



Assessment of Climate Change Impacts on Drought Characteristics and Trivariate Return Period Risks in Western Iran

Behnoush Farokhzadeh,^{1*}  Sepideh Choobeh,²  Rasool Imani³ 

1. Assistant Professor, Natural Engineering Department, Faculty of Natural Resources and Environment, Malayer University, Malayer, Iran. Email: b.farokhzadeh@malayeru.ac.ir

2. PhD Graduated in Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran. Email: s.choobeh@urmia.ac.ir

3. PhD Graduated in Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Geoscience, Kashan University, Kashan, Iran. Email: rasool.imani@grad.kashanu.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 31 January 2025
Received in revised form 24 February 2025
Accepted 14 March 2025
Available online 21 March 2025

Keywords:
Drought persistence,
Climate change,
Copula functions,
Joint return periods,
Risk analysis,
Drought intensity,
Drought duration.

ABSTRACT

Objective: This study investigates the impact of climate change on drought characteristics in western Iran by analyzing trends in drought intensity, duration, and magnitude. The research aims to assess future drought risks under different climate scenarios to support water resource management strategies.

Method: Historical precipitation data (1966–2020) from six meteorological stations were analyzed using the Standardized Precipitation Index (SPI). Future climate projections were generated using the HadCM3 General Circulation Model (GCM) and downscaled with the LARS-WG model under SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios. Statistical trend analysis, probability distribution fitting, and copula functions were applied to evaluate the interdependence of drought characteristics and estimate joint return periods.

Results: The findings indicate an increasing trend in drought severity, particularly in Hamedan and Saqez, with SSP5-8.5 showing the most extreme conditions. Drought intensity and duration are projected to increase, with prolonged dry periods becoming more frequent. Joint return periods suggest that severe drought events, previously occurring every 20 years, may now happen every 10 years.

Conclusions: Climate change is intensifying drought risks in western Iran, requiring urgent adaptation strategies. Copula-based analysis highlights stronger dependencies between drought characteristics, increasing the likelihood of extreme events. Effective water management policies, including improved storage and irrigation systems, are essential to mitigate future drought impacts.

Cite this article: Behnoush Farokhzadeh, Sepideh Choobeh, Rasool Imani. (2025). Assessment of Climate Change Impacts on Drought Characteristics and Trivariate Return Period Risks in Western Iran. *ECOHYDROLOGY*, 12 (1), 635-656. <https://doi.org/10.22059/IJE.2025.387902.1859>



Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <https://doi.org/10.22059/IJE.2025.387902.1859>

Introduction

Drought is a major climate-related disaster with significant impacts on water resources, agriculture, and ecosystems. Unlike sudden extreme events, droughts develop gradually and persist over time, making their effects difficult to manage. Climate change is increasing the frequency and severity of droughts, particularly in arid and semi-arid regions like western Iran. Changes in precipitation patterns and rising temperatures threaten agricultural productivity and water availability. Understanding drought characteristics such as intensity, duration, and magnitude is essential for effective water management. Traditional drought analysis often relies on single-variable indices like the Standardized Precipitation Index (SPI), but drought is a complex phenomenon influenced by multiple factors. Recent studies have used copula functions to model dependencies between different drought characteristics, providing a more accurate assessment of drought risk. This study examines the impact of climate change on droughts in western Iran using climate models and statistical methods. Future projections are generated using the HadCM3 General Circulation Model (GCM) and downscaled with the LARS-WG model under two climate scenarios: SSP2-4.5 (moderate emissions) and SSP5-8.5 (high emissions). By analyzing historical and projected drought data, this research aims to identify trends in drought severity and provide insights for future water management strategies.

Materials and Methods

This study examines the impact of climate change on drought characteristics in western Iran using climate modeling and statistical analysis. Future climate projections were generated using the HadCM3 General Circulation Model (GCM) and downscaled with the LARS-WG model. The Standardized Precipitation Index (SPI) was applied to assess drought severity, duration, and magnitude. Two climate scenarios, SSP2-4.5 (moderate emissions) and SSP5-8.5 (high emissions), were analyzed to evaluate potential drought intensification. Historical precipitation data (1966–2020) from six meteorological stations were used to assess past trends. The Mann-Kendall test identified significant changes in drought patterns, while probability distributions were fitted to drought indices using statistical criteria such as the Kolmogorov-Smirnov (K-S) test, AIC, and BIC. Copula functions, including Gaussian, t, and Archimedean models, were employed to analyze the interdependence of drought intensity, duration, and magnitude. Maximum Likelihood Estimation (MLE) was used to select the best-fitting copula, enabling joint return period estimation. This integrated approach provides a comprehensive risk assessment of future droughts in western Iran.

Results

The analysis of historical climate data revealed an increasing trend in drought severity across western Iran, particularly in Hamedan and Saqez. Validation of the LARS-WG model confirmed its high accuracy in simulating local precipitation patterns, with minimal bias observed in stations like Khorramabad and Sanandaj. Future climate projections under SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios indicate a significant rise in drought frequency and intensity, with SSP5-8.5 showing more extreme conditions. SPI values suggest that prolonged and severe droughts will become more frequent, especially under SSP5-8.5. Maximum drought intensity is expected to rise in most stations, with Hamedan and Saqez experiencing the most severe increases. The average drought duration is projected to extend by two to four months, indicating longer dry periods. Joint return period analysis shows that extreme droughts, which previously occurred once every 20 years, may now happen every 10 years under SSP5-8.5. Regional variability was observed, with Khorramabad showing the least increase in drought severity, while Sanandaj and Saqez were identified as the most vulnerable locations. Copula-based analysis revealed a stronger dependence between drought intensity, duration, and magnitude in future climate scenarios, suggesting an increased likelihood of simultaneous extreme drought characteristics. These findings highlight the growing risk of severe droughts and the need for proactive water resource management strategies.

Conclusion

This study highlights the increasing severity and frequency of droughts in western Iran due to climate change, emphasizing the need for adaptive water management strategies. Future climate projections

indicate that under high-emission scenarios (SSP5-8.5), droughts will become more intense and prolonged, particularly in regions like Hamedan and Saez. The use of copula functions provided a comprehensive multivariate analysis, revealing stronger dependencies between drought intensity, duration, and magnitude, which suggests a higher likelihood of extreme drought events occurring simultaneously. Regional differences in drought vulnerability were evident, with Khorramabad experiencing the least change and Sanandaj and Saez showing the highest risk. The shortening of return periods for extreme droughts further underscores the urgency of climate adaptation measures. The findings highlight the importance of proactive planning, such as improving water storage systems, enhancing irrigation efficiency, and implementing sustainable land-use policies. This research contributes to understanding the future risks of climate-induced droughts using advanced statistical and climate modeling techniques. The results can support policymakers in developing more resilient water resource management strategies to mitigate the impacts of increasing drought severity in western Iran. Future studies should incorporate additional climatic and hydrological variables to refine risk assessments and explore potential mitigation strategies further.

Author contribution

B. F. designed the study and drafted the manuscript. R.I. collected and analyzed the data, prepared the figures and tables. B. F. and S.Ch. contributed to the writing of the manuscript draft and reviewed and revised the manuscript for intellectual content. All authors reviewed and approved the final manuscript.

Data Availability Statement

All data generated or analyzed during the current study are included in this article and are available from the corresponding author upon reasonable request.

Ethical considerations

This study did not involve any ethical issues or concerns.

Funding

Not applicable.

Conflict of interest

The authors declare no competing interests.

ارزیابی تأثیر تغییرات اقلیمی بر ویژگی‌های خشکسالی و ریسک دوره‌های بازگشت سه‌متغیره در مناطق غربی ایران

به‌نوش فرخ‌زاده^{۱*}، سپیده چوبه^۲، رسول ایمانی^۳

۱. استادیار، گروه مهندسی طبیعت، دانشکده منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران. رایانامه: b.farokhzadeh@malayeru.ac.ir

۲. دکترای آبخیزداری - آب، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران. رایانامه: s.choobeh@urmia.ac.ir

۳. دکترای آبخیزداری - آب، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران. رایانامه: rasool.imani@grad.kashanu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۲ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۲/۰۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۴ تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۱/۰۱	موضوع: خشکسالی یکی از مهم‌ترین چالش‌های ناشی از تغییرات اقلیمی است که تأثیرات گسترده‌ای بر منابع آب، کشاورزی و محیط‌زیست دارد. تغییرات اقلیمی در سال‌های اخیر باعث افزایش شدت و مدت خشکسالی در بسیاری از مناطق جهان از جمله ایران شده است. بررسی ویژگی‌های خشکسالی و تحلیل روندهای آینده آن نقش مهمی در مدیریت منابع آب و کاهش اثرات این پدیده دارد. هدف: این پژوهش با هدف بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر ویژگی‌های خشکسالی در مناطق غربی ایران انجام شده است. تمرکز اصلی این مطالعه بر تغییرات شدت، مدت و بزرگی خشکسالی تحت سناریوهای مختلف اقلیمی است. همچنین، ریسک وقوع هم‌زمان این ویژگی‌ها و تأثیر آن بر مدیریت منابع آب مورد بررسی قرار گرفته است. روش تحقیق: برای تحلیل تغییرات اقلیمی، مدل گردش عمومی HadCM3 و مدل ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG برای شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی استفاده شد. داده‌های اقلیمی تاریخی (۱۹۶۶-۲۰۰۰) برای ارزیابی مدل و داده‌های (۲۰۰۱-۲۰۵۰) برای صحت‌سنجی به کار رفتند. خروجی مدل برای دوره ۲۰۲۰ تا ۲۰۵۰ تحت دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 تولید شد. از توابع کاپولا و برازش توزیع‌های حاشیه‌ای برای بررسی ارتباط میان شدت، مدت و بزرگی خشکسالی استفاده شد. یافته‌ها: نتایج نشان داد که مدل LARS-WG دقت بالایی در شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی دارد. تحلیل ویژگی‌های خشکسالی نشان داد که شدت، مدت و بزرگی خشکسالی در آینده افزایش خواهد یافت، به‌ویژه تحت سناریوی SSP5-8.5. همچنین، در دوره‌های بازگشت کوتاه، ریسک وقوع هم‌زمان این ویژگی‌ها در SSP5-8.5 بیشتر از SSP2-4.5 است؛ اما در دوره‌های بازگشت طولانی‌تر، این ریسک کاهش یافته و احتمال وقوع خشکسالی‌های شدید کمتر می‌شود. نتیجه‌گیری: بررسی‌های انجام‌شده نشان داد که تغییرات اقلیمی نه تنها شدت و مدت خشکسالی را افزایش می‌دهد، بلکه ساختار وابستگی میان شاخص‌های خشکسالی را نیز تغییر داده و ریسک وقوع هم‌زمان آن‌ها را تشدید می‌کند.

استناد: فرخ‌زاده، به‌نوش؛ چوبه، سپیده؛ ایمانی، رسول. ارزیابی تأثیر تغییرات اقلیمی بر ویژگی‌های خشکسالی و ریسک دوره‌های بازگشت سه‌متغیره در مناطق غربی ایران.

اکوهیدرولوژی، ۱۲(۱)، ۶۳۵-۶۵۶

<https://doi.org/10.22059/IJE.2025.386114.1853>

ناشر: انتشارات دانشگاه تهران. © به‌نوش فرخ‌زاده، سپیده چوبه، رسول ایمانی.



مقدمه

خشکسالی از مهم‌ترین مخاطرات اقلیمی است که تأثیرات منفی گسترده‌ای بر محیط‌زیست، منابع آبی، کشاورزی و معیشت انسان‌ها دارد (میشرا و سینگ، ^۱ ۲۰۱۰؛ بیاتاورکشی ^۲ و همکاران، ۲۰۲۳). این پدیده که با کاهش غیرعادی بارندگی نسبت به میانگین بلندمدت شناخته می‌شود، برخلاف سایر بلایای طبیعی دارای آغاز و پایان مشخص نیست و پیامدهای آن می‌تواند برای دهه‌ها باقی بماند (هایز ^۳ و همکاران، ۲۰۱۲؛ شایقی ^۴ و همکاران، ۲۰۲۴). تغییرات اقلیمی ناشی از افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای، الگوهای طبیعی بارش و دما را مختل کرده و منجر به تغییر چرخه‌های آب‌شناختی و افزایش شدت و فراوانی خشکسالی‌ها در بسیاری از نقاط جهان شده است (سررانو، بگوریا و مورنو، ^۵ ۲۰۱۰؛ IPCC، ۲۰۲۱؛ رستگاری‌پور و همکاران، ۱۴۰۳). ایران به‌عنوان یکی از کشورهای واقع در کمربند خشک جهانی، با میانگین بارندگی سالانه حدود یک‌سوم میانگین جهانی، به‌شدت در معرض خشکسالی‌های شدید قرار دارد (مدنی، ۱۳۹۳). مناطق غربی کشور، به‌دلیل ویژگی‌های خاص جغرافیایی و اقلیمی، اهمیت بالایی در مطالعات مرتبط با خشکسالی دارند. این مناطق که تحت تأثیر اقلیم مدیترانه‌ای قرار دارند، بارش‌های عمده خود را در فصول پاییز و زمستان دریافت می‌کنند. با این حال، تغییرات اقلیمی، الگوهای بارش را در این مناطق مختل کرده و منجر به کاهش بارش‌های فصلی و افزایش دما شده است (عباسپور و همکاران، ۲۰۰۹؛ یوسفی و همکاران، ۱۴۰۳). تحلیل‌های اقلیمی نشان می‌دهد که خشکسالی، کاهش بارش و افزایش دما در آینده در اکثر مناطق ایران با شدت بیشتری رخ خواهند داد. این موضوع لزوم مدیریت دقیق‌تر منابع آبی و توسعه راهبردهای سازگار با تغییر اقلیم را برجسته می‌کند (الوانکار، نظری و فتاحی، ۱۳۹۵؛ بذرافشان، زمانی و مظفری، ۱۴۰۲؛ عباسی و همکاران، ۱۳۸۹؛ کناوی و همکاران، ۲۰۲۵). درک رفتار اقلیمی و پیش‌بینی روندهای آینده، با استفاده از مدل‌ها و داده‌های اقلیمی دقیق، ابزار مهمی برای تصمیم‌گیری و کاهش آسیب‌پذیری در برابر خشکسالی‌های آتی است. از روش‌های مرسوم برای پایش خشکسالی، استفاده از شاخص بارش استاندارد شده (SPI) است که با توجه به سادگی و دقت، برای تحلیل شدت، مدت و بزرگی خشکسالی هواشناسی در مقیاس‌های زمانی مختلف به کار می‌رود (مک کی، دوزکن و کلیست، ^۶ ۱۹۹۳). با این حال، تحلیل دقیق‌تر خشکسالی نیازمند در نظر گرفتن وابستگی‌های پیچیده میان متغیرهای مرتبط است. در این راستا، توابع کاپولا به‌عنوان ابزاری پیشرفته برای مدل‌سازی روابط غیرخطی میان متغیرها مورد استفاده قرار می‌گیرند (نلسون، ^۷ ۲۰۰۶). تابع کاپولا یک شیوه انعطاف‌پذیر برای ایجاد توزیع‌های توأم آماری با توابع توزیع حاشیه‌ای متفاوت هستند. در واقع، کاپولا تابعی است که توابع توزیع حاشیه‌ای تک‌متغیره را برای تشکیل یک تابع توزیع دو یا چندمتغیره، به هم پیوند می‌دهد. این توزیع به‌طور گسترده در بسیاری از موضوعات هیدرولوژی از جمله شناسایی و تحلیل همبستگی میان شدت، مدت و بزرگی خشکسالی استفاده شده است (دوزکن و گارن، ^۸ ۱۹۹۱؛ میرعباسی، فاخری‌فرد و دین‌پژوه، ۲۰۱۲؛ زارچ، سیواکومار و شارما، ^۹ ۲۰۱۵؛ بذرافشان، زمانی و شاکری، ۲۰۲۰؛ لطفی راد، اسماعیلی قیاس‌وندی و ادیب، ۲۰۲۲؛ پورحق‌وردی و همکاران، ۱۴۰۲؛ تیموری، اسدی نلیوان و الهی، ۱۴۰۲). کاپولا در دو نوع پارامتریک و غیرپارامتریک دسته‌بندی می‌شود. در کاپولای پارامتریک برآزش داده‌های ورودی به کمک تخمین پارامترها اتفاق می‌افتد که برتری این نوع کاپولاها نسبت به غیرپارامتریک است. این پارامترها نماینده شدت وابستگی متغیرها هستند و رابطه ریاضی معینی با آن دارند (بهره‌مند و همکاران، ۱۳۹۴). مدل‌سازی تغییرات اقلیمی در مقیاس محلی ابزار ارزشمندی برای پیش‌بینی تأثیرات تغییر اقلیم بر منابع طبیعی و زیست‌بوم‌ها محسوب می‌شود (جهانگیری، معتمدوزیری و کیادلیری، ۱۴۰۳). از روش‌های رایج، استفاده از مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی است که قادرند داده‌های مدل‌های گردش عمومی جو (GCM) را با دقت بالاتری به مقیاس‌های محلی تبدیل کنند. مدل LARS-WG به‌عنوان یکی از پرکاربردترین ابزارهای ریزمقیاس‌نمایی، توانایی

1. Mishra & Singh
2. Bayatavrkeshi
3. Hayes
4. Shayeghi
5. Vicente-Serrano, Beguería & López-Moreno
6. McKee, Doesken & Kleist
7. Nelsen
8. Doesken & Garen
9. Zarch, Sivakumar & Sharma

بالایی در شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی روزانه برای پارامترهایی مانند بارش و دما دارد. این مدل به دلیل سادگی، دقت بالا و قابلیت تنظیم براساس داده‌های محلی، در بسیاری از پژوهش‌های مرتبط با تغییر اقلیم و خشکسالی استفاده شده است (سمنوف، باررو و لارس،^۱ ۲۰۰۲). هدف این تحقیق بررسی تأثیر تغییرات اقلیم بر شدت، مدت و بزرگی خشکسالی در مناطق غربی ایران با استفاده از داده‌های ریزمقیاس‌شده توسط مدل LARS-WG و توابع کاپولا تحت دو سناریوی SSP 2-4.5 و SSP 5-8.5 است تا وابستگی میان شاخص‌های خشکسالی تحلیل شود و دوره‌های بازگشت آن‌ها در شرایط اقلیمی آینده ارزیابی گردد. نتایج این پژوهش تصویری جامع از روند خشکسالی در گذشته و آینده ارائه داده و می‌تواند ابزار مؤثری برای مدیریت منابع آبی و تدوین راهبردهای سازگار با تغییرات اقلیمی باشد.

پیشینه پژوهش

پژوهش‌های مختلفی تأثیر تغییر اقلیم بر خشکسالی را از طریق مقایسه اقلیم کنونی و داده‌های حاصل از این سناریوها بررسی کرده‌اند (یائو^۲ و همکاران، ۲۰۱۹؛ بذرافشان و همکاران، ۲۰۱۹؛ بذرافشان، زمانی و شاکری، ۲۰۲۰؛ سامانتاری، راماداس و پاندا،^۳ ۲۰۲۰؛ الوانکار، نظری و فتاحی، ۱۳۹۵؛ مظفری، مرادی و بذرافشان، ۱۳۹۹؛ اژدری و همکاران، ۱۳۹۹؛ قائمی و همکاران، ۱۴۰۱).

دلقدی، جورابلو و گنجی (۱۴۰۲)، اثرات تغییر اقلیم را بر شدت، مدت و تعداد خشکسالی‌ها در منطقه سمنان با استفاده از ۱۳ مدل جهانی و دو سناریوی RCP4.5 و RCP8.5 بررسی کردند. نتایج نشان داد که در سناریوی RCP8.5 تعداد دوره‌های ترسالی و خشکسالی افزایش یافته و مدت خشکسالی، به‌ویژه براساس شاخص RDI، کاهش داشته است، اما تعداد خشکسالی‌ها بیشتر شده است. لطفی‌نسب و همکاران (۱۴۰۲) خشکسالی و ارتباط آن با تغییر اقلیم را در سایت‌های زوال بلوط سرابله، استان ایلام بررسی کردند. نتایج نشان داد که از سال ۱۹۹۸، کاهش بارندگی‌ها (هرچند غیرمعنادار) همراه با افزایش دمای حداکثر، دمای حداقل و سرعت باد، موجب افزایش تبخیر و وقوع خشکسالی در مقیاس‌های سه، شش و دوازده‌ماهه شده است. خشکسالی‌های سه‌ماهه، تحت‌تأثیر افزایش معنادار دما از سال ۲۰۰۷، شدیدتر بوده و با افزایش دمای میانگین روزانه و اوج زوال درختان بلوط بین سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۵ مصادف شده است. رستمی و مریدی (۱۴۰۳)، تأثیر تغییر اقلیم بر خشکسالی در محدوده اردبیل را با استفاده از ۷ مدل گردش عمومی جو (GCM) و دو سناریوی خوش‌بینانه و بدبینانه بررسی کردند. نتایج نشان‌دهنده افزایش میانگین دما بین ۱/۵ تا ۳ درجه سانتی‌گراد است. در شبیه‌سازی بارش، سناریوی SSP1-2.6 افزایش ۱۳ میلی‌متری و سناریوی SSP5-8.5 کاهش ۵۱ میلی‌متر بارش سالانه را پیش‌بینی می‌کند. همچنین، خشکسالی‌های متوسط با شدت و مدت ۲ تا ۲/۲ برابر و خشکسالی‌های بلندمدت با شدت و مدت ۲ تا ۲/۵ برابر نسبت به داده‌های مشاهده‌ای افزایش خواهند یافت.

بررسی اثر تغییرات اقلیمی بر الگوهای خشکسالی در شرق آفریقا نشان داد که مناطق تحت‌تأثیر خشکسالی شدید در پایان قرن بیست‌ویکم به‌ترتیب ۱۶، ۳۶ و ۵۴ درصد تحت سناریوهای RCP 2.6، RCP 4.5 و RCP8.5 افزایش می‌یابد. از نظر مکانی، رویداد مدت، فراوانی و شدت خشکسالی، در سودان، تانزانیا، سومالی و سودان جنوبی افزایش می‌یابد؛ اما در کنیا، اوگاندا و ارتفاعات اتیوپی کاهش می‌یابد (هیل^۴ و همکاران، ۲۰۲۰).

ما^۵ و همکاران (۲۰۲۲) خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی را با استفاده از شاخص‌های SPI و SRI ارزیابی کردند. نتایج نشان داد مدت خشکسالی‌های هیدرولوژیکی در تابستان و پاییز کوتاه‌تر، اما در بهار و زمستان طولانی‌تر خواهد شد. کاهش قابل توجه در گذار از خشکسالی هواشناسی به خشکسالی هیدرولوژیکی در طول پاییز عمدتاً به دلیل کاهش رطوبت خاک و بارندگی خواهد بود. درحالی‌که نبود روند قابل توجه در تابستان به این دلیل است که بین افزایش جزئی بارندگی و کاهش قابل توجه رطوبت خاک تعادل وجود دارد. پاتال^۶ و پاتال (۲۰۲۴)، به ارزیابی تأثیر تغییر اقلیم بر خطر خشکسالی مناطق نیمه‌خشک هند پرداختند. بدین منظور روند

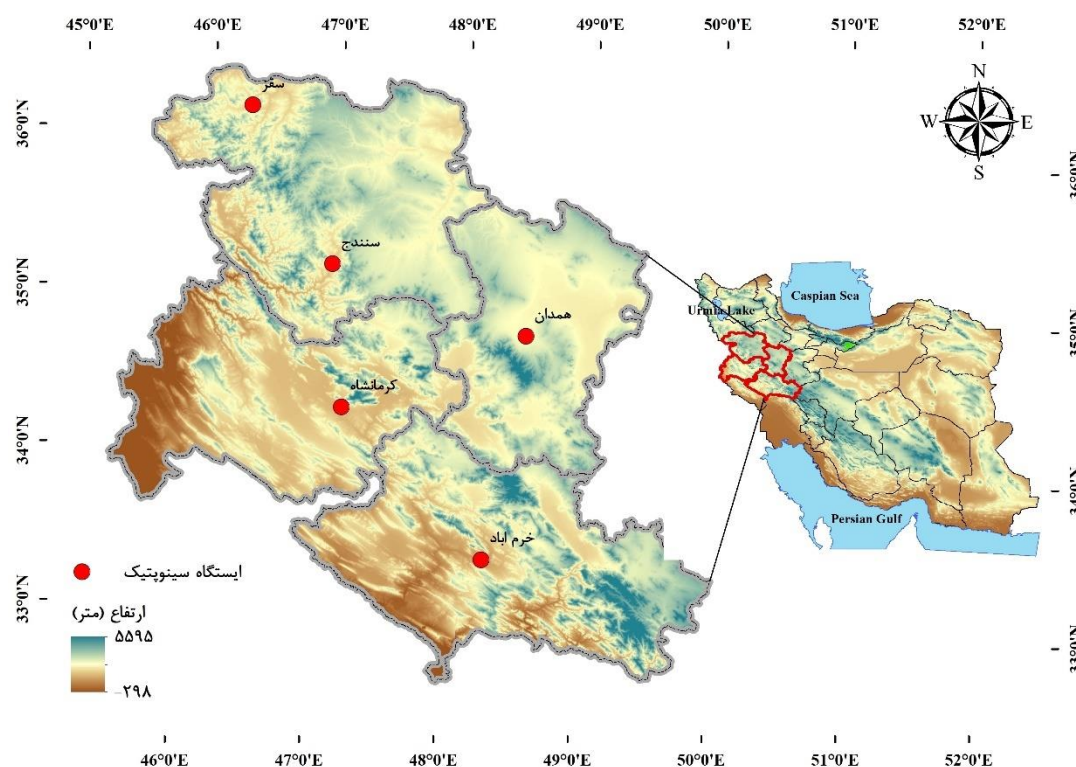
1. Semenov, Barrow & Lars-Wg
2. Yao
3. Samantaray, Ramadas & Panda
4. Haile
5. Ma
6. Patel

خشکسالی در مناطق نیمه‌خشک را با تجزیه و تحلیل داده‌های پیش‌بینی‌شده اقلیمی و داده‌های جغرافیایی، از جمله دما، بارش، خاک و عوامل کاربری زمین بررسی نمودند. نتایج نشان داد که مناطق پرخطر و بسیار پرخطر عمدتاً در قسمت‌های جنوب غربی و شمالی حوضه متمرکز شده‌اند. این مناطق از نظر پوشش گیاهی فقیر و مقدار رطوبت خاک در آن‌ها کم بوده، در مقابل مقادیر دمای سطح زمین زیاد بوده است. در مطالعه‌ای دیگر بررسی تغییرات در فراوانی و شدت خشکسالی تحت تأثیر تغییر اقلیم در اسلوواکی نشان داد که فراوانی خشکسالی‌ها از ماه‌های فصول پاییز و زمستان به ماه‌های بهار و تابستان تغییر یافته است. همچنین نتایج بیانگر افزایش جزئی شدت خشکسالی در منطقه بوده است (لابودووا^۱ و همکاران، ۲۰۲۴). در پژوهشی برای پایش خشکسالی از یک شاخص ترکیبی مبتنی بر کاپولا استفاده شد و قابلیت کاربرد آن در آسیای مرکزی بررسی شد. همچنین، شاخص خشکسالی سه متغیره غیرخطی (NTDI) بارش، تبخیر و تعرق بالقوه، و رطوبت خاک ناحیه ریشه را برای ثبت شروع و مدت خشکسالی ترکیب نمودند. براساس نتایج، NTDI در پایش خشکسالی کشاورزی بهتر از سایر شاخص‌های خشکسالی عمل کرده است (سائو^۲ و همکاران، ۲۰۲۴). به‌طور کلی، بسیاری از مطالعات نشان‌دهنده افزایش شدت و فراوانی رویدادهای خشکسالی تحت سناریوهای تغییر اقلیم هستند (پرودهوم^۳ و همکاران، ۲۰۱۴؛ مصباح‌زاده و همکاران، ۲۰۱۹؛ وو^۴ و همکاران، ۲۰۲۱، کوهی و رضانی اعتدالی، ۲۰۲۳).

روش‌شناسی پژوهش

منطقه مورد مطالعه

ایران با وسعتی حدود ۱,۶۴۰,۱۹۵ کیلومتر مربع در منطقه خاورمیانه واقع شده و از تنوع اقلیمی و جغرافیایی قابل توجهی برخوردار است. توپوگرافی منحصر به فرد ایران، شامل رشته‌کوه‌های البرز و زاگرس، نقش مهمی در شکل‌گیری اقلیم منطقه‌ای و منابع آبی ایفا می‌کند. مناطق غربی کشور که در دامنه‌های رشته‌کوه زاگرس قرار دارند، نقش بسیار مهمی در تأمین منابع آبی کشور ایفا می‌کنند. این مناطق دارای اقلیم نیمه‌خشک و سرد بوده و عمده بارش‌های خود را در فصل‌های پاییز و زمستان دریافت می‌کنند. این مناطق به دلیل وابستگی به سیستم‌های بارش مدیترانه‌ای، در معرض خشکسالی‌های متوالی قرار دارند که تأثیرات مخربی بر کشاورزی، منابع آبی زیرزمینی و اکوسیستم‌های طبیعی می‌گذارد (عراقی‌نژاد، حسینی و اسلامیان، ۲۰۱۷؛ مدرس و سرحدی، ۲۰۰۹). تغییرات اقلیمی چالش‌های این مناطق را تشدید کرده و به کاهش بارندگی و افزایش فراوانی خشکسالی‌ها منجر شده است. علاوه بر این، مناطق غربی ایران به شدت به کشاورزی و اکوسیستم‌های طبیعی وابسته بوده و به تغییرات اقلیمی بسیار حساس‌اند. خشکسالی‌ها تأثیرات قابل توجهی بر منابع آب‌زیرزمینی، جریان رودخانه‌ها و بهره‌وری کشاورزی در این مناطق دارند (براتی، پور و ساردویی، ۲۰۲۳؛ بهزادی و همکاران، ۲۰۲۲). در این تحقیق، مناطق غربی ایران به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شده‌اند (شکل ۱). داده‌های اقلیمی مربوط به بارش و دما از ایستگاه‌های سینوپتیک منتخب این نواحی (جدول ۱) به دلیل داشتن طول دوره آماری مشترک بلندمدت، در دوره ۱۹۶۶-۲۰۲۰، از سازمان هواشناسی کشور مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۱. موقعیت مناطق مورد مطالعه

جدول ۱. موقعیت ایستگاه‌های سینوپتیک منتخب غرب کشور

ردیف	ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا (متر)	متوسط بارش سالانه (میلی‌متر)
۱	خرم‌آباد	۴۸°۱۷'	۳۳°۲۶'	۱۱۴۷/۸	۴۹۳/۴۹
۲	سقز	۴۶°۱۶'	۳۶°۱۵'	۱۵۲۲/۸	۴۷۸/۲۸
۳	سنندج	۴۷°	۳۵°۰۲'	۱۳۷۳/۴	۴۴۱/۱۴
۴	کرمانشاه	۴۷°۱۵'	۳۴°۳۵'	۱۳۱۸/۶	۴۴۵/۷۷
۵	همدان	۴۸°۴۳'	۳۵°۱۲'	۱۶۷۹/۷	۳۱۱/۷۱

روش تحقیق

در این تحقیق ابتدا، داده‌های بارش روزانه از ۶ ایستگاه سینوپتیک در مناطق غربی ایران برای دوره تاریخی (۱۹۶۶-۲۰۲۰) جمع‌آوری گردید. سپس شاخص بارش استاندارد شده (SPI) در مقیاس زمانی سالانه با استفاده از نرم‌افزار DIP محاسبه و مشخصات خشکسالی شامل شدت، مدت و بزرگی استخراج شد. در مرحله بعد، تحلیل روند با استفاده از نرم‌افزار R انجام شد. داده‌های آینده با استفاده از مدل ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG تحت سناریوهای اقلیمی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 شبیه‌سازی شدند و مشخصات خشکسالی برای دوره آینده محاسبه گردید. سپس با بهره‌گیری از توابع کاپولا، روابط وابستگی میان متغیرهای شدت، مدت و بزرگی خشکسالی تحلیل شد. این تحلیل‌ها شامل برازش توابع توزیع حاشیه‌ای، انتخاب بهترین تابع کاپولا و محاسبه دوره‌های بازگشت سه‌متغیره است.

مدل‌سازی و ارزیابی تغییرات اقلیمی

مدل‌های اقلیمی به چهار دسته شامل مدل‌های موازنه‌ای (EBM)، مدل‌های دینامیکی (SDM)، مدل‌های تابش-همرفتی (RCM) و مدل‌های گردش عمومی (GCM) تقسیم می‌شوند (گودرزی، حسینی و مسگری، ۱۳۹۵). اگرچه این مدل‌ها در

شبیه‌سازی تغییرات اقلیمی جهانی و منطقه‌ای توانمند هستند، محدودیت اصلی آن‌ها قدرت تفکیک پایین مکانی است که دقت داده‌های محلی را کاهش می‌دهد. برای رفع این محدودیت، استفاده از روش‌های ریزمقیاس‌نمایی نظیر مدل LARS-WG ضروری است. مدل LARS-WG از ابزارهای آماری پیشرفته برای تولید داده‌های آب‌وهوایی روزانه در مقیاس محلی از خروجی مدل‌های GCM است. این مدل با شبیه‌سازی دقیق متغیرهایی نظیر بارش و دما، محدودیت‌های مکانی و زمانی مدل‌های GCM را کاهش داده و ابزاری مؤثر برای تحلیل تغییرات اقلیمی ارائه می‌دهد. در این پژوهش، از مدل گردش عمومی HadCM3 و مدل ریزمقیاس‌نمایی LARS-WG به دلیل کاربرد گسترده و نتایج موفقیت‌آمیز در ایران و سایر نقاط جهان (لیولد^۱ و همکاران، ۲۰۱۲؛ احمدی و عزیززاده، ۲۰۲۰؛ لطفی و همکاران، ۲۰۲۲؛ محمد و حسن، ۲۰۲۲؛ میرداسلطانی، ۲۰۲۳؛ جهانگیر و روزبهانی، ۲۰۲۴)، به‌منظور شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی و تحلیل شاخص‌های خشکسالی استفاده شده است.

برای ارزیابی عملکرد مدل و صحت‌سنجی شبیه‌سازی‌ها (کنوتی و سدالاجک)، داده‌های اقلیمی به دو دوره زمانی تقسیم شدند: دوره اول (۱۹۶۶-۲۰۰۰) برای واسنجی و ارزیابی دقت مدل و دوره دوم (۲۰۰۱-۲۰۰۵) برای صحت‌سنجی و دقت آن با استفاده از معیارهای اختلاف نسبی (RB) و میانگین اختلاف (MD) مطابق روابط ۱ و ۲ ارزیابی شد. سپس خروجی مدل LARS-WG تحت دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 برای دوره ۲۰۲۰ تا ۲۰۵۰ تولید شد.

$$RB = \frac{\sum_{n=1}^N (Sim_n - Obs_n)}{\sum_{n=1}^N |Obs_n|} \quad \text{رابطه ۱}$$

$$MD = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (Sim_n - Obs_n) \quad \text{رابطه ۲}$$

Sim بارش شبیه‌سازی‌شده به‌وسیله روش LARS-WG، Obs بارش مشاهده‌شده و N تعداد مقادیر مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده است.

مقادیر $RB: \pm 0.2 (\pm 20\%)$ نشان‌دهنده عمل کرد قابل قبول مدل است و اگر مقدار MD نزدیک به صفر باشد، نشان‌دهنده عملکرد ایدئال مدل است (اسدکور و کوهران، ۱۹۸۹^۲؛ دراپر، ۱۹۹۸^۳؛ ویلکس، ۲۰۱۱^۴؛ چوبه و همکاران، ۱۴۰۲).

شاخص SPI و ویژگی‌های خشکسالی

شاخص بارش استانداردشده (SPI) یک معیار پرکاربرد برای تحلیل خشکسالی است که به دلیل وابستگی به داده‌های بارش، سادگی و قابلیت مقایسه آماری بین مناطق و مقیاس‌های زمانی مختلف مورد توجه قرار گرفته است. این شاخص با نرمال‌سازی داده‌های بارش براساس میانگین و انحراف معیار بلندمدت محاسبه می‌شود و زمانی که مقادیر آن به کمتر از ۱- برسد، خشکسالی آغاز می‌شود و با مثبت شدن مقادیر پایان می‌یابد. این شاخص امکان تعیین شروع، مدت، شدت و بزرگی خشکسالی را فراهم می‌کند و از مزایای آن می‌توان به قابلیت استفاده در اقلیم‌های متنوع و عدم وابستگی به توپوگرافی اشاره کرد؛ هرچند به داده‌های بلندمدت بارش نیاز دارد و به توزیع‌های احتمالی حساس است (مک‌کی، دوزکن و کلیست، ۱۹۹۳؛ میشر و سینگ، ۲۰۱۰؛ هایز و همکاران، ۲۰۱۲). شدت خشکسالی به‌عنوان مجموع کمبودهای مقادیر SPI در طی مدت خشکسالی تعریف می‌شود (رابطه ۳)، مدت یا زمان تداوم خشکسالی (رابطه ۴) بازه زمانی است که مقادیر SPI به‌طور پیوسته منفی است. بزرگی خشکسالی (رابطه ۵) از نسبت شدت خشکسالی به مدت آن محاسبه می‌شود (میشر و سینگ، ۲۰۱۰؛ بذرافشان، زمانی و شاکری، ۲۰۲۰).

$$DS = \sum_{t=1}^{di} |x_0 - x_t| \quad \text{رابطه ۳}$$

که در این رابطه x_0 سطح آستانه برای متغیر اصلی x_t است.

$$DL = t_f - t_i + 1$$

(رابطه ۴)

که در آن t_i زمان شروع و t_f زمان پایان خشکسالی و DL برابر مدت خشکسالی است.

$$DM = \frac{DS}{DL}$$

(رابطه ۵)

روند تغییرات مشخصه‌های خشکسالی در دوره‌های تاریخی و آینده

در این مطالعه، تغییرات مشخصه‌های خشکسالی شامل شدت، مدت و بزرگی برای دوره تاریخی (۱۹۶۶-۲۰۲۰) و دوره آینده (۲۰۲۱-۲۰۵۰) تحت سناریوهای اقلیمی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 تحلیل شده است. این سناریوها از مسیرهای اجتماعی-اقتصادی مشترک^۱ ارائه شده در گزارش ششم هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم (IPCC) گرفته شده‌اند. سناریوی SSP2-4.5 به‌عنوان یک مسیر «متوسط» نشان‌دهنده اقداماتی برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای است که همچنان با افزایش قابل توجه این گازها همراه است و واداشت تابشی ۴/۵ وات بر متر مربع را تا سال ۲۱۰۰ پیش‌بینی می‌کند (اونیل^۲ و همکاران، ۲۰۱۶). درمقابل، سناریوی SSP5-8.5 یک مسیر «شدید» با تسلط استفاده از سوخت‌های فسیلی و واداشت تابشی ۸/۵ وات بر متر مربع را نشان می‌دهد که پیامدهایی همچون افزایش شدید دما، کاهش بارش در مناطق خشک و افزایش فراوانی و شدت خشکسالی‌ها را در پی دارد (ریاحی^۳ و همکاران، ۲۰۱۷). تحلیل روند یکی از روش‌های رایج برای تشخیص تغییرات در سری‌های زمانی است (حامد و راثو^۴، ۱۹۹۸؛ یو^۵ و همکاران، ۲۰۰۲) و آزمون ناپارامتریک من-کندال (Mann-Kendall) به‌عنوان یکی از متداول‌ترین روش‌ها در این حوزه شناخته می‌شود. این آزمون ابتدا توسط من (۱۹۴۵) و سپس توسط کندال (۱۹۷۵) توسعه یافت (من، ۱۹۴۵؛ کندال، ۱۹۷۵). این آزمون بدون نیاز به فرض خطی بودن روند یا نرمال بودن توزیع داده‌ها، روند یکنواختی در سری‌های زمانی را بررسی می‌کند. (تورگای و ارکان، ۲۰۰۵؛ والی و روستایی، ۱۴۰۱). آماره Z حاصل از این آزمون برای تعیین جهت و شدت روند استفاده می‌شود. مقادیر مثبت و منفی Z به‌ترتیب بیانگر روند افزایشی و کاهشی هستند و فرض صفر آزمون مبنی بر نبود روند در سری داده‌هاست. اگر مقدار Z بیشتر از ۱/۹۶ یا کمتر از -۱/۹۶ باشد، فرض صفر رد شده و وجود روند در سری داده‌ها تأیید می‌شود (قربانی و همکاران، ۱۳۹۸).

توابع توزیع حاشیه‌ای و کاپولا

توابع حاشیه‌ای نقش مهمی در تحلیل داده‌های چندمتغیره ایفا می‌کنند. در مطالعه خشکسالی، مشخصه‌های مختلف آن با استفاده از توابع توزیع احتمال بررسی می‌شوند. در فرایند برازش توابع حاشیه‌ای برای مشخصه‌های خشکسالی، انتخاب یک توزیع مناسب برای ساخت مدل‌های مشترک احتمالی مبتنی بر کاپولا ضروری است (سالوادوری و دی میشل^۸، ۲۰۰۷؛ پورحق‌وردی و همکاران، ۱۴۰۲). توابع‌های حاشیه‌ای رایج شامل نرمال، لگ-نرمال، ویبول، لجستیک، نمایی و گاما است که با استفاده از آزمون‌های نیکویی برازش مانند کولموگروف-اسمیرنوف (K-S)، معیار اطلاعات آکائیک (AIC) و معیار اطلاعات بیزین (BIC) ارزیابی و بهترین گزینه انتخاب می‌شود (نلسون، ۲۰۰۶). آزمون K-S بیشترین انحراف بین توزیع تجمعی تجربی و نظری را اندازه‌گیری می‌کند. مقادیر پایین K-S معمولاً کمتر از ۰/۰۵، نشان‌دهنده برازش بهتر هستند. AIC به ارزیابی نیکویی برازش مدل به‌لحاظ پیچیدگی آن می‌پردازد، به‌طوری‌که مقادیر کمتر AIC نشان‌دهنده مدل بهتر است. به همین ترتیب، BIC نیز با لحاظ حجم نمونه و پیچیدگی مدل، مدل‌های ساده‌تر را ترجیح

1. Shared Socioeconomic Pathways
2. O'Neill
3. Riahi
4. Hamed & Rao
5. Yue
6. Mann
7. Kendall
8. Salvadori & De Michele
9. Akaike

می‌دهد. مدلی که کمترین مقدار BIC را دارد انتخاب می‌شود. ترکیب این معیارها به انتخاب بهینه توزیع حاشیه‌ای کمک می‌کند (ماسی،^۱ ۱۹۵۱؛ آکائیک،^۲ ۱۹۷۴؛ اسپوارز،^۳ ۱۹۷۸؛ بورنهام و اندرسون،^۴ ۲۰۰۴).
توابع کاپولا ابزار ریاضی قدرتمندی هستند که به بررسی همبستگی غیرخطی و وابستگی بین متغیرها می‌پردازند. این توابع می‌توانند روابط پیچیده و غیرخطی بین مشخصه‌های خشکسالی را به‌خوبی مدل‌سازی کند (جو،^۵ ۱۹۹۷). انواع کاپولا‌های ارشمیدسی و بیضوی شامل فرانک، کلایتون، جوی، گوسین و تی در تجزیه و تحلیل خشکسالی به کار می‌روند. پس از انتخاب توابع حاشیه‌ای، برای تعیین نوع مناسب کاپولا از روش حداکثر درست‌نمایی^۶ استفاده شد. این روش به دلیل دقت بالا و قابلیت استفاده در مدل‌های پیچیده، ابزاری ایدئال برای مدل‌سازی وابستگی‌های چندمتغیره است (ژنست و فیور،^۷ ۲۰۰۷).

دوره بازگشت سه متغیره هم‌زمان شاخص‌های خشکسالی و تحلیل ریسک خشکسالی

دوره بازگشت (T) نشان‌دهنده فاصله زمانی مورد انتظار بین دو رخداد است که مشخصه‌های آن از یک آستانه مشخص عبور می‌کند. برای رخدادهای هم‌زمان (توأم)، از توابع کاپولا برای مدل‌سازی ساختار وابستگی استفاده می‌شود. بازه زمانی بین دو رخداد خشکسالی یعنی E برابر است با $T_E = \sum_{j=1}^{N_d} L_{dj}$ که در آن L_{dj} فاصله زمانی بین هر دو خشکسالی است و N_d برابر تعداد خشکسالی‌ها تا زمانی است که رخداد بعدی خشکسالی E اتفاق افتد. در این صورت، دوره بازگشت T مقدار مورد انتظار T_E است که می‌تواند به صورت رابطه (۶) بیان شود.

رابطه (۶)
 $T = E(N_d)E(L_d)$
دوره‌های بازگشت سه‌متغیره هم‌زمان به صورت زیر تعریف می‌شود (شیائو،^۸ ۲۰۰۳؛ سالوادوری و دی میشل،^۹ ۲۰۰۴؛ سالاس و اوبیسکرا،^{۱۰} ۲۰۱۴؛ دیئگو و همکاران، ۲۰۲۴).

$$T_{and} = \frac{E(L_d)}{1 - P(X_i \geq x_i, X_j \geq x_j, X_k \geq x_k)}$$

$$= E(L_d) / (1 - F(x_i) - F(x_j) - F(x_k) + C(F(x_i), F(x_j)) + C(F(x_i), F(x_k)) + C(F(x_j), F(x_k)) - C(F(x_i), F(x_j), F(x_k)))$$

در تحلیل ریسک خشکسالی، احتمال وقوع حداقل یک رخداد در طول n سال که به عنوان ریسک (R) تعریف می‌شود، از رابطه (۸) برآورد می‌شود (سالاس و اوبیسکرا، ۲۰۱۴):

$$Risk = 1 - (1 - \frac{1}{T})^n$$

رابطه (۸)

در این رابطه، T دوره بازگشت توأم است. با توجه به رابطه فوق افزایش دوره بازگشت به معنای کاهش احتمال وقوع سالانه آن پدیده است؛ بنابراین، در یک بازه زمانی مشخص (مانند n سال)، ریسک وقوع حداقل یک رخداد از آن پدیده نیز به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد، چراکه ریسک (R) مستقیماً تحت تأثیر احتمال وقوع سالانه و طول بازه زمانی قرار دارد. در واقع با افزایش دوره بازگشت یک پدیده، احتمال وقوع آن در هر سال کاهش می‌یابد؛ در نتیجه ریسک مواجهه با آن پدیده در یک بازه زمانی مشخص نیز کاهش می‌یابد.

1. Massey
2. Akaike
3. Schwarz
4. Burnham & Anderson
5. Joe
6. Maximum Likelihood Estimation (MLE)
7. Genest & Favre
8. Shiau
9. Salas & Obeysekera

یافته‌های پژوهش

نتایج ارزیابی و صحت‌سنجی مدل LARS-WG

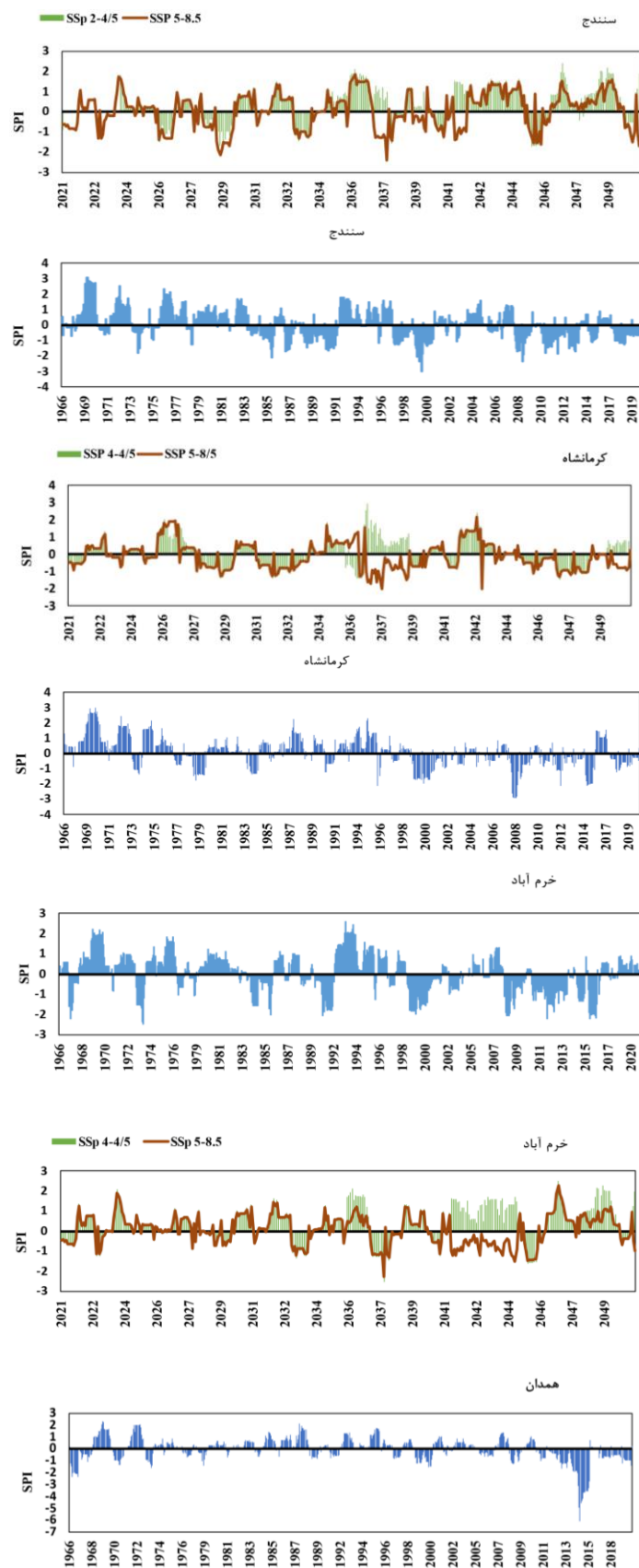
نتایج ارزیابی عملکرد مدل LARS-WG در شبیه‌سازی بارش برای دوره‌های ارزیابی (۱۹۶۶-۲۰۰۰) و صحت‌سنجی (۲۰۰۱-۲۰۰۵) در ایستگاه‌های مورد مطالعه، براساس شاخص‌های RB و MD در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج ارزیابی نشان‌دهنده عملکرد مناسب این مدل در اکثر ایستگاه‌ها و توانایی آن در شبیه‌سازی داده‌های بارش در مقیاس محلی است. در میان ایستگاه‌های مورد بررسی، ایستگاه خرم‌آباد بهترین عملکرد را داشته و مقادیر RB و MD در این ایستگاه کمترین میزان را نشان داده‌اند که بیانگر انطباق بالای داده‌های شبیه‌سازی شده با مقادیر مشاهده‌ای است. در مقابل، در ایستگاه‌های سقز و کرمانشاه، مدل تمایل به بیش‌برآورد داده‌های بارش داشته که این موضوع در مقادیر بالای RB و MD مشهود است. در ایستگاه‌های اراک و سنندج، مدل دقت بالایی را نشان داده و مقادیر RB نزدیک به صفر و MD کمترین انحراف را دارند که نشان‌دهنده شبیه‌سازی دقیق داده‌های بارش در این مناطق است؛ اما در ایستگاه همدان، مدل به‌طور کلی تمایل به کم‌برآورد داده‌های بارش داشته است.

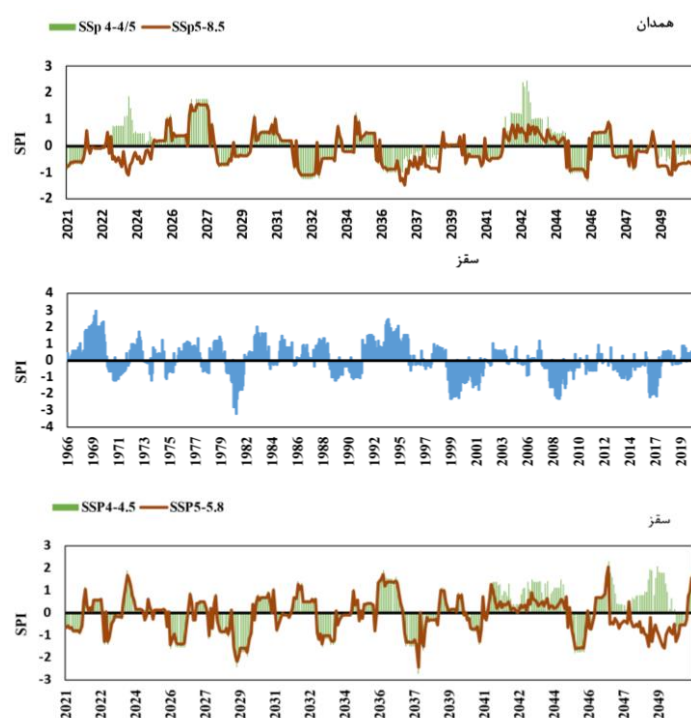
جدول ۲. مقادیر شاخص‌های ارزیابی مدل در دوره پایه

ایستگاه	ارزیابی		صحت سنجی	
	RB	MD	RB	MD
سقز	۰/۰۳۲	۱۴/۷	۰/۰۵۲	۱۵/۹۶
سنندج	-۰/۰۵	-۴/۷	-۰/۰۱۲	-۴/۷۷
خرم‌آباد	-۰/۱	-۲/۲۷	-۰/۰۰۴	-۱/۹۳
کرمانشاه	۰/۰۶۴	۲۶/۰۱	۰/۰۶۱	۱۴/۸۸
همدان	-۰/۱۷	-۹/۹۵	-۰/۰۳۳	-۱۱/۵۷

پایش زمانی SPI در دوره تاریخی و تحت سناریوهای SSP

نتایج تحلیل شاخص SPI نشان‌دهنده نوسانات خشکسالی و ترسالی در دوره تاریخی، به‌ویژه در ایستگاه‌های سقز و سنندج است که بیشترین وقوع خشکسالی‌های شدید و طولانی‌مدت را تجربه کرده‌اند، درحالی‌که خرم‌آباد شرایط معتدل‌تری داشته است. در دوره آینده، پیش‌بینی‌ها حاکی از افزایش خشکسالی در تمامی ایستگاه‌های مورد مطالعه است. تحت سناریوی SSP5-8.5، شدت و مدت خشکسالی‌ها نسبت به SSP2-4.5 افزایش یافته و شرایط حادث‌تری پیش‌بینی شده است. در خرم‌آباد، مقادیر منفی SPI افزایش یافته و خشکسالی‌ها بیشتر شده است. در سقز و سنندج، شاخص SPI در بسیاری از سال‌ها به زیر ۲- کاهش یافته که نشان‌دهنده تشدید خشکسالی است. در ایستگاه‌های کرمانشاه و همدان، کاهش فراوانی ترسالی و افزایش شدت خشکسالی‌های آتی دیده می‌شود. در دوره تاریخی، نوسانات SPI نشان‌دهنده وقوع دوره‌های خشکسالی و ترسالی بوده، اما در دهه‌های اخیر خشکسالی‌ها غالب شده‌اند. در SSP2-4.5، بهبود نسبی شرایط خشکسالی و افزایش مقادیر مثبت SPI مشاهده شده، اما در SSP5-8.5 خشکسالی‌های شدیدتر و طولانی‌تر پیش‌بینی شده است. به‌طور کلی، سناریوی SSP5-8.5 شرایط بحرانی‌تری را در مقایسه با SSP2-4.5 نشان می‌دهد و تشدید خشکسالی در آینده برای تمامی ایستگاه‌ها انتظار می‌رود.

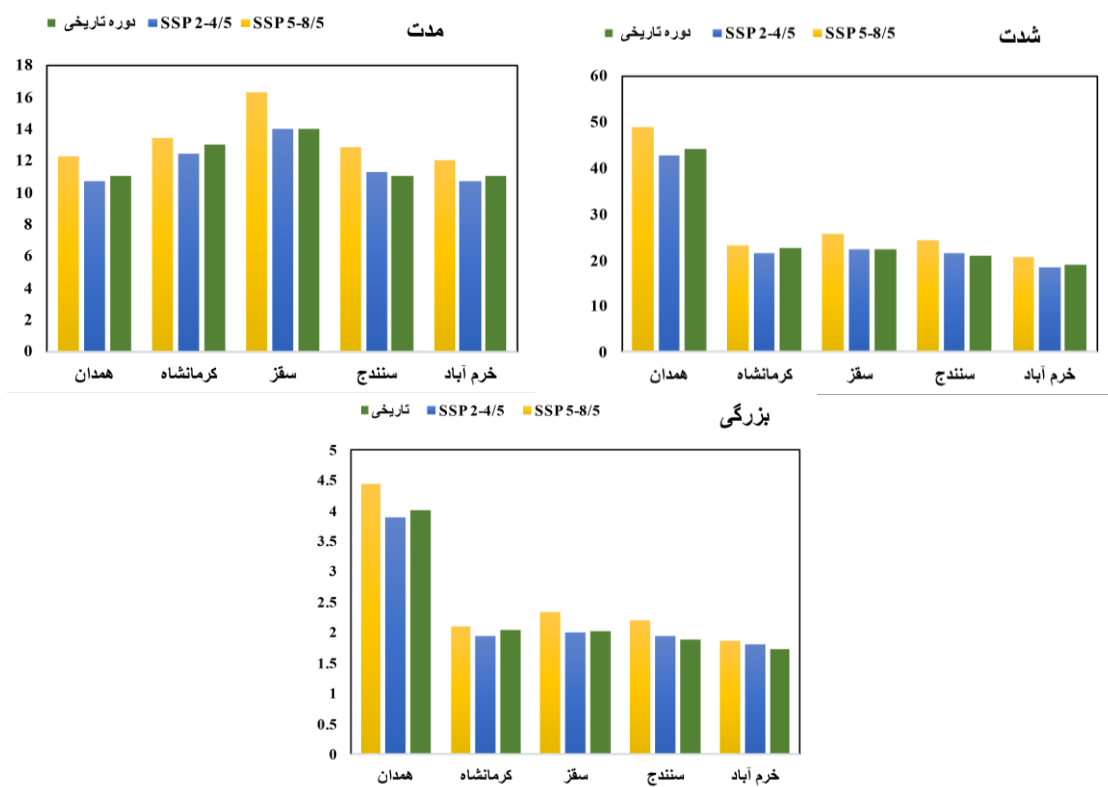




شکل ۲. نمودارهای تغییرات SPI سالیانه در دوره تاریخی و آینده در ایستگاه‌های مورد مطالعه

بررسی روند مشخصه‌های خشکسالی در دوره تاریخی و آینده

در شکل ۳ مقادیر حداکثر سه مشخصه خشکسالی در ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره تاریخی و آینده و در جداول ۳ و ۴ مقادیر آماره Z من-کندال آورده شده است.



شکل ۳. تغییرات حداکثر شدت، مدت (تداوم) و بزرگی خشکسالی در دوره تاریخی و آینده

تحلیل نتایج شاخص‌های خشکسالی در این مطالعه نشان می‌دهد که ویژگی‌های خشکسالی در دوره‌های آینده تحت سناریوهای اقلیمی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 تغییرات قابل توجهی داشته است. در ایستگاه همدان، شدت خشکسالی از ۵۰ در دوره تاریخی به ۵۲ در SSP5-8.5 افزایش یافته که نشان‌دهنده تشدید خشکسالی است. سقز نیز افزایش مشابهی از ۴۰ به ۴۴ نشان داده است. در مقابل، کرمانشاه و خرم‌آباد تغییرات کمتری را در شدت خشکسالی تجربه کرده و این تغییرات از نظر آماری معنادار نبوده‌اند. مدت خشکسالی در همدان و سقز تحت SSP5-8.5 افزایش معناداری نشان داده و به ترتیب از ۱۴ و ۱۲ ماه در دوره تاریخی به ۱۶ و ۱۴ ماه افزایش یافته است. در سنندج، مدت خشکسالی کاهش یافته و تنها در SSP5-8.5 معنادار بوده است، در حالی که کرمانشاه و خرم‌آباد تغییرات ملایمی را بدون روند معنادار نشان داده‌اند. بزرگی خشکسالی در همدان از ۴/۵ به ۴/۸ در SSP5-8.5 افزایش یافته است که این افزایش، اثرات خشکسالی را در این منطقه تقویت کرده است. سقز و سنندج نیز افزایش ملایمی در بزرگی خشکسالی داشته‌اند، اما تغییرات در کرمانشاه و خرم‌آباد غیرمعنادار بوده است. تحلیل روندهای آماری با آزمون من-کندال نشان داد که شدت و مدت خشکسالی در ایستگاه‌های همدان و سقز در دوره آینده کاهش معناداری را نشان می‌دهند. مقادیر Z در این مناطق تحت SSP5-8.5 به ترتیب به ۲/۵- و ۲/۸- رسیده است. در مقابل، کرمانشاه و خرم‌آباد مقادیر Z کمتری ثبت کرده‌اند که نشان‌دهنده پایداری نسبی این مناطق در برابر تغییرات اقلیمی است.

جدول ۳. مقادیر Z آزمون من-کندال شاخصه‌های خشکسالی در ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره تاریخی در سطح معنی‌داری ۹۵ درصد

ایستگاه	شدت خشکسالی	مدت خشکسالی	بزرگی خشکسالی
خرم‌آباد	-۰/۴	-۰/۲	-۰/۲۵
کرمانشاه	-۰/۵	-۰/۵۵	۰/۱
همدان	-۲/۱	-۲/۵	-۱/۹
سقز	-۲/۳	-۲/۲	-۲/۴
سنندج	-۱/۵	-۱/۸	-۱/۶

جدول ۴. مقادیر Z آزمون من-کندال شاخصه‌های خشکسالی در ایستگاه‌های مورد مطالعه در دوره آینده در سطح معنی‌داری ۹۵ درصد

ایستگاه	سناریو SSP 2-4.5			سناریو SSP 5-8.5		
	شدت	مدت	بزرگی	شدت	مدت	بزرگی
خرم‌آباد	-۱/۸	-۱/۵	۰/۵	-۲/۱۰	-۲/۳۰	-۱/۹۰
کرمانشاه	-۱/۲۰	-۱/۴	۰/۴۵	-۲	-۲/۲۰	-۱/۸
همدان	-۲/۲۰	-۲/۶۰	-۲	-۲/۵۰	-۲.۵	-۲/۴۰
سقز	-۲/۴۰	-۲/۷۰	-۲/۲۰	-۲/۸	-۳	-۲/۶۰
سنندج	-۱	-۱/۵۰	-۱/۱۰	-۱/۹۰	-۲/۱۰	-۱/۸۰

برآزش تابع توزیع بر شاخص‌های خشکسالی در دوره تاریخی و آینده

نتایج برآزش توابع توزیع بر شاخص‌های خشکسالی نشان می‌دهد که توزیع ویبول برای شدت خشکسالی در هر سه دوره بهترین برآزش را داشته است. در دوره تاریخی، مقدار K-S برابر با ۰/۰۶ و BIC برابر با ۱۷۶ بوده، اما در سناریوی SSP2-4.5 افزایش یافته و در SSP5-8.5 با مقدار K-S برابر با ۰/۰۵ انطباق بهتری نشان داده است. برای مدت خشکسالی، در دوره تاریخی توزیع لوگ-نرمال با مقدار K-S برابر با ۰/۰۸ مناسب‌ترین گزینه بوده، اما در دوره آینده توزیع ویبول جایگزین آن شده است. مقدار K-S در SSP2-4.5 برابر با ۰/۱۲ و در SSP5-8.5 به ۰/۲۳ افزایش یافته که بیانگر پراکندگی بیشتر داده‌هاست. برای بزرگی خشکسالی، توزیع گاما در دوره تاریخی و SSP5-8.5 بهترین برآزش را داشته است. مقدار K-S در دوره تاریخی ۰/۰۸۹ و در SSP5-8.5، BIC و AIC کاهش یافته که نشان‌دهنده تغییر پراکندگی داده‌هاست. در SSP2-4.5، توزیع ویبول بهترین انطباق را نشان داده است. به‌طور کلی، توزیع ویبول مناسب‌ترین مدل برای شدت و مدت خشکسالی در آینده است، در حالی که توزیع گاما بهترین برآزش را برای بزرگی خشکسالی در SSP5-8.5 دارد. افزایش مقدار K-S در SSP5-8.5 نشان‌دهنده افزایش شدت و پراکندگی خشکسالی در آینده است.

جدول ۵. برازش توابع توزیع مناسب شاخص‌های خشکسالی در دوره تاریخی و آینده

شاخص خشکسالی	دوره	تابع توزیع منتخب	پارامتر	K-S	BIC	AIC
شدت	تاریخی	ویبول	$\alpha = 1/11$ $\beta = 7/66$	۰/۰۶	۱۷۶	۱۸۵
	SSp2-4.5	ویبول	$\alpha = 1/32$ $\beta = 7/51$	۰/۱	۲۸۰	۳۳۶
	SSp5-8.5	ویبول	$\alpha = 1/16$ $\beta = 8/15$	۰/۰۵	۲۱۰	۲۰۸
مدت	تاریخی	لوگ نرمال	$\sigma = 1/76$ $\mu = 0/47$	۰/۰۸	۱۷۵	۱۶۹/۴۸
	SSp2-4.5	ویبول	$\alpha = 2/69$ $\beta = 7/26$	۰/۱۲	۱۴۳	۱۳۵/۲۵
	SSp5-8.5	ویبول	$\alpha = 2/76$ $\beta = 9/89$	۰/۲۳	۱۱۷	۱۱۶/۰۶
بزرگی	تاریخی	گاما	$\alpha = 2/41$ $\beta = 3/19$	۰/۰۸۹	۲۲۰	۲۰۳/۴۲
	SSp2-4.5	ویبول	$\alpha = 0/8$ $\beta = 1/91$	۰/۰۶۸	۲۱۷	۲۱۱
	SSp5-8.5	گاما	$\alpha = 1/75$ $\beta = 2/28$	۰/۰۵	۱۳۸	۱۵۰/۹۹

توابع کاپولای سه‌متغیره در دوره تاریخی و آینده

تحلیل وابستگی‌های سه‌متغیره بین مشخصه‌های خشکسالی در ایستگاه‌های مورد مطالعه (جدول ۶) نشان داد که انتخاب نوع تابع مفصل به دوره زمانی و شرایط اقلیمی بستگی دارد. در این مطالعه، انواع توابع کاپولا برای مدل‌سازی وابستگی‌های چندمتغیره استفاده شده‌اند. نتایج برازش این توابع براساس معیار بیشینه درست‌نمایی به شرح زیر است: در ایستگاه خرم‌آباد، تابع کاپولا T در دوره تاریخی با پارامتر ۰/۸ بهترین انطباق را نشان داده است. برای دوره‌های آینده، کاپولای نرمال با مقادیر پارامتر ۲/۱۴ و ۲/۲۵ به‌عنوان توابع منتخب شناسایی شدند. در کرمانشاه، کاپولای نرمال در دوره تاریخی و کاپولای T در سناریوهای آینده بهترین عملکرد را داشتند. پارامترهای وابستگی این توابع در دوره‌های آینده کمی افزایش یافتند (۰/۸۲ و ۰/۸۳)، که نشان‌دهنده تغییرات در شدت وابستگی متغیرهاست. در ایستگاه همدان، کاپولای T در دوره تاریخی با پارامتر ۰/۷۵ بهترین انطباق را ارائه داد. در SSP2-4.5، کاپولای فرانک با پارامتر ۰/۶۷ و در SSP5-8.5، کاپولای نرمال با پارامتر ۰/۷۹ مناسب‌ترین توابع شناسایی شدند. در سقز، کاپولای T در تمامی دوره‌ها به‌عنوان بهترین گزینه شناسایی شد. مقدار پارامتر وابستگی در SSP2-4.5 کاهش یافت (۰/۵۷)، اما در SSP5-8.5 به ۰/۶۱ افزایش یافت. این تغییرات نشان‌دهنده نوسانات وابستگی متغیرها در این منطقه تحت تأثیر تغییرات اقلیمی است. در سنندج، کاپولای فرانک با پارامتر ۰/۶۵ در دوره تاریخی مناسب‌ترین توزیع شناخته شد. در SSP2-4.5 و SSP5-8.5، کاپولای T بهترین برازش را نشان داد و پارامترهای وابستگی به ترتیب ۰/۷۶ و ۰/۶۸ بودند.

جدول ۶. توابع مفصل (کاپولا) سه‌متغیره منتخب و پارامترهای برآوردشده در دوره‌های تاریخی و آینده

ایستگاه	دوره	نوع کاپولا منتخب	پارامتر	Max Likelihood
خرم‌آباد	تاریخی	T	۰/۸	۲۱۲/۷
	SSp2-4.5	نرمال	۲/۱۴	۱۳۲/۹
	SSp5-8.5	نرمال	۲/۲۵	۱۴۰/۵
کرمانشاه	تاریخی	نرمال	۰/۸۱	۱۶۵
	SSp2-4.5	T	۰/۸۲	۱۵۳/۷
	SSp5-8.5	T	۰/۸۳	۱۴۳
همدان	تاریخی	T	۰/۷۵	۱۰۴/۷
	SSp2-4.5	فرانک	۰/۶۷	۹۳/۷۱
	SSp5-8.5	نرمال	۰/۷۹	۸۹/۴
سقز	تاریخی	T	۰/۷۷	۱۱۴/۵
	SSp2-4.5	T	۰/۵۷	۴۰/۶۳
	SSp5-8.5	T	۰/۶۱	۱۰۰/۳
سنندج	تاریخی	فرانک	۰/۶۵	۱۱۵
	SSp2-4.5	T	۰/۷۶	۱۶۷
	SSp5-8.5	T	۰/۶۸	۱۵۴

تعیین دوره بازگشت شاخص‌های خشکسالی و ریسک سه‌متغیره برای دوره تاریخی و آینده

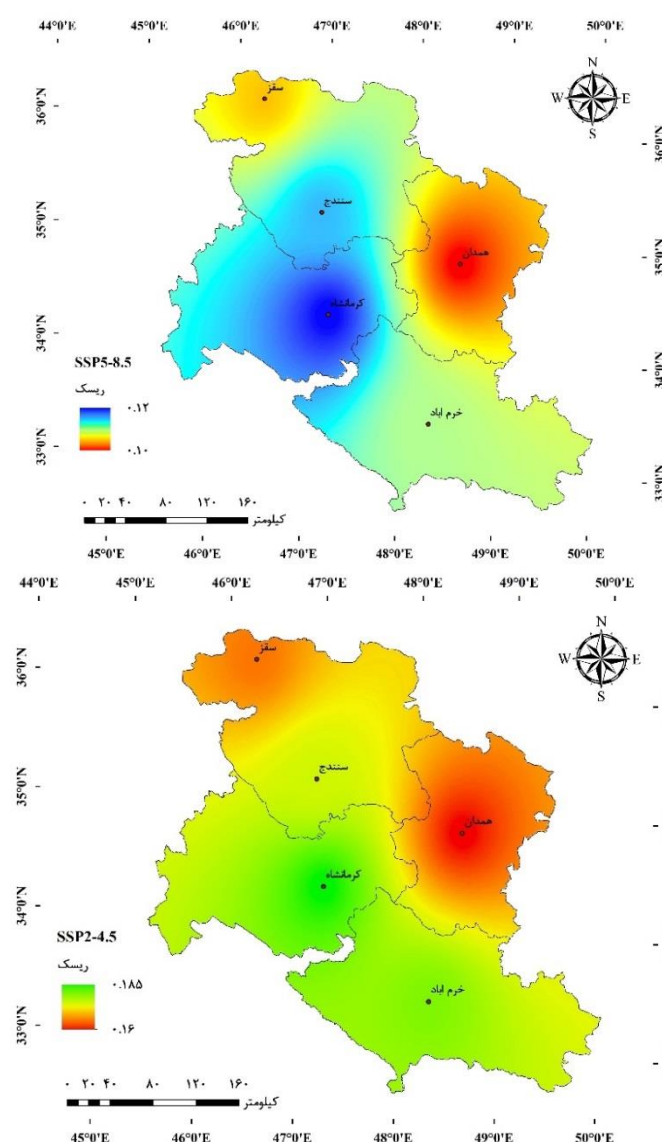
پس از تعیین توابع مفصل (کاپولا) و توابع توزیع، دوره بازگشت سهم‌تیره توأم (Tand123) و ریسک مرتبط با آن (Rand123) برای هر ایستگاه در دوره‌های بازگشت ۲ تا ۵۰ ساله محاسبه شد. برای درک کلی از وضعیت منطقه، میانگین مقادیر شاخص‌ها، دوره‌های بازگشت و ریسک مرتبط در غرب ایران برای دوره آینده تحت دو سناریوی SSP2-4.5 و SSP5-8.5 پیش‌بینی شد (جدول ۷ و ۸). در شکل ۴، نقشه توزیع مکانی ریسک خشکسالی در دوره بازگشت ۲۰ساله در مناطق غربی آورده شده است. در هر دو سناریو، شدت، مدت و بزرگی خشکسالی با افزایش دوره بازگشت بیشتر می‌شود. برای مثال، در سناریوی SSP2-4.5 برای دوره بازگشت دوساله، میانگین شدت، مدت و بزرگی خشکسالی به ترتیب ۷/۲۳، ۱۱/۱۳۳ و ۸۴/۰ محاسبه شد. دوره بازگشت سهم‌تیره برای این شرایط ۲/۸۱ سال و احتمال وقوع توأم (ریسک) برابر با ۰/۹۸ است. این نتایج نشان می‌دهد که احتمال وقوع توأم یک خشکسالی با ویژگی‌های مذکور در دهه آینده، تحت سناریوی SSP2-4.5، ۹۸ درصد است. در مقابل، در سناریوی SSP5-8.5 و برای دوره بازگشت دوساله، شدت، مدت و بزرگی خشکسالی به ترتیب ۹/۸۴، ۱۴/۸۴ و ۱/۱۷ برآورد شد. مقادیر دوره بازگشت سهم‌تیره و ریسک احتمال وقوع توأم نیز به ترتیب ۳/۶۸ سال و ۹۵ درصد بودند. این نشان می‌دهد که با وجود شدت بیشتر خشکسالی در سناریوی SSP5-8.5، احتمال وقوع توأم کاهش یافته است. در دوره‌های بازگشت طولانی‌تر، احتمال وقوع خشکسالی‌های بسیار شدید کاهش می‌یابد. برای نمونه، برای دوره بازگشت ۵۰ساله، احتمال وقوع توأم خشکسالی با شاخص‌های مذکور تحت سناریوی SSP2-4.5 تنها ۶ درصد و تحت SSP5-8.5 تنها ۴ درصد خواهد بود. این کاهش احتمال نشان‌دهنده این است که خشکسالی‌های بسیار شدید در دوره‌های بازگشت طولانی‌تر کمتر رخ می‌دهند؛ اگرچه شدت و مدت آن‌ها همچنان افزایش می‌یابد.

جدول ۷. مقادیر دوره بازگشت و ریسک توأم شاخص‌های خشکسالی تحت سناریوی SSP2-4.5

سناریو SSP 2-4.5					
دوره بازگشت	شدت	مدت	بزرگی	T _{and} ۱۲۳	R _{and} ۱۲۳
۲	۷/۲۳	۱۱/۱۳۳	۰/۸۴	۲/۸۱	۰/۹۸
۵	۱۳/۶۷	۱۴/۹۳	۱/۳۱	۹/۲۰	۰/۶۵
۱۰	۱۷/۹۱	۱۶/۹۲	۱/۵۷	۲۱/۹۵	۰/۶۳
۲۰	۲۱/۸۵	۱۸/۵۴	۱/۸۱	۵۱/۹۰	۰/۱۷۷
۵۰	۲۶/۷۳	۲۰/۳۵	۲/۰۸	۱۶۰/۹۵	۰/۰۶

جدول ۸. مقادیر دوره بازگشت و ریسک توأم شاخص‌های خشکسالی تحت سناریوی SSP5-8.5

سناریو SSP 5-8.5					
دورهٔ بازگشت	شدت	مدت	بزرگی	T_{and123}	R_{and123}
۲	۹/۸۴	۱۴/۸۴	۱/۱۷	۳/۶۸	۰/۹۵
۵	۲۰/۹۶	۲۰/۳۰	۱/۹۷	۱۴/۱۶۳	۰/۵۲
۱۰	۲۸/۹۰	۲۳/۱۹	۲/۵۱	۳۶/۰۲	۰/۲۷
۲۰	۳۶/۶۰	۲۵/۵۸	۳/۰۲	۸۳/۹۶	۰/۱۰۵
۵۰	۴۶/۵۰	۲۸/۲۴	۳/۶۶	۲۲۵/۶۴	۰/۰۴۴



شکل ۴. نقشه ریسک سه متغیره توأم تحت سناریوهای SSP2-4.5 و SSP 5-8.5

بحث و نتیجه گیری

مطالعه حاضر با هدف بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر ویژگی‌های خشکسالی در مناطق غربی ایران، با استفاده از مدل‌سازی آماری و تحلیل توابع کاپولا انجام شد. مدل LARS-WG عملکرد مناسبی در شبیه‌سازی داده‌های بارش نشان داد، به‌ویژه در ایستگاه خرم‌آباد، درحالی‌که سقز و کرمانشاه بیش‌برآورد و همدان کم‌برآورد داشتند. یافته‌ها با مطالعات هاشمی، شمس‌الدین و ملویل (۲۰۱۱)، حسن، شمس‌الدین و هارون (۲۰۱۴)، بذرافشان، محمودزاده و بذرافشان (۲۰۱۶)، کوثری، اختصاصی و ملکی‌نژاد (۲۰۱۷) و لطفی، کمالی و مشکواتی (۲۰۲۲) هم‌خوانی دارد و بیانگر قابلیت مدل LARS-WG در شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی با دقت مناسب است. تحلیل شاخص‌های شدت، مدت و بزرگی خشکسالی نشان داد که تغییرات اقلیمی باعث تشدید این شاخص‌ها، به‌ویژه در همدان و سقز شده است. سناریوی SSP5-8.5 شرایط حادثه‌تری نسبت به SSP2-4.5 پیش‌بینی کرده و ایستگاه‌های سنندج و سقز بیشترین تأثیرپذیری را نشان داده‌اند، درحالی‌که خرم‌آباد کمترین تغییرات را تجربه کرده است. یافته‌های این پژوهش با نتایج مطالعات پیشین هم‌خوانی دارد. برای مثال، الوانکار، نظری و فتاحی (۱۳۹۵) به افزایش تداوم‌های زمانی خشکسالی در آینده، به‌ویژه در مناطق غرب و شمال غرب ایران اشاره کرده‌اند. همچنین، بذرافشان و همکاران (۲۰۲۳) افزایش شدت خشکسالی و کاهش دوره بازگشت آن را در مناطق مختلف ایران گزارش کرده‌اند، و اژدری و همکاران (۱۳۹۹) نیز افزایش خشکسالی‌های هیدرو-هواشناسی تحت سناریوهای انتشار بالا را تأیید

کرده‌اند. یافته‌های تحلیل روند شاخص‌های خشکسالی نشان می‌دهد که همدان و سقز بیشترین تأثیر را از تغییرات اقلیمی، به‌ویژه تحت سناریوی SSP5-8.5 داشته‌اند که با افزایش معنادار شدت و مدت خشکسالی همراه بوده است. این نتایج با مطالعات بذرافشان، زمانی و شاکری (۲۰۲۰) و بذرافشان و همکاران (۲۰۲۳) دربارهٔ تشدید خشکسالی در مناطق کوهستانی ایران هم‌خوانی دارد. همچنین، مظفری، مرادی و بذرافشان (۱۳۹۹) افزایش مدت خشکسالی در غرب و شمال غرب ایران را گزارش کرده‌اند و یافته‌های اژدری و همکاران (۱۳۹۹) نیز افزایش بزرگی خشکسالی در مناطق نیمه‌خشک و کوهستانی را تأیید می‌کند. برازش توابع حاشیه‌ای نشان داد که توزیع ویبول به‌دلیل انعطاف‌پذیری بالا، بهترین مدل برای شدت خشکسالی در تمام دوره‌ها، به‌ویژه در شرایط آینده است، که با مطالعات دیگر، اسیست و یوسه^۱ (۲۰۲۳)، که استفاده از این توزیع را برای تحلیل خشکسالی توصیه کرده‌اند، هم‌خوانی دارد. برای مدت خشکسالی، توزیع لوگ-نرمال در دورهٔ تاریخی بهترین انطباق را نشان داد، اما در سناریوهای آینده، ویبول مناسب‌تر ارزیابی شد که بیانگر تأثیر تغییرات اقلیمی بر الگوهای خشکسالی است. همچنین، بزرگی خشکسالی در دورهٔ تاریخی بهترین برازش را با توزیع گاما داشت که با یافته‌های سانگ و سینگ^۲ (۲۰۱۰) که این توزیع را برای مدل‌سازی بزرگی خشکسالی مناسب دانسته‌اند، مطابقت دارد. در شرایط آینده، هر دو توزیع ویبول و گاما به‌عنوان مدل‌های مناسب شناسایی شدند که بر تغییرات احتمالی رفتار خشکسالی تحت سناریوهای اقلیمی مختلف تأکید دارد. این نتایج همچنین با مطالعات اسیست و یوسه^۳ (۲۰۲۳) که بر کاربرد مدل‌های آماری انعطاف‌پذیر در تحلیل خشکسالی تأکید کرده‌اند، هم‌خوانی دارد. بررسی دورهٔ بازگشت و تحلیل ریسک خشکسالی تحت سناریوهای آینده نشان داد که SSP5-8.5 باعث خشکسالی‌های شدیدتر و طولانی‌تر می‌شود. این نتایج با یافته‌های شیاو^۴ (۲۰۰۶)، ترن‌برث^۵ و همکاران (۲۰۱۴) و شفیلد و وود^۵ (۲۰۰۸) همسوست که به افزایش فراوانی و شدت خشکسالی‌ها بر اثر سناریوهای انتشار بالای گازهای گلخانه‌ای اشاره کرده‌اند. نتایج این تحقیق نشان‌دهندهٔ ضرورت برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب برای کاهش اثرات تغییرات اقلیمی است. با توجه به افزایش شدت، مدت و بزرگی خشکسالی در مناطق آسیب‌پذیر مانند همدان و سقز، اقدامات سازگار با تغییرات اقلیمی، ازجمله بهبود سیستم‌های آبیاری، توسعهٔ زیرساخت‌های ذخیره‌سازی آب و پایش مداوم شرایط اقلیمی ضروری است. این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از ابزارهای پیشرفتهٔ آماری و مدل‌های اقلیمی می‌تواند درک بهتری از رفتار خشکسالی و ریسک‌های مرتبط فراهم کرده و به سیاست‌گذاران در تدوین راهبردهای کارآمد کمک کند.

References

- Abassi, F., Habibi Nokhandan, M., Goli Mokhtari, L., & Malbousi, S. (2010). Climate Change Assessment over Iran in the Future Decades Using MAGICC-SCENGEN Model. *Physical Geography Research*, 42(72), 91-110 (In persian).
- Abbaspour, K. C., Faramarzi, M., Ghasemi, S. S., & Yang, H. (2009). Assessing the impact of climate change on water resources in Iran. *Water resources research*, 45(10).
- Ahmadi, H., & Azizzadeh, J. (2020). The impacts of climate change based on regional and global climate models (RCMs and GCMs) projections (case study: Ilam province). *Modeling Earth Systems and Environment*, 6(2), 685-696.
- Akaike, H. (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE transactions on automatic control*, 19(6), 716-723.
- Alvankar, S. R., Nazari, F., & Fattahi, E. (2016). The Intensity and Return Periods of Drought under Future Climate Change Scenarios in Iran. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 3 (2): 99-120. (In persian).
- Araghinejad, S., Hosseini-Moghari, S. M., & Eslamian, S. (2017). Application of data-driven models in drought forecasting. In *Handbook of drought and water scarcity* (pp. 423-440). CRC Press.
- Azhdari, Z., Bazrafshan, O., Shekari, M., & Zamani, H. (2020). Analysis of Hydrological Drought Severity, Duration and Magnitude Using Copula Functions (Case study: Bandar-Sedij and Kol-Mehran Watershed). *Journal of Ecohydrology*, 7(1), 237-249. doi: 10.22059/ije.2020.295823.1270 (In persian).
- Bahreghmand, A.R., Alvandi, E., Bahrami, M., Dashti, M., Heravi, H., Khosravi, G.R., Kornezhadi, A., Samadi arghini, H., Tajiki, M., & Teymouri, M. (2016). Copula functions and their application in stochastic hydrology, *Scientific Journal of Conservation and Exploitation of Natural Resources*, 4(2), 1-20. doi: 10.22069/ejang.2016.2793 (In persian).
- Barati, A. A., Pour, M. D., & Sardooei, M. A. (2023). Water crisis in Iran: A system dynamics approach on water, energy, food, land and climate (WEFLC) nexus. *Science of the Total Environment*, 882, 163549.
- Bayatavrkeshi, M., Imteaz, M. A., Kisi, O., Farahani, M., Ghabaei, M., Al-Janabi, A. M. S., ... & Yaseen, Z. M. (2023). Drought trends projection under future climate change scenarios for Iran region. *Plos one*, 18(11), e0290698.
- Bazrafshan, O., Mahmoudzadeh, F., Asgari Nezhad, A., & Bazrafshan, J. (2019). Adaptive evaluation of SPI, RDI, and SPEI indices in analyzing the trend of intensity, duration, and frequency of drought in arid and semi-arid regions of Iran. *Irrigation Sciences and Engineering*, 42(3), 117-131.
- Bazrafshan, O., Mahmudzadeh, F., & Bazrafshan, J. (2017). Evaluation of temporal trends of the drought indices SPI and SPEI in the Southern Coast of Iran. *Desert Management*, 4(8), 54-69.
- Bazrafshan, O., Zamani, H., & Shekari, M. (2020). A copula- based index for drought analysis in arid and semi-arid regions of Iran. *Natural Resource Modeling*, 33(1), e12237.
- Bazrafshan, O., Zamani, H., Mozaffari, E., Azhdari, Z., & Shekari, M. (2023). Trivariate risk analysis of meteorological drought in Iran under climate change scenarios. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 135(6), 52.
- Behzadi, F., Yousefi, H., Javadi, S., Moridi, A., Shahedany, S. M. H., & Neshat, A. (2022). Meteorological drought duration–severity and climate change impact in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 149(3), 1297-1315.
- Burnham, K. P., & Anderson, D. R. (2004). Multimodel inference: understanding AIC and BIC in model selection. *Sociological methods & research*, 33(2), 261-304.
- Choobeh, S., Farrokhzadeh, B., Bazrafshan, O., & Hasanvand, H. (2025). Impact of Climate Change on Precipitation Extremes Indices over Iran. *Watershed Management Research*, 37(4), 34-53. doi: 10.22092/wmrj.2024.364521.1565 (In persian).
- Delghandi, M., Joorablou, S., & Ganji Nowroozi, Z. (2023). The Impact of Climate Change on Severity, Duration and Magnitude of Drought using SPI and RDI in Semnan Region. *Journal of Drought and Climate change Research*, 1(1), 1-18. doi: 10.22077/jdcr.2023.5909.1004 (In persian).

- Diego, Armando, Urrea, Méndez., Dina, Vanessa, Gomez, Rave., Manuel, del, Jesús. (2024). Exploring Multivariate Return Periods: Enhancing Accuracy in Hydrological Analysis for Flood Prediction . doi: 10.5194/egusphere-egu24-5685
- Doesken, N. J., & Garen, D. (1991, September). Drought monitoring in the Western United States using a surface water supply index. In *Proceedings of the 7th Conference on Applied Climatology, Salt Lake City, UT, USA* (pp. 10-13).
- Draper, N. R. (1998). *Applied regression analysis*. McGraw-Hill. Inc.
- Esit, M., & Yuce, M. I. (2023). Copula-based bivariate drought severity and duration frequency analysis considering spatial-temporal variability in the Ceyhan Basin, Turkey. *Theoretical and Applied Climatology*, 151(3), 1113-1131.
- Genest, C., & Favre, A. C. (2007). Everything you always wanted to know about copula modeling but were afraid to ask. *Journal of hydrologic engineering*, 12(4), 347-368.
- Ghaemi, A.R., Hashemi Monfared, S. A., Bahrpeyma, A., Mahmoudi, P., & Zounemat-Kermani, M. (2022). Spatiotemporal variation of projected drought characteristics of Iran under the climate change scenarios. *Journal of Meteorology and Atmospheric Science*, 5(1), 68-80. doi: 10.22034/jmas.2023.390166.1199 (In persian).
- Ghorbani H, vali A A, zarepour H. (2019). Analysis of the Climatological Drought Trend Variations Using Mann-Kendall, Sen and Pettitt Tests in Isfahan Province. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 6(2), 129-146 (In persian).
- Goodarzi, M., Hosseini, A., & Mesgari, E. (2016). *Weather and Meteorological Models*. Zanjan, Azar kelk press (In persian).
- Haile, G. G., Tang, Q., Hosseini-Moghari, S. M., Liu, X., Gebremicael, T. G., Leng, G., ... & Yun, X. (2020). Projected impacts of climate change on drought patterns over East Africa. *Earth's Future*, 8(7), e2020EF001502.
- Hamed, K. H., & Rao, A. R. (1998). A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of hydrology*, 204(1-4), 182-196.
- Hashmi, M. Z., Shamseldin, A. Y., & Melville, B. W. (2011). Comparison of SDSM and LARS-WG for simulation and downscaling of extreme precipitation events in a watershed. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 25, 475-484.
- Hassan, Z., Shamsudin, S., & Harun, S. (2014). Application of SDSM and LARS-WG for simulating and downscaling of rainfall and temperature. *Theoretical and applied climatology*, 116, 243-257.
- Hayes, M. J., Svoboda, M. D., Wardlow, B. D., Anderson, M. C., & Kogan, F. (2012). Drought monitoring: Historical and current perspectives.
- Jahangir, M. H. & Rouzbahani, F. (2024). Simulation of Climatic Parameters using Statistical Microscale Models of SDSM and LARS in West Azerbaijan Province. *Journal of Ecohydrology*, 11(3), 374-394. doi: 10.22059/ije.2024.373803.1805 (In persian).
- Jahangiri, E., Motamedvaziri, B., & Kiadaliri, H. (2024) Investigating the Impact of Climate Change on Drought with SPI and SPEI Indices (Case Study of Karun 3 Watershed). *Iran-Watershed Management Science & Engineering*, 18(65), 85-97 (In persian).
- Joe, H. (1997). *Multivariate models and multivariate dependence concepts*. CRC press.
- Kenawy, A. E., Al-Awadhi, T., Abdullah, M., Ostermann, F. O., & Abulibdeh, A. (2025). A Multidecadal Assessment of Drought Intensification in the Middle East and North Africa: The Role of Global Warming and Rainfall Deficit. *Earth Systems and Environment*, 1-20.
- Kendall, M. G. (1948). *Rank correlation methods*.
- Koohi, S., & Ramezani Etedali, H. (2023). Future meteorological drought conditions in southwestern Iran based on the NEX-GDDP climate dataset. *Journal of Arid Land*, 15(4), 377-392.
- Kousari, M., Ekhtesasi, M., & Malekinezhad, H. (2017). Investigation of long term drought trend in semi-arid, arid and hyper-arid regions of the world. *Desert Management*, 4(8), 36-53.
- Labudová, L., Ivaňáková, G., Faško, P., Kajaba, P., & Labuda, M. (2024). Changes in drought occurrence and intensity in the context of climate change in Slovakia. *Theoretical and Applied Climatology*, 1-14.

- Lelieveld, J., Hadjinicolaou, P., Kostopoulou, E., Chenoweth, J., El Maayar, M., Giannakopoulos, C., ... & Xoplaki, E. (2012). Climate change and impacts in the Eastern Mediterranean and the Middle East. *Climatic change*, 114, 667-687.
- Lotfi, M., Kamali, G. A., Meshkatee, A. H., & Varshavian, V. (2022). Performance analysis of LARS-WG and SDSM downscaling models in simulating temperature and precipitation changes in the West of Iran. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8(4), 4649-4659.
- Lotfinasabasl, S., Dargahian, F., Gohardoost, A., Hatam Baharvand, A., & Razavizadeh, S. (2023). Analysis of drought status and its relationship with climate change, Case study: Sarableh oak decline sites, Ilam province. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 30(2), 335-354. doi: 10.22092/ijrdr.2023.129905 (In persian).
- Lotfirad, M., Esmaeili-Gisavandani, H., & Adib, A. (2022). Drought monitoring and prediction using SPI, SPEI, and random forest model in various climates of Iran. *Journal of Water and Climate Change*, 13(2), 383-406.
- Ma, L., Huang, Q., Huang, S., Liu, D., Leng, G., Wang, L., & Li, P. (2022). Propagation dynamics and causes of hydrological drought in response to meteorological drought at seasonal timescales. *Hydrology Research*, 53(1), 193-205.
- Madani, K. (2014). Water management in Iran: what is causing the looming crisis?. *Journal of environmental studies and sciences*, 4, 315-328.
- Mann, H., 1945. *Non-Parametric Tests against Trend*. *Econometrica*, 13, 245-259.
- Massey Jr, F. J. (1951). The Kolmogorov-Smirnov test for goodness of fit. *Journal of the American statistical Association*, 46(253), 68-78.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993, January). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology* (Vol. 17, No. 22, pp. 179-183).
- Mesbahzadeh, T., Mirakbari, M., Mohseni Saravi, M., Soleimani Sardoo, F., & Miglietta, M. M. (2020). Meteorological drought analysis using copula theory and drought indicators under climate change scenarios (RCP). *Meteorological Applications*, 27(1), e1856.
- Mirabbasi, R., Fakheri-Fard, A., & Dinpashoh, Y. (2012). Bivariate drought frequency analysis using the copula method. *Theoretical and applied climatology*, 108, 191-206.
- Mirdar Soltani, S. (2023). *Modeling analysis of 21st century climate change projections and their impacts on the hydrology of the Karaj-Jajrood basin, Iran* (Doctoral dissertation).
- Mishra, A. K. & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of hydrology*, 391(1-2), 202-216.
- Modarres, R. & Sarhadi, A. (2009). Rainfall trends analysis of Iran in the last half of the twentieth century. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D3).
- Mohammed, Z. M. & Hassan, W. H. (2022). Climate change and the projection of future temperature and precipitation in southern Iraq using a LARS-WG model. *Modeling Earth Systems and Environment*, 8(3), 4205-4218.
- Mozaffari, E., Moradi, N., & Bazrafshan, O. (2021). Spatio-Temporal Variability of Characteristics of Meteorological Drought in Iran under Climate Change Scenarios. *Desert Management*, 8(16), 153-163. doi: 10.22034/jdmal.2021.243146 (In persian).
- Nelsen, R. B. (2006). *An introduction to copulas*. Springer.
- O'Neill, B. C., Tebaldi, C., Van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., ... & Sanderson, B. M. (2016). The scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(9), 3461-3482.
- Patel, R. & Patel, A. (2024). Evaluating the impact of climate change on drought risk in semi-arid region using GIS technique. *Results in Engineering*, 21, 101957.
- Pourhaghverdi, F., Bazrafshan, O., Gholami, H., Shekari, M., & Zamani, H. (2023). Application of copula function in multivariate analysis of stream flow drought index (case study: Minab Esteghlal Dam Basin). *Journal of Arid Biome*, 13(1), 97-110. doi: 10.29252/aridbiom.2023.20698.1962 (In persian).

- Prudhomme, C., Giuntoli, I., Robinson, E. L., Clark, D. B., Arnell, N. W., Dankers, R., ... & Wisser, D. (2014). Hydrological droughts in the 21st century, hotspots and uncertainties from a global multimodel ensemble experiment. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(9), 3262-3267.
- Rastegaripour, F., Tavassoli, A., Babaeian, M., Fernández-Gálvez, J., & Caballero-Calvo, A. (2024). Assessing the impacts of climate change on water resource management and crop patterns in Eastern Iran. *Agricultural Water Management*, 295, 108774.
- Riahi, K., Van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., ... & Tavoni, M. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global environmental change*, 42, 153-168.
- Rostami, F. & Moridi, A. (2025). Investigating the impact of climate change on drought intensity, duration, and recurrence period in the Ardabil study area. *Water and Irrigation Management*, 14(4), 877-895 (In persian).
- Salas, J. D. & Obeysekera, J. (2014). Revisiting the concepts of return period and risk for nonstationary hydrologic extreme events. *Journal of hydrologic engineering*, 19(3), 554-568.
- Salvadori, G. & De Michele, C. (2004). Frequency analysis via copulas: Theoretical aspects and applications to hydrological events. *Water resources research*, 40(12).
- Salvadori, G. & De Michele, C. (2007). On the use of copulas in hydrology: theory and practice. *Journal of Hydrologic Engineering*, 12(4), 369-380.
- Samantaray, A. K., Ramadas, M., & Panda, R. K. (2021). Assessment of impacts of potential climate change on meteorological drought characteristics at regional scales. *International Journal of Climatology*, 41, E319-E341.
- Schwarz, G. (1978). Estimating the dimension of a model. *The annals of statistics*, 461-464.
- Semenov, M. A., Barrow, E. M., & Lars-Wg, A. (2002). A stochastic weather generator for use in climate impact studies. *User Man Herts UK*, 1-27.
- Shayeghi, A., Ziveh, A. R., Bakhtar, A., Teymoori, J., Hanel, M., Godoy, M. R. V., ... & AghaKouchak, A. (2024). Assessing drought impacts on groundwater and agriculture in Iran using high-resolution precipitation and evapotranspiration products. *Journal of Hydrology*, 631, 130828.
- Sheffield, J. & Wood, E. F. (2008). Projected changes in drought occurrence under future global warming from multi-model, multi-scenario, IPCC AR4 simulations. *Climate dynamics*, 31, 79-105.
- Shiau, J. T. (2003). Return period of bivariate distributed extreme hydrological events. *Stochastic environmental research and risk assessment*, 17, 42-57.
- Shiau, J. T. (2006). Fitting drought duration and severity with two-dimensional copulas. *Water resources management*, 20, 795-815.
- Snedecor, G. W. & Cochran, W. G. (1989). Statistical methods, 8thEdn. Ames: Iowa State Univ. Press Iowa, 54, 71-82.
- Song, S. & Singh, V. P. (2010). Frequency analysis of droughts using the Plackett copula and parameter estimation by genetic algorithm. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 24, 783-805.
- Suo, N., Xu, C., Cao, L., Song, L., & Lei, X. (2024). A copula-based parametric composite drought index for drought monitoring and applicability in arid Central Asia. *Catena*, 235, 107624.
- Teimouri, M., Asadi Nalivan, O., & Elahi, S. (2023). The Probabilistic Analysis of Drought Severity-Duration in North Khorasan Province using Copula Functions. *Watershed Management Research*, 36(2), 36-52. doi: 10.22092/wmrj.2022.359052.1479 (In persian).
- Trenberth, K. E., Dai, A., Van Der Schrier, G., Jones, P. D., Barichivich, J., Briffa, K. R., & Sheffield, J. (2014). Global warming and changes in drought. *Nature Climate Change*, 4(1), 17-22.
- Turgay P., & Ercan K. 2005. Trend Analysis in Turkish Precipitation data. Hydrological processes published online in Wiley Inter-science. 20:2011-2026.
- Vali, A. & Roustaei, F. (2022). A time series analysis of drought for the last five decades in Central Iran. *Desert Ecosystem Engineering*, 5(11), 79-92 (In persian).

- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of climate*, 23(7), 1696-1718.
- Wilks, D. S. (2011). *Statistical methods in the atmospheric sciences*. Academic press.
- Wu, C., Yeh, P. J. F., Chen, Y. Y., Lv, W., Hu, B. X., & Huang, G. (2021). Copula-based risk evaluation of global meteorological drought in the 21st century based on CMIP5 multi-model ensemble projections. *Journal of Hydrology*, 598, 126265.
- Yao, N., Li, L., Feng, P., Feng, H., Li Liu, D., Liu, Y., ... & Li, Y. (2020). Projections of drought characteristics in China based on a standardized precipitation and evapotranspiration index and multiple GCMs. *Science of the Total Environment*, 704, 135245.
- Yousefi, H., Ahani, A., Moridi, A., & Razavi, S. (2024). The future of droughts in Iran according to CMIP6 projections. *Hydrological Sciences Journal*, 69(7), 951-970.
- Yue, S., Pilon, P., Phinney, B., & Cavadias, G. (2002). The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. *Hydrological processes*, 16(9), 1807-1829.
- Zarch, M. A. A., Sivakumar, B., & Sharma, A. (2015). Droughts in a warming climate: A global assessment of Standardized precipitation index (SPI) and Reconnaissance drought index (RDI). *Journal of hydrology*, 526, 183-195.