Shahid Chamran University of Ahvaz

Irrigation Sciences and Engineering (JISE)
Vol. 49, No. 1, Spring 2026, p. 59-84

Journal homepage: https://jise.scu.ac.ir

Research Paper

EXTENDED ABSTRACT

Joint Frequency Analysis of Meteorological Drought Duration and Severity Based on ERA5-Land Reanalysis Database

A. Mianabadi[1*], M. Nazeri Tahroudi[2] and M. Pourreza-Bilondi[3]

1- Corresponding Author, Department of Ecology, Institute of Science and High Technology and Environmental Sciences, Graduate University of Advanced Technology, Kerman, Iran. (a.mianabadi@kgut.ac.ir).*
2- Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Lorestan University, Khorramabad. Iran.
3- Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, University of Birjand, Birjand. Iran.

ARTICLE INFO

Artlcle history:
Received: 26 December 2024
Revised: 21 pril 2025
Accepted: 12 May 2025
Available online: 05 May 2026

Keywords:
Copula Function, Drought Duration, Drought Severity, Marginal Distribution, Reanalysis, SPI.

TO CITE THIS ARTICLE:

Mianabadi, A., Nazeri Tahroudi, M., Pourreza-Bilondi, M. 2026. 'Joint Frequency Analysis of Meteorological Drought Duration and Severity Based on ERA5-Land Reanalysis Database', *Irrigation Sciences and Engineering*, 49(1), pp. 59-84. doi: 10.22055/jise.2025.48618.2150.

Abstract

Drought is a natural phenomenon that occurs when precipitation is below normal levels over period of time and is characterized by duration, severity, intensity, and frequency. Due to climate change, these characteristics have changed, necessitating updated monitoring methods. Drought characteristics were often examined separately through univariate - analyses; however, drought is an interrelated, multivariate phenomenon whose attributes are dependent on one another. Therefore, recent studies have recommended joint analysis of drought characteristics using multivariate probability functions. This study used copula functions to analyze drought duration and severity jointly. Daily precipitation data from Bandar Anzali (wet, 1755 mm average annual rainfall) and Kerman (dry, 131 mm average annual rainfall) were analyzed from 1959 to 2020 using ERA5-Land reanalysis. The Standardized Precipitation Index (SPI) was calculated for six time scales (1, 3, 6, 9, 12, and 24 months). After fitting marginal distribution functions to the variables and confirming the correlation between drought duration and severity, the best copula functions were selected for each timescale. The results showed that in the "AND" condition (D≥d AND S≥s), the probability of similar droughts was higher in Kerman than in Bandar Anzali, while in the "OR" condition (D≥d OR S≥s), the probability of droughts with either high duration or severity was greater in Bandar Anzali. Furthermore, estimating return periods by considering both duration and severity jointly provided a more accurate assessment of drought events. The resulting curves, which demonstrate the relationship between drought duration, severity, and return period, can serve as standard references for the Bandar Anzali and Kerman stations across various time scales. These curves remain applicable as long as the statistical distribution of drought duration and severity does not change. They provide a practical tool for monitoring drought across different time windows and devising more effective strategies for water resources management and mitigating drought impacts.

Introduction

Drought is characterized by prolonged periods of below-normal precipitation, leading to water shortages affecting ecosystems, agriculture, and human activities. Key attributes used to describe drought include duration, severity, intensity, and frequency. The importance of these characteristics in the design of water supply systems cannot be overstated. In recent years, changes attributed to climate change have been observed in these characteristics, highlighting the need for improved methods of monitoring drought. Given their random nature, studies on drought characteristics are frequently conducted using probabilistic theories. While many previous studies have focused on examining drought characteristics separately through univariate analyses. It has been established that drought is a multivariate phenomenon. Characteristics such as duration and severity are interdependent; therefore, accurate monitoring cannot be achieved using univariate functions alone. As a result, recent research has advocated for studying drought and its associated characteristics through multivariate probabilistic functions. Copula functions and joint probability distribution approaches allow researchers to analyze multiple related variables simultaneously (e.g., Drought duration vs. Drought severity) rather than independently treating them as separate time series data. Addressing the complexity of drought through multivariate approaches enables researchers and practitioners alike to develop robust monitoring frameworks essential for sustainable environmental management amid changing climatic conditions. In this study, copula functions and the ERA5-Land reanalysis dataset were utilized to conduct a comprehensive analysis of drought characteristics at two stations located in southern and northern Iran during the period from 1959 to 2020.

Materials and Methods

ERA5-Land data

The ERA5-Land reanalysis product is recognized as an enhanced version of the original ERA5 dataset, which was developed by the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). Various climate variables, including temperature, humidity, precipitation, and wind, are provided by both ERA5 and ERA5-Land products; however, a distinction in their spatial resolution exists (Muñoz-Sabater et al., 2021).

Standardized Precipitation Drought Index (SPI)

In this study, the Standardized Precipitation Index (SPI) was employed for monitoring drought conditions. A drought event is identified when the SPI value fallsbelow zero according to Run Theory (Yevjevich, 1967). Utilizing this theoretical framework with SPI enables calculations of both duration and severity related to drought events. The duration of a drought is defined as a continuous time period in months during which SPI values remain below zero. Additionally, the severity of a drought is characterized as the cumulative sum of SPI values throughout that period.

Marginal and copula functions

In this analysis, after calculating both duration and severity associated with drought conditions while examining correlations between these two variables using Kendall's tau statistic, 11 marginal distribution functions were fitted for each variable. Following the identification of optimal marginal functions, 7 copula functions were utilized at each station for comprehensive joint monitoring of drought events. Finally, calculations were conducted to determine joint probabilities of occurrence and joint return periods under two scenarios: "and" ($D \geq d$ and $S \geq s$) and "or" ($D \geq d$ or $S \geq s$).

Results and Discussion

ERA5-Land showed better performance in estimating monthly precipitation for Kerman compared to Bandar Anzali. However, overall accuracy was found to be good at both stations when considering the values of the evaluation criteria. It has been noted that alternating periods of drought and wet years have been experienced at the Bandar Anzali station, while longer and more severe drought periods

have occurred at the Kerman station, with the most intense drought recorded between 1960 and 1970. By evaluating marginal distributions, it was shown that among the examined distribution functions, a good fit for duration and severity of drought in various time windows was provided by generalized Pareto, Nakagami, GEV, Normal, log-logistic, and Weibull distributions. The correlation among the studied pair variables was confirmed; results from copula function analysis demonstrated that Galambos Copula offered the best fit at 1-, 6-, and 24-month scales; Frank copula showed optimal fitting at a 9-month scale; while Gumbel-Hoggard exhibited superior fitting at a 12-month scale. It was found that the joint probability of drought occurrence over a 24-month period with a duration of less than 8 months and severity below 8 is approximately 16% for Bandar Anzali and about 20% for Kerman. For both stations at a one-month scale, this joint probability is roughly estimated to be around 75%. Furthermore, drought severity can be estimated with varying probabilities for specific durations.

Conclusion

Based on the results and as indicated in earlier studies, it has been observed that the computational return period in the "and" scenario is greater than in the "or" scenario. This suggests that the likelihood of two events occurring simultaneously is significantly lower, resulting in longer return periods. Additionally, a general review of the presented graphs reveals that in the combined "AND" case ($D \geq d$ AND $S \geq s$), a higher probability of similar droughts occurring is found for Kerman compared to Bandar Anzali. Conversely, in the "OR" case ($D \geq d$ OR $S \geq s$), a greater probability of drought occurrences with any characteristics related to duration or severity is noted for Bandar Anzali. It has been determined that estimating return periods by considering both drought duration and severity together can provide more useful and precise outcomes for comprehensive analyses of drought events. In fact, the curves produced to illustrate relationships between duration, severity, and return period (probability of occurrence) for droughts can be utilized as standard curves for both Bandar Anzali and Kerman stations across various time scales. These curves remain effective as long as there are no changes in the statistical distributions of drought duration and severity values at these stations; therefore, they can enhance monitoring efforts regarding an essential component of water resources—precipitation—more accurately over different time intervals while offering more effective solutions to mitigate drought impacts.

Conflict of Interest

The authors declared no potential conflicts of interest concerning the research, authorship, and publication of this article. Confirmation.

Funding

The authors received no financial support for the research, authorship, and publication of this article.

Data Availability Statements

Data Availability Statement: All information and results are presented in the text of the article.

Authors' contribution

First Author: Ameneh Mianabadi, Proposing the idea, Data analysis, Writing original draft.
Second Author: Mohammad Nazeri Tahroudi, Code programing, Investigation, Review and editing.
Third Author: Mohsen Porreza-Bilondi, Investigation, Review and editing.

Acknowledgment

This research has no acknowledgments.

References

1- Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., Boussetta, S., Choulga, M., Harrigan, S., Hersbach, H. and Martens, B., 2021. ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth system science data*, *13*(9), pp.4349-4383. doi: 10.5194/essd-13-4349-2021.

2- Yevjevich, V., 1967. An objective approach to defnitions and investigations of continental hydrologic droughts. *Hydrology Papers*, 23, 1–18.

© 2026 The Author(s). Published by Shahid Chamran University of Ahvaz. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

علوم و مهندسی آبیاری جلد ٤٩، شماره‌ی۱، بهار ١٤٠٥، مقاله پژوهشی، ص. ٨٤-٥٩

تحلیل فراوانی توأم مدت و سختی خشکسالی هواشناسی مبتنی بر داده‌های بازتحلیل حاصل از پایگاه ERA5-Land

آمنه میان‌آبادی[1*]، محمد ناظری تهرودی[2] و محسن پوررضا بیلندی[3]

۱*- نویسنده مسئول، گروه اکولوژی، پژوهشکده علوم محیطی، پژوهشگاه علوم و تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران، (a.mianabadi@kgut.ac.ir)

۲- گروه علوم و مهندسی آب، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران.

۳- گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران.

دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۰۶ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۰۱ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۲۲ انتشار: ۱۴۰۵/۰۲/۱۵

چکیده

خشکسالی یکی از پدیده‌های طبیعی است که در صورت کاهش بارش نسبت به مقدار نرمال طی یک بازه زمانی رخ می‌دهد و با مشخصه‌هایی مانند مدت، سختی، شدت و فراوانی شناخته می‌شود. تغییرات اقلیمی اخیر موجب تغییر این مشخصه‌ها شده و ضرورت به‌روزرسانی روش‌های پایش خشکسالی را دوچندان کرده است. با توجه به ماهیت درهم‌تنیده خشکسالی، تحلیل مشخصه‌های آن به‌صورت چندمتغیره و توأم، با استفاده از توابع مفصل، در مطالعه‌های اخیر توصیه می‌شود. در گذشته، تحلیل خشکسالی بیشتر با داده‌های ایستگاهی انجام می‌شد، اما در مناطق فاقد ایستگاه این امکان وجود ندارد. در این مطالعه، از داده‌های بارش بازتحلیل ERA5-Landبرای محاسبه شاخص SPI و بررسی توأم مدت و سختی خشکسالی در شش مقیاس زمانی یک تا ۱۲ ماهه استفاده شد. دقت این داده‌ها با اطلاعات بارش روزانه ایستگاه‌های بندرانزلی (ایستگاه مرطوب) و کرمان (ایستگاه خشک) طی سال‌های ۱۹۵۹ تا ۲۰۲۰ ارزیابی گردید. پس از برازش توابع توزیع حاشیه‌ای و تأیید همبستگی بین مدت و سختی خشکسالی، بهترین تابع مفصل برای هر مقیاس زمانی انتخاب شد .نتایج نشان داد که در حالت "و(D≥d and S≥s) "، احتمال وقوع خشکسالی‌های مشابه در کرمان بیشتر از بندرانزلی است، در حالی که در حالت "یا(D≥d or S≥s) "، احتمال وقوع خشکسالی با هر یک از مشخصه‌های مدت یا سختی بالا در بندرانزلی بیشتر است .همچنین، تخمین دوره بازگشت با در نظر گرفتن هر دو متغیر مدت و سختی به‌صورت توأم، تحلیل دقیق‌تری از وقایع خشکسالی ارائه می‌دهد. منحنی‌های به‌دست‌آمده می‌توانند به‌عنوان الگوی قابل استفاده در مقیاس‌های زمانی مختلف برای پایش خشکسالی و کمک به تصمیم‌گیری در مدیریت منابع آب تا زمانی که توزیع آماری مقادیر مدت و سختی خشکسالی تغییر نکند، به کار گرفته شوند. همچنین، عملکرد مطلوب ERA5-Land در تخمین بارش، کارایی آن را برای تحلیل خشکسالی در مناطق فاقد داده‌های ایستگاهی نشان می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: بازتحلیل، تابع مفصل، توزیع حاشیه‌ای، سختی خشکسالی، مدت خشکسالی، SPI.

مقدمه

خشکسالی پدیده‌ای طبیعی است که هنگامی که بارش در منطقه‌ای از مقدار نرمال منطقه در یک دوره زمانی کمتر باشد، اتفاق می‌افتد. وقوع خشکسالی می‌تواند اثرات زیادی بر اکوسیستم، کشاورزی، منابع آب داشته و چالش‌های اجتماعی–اقتصادی قابل ملاحظه‌ای را به دنبال داشته باشد (Dai, 2011; Wilhite, 2000). خشکسالی با مشخصه‌هایی همچون مدت (Duration)، سختی (Severity)، شدت (Intensity) و فراوانی (Frequency) خشکسالی مشخص می‌شود. این مشخصه‌ها اهمیت زیادی در طراحی سیستم‌های تأمین آب دارند (Shiau, 2006). در سال‌های اخیر به‌دلیل وقوع تغییرات اقلیمی، این مشخصه‌ها تغییر یافته و بنابراین نیاز برای بهبود روش‌های پایش خشکسالی احساس می‌شود (IPCC, 2021; Trenberth et al., 2014). مشخصه‌های خشکسالی به‌دلیل تصادفی بودن اغلب با استفاده از نظریه‌های احتمالاتی مورد بررسی قرار می‌گیرند (Shiau, 2006). اگرچه اغلب مطالعه‌های گذشته مشخصه‌های خشکسالی را به‌صورت تک متغیره و جداگانه بررسی نموده‌اند، اما پدیده‌های درهم‌تنیده‌ای چون خشکسالی، رخدادهای چند متغیره هستند که مشخصه‌های آن‌ها از جمله مدت و سختی به همدیگر وابسته می‌باشند و پایش آن‌ها با استفاده از توابع تک متغیره نمی‌تواند با دقت مناسبی همراه باشد (Mishra and Singh, 2011). بنابراین مطالعه‌های اخیر پیشنهاد کرده‌اند که بررسی خشکسالی و مشخصه‌های آن با استفاده از توابع احتمالی چندمتغیره از دقت بیشتری برخوردار است (Shiau, 2006; Tosunoğlu and Onof, 2017).

DOI: 10.22055/jise.2025.48618.2150

بر این اساس برخی از محققان مانند González و Valdés (2003) و Nadarajah (2006) از توابع توزیع دو متغیره برای پایش توأم متغیرهای هیدرومتئورولوژی از جمله خشکسالی استفاده می‌کردند که علی‌رغم سادگی، دارای محدودیت‌هایی می‌باشند، از جمله اینکه تابع توزیع حاشیه‌ای هر متغیر باید از یک خانواده باشد (Frees and Valdez, 1998). به‌عنوان مثال، اگر مدت خشکسالی دارای تابع توزیع گاما و سختی خشکسالی دارای تابع توزیع گامبل باشد، امکان استفاده از توابع توزیع دومتغیره وجود ندارد. برای رفع این محدودیت توابع توزیع چندمتغیره با استفاده از توابع مفصل مورد توجه محققین قرار گرفت. توابع مفصل توابعی هستند که تابع توزیع تجمعی چندین تابع توزیع یک متغیره را ترکیب نموده و تابع توزیع چند متغیره تولید می‌کنند (Grimaldi et al., 2016; Shiau, 2006). مزیت اصلی توابع مفصل این است که این توابع قادر به مدل‌سازی وابستگی بین چند متغیر تصادفی بدون درنظر گرفتن توابع توزیع حاشیه‌ای آن‌ها می‌باشند. لازم به ذکر است که تابع توزیع حاشیه‌ای هر متغیر، بهترین تابع توزیع برازش داده شده به آن متغیر بدون درنظر گرفتن توزیع سایر متغیرها می‌باشد.

با درنظر گرفتن متغیرهای تصادفی پیوسته $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ با توابع توزیع حاشیه‌ای $F_1(x_1)$، $F_2(x_2)$، ...، $F_n(x_n)$، با استفاده از توابع مفصل می‌توان تابع توزیع احتمال توأم این متغیرها $(F(x_1, x_2, \dots, x_n))$ را با رابطه زیر به‌دست آورد:

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) = C[F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_n(x_n)] \quad (۱)$$

مطالعه‌های گذشته نشان داده‌اند که توابع مفصل بهتر از سایر روش‌ها از جمله روش‌های یادگیری ماشین یا روش‌های ترکیبی وزنی برای پایش توأم خشکسالی عمل می‌کند (Mishra and Singh, 2011; Wang et al., 2020).

توابع مفصل در مطالعه‌های مختلفی برای مدل‌سازی چند متغیره خشکسالی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به‌عنوان مثال، Shiau (2006) از توابع مفصلی دو بعدی برای تحلیل توأم مدت و سختی خشکسالی در ایستگاه بارانسنجی Wushantou در تایوان استفاده نموده و بر اساس آن دوره بازگشت وقایع خشکسالی با مدت و سختی‌های مختلف را به‌دست آورد. توابع مفصل برای تحلیل مدت–سختی خشکسالی در سال‌های ۱۹۵۴–۲۰۰۳ در دو ایستگاه بندرانزلی و آبادان در ایران توسط Shiau و Modarres (2009) استفاده شد. بر اساس نتایج ایشان، به‌دلیل نوسانات زیاد بارش در بندرانزلی، سختی خشکسالی‌ها در این ایستگاه بیشتر از ایستگاه آبادان بوده است. در مطالعه دیگری که در ایران توسط Behzadi et al. (2024) انجام شد، از توابع مفصل برای بررسی اثرات دوره برگشت تغییر اقلیم بر مدت–سختی وقایع خشکسالی استفاده شد. بر اساس نتایج آن‌ها وقایع خشکسالی در اقلیم آینده ایران مدت و سختی بیشتری خواهد داشت و احتمال وقوع آن‌ها افزایش خواهد یافت.

علاوه بر مطالعه‌های ذکر شده، محققان دیگری به مدل‌سازی چند متغیره وقایع خشکسالی و تحلیل توأم مدت، سختی و دوره بازگشت این وقایع با استفاده از توابع مفصل پرداختند که از آن میان می‌توان به مطالعه‌های Liu et al. (2011)، Ganguli و Reddy (2012)، Zhang et al. (2013)، Abdul Rauf و Zeephongsekul (2014)، Liu et al., (2016)، Tosunoglu و Can (2016)، Tosunoglu و Kisi (2016)، Tosunoğlu و Onof (2017)، Chen و Guo (2019)، EskandariPour و Soltaninia (2022)، Páscoa et al. (2024) Meimandi et al. (2024) و Ahmad et al. (2024) اشاره نمود. مطالعه‌های فوق نشان می‌دهد که کاربرد مفصل در تحلیل و مدل‌سازی خشکسالی در سال‌های اخیر گسترش یافته و نتایج خوبی در شرایط اقلیمی و هیدرولوژیکی مختلف به همراه داشته است.

لازم به ذکر است که اغلب مطالعه‌های صورت گرفته در زمینه تحلیل خشکسالی با استفاده از توابع مفصل بر اساس داده‌های اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌ها بوده است. اما به‌دلیل پراکنش نامناسب ایستگاه‌های باران‌سنجی در برخی از مناطق دنیا و یا تعداد کم سال‌های آماری در برخی از ایستگاه‌ها، امکان استفاده از این روش در چنین شرایطی وجود ندارد. استفاده از پایگاه‌های داده‌ای جهانی که شبکه‌بندی مناسبی از متغیرهای اقلیمی از جمله بارش و دما را فراهم می‌کنند، می‌تواند در این زمینه مورد توجه قرار گیرد. برخی از این محصولات از جمله محصولات بازتحلیلی ERA5 و ERA5-Land Hersbach et al (2020) Muñoz-Sabater et al (2021) دارای داده‌های طولانی‌مدت بارش می‌باشند که امکان استفاده از آن‌ها را در مطالعه‌های اقلیمی فراهم می‌کنند. نتایج ارزیابی این محصولات در مناطق مختلف و برای کاربردهای مختلف نشان داده است که این دو محصول دقت مناسبی در تخمین متغیرهای اقلیمی داشته و می‌توان از آن‌ها برای مدل‌سازی در مناطق فاقد داده استفاده نمود (Aschale et al., 2024; Guo et al., 2024; Kavyani Malayeri et al., 2021; Tan et al., 2023; Xu et al., 2024; Yilmaz, 2023). با توجه به توان تفکیک بهتر ERA5-Land نسبت به ERA5 و همچنین اینکه تمرکز آن بر روی پارامترهای سطح زمین می باشد تا لایه‌های ارتفاعی بالاتر و نظر به اینکه در مطالعه‌های معدودی از این محصول تاکنون در ایران استفاده شده است (Gholami et al., 2024; Kazemiazar et al., 2025). در این مطالعه عملکرد محصول ERA5-Land برای مدل‌سازی خشکسالی مورد ارزیابی قرار گرفت.

بر این اساس و با توجه به اهمیت مدل‌سازی خشکسالی و تعیین احتمال وقوع و دوره بازگشت رخدادهای خشکسالی با مدت و سختی‌های مختلف به‌ویژه در زمینه مدیریت خشکسالی،

برنامه‌ریزی منابع آب و طراحی سیستم‌های مربوطه، هدف این مطالعه تحلیل توأم مدت و سختی خشکسالی و تعیین احتمال وقوع و دوره بازگشت توأم بر اساس توابع مفصل در دو ایستگاه بندرانزلی و کرمان به‌عنوان دو ایستگاه شاخص با اقلیم های مرطوب و خشک در ایران و با استفاده از محصول بازتحلیل ERA5-Land می‌باشد.

مواد و روش‌ها

داده‌های ایستگاهی

برای پایش توأم مشخصه‌های خشکسالی از داده‌های دو ایستگاه بندرانزلی و کرمان استفاده شد (شکل ۱). ایستگاه بندرانزلی با بارش متوسط سالانه ۱۷۵۵ میلی‌متر مرطوب‌ترین ایستگاه و کرمان با بارش متوسط سالانه ۱۳۱ میلی‌متر یکی از ایستگاه‌های خشک ایران است (Mianabadi, 2023). داده‌های بارش مشاهداتی برای این دو ایستگاه از سال ۱۹۵۹ تا ۲۰۲۰ و در مقیاس روزانه موجود است که برای مطالعه خشکسالی، داده‌های روزانه به داده‌های ماهانه تبدیل شده و مورد استفاده قرار گرفت.

داده‌های ERA5-Land

محصول بازتحلیل ERA5-Land نسخه بهبود یافته ERA5 است که توسط مرکز پیش‌بینی‌های هواشناسی میان‌مدت اروپا (ECMWF) ارائه شده است. هر دو محصول ERA5 و ERA5-Land داده‌های مختلف اقلیمی از جمله دما، رطوبت، بارش و باد را فراهم می‌کنند، اما توان تفکیک مکانی آن‌ها متفاوت است. توان تفکیک ERA5-Land نه کیلومتر (۰/۱× ۰/۱ درجه) است که در مقایسه با توان تفکیک ۳۱ کیلومتری ERA5 (۰/۲۵× ۰/۲۵ درجه) جزئیات بیشتری از داده‌های سطح زمین را فراهم می‌کند (Muñoz-Sabater et al., 2021). همچنین در این محصول بر مؤلفه‌های زمینی تمرکز بیشتری شده است و بنابراین برای مطالعه‌های هیدرولوژیکی مناسب‌تر است. داده‌های ERA5-Land از سال ۱۹۵۰ به‌صورت ساعتی در دسترس کاربران قرار دارد. این داده‌ها را می‌توان از سایت کوپرنیکوس (https://www.copernicus.eu/en/access-data) تهیه کرد، اما در این مطالعه با کدنویسی در محیط GOOGLE COLAB و با بهره‌گیری از قابلیت‌های کدنویسی هم‌زمان پایتون و جاوا اسکریپ، داده‌های بارش روزانه از طریق سامانه Google Earth Engine فراخوانی و پس از تبدیل به مقادیر ماهانه مقادیر شاخص SPI و مشخصه‌های شدت و مدت خشکسالی در پنجره‌های زمانی مختلف استخراج شده و سپس به‌منظور تحلیل فراوانی توأم آن‌ها از توابع مفصل استفاده گردید (شکل ۲).

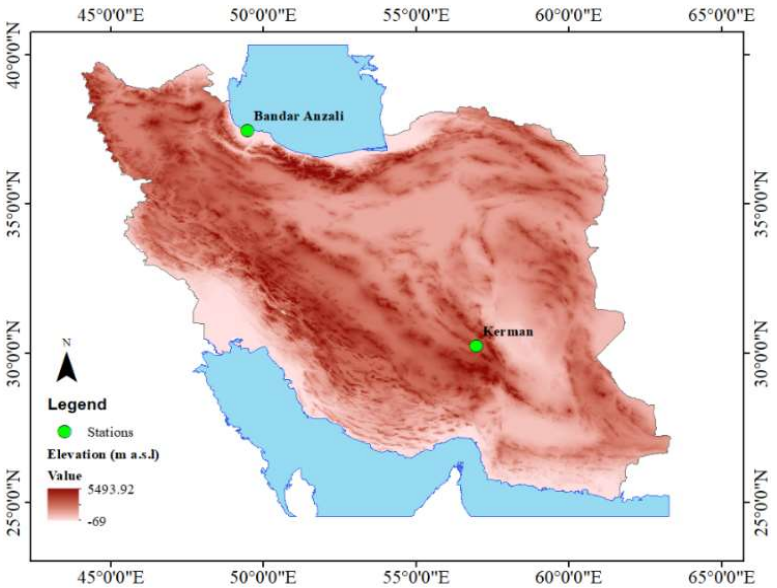


Fig. 1- Location of the two studied stations in Iran

شکل ۱- موقعیت دو ایستگاه مورد مطالعه

 DOI: 10.22055/jise.2025.48618.2150

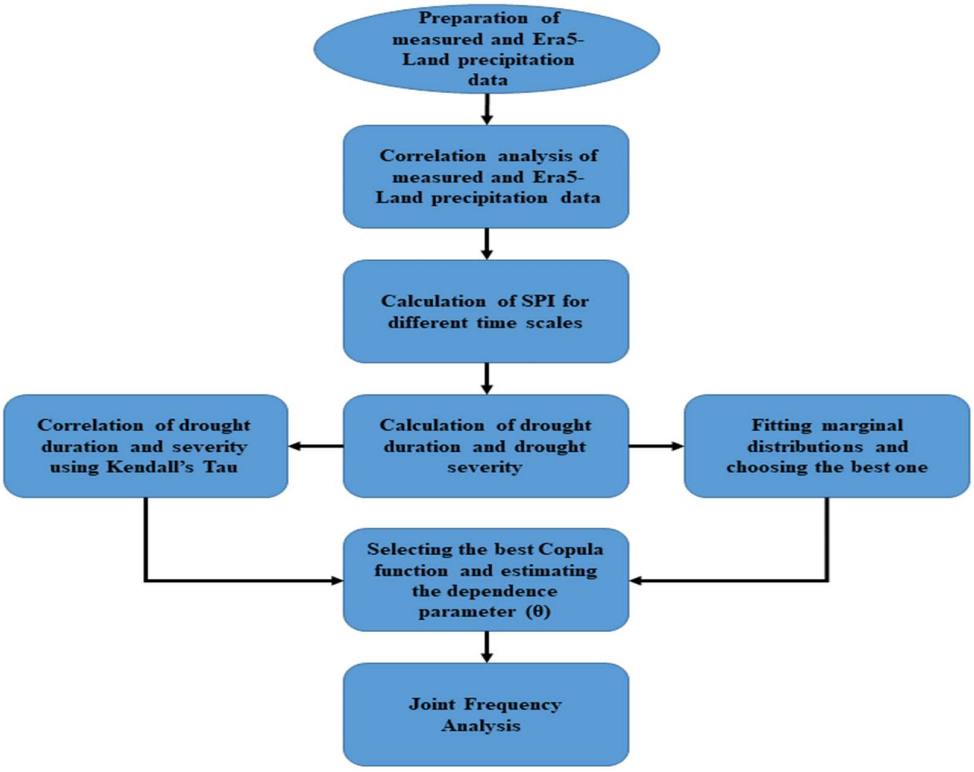


Fig. 2- Flowchart of the methodology
شکل ۲- فلوچارت مراحل انجام کار

شاخص خشکسالی بارش استاندارد شده (SPI)

در این مطالعه برای پایش خشکسالی از شاخص بارش استاندارد شده (SPI) استفاده شد. این شاخص که توسط McKee et al. (1993) ارائه شده است، برمبنای داده‌های ماهانه بارش به دست می‌آید. شاخص SPI متغیر بارش را به‌عنوان عامل اصلی مؤثر بر مدت و شدت خشکسالی درنظر می‌گیرد (Ali et al., 2019). شاخص فوق احتمال وقوع کمبود یا مازاد بارش را برای منطقه موردنظر و برای پنجره‌های زمانی مختلف (۱ تا ۲۴ ماهه) و با برازش تابع توزیع گاما بر داده‌های بارش محاسبه می‌کند. این احتمال سپس به متغیر تصادفی نرمال Z تبدیل می‌شود تا از تابع توزیع نرمال استاندارد (با میانگین صفر و انحراف معیار ۱) تبعیت کند (Mckee et al., 1993). این مسئله امکان مقایسه شاخص در مکان‌ها و دوره‌های زمانی مختلف را فراهم می‌کند. در این مطالعه شاخص SPI در شش مقیاس زمانی ۱، ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۲۴ ماهه محاسبه شد.

مشخصه‌های خشکسالی

بر اساس تعریف و بر مبنای Run Theory، خشکسالی زمانی رخ می‌دهد که مقدار SPI کمتر از صفر باشد (Yevjevich, 1967). بر اساس این نظریه و با استفاده از SPI مدت و سختی خشکسالی را می‌توان محاسبه نمود. مدت خشکسالی دوره زمانی (تعداد ماه‌ها) پیوسته‌ای است که در آن دوره SPI کمتر از صفر باشد. سختی خشکسالی نیز به‌صورت مجموع مقادیر SPI در هر دوره تعریف می‌شود.

توابع حاشیه‌ای و مفصل

در این مطالعه پس از محاسبه مدت و سختی خشکسالی، ضمن بررسی همبستگی بین جفت متغیر مدت-سختی خشکسالی با استفاده از آماره تائو کندال، تعداد ۱۱ تابع توزیع حاشیه‌ای بر هریک از این متغیرها برازش داده شد. توابع توزیع مورد بررسی در این مطالعه برای مدت و سختی خشکسالی شامل توابع نرمال، لوگ نرمال، نمایی، گاما، GEV، لوجستیک، لوگ لوجستیک، رایلی (Rayleigh)، ناکاگامی (Nakagami)، پارتو تعمیم یافته (Generalized Pareto) و ویبول می‌باشد. پس از برازش توابع حاشیه‌ای، بهترین تابع برای هر متغیر بر اساس معیارهای آماری ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب کارایی نش-ساتکلیف (NSE) انتخاب شد. لازم به ذکر است که برای تخمین پارامتر θ از روش منطقی برای حاشیه‌ها (Inference Function for Margins (IFM)) استفاده شد (Joe, 1997).

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_{im} - x_{io})^2}{n}} \qquad (۱)$$

$$\mathrm{NSE} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_{io} - x_{im})^2}{\sum_{i=1}^{n}(x_{io} - \overline{x_o})^2} \quad (۲)$$

در روابط بالا، x_{io} احتمال تجربی، x_{im} احتمال تئوری، $\overline{x_o}$ مقدار متوسط احتمال تجربی و n تعداد نمونه می‌باشد. لازم به ذکر است که همبستگی بین جفت متغیر مورد مطالعه با استفاده از آماره تائو کندال (Kendall's Tau) انجام شد (Nash and Sutcliffe, 1970).

$$\tau = \binom{N}{2}^{-1} \sum_{i<j} \mathrm{sign}\left[(x_i - x_j)(y_i - y_j)\right] \quad (۳)$$

در رابطه فوق، N تعداد داده‌ها، sign() تابع علامت و x و y جفت داده‌های مشاهداتی برای مقادیر یاد شده می‌باشد. همان گونه که از رابطه آن مشخص است این معیار شباهت بین رتبه بندی دو متغیر را کمی می‌کند و در حقیقت معیاری برای تعیین قدرت و برای ارتباط بین دو متغیر در یک مقیاس ترتیبی می‌باشد.

پس از تعیین بهترین توابع حاشیه‌ای برای هر ایستگاه، تعداد هفت تابع مفصل برای پایش توأم خشکسالی در دو ایستگاه استفاده شد که مشخصات این توابع در جدول (۱) آمده است. در این روابط u و v توابع توزیع تجمعی توزیع‌های حاشیه‌ای و θ نیز پارامتر وابستگی تابع مفصل است که درجه ارتباط بین u و v را نشان می‌دهد (Shiau, 2006). انتخاب بهترین تابع مفصل برای توزیع توأم مدت و سختی خشکسالی نیز بر مبنای معیارهای آماری RMSE، NSE و معیار آکاییکه (AIC) صورت گرفت. استفاده از این معیارها در کنار هم می‌تواند دقت، میزان خطا و کارایی مدل را مورد بررسی قرار دهد. مدل برتر بر اساس کمترین معیار آکاییکه، کمترین مقدار RMSE و بیشترین مقدار NSE انتخاب می‌شود.

$$\mathrm{AIC} = 2k - 2\,ln(L) \quad (۴)$$

در این رابطه، k تعداد پارامترهای تخمین زده شده و L مقدار حداکثر درست‌نمایی می‌باشد که به شرح زیر برآورد می‌شود:

$$\mathrm{L}(\Theta) = \prod_{i=1}^{n} f(x_i;\theta) \quad (۵)$$

محاسبه دوره بازگشت

دوره بازگشت بر مبنای مدت و سختی خشکسالی و به طور جداگانه با روابط زیر محاسبه می‌شود (Shiau and Shen, 2001):

$$T_D = \frac{E(L)}{1 - F_D(d)}$$
$$T_S = \frac{E(L)}{1 - F_S(s)} \quad (۶)$$

در روابط بالا T_D و T_S دوره بازگشت تک متغیره بر مبنای مدت خشکسالی بزرگتر از d و سختی خشکسالی بزرگتر از s، L فاصله بین وقوع دو خشکسالی پیاپی، $E(L)$ میانگین فواصل L و $F_D(d)$ و $F_S(s)$ نیز احتمال وقوع مدت خشکسالی بزرگتر از d و سختی خشکسالی بزرگتر از s می‌باشد.

اما با توجه به آنچه ذکر شد، خشکسالی یک پدیده چندمتغیره است که با مدت و سختی خشکسالی مشخص می‌شود و بنابراین محاسبه دوره بازگشت توأم با درنظر گرفتن هر دو مشخصه مدت و سختی می‌تواند باعث پایش بهتر خشکسالی شود (Tosunoğlu and Onof, 2017). بنابراین دوره بازگشت توأم خشکسالی را می‌توان در دو حالت "و" ($S \geq s$ and $D \geq d$) و "یا" ($D \geq$ $S \geq s$ or d) محاسبه نمود (Shiau, 2006).

$$T_{DS} = \frac{E(L)}{P(D \geq d, S \geq s)} = \frac{E(L)}{1 - F_D(d) - F_S(s) + F_{DS}(d,s)} = \frac{E(L)}{1 - F_D(d) - F_S(s) + C(F_D(d), F_S(s))} \quad (۷)$$

$$T'_{DS} = \frac{E(L)}{P(D \geq d \ or \ S \geq s)} = \frac{E(L)}{1 - F_{DS}(d,s)} = \frac{E(L)}{1 - C(F_D(d), F_S(s))}$$

در روابط بالا، T_{DS} و T'_{DS} به‌ترتیب دوره بازگشت توأم خشکسالی در حالت "و" و "یا" و $C(F_D(d), F_S(s))$ تابع مفصلی انتخاب شده در مرحله قبل می‌باشند.

شکل (۲) مراحل انجام کار در این مطالعه را به‌صورت خلاصه نشان می‌دهد.

جدول ۱- مشخصات توابع مفصل مورد بررسی در مطالعه حاضر (Shiau, 2006)
Table 1- Copula functions properties (Shiau, 2006)

Copula Function	Abbreviation	Equation	Parameter Range
Clayton	Cly	$C(u,v)=(u^{-\theta}+v^{-\theta}-1)^{-1/\theta}$	$\theta \geq 0$
Ali-Mikhail-Haq	AMH	$C(u,v)=\frac{uv}{1-\theta(1-u)(1-v)}$	$-1 \leq \theta \leq 1$
Farlie-Gumbel-Morgenstern	FGM	$C(u,v)=uv[1+\theta(1-u)(1-v)]$	$-1 \leq \theta \leq 1$
Frank	Fra	$C(u,v)=-\frac{1}{\theta}\ln\left[1+\frac{(e^{-\theta u}-1)(e^{-\theta v}-1)}{e^{-\theta}-1}\right]$	$\theta \neq 0$
Galambos	Gal	$C(u,v)=uv\exp\left\{\left[(-\ln u)^{-\theta}+(-\ln v)^{-\theta}\right]^{-1/\theta}\right\}$	$\theta \geq 1$
Gumbel-Hougaard	GH	$C(u,v)=\exp\left\{-\left[(-\ln u)^{\theta}+(-\ln v)^{\theta}\right]^{1/\theta}\right\}$	$\theta \geq 1$
Plackett	Pla	$C(u,v)=\frac{1}{2(\theta-1)}\{1+(\theta-1)(u+v) - [(1+(\theta-1)(u+v))^2 - 4\theta(\theta-1)uv]^{1/2}\}$	$\theta \geq 0$

نتایج و بحث

ارزیابی ERA5-Land

جدول (۲) ارزیابی محصول بازتحلیل ERA5-Land را در تخمین بارش ماهانه ایستگاه‌های بندرانزلی و کرمان در سال‌های ۱۹۵۹ تا ۲۰۲۰ نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که محصول ERA5-Land در تخمین بارش کرمان بهتر از بندرانزلی عمل کرده است، اما به‌طور کلی با توجه به مقادیر معیارهای ارزیابی، این محصول دقت مناسبی در تخمین بارش ماهانه در هر دو ایستگاه داشته است. درصد بایاس و آماره KGE ارائه شده در جدول (۲) نشان می‌دهند که داده‌های بازتحلیل ERA5-Land تطابق بیشتری با داده‌های مشاهداتی در ایستگاه کرمان دارند. علاوه بر آماره‌های یاد شده، از نمودار وایولین پلات نیز در خصوص مقایسه داده‌های مشاهداتی و بازتحلیل ERA5-Land در ایستگاه‌های مورد مطالعه استفاده شد که نتایج در شکل (۳) قابل مشاهده می‌باشد. بر اساس نتایج ارائه شده در نمودارهای وایولین پلات می‌توان مشاهده کرد که توزیع و تراکم داده‌های بازتحلیل و تخمین بارش‌های حدی در ایستگاه کرمان بهتر از ایستگاه انزلی می‌باشد.

شاخص خشکسالی بارش استاندارد شده (SPI)

تغییرات شاخص SPI در مقیاس‌های ۱، ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۲۴ ماهه در دو ایستگاه بندرانزلی و کرمان در شکل (۴) و (۵) نشان داده شده است. بر اساس شکل (۴)، ایستگاه بندرانزلی دوره‌های متناوب خشکسالی و ترسالی را تجربه کرده است. شدیدترین خشکسالی در این ایستگاه در فاصله سال‌های ۱۹۵۱ تا ۱۹۶۰ رخ داده است (SPI<-2) و در بقیه رخدادهای خشکسالی مقدار SPI از ۲- تجاوز نکرده است.

در ایستگاه کرمان (شکل ۵) دوره‌های خشکسالی طولانی‌تر و شدیدتری رخ داده است. شدیدترین خشکسالی در این ایستگاه در فاصله سال‌های ۱۹۶۰ تا ۱۹۷۰رخ داده است. در فاصله سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵ نیز دو واقعه خشکسالی دیگر رخ داده است که سختی آن کمتر از خشکسالی ۱۹۶۰-۱۹۷۰ است.

ارزیابی توابع توزیع احتمال برازش یافته بر مدت و سختی خشکسالی

جدول‌های (۳) و (۴) نتایج ارزیابی توابع توزیع احتمال برازش یافته بر مدت و سختی خشکسالی برای ایستگاه بندرانزلی را بر اساس آماره‌های RMSE (بر حسب واحد متغیر بارش، میلی متر) و NSE نشان می‌دهد. بر اساس نتایج به‌دست آمده، از بین توابع توزیع مورد بررسی در مقیاس یک ماهه و شش ماهه تابع پارتو تعمیم یافته برای مدت و تابع ناکاگامی برای سختی خشکسالی برازش بهتری داشته‌اند. در مقیاس سه ماهه مدت خشکسالی با تابع GEV و سختی خشکسالی با تابع نرمال بهتر برازش یافته است. در مقیاس نه ماهه تابع لوگ لوجستیک بر مدت خشکسالی و تابع GEV بر سختی خشکسالی برازش بهتری دارند. در مقیاس ۱۲ ماهه توابع پارتو تعمیم یافته و ویبول به‌ترتیب بر مدت و سختی خشکسالی و درمقیاس ۲۴ ماهه توابع پارتو تعمیم یافته و GEV بر مدت و سختی خشکسالی برازش مناسب‌تری دارند.

نتایج توابع برازش یافته بر مدت و سختی خشکسالی در ایستگاه کرمان در جدول‌های (۵) و (۶) ارائه شده است. بر اساس نتایج جدول (۵)، از بین توابع توزیع مورد بررسی در مقیاس یک ماهه توابع پارتو تعمیم یافته و GEV بر مدت و سختی خشکسالی برازش مناسب‌تری دارند. در مقیاس سه ماهه تابع لوگ لوجستیک بر مدت خشکسالی و تابع GEV بر سختی خشکسالی برازش بهتری دارد.

در مقیاس شش ماهه تابع GEV برای مدت و تابع ویبول برای سختی خشکسالی بهتر از سایر توابع برازش یافته‌اند. جدول (۶) نشان می‌دهد که همانند ایستگاه بندرانزلی، در کرمان نیز در مقیاس نه ماهه تابع لوگ لوجستیک بر مدت خشکسالی و تابع GEV بر سختی خشکسالی برازش بهتری دارند. در مقیاس ۱۲ ماهه توابع پارتو تعمیم یافته و لوگ لوجستیک به‌ترتیب بر مدت و سختی خشکسالی و در مقیاس ۲۴ ماهه توابع گاما و لوگ نرمال بر مدت و سختی خشکسالی بهتر برازش یافته‌اند. با توجه به اینکه بهترین تابع برازش یافته در مطالعه‌های مختلف، یکسان نبوده و نتایج متفاوتی حاصل شده است، می‌توان نتیجه گرفت که انتخاب بهترین تابع برازش یافته تحت تاثیر ماهیت داده‌ها می‌باشد (Liu et al., 2016).

جدول ۲- معیارهای ارزیابی ERA5-Land در تخمین بارش ماهانه

Table 2- Evaluation metrics of ERA5-Land for monthly precipitation estimation

Statistic	NSE	RMSE (mm)	R^2	PBIAS	KGE
Bandar Anzali	0.58	89.9	0.77	29.7	0.56
Kerman	0.76	10.3	0.67	1.2	0.7

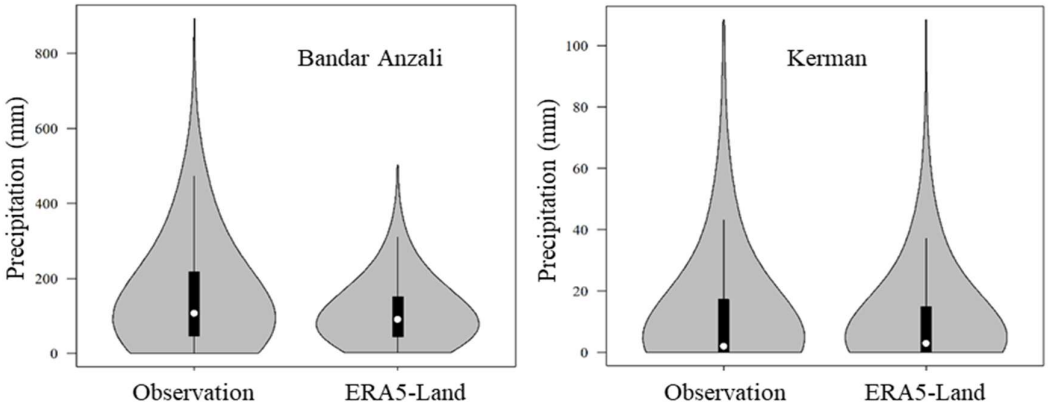


Fig. 3 - Violin plots of observational values and ERA5-Land reanalysis product at Kerman and Bandar Anzali stations

شکل ۳- وایولین پلات‌های مقادیر مشاهداتی و محصول بازتحلیل ERA5-Land در ایستگاه‌های کرمان و بندرانزلی

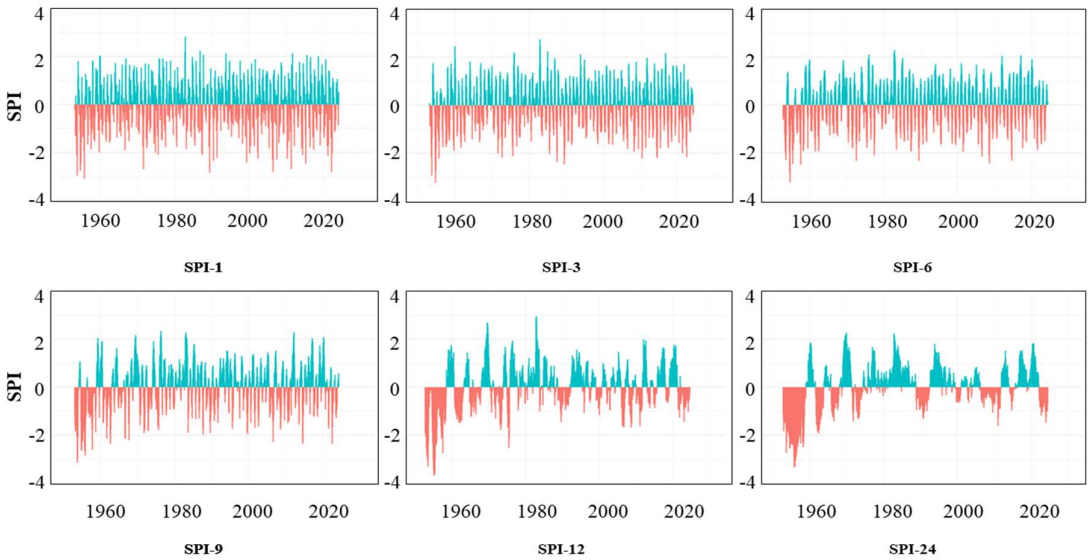


Fig. 4- SPI temporal change at Bandar Anzali station

شکل ٤- سری زمانی شاخص SPI در مقیاس‌های زمانی ۱، ۳، ٦، ۹، ۱۲ و ٢٤ ماهه در ایستگاه بندرانزلی

DOI: 10.22055/jise.2025.48618.2150

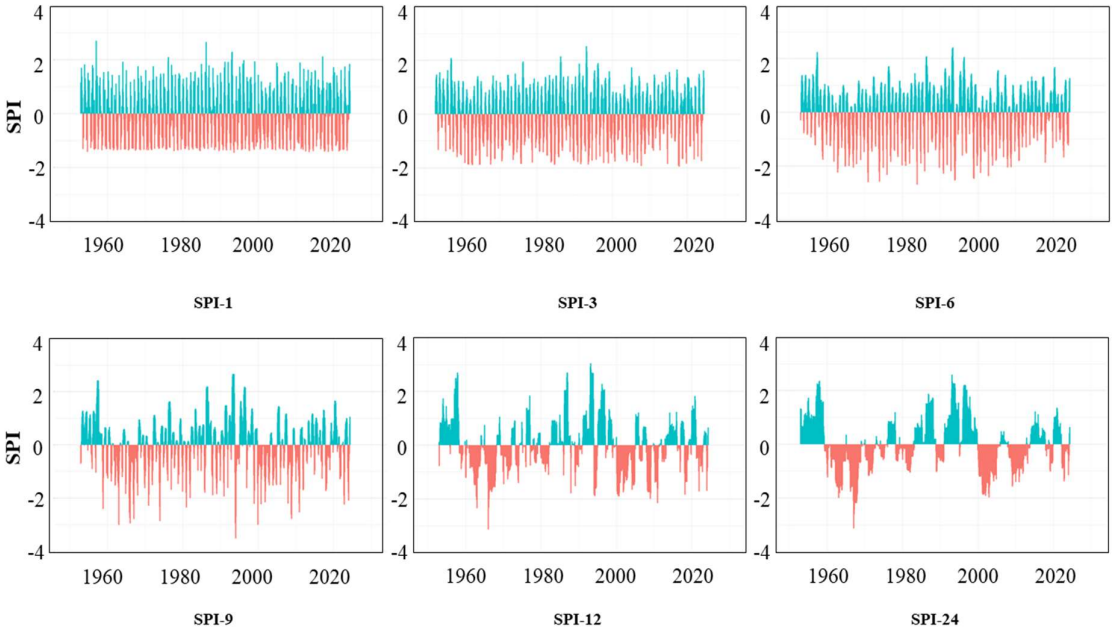


Fig. 5- SPI temporal change at Kerman station

شکل ۵- سری زمانی شاخص SPI در مقایس های زمانی ۱، ۳، ٦، ۹، ۱۲ و ۲٤ ماهه در ایستگاه کرمان

جدول ۳- معیارهای ارزیابی آماری توابع توزیع برازش یافته بر مدت و سختی خشکسالی در ایستگاه بندرانزلی در مقیاس‌های زمانی ۱، ۳ و ٦ ماهه. بهترین توابع توزیع به‌صورت پررنگ و زیرخط نشان داده شده است.

Table 3- Statistical evaluation metrics of fitted distribution functions on drought duration and severity at Bandar Anzali station at time scales of 1, 3 and 6 months. The best distribution functions are shown as bold and underlined numbers.

Distribution Function	SPI-1				SPI-3				SPI-6			
	Severity		Duration		Severity		Duration		Severity		Duration	
	NSE	RMSE	NSE	RMSE	NSE	RMSE	NSE	RMSE	NSE	RMSE	NSE	RMSE
Normal	0.91	8.49	0.9	9.32	**0.99**	**2.24**	0.96	6.09	0.91	8.49	0.9	9.32
Log-Norman	0.95	6.24	0.89	9.43	0.88	10.19	0.87	10.62	0.95	6.24	0.89	9.43
Exponential	0.96	6.05	0.88	10.19	0.82	12.14	0.53	19.79	0.96	6.05	0.88	10.19
Gama	0.98	4.14	0.9	9.06	0.93	7.45	0.91	8.91	0.98	4.14	0.9	9.06
GEV	0.96	5.74	0.65	17.19	0.99	3.07	**0.96**	**5.54**	0.96	5.74	0.65	17.19
Logistic	0.93	7.82	0.9	9	0.99	2.69	0.96	5.68	0.93	7.82	0.9	9
Log-Logistic	0.97	4.77	0.9	9.05	0.94	6.9	0.94	7.34	0.97	4.77	0.9	9.05
Rayleigh	0.57	18.98	0.82	12.4	0.98	4.4	0.83	11.86	0.57	18.98	0.82	12.4
Nakagami	**0.98**	**3.64**	0.91	8.85	0.96	5.68	0.93	7.82	**0.98**	**3.64**	0.91	8.85
Generalized Pareto	0.94	7.01	**0.93**	**7.43**	0.94	7.13	0.81	12.61	0.94	7.01	**0.93**	**7.43**
Weibull	0.98	4.42	0.91	8.82	0.96	5.55	0.95	6.46	0.98	4.42	0.91	8.82

جدول ٤- معیارهای ارزیابی آماری توابع توزیع برازش یافته بر مدت و سختی خشکسالی در ایستگاه بندرانزلی در مقیاس‌های زمانی ۹، ۱۲ و ٢٤ ماهه. بهترین توابع توزیع به‌صورت پررنگ و زیرخط نشان داده شده است.

Table 4- Statistical evaluation metrics of fitted distribution functions on drought duration and severity at Bandar Anzali station at time scales of 9, 12 and 24 months. The best distribution functions are shown as bold and underlined numbers.

Distribution Function	SPI-9				SPI-12				SPI-24			
	Severity		Duration		Severity		Duration		Severity		Duration	
	NSE	RMSE	NSE	RMSE	NSE	RMSE	NSE	RMSE	NSE	RMSE	NSE	RMSE
Normal	0.8	12.91	0.82	12.33	0.54	19.64	0.76	14.19	0.44	21.73	0.6	18.33
Log-Norman	0.94	7.38	0.97	5.37	0.99	3.48	0.97	5.3	0.94	6.85	0.86	10.95
Exponential	0.98	4.32	0.85	11.09	0.54	19.76	0.92	8.34	-0.44	34.87	0.42	22.14
Gama	0.98	4.45	0.95	6.58	0.96	5.91	0.95	6.79	0.79	13.29	0.77	13.98
GEV	**0.99**	**2.59**	0.97	4.87	0.97	4.66	0.7	15.87	**0.98**	**4.17**	-0.07	30.08
Logistic	0.95	6.69	0.94	7.23	0.8	13.01	0.89	9.7	0.57	18.97	0.69	16.08
Log-Logistic	0.98	3.83	**0.97**	**4.7**	0.98	3.95	0.96	5.48	0.96	5.95	0.89	9.69
Rayleigh	0.25	25.11	0.7	15.84	-1.35	44.52	-0.14	30.97	-1.59	46.82	-0.79	38.87
Nakagami	0.92	7.99	0.89	9.8	0.85	11.25	0.87	10.32	0.72	15.32	0.71	15.61
Generalized Pareto	0.97	4.75	0.88	9.87	0.97	5.19	**0.97**	**4.77**	0.98	4.43	**0.89**	**9.64**
Weibull	0.97	4.6	0.93	7.55	**0.99**	**3.19**	0.96	5.62	0.9	9.23	0.83	11.99

جدول ٥- معیارهای ارزیابی آماری توابع توزیع برازش یافته بر مدت و سختی خشکسالی در ایستگاه کرمان در مقیاس‌های زمانی ۱، ۳ و ٦ ماهه. بهترین توابع توزیع به‌صورت پررنگ و زیرخط نشان داده شده است.

Table 5- Statistical evaluation metrics of fitted distribution functions on drought duration and severity at Kerman station at time scales of 1, 3 and 6 months. The best distribution functions are shown as bold and underlined numbers.

Distribution Function	SPI-1				SPI-3				SPI-6			
	Severity		Duration		Severity		Duration		Severity		Duration	
	NSE	RMSE	NSE	RMSE	NSE	RMSE	NSE	RMSE	NSE	RMSE	NSE	RMSE
Normal	0.93	7.56	0.93	7.59	0.99	2.09	0.94	7.34	1	1.93	0.96	5.7
Log-Norman	0.73	14.9	0.83	11.86	0.76	14.06	0.85	11.24	0.97	5.27	0.94	7
Exponential	0.8	12.87	0.81	12.6	0.49	20.7	0.31	24.09	0.66	16.86	0.44	21.6
Gama	0.79	13.37	0.87	10.54	0.91	8.7	0.89	9.52	0.98	3.57	0.95	6.45
GEV	**0.96**	**5.48**	0.95	6.46	**0.99**	**2.07**	0.94	7.06	0.99	2.19	**0.96**	**5.54**
Logistic	0.94	6.79	0.94	7.24	0.99	2.82	**0.94**	**7.03**	0.99	2.12	0.96	5.87
Log-Logistic	0.81	12.66	0.87	10.43	0.98	4.56	0.93	7.49	0.98	3.8	0.95	6.41
Rayleigh	0.87	10.56	0.89	9.76	0.85	11.23	0.62	17.8	0.97	5.26	0.81	12.61
Nakagami	0.8	13.04	0.89	9.51	0.95	6.53	0.91	8.59	0.99	2.22	0.96	6.02
Generalized Pareto	0.92	8.35	**0.95**	**6.24**	0.76	14.32	0.6	18.27	0.86	10.75	0.79	13.39
Weibull	0.8	12.88	0.89	9.76	0.98	3.78	0.94	7.13	**1**	**1.81**	0.96	5.59

 DOI: 10.22055/jise.2025.48618.2150

جدول ٦- معیارهای ارزیابی آماری توابع توزیع برازش یافته بر مدت و سختی خشکسالی در ایستگاه کرمان در مقیاس‌های زمانی ۹، ۱۲ و ۲٤ ماهه. بهترین توابع توزیع به‌صورت پررنگ و زیرخط نشان داده شده است.

Table 6- Statistical evaluation metrics of fitted distribution functions on drought duration and severity at Kerman station at time scales of 9, 12 and 24 months. The best distribution functions are shown as bold and underlined numbers.

Distribution Function	SPI-9				SPI-12				SPI-24			
	Severity		Duration		Severity		Duration		Severity		Duration	
	NSE	RMSE	NSE	RMSE	NSE	RMSE	NSE	RMSE	NSE	RMSE	NSE	RMSE
Normal	0.79	13.25	0.7	15.86	0.7	15.93	0.81	12.7	0.7	16.05	0.85	11.31
Log-Norman	0.95	6.7	0.93	7.93	0.99	3.48	0.96	5.8	**0.96**	**6.03**	0.94	7.13
Exponential	0.98	4.38	0.84	11.55	0.61	18.21	0.95	6.4	0.46	21.4	0.89	9.62
Gama	0.98	4.09	0.88	10.2	0.97	4.66	0.96	5.89	0.95	6.7	**0.96**	**6.18**
GEV	**0.99**	**3.29**	0.94	7.11	0.98	3.92	0.94	6.97	0.95	6.57	0.71	15.64
Logistic	0.93	7.86	0.85	11.21	0.81	12.78	0.91	8.48	0.79	13.26	0.89	9.64
Log-Logistic	0.98	4.3	**0.95**	**6.68**	**0.99**	**2.6**	0.96	6.09	0.95	6.23	0.95	6.79
Rayleigh	0.11	27.37	0.29	24.48	-0.53	35.95	0.18	26.31	-0.49	35.71	0.25	25.28
Nakagami	0.93	7.45	0.78	13.66	0.94	7.28	0.92	8.31	0.94	7.42	0.95	6.44
Generalized Pareto	0.98	3.7	0.84	11.51	0.98	4.44	**0.97**	**4.95**	0.93	7.78	0.92	8.07
Weibull	0.98	4.04	0.87	10.58	0.99	2.95	0.97	5.3	0.96	6.18	0.95	6.25

بررسی همبستگی جفت متغیرها

لازمه اجرای توابع مفصل وجود همبستگی بین جفت متغیر مورد مطالعه می‌باشد، لذا پیش از برازش توابع مفصل، ابتدا باید همبستگی بین جفت متغیرها بررسی شود. از آنجا که آماره تائو کندال اغلب تحت تأثیر مقادیر پرت قرار ندارد، برای بررسی همبستگی مناسب‌تر است (Klein et al., 2011). بنابراین بررسی همبستگی جفت متغیرها از آماره تائو کندال استفاده شد که نتایج آن در شکل‌های (۶) و (۷) برای دو ایستگاه بندرانزلی و کرمان ارائه شده است. این شکل‌ها عناصر قطر اصلی هیستوگرام جفت متغیرهای مورد مطالعه به‌همراه توزیع مناسب برازش یافته و عناصر قطر فرعی همبستگی جفت متغیر مورد مطالعه و پراکندگی آن‌ها به‌همراه برازش بهترین خط را نشان می‌دهد. با توجه به مقادیر تائو کندال که در اغلب موارد بالای ۷۰ درصد است، همبستگی قابل قبولی بین مدت و سختی خشکسالی وجود دارد. بر اساس نتایج Ganguli و Reddy (2012) تجمع نقاط در قسمت پایین سمت چپ نشان‌دهنده همبستگی قوی‌تر بین مدت و سختی خشکسالی است که این مسئله در شکل‌های (۶) و (۷) نیز مشاهده می‌شود. بنابراین با توجه به همبستگی بین مشخصه‌های خشکسالی، می‌توان نتیجه گرفت که بررسی توأم این مشخصه‌ها بر بررسی آن‌ها به‌صورت تک متغیره ارجحیت دارد (Liu et al., 2016). بر این اساس می‌توان از توابع مفصل برای بررسی احتمال وقوع توأم مشخصه‌های خشکسالی استفاده نمود (Tosunoglu and Can, 2016; Tosunoglu and Kisi, 2016). لازم به ذکر است که با تغییر مقیاس زمانی از مقیاس سه ماهه به ۲۴ ماهه، سری‌های مورد مطالعه هموارتر و نقاط حدی کمتر می‌شود و این مسئله باعث کاهش فاصله بین مقادیر مشاهداتی و میانگین خواهد شد و در نهایت سبب می‌شود تا وابستگی‌ها بیشتر شده و اختلاف‌ها کاهش یابد (Vasiliades et al., 2009).

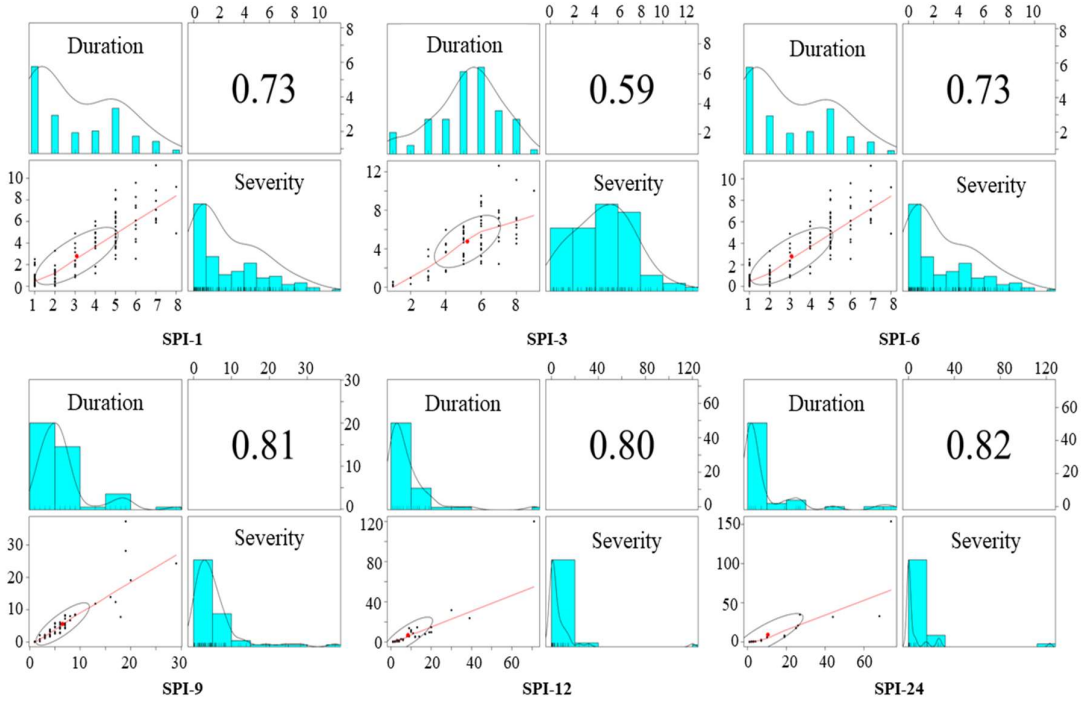


Fig. 6- Correlation of drought duration and severity using Kendall's Tau at Bandar Anzali Station

شکل ٦- همبستگی جفت متغیر مدت و سختی خشکسالی با استفاده از آماره تائو کندال در ایستگاه بندرانزلی

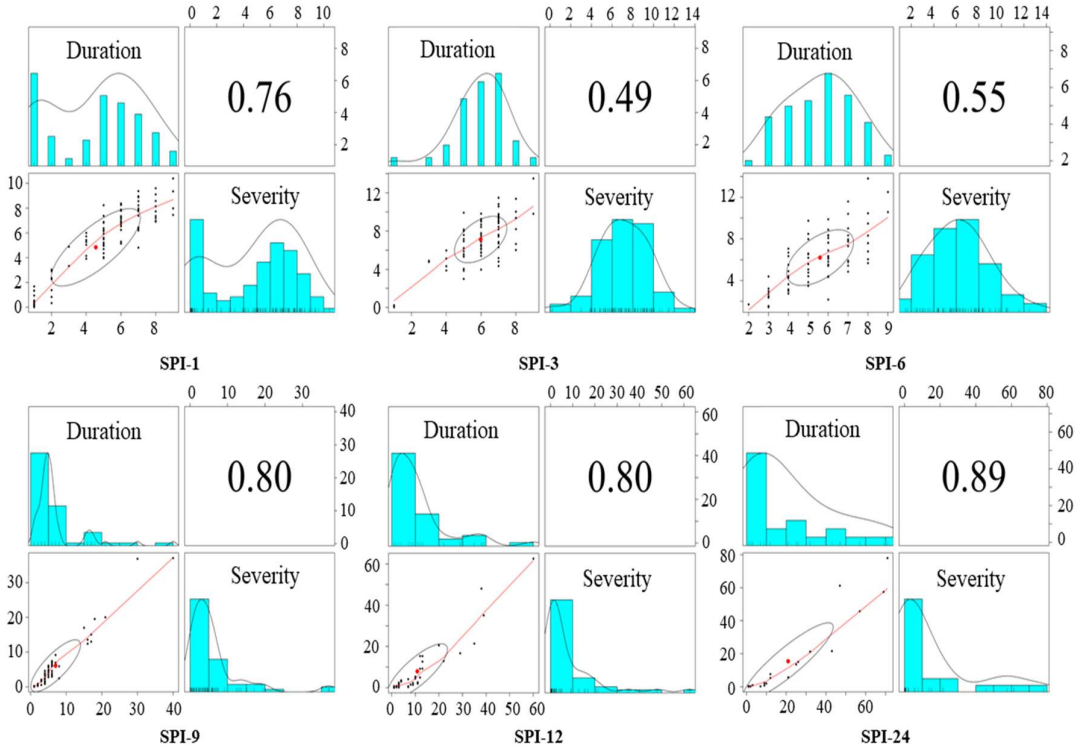


Fig. 7- Correlation of drought duration and severity using Kendall's Tau at Kerman Station

شکل ۷- همبستگی جفت متغیر مدت و سختی خشکسالی با استفاده از آماره تائو کندال در ایستگاه کرمان

 DOI: 10.22055/jise.2025.48618.2150

انتخاب تابع مفصل

جدول‌های (۷) و (۸) نتایج ارزیابی توابع مفصل را در ایستگاه بندرانزلی نشان می‌دهد. بر این اساس توابعی که کمترین مقدار RMSE و AIC و بیشترین مقدار NSE را داشتند، به‌عنوان بهترین تابع مفصل انتخاب و معرفی شدند. از بین توابع مورد بررسی در مقیاس‌های یک، شش و ۲۴ ماهه تابع گالامبوس (Gal)، برای مقیاس نه ماهه تابع فرانک (Fra) و برای مقیاس ۱۲ ماهه تابع گامبل–هوگارد بهترین برازش را بر جفت متغیر مورد مطالعه داشتند. برای مقیاس سه ماهه تابع گالامبوس و گامبل–هوگارد (GH) نتایج مشابهی را به‌همراه داشتند که در نهایت تابع گالامبوس برای این مقیاس انتخاب شد. نتایج ارزیابی توابع مفصل برای ایستگاه کرمان در جدول‌های (۹) و (۱۰) ارائه شده است. بر طبق نتایج به‌دست آمده بهترین توابع مفصل در ایستگاه کرمان در مقیاس‌های زمانی یک، سه، شش و ۲۴ تابع گامبل–هوگارد، در مقیاس زمانی نه ماهه تابع گالامبوس و در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه تابع فرانک می‌باشند.

مقادیر θ برای توابع مورد بررسی نیز در این جدول‌ها ارائه شده است. با توجه با این که تابع مفصل منتخب بر اساس توزیع حاشیه‌ای داده‌های مورد مطالعه انتخاب می‌شود (که خود تحت تأثیر ماهیت داده‌ها می‌باشد)، این تفاوت در مفصل برتر در مطالعه‌های مختلف نیز مشاهده شده است (Mirabbasi et al., 2012; Pronoos Sedighi et al., 2022; Ramezani et al., 2023).

رویکرد مبتنی بر مفصل در بحث شبیه‌سازی و تحلیل فراوانی با توجه به این که بر اساس توزیع توأم جفت متغیر مورد مطالعه عمل می‌کنند، محدودیت جغرافیایی ندارد و تنها محدودیت توابع مفصل مرسوم در حالت دو متغیره، وجود وابستگی بین جفت متغیر مورد مطالعه می‌باشد که در صورت عدم وجود وابستگی، نتایج قابل اعتماد نخواهد بود. البته در ابعاد بالاتر و استفاده از مفصل‌های دورانی می‌توان به این محدودیت نیز غلبه کرد (Nazeri Tahroudi et al., 2022).

جدول ۷- معیارهای ارزیابی توابع مفصل و مقدار θ در ایستگاه بندرانزلی در مقیاس‌های زمانی ۱، ۳ و ٦ ماهه. بهترین توابع توزیع به‌صورت پررنگ و زیرخط نشان داده شده است.

Table 7- Evaluation metrics of copula functions and θ values at Bandar Anzali station at time scales of 1, 3 and 6 months. The best copula functions are shown as bold and underlined numbers.

Time Scale	Copula Function	RMSE	NSE	AIC	θ
SPI-1	Cly	0.1	0.89	-8.96	2.63
	AMH	0.13	0.8	-8.88	0.99
	FGM	0.19	0.55	-7.82	-0.48
	FRA	0.08	0.92	-9.22	20
	Gal	**0.05**	**0.97**	**-9.27**	**3.82**
	GH	0.08	0.92	-9.27	5.96
	Plak	0.1	0.88	-9.11	20
SPI-3	Cly	0.07	0.93	-8.2	4.6
	AMH	0.11	0.85	-8.08	1
	FGM	0.18	0.63	-7.02	-0.61
	FRA	0.06	0.95	-8.41	20
	Gal	**0.06**	**0.96**	**-8.46**	**2.06**
	GH	**0.06**	**0.96**	**-8.46**	**7.64**
	Plak	0.07	0.94	-8.26	20
SPI-6	Cly	0.1	0.89	-8.96	2.63
	AMH	0.13	0.8	-8.88	0.99
	FGM	0.19	0.55	-7.82	-0.48
	FRA	0.08	0.92	-9.22	20
	Gal	**0.05**	**0.97**	**-9.27**	**3.82**
	GH	0.08	0.92	-9.27	5.96
	Plak	0.1	0.88	-9.11	20

جدول ۸- معیارهای ارزیابی توابع مفصل و مقدار θ در ایستگاه بندرانزلی در مقیاس‌های زمانی ۹، ۱۲ و ۲۴ ماهه. بهترین توابع توزیع به‌صورت پررنگ و زیرخط نشان داده شده است.

Table 8- Evaluation metrics of copula functions and θ values at Bandar Anzali station at time scales of 9, 12 and 24 months. The best copula functions are shown as bold and underlined numbers.

Time Scale	Copula Function	RMSE	NSE	AIC	θ
SPI-9	Cly	0.09	0.91	-8.11	7.38
	AMH	0.17	0.66	-7.9	1
	FGM	0.26	0.17	-7.05	-0.87
	FRA	**0.08**	**0.93**	**-8.23**	**20**
	Gal	0.08	0.93	-8.18	19.82
	GH	0.08	0.93	-8.18	6.05
	Plak	0.11	0.85	-8.09	20
SPI-12	Cly	0.09	0.89	-7.64	9.79
	AMH	0.18	0.6	-7.36	1
	FGM	0.28	0.07	-6.57	-0.97
	FRA	0.1	0.89	-7.7	20
	Gal	0.13	0.9	-7.67	14.74
	GH	**0.09**	**0.9**	**-7.67**	**7.37**
	Plak	0.13	0.79	-7.56	20
SPI-24	Cly	0.16	0.71	-6.97	10.14
	AMH	0.23	0.34	-6.62	1
	FGM	0.33	-0.31	-5.99	-0.9
	FRA	0.16	0.69	-6.96	20
	Gal	**0.12**	**0.81**	**-5.84**	**19.94**
	GH	0.17	0.65	-6.82	4.7
	Plak	0.19	0.54	-6.82	20

جدول ۹- معیارهای ارزیابی توابع مفصل و مقدار θ در ایستگاه کرمان در مقیاس‌های زمانی ۱، ۳ و ۶ ماهه. بهترین توابع توزیع به‌صورت پررنگ وزیرخط نشان داده شده است.

Table 9- Evaluation metrics of copula functions and θ values at Kerman station at time scales of 1, 3 and 6 months. The best copula functions are shown as bold and underlined numbers.

Time Scale	Copula Function	RMSE	NSE	AIC	θ
SPI-1	Cly	0.1	0.88	-8.74	2.34
	AMH	0.11	0.85	-8.7	1
	FGM	0.15	0.72	-7.54	-0.51
	FRA	0.1	0.87	-8.95	20
	Gal	0.1	0.87	-8.98	5.09
	GH	**0.1**	**0.88**	**-8.97**	**5.56**
	Plak	0.1	0.88	-8.86	20
SPI-3	Cly	0.1	0.89	-7.97	3.8
	AMH	0.13	0.79	-7.9	1
	FGM	0.22	0.43	-6.83	-1
	FRA	0.08	0.93	-8.21	20
	Gal	0.07	0.84	-8.29	19.99
	GH	**0.07**	**0.94**	**-8.28**	**7.5**
	Plak	0.09	0.91	-8.06	20
SPI-6	Cly	0.06	0.96	-7.94	5.43
	AMH	0.12	0.84	-7.75	1
	FGM	0.19	0.59	-6.74	-0.51
	FRA	0.05	0.97	-8.09	20
	Gal	0.07	0.93	-8.12	19.92
	GH	**0.04**	**0.98**	**-8.12**	**6.86**
	Plak	0.07	0.94	-7.95	20

 DOI: 10.22055/jise.2025.48618.2150

جدول ۱۰- معیارهای ارزیابی توابع مفصل و مقدار θ در ایستگاه کرمان در مقیاس‌های زمانی ۹، ۱۲ و ۲۴ ماهه. بهترین توابع توزیع به‌صورت پررنگ و زیرخط نشان داده شده است.

Table 9- Evaluation metrics of copula functions and θ values at Kerman station at time scales of 9, 12 and 24 months. The best copula functions are shown as bold and underlined numbers.

Time Scale	Copula Function	RMSE	NSE	AIC	θ
SPI-9	Cly	0.11	0.84	-7.95	6.07
	AMH	0.18	0.59	-7.77	1
	FGM	0.29	0.02	-6.96	-0.93
	FRA	0.1	0.87	-8.03	20
	Gal	**0.08**	**0.92**	**-7.02**	**4.34**
	GH	0.11	0.86	-8	4.97
	Plak	0.13	0.78	-7.94	20
SPI-12	Cly	0.1	0.89	-7.36	5.95
	AMH	0.17	0.66	-7.19	1
	FGM	0.26	0.18	-6.56	-0.94
	FRA	**0.08**	**0.91**	**-7.45**	**20**
	Gal	0.09	0.9	-7.45	4.89
	GH	0.09	0.91	-7.45	5.85
	Plak	0.12	0.83	-7.35	20
SPI-24	Cly	0.09	0.91	-6.51	8.87
	AMH	0.16	0.68	-6.28	1
	FGM	0.25	0.23	-5.72	-1
	FRA	0.09	0.9	-6.51	20
	Gal	0.11	0.85	-6.57	5.76
	GH	**0.09**	**0.91**	**-6.57**	**8.18**
	Plak	0.12	0.82	-6.43	20

احتمال وقوع و دوره بازگشت توأم خشکسالی

شکل‌های (۸) و (۹) احتمال وقوع توأم مقادیر مدت و سختی خشکسالی کمتر از یک مقدار مشخص را به‌ترتیب در دو ایستگاه بندرانزلی و کرمان برای مقیاس‌های مختلف نشان می‌دهند. شایان ذکر است که این خطوط تراز می‌توانند به ازای احتمال توأم مشخص، ترکیبات مختلفی از حالت‌های وقوع شدت و مدت خشکسالی را بیان نمایند.

بر اساس این شکل‌ها، به طور مثال، احتمال وقوع خشکسالی در مقیاس ۲۴ ماهه با مدت کمتر از هشت ماه و سختی کمتر از هشت در بندرانزلی حدود ۱۶ درصد و در کرمان حدود ۲۰ درصد است. این احتمال برای مقیاس یک ماهه برای هر دو ایستگاه بندرانزلی و کرمان حدود ۷۵ درصد است. همچنین با توجه به این شکل‌ها می‌توان به ازاء مدت مشخص، با احتمالات مختلف میزان سختی خشکسالی را تخمین زد. به‌طور مثال، با در نظر گرفتن مدت خشکسالی چهار ماهه، مقدار سختی خشکسالی با مقیاس یک ماهه (SPI-1) در ایستگاه بندرانزلی با احتمالات ۵۰ و ۶۰ درصد به‌ترتیب حدود چهار و هفت تخمین زده می‌شود. با توجه به این که نمودارهای ارائه شده بر مبنای توزیع حاشیه‌ای داده‌ها بوده و تابع توزیع تجمعی جفت متغیرها تولید شده است، این نمودارها را می‌توان به‌عنوان نمودارهای منطقه‌ای برای تحلیل احتمال وقوع توأم مدت–سختی خشکسالی هواشناسی در ایستگاه‌های مورد مطالعه به‌کار برد. همچنین با درنظر گرفتن یکی از مشخصه‌های خشکسالی می‌توان با احتمالات مختلف مشخصه دیگر خشکسالی هواشناسی را تخمین زد. از طرف دیگر احتمال این که هم مدت و هم سختی خشکسالی به‌طور همزمان از یک آستانه معین فراتر رود، اطلاعات مفیدی برای بهبود مدیریت سیستم‌های منابع آب در شرایط خشکسالی فراهم می‌کند که این موضوع را نمی‌توان در تحلیل فراوانی وقوع جداگانه مدت و سختی خشکسالی فراهم کرد (Mirabbasi et al., 2012).

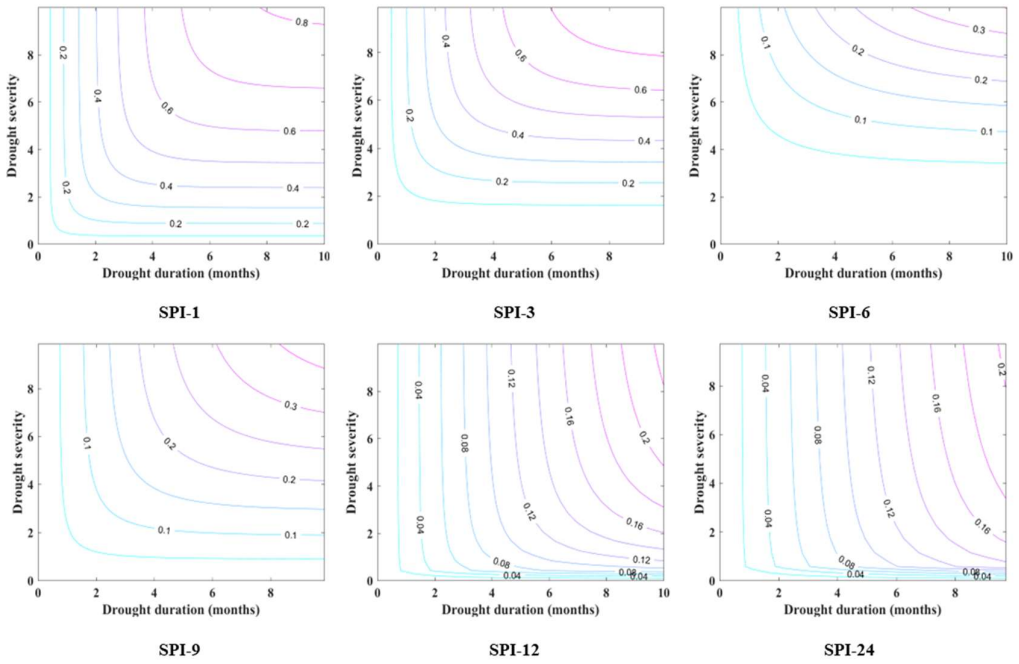


Fig. 8- The joint probability of drought duration and severity at Bandar Anzali station
شکل ۸- احتمال وقوع توأم مقادیر مدت و سختی خشکسالی در ایستگاه بندرانزلی

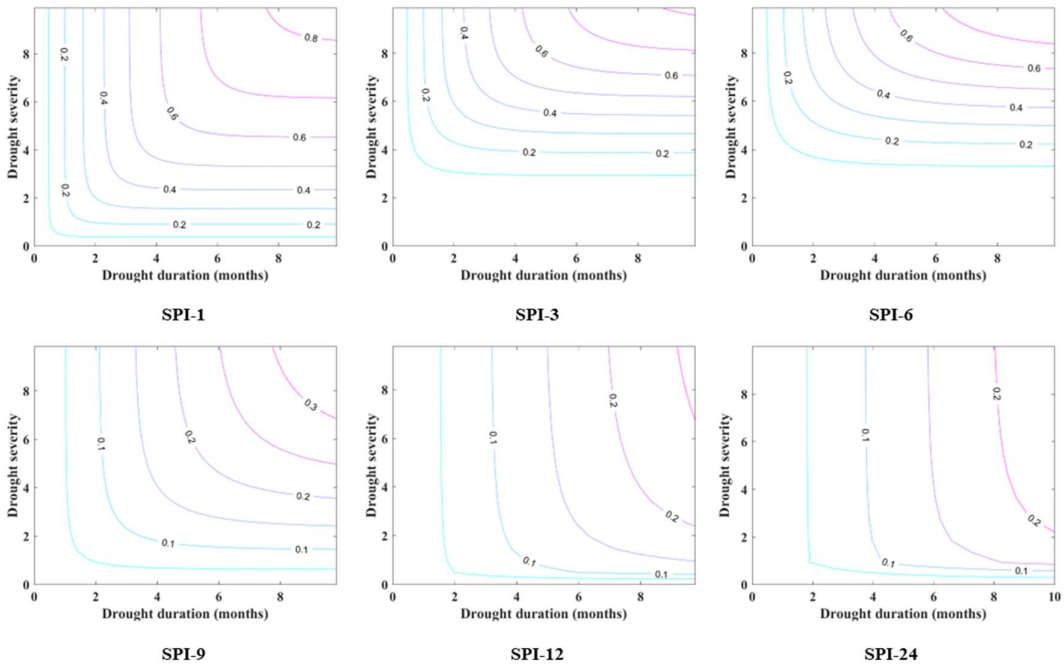


Fig. 9- The joint probability of drought duration and severity at Kerman station
شکل ۹- احتمال وقوع توأم مقادیر مدت و سختی خشکسالی در ایستگاه کرمان

DOI: 10.22055/jise.2025.48618.2150

نتایج بررسی دوره بازگشت توأم مدت و سختی خشکسالی در حالت "و" ($D\geq d$ و $S\geq s$) و حالت "یا" ($D\geq d$ یا $S\geq s$) در مقیاس‌های زمانی مختلف در شکل‌های (۱۰) تا (۱۳) برای دو ایستگاه مورد مطالعه ارائه شده است. بر اساس شکل‌های فوق برای یک دوره بازگشت معین، ترکیبات مختلفی از شدت و مدت را می‌توان ارائه کرد. به‌عنوان مثال با توجه به شکل (۱۰) می‌توان مشاهده کرد که در مقیاس ۲۴ ماهه SPI در ایستگاه بندرانزلی دوره بازگشت توأم برای مدت بیشتر از هشت ماه و سختی بیشتر از ۱۰ حدود ۱۰۰ سال و دوره بازگشت توأم برای مدت بیشتر از هشت ماه یا سختی بیشتر از ۱۰ حدود ۶۰ سال است. این مقادیر در ایستگاه کرمان به‌ترتیب حدود ۹۰ و ۶۰ سال می‌باشد. همان‌طور که در شکل‌ها دیده می‌شود، در حالت "و" دوره بازگشت محاسباتی نسبت به حالت "یا" افزایش می‌یابد. این امر بدین مفهوم است که شانس وقوع دو واقعه به‌صورت همزمان بسیار کمتر بوده و در نتیجه در دوره بازگشت‌های بزرگتری ممکن است رخ دهد که بدین صورت می‌توان علت افزایش دوره بازگشت توأم را توجیه نمود (Ganguli and Reddy, 2012; Yue and Rasmussen, 2002). با افزایش مقیاس زمانی از یک به ۲۴ ماه، دوره بازگشت ترکیبات مختلف مدت و سختی خشکسالی افزایش می‌یابد. بنابراین احتمال وقوع خشکسالی‌های کوتاه‌مدت بیشتر از خشکسالی‌های بلندمدت است. مقایسه بین دو ایستگاه نیز نشان می‌دهد که یک واقعه خشکسالی با مشخصات یکسان در ایستگاه کرمان دوره بازگشت کمتری نسبت به ایستگاه بندرانزلی داشته و بنابراین احتمال وقوع آن در کرمان بیشتر از بندرانزلی می‌باشد.

باتوجه به اینکه استفاده از توابع توزیع تک متغیره برای محاسبه دوره بازگشت می‌تواند منجر به بیش‌برآورد یا کم‌برآورد ریسک خشکسالی شود Salvadori و De Michele (2007)، بنابراین تخمین دوره بازگشت توأم با درنظر گرفتن هر دو متغیر مدت و سختی خشکسالی به‌طور هم‌زمان در تحلیل جامع وضعیت خشکسالی و نیز بررسی سناریوهای مختلف اقلیمی می‌تواند سودمندتر و دقیق‌تر باشد. در واقع منحنی‌های ارائه شده در شکل‌های (۸) تا (۱۳) می‌توانند به‌عنوان منحنی تیپ برای ایستگاه‌های بندرانزلی و کرمان در مقیاس‌های زمانی مختلف عمل کنند و این منحنی‌ها تا زمانی که توزیع آماری مقادیر مدت و سختی خشکسالی در این ایستگاه تغییر نکند، کارایی دارند.

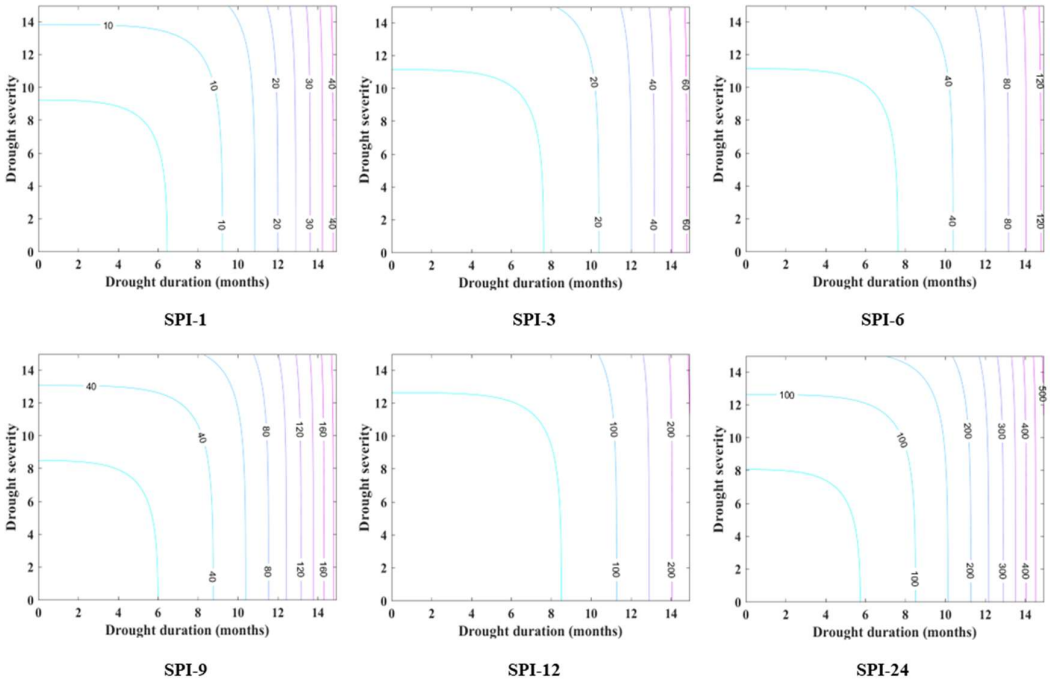


Fig. 10- The joint return period of drought duration and severity for “and” state at Bandar Anzali station

شکل ۱۰- دوره بازگشت توأم مقادیر مدت و سختی خشکسالی در حالت "و" در ایستگاه بندرانزلی

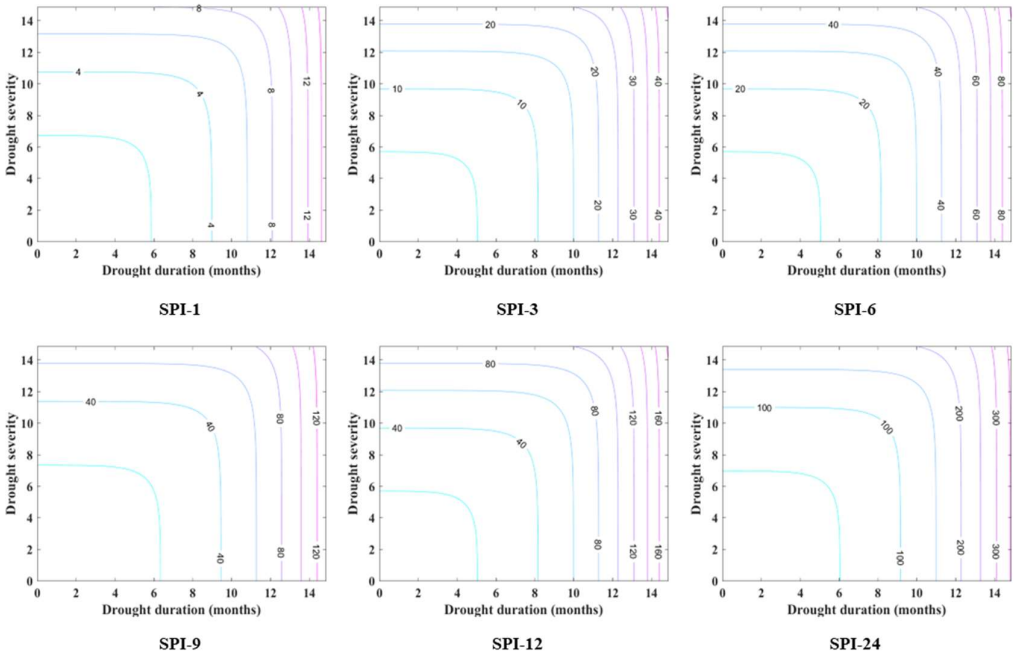


Fig. 11- The joint return period of drought duration and severity for “and” state at Kerman station

شکل ۱۱- دوره بازگشت توأم مقادیر مدت و سختی خشکسالی در حالت "و" در ایستگاه کرمان

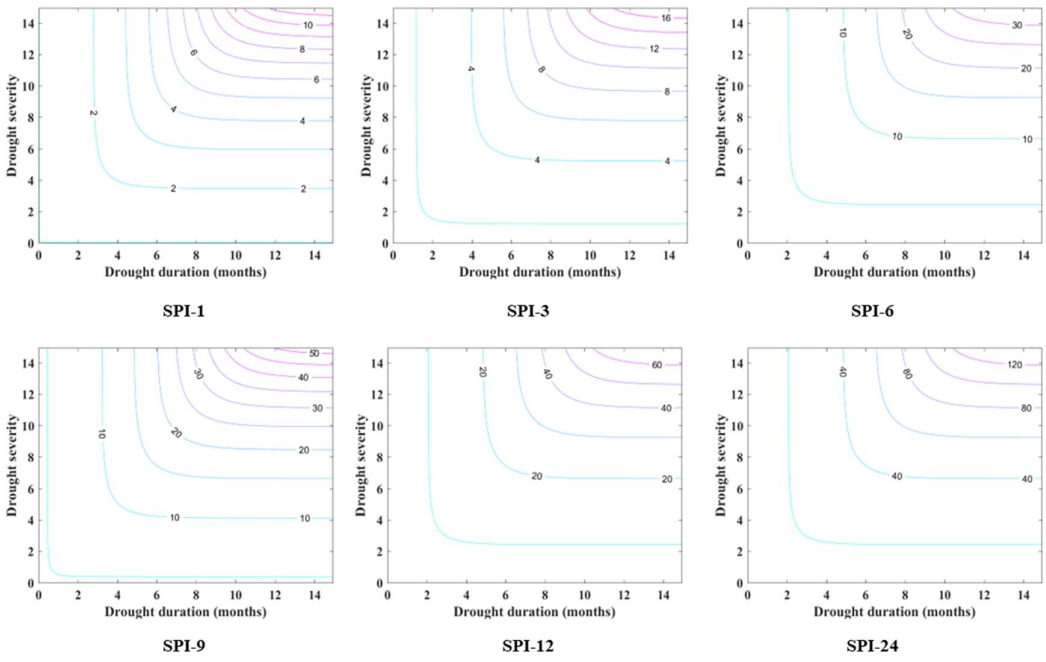


Fig. 12- The joint return period of drought duration and severity for “or” state at Bandar Anzali station

شکل ۱۲- دوره بازگشت توأم مقادیر مدت و سختی خشکسالی در حالت "یا" در ایستگاه بندرانزلی

 DOI: 10.22055/jise.2025.48618.2150

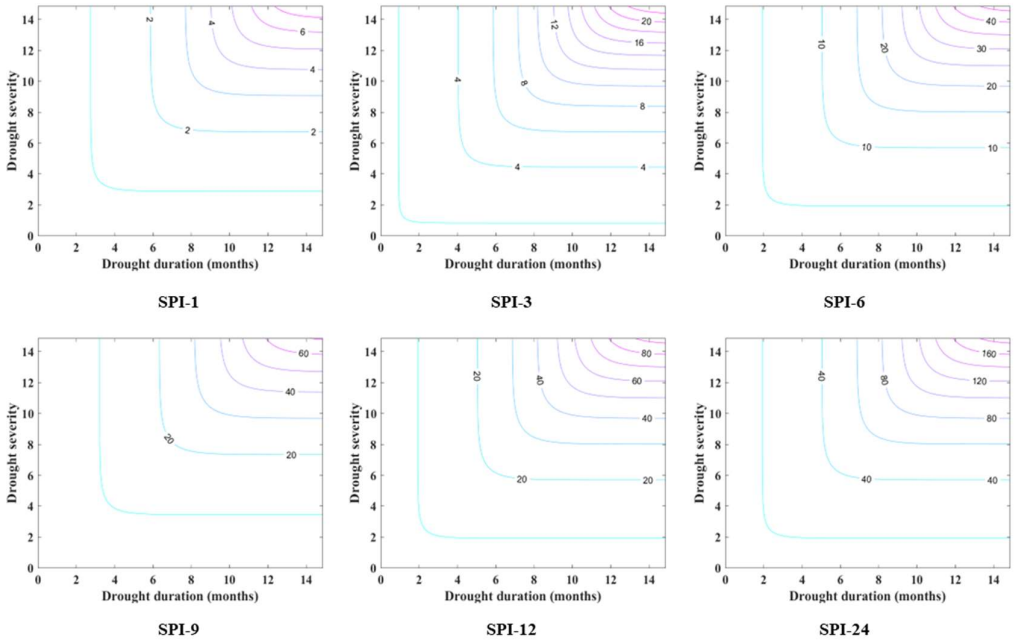


Fig. 13- The joint return period of drought duration and severity for "or" state at Kerman station
شکل ۱۳- دوره بازگشت توأم مقادیر مدت و سختی خشکسالی در حالت "یا" در ایستگاه کرمان

نتیجه‌گیری

در این مطالعه برای بررسی مشخصه‌های خشکسالی از توابع مفصل استفاده شد. با استفاده از این توابع می‌توان احتمال وقوع و دوره بازگشت وقایع خشکسالی را با درنظر گرفتن مشخصه‌های مختلف خشکسالی به‌صورت توأم مورد بررسی قرار داد. به این منظور پس از محاسبه شاخص SPI با استفاده از داده‌های بارش حاصل از محصول بازتحلیل ERA5-Land متغیرهای مدت و سختی خشکسالی برای مقیاس‌های زمانی ۱، ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۲۴ ماهه و برازش ۱۱ تابع توزیع مختلف بر آن‌ها، بهترین تابع توزیع برازش یافته انتخاب شد.

سپس با بررسی آماره تائو کندال و اطمینان از همبستگی قابل قبول بین مدت و سختی خشکسالی، تعداد هفت تابع مفصل بررسی و برای هر مقیاس زمانی بهترین تابع مفصل انتخاب گردید. پس از انتخاب بهترین تابع مفصل، احتمال وقوع توأم مدت و سختی خشکسالی و نیز دوره بازگشت توأم در دو حالت "و" و "یا" محاسبه شد. در حالت "و" دوره بازگشت وقایع خشکسالی برای شرایط که مدت و سختی خشکسالی از مقدار مشخصی بیشتر باشند، تعیین می‌شود. در حالت "یا"، دوره بازگشت برای حالتی که مدت خشکسالی از حد مشخص و یا سختی خشکسالی از حد مشخصی بیشتر باشد، محاسبه می‌شود. بر اساس نتایج و نیز همان‌طور که در مطالعه‌های قبلی ذکر شده است، دوره بازگشت محاسباتی در حالت "و" نسبت به حالت "یا" بزرگتر است. این امر نشان‌دهنده آن است که شانس وقوع دو واقعه به‌صورت هم‌زمان بسیار کمتر بوده و در نتیجه در دوره بازگشت‌های بزرگتری ممکن است رخ داد. همچنین براساس بررسی کلی نمودارهای ارائه شده، نتایج نشان داد که در حالت توأم "و" ($D\geq d$ and $S\geq s$)، احتمال وقوع خشکسالی‌های مشابه در کرمان بیشتر از بندرانزلی است، در حالی که در حالت "یا" ($D\geq d$ or $S\geq s$)، احتمال وقوع خشکسالی با هر یک از مشخصات مدت یا سختی بالا در بندرانزلی بیشتر است. تخمین دوره بازگشت با درنظر گرفتن هر دو متغیر مدت و سختی خشکسالی به‌صورت توأم می‌تواند در تحلیل جامع وقایع خشکسالی سودمندتر و دقیق‌تر باشد. در واقع منحنی‌های حاصل که رابطه بین مدت، سختی و دوره بازگشت (احتمال وقوع) خشکسالی‌ها را نشان می‌دهند، می‌توانند به‌عنوان منحنی تیپ برای ایستگاه‌های بندرانزلی و کرمان در مقیاس‌های زمانی مختلف استفاده شوند. این منحنی‌ها تا زمانی که توزیع آماری مقادیر مدت و سختی خشکسالی در این ایستگاه‌ها تغییر نکند، کارایی دارند و بنابراین می‌توان از آن‌ها برای پایش مولفه مهم منابع آب یعنی بارش در پنجره های زمانی مختلف به‌صورت دقیق‌تر بهره برده و راهکارهای مؤثرتری را برای کاهش اثرات خشکسالی ارائه نمود.

بر اساس نتایج این مطالعه و با توجه به عملکرد خوب ERA5-Land در تخمین بارش، می‌توان از این محصول برای تحلیل مکانی خشکسالی استفاده نمود. این مسئله به ویژه در مناطقی که داده‌های ایستگاهی وجود ندارد، اهمیت می‌یابد. بنابراین استفاده از محصول بازتحلیل ERA5-Land که دارای توان تفکیک مکانی و زمانی مناسب و دوره آماری طولانی مدت است، برای تحلیل خشکسالی در پهنه‌های مختلف اقلیمی پیشنهاد می‌شود.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ گونه تضاد منافعی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

منابع مالی

نویسندگان هیچ گونه حمایت مالی برای تحقیق، تالیف و انتشار این مقاله دریافت نکردند.

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: آمنه میان‌آبادی، طرح ایده، تجزیه و تحلیل داده ها، نگارش نسخه اولیه مقاله

نویسنده دوم: محمد ناظری تهرودی، کدنویسی، بررسی نتایج، ویرایش مقاله

نویسنده سوم: محسن پوررضا بیلندی، بررسی نتایج، ویرایش مقاله

تقدیر و تشکر

این پژوهش فاقد تقدیر و تشکر است.

References

1- Abdul Rauf, U.F. and Zeephongsekul, P. 2014, "Copula based analysis of rainfall severity and duration: a case study", *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 115 No. 1–2, pp. 153–166, doi: 10.1007/s00704-013-0877-1.

2- Ahmad, I., Ahmad, T., Rehman, S.U., Mufrah Almanjahie, I. and Alshahrani, F. 2024, "A detailed study on quantification and modeling of drought characteristics using different copula families", *Heliyon*, Vol. 10 No. 3, p. e25422, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e25422.

3- Ali, M., Deo, R.C., Maraseni, T. and Downs, N.J. 2019, "Improving SPI-derived drought forecasts incorporating synoptic-scale climate indices in multi-phase multivariate empirical mode decomposition model hybridized with simulated annealing and kernel ridge regression algorithms", *Journal of Hydrology*, Vol. 576, pp. 164–184, doi: 10.1016/j.jhydrol.2019.06.032.

4- Aschale, T.M., Cancelliere, A., Palazzolo, N., Buonacera, G. and Peres, D.J. 2024, "Analysis of the Spatiotemporal Trends of Standardized Drought Indices in Sicily Using ERA5-Land Reanalysis Data (1950–2023)", *Water*, Vol. 16 No. 18, p. 2593, doi: 10.3390/w16182593.

5- Behzadi, F., Javadi, S., Yousefi, H., Hashemy Shahdany, S.M., Moridi, A., Neshat, A., Golmohammadi, G. and Maghsoudi, R., 2024. Projections of meteorological drought severity-duration variations based on CMIP6. *Scientific Reports*, *14*(1), p.5027. doi: 10.1038/s41598-024-55340-x.

6- Chen, L. and Guo, S. 2019, "Drought Analysis Using Copulas", *Copulas and Its Application in Hydrology and Water Resources*, Springer, pp. 97–116, doi: 10.1007/978-981-13-0574-0_5.

7- Dai, A. 2011, "Drought under global warming: a review", *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, Vol. 2 No. 1, pp. 45–65, doi: 10.1002/wcc.81.

8- EskandariPour, M. and Soltaninia, S. 2022, "Analyzing the duration frequency and severity of drought using copula function in the Yazd city", *Journal of Water and Climate Change*, Vol. 13 No. 1, pp. 67–82, doi: 10.2166/wcc.2021.366.

9- Frees, E.W. and Valdez, E.A. 1998, "Understanding Relationships Using Copulas", *North American Actuarial Journal*, Vol. 2 No. 1, pp. 1–25, doi: 10.1080/10920277.1998.10595667.

10- Ganguli, P. and Reddy, M.J. 2012, "Risk Assessment of Droughts in Gujarat Using Bivariate Copulas", *Water Resources Management*, Vol. 26 No. 11, pp. 3301–3327, doi: 10.1007/s11269-012-0073-6.

11- Gholami, S., Farajzadeh, M. and Ghavidel Rahimi, Y. 2024, "Comparative study of the performance of CHIRPS and ERA5-Land databases in detecting droughts in Iran", *Natural Geography*, Vol. 16 No. 61, pp. 1-22. In Persian.

12- González, J. and Valdés, J.B. 2003, "Bivariate Drought Recurrence Analysis Using Tree Ring Reconstructions", *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 8 No. 5, pp. 247–258, doi: 10.1061/(ASCE)1084-0699(2003)8:5(247).

13- Grimaldi, S., Petroselli, A., Salvadori, G. and De Michele, C. 2016, "Catchment compatibility via copulas: A non-parametric study of the dependence structures of hydrological responses", *Advances in Water Resources*, Vol. 90, pp. 116–133, doi: 10.1016/j.advwatres.2016.02.003.

14- Guo, C., Ning, N., Guo, H., Tian, Y., Bao, A. and De Maeyer, P. 2024, "Does ERA5-Land Effectively Capture Extreme Precipitation in the Yellow River Basin?", *Atmosphere*, Vol. 15 No. 10, p. 1254, doi: 10.3390/atmos15101254.

15- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., *et al.* 2020, "The ERA5 global reanalysis", *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. 146 No. 730, pp. 1999–2049, doi: 10.1002/qj.3803.

16- Legg, S., 2021. IPCC, 2021: Climate change 2021-the physical science basis. Interaction, 49(4), pp.44-45.

17- Kavyani Malayeri, A., Saghafian, B. and Raziei, T. 2021, "Performance evaluation of ERA5 precipitation estimates across Iran", *Arabian Journal of Geosciences*, Vol. 14 No. 23, p. 2676, doi: 10.1007/s12517-021-09079-8.

18- Kazemiazar, F., Rezaie, H. and Mirabbasi, R., 2025. Performance evaluation of monthly ERA5 and ERA5-Land Reanalysis precipitation data in the upstream of the Zayandehroud reservoir basin. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, *19*(1), pp.75-87. (In Persian).

19- Klein, B., Schumann, A.H. and Pahlow, M. (2011), "Copulas – New Risk Assessment Methodology for Dam Safety", *Flood Risk Assessment and Management*, Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 149–185, doi: 10.1007/978-90-481-9917-4_8.

20- Liu, C.-L., Zhang, Q., Singh, V.P. and Cui, Y. 2011, "Copula-based evaluations of drought variations in Guangdong, South China", *Natural Hazards*, Vol. 59 No. 3, pp. 1533–1546, doi: 10.1007/s11069-011-9850-4.

21- Liu, X.-F., Wang, S.-X., Zhou, Y., Wang, F.-T., Yang, G. and Liu, W.-L. 2016, "Spatial analysis of meteorological drought return periods in China using Copulas", *Natural Hazards*, Vol. 80 No. 1, pp. 367–388, doi: 10.1007/s11069-015-1972-7.

22- McKee, T.B., Doesken, N.J. and Kleist, J. 1993, "The relationship of drought frequency and duration of time scales", *Eighth Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society*, Vol. Jan17-23 No. 1993, Anaheim CA, pp. 179–186.

23- Meimandi, J.B., Bazrafshan, O., Esmaeilpour, Y., Zamani, H. and Shekari, M. 2024, "Risk assessment of meteo-groundwater drought using copula approach in the arid region", *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol. 38 No. 4, pp. 1523–1540, doi: 10.1007/s00477-023-02641-8.

24- Mianabadi, A. 2023, "Evaluation of long-term satellite-based precipitation products for developing intensity-frequency (IF) curves of daily precipitation", *Atmospheric Research*, Elsevier B.V., Vol. 286 No. February, p. 106667, doi: 10.1016/j.atmosres.2023.106667.

25- Mirabbasi, R., Fakheri-Fard, A. and Dinpashoh, Y. 2012, "Bivariate drought frequency analysis using the copula method", *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 108 No. 1–2, pp. 191–206, doi: 10.1007/s00704-011-0524-7.

26- Mishra, A.K. and Singh, V.P. 2011, "Drought modeling – A review", *Journal of Hydrology*, Vol. 403 No. 1–2, pp. 157–175, doi: 10.1016/j.jhydrol.2011.03.049.

27- Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., Balsamo, G., Boussetta, S., Choulga, M., Harrigan, S., Hersbach, H. and Martens, B., 2021. ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth system science data*, *13*(9), pp.4349-4383. doi: 10.5194/essd-13-4349-2021.

28- Nadarajah, S. and Gupta, A.K. 2006. "Intensity-duration models based on bivariate gamma distributions", *Hiroshima mathematical journal*, Vol. 36 No. 3, pp. 387-395, doi: 10.1029/2006WR005641.

29- Nash, J.E. and Sutcliffe, J.V. 1970, "River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles", *Journal of Hydrology*, Vol. 10 No. 3, pp. 282–290, doi: 10.1016/0022-1694(70)90255-6.

30- Nazeri Tahroudi, M., Ramezani, Y., De Michele, C. and Mirabbasi, R. (2022), "Trivariate joint frequency analysis of water resources deficiency signatures using vine copulas", *Applied Water Science*, Vol. 12 No. 4, p. 67, doi: 10.1007/s13201-022-01589-4.

31- Páscoa, P., Gouveia, C.M., Ribeiro, A.F.S. and Russo, A. 2024, "Compound drought and hot events assessment in Australia using copula functions", *Environmental Research Communications*, Vol. 6 No. 3, p. 031002, doi: 10.1088/2515-7620/ad2bb8.

32- Pronoos Sedighi, M., Ramezani, Y., Nazeri Tahroudi, M. and Taghian, M. 2022, "Joint frequency analysis of river flow rate and suspended sediment load using conditional density of copula functions", *Acta Geophysica*, Vol. 71 No. 1, pp. 489–501, doi: 10.1007/s11600-022-00894-5.

33- Ramezani, Y., Nazeri Tahroudi, M., De Michele, C. and Mirabbasi, R. (2023), "Application of copula-based and ARCH-based models in storm prediction", *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 151 No. 3–4, pp. 1239–1255, doi: 10.1007/s00704-022-04333-9.

34- Salvadori, G. and De Michele, C. 2007, "On the Use of Copulas in Hydrology: Theory and Practice", *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 12 No. 4, pp. 369–380, doi: 10.1061/(ASCE)1084-0699(2007)12:4(369).

35- Shiau, J.T. 2006, "Fitting Drought Duration and Severity with Two-Dimensional Copulas", *Water Resources Management*, Vol. 20 No. 5, pp. 795–815, doi: 10.1007/s11269-005-9008-9.

36- Shiau, J.T. and Modarres, R. 2009, "Copula-based drought severity-duration-frequency analysis in Iran", *Meteorological Applications*, Vol. 16 No. 4, pp. 481–489, doi: 10.1002/met.145.

37- Shiau, J.T. and Shen, H.W. 2001, "Recurrence Analysis of Hydrologic Droughts of Differing Severity", *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 127 No. 1, pp. 30–40, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9496(2001)127:1(30).

38- Tan, M.L., Armanuos, A.M., Ahmadianfar, I., Demir, V., Heddam, S., Al-Areeq, A.M., Abba, S.I., *et al.* 2023, "Evaluation of NASA POWER and ERA5-Land for estimating tropical precipitation and temperature extremes", *Journal of Hydrology*, Vol. 624, p. 129940, doi: 10.1016/j.jhydrol.2023.129940.

39- Tosunoglu, F. and Can, I. 2016, "Application of copulas for regional bivariate frequency analysis of meteorological droughts in Turkey", *Natural Hazards*, Vol. 82 No. 3, pp. 1457–1477, doi: 10.1007/s11069-016-2253-9.

40- Tosunoglu, F. and Kisi, O. 2016, "Joint modelling of annual maximum drought severity and corresponding duration", *Journal of Hydrology*, Vol. 543, pp. 406–422, doi: 10.1016/j.jhydrol.2016.10.018.

41- Tosunoğlu, F. and Onof, C. 2017, "Joint modelling of drought characteristics derived from historical and synthetic rainfalls: Application of Generalized Linear Models and Copulas", *Journal of Hydrology: Regional Studies*, Vol. 14, pp. 167–181, doi: 10.1016/j.ejrh.2017.11.001.

42- Trenberth, K.E., Fasullo, J.T. and Balmaseda, M.A. 2014, "Earth's energy imbalance", *Journal of Climate*, Vol. 27 No. 9, pp. 3129–3144.

43- Vasiliades, L., Loukas, A. and Patsonas, G. 2009, "Evaluation of a statistical downscaling procedure for the estimation of climate change impacts on droughts", *Natural Hazards and Earth System Sciences*, Vol. 9 No. 3, pp. 879–894, doi: 10.5194/nhess-9-879-2009.

44- Wang, F., Wang, Z., Yang, H., Di, D., Zhao, Y. and Liang, Q. 2020, "A new copula-based standardized precipitation evapotranspiration streamflow index for drought monitoring", *Journal of Hydrology*, Vol. 585, p. 124793, doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.124793.

45- Wilhite, D.A. 2000, "Drought as a Natural Hazard: Concepts and Definitions Drought", in Wilhite, D.A. (Ed.), *Drought: A Global Assessment*, New York, pp. 3–18.

46- Xu, C., Wang, W., Hu, Y. and Liu, Y. 2024, "Evaluation of ERA5, ERA5-Land, GLDAS-2.1, and GLEAM potential evapotranspiration data over mainland China", *Journal of Hydrology: Regional Studies*, Vol. 51, p. 101651, doi: 10.1016/j.ejrh.2023.101651.

47- Yevjevich, V. 1967, "An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts", *Hydrology Papers*, Vol. 23, pp. 1–18.

48- Yilmaz, M. 2023, "Accuracy assessment of temperature trends from ERA5 and ERA5-Land", *Science of The Total Environment*, Vol. 856, p. 159182, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.159182.

49- Yue, S. and Rasmussen, P. 2002, "Bivariate frequency analysis: discussion of some useful concepts in hydrological application", *Hydrological Processes*, Vol. 16 No. 14, pp. 2881–2898, doi: 10.1002/hyp.1185.

50- Zhang, Q., Xiao, M., Singh, V.P. and Chen, X. (2013), "Copula-based risk evaluation of droughts across the Pearl River basin, China", *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 111 No. 1–2, pp. 119–131, doi: 10.1007/s00704-012-0656-4.