

Research Article



Comparison of different distributive functions based on drought indices: SRI and SSI in the Anzali watershed

Mohammad Hossein Jahangir *, Katayoon Sataryan Asil, Morteza Piran

Department of New Energy and Environment, Faculty of New Sciences and Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran.

Corresponding Author email: mh.jahangir@ut.ac.ir

© The Author (s) 2025

Received: 09 Aug 2025

Revised: 27 Nov 2025

Accepted: 14 Jan 2026

Published: 17 Jan 2026

Extended Abstract

Introduction

Due to global warming and the consequent disruption of the hydrological cycle, prolonged drought periods have become increasingly evident in recent decades. Drought is a phenomenon that has significantly affected societies worldwide and therefore requires systematic analysis and trend assessment. The aim of this study is to identify the most appropriate cumulative probability distribution for drought assessment using the Standardized Runoff Index (SRI) and the Standardized Streamflow Index (SSI). The Anzali watershed was investigated over a 30-year period (1986–2015) using annual data from ten hydrometric stations. Several commonly used probability distribution functions were evaluated using MATLAB software, and the gamma distribution was identified as the most suitable. Subsequently, spatial zoning of drought conditions in the Anzali watershed was carried out using the SRI index and the Inverse Distance Weighting (IDW) interpolation method in ArcGIS for the period 2006–2015. A comparison of the statistical characteristics of the SRI and SSI indices indicated that both indices exhibit similar drought trends. Overall, the results revealed that the Anzali watershed did not experience severe drought conditions during the study period, except at the Kharjgil station in 1990.

Materials and Methods

To monitor and assess drought conditions in the Anzali watershed, two hydrological drought indices SRI and SSI were selected. The Anzali watershed is one of the most important basins in northern Iran and receives the highest precipitation levels in the country. Due to the abundance of rainfall and water availability in this region, these two indices were chosen, as both can be calculated based on runoff and streamflow data. For this purpose, data from ten hydrometric stations covering a 30-year period (1986–2015) were analyzed. Determining the most appropriate probability distribution function is critical for accurate drought assessment using these indices. Therefore, three commonly used distribution functions the Weibull, Gamma, and Normal distributions were evaluated. Each distribution was applied to calculate the indices, and their performance was assessed. To determine the optimal distribution function, error-based criteria including Root Mean Square Error (RMSE), Mean Square Error (MSE), and Mean Absolute Error (MAE) were used. MATLAB software was employed to perform the statistical analyses with high accuracy and minimal computational error. Finally, spatial zoning of drought conditions was conducted using the SRI index and the IDW interpolation method in ArcGIS.

Results and Discussion

Based on the RMSE, MSE, MAE values, and the correlation between the indices and the probability distribution functions, the gamma distribution was identified as the most suitable distribution for all stations. This conclusion was supported by correlation coefficients close to one and error values approaching zero. The results also indicated that the SPI and SRI indices present consistent assessments of regional drought conditions. Using the gamma distribution, it was determined that no severe drought events occurred in the Anzali watershed during the 30-year study period. However, the Kharjgil station experienced a severe drought in 2016, which was unprecedented in the region over the past three decades. Additionally, most stations shifted from near-normal to relatively dry conditions during the periods 1972–1975



and 1976. In 2005, all stations experienced relatively dry conditions, with SRI values of approximately -1.25 . Similarly, drought conditions intensified in 1990. In contrast, Taskoweh station experienced very wet conditions in 2016, and an extremely wet (waterlogged) condition was observed across the entire region in 2017. Surveys conducted in 2013 indicated lingering effects from droughts in previous years.

Conclusion

Given the reduction in rainfall regularity and duration in traditionally humid regions, it is essential to select drought indices that are well suited to the meteorological and hydrological characteristics of each region. The findings of this study suggest that identifying the most appropriate index based on regional conditions is a prerequisite for reliable drought monitoring. In the Anzali watershed, the SRI index proved to be particularly effective. The results indicated that the longest drought period occurred between 2005 and 2014. Among the studied stations, Pirsera and Kamadol located at the lowest elevations of the Caspian Plain experienced the highest drought severity, likely due to their rural setting and intensive water exploitation. A comparison of drought zoning maps for 2005 and 2014 clearly demonstrated an increase in drought severity over time. Furthermore, comparison of the SRI and SSI indices showed that, since both indices are based on discharge data, they provide similar assessments of drought conditions. However, the classification framework of the SRI index allows for a more detailed and effective interpretation of drought severity.

Keywords: Gamma distribution function, Normal distribution function, Weibull distribution function, Standardized Surface flow Index, Standardized runoff index

Conflicts of Interest

The author declares no conflict of interest regarding the publication of this article.

Data Availability Statement

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

Author Contribution

Mohammad Hossein Jahangir: Writing, Methodology, Investigation and Data Curation, and Software. All authors: Analysis, Guidance and Supervision, Text Editing, Completion and Data Collection.

Citation: Jahangir, M.H., Sataryan Asil, K., Piran, M. (2025). Comparison of different distributive functions based on drought indices: SRI and SSI in the Anzali watershed, *Technical Strategies in Water Systems*, 3(3), 299-312. <https://doi.org/10.82185/tsws.2025.1214420>

Publisher: Islamic Azad University, Isfahan Branch



مقایسه توابع توزیع مختلف منطبق بر شاخص‌های خشکسالی SRI و SSI در حوزه آبخیز انزلی

محمد حسین جهانگیر^{*}، کنایون ستاریان اصیل، مرتضی پیران

گروه انرژی‌های نو و محیط زیست، دانشکده علوم و فنون نوین، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

ایمیل نویسنده مسئول: mh.jahangir@ut.ac.ir

© The Author (s) 2025

چاپ: ۱۴۰۴/۱۰/۲۷

پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۲۴

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۰۶

دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۱۸

چکیده

با توجه به گرمایش جهانی و در نتیجه برهم خوردن تعادل چرخه هیدرولوژی امروزه بشر شاهد دوره‌های خشکسالی با طول دوره بیشتر است. خشکسالی به عنوان پدیده‌ای که امروزه جوامع را بسیار به خود درگیر کرده نیازمند بررسی و روندیابی است. هدف این مقاله بررسی یافتن بهترین تابع توزیع تجمعی برای محاسبه خشکسالی بر اساس شاخص رواناب سطحی (SRI) و شاخص جریان سطحی استاندارد شده (SSI) است. حوزه آبخیز انزلی طی ۳۰ سال از سال‌های ۱۳۶۵-۱۳۹۴ در ده ایستگاه در مقیاس سالانه مورد پژوهش قرار گرفته شده است. با استفاده از نرم افزار متلب به بررسی چند تابع توزیع متداول و در نهایت انتخاب تابع توزیع گاما به عنوان مناسب ترین پرداخته شده است. همچنین در نرم افزار Arc GIS با استفاده از روش IDW پهنه بندی حوزه انزلی با شاخص SRI از ابتدا یک دوره خشکسالی ۱۳۸۵ تا پایان ۱۳۹۴ صورت گرفته است و با مقایسه خصوصیات آماری شاخص SRI و SSI مشخص شد این دو شاخص روند مشابهی را از وضعیت خشکسالی نشان می‌دهند. همچنین مشخص شد حوزه آبخیز انزلی خشکسالی شدیدی را جز در ایستگاه خرگیل در سال ۶۹ تجربه نکرده است.

واژه‌های کلیدی: تابع توزیع گاما، تابع توزیع نرمال، تابع توزیع ویبول، شاخص جریان سطحی استاندارد شده، شاخص استاندارد شده رواناب

استناد: جهانگیر، م.ح.، ستاریان اصیل، ک.، و پیران، م. (۱۴۰۴). مقایسه توابع توزیع مختلف منطبق بر شاخص‌های خشکسالی SRI و SSI در حوزه آبخیز انزلی. راهبردهای فنی در سامانه‌های آبی، ۳(۳): ۲۹۹-۳۱۲. <https://doi.org/10.82185/tsws.2025.1214420>

ناشر: دانشگاه آزاد اسلامی واحد اصفهان (خوراسگان)

۱- مقدمه

خشکسالی یکی از مخاطرات طبیعی به‌شمار می‌رود که دارای ماهیتی بلندمدت، اثرات گسترده و فراوانی وقوع بالاست (Yang et al., 2018). گستره وسیع جغرافیایی و نبود تعریف واحد، مطالعه آن را سخت‌تر می‌سازد. در ایران، با افزایش فراوانی خشکسالی و کاهش منابع آب، شناخت و مدیریت این پدیده اهمیت ویژه‌ای یافته است. برای این منظور، پژوهشگران از روش‌هایی مانند تحلیل فراوانی منطقه‌ای و شاخص‌های استاندارد چون SRI و SSI استفاده می‌کنند که امکان ارزیابی شدت و تداوم خشکسالی و برآورد احتمال وقوع آن حتی در مناطق با داده‌های محدود را فراهم می‌سازد (Parvizi et al., 2022). خشکسالی در میان بلایای هواشناسی و هیدرولوژیک بیشترین تلفات انسانی را به همراه داشته و تحت شرایط گرمایش جهانی، شدت و فراوانی آن در حال افزایش است (Huang et al., 2026). امروزه به دلیل تغییرات اقلیمی و کمبود آب در دسترس، تمایل جوامع به استفاده از آب‌های زیرزمینی با استفاده از حفر چاه‌های عمیق بیشتر شده که این امر خود باعث آسیب‌های جبران‌ناپذیر و جدی به طبیعت می‌شود که به دنبال آن مشکلات خشکسالی را به وجود می‌آورد (Petersen-Perlman et al., 2022). امروزه با بهره‌گیری از شاخص‌های خشکسالی، تلاش می‌شود سال‌های تر و خشک شناسایی شوند تا مدیریت پایدارتر حوزه‌های آبخیز امکان‌پذیر گردد. به طور کلی، خشکسالی را می‌توان به چهار نوع خشکسالی هواشناسی، کشاورزی، هیدرولوژیکی و خشکسالی اجتماعی اقتصادی دسته‌بندی کرد. خشکسالی‌ها به صورت کمبود آب در انواع مختلف، شامل موارد مربوط به بارش، رواناب و سطح رطوبت خاک، آشکار می‌شوند (Thomas et al., 2017). طبقه‌بندی‌های جدیدی در تحقیقات خشکسالی شامل خشکسالی زیست‌محیطی و خشکسالی آب‌های زیرزمینی مطرح شده است که فراتر از نقش خشکسالی هواشناسی است. به‌طوری که مطالعات اخیر نشان داده‌اند این دسته‌های جدید نقش مهمی در تحلیل جامع خشکسالی و پیامدهای آن در اکوسیستم‌ها و منابع آب دارند (Srivastava et al., 2025). همچنین در شاخص‌های خشکسالی، مجموعه‌ای از پارامترهای اقلیمی و هیدرولوژیکی از جمله درجه حرارت، بارش، مقدار برف و آب‌دهی رودخانه‌ها به کار گرفته می‌شود تا وضعیت خشکسالی در قالب مقادیری کمی و قابل مقایسه، به‌صورت جامع نمایش داده شود (Katneshwarkar & Kinouchi, 2022). شاخص استاندارد شده بارش (SPI)^۱ یکی از مناسب‌ترین و کاربردی‌ترین شاخص‌های پیشنهاد شده برای مطالعه خشکسالی و ترسالی است که امروز در سطح وسیعی در جهان مورد استفاده و پذیرش بسیاری از جوامع علمی قرار گرفته است (Salimi et al., 2021). توسعه‌ی شاخص چندمتغیره MSDI بر پایه‌ی ترکیب SPI و SSI^۲ با استفاده از توابع کاپولا نشان داد که ارزیابی مشترک شاخص‌های بارش و رطوبت خاک می‌تواند ویژگی‌های خشکسالی را با دقت بیشتری آشکار کند و نسبت به شاخص‌های تک‌متغیره، تصویر جامع‌تری از شدت و تداوم خشکسالی ارائه دهد (Guo et al., 2025). مطالعات جدید حاکی از آن است که خشکسالی هیدرولوژیکی تا حد زیادی تحت تأثیر خشکسالی هواشناسی قرار دارد و شاخص استاندارد شده بارش (SPI) در مقیاس‌های زمانی مختلف، همبستگی معناداری با شاخص‌های مبتنی بر جریان و رواناب نشان می‌دهد (Abu Arra et al., 2024). به عنوان مثال بررسی شاخص خشکسالی هیدرولوژیکی در لبنان حاکی از کاهش قابل‌توجه منابع آب سطحی در مقیاس‌های زمانی مختلف است (Tayara-Zobaida, 2023).

از آنجا که ترکیب متغیرهای هیدرولوژیکی تصویر کامل‌تری می‌دهد، تعیین توزیع بهینه SRI در کنار ارزیابی SSI می‌تواند نوسان‌های زمانی-مکانی خشکسالی را واقع‌گرایانه‌تر نشان دهد و با توجه به اینکه خشکسالی چندبعدی است و شاخص‌های منفرد تصویر کامل نمی‌دهند؛ SRI و SSI ابعاد متفاوتی را بازتاب می‌کنند (Katneshwarkar & Kinouchi, 2022). نتایج یک مطالعه اخیر درباره ویژگی‌های انتشار خشکسالی نشان داد که خشکسالی هیدرولوژیکی معمولاً در پی وقوع خشکسالی هواشناسی رخ می‌دهد و پاسخ منابع آب سطحی به کاهش بارش می‌تواند هم‌زمان یا با تأخیر زمانی بروز کند. این مطالعه تأکید می‌کند که الگوی زمانی انتقال خشکسالی از مرحله هواشناسی به هیدرولوژیکی تابع مقیاس زمانی شاخص‌ها و شرایط هیدرولوژیکی حوضه آبریز است (Hong et al., 2023).

^۱ Standardize Precipitation Index^۲ Standard Streamflow Index

(al., 2025) در مطالعه‌ای در چین SRI را از رواناب به عنوان شرایط از دست دادن استفاده کرده و سپس آن را با فرایند استانداردسازی ترکیب می‌کنند تا سری‌های SRI به دست آید نتایج همچنین نشان داد که در مناطق مرطوب، شاخص SRI پاسخ سریع‌تری به تغییرات کوتاه‌مدت بارش دارد و برای تلفیق خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی کارایی بالاتری ارائه می‌دهد (Li et al., 2025). al., 2025) توزیع‌های احتمال و مدل‌های آماری مبتنی بر سری زمانی رواناب و جریان، نقش کلیدی در شناسایی خشکسالی‌های هیدرولوژیکی داشته‌اند؛ به‌ویژه شاخص SRI به دلیل سادگی محاسبات و نیاز کمتر به داده‌های ورودی در مقیاس‌های زمانی مختلف کاربرد بیشتری دارد (Kartika & Wijayanti, 2023). در بررسی دوره‌های بازگشت خشکسالی، مشخص شد که شدت خشکسالی‌های شدید در توزیع انتخاب‌شده Pearson Type III با دقت بیشتری برآورد می‌شود (Parvizi et al., 2022). اما در این تحقیق از توزیع‌های دیگر استفاده شده است، در مطالعه‌ای با استفاده از شاخص‌های استانداردشده SRI، SSI، SPI و sETI، یک شاخص ترکیبی خشکسالی توسعه داده شد که قابلیت تلفیق مؤلفه‌های مختلف هواشناسی، هیدرولوژیکی و تبخیری را در یک ساختار تحلیلی مشترک فراهم می‌کند (Ali et al., 2022). مطالعات نشان می‌دهد که شاخص خشکسالی هیدرولوژیک SSI با شاخص خشکسالی SPI و با سایر شاخص‌های خشکسالی نیز ارتباط نزدیک دارد. مطالعه شاخص‌های SPEI و SSI در حوضه ناورود استان گیلان همبستگی ۹۹ درصد را نشان می‌دهد. با مقایسه شاخص‌های SPI، SPEI و SSI در حوضه‌های آبریز ليقوان، ناورود و سقز همبستگی بالای شاخص‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیک مشاهده شد (Salimi et al., 2021). بر اساس مطالعات اخیر، استفاده هم‌زمان از شاخص‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی نظیر SPI و SSI امکان تحلیل جامع‌تری از ویژگی‌های شدت، تداوم و انتشار خشکسالی را فراهم می‌کند همچنین نتایج نشان داد که به طور کلی با افزایش مقیاس زمانی، همبستگی بین مقادیر شاخص‌های SPI و SRI افزایش می‌یابد (Jahangir et al., 2022). تحقیقات اخیر از ترکیب شاخص‌های خشکسالی مانند SSI و SRI برای دسته‌بندی خشکسالی کشاورزی و ارزیابی تأثیر آن‌ها بر امنیت غذایی در مناطق مختلف استفاده کرده‌اند، مانند مطالعه‌ای که در مرکز هند انجام شده است (Katneshwarkar & Kinouchi, 2022). در مطالعات جدید، برای بررسی انتشار خشکسالی از شاخص‌های SPI و SRI در چارچوب‌های ناپایدار مثل GAMLSS استفاده شده و نشان داده‌اند که در اثر شاخص‌های اقلیمی بزرگ‌مقیاس و عناصر هواشناسی منطقه‌ای، شدت و مدت خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی و همچنین زمان انتشار بین آن‌ها به‌طور معنی‌داری تغییر می‌کند (Li et al., 2024). تحقیقات گذشته نشان داده‌اند که خشکسالی‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی تحت تأثیر تغییرات اقلیمی در مناطق مدیترانه‌ای و ایتالیا به طور قابل توجهی شدت و مدت زمان بیشتری دارند. استفاده از مدل‌های SWAT و شاخص‌های استاندارد شده مانند SRI و SPI به تحلیل و پیش‌بینی تغییرات خشکسالی و تأثیرات آن‌ها بر منابع آبی و کشاورزی کمک کرده است. استفاده از این روش برای بررسی خشکسالی هیدرولوژیک، مخصوصاً در حوزه‌هایی که از رواناب آنها برای تأمین آب شهری استفاده می‌شود، مناسب تشخیص داده شد (Tariq et al., 2024).

در این تحقیق جهت اطمینان از دقت مناسب مقادیر شاخص SRI در تخمین شدت و مدت خشکسالی، از آمار بلندمدت و با کیفیت رواناب ماهانه استفاده شد. باوجود اهمیت زیاد شاخص‌های هیدرولوژیک در مدیریت منابع آب ولی در کشور معمولاً برای پایش و بررسی خشکسالی از شاخص‌های خشکسالی هواشناسی استفاده می‌شود. لذا در این مطالعه نتایج حاصل از شاخص خشکسالی هیدرولوژیک SRI را با نتایج حاصل از شاخص خشکسالی هیدرولوژی SSI در حوزه آبخیز انزلی مقایسه شدند. در منطقه مورد مطالعه بیشتر به تأثیرات میزان بارش باران و در نتیجه بررسی شاخص خشکسالی EDI^۱ و SPI و SPEI^۲ توجه شده است که بهترین شاخص از نظر تحقیقات قبلی شاخص SPI شناخته شده است (Salimi et al., 2021). با توجه به اینکه منطقه انزلی از نظر اقلیمی در جلگه خزر قرار دارد و همچنین پر باران‌ترین شهر ایران است، در نتیجه انتخاب شاخص SRI به دلیل بررسی وضعیت رواناب‌ها

^۱ Effective Drought Index

^۲ Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index

شاخصی مهم برای منطقه بشمار می‌آید. هدف از این تحقیق بررسی و تطبیق دو شاخص SRI و SSI با رویکرد یافتن بهترین تابع توزیع تجمعی است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز تالش - تالاب انزلی را می‌توان به دو ناحیه مجزا از یکدیگر تقسیم کرد. قسمت اول که با نام حوضه آبریز تالش شناخته می‌شود در پایان ساحل غربی دریای خزر قرار داشته و مجموعه رودخانه‌های کوچکی را که مستقیماً به دریا می‌ریزند در برمی‌گیرد. این حوضه آبریز بین طول جغرافیایی $48^{\circ}35'$ تا $49^{\circ}43'$ درجه شرقی و عرض جغرافیایی $36^{\circ}54'$ تا $38^{\circ}27'$ درجه شمالی قرار گرفته است. مساحت این حوضه آبریز برابر 6827 کیلومتر مربع بوده که $64/4$ درصد آن را مناطق کوهستانی و $35/6$ درصد را نواحی کوهپایه و دشت تشکیل می‌دهد. حوضه آبریز در امتداد ساحل دریاچه واقع شده و از شمال به کشور آذربایجان، از غرب به حوضه‌های ارس و سفیدرود، از جنوب به مرداب انزلی و از شرق به دریای خزر محدود است. براساس برآوردهای حاصل از مجموعه‌ای از مدل‌های اقلیمی جهانی (CMIP5) و سناریوهای مختلف انتشار گازهای گلخانه‌ای RCP2/6، RCP4/5 و RCP8.5، پیش‌بینی می‌شود میانگین دمای سالانه منطقه در دوره $2021-2080$ نسبت به دوره مرجع $1967-2005$ افزایشی در حدود $1/6$ تا $2/7$ درجه سلسیوس داشته باشد. نتایج مدل‌سازی‌ها حاکی از کاهش میانگین بارش سالانه بوده و میزان این کاهش در حدود 10 تا 13 درصد برآورد شده است (Naderi & Saatsaz, 2020). در این حوضه آبریز شهرهای آستارا، هشتپر، اسالم و رضوان شهر در ناحیه تالش و شهرهای رشت، انزلی، فومن و صومعه سرا در ناحیه مرداب واقع شده‌اند. شکل (۱) نمایی کلی از منطقه مورد مطالعاتی را نشان می‌دهد.

در این مطالعه با استفاده از ده ایستگاه منتخب در حوضه آبریز انزلی - تالش اطلاعات مربوط به دبی منطقه از سازمان اطلاعات و آمار تهیه و تحلیل شده است. اطلاعات مربوط به ایستگاه‌ها به طور خلاصه در جدول (۱) آورده شده است.

شکل ۱- موقعیت مکانی بندر انزلی

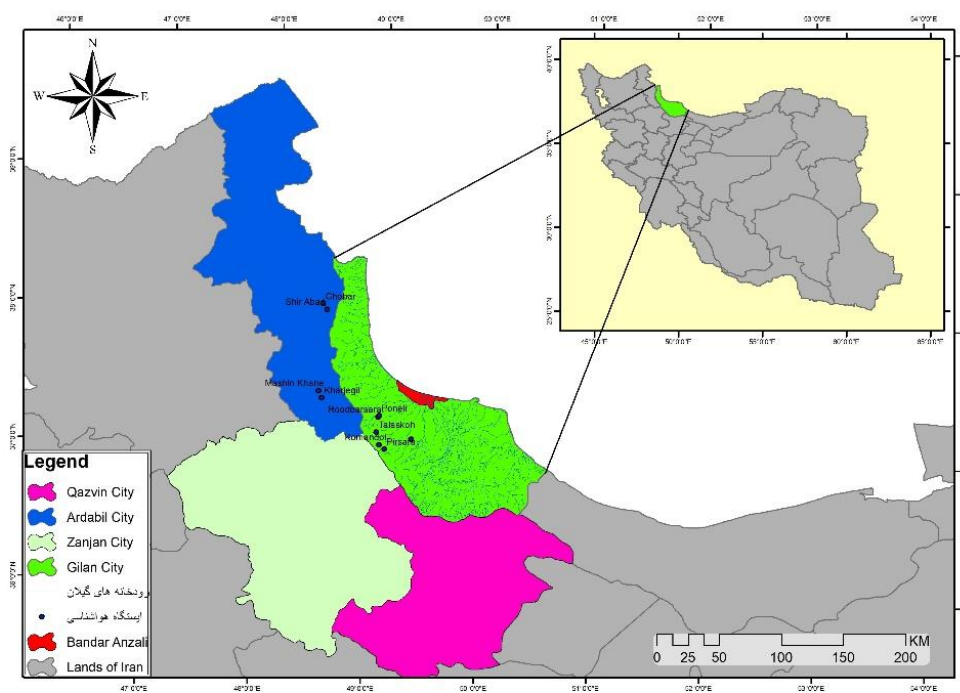


Fig. 1. Anzali watershed map

جدول ۱- مشخصات ایستگاه‌های هیدرومتری

Table 1. Specifications of hydrometric stations

نام ایستگاه	طول دوره آمار	ارتفاع	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی
سازمان آب	۱۳۶۶-۱۳۹۵	۵	۳۷-۱۵-۲۸	۴۹-۳۶-۴۶
رودبارسرا	۱۳۶۶-۱۳۹۵	۱۲۰	۳۷-۳۰-۱۵	۴۹-۰۵-۵۲
پونل	۱۳۶۶-۱۳۹۵	۸۵	۳۷-۳۱-۴۷	۴۹-۰۶-۱۹
خرجگیل	۱۳۶۶-۱۳۹۵	۱۴۰	۳۷-۴۲-۴۱	۴۸-۵۳-۴۴
ماشین خانه	۱۳۶۶-۱۳۹۵	۱۵۵	۳۷-۴۷-۴۲	۴۸-۵۰-۱۱
شیرآباد	۱۳۶۶-۱۳۹۵	-۵	۳۸-۰۶-۲۹	۴۸-۵۴-۰۸
چوبر	۱۳۶۶-۱۳۹۵	۸۵	۳۸-۱۰-۱۹	۴۸-۵۰-۵۸
پیرسرا	۱۳۶۶-۱۳۹۵	۲۱۰	۳۷-۰۸-۱۹	۴۹-۱۲-۳۴
کمدول	۱۳۶۶-۱۳۹۵	۲۶۰	۳۷-۱۰-۱۹	۴۹-۰۷-۴۶
طاسکوه	۱۳۶۶-۱۳۹۵	۱۵۰	۳۷-۱۹-۵۷	۴۹-۰۴-۱۹

۲-۲- روش محاسبه SRI و SSI

شاخص رواناب استاندارد شده SRI و شاخص جریان سطحی استاندارد شده SSI برای کنترل خشکسالی هیدرولوژیکی هستند. این شاخص‌ها توسط (Shukla & Wood, 2008) و (Bloomfield et al., 2015) ارائه شده است. SRI و SSI با استفاده از روشی مشابه با روش محاسبه SPI که جز شاخص‌های متداول است، محاسبه می‌شوند (McKee et al., 1993). با این تفاوت که میزان دبی جایگزین بارندگی می‌شود. SPI یک شاخص خشکسالی هواشناسی است که از سوابق بارش بلند مدت تخمین زده شده است (McKee et al., 1993). روش محاسبه SPI از طریق رابطه (۱) به شرح زیر است:

$$SPI = \frac{x_i - \bar{x}}{sx} \quad (1)$$

در این رابطه x_i مقادیر بارندگی در هر ماه، $\bar{x}$ مقدار میانگین بارندگی و sx انحراف معیار بارندگی در مقیاس زمانی معین است. شاخص SRI از طریق رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

اگر $(0 < H(x) \leq 0/5)$:

$$SRI = - \left[t - \frac{C_0 + C_1 t + C_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right]$$

$$t = \sqrt{\ln \left(\frac{1}{H(x)^2} \right)}$$

(۲)

اگر $(0/5 < H(x) \leq 1)$:

$$SRI = + \left[t - \frac{C_0 + C_1 t + C_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right]$$

$$t = \sqrt{\ln \left(\frac{1}{(1 - H(x))^2} \right)}$$

که در روابط فوق C و d مقادیر ثابت بوده و شامل

$$C_0 = 2/535537, d_0 = 3/432788, C_1 = 0/802853$$

$$d_1 = 0/1892, c_2 = 0/30328, d_2 = 0/0338$$

است. $H(X)$ ، تابع احتمال تجمعی است. مقدار به دست آمده شاخص SRI با استفاده از جدول (۲) تحلیل می‌شود.

جدول ۲- طبقه‌بندی خشکسالی براساس شاخص SRI (Zhang et al., 2025)

Table 2. Classification of drought based on SRI index

SRI	وضعیت
$2 \leq$	مرطوب شدید
$1/5 - 1/99$	بسیار مرطوب
$1 - 1/49$	نسبتاً مرطوب
$0/99 - -0/99$	نزدیک نرمال
$-1 - -1/49$	نسبتاً خشک
$-1/5 - -1/99$	بسیار خشک
$-2 > =$	خشکسالی شدید

در این بررسی به منظور یافتن بهترین تابع توزیع احتمالاتی ابتدا مقدار شاخص SRI، با استفاده از توزیع گاما، نرمال و ویبول محاسبه شده است. سپس با بهره‌گیری از مقادیر خطای جذر میانگین مربعات RMSE، خطای میانگین مربعات MSE، میانگین مطلق خطا MAE و میزان همبستگی تابع توزیع مناسب انتخاب شد. بهترین تابع توزیع تابعی است که میزان خطای کمتری دارد. بر این اساس بهترین تابع توزیع، با کمترین MSE، MAE و ضریب همبستگی نزدیک ۱ است. نتیجه در جدول (۴) آورده شده است. رابطه محاسبه آنها به ترتیب در روابط (۳، ۴، ۵) آورده شده است.

$$RMSE = \sqrt{\left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{Obs} - Q_i^{Sim})^2}{N} \right]} \quad (3)$$

$$\rho = \frac{[\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(\hat{X}_i - \bar{\hat{X}})]^2}{[\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (\hat{X}_i - \bar{\hat{X}})^2]} \quad (4)$$

$$MAE = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n |X_i - x| \quad (5)$$

تابع چگالی گاما، از رابطه (۶) به دست می‌آید (Abramowitz et al., 1965).

$$f(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \gamma^\alpha} x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} \quad x > 0 \quad (6)$$

مقدار متغیر X در این پژوهش داده‌های بارش، γ (α) پارامتر تابع گاما، $1/46 \geq \alpha$ پارامتر شکل و β پارامتر مقیاس است به ترتیب از طریق رابطه‌های (۷ تا ۹) محاسبه می‌شوند.

$$\gamma(\alpha) = \int_0^\infty y^{\alpha-1} e^{-y} dy \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{1}{4A} \left[1 + \sqrt{\frac{4A}{3}} \right] \quad (8)$$

$$\quad (9)$$

$$A = \ln(x) - \frac{\sum(\ln x)}{n}$$

$$\beta = \frac{x}{\alpha}$$

n = تعداد مشاهدات بارش، F_x = تابع توزیع تجمعی، احتمال تجمعی گاما از رابطه (۱۰) محاسبه می‌شود.

$$F_x = \int_0^x f(x) dx = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} dx \quad (10)$$

تابع تجمعی گاما برای داده‌های مساوی با صفر صدق نمی‌کند. برای همین موضوع میزان F_x تجمعی از رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود.

$$H_x = q + (1 - q)F_x \quad (11)$$

در این رابطه، H_x تابع تجمعی کل و q احتمال مقادیر صفر است. اگر m تعداد مقادیر بارندگی باشد که در سری زمانی احتمال آن صفر است، آن‌گاه مقدار q برابر با رابطه (۱۲) خواهد بود.

$$q = \frac{m}{n} \quad (12)$$

توابع (۱۳) تا (۱۵) توابع توزیع به کار رفته در این پژوهش شامل تابع نرمال گوسی، ویبول را نشان می‌دهد.

$$f(x) = \frac{1}{x\delta\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2\delta} \left(\frac{\ln x - \ln \alpha}{\delta} \right)} \quad (13)$$

$$\ln \alpha = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \ln X_i \quad (14)$$

$$f(x) = x^{(\alpha-1)} e^{(-\frac{\alpha}{\beta})} \quad (15)$$

$$F(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int x^{(\alpha-1)} e^{(-\frac{\alpha}{\beta})} \quad (15)$$

مقدار SSI نیز از رابطه شماره (۱۶) به شرح زیر محاسبه می‌شود و برای تحلیل شرایط از منظر این شاخص از جدول شماره (۳) استفاده می‌شود.

$$SSI = W - \frac{C_0 + C_1 W + C_2 W^2}{1 + d_1 W + d_2 W^2 + d_3 W^3} \quad (16)$$

$$W = \sqrt{-2 \ln p}$$

$$P = 1 - F(x) \quad P < 0.5$$

$$P = F(x) \quad P > 0.5$$

جدول ۳- طبقه‌بندی خشکسالی براساس شاخص SSI (Guo et al., 2025)

Table3. Classification of drought based on SSI index

SSI	وضعیت
$1/46 \leq$	ترسالی شدید
$0/52 - 1/46$	ترسالی ملایم
$-0/52 - 0/52$	نرمال
$-0/52 - -1/46$	خشکسالی ملایم
$-0/46 >$	خشکسالی شدید

۳- نتایج و بحث

با استفاده از جدول شماره (۴) و بهره‌گیری از خطاهای MAE, RMSE, MSE و میزان همبستگی بین میزان شاخص با توابع توزیع مختلف، بهترین تابع توزیع برای تمام ایستگاه‌ها تابع توزیع گاما برآورد شده است زیرا ضریب همبستگی به یک نزدیک و یا مساوی یک و میانگین مربعات خطا و قدر مطلق خطا نیز به صفر نزدیک بوده است.

با توجه به شکل (۲)، می‌توان مشاهده کرد که شاخص SSI و SRI همواره تحلیل یکسان از وضعیت منطقه دارند. شکل (۲) رفتار دو شاخص SRI و SSI را برای دو ایستگاه طاسکوه و شیرآباد نشان می‌دهد و امکان بررسی همخوانی این دو شاخص را در بازه زمانی مطالعه فراهم می‌کند. آنچه از این شکل مشخص است، هم‌جهتی تغییرات در بیشتر سال‌هاست؛ به این معنا که سال‌هایی که یکی از شاخص‌ها به سمت مقادیر منفی حرکت کرده، شاخص دیگر نیز عمدتاً همان الگو را بازتاب داده است. این موضوع از نظر تحلیلی مهم است، زیرا نشان می‌دهد با وجود تفاوت در ساختار محاسباتی و جزئیات استانداردسازی، هر دو شاخص در شناسایی دوره‌های غالب خشک و تر در مقیاس سالانه عملکرد مشابهی دارند. در عین حال، شکل (۲) نشان می‌دهد که یکسان بودن روند به معنی یکسان بودن دامنه تغییرات نیست؛ در برخی سال‌ها اختلاف دامنه بین SSI و SRI بیشتر است.

شکل (۳) تغییرات شاخص SRI را بر اساس توزیع گاما برای تمامی ایستگاه‌های حوزه آبخیز انزلی نمایش می‌دهد. مطابق این شکل، مقادیر شاخص در بیشتر سال‌ها در محدوده نرمال تا نسبتاً خشک قرار داشته و وقوع خشکسالی‌های شدید به صورت گسترده در سطح حوزه مشاهده نمی‌شود. در عین حال، برخی سال‌ها با کاهش هم‌زمان مقادیر SRI در چند ایستگاه همراه بوده‌اند که نشان‌دهنده بروز دوره‌های خشکسالی نسبتاً فراگیر در حوزه است. همچنین، بروز مقادیر حدی در برخی ایستگاه‌ها بیانگر تأثیر شرایط محلی بر شدت پاسخ شاخص و ناهمگنی مکانی خشکسالی در منطقه می‌باشد. بر اساس بهترین تابع توزیع (گاما) در شکل (۳) می‌توان نتیجه گرفت در منطقه حوزه آبخیز انزلی در طی سی سال، خشکسالی شدید رخ نداده است. این وضعیت در حالی است که ایستگاه خرچگیل در سال ۶۹ تجربه خشکسالی شدید را داشته که در طی ۳۰ سال برای منطقه بی‌سابقه بوده است. این موضوع در حالی است که اکثر ایستگاه‌ها در سال ۷۲ تا ۷۵ و سال ۷۶ از وضعیت نرمال به سمت خشک فاصله گرفته‌اند. همچنین تمام ایستگاه در سال ۸۵ شرایط نسبتاً خشک، با میزان شاخص SRI حدوداً $(-1/25)$ را تجربه کرده‌اند که در شکل (۴) شرایط منطقه در این سال آورده شده است. در سال ۹۰ نیز شرایط منطقه به سمت خشکی نسبی پیش رفته است. در مقابل، ایستگاه طاسکوه در سال ۶۷ وضعیت ترسالی شدید را تجربه کرده و در سال ۷۲ نیز در کل منطقه شرایط پرآبی مشاهده شده است. همچنین، بر اساس نتایج بررسی‌ها، در سال ۹۳ شرایط منطقه بیانگر مرحله پایانی خشکسالی‌های چندساله پیشین بوده است که وضعیت ایستگاه‌ها در این سال در شکل (۵) به‌وضوح نمایش داده شده است.

شکل ۲- مقایسه تطبیقی مقادیر توزیع‌های شاخص‌های SRI و SSI برای حوزه آبخیز انزلی (ایستگاه طاسکوه و شیرآباد).

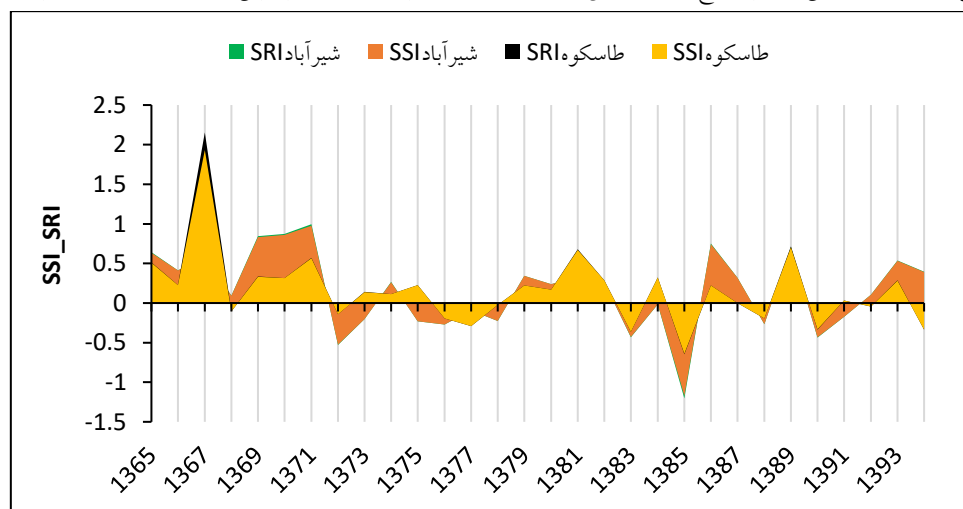


Fig. 2. Comparative comparison of SRI and SSI index distribution values for Anzali watershed

شکل ۳- مقادیر شاخص SRI بر اساس توزیع گاما برای حوزه آبخیز انزلی (تمام ایستگاه‌ها)

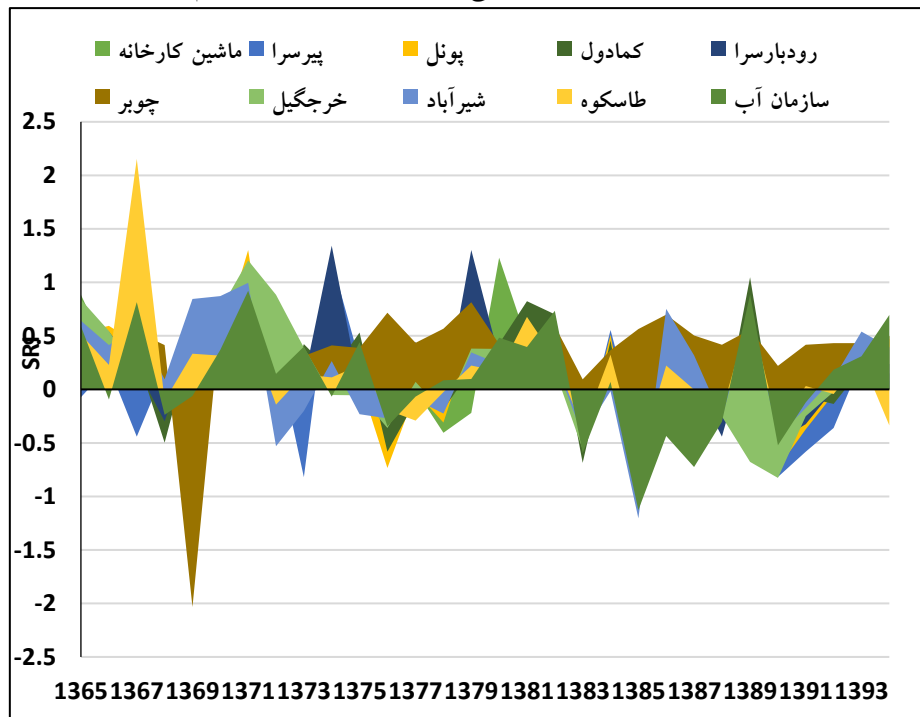


Fig. 1. SRI index values based on gamma distribution for Anzali watershed (all stations)

شکل ۴- نقشه پهنه‌بندی شاخص خشکسالی SRI در سال ۱۳۹۳ (درونیابی IDW)

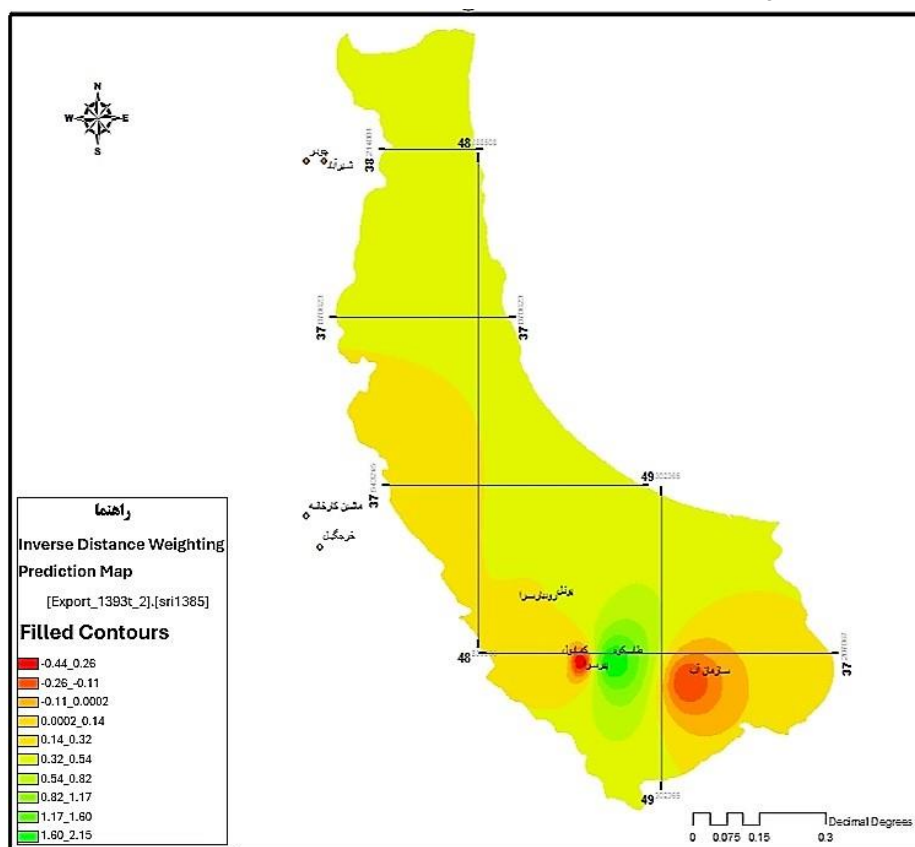


Fig. 4. Spatial zoning map of the SRI drought index in 2014 (IDW interpolation)

در سال ۱۳۹۳ بخش عمده‌ای از حوزه آبخیز انزلی در محدوده شرایط نرمال تا نسبتاً خشک قرار داشته است. شدت خشکسالی در نواحی مرکزی و بخش‌هایی از دشت ساحلی بیشتر بوده که می‌تواند ناشی از کاهش رواناب و افزایش برداشت آب در این مناطق باشد.

شکل ۵- نقشه پهنه‌بندی شاخص خشکسالی SRI در سال ۱۳۸۵ (درونیابی IDW)

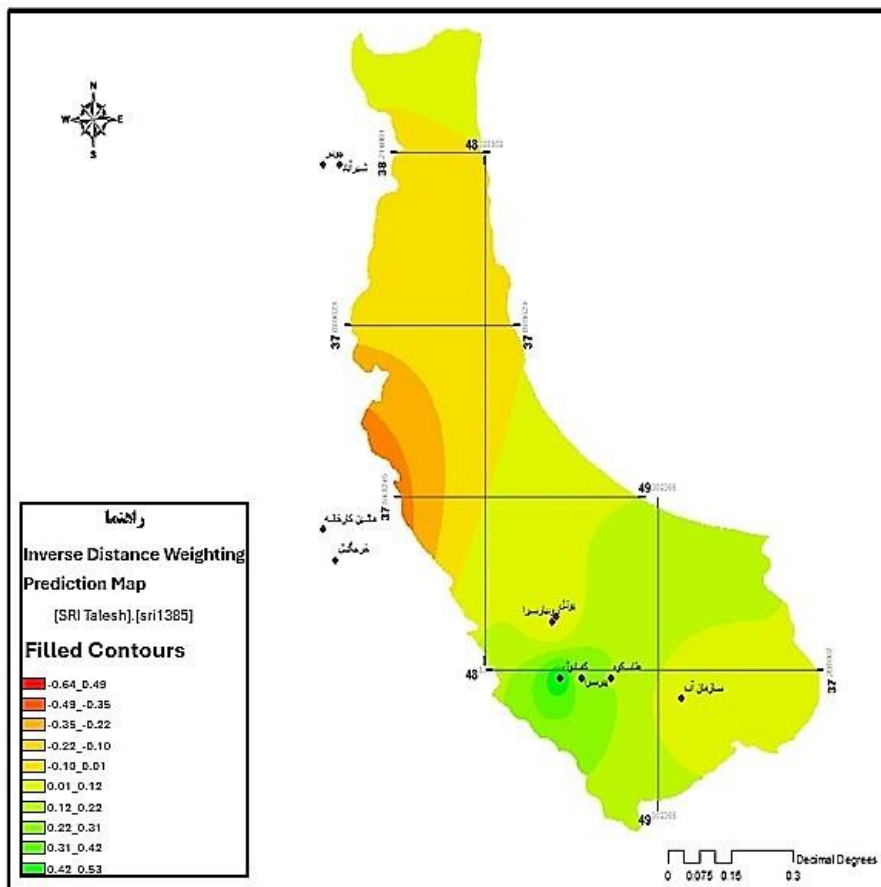


Fig. 5. Spatial zoning map of the SRI drought index in 2006 (IDW interpolation)

جدول ۴- مقایسه توابع توزیع تجمعی برای محاسبه SRI

Table 4. Comparison of cumulative distribution functions for calculating SRI

گاما - نرمال				ویبول - نرمال				ویبول - گاما				نام ایستگاه
COR	MAE	RMSE	MSE	COR	MAE	RMSE	MSE	COR	MAE	RMSE	MSE	
۰/۹۹۶۸	۰/۴۲۵۸	۰/۵۰۰۷	۰/۲۵۰۷	۰/۹۹۳	۰/۸۷۲۶	۱/۰۵۸۹	۱/۱۲۱۲	۰/۹۹۹۴	۰/۴۷۴۶	۰/۵۹۱۷	۰/۳۵۰۱	سازمان آب
۰/۹۸۸۹	۰/۴۱۳۶	۰/۵۳۱۱	۰/۲۸۲۱	۰/۹۷۹۴	۰/۶۸۴۲	۰/۹۰۵۰	۰/۸۱۹۱	۰/۹۹۸۵	۰/۳۱۶۱	۰/۴۰۸۴	۰/۱۶۶۸	رودبارسرا
۰/۹۹۵۱	۰/۳۹۵۳	۰/۵۰۷۲	۰/۲۵۷۲	۰/۹۹۰۵	۰/۸۰۲۷	۱/۰۱۹۲	۱/۰۳۸۸	۰/۹۹۹۲	۰/۴۰۸۰	۰/۵۳۰۷	۰/۲۷۱۶	پونل
-۰/۵۸۳	۱/۵۰۳	۱/۸۰۷	۳/۲۶۸	۰/۵۶۸	۰/۸۲۰	۰/۹۶۶	۰/۹۳۴	-۰/۹۹۷	۱/۰۵۸	۱/۲۵۴	۱/۵۷۲	خرجگیل
۰/۹۹۲۶	۰/۴۱۳۶	۰/۵۱۷۳	۰/۲۶۷۶	۰/۹۸۵۸	۰/۷۶۶۱	۰/۹۶۴۴	۰/۹۳۰۰	۰/۹۹۸۹	۰/۳۵۴۴	۰/۴۵۳۶	۰/۲۰۵۸	ماشین‌خانه
۰/۹۹۰۷	۰/۴۴۵۳	۰/۵۲۶۱	۰/۲۷۶۸	۰/۹۳۸۰	۰/۷۷۰۷	۰/۹۳۸۰	۰/۸۷۹۸	۰/۹۹۸۶	۰/۳۳۷۵	۰/۴۲۱۱	۰/۱۷۷	شیرآباد
۰/۸۵۳۳	۰/۶۱۴۰	۰/۷۳۸۴	۰/۵۴۵۳	۰/۷۹۳۴	۰/۶۴۱۸	۰/۸۲۱۰	۰/۶۷۴۰	۰/۹۹۴۴	۰/۲۷۶۹	۰/۳۱۷۹	۰/۱۰۱۰	چوبر
۰/۹۹۵۱	۰/۳۹۱۷	۰/۵۰۸۵	۰/۲۵۸۴	۰/۹۹۰۶	۰/۷۸۹۶	۱/۰۰۹۰	۰/۰۱۸۰	۰/۹۹۹۲	۰/۴۰۰۶	۰/۵۱۵۴	۰/۲۶۵۷	پیرسرا
۰/۹۹۶۳	۰/۴۲۳۳	۰/۵۰۶۸	۰/۲۵۶۹	۰/۹۹۲۸	۰/۸۴۳۲	۱/۰۱۵۲	۱/۰۳۰۶	۰/۹۹۹۴	۰/۴۲۱۰	۰/۵۲۴۴	۰/۲۷۵۰	کمدول
۰/۹۸۱۰	۰/۳۵۰۳	۰/۵۳۸۴	۰/۲۸۹۹	۰/۹۶۴۴	۰/۴۸۴۸	۰/۹۰۲۵	۰/۸۱۴۵	۰/۹۹۷۴	۰/۳۳۶۵	۰/۴۸۶۱	۰/۲۳۶۳	طاسکوه

۴- نتیجه‌گیری

هدف اصلی این تحقیق، مقایسه شاخص‌های خشکسالی SRI و SSI و انتخاب بهترین تابع توزیع برای ارزیابی خشکسالی‌ها در حوزه آبخیز انزلی بود. نتایج نشان داد که توزیع گاما بهترین انتخاب برای مدل‌سازی خشکسالی در این منطقه است. این انتخاب بر اساس تحلیل خطاهایی مانند RMSE، MSE و MAE صورت گرفت که نشان‌دهنده کمترین خطا و بیشترین تطابق با داده‌های واقعی بود. همچنین، مقایسه بین شاخص‌های SRI و SSI نشان داد که این دو شاخص روند مشابهی از وضعیت خشکسالی در حوزه آبخیز انزلی دارند، با این تفاوت که SRI به دلیل پایه‌گذاری آن بر رواناب و توانایی بیشتر در تحلیل دقیق‌تر خشکسالی در مقیاس‌های زمانی مختلف، تحلیل بهتری از وضعیت خشکسالی ارائه می‌دهد. این تحقیق همچنین به بررسی خشکسالی‌ها در حوزه آبخیز انزلی در طول ۳۰ سال گذشته پرداخته است. نتایج نشان داد که خشکسالی‌های شدید در این مدت تنها در ایستگاه خرجگیل در سال ۲۰۱۶ مشاهده شده است و سایر ایستگاه‌ها به‌ویژه در دهه‌های ۱۹۷۰ تا ۱۹۸۰ و ۲۰۰۵ شرایط خشکسالی نسبی را تجربه کرده‌اند. باوجود نتایج دقیق، این تحقیق با محدودیت‌هایی مواجه بود از جمله: دسترسی محدود به داده‌های هیدرومتری در برخی ایستگاه‌ها که باعث می‌شود پیش‌بینی‌ها در برخی مناطق دقت کمتری داشته باشد و در برخی ایستگاه‌ها به‌ویژه در ایستگاه‌های مرزی، به دلیل کمبود داده‌های دقیق، نتایج مدل‌سازی با خطای نسبی مواجه شد.

نتایج این تحقیق می‌تواند در مدیریت منابع آبی و کشاورزی در حوزه آبخیز انزلی و مناطق مشابه به طور گسترده‌ای مفید باشد. استفاده از شاخص‌های SRI و SSI برای تحلیل وضعیت خشکسالی‌ها و پیش‌بینی‌های آینده می‌تواند به مدیران منابع آب کمک کند تا برنامه‌های دقیق‌تری برای مدیریت خشکسالی و توسعه کشاورزی پایدار طراحی کنند. این تحقیق می‌تواند برای تحلیل تأثیرات تغییرات اقلیمی بر خشکسالی‌ها و نوسانات منابع آبی نیز کاربردی باشد.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

دسترسی به داده‌ها

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

مشارکت نویسندگان

محمد حسین جهانگیر: نگارش، روش‌شناسی، تحقیق و جمع‌آوری داده‌ها و نرم‌افزار. تمامی نویسندگان: تحلیل، راهنمایی و نظارت، ویرایش متن، تکمیل و جمع‌آوری داده‌ها.

منابع

- Abramowitz, M., Stegun, I.A. & Miller, D. (1965). Handbook of mathematical functions with formulas, graphs and mathematical tables (National Bureau of Standards Applied Mathematics Series No. 55), *Journal of Applied Mechanics*, 32(1). <https://doi.org/10.1115/1.3625776>
- Abu Arra, A., Alashan, S., & Şişman, E. (2024). Trends of meteorological and hydrological droughts and associated parameters using innovative approaches. *Journal of Hydrology (Amst)*, 640:131661. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131661>
- Ali, M., Ghaith, M., Wagdy, A., & Helmi, A. M. (2022). Development of a new multivariate composite drought index for the Blue Nile River Basin. *Water (Switzerland)*, 14(6). <https://doi.org/10.3390/w14060886>
- Bloomfield, J.P., Marchant, B. P., Bricker S. H., & Morgan, R. B. (2015). Regional analysis of groundwater droughts using hydrograph classification. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(10). <https://doi.org/10.5194/hess-19-4327-2015>
- Guo, L., & et al. (2025). Developing a multivariate drought index to assess drought characteristics based on the SWAT-Copula method in the Poyang Lake basin, China. *Ecol Indic*, 170. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113123>

- Hong, D. U., Sidong, Z., Xiaofu, W. E. I., Haojie, L. I. U., & Jun, X. I. A. (2025). Study on propagation characteristics from meteorological drought to hydrological drought in the Jialing River Basin. *Water Resources Protection*, 41(3): 134–143.
- Huang, K., Zhang, H., Cui, G., Wang, Y., Yin, M., & Du, J. (2026). Drought propagation in china: Uncertainties originate more from dataset choice than drought index selection. *Atmos Res*, 330:108555. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2025.108555>
- Jahangir, MH., Kaleshani, F., & Sataryanasil, K. (2022). Soil management and modeling, “comparative study of drought meteorological (SPI) and hydrological (SSI) indices based on the best cumulative distribution function for Urmia Basin. 2:53–63. <https://doi.org/10.22098/MMWS.2022.10810.1089>
- Kartika, F. D., & Wijayanti, P. (2026). Drought disaster modeling using drought index: a systematic literature review,” *IOP Conference Ser Earth Environment Science*, 1190(1): 12026. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1190/1/012026>
- Katneshwarkar, B., & Kinouchi, T. (2022). Integration of multiple drought indices for agriculture drought categorization and impact assessment in central India. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-3286>
- Li, Z., Lu, E., Tu, J., & Yuan, D. (2024). Historical and future changes in meteorological–hydrological compound drought in China. *Atmosphere* (Basel), 15(12). <https://doi.org/10.3390/atmos15121459>
- Li, X., Zhang, X., Hong, X., Ni, Z., & Jiang, C. (2025). A novel approach for the estimation of hydrological drought index incorporating precipitation-runoff relationship. *Journal of Hydrology* (Amst), 653:132734. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.132734>
- McKee, T.B., Nolan, J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales, *Preprints, Eighth Conf. on Applied Climatology, Amer. Meteor. Soc.* [Preprint].
- Naderi, M., & Saatsaz, M. (2020). Impact of climate change on the hydrology and water salinity in the Anzali Wetland, northern Iran. *Hydrological Sciences Journal*. 65(4): 552–570. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1704761>
- Parvizi, S., Eslamian, M., Gheysari, A., Gohari, & Kopai, S. S. (2022). Regional frequency analysis of drought severity and duration in Karkheh river basin, Iran using univariate L-moments method. *Environ Monitoring Assessment* 194(5). <https://doi.org/10.1007/s10661-022-09977-8>
- Petersen-Perlman, J. D., Aguilar-Barajas, I., & Megdal, S. B. (2022). Drought and groundwater management: Interconnections, challenges, and policyresponses. *Current Opin Environment Science Health*, 28: 100364. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2022.100364>
- Salimi, H., Asadi, E., & Darbandi, S. (2021). Meteorological and hydrological drought monitoring using several drought indices. *Applied Water Science*, 11(2). <https://doi.org/10.1007/s13201-020-01345-6>
- Shukla, S., & Wood, A.W. (2008). Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. *Geophysical Research Letters*, 35(2). <https://doi.org/10.1029/2007GL032487>
- Srivastava, A., Pandey, A., & Maity, R. (2025). Comparative multi-index analysis of existing drought typology and environmental droughts in a climate-stressed region. *Science Report*, 15(1): 34349. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-16859-9>
- Tariq, M., Rohith, A. N., Cibin, R., Aruffo, E., Abouzied, G. A. A., & Di Carlo, P. (2024). Understanding future hydrologic challenges: Modelling the impact of climate change on river runoff in central Italy. *Environmental Challenges*, 15: 100899. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.100899>
- Tayara-Zobaida, E. (2023). Hydrologic drought characteristics of selected basins in various climate zones of Lebanon, meteorology hydrology and water management. *Research and Operational Applications*, 11(2): 1–24. <https://doi.org/10.26491/mhwm/174194>
- Thomas, B. F., Famiglietti, J. S., Landerer, F. W., Wiese, D. N., Molotch, N. P., & Argus, D. F. (2017). GRACE groundwater drought index: Evaluation of California Central Valley groundwater drought. *Remote Sensing of Environment*, 198. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.026>
- Yang, P., Xia, J., Zhang, Y., Zhan, C., & Qiao, Y. (2018). Comprehensive assessment of drought risk in the arid region of Northwest China based on the global palmer drought severity index gridded data. *Science of the Total Environment*, 627. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv>
- Zhang, X., et al. (2025). Study on the probability of meteorological-to-hydrological drought propagation based on a bayesian network. *Land* (Basel). 14(3): 445. <https://doi.org/10.3390/land14030445>