طبقات خشکسالی SPI در مقیاس دوازده‌ماهه برای ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۱۴) (a)، دوره آینده (۲۰۲۵-۲۰۵۰) طبق سناریوی متوسط SSP2-4.5 (b)، دوره آینده (۲۰۲۵-۲۰۵۰) طبق سناریوی بدبینانه SSP5-8.5 (c)

Figure 8- Frequency of SPI drought classes on a 12-month scale for the study stations in the base period (1985-2014) (a), Future period (2025-2050) according to the SSP2-4.5 medium scenario (b), and Future period (2025-2050) according to the pessimistic scenario SSP5-8.5 (c)

پارس آباد با ثبت ۱۷ مورد در این طبقه، پایدارترین وضعیت اقلیمی را دارد. در مقابل، خشکسالی های کوتاه مدت (دوماهه) در طبقات خفیف و متوسط رایج تر هستند؛ به ویژه در ایستگاه های بران، گرمی و پارس آباد.

در خشکسالی شدید، توالی های بلندمدت (۵ ماهه و بیش تر) تنها به صورت پراکنده و محدود دیده شده اند که نشانه ای از وقوع دوره های شدید اما نادر خشکسالی است. در طبقات ترسالی نیز، توالی های کوتاه مدت (به ویژه دوماهه) در ترسالی خفیف و متوسط غالب اند؛ در حالی که در ترسالی شدید، برخی ایستگاه ها (مانند شورگل، ساوالان، پارس آباد و... هرکدام با یک مورد) شاهد توالی های مرطوب بلندمدت بوده اند.

در سناریوی آینده SSP2-4.5، ثبات اقلیمی افزایش یافته و طبقه نرمال با ۱۴۹ مورد توالی بلندمدت همچنان بیش ترین فراوانی را دارد؛ ایستگاه اصلاندوز با ۱۲ مورد در صدر قرار می گیرد. در مقابل، خشکسالی های دو ماهه در طبقات مختلف خفیف تا شدید رایج تر خواهند بود.

ایستگاه هایی مانند شورگل، پارس آباد، انجیللو، و اصلاندوز بیش ترین خطر را از خشکسالی های کوتاه مدت دارند. در ترسالی متوسط و شدید نیز، توالی های ۳ تا ۵ ماهه در برخی ایستگاه ها (مانند انگوت، شورستان و اصلاندوز) نشان از وقوع شرایط مرطوب و پایدار دارد. در سناریوی SSP5-8.5، با افزایش شدت نوسانات اقلیمی، تعداد توالی های بلندمدت در طبقه نرمال به ۱۸۴ مورد افزایش یافته و ایستگاه شورگل با ۱۵ مورد، پایدارترین اقلیم را خواهد داشت. با این حال، در بیش تر طبقات دیگر از جمله ترسالی ها و خشکسالی ها، توالی های دو ماهه بیش ترین فراوانی را دارند که بیان گر افزایش فراوانی دوره های ناپایدار اقلیمی است.

ایستگاه های جعفرآباد، اصلاندوز، دشت و گرمی در معرض توالی های بلندمدت و کوتاه مدت شدید قرار خواهند گرفت که نشان دهنده آسیب پذیری اقلیمی بالای این نواحی در آینده است.

مطابق شکل ۹، در دوره مشاهداتی (۱۹۸۵-۲۰۱۴)، بیش ترین نوسانات اقلیمی ماهانه در ماه های اردیبهشت و بهمن مشاهده شد؛ به طوری که در اردیبهشت، ترسالی متوسط (۲۶ مورد) و خشکسالی خفیف (۲۱ مورد) و در بهمن، ترسالی خفیف (۳۹ مورد) و خشکسالی متوسط (۱۶ مورد) فراوانی بالایی داشتند.

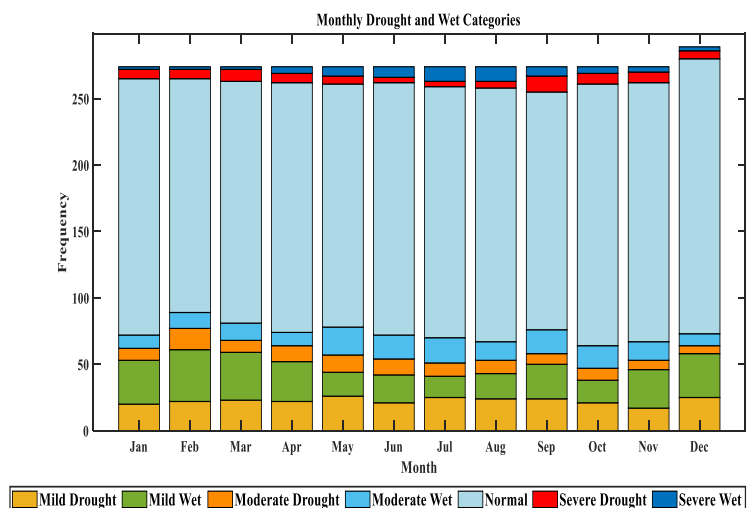
این هم زمانی شرایط مرطوب و خشک، نشانه ای از بی ثباتی اقلیمی در این ماه هاست. خشکسالی شدید در شهریور (۱۲ مورد) و ترسالی شدید در تیر و مرداد (هرکدام ۱۱ مورد) نیز بیان گر شدت رخداد های اقلیمی افراطی در تابستان است. در عین حال، ماه آذر با ۲۰۷ مورد نرمال ترین وضعیت را داراست.

در سناریوی آینده SSP2-4.5، ماه بهمن با ۳۰۱ مورد در طبقه نرمال، متعادل ترین شرایط اقلیمی را خواهد داشت. مرداد، هم در خشکسالی خفیف (۷۶ مورد) و هم ترسالی متوسط (۳۱ مورد)، بیش ترین نوسانات را تجربه خواهد کرد. مهر (۴۳ مورد ترسالی خفیف) و دی (۲۴ مورد خشکسالی متوسط) نیز از ماه های پرتکرار در اقلیم های افراطی هستند.

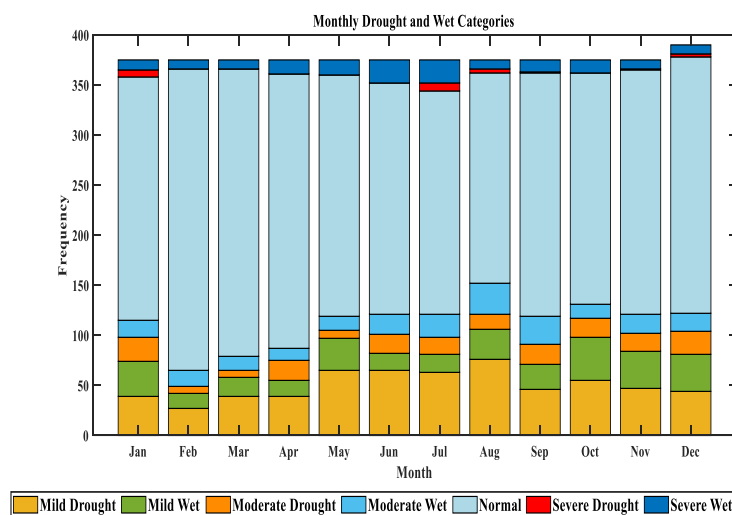
تیر با ۸ مورد خشکسالی شدید و هم زمان ۲۳ مورد ترسالی شدید، نماد پایداری ناپایدار اقلیمی در تابستان خواهد بود. در سناریوی شدید تر SSP5-8.5، خرداد و شهریور (هرکدام ۲۷۱ مورد در طبقه نرمال) ماه هایی با ثبات اقلیمی بالاتر خواهند بود. اسفند با ۴۶ مورد خشکسالی خفیف، و بهمن با ۵۷ مورد ترسالی خفیف، همچنان شاهد نوسانات بارز اقلیمی خواهند بود.

در فروردین، شدت خشکسالی متوسط با ۳۴ مورد بیش تر می شود. مرداد نیز با ۲۶ مورد در هر دو طبقه ترسالی متوسط و خشکسالی شدید، نقطه اوج ناپایداری در تابستان خواهد بود. در نهایت، شهریور و مهر با ۱۵ مورد ترسالی شدید، نمایانگر دوره هایی با احتمال افزایش بارندگی شدید در اواخر تابستان و اوایل پاییز هستند.

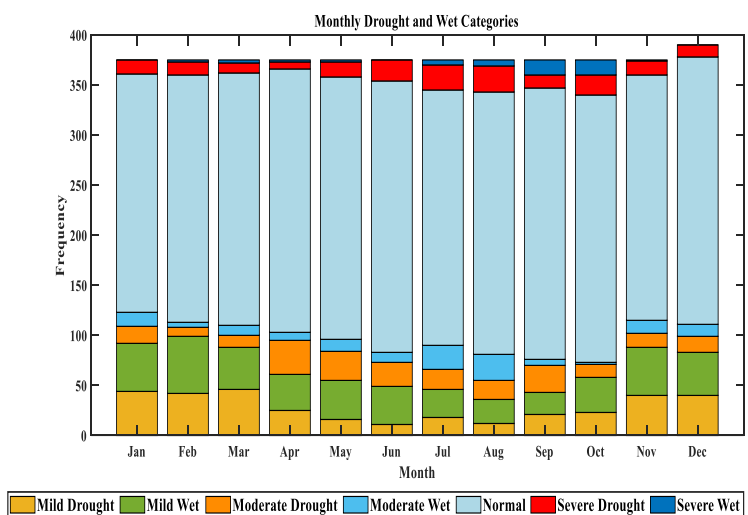
بر اساس شکل ۱۰، بر اساس نتایج دوره مشاهداتی، طبقه نرمال با ۱۳۴ توالی ۵ ماهه و بیش تر، بالاترین فراوانی را داراست که نشان دهنده ثبات اقلیمی نسبی در منطقه است. ایستگاه



a)



b)

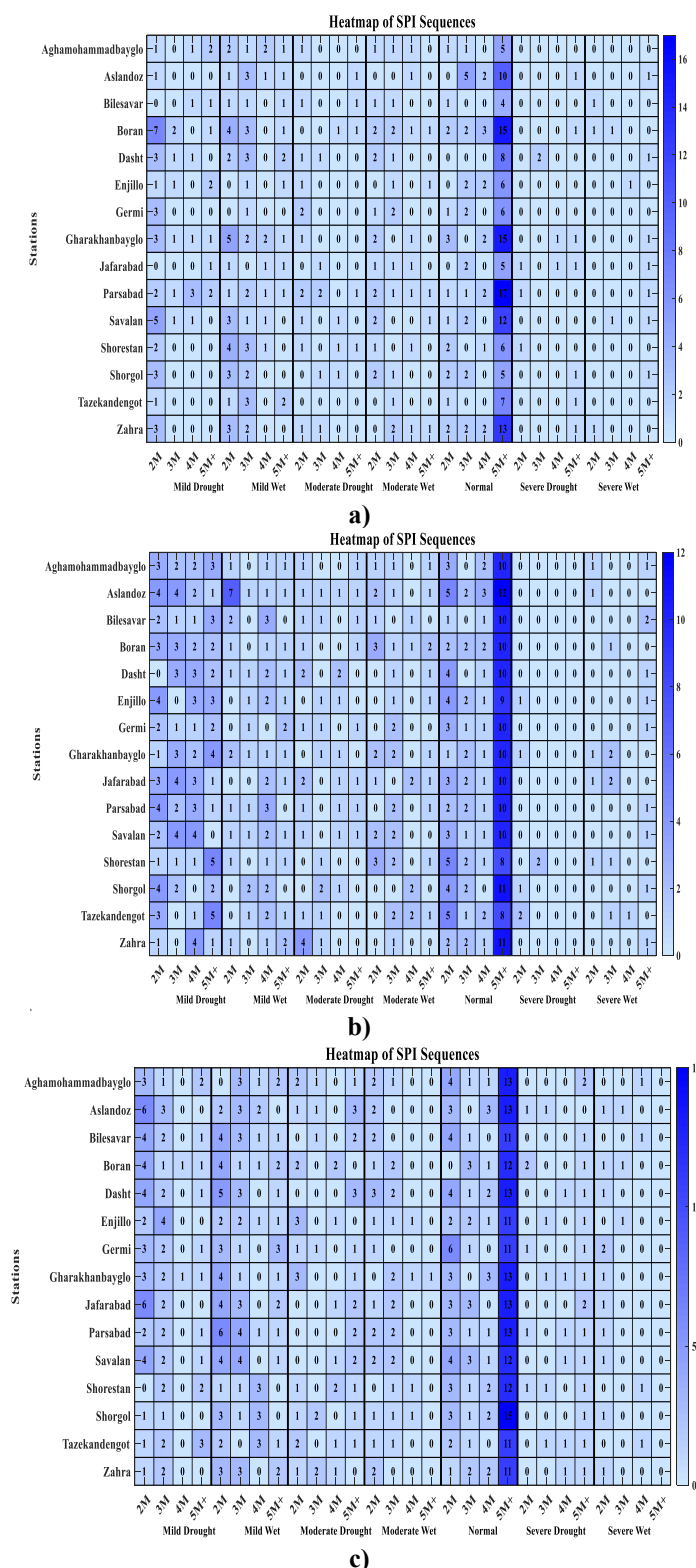


c)

شکل ۹- فراوانی طبقات خشکسالی SPI در مقیاس دوازده‌ماهه برای ماه‌های میلادی در دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۸۵) (a)، دوره آینده (۲۰۵۰-۲۰۲۵)

(b) طبق سناریوی متوسط SSP2-4.5، دوره آینده (۲۰۲۵-۲۰۵۰) طبق سناریوی بدبینانه SSP5-8.5 (c)

Figure 9 - Frequency of SPI drought classes on a 12-month scale for Gregorian months in the base period (1985-2014) (a), Future period (2025-2050) according to the SSP2-4.5 medium scenario (b), Future period (2025-2050) according to the pessimistic scenario SSP5-8.5 (c)



شکل ۱۰- فراوانی توالی طبقات خشکسالی SPI در مقیاس دوازده ماهه برای ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره پایه (۱۹۸۵-۲۰۱۴) (a)،

دوره آینده (۲۰۲۵-۲۰۵۰) طبق سناریوی متوسط SSP2-4.5 (b)، دوره آینده (۲۰۲۵-۲۰۵۰) طبق سناریوی بدبینانه SSP5-8.5 (c)

Figure 10- Frequency of SPI drought class sequences on a 12-month scale for the study stations in the base period (1985-2014) (a), Future period (2025-2050) according to the SSP2-4.5 medium scenario (b), and Future period (2025-2050) according to the pessimistic scenario SSP5-8.5 (c)

۴- نتیجه‌گیری

و به‌کارگیری فناوری‌های نوین آبیاری از جمله اقداماتی است که باید در اولویت قرار گیرد تا تأثیرات منفی تغییر اقلیم کاهش یابد. در نهایت، یافته‌های این مطالعه تأکید می‌کند که برای مواجهه مؤثر با پیامدهای تغییر اقلیم در دشت مغان، باید هم‌زمان به بهبود مدل‌های اقلیمی، اصلاح سیاست‌های کشاورزی و مدیریت منابع آب توجه شود و برنامه‌ریزی‌های منطقه‌ای با تمرکز بر افزایش انعطاف‌پذیری زیست‌محیطی و اقتصادی انجام گیرد. این امر علاوه بر حفظ پایداری منابع، می‌تواند به توسعه پایدار و افزایش امنیت غذایی منطقه کمک کند. یافته‌های این پژوهش با نتایج Heydarzadeh and Nohegar (2022) هم‌راستا است؛ آن‌ها نیز بیان داشتند که در دوره آینده و تحت سناریوهای متوسط و بدبینانه، اگرچه خشکسالی‌ها شدیدتر خواهد بود، اما طبقه نرمال همچنان وضعیت غالب منطقه باقی خواهد ماند. همچنین، (Asgari et al, 2023) در مطالعه خود اشاره کردند که با وجود افزایش بارش و خشکسالی در هر دو سناریوی متوسط و بدبینانه، شرایط منطقه عمدتاً نرمال و متمایل به ترسالی پیش‌بینی می‌شود. علاوه بر این، افزایش خشکسالی در دوره آینده در مطالعات (Mesbahzadeh et al. (2019 و Zhang et al. (2023 نیز مورد تأکید قرار گرفته است.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده‌ها

داده‌ها و نتایج استفاده شده در این پژوهش از طریق مکاتبه با نویسنده مسئول در اختیار قرار خواهد گرفت.

منابع:

- ارشادفتح، فرناز، رائینی سرجاز، محمود، شاهنظری، علی و ایوبند اولسون، یورن (۱۴۰۱). کاربرد روش پس‌پردازش مقیاس‌دهی خطی برای تصحیح اریبی برون‌داد مدل‌های اقلیمی CMIP6. تحقیقات منابع آب ایران، ۱۸(۳)، ۱۳۱-۱۴۴. doi: 10.1001.1.17352347.1401.18.3.9.1
- ارشادفتح، فرناز، شاهنظری، علی، رائینی سرجاز، محمود و ایوبند اولسون، یورن (۱۴۰۲). ترکیب روش‌های تصحیح اریبی برون‌داد دما و بارش مدل‌های اقلیمی گزارش ششم در دشت همدان-بهار. پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، ۱۴ (۲۷)، ۷۵-۸۵. ۱۴۰۲۷۵/jwmr.۱۰۶۱۱۸۶
- انصاری مهابادی، ثمین، دهبان، حسین، زارعیان، محمدجواد و فرخ‌نیا، اشکان (۱۴۰۱). بررسی روند تغییرات دما و بارش حوضه‌های آبریز ایران در افق ۲۰ سال آینده بر اساس برون‌داد مدل‌های CMIP6.

این پژوهش نشان داد که روش مقیاس‌بندی خطی بارش، کارآمدترین روش تصحیح اریبی مدل‌های CMIP6 برای شبیه‌سازی بارش دشت مغان است و مدل EC-Earth3 بهترین دقت را در بازسازی الگوهای بارش منطقه داشت. پهنه‌بندی بارش در دوره پایه (۲۰۱۴-۱۹۸۵) نشان داد که بیشینه بارش در نواحی شرقی و جنوب‌شرقی (بيله‌سوار و زهرا) و کمینه در نواحی غربی (بران) است، الگویی که توسط مدل همدادی با دقت بازتولید شد. مقایسه دوره گذشته و آینده (۲۰۵۰-۲۰۲۵) بر اساس سناریوهای اقلیمی نشان می‌دهد که بارش کلی منطقه افزایش می‌یابد، اما این افزایش همراه با تغییر قابل توجه در الگوی فصلی بارش است؛ به‌گونه‌ای که اوج بارش از تابستان به پاییز منتقل می‌شود. این تغییر زمانی می‌تواند چالش‌هایی جدی برای کشاورزی، به‌ویژه در بخش‌هایی که وابسته به بارش تابستانی هستند، ایجاد کند و نیازمند بازنگری در برنامه‌ریزی‌های آبیاری و کشت محصولات باشد. تحلیل شاخص خشکسالی SPI در مقیاس شش‌ماهه نشان می‌دهد که در دوره پایه، طبقه نرمال بیش‌ترین فراوانی را دارد و خشکسالی‌ها بیشتر به صورت پراکنده و با شدت کم‌تر در ایستگاه‌هایی مانند بران و قره‌خان‌بیگلر رخ داده‌اند. در دوره آینده و تحت سناریوی متوسط SSP2-4.5، ایستگاه‌های گرمی و زهرا با افزایش خشکسالی و کاهش دوره‌های ترسالی مواجه خواهند شد، در حالی که ایستگاه بران همچنان خشکسالی قابل توجهی را تجربه می‌کند. اما در سناریوی بدبینانه SSP5-8.5، خشکسالی‌ها شدیدتر و طولانی‌تر خواهند بود و ایستگاه‌های دشت، گرمی و پارس‌آباد بیش‌تر تحت تأثیر قرار می‌گیرند. در مقیاس ۱۲ ماهه نیز، دوره پایه با غالب بودن طبقه نرمال و وقوع خشکسالی‌های بلندمدت در ایستگاه‌هایی مانند پارس‌آباد و قره‌خان‌بیگلر همراه است. برای دوره آینده، در سناریوی SSP2-4.5، ایستگاه‌های اصلاندوز و شاورستان با افزایش خشکسالی مواجه خواهند بود، در حالی که ایستگاه‌های بران و بيله‌سوار بیشتر دوره‌های ترسالی را تجربه خواهند کرد. در سناریوی SSP5-8.5، خشکسالی در ایستگاه‌های اصلاندوز و زهرا تشدید می‌شود، اما ایستگاه‌های قره‌خان‌بیگلر و پارس‌آباد از بیش‌ترین میزان ترسالی برخوردار خواهند بود. اگرچه در برخی مناطق نوسانات و شدت خشکسالی افزایش می‌یابد، اما تداوم فراوانی طبقه نرمال در اکثر ایستگاه‌ها و هر دو سناریو، نشان‌دهنده پایداری نسبی اقلیم منطقه است که می‌تواند فرصت مناسبی برای توسعه مدیریت پایدار منابع آب فراهم آورد. این تغییرات اقلیمی و الگوهای بارشی ناپایدار، اهمیت اتخاذ سیاست‌های تطبیقی را دوچندان می‌کند؛ به‌ویژه در منطقه دشت مغان که اقتصاد آن وابسته به کشاورزی است و منابع آب محدود است. طراحی سازوکارهای مدیریت ریسک، توسعه سیستم‌های هشدار زود هنگام خشکسالی،

- رضائی، حسن، پاشاپور، حجت‌اله و صادقی، فرشید (۱۴۰۳). ارزیابی عملکرد مدل‌های CMIP6 و پیش‌نگری تغییرات دما و بارش تحت سناریوهای خط سیر اجتماعی-اقتصادی مشترک (SSP) در ایران. فصلنامه آینده‌پژوهی راهبردی، ۳(۱۰)، ۷-۲۸. https://jsfs.sndu.ac.ir/article_2944.html
- زادمهر، حسین و فرخیان فیروزی، احمد (۱۴۰۰). بررسی دمای خاک با استفاده از آزمون ناپارامتری من-کندال اصلاح‌شده در مناطق انتخابی استان خوزستان. پژوهش‌های خاک، ۳۵(۴)، ۴۲۹-۴۴۳. doi: 10.22092/ijssr.2022.355507.622
- زارعی، عبدالرسول، مقیمی، محمد مهدی و بهرامی، مهدی (۱۳۹۶). پایش و پیش‌بینی خشکسالی ماهانه با استفاده از شاخص استاندارد بارش و زنجیره مارکوف (مطالعه موردی: جنوب شرق ایران). جغرافیا و پایداری محیط، ۷(۲)، ۳۹-۵۱. https://ges.razi.ac.ir/article_784.html
- شعبان‌پور، فاطمه، بذرافشان، جواد و عراقی‌نژاد، شهاب (۱۳۹۹). ارزیابی تأثیر روش‌های تصحیح اریبی بر مهارت پیش‌بینی فصلی بارش مدل اقلیمی CFSv2. تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۱(۱۲)، ۳۰۱۷-۳۰۳۲. doi: 10.22059/ijswr.2020.306717.668680
- صلاحی، برومند، گودرزی، مسعود و حسینی، سیداسعد (۱۳۹۵). پیش‌بینی تغییرات دما و بارش در دهه ۲۰۵۰ در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه. مهندسی و مدیریت آبخیز، ۸(۴)، ۴۲۵-۴۳۸. doi: 10.22092/ijwmse.2016.107179
- عبدالعلی‌زاده، فیروز، محمدخورشید دوست، علی و جهانبخش‌اصل، سعید (۱۴۰۲). پیش‌نگری و ارزیابی روند دما، بارش و خشکسالی حوضه آبریز دریاچه ارومیه. هیدروئومورفولوژی، ۱۰(۳۶)، ۵۷-۳۹. doi: 10.22034/hyd.2023.56103.1687
- عزیزی، علی‌اکبر، لیاقت، عبدالمجید، شهابی‌فر، مهدی و سیدجلالی، سیدعلیرضا (۱۴۰۰). بررسی اثر تقویم زراعی بر پتانسیل بهره‌وری آب اقلیمی (PCWP) ذرت در دشت مغان. به‌زراعی کشاورزی، ۲۳(۴)، ۷۱۳-۷۲۶. doi: 10.22059/ijci.2020.293896.2313
- عسگری، الهه، نوروزی‌نظر، محمدصادق، باعقیده، محمد و انتظار، علیرضا (۱۴۰۲). ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر خشکسالی‌های آینده حوضه آبخیز گرگانرود تحت مدل‌های CMIP6. پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، ۴(۱۴)، ۲۷-۴۲. doi: 10.30488/ccr.2023.397170.1134
- گودرزی، محمدرضا، ذهیبون، باقر، مساح بوانی، علی‌رضا و کمال، علی‌رضا (۱۳۹۱). مقایسه عملکرد سه مدل هیدرولوژی SWAT، IHACRES و SIMHYD در شبیه‌سازی رواناب حوضه قره‌سو. مدیریت آب و آبیاری، ۲(۱)، ۲۵-۴۰. doi: 10.22059/jwim.2012.25090
- مساعدی، ابوالفضل و قبائی‌سوق، محمد (۱۳۹۰). تصحیح شاخص بارش استاندارد شده (SPI) بر اساس انتخاب مناسب‌ترین تابع توزیع احتمال. نشریه آب‌و خاک (علوم و صنایع کشاورزی)، ۲۵(۵)، ۱۲۰۶-۱۲۵۸. doi: 10.22067/jsw.v0i--11258
- مصباح زاده، طویه، میراکبری، مریم، محسنی ساروی، محسن، خسروی، حسن و مرتضایی، قاسم (۱۳۹۸). بررسی وضعیت خشکسالی هواشناسی در حال و آینده با استفاده از مدل سری CMIP5
- پژوهش آب ایران، ۱۶(۱)، ۱۱-۲۴. doi: 10.22034/iwtrj.2022.11204
- آقاجانلو، کامله و فتحی المالو، حسین (۱۴۰۳). تحلیل منطقه‌ای خشکسالی و پیش‌نمایی تغییرات اقلیمی در دوره‌های آتی تحت مدل CMIP6 (مطالعه موردی: استان مازندران). پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز، ۱۵(۲)، ۴۸-۳۲. doi: 10.61186/jwmmr.15.2.32
- بابائیان، ایمان، گیولینی، گرازیانو، مدیریان، راهله و کریمیان، مریم (۱۴۰۳). پیش‌نگری بارش ایران در دوره ۲۰۷۵-۲۰۲۶ با استفاده از مقیاس کاهی دینامیکی توسط مدل منطقه‌ای RegCM4.7 طبق سناریوهای SSP. هواشناسی کشاورزی، ۱۲(۱)، ۲۰-۳۴. doi: 10.22125/agmj.2023.405388.1155
- بابائیان، ایمان، مدیریان، راهله، خزانه‌داری، لیلی، کریمیان، مریم، کوزه‌گران، سعیده، کوهی، منصوره، فلامرزی، یاشار و ملبوسی، شراره (۱۴۰۲). چشم‌انداز بارش ایران در قرن ۲۱ با به‌کارگیری مقیاس کاهی آماری برونداد مدل‌های منتخب CMIP6 توسط نرم‌افزار CMHyd. فیزیک زمین و فضا، ۴۹(۲)، ۴۳۱-۴۴۹. doi: 10.22059/jesphys.2023.332410.1007436
- بذرافشان، جواد و حجابی، سمیه (۱۳۹۶). روش‌های پایش خشکسالی. چاپ دوم، انتشارات دانشگاه تهران. صفحه ۶۵
- بروغنی، مهدی، فهیمی‌نژاد، الهام و پژوهان، ایمان (۱۴۰۱). پیش‌بینی خشک‌سالی سواحل دریای خزر با تأثیر تغییر اقلیم. فصلنامه علوم محیطی، ۲۰(۲)، ۹۹-۱۱۶. doi: 10.52547/envs.2022.1038
- جوان‌مردقصاب، مجید، دلاور، مجید، مرید، سعید (۱۳۹۷). ارزیابی پیش‌بینی میان‌مدت بارش مدل‌های عددی جهانی پایگاه TIGGE در حوضه کارون بزرگ. تحقیقات منابع آب ایران، سال ۱۴، شماره ۳، ۱-۱۴. https://www.iwrr.ir/article_54830.html
- جهدی، رقیه، حنیفه‌پور، مهین و جلالی، سعیده (۱۴۰۳). ارزیابی آثار خشکسالی هواشناسی بر پویایی پوشش گیاهی در استان گلستان. جغرافیا و پایداری محیط، ۱۴(۳)، ۵۱-۳۹. doi: 10.22126/ges.2024.10786.2762
- حیدرزاده، مریم و نوحه‌گر، احمد (۱۴۰۰). پایش خشکسالی هواشناسی آینده با استفاده از مدل تغییر اقلیم سری CMIP5 و زنجیره مارکوف. پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، ۱۴۰۰(۴۷)، ۲۱-۳۲. https://clima.irimo.ir/article_142799.html?lang=fa
- خادم‌پور، فهیمه، امیرآبادی‌زاده، مهدی و فلامرزی، یاشار (۱۴۰۳). پیش‌بینی جریان تحت تأثیر تغییر اقلیم بر اساس خروجی ترکیبی مدل‌های CMIP6 (مطالعه موردی: سد دز). مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، ۴(۴)، ۳۲-۵۰. doi: 10.22034/iwm.2024.2022522.1133
- دوستان، رضا (۱۳۹۴). تحلیلی بر خشکسالی‌های ایران در نیم قرن گذشته. پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، ۱۳۹۴(۲۳)، ۱-۱۸. https://clima.irimo.ir/article_40460.html
- رجائی، فاطمه (۱۴۰۱). پیش‌بینی خشکسالی تحت رویکرد تغییر اقلیم آینده (مطالعه موردی: قراخیل). مطالعات علوم محیط زیست، ۷(۲)، ۵۰۰-۴۹۹. doi: 10.22034/jess.2022.330098.1724

ایران، ۱۴ (۳)، ۱۳۹-۱۲۵.
https://www.iwrr.ir/article_59829.html?lang=fa
 نیرومندفرد، فریبا، خاشعی سیوکی، عباس، هاشمی، سیدرضا و قربانی، خلیل (۱۴۰۱). بررسی پیش‌نگری تغییر اقلیم بر پارامترهای دما و بارش با استفاده از مدل‌های CMIP6 (مطالعه موردی: ایستگاه بیرجند). *مجله تحقیقات آب‌و‌خاک ایران*، ۵۳ (۹)، ۲۰۰۹-۲۰۲۶. doi: 10.22059/ijswr.2022.343936.669284
 وطن‌پرست قلعه‌جوق، فاطمه و صلاحی، برومند (۱۴۰۳). ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر خشکسالی‌های دهه‌های آتی در حوزه آبخیز ارس تحت مدل CMIP6. *مهندسی و مدیریت آبخیز*. ۱۷ (۱)، ۳۴-۴۴. doi: 10.22092/ijwmse.2024.364619.2040۶۳

References

- Abbas, A., Ullah, S., Ullah, W., Waseem, M., Dou, X., Zhao, C., Karim, A., Zhu, J., Hagan, D. F. T., Bhatti, A. S., & Ali, G. (2022). Evaluation and projection of precipitation in Pakistan using the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 model simulations. *International Journal of Climatology*, 42(13), 6665–6684. doi: 10.1002/joc.7602
- Abdolzadeh, F., Mohammad Khorshiddoust, A., & Jahanbakhsh, S. (2023). Projection and evaluation of the trend of temperature, precipitation and drought in Urmia Lake catchment. *Hydrogeomorphology*, 10(36), 39–57. doi: 10.22034/hyd.2023.56103.1687. [In Persian]
- Afsari, R., Nazari-Sharabian, M., Hosseini, A., & Karakouzian, M. (2024). A CMIP6 multi-model analysis of the impact of climate change on severe meteorological droughts through multiple drought indices—Case study of Iran's metropolises. *Water*, 16(5), 711. doi: 10.3390/w16050711
- Aghajanloo, K., & Fathi Almalou, H. (2024). Local analysis of drought and climate change projection in future periods under the CMIP6 model (Case study: Mazandaran Province). *Journal of Watershed Management Research*, 15(2), 32–48. doi: 10.61186/jwmr.15.2.32. [In Persian]
- Ansari Mahabadi, S., Dehban, H., Zareian, M. J., & Farokhnia, A. (2022). Investigation of temperature and precipitation changes in Iran's basins in the next 20 years based on the output of CMIP6 models. *Iranian Water Resources Journal*, 16(1), 11–24. doi: 10.22034/iwrj.2022.11204. [In Persian]
- Asgari, E., Norouzi Nazar, M. S., Baaghdeh, M., & Entezari, A. (2023). Assessing the impacts of climate change on the future droughts in Gorganroud Watershed under CMIP6 models. *Climate Change Research*, 4(14), 27–42. doi: 10.30488/ccr.2023.397170.1134. [In Persian]
- Azizi, A. A., Liaghat, A., Shahabifar, M., & Seyed Jalali, S. A. (2021). Investigation of the effect of crop calendar on the potential climatic water productivity (PCWP) of maize in Moghan Plain. *Journal of Crops Improvement*, 23(4), 713–726. doi: 10.22059/jci.2020.293896.2313. [In Persian]
- Babaeian, I., Giuliani, G., Modirian, R., & Karimian, M. (2024). Projection of Iran's precipitation during 2026–2075 by dynamical downscaling by RegCM4.7 under SSP scenarios. *Journal of Agricultural Meteorology*, 12(1), 20–34. doi: 10.22125/agmj.2023.405388.1155. [In Persian]
- Babaeian, I., Modirian, R., Khazanedari, L., Karimian, M., Kouzegaran, S., Kouhi, M., Falamarzi, Y., & Malbusi, S. (2023). Projection of Iran's precipitation in 21st century using downscaling of selected CMIP6 models by CMHyd. *Journal of the Earth and Space Physics*, 49(2), 431–449. doi: 10.22059/jesphys.2023.332410.1007436. [In Persian]
- Bazrafshan, J., & Hejabi, S. (2017). drought monitoring Methods (2nd ed.). *University of Tehran Press*, 65. [in Persian]
- Boroughani, M., Fahiminejad, E., & Pazhouhan, I. (2022). Predicting drought impact on the Caspian Sea coast affected by climate change. *Environmental Sciences*, 20(2), 99–116. doi: 10.52547/envs.2022.1038. [In Persian]
- Bustos Usta, D. F., Teymouri, M., Chatterjee, U., & Bandyopadhyay, N. (2022). Projections of atmospheric changes over Iran in 2014–2050 using the CMIP6-HighResMIP experiment. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(1335). doi: 10.1007/s12517-022-10639-9
- Deo, R.C., Kisi, O., & Singh, V.P. (2017). Drought forecasting in eastern Australia using multivariate adaptive regression spline, least square support vector machine, and M5Tree model. *Atmospheric Research*, 181, 149–175. doi: 10.1016/j.atmosres.2016.10.004
- Desmet, Q., & Ngo-Duc, T. (2022). A novel method for ranking CMIP6 global climate models over the southeast Asian region. *International Journal of Climatology*, 42(1), 97–117. doi: 10.1002/joc.7234
- Doostan, R. (2015). Analysis of the Iran droughts in the past half century. *Journal of Climate*

سناریوهای RCP. *مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران*. ۱۳ (۴۶)، ۲۱-۱۱. doi: 20.1001.1.20089554.1398.13.46.4.0.۱۱-۲۱
 نجفی، محمدسعید، دهبان، حسین و فرح‌نیا، اشکان (۱۴۰۲). پیش‌بینی بارش ماهانه در ایران بر اساس رویکرد همادی با استفاده از مدل WRF/CFSv.2 (مطالعه موردی: دوره اکتبر ۲۰۱۹ تا آوریل ۲۰۲۰). *مجله ژئوفیزیک ایران*، ۱۷ (۱)، ۱۲۹-۱۴۵. doi: 10.30499/ijg.2022.349816.1440
 نوده‌فراهانی، محمدعلی، راسخی، آنا، پرماس، بهنام و کشوری، عبدالرحمن (۱۳۹۷). بررسی اثرات تغییر اقلیم بر دما، بارش و خشکسالی‌های دوره آبی حوضه شادگان. *مجله تحقیقات منابع آب*

- Research, 1394(23), 1–18. https://clima.irimo.ir/article_40460.html. [In Persian]
- Ershadfath, F., Raeini Sarjaz, M., Shahnazari, A., & Olesen, J. E. (2022). Application of linear scaling post-processing method for bias correction of climate models retrieved from CMIP6. *Iran Water Resources Research*, 18(3), 131–144. doi: 20.1001.1.17352347.1401.18.3.9.1. [in Persian]
- Ershadfath, F., Shahnazari, A., Raeini Sarjaz, M., Eivind Olese, J. (2023). Combining Bias Correction Methods for Simulated Temperature and Precipitation by CMIP6 Models in Hamedan-Bahar Plain. *J Watershed Manage Res*. 14(27), 75-85. doi:10.61186/jwmr.14.27.75. [in Persian]
- Fang, G. H., Yang, J., Chen, Y. N., & Zammit, C. (2015). Comparing bias correction methods in downscaling meteorological variables for a hydrologic impact study in an arid area in China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(6), 2547–2559. doi: 10.5194/hess-19-2547-2015
- Goodarzi, M. R., Zahabiyoun, B., Massah Bavani, A. R., & Kamal, A. R. (2012). Performance comparison of three hydrological models SWAT, IHACRES and SIMHYD for the runoff simulation of Gharehou basin. *Water and Irrigation Management*, 2(1), 25–40. doi: 10.22059/jwim.2012.25090. [In Persian]
- Hasan, N. A., Yang, D., & Al-Shibli, F. (2023). SPI and SPEI drought assessment and prediction using TBATS and ARIMA models. *Jordan. Water*, 15(20), Article 3598. doi: 10.3390/w15203598
- Heydarzadeh, M., & Nohegar, A. (2021). Future meteorological drought monitoring using CMIP5 series climate change model and Markov chain. *Journal of Climate Research*, 47, 21–32. https://clima.irimo.ir/article_142799.html?lang=en. [In Persian]
- Iqbal, Z., Shahid, S., Ahmed, K., Ismail, T., Ziarh, G. F., Chung, E.-S., & Wang, X. (2021). Evaluation of CMIP6 GCM rainfall in mainland Southeast Asia. *Atmospheric Research*, 254, 105525. doi: 10.1016/j.atmosres.2021.105525
- Jahdi, R., Hanifepour, M., & Jahdi, R. (2024). Analyzing the effects of meteorological drought on vegetation dynamics in the Golestan Province. *Geography and Environmental Sustainability*, 14(3), 39–51. doi: 10.22126/ges.2024.10786.2762. [In Persian]
- Jvanmard Ghassab, M., & Morid, S. (2018). Evaluation of medium-term forecast of TIGGE numerical weather prediction models in Karun basin. *Iran-Water Resources Research*, 14(3), 1–12. https://www.iwrr.ir/article_54830.html. [In Persian]
- Kamruzzaman, M., Shahid, S., Roy, D. K., Islam, A. R. M. T., Hwang, S., Cho, J., Zaman, M. A. U., Sultana, T., Rashid, T., & Akter, F. (2022). Assessment of CMIP6 global climate models in reconstructing rainfall climatology of Bangladesh. *International Journal of Climatology*, 42(7), 3928–3953. doi: 10.1002/joc.7452
- Khadempour, F., Amirabadizadeh, M., & Falamarzi, Y. (2025). Streamflow forecasting under the impacts of climate change based on the combined output of CMIP6 models (Case study: Dez Dam). *Integrated Watershed Management*, 4(4), 32–50. doi: 10.22034/iwm.2024.2022522.1133 . [In Persian]
- Lu, K., Arshad, M., Ma, X., Ullah, I., Wang, J., & Shao, W. (2022). Evaluating observed and future spatiotemporal changes in precipitation and temperature across China based on CMIP6-GCMs. *International Journal of Climatology*, 42(15), 7703–7729. doi: 10.1002/joc.7673
- Madadgar, Sh., & Moradkhani, H. (2013). A Bayesian framework for probabilistic seasonal drought forecasting. *Journal of Hydrometeorology*, 14(6), 1685–1705. doi: 10.1175/JHM-D-13-010.1
- Mesbahzadeh, T., Mirakbari, M., Mohseni Saravi, M., Khosravi, H., & Mortezaei, G. (2019). Study of current and future meteorological drought conditions using the CMIP5 model under RCP scenarios. *Journal of Water and Environmental Science*, 13(46), 11–21. doi: 20.1001.1.20089554.1398.13.46.4.0 . [In Persian]
- Mohammed, S., Arshad, S., Alsilibi, F., Ul Moazzam, M. F., Bashir, B., Ahmed Proshan, F., Alsaman, A., Vad, A., Rátonyi, T., & Harsányi, E. (2024). Utilizing machine learning and CMIP6 projections for short-term agricultural drought monitoring in central Europe (1900–2100). *Journal of Hydrology*, 615, 130968. doi: 10.1016/j.jhydrol.2024.130968
- Mosaedi, A., & Ghabaei Sough, M. (2011). Modification of standardized precipitation index (SPI) based on relevant probability distribution function. *Water and Soil*, 25(5). doi: 10.22067/jsw.v0i-.11258. [In Persian]
- Najafi, M. S., Dehban, H., & Farokhnia, A. (2023). Forecasting of monthly precipitation based on ensemble approach using CFSv2-WRF model over Iran (Case study: October 2019 to April 2020). *Iranian Journal of Geophysics*, 17(1), 129–145. doi: 10.30499/ijg.2022.349816.1440. [In Persian]
- 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. doi: 10.1002/joc.7098
- Niroumandfard, F., Khashei, A., Hashemi, R., & Ghorbani, K. (2022). Investigation of climate change projection on temperature and precipitation parameters using CMIP6 models

- (Case study: Birjand station). *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 53(9), 2009–2026. doi: 10.22059/ijswr.2022.343936.669284. [In Persian]
- Node Farahani, M. A., Rasekhi, A., Parmas, B., & Keshvari, A. (2018). The effects of climate change on temperature, precipitation and drought in the future Shadegan basin. *Iran-Water Resources Research*, 14(3), 125–139. https://www.iwrr.ir/article_59829.html?lang=en. [In Persian]
- Rajaei, F. (2022). Drought forecasting under the approach of future climate change (Case study: Qarakhil). *Journal of Environmental Science Studies*, 7(2), 4990–5001. doi: 10.22034/jess.2022.330098.1724. [In Persian]
- Rezaei, H., Pashapour, H., & Sadeghi, F. (2024). Performance evaluation of CMIP6 models and forecasting of temperature and precipitation changes under Shared Socioeconomic Pathways (SSP) scenarios in Iran. *Strategic Futures Studies*, 3(10), 7–30. doi: 20.1001.1.28212592.1403.3.10.1.5. [In Persian]
- Salahi, B., Goudarzi, M., & Hosseini, S. A. (2016). Predicting the temperature and precipitation changes during the 2050s in Urmia Lake Basin. *Watershed Engineering and Management*, 8(4), 425–438. doi: 10.22092/ijwmse.2016.107179. [In Persian]
- Shabanpour, F., Bazrafshan, J., & Araghinejad, S. (2021). Evaluation of the effect of bias correction methods on the skill of seasonal precipitation forecasts of CFSv2 climate model. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 51(12), 3017–3032. doi: 10.22059/ijswr.2020.306717.668680. [In Persian]
- Shrestha, A., Rahaman, M. M., Kalra, A., Jogineedi, R., & Maheshwari, P. (2020). Climatological drought forecasting using bias corrected CMIP6 climate data: A case study for India. *Forecasting*, 2(2), 241–258. doi: 10.3390/forecast2020004
- 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. *Watershed Engineering and Management*, 17(1), 44–63. doi: 10.22092/ijwmse.2024.364619.2040. [In Persian]
- Xu, F., Qu, Y., Bento, V. A., Song, H., Qiu, J., Qi, J., Wan, L., Zhang, R., Miao, L., Zhang, X., & Wang, Q. (2024). Understanding climate change impacts on drought in China over the 21st century: A multi-model assessment from CMIP6. *npj Climate and Atmospheric Science*, 7(32), 1–12. doi: 10.1038/s41612-024-00578-5
- Yuanbin, S., Qamar, S., Ali, Z., Yang, T., Nazeer, A., & Fayyaz, R. (2023). A new ensemble index for extracting predictable drought features from multiple historical simulations of climate. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 75(1), 1–15. doi: 10.16993/tellusa.46
- Zadmehr, H., & Farrokhanian Firouzi, A. (2022). Investigation of soil temperature using the modified Mann-Kendall non-parametric test in selected regions of Khuzestan Province. *Iranian Journal of Soil Research*, 35(4), 429–443. doi: 10.22092/ijsr.2022.355507.622. [In Persian]
- Zarei, A. R., Moghimi, M. M., & Bahrani, M. (2017). Monitoring and prediction of monthly drought using standardized precipitation index and Markov chain (Case study: Southeast of Iran). *Geography and Environmental Sustainability*, 7(2), 39–51. https://ges.razi.ac.ir/article_784.html. [In Persian]
- Zhang, Y., Hu, X., Zhang, Z., Kong, R., Peng, Z., Zhang, Q., & Chen, X. (2023). The increasing risk of future simultaneous droughts over the Yangtze River Basin based on CMIP6 models. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 37, 2577–2601. doi: 10.1007/s00477-023-02406-3