




Evaluation and Monitoring of Meteorological Drought and Its Trend Analysis in Urmia County

Afrazfar, R.¹  | Abasalinezhad, H.²  | Simai, E.³ 

1. Master's degree in Applied Meteorology, Expert at Shahid Bakeri Airport, Urmia, Iran.
2. Master's degree, Applied Meteorology, Head of the Agricultural Meteorological Research Station, Urmia University, Urmia, Iran.
3. Master's degree, Meteorology, Director General of Meteorology of West Azerbaijan Province, Urmia Iran.

Corresponding Author E-mail: h-alinezhad@irimo.ir

(Received: 09 Mar 2025, Accepted: 08 Jun 2025, Published online: 23 Sep 2025)

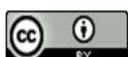
Abstract

This study aims to analyze rainfall trends and evaluate and monitor drought conditions in Urmia County. The DIP software was used to calculate meteorological drought indices, and the values of these indices for Urmia County were estimated and analyzed over a 30-year period from 1994 to 2023. The observational results from the charts indicate that the SPI, CZI, and ZSI indices exhibit almost similar trends and behave similarly in drought assessment. Given these findings, the CZI and ZSI indices can be considered as alternatives to the SPI index, which is recommended by the World Meteorological Organization, for drought studies in Urmia County. After selecting the most suitable indices, the drought trend analysis was conducted using the Mann-Kendall and Sen's slope tests. The trend analysis based on SPI, ZSI, and CZI indices indicated an increasing trend for all three indices; however, no significant trend was observed in the variations of these indices over the period from 1994 to 2023. These results suggest that drought in this region does not follow a specific pattern of increase or decrease and that its variations are primarily influenced by short-term climatic fluctuations.

Keywords: Meteorological drought, Urmia County, trend analysis, Mann-Kendall, Sen's slope

Cite this article: Afrazfar, R., Abasalinezhad, H. and Simai, E. (2025). Evaluation and Monitoring of Meteorological Drought and Its Trend Analysis in Urmia County. (e222781). *Nivar*, 49(130-131), 39-61, e222781 doi: 10.30467/nivar.2025.511461.1326

E-mail: (1) rafrazfar@gmail.com (3) Esmaeil_Simai@yahoo.com



ارزیابی و پایش خشکسالی هواشناسی و تحلیل روند آن در شهرستان ارومیه

روزبه افزافر^۱ | حامد عباسعلی نژاد^۲ | صمد حمزه ثنی^۳

۱. کارشناسی ارشد آب و هواشناسی کاربردی، کارشناس فرودگاه شهید باکری ارومیه، ارومیه، ایران.
۲. کارشناسی ارشد، آب و هواشناسی کاربردی، مسئول ایستگاه تحقیقات هواشناسی کشاورزی دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران.
۳. کارشناسی ارشد، هواشناسی، مدیر کل هواشناسی استان آذربایجان غربی، ارومیه، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: h-alinezhad@irimo.ir

(دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱۹، پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۸، انتشار آنلاین: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱)

چکیده

این مطالعه با هدف ارزیابی و پایش خشکسالی و بررسی روند شاخص‌های خشکسالی در شهرستان ارومیه انجام شده است. در این تحقیق از نرم افزار DIP برای محاسبه شاخص‌های خشکسالی هواشناسی استفاده شده است و ارزش این شاخص‌ها برای شهرستان ارومیه در بازه زمانی ۳۰ ساله، از سال ۱۳۷۳ تا ۱۴۰۲ برآورد و تحلیل شده است. نتایج مشاهداتی نمودارها نشان می‌دهد که شاخص‌های SPI، CZI و ZSI تقریباً روند، رفتار و عملکردی مشابه در بررسی خشکسالی هواشناسی برای شهرستان ارومیه را دارند. پس از انتخاب شاخص‌های برتر، بررسی روند خشکسالی با آزمون‌های من-کندال و شیب سن در شهرستان ارومیه انجام شد که بر اساس روند شاخص‌های SPI، ZSI و CZI نشان داد که روند هر سه شاخص صعودی است، اما روند معناداری در تغییرات این شاخص‌ها طی دوره ۱۳۷۳ تا ۱۴۰۲ مشاهده نمی‌شود. این نتایج حاکی از آن است که خشکسالی در این منطقه الگوی خاصی از افزایش یا کاهش نداشته و تغییرات آن بیشتر تحت تأثیر نوسانات کوتاه‌مدت اقلیمی قرار گرفته است.

کلیدواژه‌ها: خشکسالی هواشناسی، شهرستان ارومیه، تحلیل روند، من-کندال، شیب سن

۱. مقدمه

خشکسالی، شناسایی، نظارت و برخورد مؤثر با آن را بسیار سخت و دشوار می‌سازد و بسیاری از آثار آن تا زمانی که به شدت نمایان نشوند، نادیده باقی می‌مانند. مشابه دیگر بلاهای طبیعی، خشکسالی بر جنبه‌های مختلف زندگی، اعم از اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی تأثیر می‌گذارد، تولیدات کشاورزی را مختل کرده، منابع آبی را تهدید می‌کند و اکوسیستم‌ها را در معرض خطر قرار می‌دهد (Leng et al. 2022; Zeng et al. 2023). این تأثیرات با افزایش روزافزون نیاز به آب، که به واسطه رشد جمعیت، توسعه

افزایش شدت گرمایش جهانی باعث برهم خوردن تعادل آب و انرژی می‌شود، که این امر تعداد و شدت وقوع رویدادهای شدید آب‌وهوایی را نیز افزایش می‌دهد (Alessi et al. 2022; Tan et al. 2023). در میان این رویدادها، خشکسالی به‌عنوان یک پدیده طبیعی منحصربه‌فرد شناخته می‌شود که با شروع تدریجی، پیشرفت آهسته و تأثیرات وسیع فضایی، خود را متمایز کرده است. برخلاف بلاهای ناگهانی مانند سیل و طوفان، ماهیت پیش‌روندگی

استناد: افزافر، روزبه، عباسعلی نژاد، حامد و سیمائی، اسماعیل. (۱۴۰۴). ارزیابی و پایش خشکسالی هواشناسی و تحلیل روند آن در شهرستان ارومیه. (e222781). نیوار،

e222781 doi: 10.30467/nivar.2025.511461.1326, ۳۹-۶۱، (۱۳۰-۱۳۱) ۴۹

رایانامه: (۱) rafrzfar@gmail.com (۳) Esmail_Simaei@yahoo.com

ناشر: سازمان هواشناسی کشور.



DOI: <https://doi.org/10.30467/nivar.2025.511461.1326>

کشورها را آزار می‌دهد (Park et al., 2016). بر اساس یک مطالعه، خشکسالی سالانه بین ۶ تا ۸ میلیارد دلار خسارت اقتصادی در سراسر جهان ایجاد می‌کند که به طور قابل توجهی بیشتر از سایر بلاهای طبیعی است (He et al., 2021). طبق گزارش کمیسیون اروپا: مرکز تحقیقات مشترک و همکاران (۲۰۲۰)، پیش‌بینی می‌شود که خسارات اقتصادی ناشی از خشکسالی در اروپا با افزایش ۱/۵ درجه سانتی‌گراد دمای جهانی، تا ۱۷۰٪ افزایش یابد که ضرورت ایجاد و بهبود سیستم‌های دقیق نظارت و پیش‌بینی خشکسالی را به طور خاص برجسته می‌کند. نظارت جامع و دقیق، نه تنها به پاسخ‌گویی به موقع و تخصیص بهینه منابع کمک می‌کند، بلکه به تحلیل دقیق‌تر و درک عمیق‌تر ابعاد مختلف خشکسالی در بخش‌های مختلف اقتصادی، اجتماعی و محیط‌زیستی می‌پردازد (Terzi and Önöz, 2025). برای رشد پایدار در یک شرایط آب و هوای در حال تغییر، یادگیری بیشتر در مورد خشکسالی و بهبود پاسخ انسان به آن بسیار مهم است (Battisti and Naylor, 2009; Li et al., 2015; He et al., 2017; Pradhan et al., 2017; Hu et al., 2018).

چندین شاخص خشکسالی برای ردیابی شدت خشکسالی و وضعیت تأمین آب، توسعه یافته‌اند، که در شکل‌گیری برنامه‌های مؤثر برای مقابله با اثرات خشکسالی در آینده نقش مهمی دارند (Alley, 1984; Quiring & Papakryiakou, 2003; Yang et al., 2021). این شاخص‌ها با استفاده از داده‌های بارش بلافاصله توسعه یافته‌اند، از جمله شاخص بارش استاندارد شده (McKee et al., 1993)، شاخص استاندارد شده تبخیر-تعرق (Vicente-Serrano et al., 2010) (SPEI)، شاخص ناهنجاری پالمر (Palmer Drought Severity Index - PDSI) (Palmer, 1965) و شاخص Z-چین (Wu et al., 2001). در نشست سازمان جهانی هواشناسی

شهری و گسترش کشاورزی به وجود آمده است، تشدید می‌شود. با شدت گرفتن تغییرات اقلیمی و رشد تقاضای جهانی برای استفاده از منابع آبی، اثرات منفی خشکسالی‌ها نیز تشدید می‌شود و این امر چالش‌های بیشتری را برای کاهش تأثیرات خشکسالی به همراه دارد (AghaKouchak et al., 2014; Walker and Van Loon, 2023).

شروع خشکسالی یک پدیده تدریجی و پیچیده است (Gao et al., 2023). بنابراین می‌توان گفت خشکسالی یک اصطلاح نسبی است که بسته به ویژگی‌های مشاهدات، معیارهای عملیاتی و الگوهای آب‌وهوایی غالب، می‌تواند تعاریف مختلفی داشته باشد (Dracup et al., 1980; Islam et al., 2022). همچنین، خشکسالی می‌تواند به روش‌های مختلفی خود را نمایان کند (Park et al., 2016; Wilhite, 2007). بر اساس تکنیک‌های طبقه‌بندی پرکاربرد، خشکسالی را می‌توان به چهار نوع متمایز دسته‌بندی کرد: خشکسالی هواشناسی، خشکسالی کشاورزی، خشکسالی هیدرولوژیکی، و خشکسالی اجتماعی-اقتصادی (Heim, 2002; Mlynski et al., 2021; Shi et al., 2022; Yin et al., 2021).

کاهش یا عدم بارندگی، منجر به خشکسالی هواشناسی می‌شود (Gao et al., 2023)، به‌ویژه زمانی که شرایط آب‌وهوایی خشک در یک منطقه خاص غالب باشد (Mlynski et al., 2021). همچنین، خشکسالی هواشناسی طولانی‌مدت می‌تواند از طریق کاهش سطح رطوبت خاک، کاهش سطح آب‌های زیر زمینی و کاهش کیفیت آب‌های شیرین می‌تواند منجر به خشکسالی کشاورزی شود (Park et al., 2016). پیش‌بینی و ارزیابی خشکسالی، همراه با بررسی وضعیت فعلی آن، نیازمند آگاهی از جنبه‌های مختلف خشکسالی است (Park et al., 2016; Tadesse et al., 2005). مشکلات کشاورزی و کمبود آب بسیاری از

کسب ۲۱ امتیاز به عنوان بهترین شاخص منطقه انتخاب شد و شاخص‌های IN و IS نیز نتایج دقیقی ارائه دادند. زارعی و همکاران (۲۰۲۳) با استفاده از شاخص‌های SPI، RAI و ZSI به بررسی خشکسالی در خراسان رضوی طی ۲۷ سال پرداختند. نتایج نشان داد خشکسالی‌های شدید در شرق، مرکز و جنوب استان رخ داده است. ارزیابی شاخص‌های DHI، DVI، DEI و DRI نشان داد که بخش کشاورزی به دلیل وابستگی به ذخایر رطوبتی بیشترین آسیب را دیده و منابع آب منطقه در کوتاه‌مدت و میان‌مدت تحت تأثیر خشکسالی قرار گرفته‌اند. شمس‌نیا و همکاران (۲۰۲۳) با استفاده از شاخص SMDI و دو مدل AquaCrop و ET0 به بررسی تأثیر خشکسالی بر رطوبت خاک در ایستگاه زرقان طی ۳۰ سال (۲۰۲۲-۱۹۹۲) پرداختند. شاخص SMDI با شاخص‌های SPI و RDI مقایسه شد و نتایج نشان داد که شدیدترین خشکسالی‌ها در سال‌های ۲۰۱۰، ۲۰۱۱، ۲۰۱۶ و ۲۰۲۱ رخ داده است. بررسی همبستگی شاخص‌ها نشان داد RDI نسبت به SPI حساسیت بیشتری به شرایط اقلیمی دارد و برای ارزیابی خشکسالی در مناطق خشک و نیمه‌خشک مناسب‌تر است. ناتاراجان و همکاران (۲۰۲۳) عملکرد شش شاخص خشکسالی SPI، CZI، MCZI، DI، RAI، ZSI را در سه منطقه با شرایط اقلیمی متفاوت هند بررسی کردند. نتایج نشان داد SPI و CZI کمیت مشابهی از خشکسالی ارائه کردند، در حالی که RAI و ZSI شدت خشکسالی را بیشتر برآورد کردند. در نهایت، چارچوبی برای ارزیابی آسیب‌پذیری خشکسالی بر اساس شدت برآورد شده ارائه نمودند. فیصل و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از داده‌های CHIRPS و شاخص SPI خشکسالی کشاورزی را در غرب پایوآندونزی ارزیابی کردند. داده‌های بارش (۱۹۹۶-۲۰۱۹) از پنج ایستگاه اقلیمی جمع‌آوری شد. نتایج نشان داد شاخص خشکسالی از مرطوب تا شدید خشک متغیر بود و بیشترین شدت آن بین سپتامبر تا دسامبر رخ داد. دقت CHIRPS در مقایسه با داده‌های اقلیمی ۵۳٪ و همبستگی SPI با داده‌های اقلیمی $R^2 = 0.51$ گزارش شد. دهقانی و همکاران (۲۰۲۰) با استفاده از شاخص‌های DI، PNI، SPI، ZSI، CZI و MCZI خشکسالی را در الیگودرز طی دوره ۱۹۷۰-۲۰۱۸

در سال ۲۰۰۹، SPI به‌عنوان شاخص استاندارد جهانی برای پایش خشکسالی هواشناسی توصیه شد (Rezaei et al., 2024, Park et al., 2016; Wardlow et al., 2012). گوموش و همکاران (۲۰۲۵) با تحلیل داده‌های بارش ماهانه (۲۰۲۰-۱۹۵۰) در منطقه‌ای از ترکیه، خشکسالی را با هفت شاخص مختلف (SPI، RAI، PN، MCZI، DI، CZI) و ZSI پایش کردند، همچنین از طریق آزمون Mann-Kendall تحلیل روند شاخص‌ها را مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج نشان داد روند مثبتی به سمت افزایش رطوبت در تمام شاخص‌ها وجود دارد که به طور قابل‌توجهی منعکس‌کننده تغییرات آب و هوایی در منطقه است. آکتورک و همکاران (۲۰۲۴) با استفاده از روش L-moments خشکسالی‌های ۱۲ ماهه در حوضه Kızılırmak ترکیه را تحلیل کردند. داده‌های بارش (۲۰۲۰-۱۹۶۰) از ۲۲ ایستگاه جمع‌آوری و شاخص‌های SPI، CZI، MCZI بررسی شد. نتایج نشان داد منطقه از نظر خشکسالی همگن است و توزیع‌های GEV، PE3 و GLO بهترین برازش را دارند. همچنین آن‌ها دریافتند که نقشه‌های خشکسالی به‌دست‌آمده ابزاری مفید برای تخمین احتمال خشکسالی محسوب می‌شوند. کازانچی و همکاران (۲۰۲۴) در تحقیقی به ارزیابی عملکرد سه شاخص خشکسالی بارش استاندارد (SPI)، شاخص چین Z-CZI و شاخص اصلاح‌شده چین Z-MCZI برای پایش خشکسالی در مقیاس ماهانه از ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۱ در کشور عراق پرداختند آنها نتیجه گرفتند که SPI و CZI را می‌توان شاخص‌های خوبی برای توصیف خشکسالی در تمام مناطق عراق در نظر گرفت. امیری و همکاران (۲۰۲۴) با هدف ارزیابی شاخص‌های مناسب برای پایش خشکسالی هواشناسی در دشت الشتر، شاخص‌های ZSI، MCZI، CZI، ID، IN و IS را بر اساس داده‌های بارش سه ایستگاه (۲۰۲۱-۲۰۰۱) بررسی کردند. نتایج نشان داد که شاخص CZI با دقت بیشتر عملکرد بهتری نسبت به سایر شاخص‌ها دارد. همچنین، تحلیل همبستگی اسپیرمن بین بارش و شاخص‌های خشکسالی نشان داد که همبستگی مطلوبی بین تمامی شاخص‌ها برقرار است، به‌جز MCZI که عملکرد ضعیفی داشت. در نهایت، CZI با

تقریبی ۷۰ کیلومتر و عرض ۳۰ کیلومتر، در کنار دریاچه ارومیه و در موقعیت جغرافیایی ۳۷ درجه و ۳۳ دقیقه عرض شمالی و ۴۵ درجه و ۴ دقیقه طول شرقی واقع شده است. ارتفاع این شهر از سطح دریا ۱۳۱۳ متر بوده و فاصله زمینی آن تا تهران حدود ۷۶۰ کیلومتر است (Mohammadrezapour i et al., 2024). در شکل ۲ موقعیت شهرستان ارومیه و ایستگاه هواشناسی فرودگاه شهید باکری ارومیه مشخص شده است.

انتخاب شاخص‌های مبتنی بر داده بارش

محاسبه شاخص‌های خشکسالی با نرم افزار DIP

تشخیص دوره‌های ترسالی و خشکسالی با شدت‌های مختلف با استفاده از مقادیر شاخص‌ها

تحلیل روند شاخص‌های خشکسالی با آزمون من-کندال و شیب سن برای شاخص‌هایی که رفتار مشابه با SPI دارند

ارزیابی نتایج و ارائه پیشنهادها

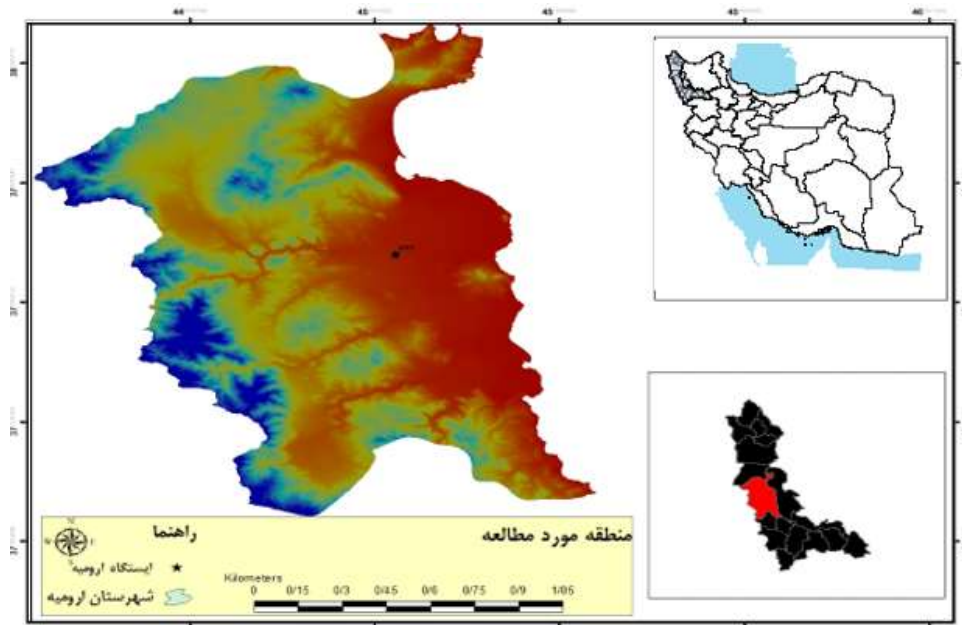
گردآوری داده بارش از اداره کل هواشناسی استان آذربایجان غربی

بررسی کردند. نتایج نشان داد که ZSI و CZI، PNI، SPI و ZSI روندی مشابه دارند و در تعیین دوره‌های خشک به نتایج یکسانی می‌رسند، در حالی که DI نوسانات شدیدی دارد. شاخص MCZI الگوی متفاوتی داشته و توانایی نمایش خشکسالی سالانه را ندارد. هدف از این مطالعه، بررسی و ارزیابی شاخص‌های خشکسالی هواشناسی در شهرستان ارومیه به منظور شناسایی شاخص‌هایی که رفتار مشابه برای پایش خشکسالی در منطقه مورد مطالعه دارند، می‌باشد، که به روش مشاهداتی انجام می‌گیرد. در این راستا، با استفاده از داده‌های بارش در یک دوره زمانی ۳۰ ساله، شاخص‌های مختلف خشکسالی از جمله SPI، CZI، DI، ZSI، PNI و MCZI محاسبه و مقایسه خواهند شد. این پژوهش به تعیین روند خشکسالی، شدت و تداوم آن کمک کرده و می‌تواند مبنایی برای مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی‌های کشاورزی و زیست‌محیطی در منطقه باشد. همچنین پس از شناسایی و انتخاب شاخص‌های مشابه، تحلیل روند نیز برای شاخص‌های با رفتار تقریباً یکسان انجام خواهد شد. در شکل ۱ خلاصه‌ای از کلیات فعالیت‌ها و رویه‌های این مطالعه ارائه شده است.

۲. مواد و روش

۲-۱. منطقه مورد مطالعه

ارومیه، به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین شهرهای ایران، مرکز اداری و سیاسی استان آذربایجان غربی محسوب می‌شود. این شهر با قدمتی بیش از ۳۰۰۰ سال، قدیمی‌ترین شهر در شمال‌غرب ایران به شمار می‌رود. ارومیه در جلگه‌ای به طول



شکل ۲- موقعیت شهرستان ارومیه و ایستگاه هواشناسی فرودگاه شهید باکری ارومیه

۲-۲. شاخص‌های خشکسالی

خشکسالی‌های هواشناسی که معمولاً با کاهش بارندگی همراه هستند، می‌توانند برای هفته‌ها، ماه‌ها و حتی سال‌ها ادامه پیدا کنند. کاهش بارش نسبت به مقادیر نرمال (بلند مدت) تأثیرات زیادی بر فعالیت‌های انسان، منابع آبی و اقتصاد دارد (Ngwenya et al. 2024; Latifoğlu et al. 2024). به همین دلیل، پایش مداوم خشکسالی‌های هواشناسی برای کاهش خطرات ناشی از تغییرات اقلیمی و خشکسالی بسیار ضروری است. یکی از نیازهای اساسی در برنامه‌ریزی خشکسالی، استفاده از نرم‌افزاری کارآمد برای محاسبه شاخص‌های خشکسالی است. در این راستا، نرم‌افزار DIP برای انجام محاسبات و تحلیل‌های مربوط به خشکسالی طراحی شده است. این نرم‌افزار به‌طور کامل و جامع شاخص‌های رایج خشکسالی را محاسبه کرده و امکاناتی مانند انجام محاسبات آماری، ترسیم نمودارها و مقایسه شاخص‌ها را به‌طور کاربرپسند ارائه می‌دهد. شاخص‌های مختلفی از جمله PNI ، DI ، SPI ، CZI ، ZSI و $MCZI$ در این نرم‌افزار مورد استفاده قرار می‌گیرند (Dehghani et al., 2020). در این پژوهش، از نرم‌افزار DIP برای محاسبه شاخص‌های خشکسالی هواشناسی استفاده شده است.

و داده‌های بارندگی مورد استفاده مربوط به دوره آماری ۱۳۷۳ تا ۱۴۰۲ ایستگاه سینوپتیک فرودگاه شهید باکری ارومیه می‌باشد. محاسبات با نرم‌افزار DIP انجام شده و شاخص‌های خشکسالی SPI ، PNI ، DI ، CZI و $MCZI$ محاسبه گردیده‌اند.

SPI (Standardized Precipitation Index) شاخص بارش استاندارد برای ارزیابی شدت خشکسالی از داده‌های بارش استفاده می‌کند و مستقل از موقعیت جغرافیایی است. این شاخص با مقایسه بارش یک دوره خاص با میانگین تاریخی آن، میزان خشکسالی را در زمان‌ها و مکان‌های مختلف اندازه‌گیری کرده و تأثیر کمبود بارش بر منابع آبی مانند آب‌های زیرزمینی، رطوبت خاک و جریان رودخانه را در مقیاس‌های زمانی گوناگون منعکس می‌کند. SPI به‌عنوان ابزاری مهم برای تحلیل دوره‌های خشک و مرطوب و پیش‌بینی شرایط آینده، در مدیریت منابع آبی و برنامه‌ریزی برای مقابله با خشکسالی‌ها نقش مؤثری دارد. این شاخص از توزیع نرمال برای داده‌های بارندگی پیروی کرده و شدت خشکسالی را بر اساس یک سیستم طبقه‌بندی مشخص تعیین می‌کند. مقدار SPI با فرمول زیر محاسبه می‌شود. طبقات

مقدار PNI با فرمول زیر محاسبه می‌شود. طبقات مختلف این شاخص در جدول (۲) آمده است. این نمایه از رابطه‌ی (۲) محاسبه می‌شود (Korkmaz et al., 2024). (۲)

$$PNI = \frac{Pi}{\bar{P}} * 100$$

که در این رابطه Pi بارش سالانه و \bar{P} میانگین بارش در دوره آماری است.

جدول ۲- طبقات شاخص خشکسالی PNI

شاخص	طبقه بندی
۰ > ۹۰	نرمال و بالاتر
۹۰-۸۰	نزدیک به حالت نرمال
۸۰-۷۰	خشکسالی ضعیف
۷۰-۵۵	خشکسالی متوسط
۴۰-۵۵	خشکسالی شدید
< ۴۰	خشکسالی بسیار شدید

DI (Drought Index) این شاخص وقوع بارندگی‌های بلندمدت را به دهک‌های توزیع نرمال تقسیم می‌کند (Gibbs & Maher, 1967, Khasraei et al., 2024). رتبه‌بندی بارش در یک زمان خاص بر اساس توزیع نرمال ثبت شده در طول دوره انجام می‌شود. این روش محاسبات نسبتاً ساده‌ای دارد، اما برای استفاده به آمارهای طولانی‌مدت نیاز دارد (Dehghani et al., 2020, Smakhtin and Hughes, 2007). طبقات مختلف این شاخص در جدول (۳) آمده است. این نمایه از رابطه‌ی (۳) محاسبه می‌شود.

$$m_i = (i(n + 1))/10 \quad (3)$$

که در آن m_i دهک i ام، i شماره دهک و n تعداد داده‌های بارندگی است.

مختلف این شاخص در جدول (۱) آمده است. این نمایه از رابطه‌ی (۱) محاسبه می‌شود (Muter et al., 2024).

$$SPI = (Pi - \bar{P}) / SD \quad (1)$$

که در آن، Pi مقدار بارندگی در سال i ، \bar{P} میانگین بارندگی بلندمدت و SD انحراف معیار بارش در دوره آماری است.

جدول ۱- طبقات شاخص خشکسالی SPI

شاخص (%)	طبقه بندی
> ۱	نرمال و بالاتر
۱ تا -۱	نزدیک به حالت نرمال
-۱/۵ تا -۱	خشکسالی متوسط
-۱/۵ تا -۲	خشکسالی شدید
< = -۲	خشکسالی بسیار شدید

PNI (Percent of Normal Index) شاخص درصد از نرمال بارش یکی از ساده‌ترین و پرکاربردترین شاخص‌های خشکسالی است که میزان انحراف بارندگی را از مقدار متوسط بلندمدت آن محاسبه می‌کند. مقدار نرمال این شاخص ۱۰۰٪ در نظر گرفته می‌شود و می‌توان آن را برای دوره‌های زمانی مختلف مانند یک ماه، یک فصل یا یک سال محاسبه کرد. PNI برای تحلیل دوره‌های خشک و مرطوب در بازه‌های زمانی مشخص بسیار مؤثر است و به دلیل سادگی در محاسبات، به‌طور گسترده در ارزیابی خشکسالی استفاده می‌شود. این شاخص که ابتدا در سال ۱۹۱۳ توسط ویلک و همکارانش توسعه یافت، همواره مقدار مثبتی دارد و از نظر تئوری محدودیت بالایی ندارد، اما مقدار آن از پایین به صفر محدود است. محاسبه این شاخص بر اساس داده‌های بلندمدت بارندگی هر ایستگاه و بررسی تغییرات درصدی آن نسبت به میانگین بلندمدت بارش، به‌صورت ماهانه یا سالانه انجام می‌شود.

که در آن Z_{ij} شاخص CZI، i مقیاس زمانی مورد نظر، که می‌تواند ۱، ۲، ۳، ۴ سال باشد و j سال مورد نظر است.

$$C_{si} = \frac{\sum_{j=1}^n (X_{ij} - \bar{X}_i)^3}{n\sigma_i^3} \quad (5)$$

که در آن C_{si} ضریب چولگی و n تعداد کل سال‌های دوره آماری است.

$$\varphi_{ij} = \frac{X_{ij} - \bar{X}_i}{\sigma_i} \quad (6)$$

که در آن φ_{ij} متغیر استاندارد شده، X_{ij} بارندگی سال i ، \bar{X}_i و σ_i به ترتیب میانگین و انحراف معیار بارندگی در هر مقیاس زمانی هستند. برای محاسبه CZI گاهی به جای میانگین از میانه نیز استفاده می‌شود، که آن را شاخص CZI اصلاح شده یا MCZI می‌نامند.

جدول ۴- طبقات شاخص خشکسالی CZI, MCZI

شاخص CZI	شاخص MCZI	طبقه بندی
≥ 2	≥ 2	ترسالی حاد
۱/۵ تا ۱/۹۹	۱/۵ تا ۱/۹۹	ترسالی شدید
۱ تا ۱/۴۹	۱ تا ۱/۴۹	ترسالی متوسط
۰/۹۹ تا -۰/۹۹	۰/۹۹ تا -۰/۹۹	نزدیک به نرمال
-۱ تا -۱/۴۹	-۱ تا -۱/۴۹	خشکسالی متوسط
-۱/۵ تا -۱/۹۹	-۱/۵ تا -۱/۹۹	خشکسالی شدید
≤ -2	≤ -2	خشکسالی بسیار شدید

ZSI شباهت زیادی به CZI دارد، اما نیازی به برازش داده‌های بارش به توزیع گاما یا توزیع پیرسون نوع-III ندارد (Salehnia et al. 2017; Khasraei et al. 2024). این شاخص با تقسیم اختلاف مقدار بارندگی با میانگین بارندگی تجمعی بر انحراف معیار تجمعی محاسبه می‌کند. در نتیجه، مقادیر بارش را به مقیاسی استاندارد شده تبدیل می‌کند که برای تحلیل خشکسالی قابل استفاده است (Gümüş et al. 2024). طبقات مختلف این شاخص در جدول (۵) آمده است. این نمایه از رابطه‌ی (۷) محاسبه می‌شود.

$$ZSI = \frac{P_i - \bar{P}}{SD} \quad (7)$$

جدول ۳- طبقات شاخص خشکسالی DI

شاخص	طبقه بندی
۴	ترسالی بسیار شدید
۳	ترسالی شدید
۲	ترسالی متوسط
۱	ترسالی ضعیف
۰	نرمال
-۱	خشکسالی ضعیف
-۲	خشکسالی متوسط
-۳	خشکسالی شدید
-۴	خشکسالی بسیار شدید

CZI (China-Z Index) این شاخص، محاسبات را با فرض اینکه داده‌های بارندگی با توزیع پیرسون نوع-III و متغیرها با تبدیل ریشه مکعب ویلسون-هیلفرتی در مقیاس Z هستند، انجام می‌دهد (Gümüş et al. 2024).

همچنین MCZI (Modified CZI) یک نسخه اصلاح شده از CZI است که مرکز ملی آب و هوای چین CZI را به عنوان جایگزینی برای SPI در اوایل دهه ۹۰ توسعه داد (Kazanchi et al. 2024). در محاسبه شاخص MCZI، به جای استفاده از میانگین بارندگی، از میانه بارندگی استفاده می‌شود. تفاوت این دو در این است که میانگین تحت تأثیر بارش‌های بسیار زیاد یا کم قرار می‌گیرد، ولی میانه مقدار وسط داده‌هاست و تأثیر تغییرات حادی را کاهش می‌دهد. این تغییر باعث می‌شود شاخص MCZI دقیق‌تر و پایدارتر باشد، مخصوصاً در مناطقی با نوسانات شدید بارش وجود داشته باشد. به همین دلیل، MCZI به عنوان یک شاخص بهتر برای تحلیل خشکسالی و تغییرات اقلیمی معرفی شده است (Kazanchi et al. 2024). طبقات مختلف این شاخص در جدول (۴) آمده است. این نمایه از رابطه‌ی (۴) تا (۶) محاسبه می‌شود.

$$Z_{ij} = \frac{6}{C_{si}} \left(\frac{C_{si}}{2} \varphi_{ij} + 1 \right)^{1/3} - \frac{6}{C_{si}} + \frac{C_{si}}{6} \quad (4)$$

نزولی و روش برآوردگر شیب سن برای برآورد شیب خطی روند است (Mohammadi et al. 2023).

۲-۳-۱ آزمون من-کندال

آزمون ناپارامتریک من-کندال ابتدا توسط من در سال ۱۹۴۵ ارائه و سپس توسط کندال در سال ۱۹۷۵، بسط و توسعه یافت (Gaddikeri et al. 2023). این روش به طور گسترده‌ای در تحلیل روند سری‌های هیدرولوژیکی و هواشناسی بکار گرفته می‌شود (Ankrah et al. 2023)، که وجود یک روند را در یک سری زمانی با فرض صفر، مبنی بر عدم وجود روند مقایسه می‌کند. مزیت این تحلیل وابسته نبودن آن به توزیع آماری خاص و اثر پذیری ناچیز این روش از مقادیر حدی است (Gaddikeri et al. 2023). این آزمون با استفاده از دو سری زمانی متوالی (X_i و X_j) از n نقطه داده در یک سری تعیین می‌شود. هر مقدار داده متوالی در یک سری زمانی معین با سایر داده‌های سری مقایسه می‌شود؛ مقدار آماری S با بررسی ترتیب داده‌ها در سری زمانی محاسبه می‌شود. (kenabatho, 2025) در این روش، هر مقدار داده با مقادیر بعدی مقایسه می‌شود به طوری که اگر مقدار بعدی بزرگ‌تر باشد، S یک واحد افزایش می‌یابد و اگر کوچک‌تر باشد، یک واحد کاهش پیدا می‌کند. در نهایت، مقدار آماری S با محاسبه مجموع این افزایش‌ها و کاهش‌ها به دست می‌آید. (kendall, 1975) بنابراین، استاتیک آزمون من-کندال با استفاده از رابطه (۸) همانطور که در زیر بیان می‌شود، محاسبه می‌شود.

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{Sign}(X_j - X_i) \quad (8)$$

جایی که: X_j و X_i به ترتیب مقادیر داده‌ها در سال j ام و i ام هستند. تابع علامت نیز طبق رابطه (۹) محاسبه می‌شود.

$$\text{Sign}(X_j - X_i) = \begin{cases} +1; & \text{if } X_j - X_i > 0 \\ 0; & \text{if } X_j - X_i = 0 \\ -1; & \text{if } X_j - X_i < 0 \end{cases} \quad (9)$$

که در آن P_i بارندگی سال i ، \bar{P} میانگین بارندگی بلند مدت و SD انحراف معیار بارش در طول دوره آماری می‌باشد.

جدول ۵- طبقات شاخص خشکسالی ZSI

شاخص	طبقه بندی
≤ -2	ترسالی بسیار شدید
۱/۵ تا ۱/۹۹	ترسالی شدید
۱ تا ۱/۴۹	ترسالی متوسط
۰/۹۹ تا ۰/۹۹	نزدیک به نرمال
۱/۴۹ تا ۱	خشکسالی متوسط
۱/۹۹ تا ۱/۵	خشکسالی شدید
≤ -2	خشکسالی بسیار شدید

۲-۳. تجزیه و تحلیل روند خشکسالی

برای تشخیص روند خشکسالی از نظر تغییرات جریان و بارندگی و رخدادهای مرطوب، از روش‌های مختلفی مانند تحلیل‌های آماری و آزمون‌های رتبه‌بندی استفاده می‌شود (Ankrah et al. 2023). در میان روش‌های آماری، تکنیک‌هایی همچون آزمون‌های مبتنی بر شیب، رگرسیون خطی حداقل مربعات (LR)، برآوردگر شیب سن (SS) و آزمون‌های مبتنی بر رتبه از جمله آزمون من-کندال (MK) و آزمون همبستگی رتبه‌ای اسپیرمن (SRC) کاربرد گسترده‌ای دارند (Tareke.K.A 2025). در این تحقیق از آزمون من-کندال و برآوردگر شیب سن که توسط سازمان هواشناسی جهانی (WMO) برای بررسی متغیرهای هواشناسی و هیدرولوژیکی در تحقیقات محیطی و برای تجزیه و تحلیل روند زمانی به شدت توصیه شده است استفاده گردید. برای تشخیص روند خشکسالی هواشناسی در سطح معنی‌داری ۵٪ از یک فایل اکسل (MS Excel Template)، که توسط مؤسسه هواشناسی فنلاند در سال ۲۰۰۲ توسعه داده شده است، استفاده شد. این فایل به صورت نرم‌افزار رایگان برای تحلیل روند داده‌های سالانه طراحی شده و شامل آزمون من-کندال برای بررسی روند صعودی یا

و قضاوت نمودن در مورد منحنی داری شیب بدست آمده در سطوح مختلف اطمینان می‌باشد. شیب سن دارای مزیتی نسبت به رگرسیون خطی است که ارزیابی، تحت تأثیر وجود ناهنجاری‌ها و عدم دقت در داده‌ها قرار نمی‌گیرد (Calma et al. 2025). بزرگی روند Q به صورت زیر محاسبه می‌شود:

الف) محاسبه شیب سن بین هر جفت داده با استفاده از رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود. (قربانی و همکاران، ۱۳۹۸)

$$Q_i = \frac{X_t - X_s}{t - s}, i = 1, 2, \dots, N \quad (13)$$

که X_t و X_s به ترتیب داده در زمان‌های $t > s$ و $N = \frac{n(n-1)}{2}$ می‌باشد. با اعمال این رابطه برای هر دو جفت داده، یک سری زمانی از شیب‌های محاسبه شده، بدست می‌آید، که از محاسبه میانه این سری زمانی، برآورد شیب سن مربوط به خط روند حاصل می‌شود. مقدار مثبت این شیب حاکی از صعودی بودن روند و مقدار منفی آن نشان دهنده نزولی بودن روند می‌باشد (Kliengchuay et al. 2024).

ب) محاسبه پارامتر C_α برای سطح اطمینان مورد نظر، طبق رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود. (Salmi et al. 2002)

$$C_\alpha = Z_{1-\frac{\alpha}{2}} \sqrt{Var(S)} \quad (14)$$

که در آن Z چندک توزیع نرمال استاندارد می‌باشد.

ج) برای محاسبه حدود اطمینان بالا و پایین با ضریب $(1-\alpha)$ ، ابتدا مقادیر M_1 و M_2 به کمک روابط (۱۵) محاسبه می‌شود.

(قربانی و همکاران، ۱۳۹۸)

$$\begin{cases} M_1 = \frac{N - C_\alpha}{2} \\ M_2 = \frac{N + C_\alpha}{2} \end{cases} \quad (15)$$

که N تعداد شیب‌های محاسبه شده در بند الف) می‌باشد.

اگر کمتر از ده نقطه داده در سری زمانی وجود داشته باشد، مقدار $|S|$ به طور مستقیم با توزیع S مقایسه می‌شود (kendall, 1975). اگر بیش از ده نقطه داده وجود داشته باشد، مقدار آماره S بر اساس میانگین و واریانس همانطور که در معادلات (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده است، توزیع می‌شود.

$$E(S) = 0 \quad (10)$$

$$Var(S) = (11)$$

$$\frac{m(-1)(2m+5) - \sum_{k=1}^n k1(k1-1)(2k1+5)}{18}$$

که در آن k تعداد گروه‌های دارای گره (داده‌های پشت سر هم یک گره ایجاد می‌کنند)، $k1$ طول k امین گروه گره‌دار می‌باشد (kenabatho, 2025). در نهایت آماره Z ناپارامتری من-کندال با استفاده از رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود.

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{Var(S)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{Var(S)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (12)$$

مقادیر منفی و مثبت Z به ترتیب بیانگر روند کاهشی و روند افزایشی در سری داده‌ها است. با توجه به سطح اطمینان ۹۵ درصد اگر $|Z| > 1/96$ باشد، فرض صفر مبنی بر عدم وجود روند در سری زمانی مورد مطالعه، رد می‌شود و وجود روند در سری داده‌ها پذیرفته می‌شود. (chowdari et al., 2023)

۲-۳-۲ آزمون شیب سن

برآوردگر شیب سن یک روش ناپارامتریک برای تعیین مقدار یک روند در یک سری زمانی است (Sen 1968; Bandyopadhyay et al. 2009; Jain et al. 2013; Gajbhiye et al. 2016; Chandniha et al. 2017).

اساس آزمون سن بر محاسبه یک شیب میانه برای سری زمانی

صورتی که عدد صفر در دامنه بین دو شیب استخراج شده فوق قرار گیرد، فرض صفر پذیرفته شده و سری زمانی بدون روند است. (قربانی و همکاران، ۱۳۹۸)

یا شاخص‌هایی که همبستگی و تشابه رفتاری را با شاخص SPI دارند برای شهرستان ارومیه انتخاب شد.

۳-۱. تغییرات سالانه بارندگی در ایستگاه مورد مطالعه

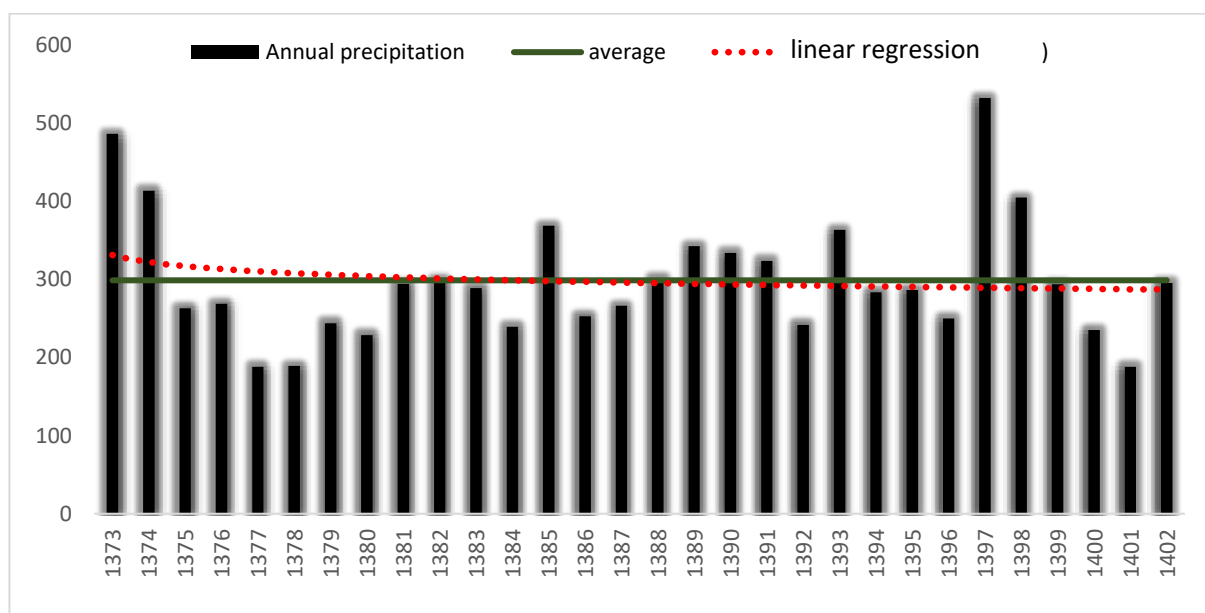
در این پژوهش از داده‌های ۳۰ ساله ایستگاه سینوپتیک فرودگاه شهید باکری ارومیه استفاده گردید. شکل (۳) میانگین بارش ۳۰ ساله (بلند مدت) این ایستگاه ۲۹۸/۵۴ میلیمتر می‌باشد. خط رگرسیون نشان از کاهش بارش در طی ۳۰ ساله گذشته را دارد، و از سال ۱۳۸۵، کمتر از میانگین بارش بلند مدت بوده است که این کاهش می‌تواند هم راستا با تغییرات در الگوهای اقلیمی در ایران به خصوص در شمال غرب کشور و شهرستان ارومیه باشد. بیشترین مقدار بارش ثبت شده در این ایستگاه برای سال ۱۳۹۷ به میزان ۵۳۱/۸ میلیمتر و کمترین مقدار بارش ثبت شده در سال‌های ۱۳۷۷ و ۱۴۰۱ به میزان ۱۸۷/۷ میلیمتر بوده است.

(د) برای بررسی حدود اطمینان، از بین شیب‌های محاسبه شده توسط رابطه (۱۳) که از کوچک به بزرگ مرتب می‌شوند، M_1 امین و $M_2 + 1$ امین شیب استخراج می‌گردند. در

۳- نتایج و بحث

در مطالعه حاضر از شش شاخص خشکسالی برای ارزیابی و پایش خشکسالی شهرستان ارومیه استفاده شد، شاخصی‌هایی که بیشترین تشابه رفتاری را با شاخص خشکسالی SPI که توسط WMO (سازمان جهانی هواشناسی) به عنوان شاخص استاندارد برای پایش و تعیین خشکسالی انتخاب و معرفی شده است (Khasraei et al. 2024)، انتخاب و معرفی گردید که می‌توان برای پایش خشکسالی شهرستان ارومیه مورد استفاده قرار گیرند.

SPI به دلیل سادگی، انعطاف‌پذیری و حداقل نیاز به داده، یکی از پرکاربردترین شاخص‌های خشکسالی در سراسر جهان محسوب می‌شود (Gonçalves et al., 2023). این شاخص توانایی پایش شرایط خشک و مرطوب را در مناطق مختلف دارا بوده و برای تحلیل‌های زمانی پایدار و قابل اعتماد است (Khasraei et al. 2024). در این پژوهش، شاخص



شکل ۳ - میزان بارش در طی ۳۰ سال

۲-۳. تحلیل پایش خشکسالی هواشناسی شهرستان ارومیه بر اساس شاخص‌های مختلف خشکسالی هواشناسی

جدول (۶) نتایج پایش خشکسالی هواشناسی شهرستان ارومیه را بر اساس شاخص‌های مختلف ارائه می‌دهد. طبق جدول (۷)، بیشترین فراوانی مربوط به طبقه نرمال یا نزدیک به نرمال بوده، در حالی که کمترین فراوانی مربوط به طبقه خشکسالی بسیار شدید مشاهده شده است، همچنین بر اساس جدول (۶)، شاخص MCZI بیشترین تفاوت در نتایج را نسبت به سایر شاخص‌ها نشان می‌دهد و پس از آن، شاخص DI نیز رفتار متفاوتی از خود بروز داده است.

شکل‌های (۴ تا ۹) تغییرات بارش سالانه (میل‌های مشکلی) و روند شاخص‌های خشکسالی مختلف (منحنی‌های قرمز) را در دوره مورد بررسی نمایش می‌دهند. بارش سالانه دارای نوسانات قابل توجهی بوده و در برخی سال‌ها افزایش شدید و در برخی دیگر کاهش محسوسی داشته است. این تغییرات احتمالاً تحت تأثیر پدیده‌های اقلیمی مانند ال‌نینو، لانینا یا تغییرات اقلیمی قرار دارند.

شاخص SPI و ZSI تغییرات شدیدتری نسبت به سایر شاخص‌ها نشان داده‌اند، به گونه‌ای که در دوره‌های خشک به مقادیر منفی و در دوره‌های مرطوب به مقادیر مثبت میل کرده‌اند. این رفتار نشان دهنده حساسیت بالای این شاخص‌ها به نوسانات بارندگی است و آن‌ها را گزینه‌هایی مناسب برای تشخیص سریع خشکسالی‌های کوتاه مدت تبدیل می‌کند. در مقابل، شاخص PNI رفتار نرم‌تری نسبت به SPI و ZSI دارد و همبستگی مناسبی با بارش سالانه نشان می‌دهد. به همین دلیل برای مقایسه مقادیر بارش هر سال با مقدار نرمال

دوره‌ای مناسب ارزیابی می‌شود. MCZI تغییرات کمتری داشته و عمدتاً در محدوده منفی باقی مانده است، که ممکن است ناشی از حساسیت پایین آن نسبت به بارش‌های شدید و تاکید بیشتر بر روندهای خشکسالی بلند مدت باشد، شاخص‌های DI و CZI نیز نوسانات بیشتری را تجربه کرده‌اند و شدت خشکسالی‌های رخ داده را به خوبی نمایش می‌دهند، به ویژه در سال‌های کم‌بارش.

دوره‌های خشکسالی در چندین بازه زمانی، از جمله سال‌های میانی و پایانی دوره مورد بررسی، مشاهده می‌شوند، جایی که شاخص‌های خشکسالی نشان می‌دهد که بازه‌های زمانی مختلف، به ویژه در سال‌های میانی و پایانی دوره مورد بررسی، خشکسالی‌های شدیدی به وقوع پیوسته‌اند، در مقابل، در سال‌های پر بارش مانند ۱۳۹۷ و ۱۳۷۳، شاخص‌های خشکسالی مقادیر مثبتی را نشان داده‌اند که نمایانگر وقوع دوره‌های ترسالی است. شاخص‌های SPI و DI نسبت به تغییرات بارش، واکنش سریعتری دارند، در حالی که برخی دیگر مانند PNI و MCZI روند نرم‌تر و پایدارتری دارند.

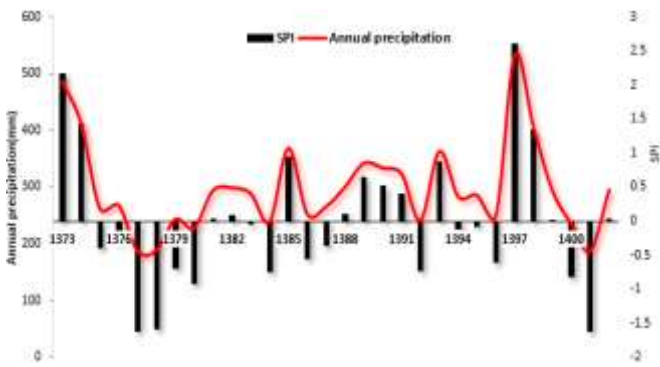
مقایسه مشاهداتی شاخص‌های SPI، PNI، DI، ZSI، CZI و MCZI در شکل ۱۰ نشان می‌دهد که شاخص‌های SPI، PNI، CZI و ZSI روند و رفتار تقریباً مشابهی از خود نشان داده‌اند، در حالی که شاخص DI همسو و هماهنگ با سایر شاخص‌ها نوسان داشته، اما با شدت بیشتری نسبت به آنها تغییر کرده است، همچنین، شکل (۱۱) روند شاخص‌های SPI، CZI و ZSI را نشان می‌دهد که از لحاظ مشاهدات نموداری، تقریباً منطبق بر یکدیگر می‌باشند.

جدول ۶- طبقات شاخص‌های خشکسالی SPI، PNI، DI، ZSI، CZI و MCZI

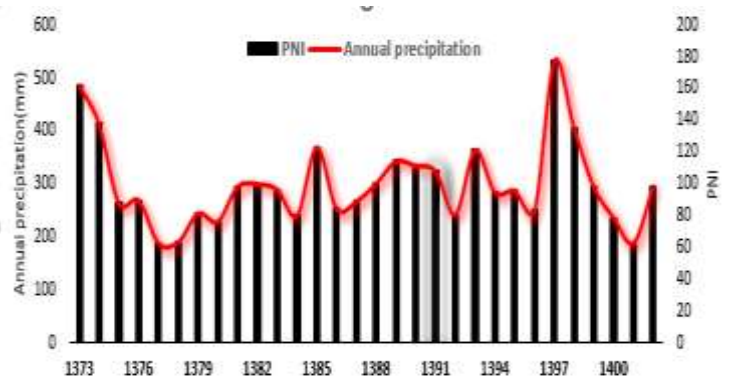
سال	طبقه بندی SPI	طبقه بندی PNI	طبقه بندی DI	طبقه بندی CZI	طبقه بندی MCZI	طبقه بندی ZSI
۱۳۷۳	ترسالی شدید	نرمال	ترسالی بسیار شدید	ترسالی شدید	خشکسالی متوسط	ترسالی شدید
۱۳۷۴	ترسالی حاد	نرمال	ترسالی شدید	نزدیک نرمال	خشکسالی متوسط	نزدیک نرمال
۱۳۷۵	نزدیک نرمال	نرمال	خشکسالی متوسط	نزدیک نرمال	خشکسالی متوسط	نزدیک نرمال
۱۳۷۶	نزدیک نرمال	نرمال	خشکسالی ضعیف	نزدیک نرمال	خشکسالی متوسط	نزدیک نرمال
۱۳۷۷	خشکسالی شدید	خشکسالی متوسط	خشکسالی بسیار شدید	خشکسالی شدید	خشکسالی متوسط	خشکسالی متوسط
۱۳۷۸	خشکسالی شدید	خشکسالی متوسط	خشکسالی بسیار شدید	خشکسالی شدید	خشکسالی متوسط	خشکسالی متوسط
۱۳۷۹	نزدیک نرمال	خشکسالی خفیف	خشکسالی شدید	نزدیک نرمال	خشکسالی متوسط	نزدیک نرمال
۱۳۸۰	خشکسالی متوسط	خشکسالی خفیف	خشکسالی شدید	خشکسالی متوسط	خشکسالی متوسط	خشکسالی متوسط
۱۳۸۱	نزدیک نرمال	نرمال	نرمال	نزدیک نرمال	خشکسالی متوسط	نزدیک نرمال
۱۳۸۲	نزدیک نرمال	نرمال	نرمال	نزدیک نرمال	خشکسالی متوسط	نزدیک نرمال
۱۳۸۳	نزدیک نرمال	نرمال	نرمال	نزدیک نرمال	خشکسالی متوسط	نزدیک نرمال
۱۳۸۴	نزدیک نرمال	خشکسالی خفیف	خشکسالی شدید	نزدیک نرمال	خشکسالی متوسط	نزدیک نرمال
۱۳۸۵	نزدیک نرمال	نرمال	ترسالی متوسط	نزدیک نرمال	خشکسالی متوسط	نزدیک نرمال
۱۳۸۶	نزدیک نرمال	خشکسالی خفیف	خشکسالی متوسط	نزدیک نرمال	خشکسالی متوسط	نزدیک نرمال
۱۳۸۷	نزدیک نرمال	نرمال	خشکسالی متوسط	نزدیک نرمال	خشکسالی متوسط	نزدیک نرمال
۱۳۸۸	نزدیک نرمال	نرمال	نرمال	نزدیک نرمال	خشکسالی متوسط	نزدیک نرمال
۱۳۸۹	نزدیک نرمال	نرمال	ترسالی ضعیف	نزدیک نرمال	خشکسالی متوسط	نزدیک نرمال
۱۳۹۰	نزدیک نرمال	نرمال	ترسالی ضعیف	نزدیک نرمال	خشکسالی متوسط	نزدیک نرمال
۱۳۹۱	نزدیک نرمال	نرمال	نرمال	نزدیک نرمال	خشکسالی متوسط	نزدیک نرمال
۱۳۹۲	نزدیک نرمال	خشکسالی خفیف	خشکسالی شدید	نزدیک نرمال	خشکسالی متوسط	نزدیک نرمال
۱۳۹۳	نزدیک نرمال	نرمال	ترسالی متوسط	نزدیک نرمال	خشکسالی متوسط	نزدیک نرمال
۱۳۹۴	نزدیک نرمال	نرمال	خشکسالی ضعیف	نزدیک نرمال	خشکسالی متوسط	نزدیک نرمال
۱۳۹۵	نزدیک نرمال	نرمال	خشکسالی ضعیف	نزدیک نرمال	خشکسالی متوسط	نزدیک نرمال
۱۳۹۶	نزدیک نرمال	خشکسالی خفیف	خشکسالی متوسط	نزدیک نرمال	خشکسالی متوسط	نزدیک نرمال
۱۳۹۷	نزدیک نرمال	نرمال	ترسالی بسیار شدید	ترسالی شدید	خشکسالی متوسط	ترسالی حاد
۱۳۹۸	نزدیک نرمال	نرمال	ترسالی شدید	نزدیک نرمال	خشکسالی متوسط	نزدیک نرمال
۱۳۹۹	نزدیک نرمال	نرمال	نرمال	نزدیک نرمال	خشکسالی متوسط	نزدیک نرمال
۱۴۰۰	خشکسالی متوسط	خشکسالی خفیف	خشکسالی شدید	نزدیک نرمال	خشکسالی متوسط	نزدیک نرمال
۱۴۰۱	خشکسالی شدید	خشکسالی متوسط	خشکسالی بسیار شدید	خشکسالی شدید	خشکسالی متوسط	خشکسالی متوسط
۱۴۰۲	نزدیک نرمال	نرمال	نرمال	نزدیک نرمال	خشکسالی متوسط	نزدیک نرمال

جدول ۷- فراوانی طبقات خشکسالی بر اساس شاخص‌های خشکسالی SPI، PNI، DI، ZSI، CZI و MCZI

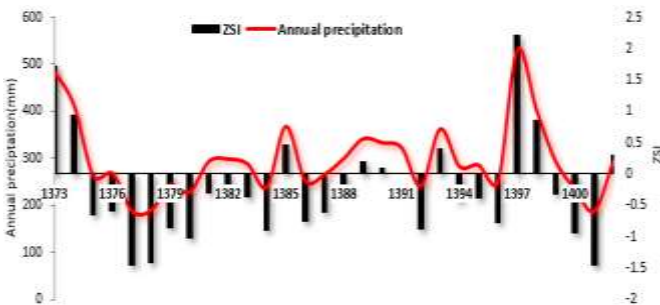
شاخص‌های خشکسالی	خشکسالی بسیار شدید	خشکسالی شدید	خشکسالی متوسط	خشکسالی ضعیف	نرمال یا نزدیک به نرمال	ترسالی ضعیف	ترسالی متوسط	ترسالی شدید	ترسالی بسیار شدید
SPI	-	۳	۲	-	۲۳	-	-	۱	۱
PNI	-	-	۳	۷	۲۰	-	-	-	-
DI	۳	۵	۴	۳	۷	۲	۲	۲	۲
ZSI	-	-	۴	-	۲۴	-	-	۱	۱
CZI	-	۳	۱	-	۲۴	-	-	۲	-
MCZI	-	-	۳۰	-	-	-	-	-	-



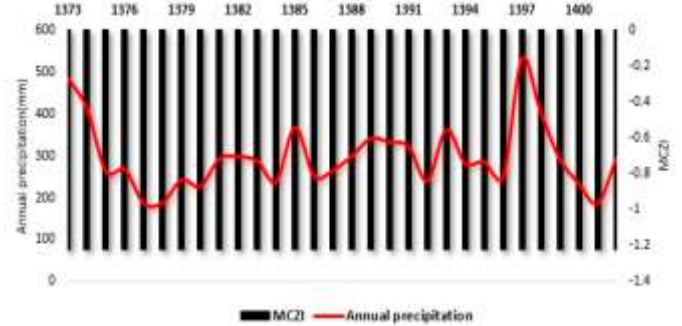
شکل ۵- تغییرات شاخص SPI و میزان بارش در طی ۳۰ سال



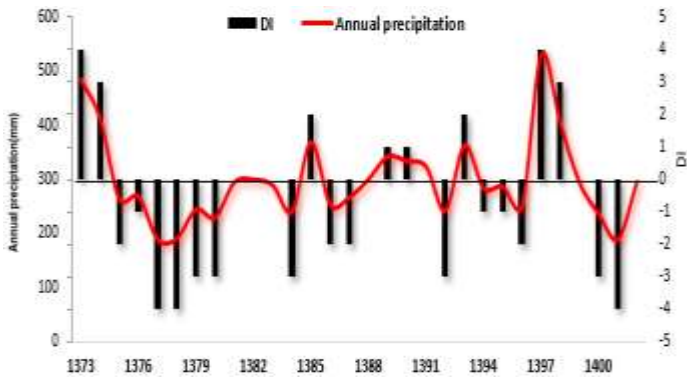
شکل ۴- تغییرات شاخص PNI و میزان بارش در طی ۳۰ سال



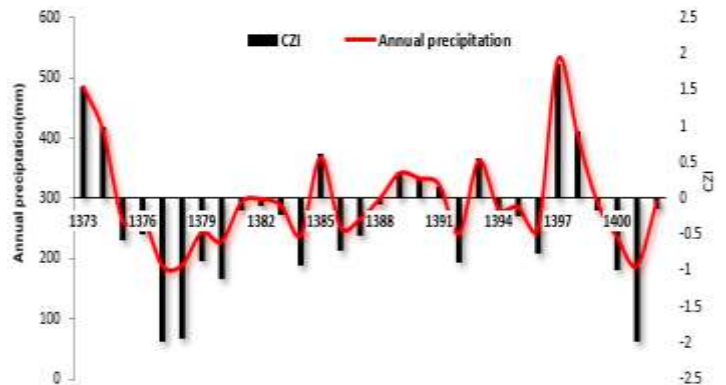
شکل ۷- تغییرات شاخص ZSI و میزان بارش در طی ۳۰ سال



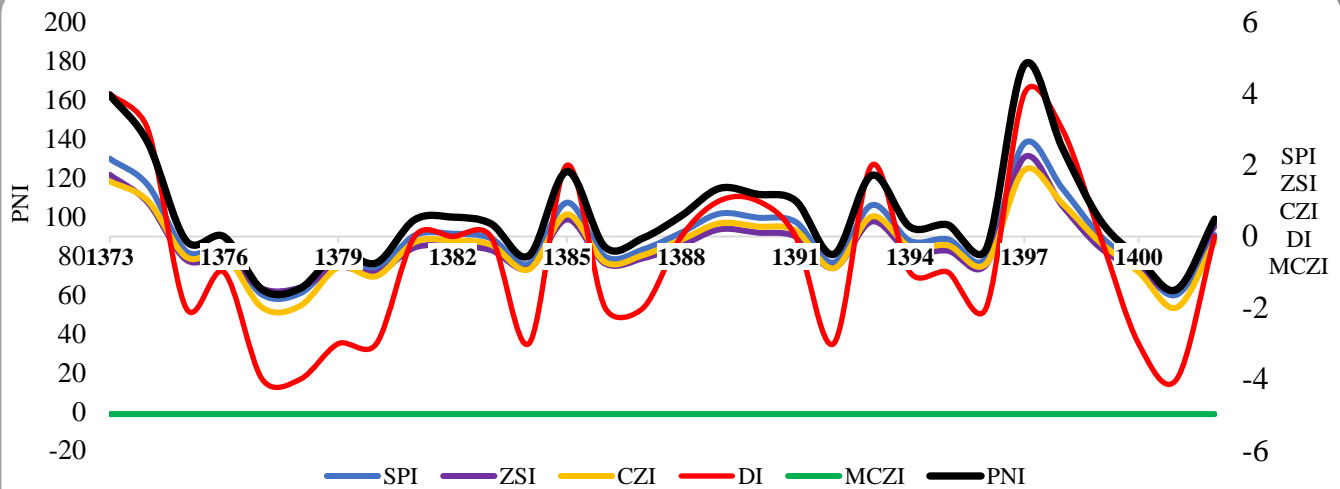
شکل ۶- تغییرات شاخص MCZI و میزان بارش در طی ۳۰ سال



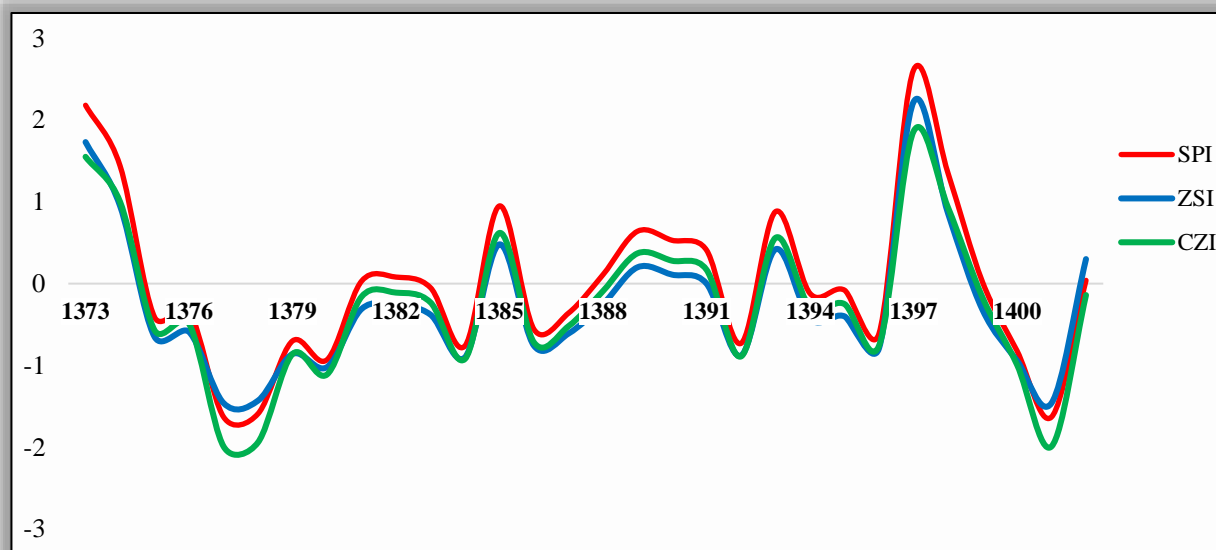
شکل ۹- تغییرات شاخص DI و میزان بارش در طی ۳۰ سال



شکل ۸- تغییرات شاخص CZI و میزان بارش در طی ۳۰ سال



شکل ۱۰- مقایسه شاخص‌های SPI، PNI، DI، ZSI، CZI و MCZI



شکل ۱۱- مقایسه شاخص‌های SPI، ZSI، CZI

شاخص‌ها عمل کرده است. در ادامه برای همه شاخص‌ها تحلیل روند انجام گرفت اما با توجه به این که آزمون من-کندال یک روش ناپارامتری برای شناسایی روند در سری‌های زمانی است و چون داده‌ها دارای خودهمبستگی می‌باشند، نتایج آزمون با خطا همراه شد که این موضوع در مطالعات باقرپور و همکارانش در سال ۲۰۱۷ (Bagherpoor et al.)

بر این اساس به لحاظ مشاهدات نموداری می‌توان نتیجه گرفت که سه شاخص SPI، CZI و ZSI برای شناسایی دوره‌های خشکسالی رفتاری مشابه و نتایج یکسانی ارائه می‌دهند، که این نتیجه با نتایج دهقانی و همکارانش مطابقت دارد، در مقابل، شاخص‌های PNI و DI تفاوت‌های محسوسی با این سه شاخص دارند، همچنین شاخص MCZI چه از نظر روند و چه از نظر نتایج، کاملاً متفاوت از سایر

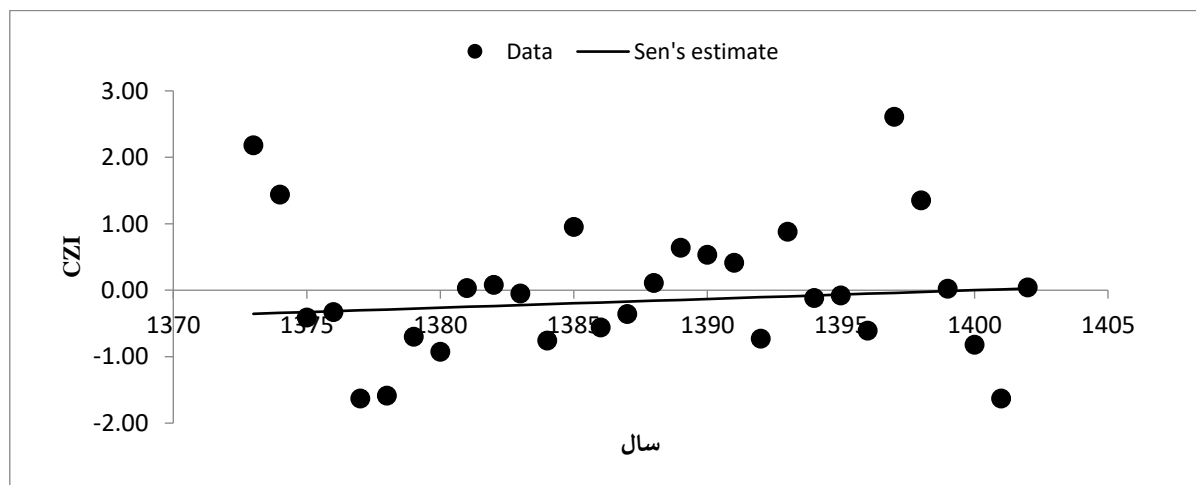
لحاظ روند نیز مورد تحلیل قرار دهیم، که در جدول ۸ نتایج تحلیل روند انجام شده ارائه شد و نتایج آزمون من-کندال و برآورد شیب سن برای شاخص های SPI، ZSI و CZI در شهرستان ارومیه مورد تجزیه و تحلیل و بررسی قرار گرفت.

(2017)، مالیک و همکارانش در سال ۲۰۲۱ (Mallick et al. 2021) نیز اشاره شده است. بنابراین با توضیحات ارائه شده و نیز از طریق مشاهدات در نتایج، تصمیم بر این شد تا سه شاخص SPI، CZI و ZSI که رفتار تقریباً مشابهی را برای منطقه مورد مطالعه دارند را به

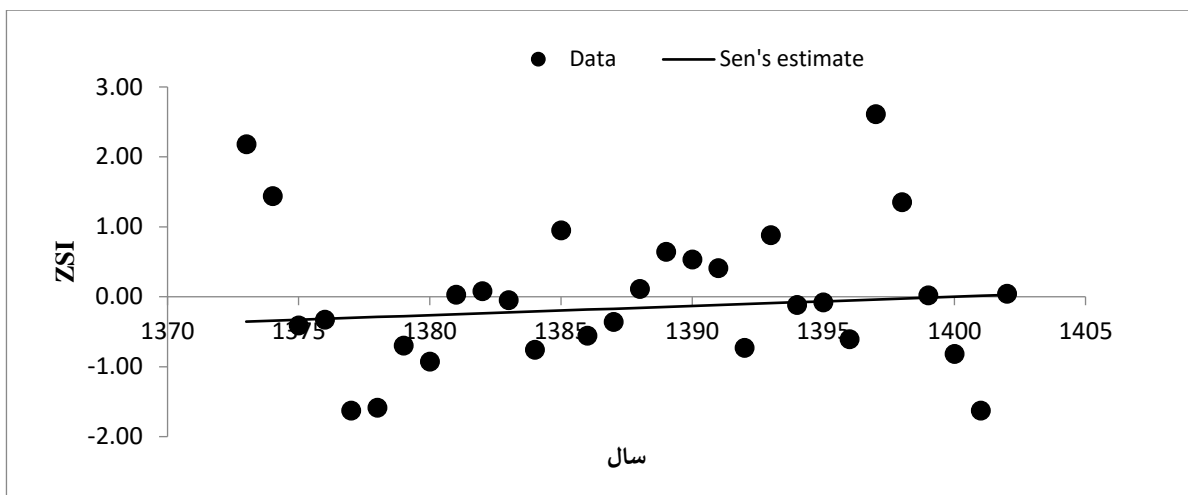
جدول (۸) نتایج آزمون من-کندال و برآورد شیب سن

شاخص	روند من-کندال		برآورد شیب سن									
	تعداد سالها (N)	آزمون (Z)	شیب سن (Q)	Q حد اقل		Q حداکثر		شیب سن B	B حد اقل		B حداکثر	
				%۹۹	%۹۵	%۹۹	%۹۵		%۹۹	%۹۵		
SPI	۳۰	۰/۴۵	۰/۰۱۳	-۰/۰۵۴	۰/۰۷۲	-۰/۰۴۱	۰/۰۵۸	-۰/۳۶	۰/۶۳	-۱/۰۶	۰/۴۱	-۰/۹۰
ZSI	۳۰	۰/۶۲	۰/۰۱۴	-۰/۰۴۲	۰/۰۶۱	-۰/۰۲۷	۰/۰۵۱	-۰/۶۶	۰/۱۸	-۱/۱۹	-۰/۰۶	-۱/۰۹
CZI	۳۰	۰/۴۵	۰/۰۱۳	-۰/۰۵۱	۰/۰۶۶	-۰/۰۳۹	۰/۰۵۷	-۰/۵۲	۰/۴۰	-۱/۱۶	۰/۲۰	-۱/۰۷

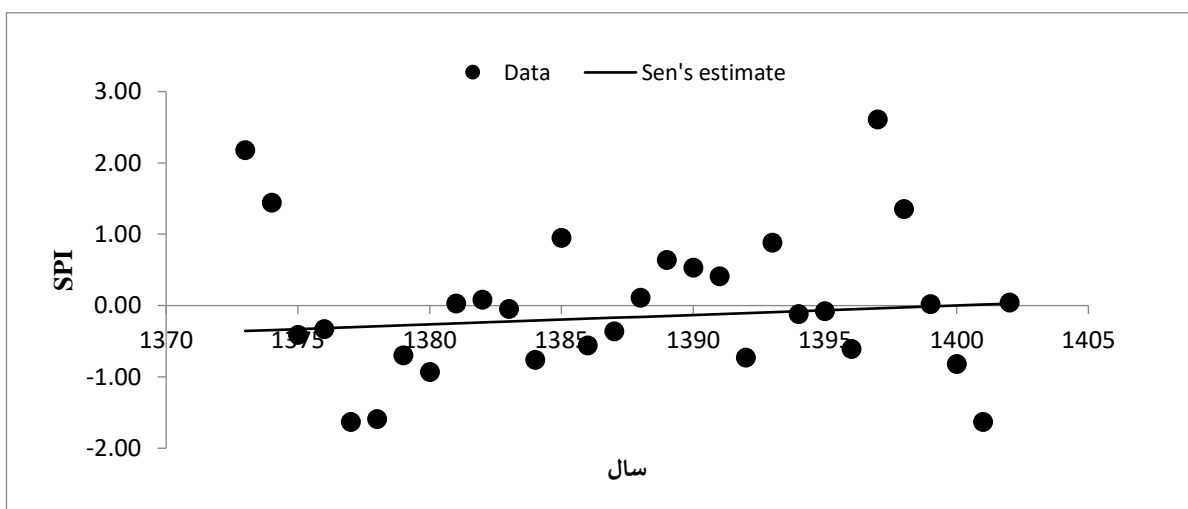
نتایج آزمون برآورد شیب سن نیز در شکل های ۱۲ تا ۱۴ ارائه شده است.



شکل ۱۲- تحلیل روند شیب سن شاخص CZI



شکل ۱۳ - تحلیل روند شیب سن شاخص ZSI



شکل ۱۴ - تحلیل روند شیب سن شاخص SPI

بازه‌های اطمینان ۹۵٪ و ۹۹٪ نیز شامل مقدار صفر هستند، که تأییدی بر عدم وجود روند. معنادار در شاخص‌ها است. همچنین عرض از مبدأ (B) و بازه‌های اطمینان نشان می‌دهند که مقدار B برای SPI برابر ۰/۳۶-، برای ZSI برابر ۰/۶۶- و برای CZI برابر ۰/۵۲- است، که نشان می‌دهد مقدار اولیه شاخص‌ها در محدوده‌ای متوسط قرار دارد. مقادیر B حداقل و حداکثر در سطوح اطمینان ۹۵٪ و ۹۹٪ نشان می‌دهد که تغییرات شاخص‌های خشکسالی فاقد روند مشخصی هستند.

نتایج آزمون من-کندال (Z) نشان داد، مقدار Z برای شاخص SPI برابر ۰/۴۵، برای ZSI برابر ۰/۶۲ و برای CZI برابر ۰/۴۵ است. از آنجایی که این مقادیر کمتر از ۱/۹۶ هستند، هیچ کدام از روندها، در سطح ۹۵٪ معنادار نیستند. این نتیجه نشان می‌دهد که تغییرات شاخص‌های خشکسالی در بازه زمانی مورد مطالعه تصادفی بوده و روند افزایشی یا کاهشی مشخصی مشاهده نمی‌شود.

نتایج برآورد شیب سن (Q) نیز نشان داد، مقدار شیب سن (Q) برای SPI برابر ۰/۰۱۳، برای ZSI برابر ۰/۰۱۴ و برای CZI برابر ۰/۰۱۳ است. این مقادیر بسیار کوچک بوده و نزدیک به صفر هستند که نشان می‌دهد تغییرات خشکسالی در طول دوره مورد مطالعه بسیار محدود بوده است.

می تواند ناشی از ناپایداری متغیرهای اقلیمی، به ویژه بارندگی باشد، که در پژوهش‌های مشابه نیز گزارش شده است. (Salarijazi et al. 2024)

خشکسالی، مانند تغییرات بارندگی، دما و الگوهای جوی در مطالعات آتی بررسی شوند. همچنین پیشنهاد می‌گردد برای ارزیابی دقت مدل‌ها، از تحلیل مقادیر حدی استفاده گردد. خشکسالی به‌عنوان یک بلای طبیعی با ماهیتی تدریجی، در مقایسه با سیل و زلزله فرصت برنامه‌ریزی، پیشگیری و مدیریت را فراهم می‌کند. با این حال، پیامدهای گسترده‌ای بر منابع آبی، سلامت انسان، محیط‌زیست، تعارضات سیاسی و اجتماعی، مهاجرت و کیفیت زندگی دارد. با توجه به وقوع و افزایش رخداد این پدیده در کشور، ضرورت سیاست‌گذاری و اجرای راهکارهای مدیریتی بیش از پیش احساس می‌شود. توسعه سیستم‌های پایش مستمر، ارتقای سطح آگاهی عمومی و سرمایه‌گذاری در تحقیقات علمی از جمله اقداماتی هستند که می‌توانند نقش مهمی در کاهش اثرات خشکسالی ایفا کنند. در نهایت، تنها با تدوین یک راهبرد ملی و اجرای سیاست‌های منعطف و کارآمد می‌توان تاب‌آوری کشور را در برابر این بحران افزایش داد و از خسارات احتمالی در آینده را کاهش داد.

منابع

1. (FA) Ghorbani, H., Vali, A., & Zare Pour, H. (2019). Analysis of meteorological drought trends using Mann-Kendall and Sen tests in Isfahan province. https://civilica.com/doc/1285683
2. AghaKouchak A, Cheng L, Mazdiyasi O, Farahmand A (2014) Global warming and changes in risk of concurrent climate extremes: Insights from the 2014 California drought. *Geophys Res Lett* 41:8847–8852. <https://doi.org/10.1002/2014gl062308>
3. Aktürk, G., Çıtakoğlu, H., Demir, V., & Beden, N. (2024). Meteorological drought analysis and regional frequency analysis in the Kızılırmak Basin: creating a framework for sustainable water resources

تحلیل روند شاخص‌ها با آزمون من-کندال و شیب سن نشان داد، علی‌رغم مشاهدات روند افزایشی اندک در شاخص‌ها، این روند از نظر آماری معنادار نبوده است. این موضوع

۴. نتیجه گیری

خشکسالی را می‌توان به چهار گروه عمده هواشناسی، هیدرولوژیکی، کشاورزی و اجتماعی-اقتصادی تقسیم کرد که خشکسالی هواشناسی با مقادیر بارندگی در مقایسه با میانگین آن ارزیابی می‌شود. در این پژوهش از داده‌های فراسنج بارش برای بازه ۳۰ ساله ایستگاه سینوپتیک فرودگاه شهید باکری ارومیه استفاده گردید. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که از میان شاخص‌های بررسی شده (۶ شاخص DI, SPI, ZSI, CZI, PNI و MCZI) برای پایش خشکسالی شهرستان ارومیه، شاخص‌های SPI, PNI, CZI و ZSI تقریباً روند مشابهی دارند. اما از بین این شاخص‌ها، روند شاخص‌های SPI, CZI و ZSI تقریباً یکسان بوده و می‌تواند به نتایج یکسانی در تعیین دوره‌های خشک دست یابد. همچنین، شاخص PNI تا حد زیادی با این شاخص‌ها هماهنگ است، اما شدت تغییرات آن بیشتر است. شاخص DI نیز روندی مشابه دارد، اما نوسانات آن بسیار شدیدتر است. در مقابل، شاخص MCZI رفتار کاملاً متفاوتی از خود نشان داده و در مقیاس سالانه قادر به نمایش دقیق دوره‌های خشکسالی و ترسالی در این منطقه نیست، چرا که نتایج آن در تمامی سال‌ها ثابت بوده است. در نتیجه می‌توان گفت برای شهرستان ارومیه می‌توان از شاخص‌های CZI و ZSI به علت رفتار مشابه با شاخص SPI که سازمان هواشناسی جهانی توصیه نموده، نیز استفاده کرد. بررسی روند خشکسالی در شهرستان ارومیه بر اساس شاخص‌های SPI, ZSI و CZI نشان داد که روند معناداری در تغییرات این شاخص‌ها طی دوره ۱۳۷۳ تا ۱۴۰۲ مشاهده نمی‌شود. این نتایج حاکی از آن است که خشکسالی در این منطقه الگوی خاصی از افزایش یا کاهش نداشته و تغییرات آن بیشتر تحت تأثیر نوسانات کوتاه‌مدت اقلیمی قرار گرفته است. به منظور تحلیل دقیق‌تر، پیشنهاد می‌شود که سایر عوامل مؤثر بر

12. Chowdari, K., Deb Barma, S., Bhat, N. et al. Trends of seasonal and annual rainfall of semi-arid districts of Karnataka, India: application of innovative trend analysis approach. *Theor Appl Climatol* 152, 241–264 (2023). <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04400-9>
 13. Dehghani, T., Ahmadpari, H., Aghelmirzaei, F., & Godarzi, A. (2020). Meteorological drought monitoring using several drought indices (Case study: Aligudarz county). https://www.researchgate.net/publication/361855458_Meteorological_drought_monitoring_using_several_drought_indices_Case_study_Aligudarz_county
 14. Dracup, J.A., Lee, K.I.L.E., Paulson, E.G., 1980. On the definition of droughts. *Water Resour Res* 16, 297–302. <https://doi.org/10.1029/WR016i002p00297>
 15. Faisal, A., Indarto, I., Novita, E., & Budiyo, B. (2021). Assessment of agricultural drought based on CHIRPS data and SPI method over West Papua–Indonesia. *Journal of Water and Land Development*, 44–52. : <https://doi.org/10.24425/jwld.2021.139942>
 16. Gaddikeri, V., Sarangi, A., Singh, D. K., Jatav, M. S., Rajput, J., & Kushwaha, N. L. (2024). Trend and change-point analyses of meteorological variables using Mann–Kendall family tests and innovative trend assessment techniques in New Bhanupur command (India). *Journal of Water and Climate Change*, 15(5), 2033–2058. <https://doi.org/10.2166/wcc.2024.462>
 17. Gajbhiye, S., Meshram, C., Singh, S. K., Srivastava, P. K. & Islam, T. 2016 Precipitation trend analysis of Sindh River Basin, India, from 102-year record (1901–2002). *Atmospheric Science Letters* 17 (1), 71–77. <https://doi.org/10.1002/asl.602>
 18. Gao, Y., Fu, S., Cui, H., Cao, Q., Wang, Z., Zhang, Z., Wu, Q., Qiao, J., 2023. Identifying the spatio-temporal pattern of drought characteristics and its constraint factors in the Yellow River Basin. *Ecol. Indic.* 154, 110753 <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110753>.
 19. Gonçalves, S. T. N., Vasconcelos Júnior, F., & das C., Silveira, C. da S., Cid, D. A. C., Martins, E. S. P. R., & Costa, J. M. F. da. management. *Water*, 16(15), 2124. <https://doi.org/10.3390/w16152124>
 4. Alessi MJ, Herrera DA, Evans CP, DeGaetano AT, Ault TR (2022) Soil Moisture Conditions Determine Land-Atmosphere Coupling and Drought Risk in the Northeastern United States. *JGR Atmos* 127. <https://doi.org/10.1029/2021jd034740>
 5. Alley, W.M., 1984. The Palmer drought severity index: limitations and assumptions. *Clim. Appl. Meteorol.* 23, 1100–1109. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1984\)0232.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1984)0232.0.CO;2)
 6. Ankrah, J., Monteiro, A., & Madureira, H. (2023). Spatiotemporal Characteristics of Meteorological Drought and Wetness Events across the Coastal Savannah Agroecological Zone of Ghana. *Water*, 15(1), 211. <https://doi.org/10.3390/w15010211>
 7. Bagherpour M, Seyedian M, Fathabadi A, Mohamadi A. Study of Mann-Kendall test performance in detecting the series of autocorrelation. *jwmseir* 2017; 11 (36) :11-21 URL: <http://jwmsei.ir/article-1-532-en.html>
 8. Bandyopadhyay, A., Bhadra, A., Raghuwanshi, N. & Singh, R. 2009 Temporal trends in estimates of reference evapotranspiration over India. *Journal of Hydrologic Engineering* 14 (5), 508–515. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000006](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000006)
 9. Battisti, D.S., Naylor, R.L., 2009. Historical warnings of future food insecurity with unprecedented seasonal heat. *Science* 323 (5911), 240–244. <https://doi.org/10.1126/science.1164363>.
 10. Calma, J., & Fajardo, S. M. (2025). Climate Trend Analysis Using Mann-Kendall and Sen's Slope Estimator Tests in Central Luzon, Philippines. *Interdisciplinary Research Review*, 20(1). <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/jtir/article/view/250008>
 11. Chandniha, S. K., Meshram, S. G., Adamowski, J. F. & Meshram, C. 2017 Trend analysis of precipitation in Jharkhand State, India. *Theoretical and Applied Climatology* 130 (1), 261–274. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1875-x>
-

- <https://doi.org/10.1007/s12145-024-01324-4>
28. Kazanchi, S. R., & Awchi, T. A. (2024). Meteorological Drought Analysis Using Multiple Indices for Selected Stations in Iraq. *Tikrit Journal of Engineering Sciences*, 31(2), 91-105. <https://doi.org/10.25130/tjes.31.2.9>
 29. Kenabatho, P. K. (2025). Innovative trend analysis of long-term spatial-temporal rainfall patterns over Botswana: Implications for water resources management. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 58, 102217. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102217>
 30. Kendall, M. G. (1948). Rank correlation methods.
 31. Khasraei, A., Zare Abyaneh, H., Jovzi, M., & Albaji, M. (2024). Long-term monitoring and evaluation of drought and determining the accuracy of its indicators in western Iran. *Environment, Development and Sustainability*, 1-24. <https://doi.org/10.1007/s10668-024-04608-3>
 32. Kliengchuay, W., Mingkhwan, R., Kiangkoo, N., Suwanmanee, S., Sahanavin, N., Kongpran, J., ... & Tantrakarnapa, K. (2024). Analyzing temperature, humidity, and precipitation trends in six regions of Thailand using innovative trend analysis. *Scientific Reports*, 14(1), 7800. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-57980-5>
 33. Korkmaz, M., & Kuriqi, A. (2024). Regional climate change and drought dynamics in Tunceli, Turkey: Insights from drought indices. *Water Conservation Science and Engineering*, 9(2), 49. <https://doi.org/10.1007/s41101-024-00281-9>
 34. Latifoğlu L, Bayram S, Aktürk G, Citakoglu H (2024) Drought index time series forecasting via three-in-one machine learning concept for the Euphrates basin. *Earth Sci Inf* 17(6):5841–5898. <https://doi.org/10.1007/s12145-024-01471-8>
 35. Leng S, Huete A, Cleverly J, Gao S, Yu Q, Meng X, Qi J, Zhang R, Wang Q (2022) Assessing the Impact of Extreme Droughts on Dryland Vegetation by Multi-Satellite Solar-Induced Chlorophyll Fluoresce. <https://doi.org/10.3390/rs14071581>
 - (2023). Comparative analysis of drought indices in hydrological monitoring in Ceará's semi-arid basins, Brazil. *Water*, 15(7), 1259. <https://doi.org/10.3390/w15071259>
 20. Gümüş, M. G., Çiftçi, H. Ç., & Gümüş, K. (2025). Determination of the performance of training algorithms and activation functions in meteorological drought index prediction with nonlinear autoregressiveneuralnetwork. *EarthScienceInformatics*, 18(2),197.<https://doi.org/10.1007/s12145-025-01711-5>
 21. He, B., Chang, J., Wang, Y., Wang, Y., Zhou, S., Chen, C., 2021. Spatio-temporal evolution and non-stationary characteristics of meteorological drought in inland arid areas. *Ecol. Indic.* 126, 107644 <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107644>.
 22. He, X., Wada, Y., Wanders, N., Sheffield, J., 2017. Human water management intensifies hydrological drought in California. *Geophys. Res. Lett.* 1–19. <https://doi.org/10.1002/2016GL071665>
 23. Heim Jr.R.R.,2002 Areview of twentieth – century drought indices used in the United states. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 83,1149–1166. <https://doi.org/10.1175/1520-0477-83.8.1149>
 24. Hu, P., Zhang, Q., Shi, P., Chen, B., Fang, J., 2018. Flood-induced mortality across the globe: spatiotemporal pattern and influencing factors. *Sci. Total Environ.* 643, 171–182. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.197>
 25. Islam, S.M.S., Islam, K.M.A., Akter, R., 2022. Drought hot spot analysis using local indicators of spatial autocorrelation : an experience from Bangladesh. *Environ. Challenges* 6, 100410. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100410>.
 26. Jain, S. K., Kumar, V. & Saharia, M. 2013 Analysis of rainfall and temperature trends in northeast India. *International Journal of Climatology* 33 (4), 968–978. <https://doi.org/DOI:10.1002/joc.3483>
 27. Kadam CM, Bhosle UV, Holambe RS (2024) Deep learningdriven regional drought assessment: an optimized perspective. *Earth Sci Inf* 17(2):1523–1537.

- (Case Study: Urmia City). *Journal of Information Processing and Management Research*, 40(1). <https://doi.org/jipm.40.1>
43. Muter, S. A., Al-Timimi, Y. K., & Al-Jiboori, M. H. (2024, July). Analysis of temporal and spatial drought characteristics in Iraq using the standard precipitation index (SPI). In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1371, No. 2, p. 022032). IOP Publishing. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1371/2/022032>
 44. Natarajan, N., Vasudevan, M., Ahash Raja, S., Mohanpradaap, K., Sneha, G., & Joshna Shanu, S. (2023). An assessment methodology for drought severity and vulnerability using precipitation-based indices for the arid, semi-arid and humid districts of Tamil Nadu, India. *Water Supply*, 23(1), 54-79. <https://doi.org/10.2166/ws.2022.415>
 45. Ngwenya M, Gidey E, Simatele MD (2024) Agroecological-based modeling of meteorological drought at 12-month time scale in the Western Cape Province of South Africa. *Earth Sci Inf* 17(3):1851–1865. <https://doi.org/10.1007/s12145-023-01193-3>
 46. Park, S., Im, J., Jang, E., Rhee, J., 2016. Drought assessment and monitoring through blending of multi-sensor indices using machine learning approaches for different climate regions. *Agric. for. Meteorol.* 216, 157–169. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.10.011>.
 47. Pradhan, P., Costa, L., Rybski, D., Lucht, W., Kropp, J.P., 2017. A systematic study of Sustainable Development Goal (SDG) interactions. *Earth's Future* 5 (11), 1169–1179. <https://doi.org/10.1002/2017EF000632>
 48. Quiring, S.M., Papakryiakou, T.N., 2003. An evaluation of agricultural drought indices for the Canadian prairies. *Agric. for. Meteorol.* 118, 49–62. [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(03\)00072-8](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(03)00072-8).
 49. Rezaei, R., & Shabri, A. (2024). Enhancing drought prediction precision with EEMD-ARIMA modeling based on standardized precipitation index. *Water Science & Technology*, 89(3), 745-770. <https://doi.org/10.2166/wst.2024.028>
 36. Li, J., Zhang, Q., Chen, Y.D., Singh, V.P., 2015. Future joint probability behaviors of precipitation extremes across China: spatiotemporal patterns and implications for flood and drought hazards. *Glob. Planet. Chang.* 124, 107–122. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.11.012>
 37. Mallick, J., Talukdar, S., Alsubih, M. et al. Analysing the trend of rainfall in Asir region of Saudi Arabia using the family of Mann-Kendall tests, innovative trend analysis, and detrended fluctuation analysis. *Theor Appl Climatol* 143,823841(2021).<https://doi.org/10.1007/s00704-020-03448-1>
 38. McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993, January). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology* (Vol. 17, No. 22, pp. 179-183). <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2334046>
 39. Meysam Salarijazi, Iman Ahmadianfar, Zaher Mundher Yaseen, Prediction enhancement for surface water sodium adsorption ratio using limited inputs: Implementation of hybridized stacked ensemble model with feature selection algorithm, *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, Volume 134, 2024, 103561, ISSN 1474-7065*, <https://doi.org/10.1016/j.pce.2024.103561>.
 40. Młynski, D., Wałęga, A., Kuriqi, A., 2021. Influence of meteorological drought on environmental flows in mountain catchments. *Ecol. Indic.* 133 <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108460>
 41. Mohammadi, N., Hejazizadeh, Z., Zeaiean Firouzabadi, P., & Karbalaee, A. (2024). Detection of the effect of climate change on the mechanism of heat islands in Tehran province. *Journal of the Nivar*, 48(124-125), 203-224.: <https://doi.org/10.30467/nivar.2024.442784.1281>
 42. Mohammadrezapour, R., Rafipour, R., & Alipour, A. (2024). Examining the Application of the Co-Creation Concept in Achieving Smartness in Urban Communities
-

- Remote Sens. 59, 244–253. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2005.02.003>
58. Tan X, Wu X, Huang Z, Fu J, Tan X, Deng S, Liu Y, Gan TY, Liu B (2023) Increasing global precipitation whiplash due to anthropogenic greenhouse gas emissions. *Nat Commun* 14. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-38510-9>
 59. Tareke, K. A. (2025). Long-term hydrological drought monitoring and trend analysis in Blue Nile River basin. *Heliyon*, 11(1). <https://doi.org/10.30467/nivar.2024.442784.1281>
 60. Terzi, T.B., Önöz, B. DroughtStats: A comprehensive software for drought monitoring and analysis. *Earth Sci Inform* 18, 159 (2025). <https://doi.org/10.1007/s12145-024-01687-8>
 61. Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S., Lopez-Moreno, J.I., 2010. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *J. Clim.* 23, 1696–1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
 62. Walker DW, Van Loon AF (2023) Droughts are coming on faster. *Science* 380:130–132. <https://doi.org/10.1126/science.adh3097>
 63. Wardlow, B.D., Anderson, M.C., Verdin, J.P., 2012. Remote Sensing of Drought: Innovative Monitoring Approaches. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b11863>
 64. Wilhite, D.A., Svoboda, M.D., Hayes, M.J., 2007. Understanding the complex impacts of drought : A key to enhancing drought mitigation and preparedness *. *Water Resour. Manag.* 763–774 <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9076-5>.
 65. Yang, C., Liu, C., Gu, Y., Wang, Y., Xing, X., Ma, X., 2023. A novel comprehensive agricultural drought index accounting for precipitation, evapotranspiration, and soil moisture. *Ecol. Indic.* 154, 110593 <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110593>.
 66. Yin, J., Yuan, Z., Li, T., 2021. The spatial-temporal variation characteristics of natural vegetation drought in the Yangtze river source region, China. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 18, 1–25. <https://doi.org/10.3390/ijerph18041613>.
 50. Salahi, B., Rezaei Banafsheh Daragh, M., Vaezi, A., & Faridpour, M. (2018). Monitoring and comparative analysis of meteorological drought on the groundwater level changes Marand plain. *Journal of Spatial Analysis Environmental hazards*, 4(4), 61-78. <https://www.dpublication.com/wp-content/uploads/2020/09/11-1853.pdf>
 51. Salehnia, N., Alizadeh, A., Sanaeinejad, H., Bannayan, M., Zarrin, A., & Hoogenboom, G. (2017). Estimation of meteorological drought indices based on AgMERRA precipitation data and station-observed precipitation data. *Journal of Arid Land*, 9(6), 797–809. <https://doi.org/10.1007/s40333-017-0070-y>
 52. Salmi, T. (2002). Detecting trends of annual values of atmospheric pollutants by the Mann-Kendall test and Sen's slope estimates-the Excel template application MAKESENS. *Ilmatieteen laitos*.
 53. Sen, P. K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American statistical association*, 63(324), 1379-1389. <http://www.jstor.org> Tue Mar 20 18:18:32 2007
 54. Shamsnia, S.A. (2023). Adaptive evaluation and comparison of SMDI, SPI and RDI drought indices in Zarghan region, Fars province. *Journal of the Climate Change Research*, 4 (15), 73-90. <https://doi.org/10.30488/crcr.2023.417456.1163>
 55. Shi, X., Ding, H., Wu, M., Zhang, N., Shi, M., Chen, F., Li, Y., 2022. Effects of different types of drought on vegetation in Huang-Huai-Hai River Basin, China. *Ecol. Indic.* 144, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109428>.
 56. Smakhtin, V. U., & Hughes, D. A. (2007). Automated estimation and analyses of meteorological drought characteristics from monthly rainfall data. *Environmental Modelling & Software*, 22(6), 880-890. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2006.05.013>
 57. Tadesse, T., Brown, J.F., Hayes, M.J., 2005. A new approach for predicting droughtrelated vegetation stress : Integrating satellite, climate, and biophysical data over the U. S. Central Plains. *Photogramm.*

68. Zeng J, Zhou T, Qu Y, Bento VA, Qi J, Xu Y, Li Y, Wang Q (2023) An improved global vegetation health index dataset in detecting vegetation drought. *Sci Data* 10. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02255-3>
67. Zarei, M., Naeemi Tabar, M., & Zandi, R. (2023). Drought Risk Analysis using Drought Risk Assessment Indices The Case Study of Khorasan Razavi Province. *Geographical planning of space quarterly journal*, 13 (2), 133-150. <http://doi.org/10.30488/GPS.2023.387240.3622>
-