Vol. 15, No. 3, Autumn 2026, p. 160-180 ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

Journal of Geography and Environmental Hazards

RESEARCH ARTICLE DOI: 10.22067/GEOEH.2026.100096.1689 OPEN ACCESS

Spatiotemporal Analysis of Drought in the Lake Urmia Basin Using the Crossing Empirical Trend Analysis (CETA)

Farzaneh Saidpour Dalezi [1], Khadijeh Javan [1]*

[1] Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, Urmia University, Urmia, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 27 July 2026

Revised: 07 September 2026

Accepted: 09 September 2026

Available Online:

09 September 2026

Keywords:

Drought

Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)

Crossing Empirical Trend Analysis (CETA)

Climatic Variability

Lake Urmia

ABSTRACT

Drought is one of the most important climatic phenomena affecting water resources and environmental conditions in the Lake Urmia Basin, making the assessment of its spatiotemporal variability particularly important. This study aimed to investigate the spatiotemporal variations in drought using the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) and the Crossing Empirical Trend Analysis (CETA) method over the period 1987–2024. Precipitation and temperature data from eight selected stations across the basin were used. The results showed substantial temporal fluctuations in SPEI, with a non-uniform spatial pattern of variability across the basin. CETA analysis indicated that the upper slope (Us) and pivot slope (Ps) were decreasing at most stations, whereas the behavior of the lower slope (Ls) varied among stations. At Mahabad, Saqez, Takab, and Urmia, us showed a decreasing trend while Ls showed an increasing trend, indicating opposing changes in the two tails of the SPEI distribution. In contrast, both slopes showed decreasing trends at Maragheh, Sahand, and Sarab. Sen's slope (Ss) was also decreasing at most stations, while differences in its magnitude indicated spatial heterogeneity in the rate of temporal changes in SPEI. Overall, the findings indicate a predominant decreasing tendency in SPEI across most parts of the basin, along with spatial differences in the behavior of different segments of the index distribution

* Corresponding author: Khadijeh Javan E-mail address: kh.javan@urmia.ac.ir

How to cite this article: Saidpour Dalezi, F., & Javan, Kh. (2026). Spatiotemporal Analysis of Drought in the Lake Urmia Basin Using the Crossing Empirical Trend Analysis (CETA). *Journal of Geography and Environmental Hazards, 15*(3), 160-180. https://doi.org/10.22067/geoeh.2026.100096.1689

©2026 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Extended Abstract

Introduction

Drought is one of the most important climatic phenomena affecting water resources, agricultural systems, and environmental conditions, particularly in arid and semi-arid regions. Its temporal evolution and spatial distribution are influenced by variations in precipitation and atmospheric water demand, making the identification of changes in drought conditions important for sustainable water resources management. The Lake Urmia Basin in northwestern Iran has experienced substantial fluctuations in moisture conditions during recent decades, and changes in drought characteristics have important implications for the management of water resources in the basin. Previous studies in the Lake Urmia Basin have mainly focused on the temporal behavior of drought indices and their overall trends. However, an overall trend may not fully represent changes occurring across different portions of the distribution of a climatic index. In particular, the upper and lower parts of a drought-index distribution may exhibit different temporal behaviors. The Crossing Empirical Trend Analysis (CETA), introduced by Şen (2022), provides an approach for examining trend behavior at different portions of a time-series distribution through the upper slope (Us), lower slope (Ls), and pivot slope (Ps). In addition, Sen's slope (Ss) can be used to characterize the overall direction and magnitude of temporal change. Therefore, this study aimed to investigate the spatiotemporal variations in drought in the Lake Urmia Basin using the 12-month Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI-12) and the CETA method during 1987–2024.

Material and Methods

The Lake Urmia Basin, with an area of approximately 51,876 km², is located in northwestern Iran. Daily precipitation and air temperature data from eight synoptic stations, including Urmia, Tabriz, Sahand, Sarab, Maragheh, Mahabad, Saqez, and Takab, were used for the period 1987–2024. The selected stations represent different geographical and climatic conditions within the basin. Missing observations in the original meteorological records were reconstructed and completed before the analysis. The SPEI was calculated at a 12-month timescale based on the climatic water balance, defined as the difference between precipitation and potential evapotranspiration. Potential evapotranspiration was estimated using the Hargreaves–Samani method based on the available daily temperature data. The resulting daily potential evapotranspiration values were aggregated to monthly values and used together with monthly precipitation to calculate SPEI-12. The temporal behavior of SPEI was subsequently examined using the Crossing Empirical Trend Analysis (CETA). In this method, the time series is divided into two temporal sections and the crossing behavior of the series is used to derive trend lines representing different portions of the distribution. The upper slope (Us), lower slope (Ls), and pivot slope (Ps) were calculated to characterize changes in the upper, lower, and central portions of the SPEI distribution, respectively. Sen's slope (Ss) was also calculated to provide an overall measure of the direction and magnitude of temporal change. Because CETA does not provide a statistical significance test for the estimated slopes in the present implementation, the direction of change was determined according to the sign of each slope. Positive values were therefore interpreted as increasing and negative values as decreasing. The results were summarized in tables and spatial distribution maps to identify differences among the stations.

Results and Discussion

The temporal variations in SPEI-12 showed considerable fluctuations between dry and wet conditions across the eight stations, with noticeable spatial differences in the magnitude and temporal behavior of these variations. The CETA results indicated that the upper slope (Us) was decreasing at all stations, with values ranging from −0.00640 at Maragheh to −0.00013 at Tabriz, indicating differences in the rate of change across the basin. The pivot slope (Ps) was also decreasing at seven stations, whereas Tabriz showed a positive value. In contrast, the lower slope (Ls) exhibited a heterogeneous spatial pattern. Ls was positive at Mahabad, Saqez, Tabriz, Takab, and Urmia, and negative at Maragheh, Sahand, and Sarab. The highest positive Ls occurred at Urmia (0.010571), highlighting the marked spatial contrast in the lower portion of the SPEI distribution. Accordingly, Us and Ls showed opposite directions at Mahabad, Saqez, Tabriz, Tekab, and Urmia, while both were decreasing at Maragheh, Sahand, and Sarab. Sen's slope (Ss) was negative at seven stations, with the

strongest overall decrease occurring at Maragheh (−0.00320), whereas Tabriz showed a positive slope (0.000863). The differences between Ss and the CETA parameters indicate that the overall trend did not always represent the same behavior across different portions of the SPEI distribution. The Pivot Point and pivot trend line further helped distinguish the behavior of the central portion from the upper and lower segments. Overall, the spatial distribution maps confirmed considerable heterogeneity in drought trends across the basin. These findings are consistent with previous studies reporting spatial and temporal heterogeneity in drought conditions in Iran and with applications of CETA to climatic time series. The results highlight the value of considering different portions of the SPEI distribution alongside the overall trend when examining drought variability.

Conclusion

This study investigated the spatiotemporal variations in drought across the Lake Urmia Basin using SPEI-12 and the Crossing Empirical Trend Analysis (CETA) method during 1987–2024. The results demonstrated substantial spatial and temporal heterogeneity in SPEI behavior across the eight selected stations. The upper slope (Us) was decreasing at all stations, while the lower slope (Ls) showed a heterogeneous spatial pattern, with increasing values at Mahabad, Saqez, Tabriz, Takab, and Urmia and decreasing values at Maragheh, Sahand, and Sarab. This resulted in opposing Us and Ls directions at five stations, whereas both slopes were decreasing at the remaining three stations. The pivot slope (Ps) was decreasing at seven stations and increasing at Tabriz. Sen's slope was also decreasing at seven stations, with the largest overall decrease occurring at Maragheh, while Tabriz showed a positive overall slope. These results indicate that the predominant decreasing direction of SPEI across the basin was accompanied by substantial spatial differences in the magnitude and distributional behavior of the changes. The findings also demonstrate that the overall trend of SPEI does not necessarily describe the behavior of all portions of its distribution. Considering Us, Ls, Ps, and Ss together therefore provides a more detailed description of the spatial and temporal characteristics of drought conditions. The identified spatial differences can contribute to drought monitoring, the identification of areas with greater changes, and improved water resources management in the Lake Urmia Basin.

جلد ۱۵، شماره ۳، پاییز ۱۴۰۵ ، ص ۱۸۰-۱۶۰ ISSN (Print):2322-1682 ISSN (Online):2383-3076

نشریه علمی
جغرافیا و مخاطرات محیطی

دسترسی آزاد DOI: 10.22067/GEOEH.2026.100096.1689 مقاله پژوهشی

بررسی تغییرات زمانی- مکانی خشکسالی در حوضهٔ آبریز دریاچه ارومیه با بهره‌گیری از روش تحلیل روند تجربی متقاطع (CETA)

فرزانه سعیدپور دله‌زی[۱]، خدیجه جوان[۱*]

[۱] گروه جغرافیا، دانشکدهٔ ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچهٔ مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۵/۰۵

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۶/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۱۸

کلمات کلیدی:

خشکسالی

شاخص SPEI

تحلیل روند تجربی متقاطع (CETA)

تغییرپذیری اقلیمی

دریاچه ارومیه

چکیده

خشکسالی یکی از مهم‌ترین پدیده‌های اقلیمی مؤثر بر منابع آب و شرایط محیطی در حوضه دریاچه ارومیه است و بررسی تغییرات زمانی و مکانی آن اهمیت زیادی دارد. این پژوهش با هدف بررسی تغییرات زمانی- مکانی خشکسالی با استفاده از شاخص SPEI و روش تحلیل روند تجربی متقاطع (CETA) طی دوره ۱۹۸۷-۲۰۲۴ انجام شد. داده‌های بارش و دما در هشت ایستگاه منتخب حوضه مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد که SPEI از نوسانات زمانی قابل توجهی برخوردار بوده و الگوی تغییرات آن در سطح حوضه یکنواخت نیست. تحلیل CETA نشان داد که در بیشتر ایستگاه‌ها شیب بخش بالایی (Us) و شیب محوری (Ps) کاهشی است، در حالی که رفتار بخش پایینی (Ls) در برخی ایستگاه‌ها متفاوت است. در مهاباد، سقز، تکاب و ارومیه، Us کاهشی و Ls افزایشی بود که بیانگر ناهم‌جهتی تغییرات در دو بخش انتهایی توزیع SPEI است؛ در مقابل، در مراغه، سهند و سراب، هر دو شیب جهت کاهشی داشتند. همچنین، شیب سن (Ss) در بیشتر ایستگاه‌ها کاهشی بود و تفاوت مقدار آن، ناهمگنی شدت تغییرات زمانی SPEI را نشان داد. در مجموع، نتایج بیانگر غلبه جهت کاهشی SPEI در بیشتر بخش‌های حوضه و وجود تفاوت مکانی در رفتار بخش‌های مختلف توزیع شاخص است.

مقدمه

تغییر اقلیم به عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی قرن حاضر، با افزایش دمای هوا، تغییر الگوی زمانی و مکانی بارش و تشدید رخدادهای حدی اقلیمی، اثرات گسترده‌ای بر منابع آب، اکوسیستم‌ها، کشاورزی و توسعه اقتصادی- اجتماعی برجای گذاشته است. یکی از مهم‌ترین پیامدها، تغییر در فراوانی، شدت و تداوم رخدادهای خشکسالی در بسیاری از مناطق جهان، به‌ویژه نواحی خشک و نیمه‌خشک، است (Ahmadi, Paimozd & Rahimi, 2021). اگر چه خشکسالی در کشورهایی با اقلیم خشک و نیمه‌خشک از جمله ایران همواره یکی از چالش‌های مهم اقلیمی و محیطی بوده است، اما در دهه‌های اخیر تحت تأثیر تغییر اقلیم، این پدیده در بسیاری از مناطق جهان به یکی از عوامل مهم تهدیدکننده امنیت آب و غذا تبدیل شده است

* نویسندهٔ مسئول: خدیجه جوان E-mail: kh.javan@urmia.ac.ir

(Kampragou, Apostolaki, Manoli, Froebrich & Assimacopoulos, 2011). خشکسالی برخلاف بسیاری از رخدادهای ناگهانی مانند سیل و زمین‌لرزه، به صورت تدریجی آغاز می‌شود، توسعه می‌یابد و معمولاً مرز زمانی مشخصی برای شروع و پایان ندارد؛ ازاین‌رو، شناسایی و پایش به‌موقع آن می‌تواند با پیچیدگی بیشتری همراه باشد (Navabi, Moghaddasi & Gangi, 2021). این ویژگی، در کنار گستردگی و تداوم زمانی خشکسالی، موجب می‌شود ارزیابی دقیق تغییرات آن برای مدیریت منابع آب و کاهش پیامدهای محیط‌زیستی، کشاورزی، اقتصادی و اجتماعی اهمیت ویژه‌ای داشته باشد. علاوه بر این، خشکسالی یکی از فراگیرترین و پرهزینه‌ترین مخاطرات طبیعی محسوب می‌شود که پیامدهای گسترده‌ای بر منابع آب، محیط‌زیست، تولیدات کشاورزی، امنیت غذایی و توسعه اقتصادی و اجتماعی دارد (Pokhrel et al., 2021).

به طور کلی، خشکسالی به چهار گروه اصلی شامل خشکسالی هواشناسی، کشاورزی، هیدرولوژیکی و اجتماعی- اقتصادی تقسیم می‌شود (Khadr, 2016). خشکسالی هواشناسی معمولاً به عنوان نخستین شکل قابل شناسایی این پدیده بوده و معمولاً در اثر کاهش بارش، افزایش دما و کاهش رطوبت نسبی هوا ایجاد می‌شود. در صورت تداوم این شرایط، کاهش رواناب و تغذیه آب‌های زیرزمینی موجب شکل‌گیری خشکسالی هیدرولوژیکی خواهد شد (Khalili, Mahtabi, Nikbakht & Mohammadi, 2023). از سوی دیگر، افزایش تبخیر-تعرق، کاهش رطوبت خاک و ایجاد تنش آبی برای گیاهان، زمینه وقوع خشکسالی کشاورزی را فراهم می‌کند که در نهایت با کاهش تولیدات کشاورزی، امنیت غذایی و توسعه پایدار اقتصادی و اجتماعی را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Zhang et al., 2023). از این رو، پایش دقیق و مستمر خشکسالی یکی از ارکان اصلی مدیریت منابع آب و کاهش خسارات ناشی از این پدیده محسوب می‌شود.

به منظور پایش و ارزیابی خشکسالی، شاخص‌های متعددی توسعه یافته‌اند که هر یک بر اساس یک یا چند متغیر اقلیمی، شدت و وضعیت خشکسالی را توصیف می‌کنند. از آنجا که آغاز خشکسالی تدریجی بوده و عوامل مؤثر بر آن بسیار پیچیده و متأثر از شرایط اقلیمی و هیدرولوژیکی هستند، استفاده از شاخص‌های استاندارد، نقش مهمی در تشخیص، پایش و مدیریت این پدیده دارد (Sedaghat Nejad, Mosaedi, Ghahraman & Saadatpour, 2024; Mishra & Singh, 2010). به طور کلی، مهم‌ترین کارکردهای یک شاخص خشکسالی شامل تعیین زمان شروع و پایان خشکسالی، ارزیابی شدت، مدت و گسترهٔ مکانی آن و فراهم کردن اطلاعات لازم برای برنامه‌ریزی و مدیریت منابع آب است (Gaznavi, Mosaedi & Ghabaei Sough, 2021). در میان این شاخص‌ها، شاخص بارش- تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) یکی از شاخص‌های پرکاربرد برای بررسی تغییرات خشکسالی هواشناسی است. شاخص SPEI علاوه بر بارش، اثر تبخیر- تعرق بالقوه و در نتیجه تغییرات دما را نیز در محاسبات خود لحاظ می‌کند؛ ازاین‌رو، نسبت به تغییرات اقلیمی و گرمایش جهانی حساسیت بیشتری داشته و تصویر واقع‌بینانه‌تری از شرایط رطوبتی ارائه می‌دهد (Vicente-Serrano, Beguería & López-Moreno, 2010؛ Beguería, Vicente-Serrano, Reig & Latorre, 2014). این ویژگی سبب می‌شود SPEI برای بررسی تغییرات بلندمدت شرایط رطوبتی، به‌ویژه در شرایطی که تغییرات دما و تقاضای تبخیری در کنار تغییرات بارش رخ می‌دهد، شاخص مناسبی باشد. با این حال، محاسبه SPEI به تنهایی برای شناخت رفتار زمانی خشکسالی کافی نیست و بررسی روند تغییرات این شاخص در طول زمان نیز ضرورت دارد.

تحلیل روند یکی از رویکردهای رایج برای شناسایی تغییرات بلندمدت در سری‌های زمانی هیدروکلیماتولوژیکی است. روش‌های پارامتری و ناپارامتری متعددی برای این منظور توسعه یافته‌اند که در میان آن‌ها آزمون من-کندال و برآوردگر شیب سن از پرکاربردترین روش‌های ناپارامتری هستند که در مطالعات مختلف برای تحلیل روند بارش، دما و شاخص‌های خشکسالی به کار گرفته شده‌اند (Mirhashemi, Sharafi & Ariyantabar, 2021). این روش‌ها عمدتاً یک روند کلی را برای کل سری زمانی برآورد می‌کنند و از این طریق جهت و نرخ تغییرات عمومی یک متغیر را مشخص می‌سازند (Mirzayi Hasanlo, Abghari & Erfanian, 2020). با وجود کاربرد گسترده این روش‌ها، یک روند کلی لزوماً نمی‌تواند تفاوت رفتار مقادیر پایین، میانی و بالای توزیع یک متغیر را نشان دهد. در نتیجه، در سری‌هایی که تغییرات در بخش‌های مختلف توزیع یکسان نیست، اطلاعات مربوط به رفتار مقادیر حدی و روندهای نامتقارن ممکن است در یک شیب کلی ادغام شود. این مسئله در تحلیل متغیرهای

هیدروکلیماتولوژیکی و به‌ویژه شاخص‌های خشکسالی اهمیت بیشتری دارد؛ زیرا تغییر در مقادیر پایین و بالای یک شاخص الزاماً از یک الگوی روندی پیروی نمی‌کند.

در پاسخ به این محدودیت، روش‌های نوین تحلیل روند با هدف بررسی رفتار بخش‌های مختلف توزیع داده‌ها توسعه یافته‌اند. تحلیل روند نوآورانه (ITA[1]) یکی از رویکردهای مهم در این زمینه است که امکان بررسی بصری روند در سطوح مختلف داده، از جمله مقادیر پایین، متوسط و بالا، را فراهم می‌کند (Şen, 2012). پس از معرفی ITA، روش‌های گرافیکی و توسعه‌یافته دیگری نظیر تحلیل روند چندضلعی نوآورانه (IPTA[2])، و روش تحلیل روند محوری نوآورانه (ITPAM[3]) نیز با هدف بررسی روند در مقیاس‌ها و ساختارهای مختلف سری‌های زمانی ارائه شدند (Şen, 2017؛ Ceribasi, Ceyhunlu & Ahmed, 2021). این روش‌ها امکان بررسی جزئی‌تر روند را نسبت به روش‌های کلاسیک فراهم می‌کنند و می‌توانند تغییرات در سطوح مختلف مقادیر یا مقیاس‌های زمانی ماهانه و فصلی را آشکار سازند (Ceyhunlu & Ceribasi, 2024). با این حال، این روش‌ها عمدتاً ماهیتی گرافیکی دارند و امکان برآورد مستقیم و کمی شیب روند در سطوح مشخص توزیع را محدود می‌کنند. از این رو، توسعه روش‌هایی که ضمن بررسی بخش‌های مختلف توزیع، امکان تعیین کمی میزان تغییرات روند را نیز فراهم کنند، مورد توجه قرار گرفت.

در همین راستا، سن (Şen, 2022) روش تحلیل روند تجربی متقاطع (CETA) را برای برآورد کمی شیب روند در سطوح مختلف توزیع سری‌های زمانی معرفی کرد. در CETA، شیب روند در یک سطح مشخص از داده‌ها بر اساس خطی تعیین می‌شود که بیشترین تعداد نقاط تقاطع را با سری زمانی ایجاد می‌کند؛ بنابراین، برخلاف روش‌های کلاسیک که یک شیب کلی برای کل سری زمانی ارائه می‌کنند، این روش امکان مقایسه جهت و میزان روند در بخش‌های مختلف توزیع و به‌ویژه بخش‌های پایین و بالای سری زمانی را فراهم می‌سازد. این ویژگی، CETA را برای بررسی رفتار روندی مقادیر پایین و بالای توزیع، که می‌توانند نمایانگر شرایط حدی در سری‌های هیدروکلیماتولوژیکی باشند، مناسب می‌سازد (Şen, 2022؛ Şimşek, Ceyhunlu, Ceribasi & Keskiner, 2024). مطالعات اخیر نیز کاربرد روش CETA را در تحلیل روند متغیرهای اقلیمی و شاخص‌های خشکسالی بررسی کرده‌اند: برای نمونه، سیمسک و همکاران (Şimşek et al,. 2024) با استفاده از این روش، روند خشکسالی هواشناسی را در حوضه‌های آبریز آراس و کورو ترکیه بررسی کردند و نشان دادند که CETA قادر است تفاوت روند در بخش‌های بالایی، پایینی و محوری توزیع را آشکار ساخته و تغییرات روندی را با جزئیات بیشتری نسبت به روش‌های متداول نشان دهد. سیهونلو و سوما (Ceyhunlu & Cuma, 2025) با بررسی روند دما، بارش و رطوبت نسبی در حوضه رودخانه ساکاریا نشان دادند که نتایج روش CETA از همخوانی بالایی با آزمون‌های من-کندال و شیب سن برخوردار بوده و می‌تواند به عنوان رویکردی کارآمد و مکمل در تحلیل روند متغیرهای هیدرواقلیمی مورد استفاده قرار گیرد. افزون بر این، پاوار و همکاران (Pawar, Ceyhunlu, Ceribasi & Şimşek, 2025) نیز کاربرد CETA را در تحلیل شاخص‌های خشکسالی بررسی کرده و بر توانایی آن در آشکارسازی روندهای متفاوت در بخش‌های مختلف توزیع تأکید کردند. در سال‌های اخیر، در ادامه توسعه روش‌های تحلیل روند در سطوح مختلف توزیع، روش‌های جدیدتری نیز بر پایه این رویکرد ارائه شده‌اند. از جمله، تحلیل روند تجربی متقاطع اصلاح‌شده (MCETA[4]) در سال ۲۰۲۵ با هدف توسعه چارچوب CETA و افزایش انعطاف‌پذیری آن در بررسی ساختارهای مختلف روند در سری‌های زمانی معرفی شد (Modaresi, Oskouei, Janvanshiri & Bajgiran, 2025). این روند توسعه روش‌ها نشان‌دهندهٔ توجه روزافزون به ارزیابی روند در بخش‌های مختلف توزیع و به‌ویژه آشکارسازی رفتارهای متفاوت در مقادیر دور از مرکز سری‌های زمانی است.

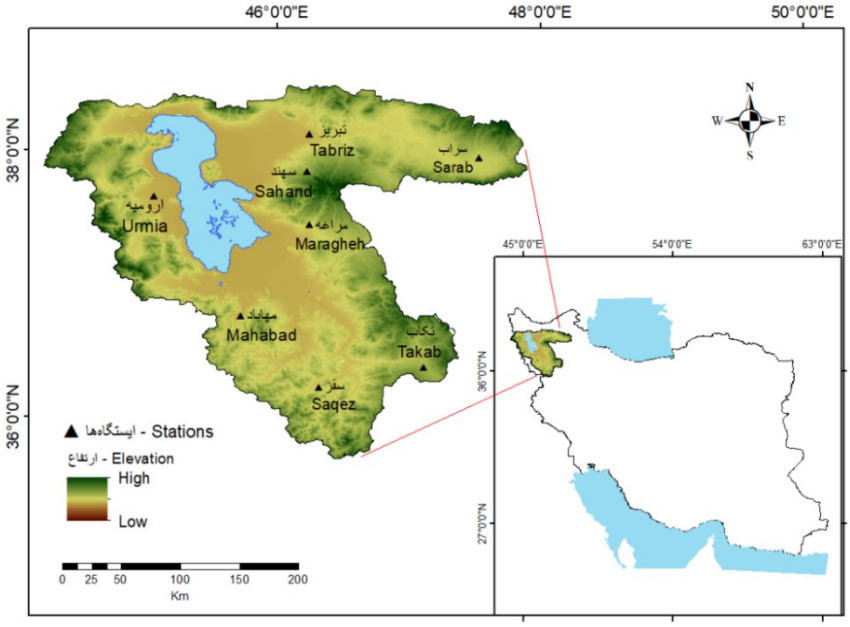
با وجود مطالعات متعدد درباره خشکسالی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه، هنوز یکی از جنبه‌های مهم تغییرات خشکسالی، یعنی چگونگی رفتار روند در بخش‌های مختلف توزیع شاخص‌های خشکسالی، به طور کافی بررسی نشده است.

1 - Innovative Trend Analysis
2 - Innovative Polygon Trend Analysis
3 - Innovative Trend Pivot Analysis Method
4 - Modified Crossing Empirical Trend Analysis

بیشتر ارزیابی‌های موجود، روند شاخص را به صورت کلی یا ویژگی‌های رخدادهای خشکسالی را بر اساس شدت، مدت و فراوانی بررسی کرده‌اند؛ در نتیجه، مشخص نیست که آیا روند کلی شاخص می‌تواند تغییرات بخش‌های مختلف توزیع، به ویژه مقادیر متناظر با شرایط خشک و مرطوب شدید، را به طور کامل نمایندگی کند (Sobhani, Zengir & Kianian, 2019; Ahmadebrahimpour, Aminnejad & Khalili, 2019; Davarpanah, Erfanian & Javan, 2021; Habibi, Babaeian & Schöner, 2021; Mirgol, Nazari, Etedali & Zamanian, 2021; Shirmohammadi, Rostami, Varamesh, Jaafari & Taie Semiromi, 2024; Samiei & Alijanian, 2025). اگرچه این مطالعات شناخت ارزشمندی از وضعیت و تغییرات خشکسالی در حوضه فراهم کرده‌اند، بررسی یک روند کلی برای کل سری زمانی لزوماً نمی‌تواند تفاوت‌های موجود در رفتار روندی سطوح مختلف توزیع شاخص را آشکار سازد؛ به ویژه آنکه تغییرات در بخش‌های حدی توزیع می‌تواند الگوی متفاوتی از مقادیر مرکزی نشان دهد. مطالعات اخیر در مقیاس ایران نیز تغییرات قابل‌توجهی را در ساختار، گستره، تداوم و الگوی زمانی-مکانی خشکسالی نشان داده‌اند و بر پیچیدگی و ناهمگنی این پدیده در مقیاس ملی تأکید کرده‌اند (Mahdizadeh, Ghavidel & Farajzadeh, 2025; Mahdizadeh Sola, Ghavidel Rahimi & Farajzadeh, 2025). همچنین، مطالعات مبتنی بر سناریوهای اقلیمی آینده نشان داده‌اند که تغییرات مورد انتظار در بارش و دما می‌تواند الگوی خشکسالی در ایران را در دهه‌های آینده دستخوش تغییر کند؛ به‌ویژه آنکه کاهش بارش در برخی مناطق و فصل‌ها، هم‌زمان با افزایش دما، می‌تواند چالش‌های بیشتری را برای مدیریت منابع آب و کشاورزی ایجاد کند (Karbalaee, Shoja, Ashrafi & Kamangar, 2025). در حوضه آبریز دریاچه ارومیه نیز جوان (Javan, 2021) با استفاده از روش تحلیل روند نوآورانه نشان داد که روند خشکسالی در سطوح متناظر با شرایط خشک، نرمال و مرطوب الزاماً یکسان نیست. با این حال، تفاوت شیب روند در سطوح مختلف توزیع شاخص SPEI تاکنون به‌صورت کمی و نظام‌مند در مقیاس کل حوضه بررسی نشده است. این خلأ، به ویژه با توجه به قابلیت روش CETA در تعیین شیب روند در سطوح مختلف توزیع و آشکارسازی رفتار متفاوت بخش‌های حدی سری زمانی، اهمیت بیشتری می‌یابد. از این رو، پژوهش حاضر با هدف بررسی تغییرات زمانی و مکانی SPEI و ارزیابی ناهمگنی روند آن در سطوح مختلف توزیع در حوضه آبریز دریاچه ارومیه انجام شده است. در این راستا، تفاوت جهت و میزان شیب روند در بخش‌های مختلف توزیع SPEI بررسی می‌شود تا مشخص شود آیا روند کلی شاخص می‌تواند بیانگر رفتار روندی کل توزیع باشد یا بخش‌های مختلف آن، به‌ویژه در سطوح متناظر با شرایط خشک و مرطوب، الگوهای روندی متفاوتی را نشان می‌دهند. نتایج این پژوهش می‌تواند ضمن ارائه شناخت دقیق‌تر از الگوی زمانی و مکانی خشکسالی، به تبیین تفاوت‌های روندی در سطوح مختلف توزیع SPEI، بهبود ارزیابی تغییرات زمانی خشکسالی و فراهم‌سازی اطلاعات کاربردی برای مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی سازگاری با تغییر اقلیم در حوضه آبریز دریاچه ارومیه کمک کند.

منطقهٔ مورد مطالعه

حوضهٔ آبریز دریاچه ارومیه با مساحت تقریبی ۵۱۸۷۶ کیلومتر مربع، در محدوده ۴۴ تا ۴۸ درجه طول شرقی و ۳۵ تا ۳۸ درجه عرض شمالی واقع شده و حدود ۳ درصد از مساحت ایران را در بر می‌گیرد (Dinpashoh & jahanbakhsh & Mosavi-Jahani, 2023). این حوضه در شمال غرب ایران قرار داشته و از نظر تقسیمات سیاسی، حدود ۴۶ درصد از آن در استان آذربایجان غربی، ۴۳ درصد در استان آذربایجان شرقی و ۱۱ درصد در استان کردستان واقع شده است (Soufi, Alijani, Borna & Asadian, 2021). دریاچه ارومیه به‌عنوان بزرگ‌ترین دریاچه شور داخلی ایران، در مرکز این حوضه قرار دارد و نقش مهمی در تعادل اکولوژیکی و اقلیمی منطقه ایفا می‌کند. میانگین بارندگی سالانه حوضه حدود ۳۱۰ میلی‌متر بوده و میزان بارش در بخش‌های مختلف آن بین ۲۲۰ تا ۴۵۰ میلی‌متر متغیر است (Javan, 2021). در دهه‌های اخیر، کاهش قابل توجه تراز آب دریاچه ارومیه، همراه با تغییرات اقلیمی و بروز خشکسالی‌های مکرر، این حوضه را با چالش‌های جدی زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی مواجه کرده است؛ ازاین‌رو، بررسی روند زمانی و مکانی خشکسالی در این منطقه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی محدودهٔ مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل۱- موقعیت جغرافیایی محدودهٔ مورد مطالعه

Fig.1. Geographical location of the study area

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، به منظور بررسی تغییرات زمانی و مکانی خشکسالی در حوضهٔ آبریز دریاچه ارومیه، از داده‌های روزانه بارش و دمای هوا مربوط به هشت ایستگاه سینوپتیک شامل ارومیه، تبریز، سهند، سراب، مراغه، مهاباد، سقز و تکاب طی دوره آماری ۱۹۸۷ تا ۲۰۲۴ استفاده شد. داده‌های دمایی شامل دمای حداقل (Tmin)، دمای حداکثر (Tmax) و دمای میانگین (Tmean) بودند. ابتدا تبخیر- تعرق بالقوه با استفاده از داده‌های روزانه دما و روش هارگریوز- سامانی محاسبه شد. سپس داده‌های روزانه بارش و تبخیر- تعرق بالقوه به مقیاس ماهانه تجمیع شدند و سری زمانی ماهانه SPEI در مقیاس ۱۲ ماهه (SPEI-12) محاسبه شد. ایستگاه‌های مورد مطالعه با توجه به پراکنش مناسب در سطح حوضه و طول دوره آماری انتخاب شدند. مشخصات جغرافیایی و ارتفاع ایستگاه‌های مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات جغرافیایی و ارتفاع ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه

Table 1- Geographical characteristics and altitude of the studied synoptic stations

ردیف row	نام ایستگاه Station name	ارتفاع(m) height	عرض جغرافیایی latitude	طول جغرافیایی Longitude
1	ارومیه Urmia	1315.9	37° 32′	45° 05′
2	تکاب Takab	1817.2	36° 23′	47° 07′
3	تبریز Tabriz	1361	38° 05′	46° 17′
4	سراب Sarab	1682	37° 56′	47° 32′
5	سقز Saqez	1522.8	36° 15′	46° 16′
6	سهند Sahand	1641	37° 56′	46° 37′
7	مراغه Maragheh	1477.7	37° 24′	46° 16′0
8	مهاباد Mahabad	1385	36° 46′	45° 43′

شاخص بارش- تبخیر و تعرق استانداردشده (SPEI)

شاخص بارش- تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) توسط ویسنته‌سرانو و همکاران (Vicente-Serrano etal., 2010) با هدف رفع محدودیت‌های شاخص SPI و در نظر گرفتن اثر هم‌زمان بارش و تبخیر-تعرق بالقوه در ارزیابی خشکسالی توسعه یافت. مبنای محاسبه این شاخص، تراز اقلیمی آب است و علاوه بر تغییرات بارش، اثر تغییرات دما و نیاز تبخیری جو را نیز در ارزیابی شرایط خشک و مرطوب لحاظ می‌کند. از این رو، SPEI یکی از مناسب‌ترین شاخص‌ها برای بررسی خشکسالی در شرایط تغییر اقلیم و گرمایش جهانی محسوب می‌شود (Beguería et al., 2014؛ Vicente-Serrano et al., 2010).

در این پژوهش، تبخیر- تعرق بالقوه (PET) با استفاده از روش هارگریوز سامانی (Hargreaves & Samani, 1985) محاسبه شد. انتخاب این روش با توجه به نتایج مطالعات ارزیابی‌شده در ایران و سایر مناطق انجام شد. سپاس‌خواه و رزاقی (Sepaskhah & Razzaghi, 2009) عملکرد مناسب‌تر روش هارگریوز سامانی اصلاح‌شده را در مقایسه با روش تورنت‌ویت اصلاح‌شده در یک منطقه نیمه‌خشک ایران گزارش کردند. در یک ارزیابی جهانی نیز آلمارکس و همکاران (Almorox, Quej & Martí, 2015) عملکرد مناسب روش هارگریوز سامانی را در چندین طبقه اقلیمی، از جمله اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک، گزارش کردند. بر این اساس، با توجه به شرایط اقلیمی حوضه آبریز دریاچه ارومیه، روش هارگریوز سامانی برای برآورد PET انتخاب شد. محاسبه PET بر اساس رابطه (۱) صورت می‌پذیرد (Hargreaves & Samani, 1985).

$$PET = 0.408 \times 0.0023 \times (T_{mean} + 17.8) \times (T_{max} - T_{min})^{0.5} \times Ra \quad (۱)$$

که در آن: PET تبخیر- تعرق بالقوه (میلی‌متر در روز)، Tmean، Tmax و Tmin به ترتیب دمای متوسط، بیشینه و کمینه روزانه هوا (^{o}C) و Ra تابش فرازمینی ($MJ\ m^{-2}\ day^{-1}$) است. مقادیر Ra بر اساس عرض جغرافیایی و روز ژولیوسی هر ماه محاسبه شد.

ابتدا تبخیر- تعرق بالقوه با استفاده از داده‌های روزانه دما محاسبه شد و سپس مقادیر روزانه PET برای به دست‌آوردن تبخیر- تعرق بالقوه ماهانه تجمیع شدند. در ادامه، تراز اقلیمی آبی از اختلاف بین بارش ماهانه و تبخیر- تعرق بالقوه ماهانه با استفاده از رابطه (۲) محاسبه گردید:

$$D = P - PET \quad (۲)$$

که در آن؛ D تراز اقلیمی آبی، P بارش (میلی‌متر) و PET تبخیر-تعرق بالقوه (میلی‌متر) است. سپس مقادیر D در مقیاس‌های زمانی مورد نظر تجمیع شده و با استفاده از توزیع لگ‌لجستیک سه‌پارامتری برازش داده شد. در ادامه، احتمال تجمعی حاصل با استفاده از تابع معکوس توزیع نرمال استاندارد به مقادیر استاندارد تبدیل شد و شاخص SPEI محاسبه گردید (Vicente-Serrano et al., 2010).

طبقه‌بندی وضعیت رطوبتی بر اساس مقادیر شاخص SPEI و مطابق طبقات پیشنهادی مک‌کی و همکاران (McKee, Doesken & Kleist, 1993) انجام شد (جدول ۲). مقادیر منفی SPEI بیانگر شرایط خشکسالی و مقادیر مثبت نشان‌دهندهٔ شرایط ترسالی هستند و با افزایش قدر مطلق شاخص، شدت خشکسالی یا ترسالی افزایش می‌یابد.

در مقایسه با SPI، شاخص SPEI با لحاظ هم‌زمان اثر بارش و تبخیر- تعرق بالقوه، تصویر واقع‌بینانه‌تری از شرایط رطوبتی و تغییرات خشکسالی ارائه می‌دهد؛ ازاین‌رو، در سال‌های اخیر به یکی از پرکاربردترین شاخص‌های ارزیابی خشکسالی در مطالعات تغییر اقلیم و مدیریت منابع آب تبدیل شده است (Danandeh Mehr, Sorman, Kahya & Hesami Afshar, 2020؛ Vicente-Serrano et al., 2010). تمامی محاسبات مربوط به شاخص SPEI با استفاده از بسته استاندارد SPEI در نرم‌افزار R انجام گرفته است. در این پژوهش، شاخص SPEI در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه محاسبه شد تا تغییرات خشکسالی در مقیاس سالانه مورد بررسی قرار گیرد.

جدول ۲- طبقه بندی شاخص خشکسالی SPI و SPEI (McKee et al., 1993)

Table2- Classification of SPI and SPEI drought indices

SPI/SPEI	طبقه خشکسالی Drought class
≤ -2.00	خشکسالی خیلی شدید Extreme Drought
-1.99 ≤ -1.50	خشکسالی شدید Severe Drought
-1.49 ≤ -1.00	خشکسالی ملایم *Mild Drought*
0.99≥-0.99	نرمال Normal
1.49≥1.00	ترسالی ملایم Moderately Wet
1.99≥1.50	ترسالی شدید Very Wet
≥ 2.00	ترسالی خیلی شدید Extremely Wet

روش تحلیل روند تجربی متقاطع (CETA)

به منظور بررسی روند سری‌های زمانی شاخص‌های خشکسالی، از روش تحلیل روند تجربی متقاطع (CETA) ارائه شده توسط سن (Şen, 2022) استفاده شد. این روش یکی از جدیدترین روش‌های تحلیل روند است که با بررسی هم‌زمان رفتار بخش‌های مختلف توزیع داده‌ها، امکان شناسایی تغییرات نامتقارن سری‌های زمانی را فراهم می‌کند. برخلاف روش‌های متداول که تنها یک شیب کلی برای کل سری زمانی ارائه می‌کنند، CETA با محاسبه شیب‌های بخش بالایی (Us) و بخش پایینی (Ls) و تعیین شیب محوری (Ps) قادر است رفتار مستقل بخش‌های مختلف توزیع داده را ارزیابی کند (Şen, 2022). مراحل اجرای این روش به‌صورت شماتیک در شکل ۲ نشان داده شده است. در نمودار CETA، شیب مثبت نشان‌دهنده روند افزایشی و شیب منفی نشان‌دهنده روند کاهشی است. Us و Ls به‌ترتیب رفتار بخش‌های بالایی و پایینی توزیع داده را نشان می‌دهند، در حالی که Ps جهت و شدت روند کلی سری زمانی را بیان می‌کند. قرار گرفتن Us و Ls در یک سمت خط صفر نشان‌دهنده روند هم‌جهت در بخش‌های مختلف توزیع و قرار گرفتن آن‌ها در دو سوی صفر بیانگر رفتار متفاوت بخش‌های بالایی و پایینی سری زمانی است. همچنین، تعداد تقاطع‌های خط محوری با سری زمانی (Crossings) به عنوان معیار انتخاب Ps مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ به‌گونه‌ای که خط دارای بیشترین تعداد تقاطع به عنوان روند تجربی سری زمانی انتخاب می‌شود.

روش CETA از نظر هدف کلی با تحلیل روند نوآورانه (ITA) مشابه است، اما در نحوه استخراج اطلاعات روند تفاوت دارد. در ITA، سری زمانی به دو زیرسری تقسیم و مقادیر متناظر دو بخش برای ارزیابی روند نسبت به خط ۴۵ درجه مقایسه می‌شوند؛ در مقابل، CETA با تمرکز بر نقاط حدی بالایی و پایینی و استفاده از یک نقطه محوری مبتنی بر میانه، دامنه‌ای از شیب‌های ممکن را در فاصله بین شیب‌های بالایی و پایینی بررسی می‌کند (Şen, 2012; Şen, 2022). بنابراین، CETA علاوه بر روند کلی، امکان بررسی تفاوت رفتار بخش‌های بالایی و پایینی توزیع داده‌ها را فراهم می‌کند؛ ویژگی‌ای که برای تحلیل شاخص‌های خشکسالی و بررسی رفتار مقادیر با شدت‌های متفاوت اهمیت دارد.

در گام نخست، سری زمانی به دو زیرسری با طول مساوی تقسیم شد. سپس مقادیر بیشینه و کمینه هر زیرسری به همراه زمان وقوع آن‌ها تعیین گردید. بر این اساس، نقاط بیشینه دو زیرسری به صورت (X_{U1},Y_{U1}) و (X_{U2},Y_{U2}) و نقاط کمینه دو زیرسری به صورت (X_{L1},Y_{L1}) و (X_{L2},Y_{L2}) تعریف شدند.

در گام دوم، شیب بالایی (Us) و شیب پایینی (Ls) به‌ترتیب از روابط ۳ و ۴ محاسبه شدند:

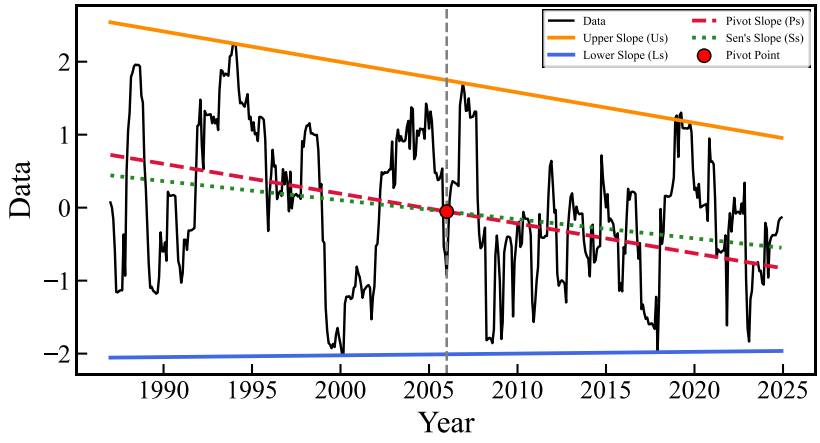
$$U_s = \frac{Y_{U2} - Y_{U1}}{X_{U2} - X_{U1}} \quad (۳)$$

$$L_s = \frac{Y_{L2} - Y_{L1}}{X_{L2} - X_{L1}} \quad (۴)$$

در گام سوم، یک نقطه محوری روی خط عمودی جداکننده دو زیرسری انتخاب شد. مطابق پیشنهاد سن (Şen, 2022)، میانه سری زمانی به‌عنوان نقطه محوری در نظر گرفته شد که متناظر با احتمال ۵۰ درصد توزیع داده‌ها است. انتخاب میانه موجب کاهش تأثیر مقادیر حدی شده و نماینده مناسبی از مرکز توزیع داده‌ها محسوب می‌شود.

در گام چهارم، مجموعه‌ای از خطوط مستقیم با شیب‌های مختلف در فاصله بین Us و Ls از نقطه محوری عبور داده شد. برای هر خط، تعداد تقاطع‌های آن با سری زمانی محاسبه گردید. خطی که بیشترین تعداد تقاطع را با داده‌های مشاهده‌شده ایجاد کند، به‌عنوان خط روند تجربی یا شیب محوری (Ps) انتخاب شد. این شیب، مناسب‌ترین نمایش از روند کلی سری زمانی را ارائه می‌دهد. به طور کلی، افزایش تعداد نقاط تقاطع با خط محوری می‌تواند بیانگر کاهش همبستگی سریالی و افزایش پیچیدگی رفتار زمانی داده‌ها باشد؛ از این رو، معیار تعداد تقاطع‌ها در انتخاب خط روند تجربی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Pawar et al., 2025).

در نهایت، مقدار و علامت Ps به‌ترتیب بیانگر شدت و جهت روند کلی سری زمانی هستند، در حالی که Us و Ls اطلاعات مربوط به رفتار بخش‌های بالایی و پایینی توزیع داده را ارائه می‌کنند. مقایسه این سه پارامتر امکان ارزیابی هم‌زمان روند کلی و بررسی تفاوت رفتار رخدادهای حدی در بخش‌های مختلف توزیع را فراهم می‌سازد و یکی از مهم‌ترین مزیت‌های روش CETA نسبت به روش‌های کلاسیک تحلیل روند محسوب می‌شود؛ مزیتی که در مطالعات اخیر نیز بر کاربرد آن در تحلیل شاخص‌های خشکسالی تأکید شده است (Şimşek et al., 2024).



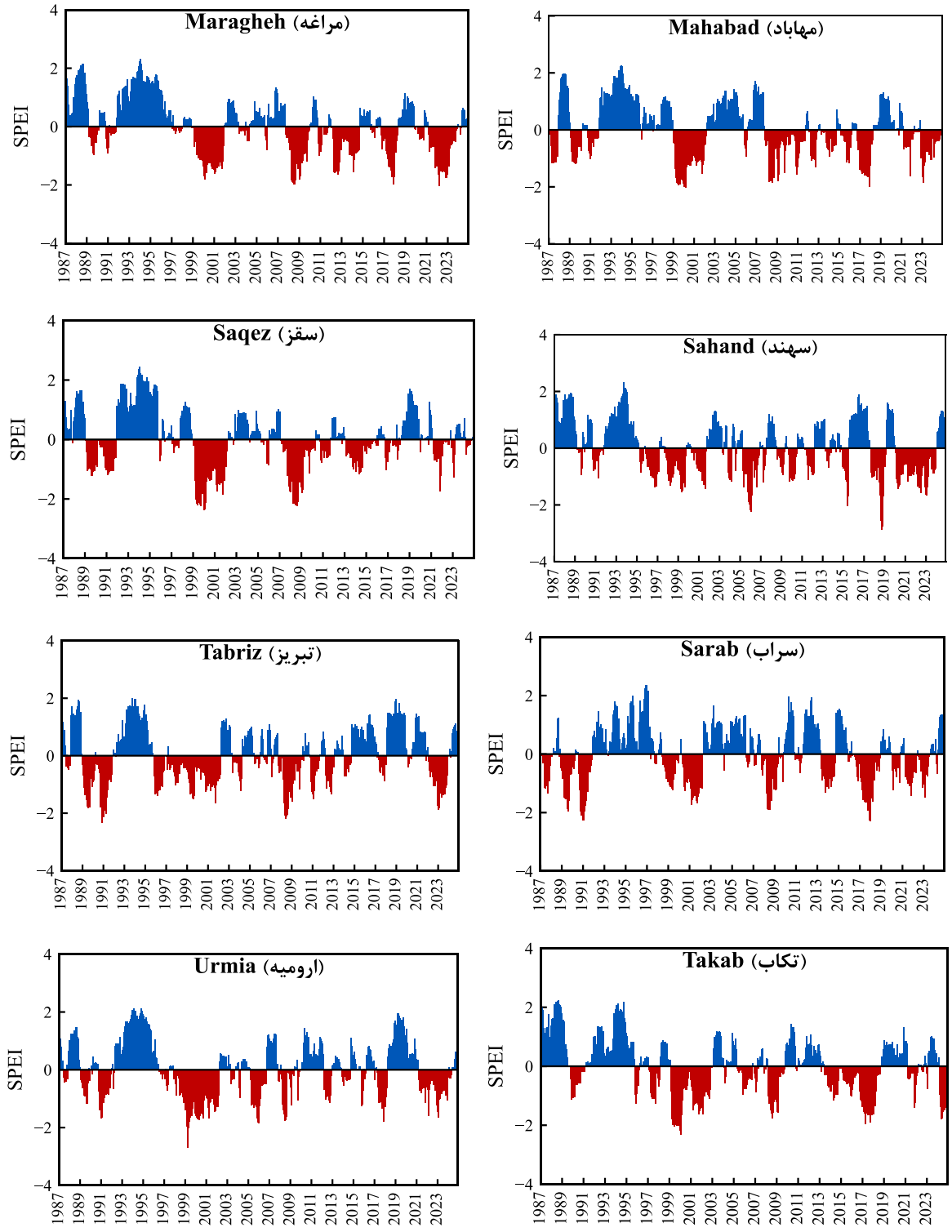
شکل ۲- نمایش شماتیک روش تحلیل روند تجربی متقاطع (CETA) (Şen, 2022)

Fig.2. Schematic representation of the Crossing Empirical Trend Analysis (CETA) method

نتایج و بحث

بررسی تغییرات زمانی شاخص SPEI

شکل ۳ تغییرات زمانی شاخص SPEI را در هشت ایستگاه منتخب حوضه دریاچه ارومیه طی دورهٔ مورد مطالعه نشان می‌دهد. بررسی سری‌های زمانی نشان می‌دهد که مقادیر SPEI در تمامی ایستگاه‌ها از نوسانات زمانی قابل توجهی برخوردار بوده و در طول دوره مطالعه، جابه‌جایی متناوب بین شرایط مرطوب و خشک رخ داده است. این نوسانات در ایستگاه‌های مختلف از الگوی یکسانی برخوردار نیستند و زمان وقوع، دامنه و جهت تغییرات شاخص در طول دوره مورد بررسی متفاوت است. در بیشتر ایستگاه‌ها، اواخر دهه ۱۹۸۰ و بخش قابل توجهی از نیمه نخست دهه ۱۹۹۰ با مقادیر مثبت SPEI همراه بوده است که نشان‌دهندهٔ شرایط مرطوب‌تر در این دوره است. در مقابل، از اواخر دهه ۱۹۹۰ و به ویژه در اوایل دهه ۲۰۰۰، در بخش قابل توجهی از ایستگاه‌ها کاهش مقادیر SPEI مشاهده می‌شود. این کاهش در ایستگاه‌هایی مانند مراغه، مهاباد، سقز و تکاب برجسته‌تر بوده تغییر شرایط رطوبتی به سمت مقادیر خشک‌تر را نشان می‌دهد.



شکل ۳- تغییرات زمانی شاخص SPEI در حوضه دریاچه ارومیه

Fig.3. Temporal changes of SPEI index in Lake Urmia basin

در فاصله زمانی حدود ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۵، تغییرپذیری زمانی SPEI در اغلب ایستگاه‌ها افزایش یافته و نوسان بین مقادیر مثبت و منفی شاخص بیشتر شده است. در این دوره، در ایستگاه‌هایی مانند سهند، سراب و ارومیه، تغییرات متناوب مقادیر SPEI در محدوده مثبت و منفی مشاهده می‌شود، در حالی که در ایستگاه‌های مراغه، مهاباد و تکاب، مقادیر منفی شاخص در بخش‌هایی از این دوره برجسته‌تر است. در سال‌های پایانی دوره مطالعه نیز نوسانات SPEI در ایستگاه‌های مختلف ادامه داشته است؛

به‌طوری‌که در برخی ایستگاه‌ها مانند تبریز، ارومیه و سهند، مقادیر مثبت در بخش‌هایی از این دوره مشاهده می‌شود، در حالی که در مراغه، مهاباد و تکاب، مقادیر منفی SPEI در بخش‌هایی از دوره همچنان برجسته است. بنابراین، الگوی زمانی SPEI در ایستگاه‌های مورد مطالعه یکنواخت نیست و تفاوت‌هایی در زمان وقوع و جهت تغییرات شرایط رطوبتی بین ایستگاه‌ها مشاهده می‌شود.

به طور کلی، مقادیر SPEI در ایستگاه‌های مورد مطالعه عمدتاً در محدوده استاندارد شاخص (بین ۲- تا ۲+) قرار دارند و تغییرات زمانی آن، جابه‌جایی متناوب بین شرایط خشک و مرطوب را در طول دوره آماری نشان می‌دهد. در برخی مقاطع، نوسانات شاخص به صورت هم‌زمان در چندین ایستگاه مشاهده می‌شود، در حالی که در برخی دوره‌ها رفتار ایستگاه‌ها از یکدیگر فاصله می‌گیرد. این الگو بیانگر وجود هم‌زمان تغییرات مشترک و تفاوت‌های محلی در رفتار زمانی شرایط رطوبتی حوضه است. از این رو، تغییرات SPEI یک الگوی زمانی یکنواخت در سراسر حوضه نشان نمی‌دهد و تفاوت رفتار ایستگاه‌ها، ضرورت بررسی کمی روند و تفاوت آن در بخش‌های مختلف توزیع شاخص را نشان می‌دهد.

این الگوی تغییرات زمانی با برخی مطالعات پیشین در زمینه تغییرپذیری شاخص‌های خشکسالی در ایران قابل مقایسه است. بذرافشان و همکاران (Bazrafshan, Mahmoudzadeh, Asgari Nezhad & Bazrafshan, 2019) در بررسی شاخص‌های خشکسالی در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران، تغییرات قابل توجه شرایط رطوبتی را در مقیاس‌های زمانی مختلف گزارش کردند. همچنین حیدری و رحیمی (Heydari & Rahimi, 2026) در بررسی شرایط خشکسالی در غرب ایران، تفاوت‌های مکانی و زمانی قابل‌توجهی را در رفتار شاخص‌های خشکسالی نشان دادند. یافته‌های مطالعات پیشین در مجموع با مشاهده تغییرپذیری زمانی و ناهمگونی مکانی شرایط رطوبتی در ایستگاه‌های مورد مطالعه حاضر همخوانی دارد.

تحلیل روند SPEI با روش CETA

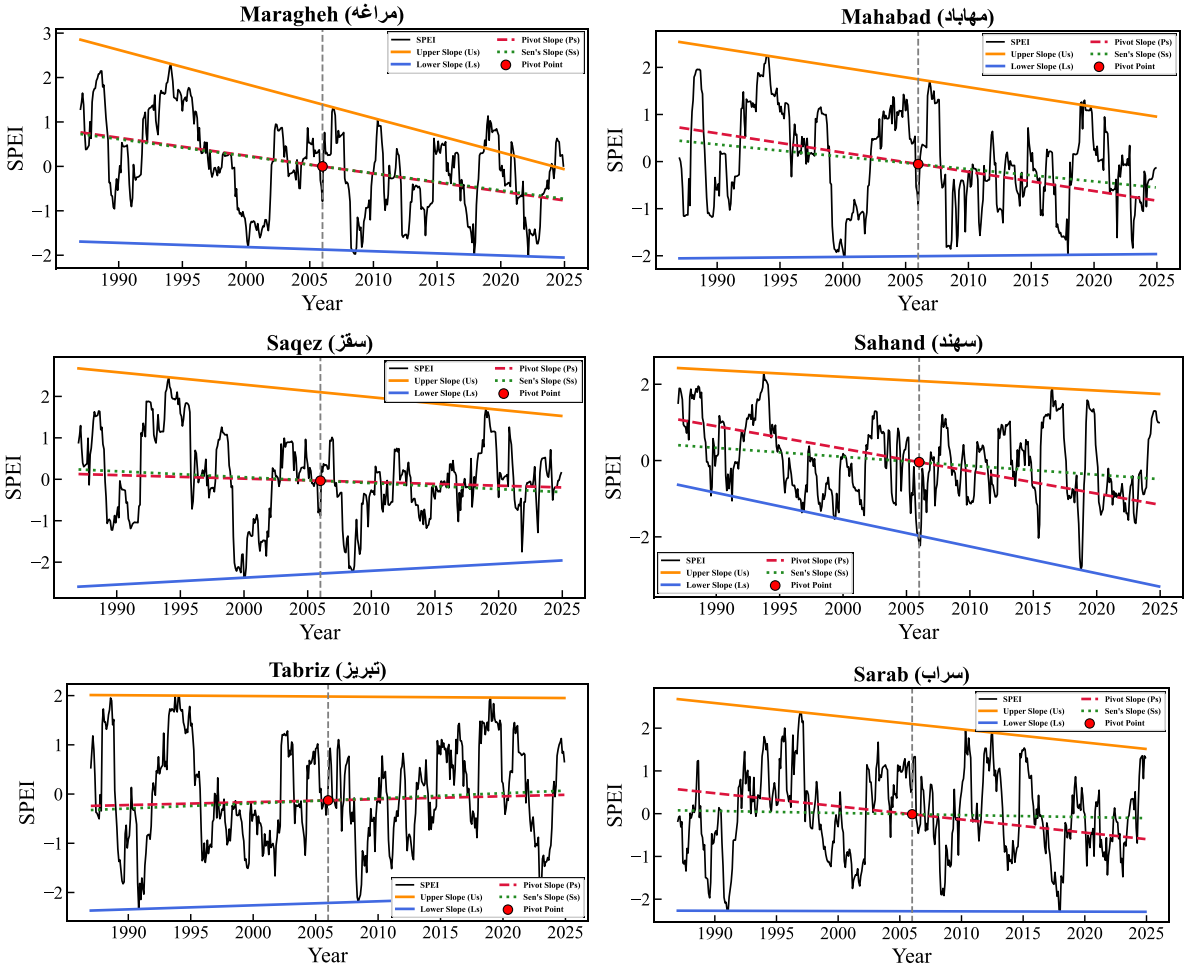
به منظور بررسی رفتار زمانی شاخص SPEI در بخش‌های مختلف توزیع داده‌ها، از روش تحلیل روند تجربی متقاطع (CETA) استفاده شد. این روش با محاسبه جداگانه شیب بخش بالایی (Us)، شیب بخش پایینی (Ls) و شیب محوری (Ps)، امکان بررسی تفاوت رفتار قسمت‌های مختلف توزیع شاخص را فراهم می‌کند. برخلاف روش‌های متداول تحلیل روند که عمدتاً یک روند کلی برای کل سری زمانی ارائه می‌کنند، CETA می‌تواند تغییرات بخش‌های مختلف توزیع را به‌صورت مجزا آشکار سازد و از این طریق اطلاعات دقیق‌تری درباره ناهمگونی روند SPEI در مقادیر مختلف شاخص ارائه دهد. همچنین، شیب سن (Ss) برای مقایسه با روند کلی سری زمانی در نظر گرفته شد. نتایج تحلیل CETA برای شاخص SPEI در هشت ایستگاه منتخب حوضه آبریز دریاچه ارومیه در شکل ۴ ارائه شده است. جهت تغییرات هر یک از شیب‌ها بر اساس علامت آن‌ها تعیین شد؛ به‌گونه‌ای که مقادیر مثبت نشان‌دهندهٔ روند افزایشی و مقادیر منفی بیانگر روند کاهشی هستند. مقادیر دقیق Us، Ls، Ps و Ss برای ایستگاه‌های مورد مطالعه در جدول ۳ ارائه شده است.

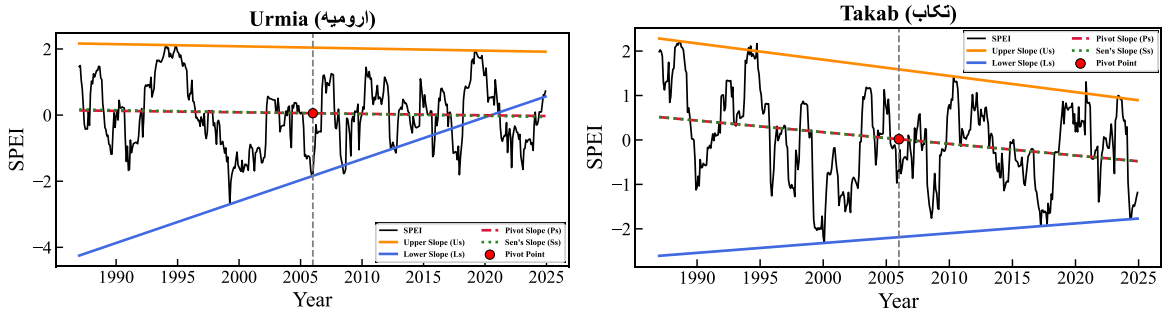
بررسی نتایج نشان می‌دهد که رفتار بخش‌های مختلف توزیع SPEI در ایستگاه‌های مورد مطالعه از الگوی یکنواختی پیروی نمی‌کند. در برخی ایستگاه‌ها، شیب‌های Us و Ls هم‌جهت هستند، در حالی که در برخی دیگر، جهت تغییرات دو بخش انتهایی توزیع متفاوت است.. این تفاوت نشان می‌دهد که تغییرات SPEI در بخش‌های مختلف توزیع الزاماً از یک روند واحد تبعیت نمی‌کند و رفتار شرایط خشک و مرطوب می‌تواند در طول دوره آماری متفاوت باشد. در ایستگاه‌های مهاباد، سقز، تکاب و ارومیه، Us منفی و Ls مثبت به‌دست آمده است. این الگو نشان‌دهنده رفتار ناهم‌جهت دو بخش انتهایی توزیع SPEI است؛ به عبارت دیگر، تغییرات بخش بالایی و پایینی سری زمانی در یک جهت حرکت نکرده‌اند. بنابراین، روند کلی SPEI در این ایستگاه‌ها نمی‌تواند به‌تنهایی بیانگر رفتار یکسان تمامی بخش‌های توزیع باشد. در مقابل، در ایستگاه‌های مراغه، سهند و سراب، هر دو شیب Us و Ls منفی هستند که نشان‌دهنده تغییر هم‌جهت دو بخش توزیع است، هر چند مقدار این شیب‌ها در ایستگاه‌های مختلف متفاوت است. تبریز نیز الگویی متفاوت نشان می‌دهد؛ در این ایستگاه Us اندکی منفی و Ls مثبت است و در نتیجه، رفتار دو بخش توزیع SPEI از نظر جهت تغییر یکسان نیست.

شیب محوری (Ps) در اغلب ایستگاه‌ها منفی است و تنها در تبریز مقدار مثبت دارد. این الگو نشان می‌دهد که جهت تغییرات مرکزی سری SPEI در بیشتر ایستگاه‌ها به سمت مقادیر پایین‌تر شاخص بوده است. شیب سن نیز در بیشتر ایستگاه‌ها منفی به‌دست آمده و تنها در تبریز مقدار مثبت دارد. هم‌جهتی عمده Ps و Ss نشان می‌دهد که روند کلی سری زمانی در بیشتر ایستگاه‌ها با جهت تغییرات بخش مرکزی توزیع سازگار است. در عین حال، تفاوت میان Us و Ls در برخی ایستگاه‌ها نشان می‌دهد که این روند کلی لزوماً در تمام بخش‌های توزیع به یک شکل رخ نداده است.

یکی از ویژگی‌های مهم تحلیل CETA، استفاده از نقطه محوری (Pivot Point) و شیب محوری برای بررسی ساختار روند در کنار شیب‌های بالایی و پایینی است. نقطه محوری، مرجع هندسی تعیین شیب محوری بوده و امکان مقایسه رفتار سری زمانی در بخش‌های مختلف توزیع را فراهم می‌کند. در شکل ۴، خطوط مربوط به Us، Ls و Ps در ارتباط با نقطه محوری نمایش داده شده‌اند؛ از این رو، مقایسه آن‌ها امکان شناسایی تفاوت جهت و شدت تغییرات در قسمت‌های مختلف توزیع SPEI را فراهم می‌سازد. به ویژه، در ایستگاه‌هایی که Us و Ls دارای علامت مخالف هستند، اختلاف جهت خطوط بالایی و پایینی نسبت به نقطه محوری، ناهمگونی رفتار دو انتهای توزیع را به‌صورت آشکار نشان می‌دهد.

به‌طور کلی، نتایج CETA نشان می‌دهد که تغییرات زمانی SPEI در حوضه آبریز دریاچه ارومیه تنها با یک روند کلی قابل توصیف نیست. اگرچه شیب سن و شیب محوری در بیشتر ایستگاه‌ها جهت کاهشی دارند، تفاوت میان Us و Ls در تعدادی از ایستگاه‌ها بیانگر آن است که بخش‌های مختلف توزیع شاخص رفتار یکسانی ندارند. این ویژگی به‌ویژه در مهاباد، سقز، تکاب و ارومیه آشکار است؛ جایی که جهت شیب بخش بالایی و پایینی توزیع مخالف یکدیگر است. بنابراین، CETA با تفکیک رفتار بخش‌های مختلف توزیع، اطلاعاتی فراتر از جهت روند کلی SPEI ارائه می‌کند و امکان شناسایی ناهمگونی روند در شرایط خشک و مرطوب را فراهم می‌سازد.





شکل ۴- نمودارهای تحلیل CETA برای شاخص SPEI در ایستگاه‌های حوضه دریاچه ارومیه

Fig.4. CETA analysis graphs for SPEI index at stations in Lake Urmia basin

جدول ۳- مقادیر شیب‌های Us، Ls، Ps و شیب سن (Ss) برای شاخص SPEI در ایستگاه‌های منتخب حوضه دریاچه ارومیه

Table 3- Values of Us, Ls, Ps, and Sen's slope (Ss) for SPEI at the selected stations in the Lake Urmia Basin

Ss	Ps	Ls	Us	ایستگاه Station
-0.00218	-0.00341	0.000201	-0.00348	مهاباد Mahabad
-0.0032	-0.00336	-0.00079	-0.0064	مراغه Maragheh
-0.00195	-0.0049	-0.00586	-0.00149	سهند Sahand
-0.0012	-0.00071	0.00139	-0.00252	سقز Saqez
-0.0004	-0.00256	-5.8E-05	-0.00256	سراب Sarab
0.000863	0.000494	0.000683	-0.00013	تبریز Tabriz
-0.00219	-0.00218	0.001841	-0.00305	تکاب Takab
-0.00049	-0.00037	0.010571	-0.00055	ارومیه Urmia

تحلیل مکانی روند شاخص SPEI با روش CETA

شکل ۵ پراکنش مکانی روندهای حاصل از پارامترهای CETA و شیب سن برای شاخص SPEI را در ایستگاه‌های منتخب حوضه آبریز دریاچه ارومیه نشان می‌دهد. در این شکل، جهت روندها بر اساس علامت شیب‌ها به دو صورت افزایشی و کاهشی نمایش داده شده است. الگوی مکانی پارامترهای CETA بیانگر آن است که تغییرات SPEI در سطح حوضه از یکنواختی فضایی برخوردار نیست و جهت و ساختار تغییرات در بخش‌های مختلف توزیع، میان ایستگاه‌ها تفاوت دارد. این ناهمگنی در مقایسه هم‌زمان پارامترهای Us، Ls و Ps آشکارتر است و نشان می‌دهد که تغییرات زمانی SPEI در نقاط مختلف حوضه می‌تواند در بخش‌های مختلف توزیع رفتار متفاوتی داشته باشد.

از نظر مکانی، پارامتر Us الگوی نسبتاً همگنی را در سطح حوضه نشان می‌دهد و در بیشتر ایستگاه‌ها جهت کاهشی دارد. در مقابل، Ls پراکندگی فضایی بیشتری را نشان داده و تفاوت جهت آن میان ایستگاه‌ها بیشتر است. این تفاوت به ویژه در مهاباد، سقز، تکاب و ارومیه آشکار است؛ جایی که جهت Us و Ls متفاوت است. در مقابل، مراغه، سهند و سراب از نظر جهت دو بخش انتهایی توزیع رفتار هماهنگ‌تری دارند. بنابراین، بیشترین ناهمگنی فضایی در بخش پایینی توزیع SPEI مشاهده می‌شود، در حالی که بخش بالایی توزیع در اغلب ایستگاه‌ها الگوی مشابه‌تری دارد. الگوی مکانی Ps نیز نشان می‌دهد که در بیشتر ایستگاه‌های حوضه، بخش محوری توزیع SPEI در جهت کاهشی قرار دارد و تنها تبریز رفتار متفاوتی نسبت به سایر ایستگاه‌ها نشان می‌دهد.

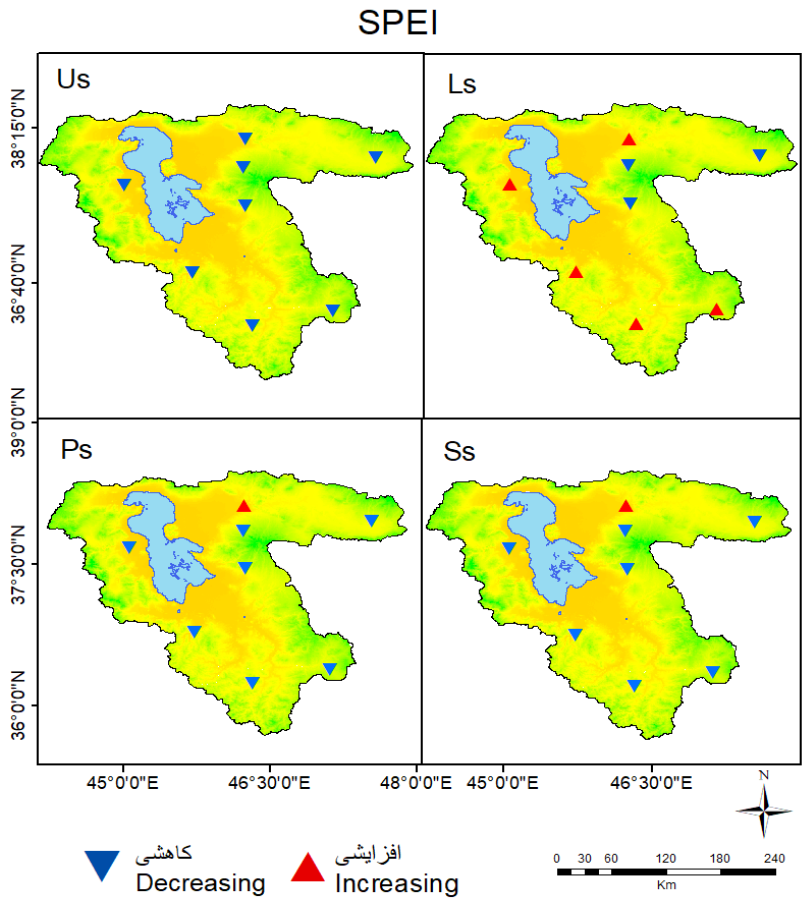
از این نظر، تبریز در مقایسه با سایر ایستگاه‌های مورد مطالعه یک ناحیه متمایز از نظر رفتار زمانی SPEI محسوب می‌شود. تفاوت این ایستگاه با سایر نقاط حوضه در پارامترهای مختلف CETA نیز مشاهده می‌شود و نشان‌دهندهٔ آن است که الگوی تغییرات SPEI در این بخش از حوضه با الگوی غالب سایر ایستگاه‌ها یکسان نیست.

مقایسهٔ فضایی شیب سن با پارامترهای CETA نیز نشان می‌دهد که الگوی کلی تغییرات SPEI در بیشتر ایستگاه‌ها مشابه است، اما بررسی پارامترهای Us و Ls اطلاعات متفاوتی درباره ساختار این تغییرات ارائه می‌کند. به ویژه، در ایستگاه‌هایی که جهت Us و Ls مخالف است، روند کلی سری زمانی نمی‌تواند به تنهایی تفاوت رفتار بخش‌های بالایی و پایینی توزیع را نشان دهد. از این رو، نقشه‌های CETA علاوه بر نمایش الگوی غالب تغییرات SPEI، نواحی دارای رفتار متفاوت در بخش‌های مختلف توزیع شاخص را نیز مشخص می‌کنند.

در مجموع، پراکندگی مکانی پارامترهای CETA وجود یک الگوی غالب کاهشی در بخش عمده‌ای از حوضه را در کنار ناهمگنی فضایی در ساختار تغییرات SPEI نشان می‌دهد. تفاوت میان ایستگاه‌های مختلف، به ویژه در بخش پایینی توزیع، بیانگر آن است که تغییرات شرایط خشک و مرطوب در سطح حوضه از یک الگوی فضایی واحد پیروی نمی‌کند. بنابراین، تحلیل مکانی CETA مکمل تحلیل زمانی بوده و امکان شناسایی تفاوت‌های فضایی در رفتار بخش‌های مختلف توزیع SPEI را فراهم می‌کند؛ موضوعی که در ارزیابی صرفاً مبتنی بر روند کلی سری زمانی قابل مشاهده نیست.

نتایج پارامتر Us نشان می‌دهد که در تمامی ایستگاه‌ها شیب بخش بالایی توزیع SPEI منفی است، اگر چه مقدار آن در تبریز بسیار نزدیک به صفر بوده و تغییرات این بخش در این ایستگاه بسیار محدودتر از سایر نقاط است. منفی بودن Us بیانگر کاهش مقادیر بالاتر SPEI در طول دوره مطالعه است؛ به عبارت دیگر، بخش بالایی توزیع که معرف مقادیر بالاتر شاخص و شرایط مرطوب‌تر است، در بیشتر ایستگاه‌ها گرایش کاهشی نشان می‌دهد. بیشترین کاهش Us در مراغه و پس از آن در سهند، تکاب و سقز مشاهده می‌شود، در حالی که مقدار آن در ارومیه و سراب نسبتاً کمتر است. این الگو نشان می‌دهد که بخش بالایی توزیع SPEI در اغلب ایستگاه‌ها به سمت مقادیر پایین‌تر حرکت کرده است. با این حال، این تغییر به تنهایی نمی‌تواند معادل افزایش شدت خشکسالی یا کاهش فراوانی شرایط مرطوب تلقی شود، زیرا تفسیر رفتار خشکسالی مستلزم بررسی هم‌زمان بخش پایینی توزیع و سایر پارامترهای CETA است.

یافته‌های تحلیل روند SPEI در این پژوهش با نتایج میرزائی حسنلو و همکاران (Mirzayi Hasanlo et al., 2020) که با استفاده از آزمون من-کندال و روش LOWESS در چهار ایستگاه حوضه دریاچه ارومیه نشان دادند شاخص SPEI در هر سه مقیاس زمانی روند نزولی (افزایش خشکسالی) داشته و ایستگاه مهاباد دارای شیب نزولی بیشتری نسبت به سایر ایستگاه‌ها بوده است، همخوانی کامل دارد. همچنین، بذرافشان و همکاران (Bazrafshan et al., 2019) در بررسی تطبیقی شاخص‌های خشکسالی در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران نشان دادند SPEI مقدار روند خشکسالی را با شدت بیشتری برآورد می‌کند که با مشاهدات پژوهش حاضر مبنی بر شدت بیشتر روند کاهشی SPEI نسبت به SPI در ایستگاه‌های گرم‌تر حوضه همسو است. از نظر الگوی مکانی، نتایج با مطالعه جوان و همکاران (Javan, Azizzadeh, Bashiri & Shahriar, 2015) که با استفاده از داده‌های شبکه‌ای در شمال غرب ایران نشان دادند بخش شرقی نسبت به بخش غربی مرطوب‌تر است، هم‌سو بوده و تفاوت رفتار مکانی ایستگاه‌های شرقی (سهند و سراب) و غربی (ارومیه و مهاباد) را تأیید می‌کند. با این حال، روش CETA، فراتر از روش‌های کلاسیک مانند من-کندال، LOWESS و ITA، امکان بررسی مستقل روند در بخش‌های بالایی و پایینی توزیع را فراهم کرده و نشان می‌دهد که در ایستگاه‌هایی مانند مهاباد، سقز، تکاب و ارومیه، رفتار نامتقارن رخدادهای خشک و مرطوب در SPEI شدیدتر از SPI است؛ موضوعی که در مطالعات پیشین به دلیل استفاده از روش‌های کلاسیک روند، قابل تفکیک نبوده است.



شکل ۵- توزیع مکانی پارامترهای CETA و شیب سن برای شاخص SPEI در حوضه آبریز دریاچه ارومیه
Us: شیب بخش بالایی توزیع؛ Ls: شیب بخش پایینی توزیع؛ Ps: شیب محوری؛ Ss: شیب سن

Fig.5. Spatial distribution of CETA parameters and Sen's slope for for the SPEI index in the Lake Urmia Basin
Us: Upper slope; Ls: Lower slope; Ps: Pivot slope; Ss: Sen's slope

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با هدف بررسی تغییرات زمانی و مکانی شاخص بارش- تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) در مقیاس ۱۲ ماهه و ارزیابی ناهمگنی روند آن در بخش‌های مختلف توزیع شاخص با استفاده از روش تحلیل روند تجربی متقاطع (CETA) در هشت ایستگاه منتخب حوضه آبریز دریاچه ارومیه طی دوره ۱۹۸۷ تا ۲۰۲۴ انجام شد. نتایج نشان داد که مقادیر SPEI در ایستگاه‌های مورد مطالعه از تغییرپذیری زمانی قابل‌توجهی برخوردار بوده و شرایط با مقادیر مثبت و منفی شاخص در دوره‌های مختلف به‌صورت متناوب رخ داده است. اگرچه برخی الگوهای زمانی میان ایستگاه‌ها مشترک بود، زمان وقوع و دامنه تغییرات در سطح حوضه یکسان نبود و تفاوت‌های مکانی در رفتار SPEI مشاهده شد. در برخی دوره‌ها، نوسانات هم‌زمان شاخص در چندین ایستگاه مشاهده شد، در حالی که در دوره‌های دیگر، رفتار ایستگاه‌ها از یکدیگر فاصله گرفت. در مجموع، سری‌های زمانی SPEI بیانگر تغییرپذیری زمانی و ناهمگنی مکانی شرایط رطوبتی در ایستگاه‌های مورد مطالعه بود.

تحلیل CETA نشان داد که بخش‌های مختلف توزیع SPEI می‌توانند روندهای متفاوتی داشته باشند. در برخی ایستگاه‌ها، بخش بالایی و پایینی توزیع دارای جهت روند مخالف بودند، در حالی که در برخی دیگر روند این دو بخش هم‌جهت بود. همچنین، مقایسه شیب‌های بخش بالایی (Us) و پایینی (Ls) با شیب محوری (Ps) و شیب سن (Ss) نشان داد که اگر چه روند کلی و بخش مرکزی توزیع در بیشتر ایستگاه‌ها جهت مشابهی دارند، این الگو الزاماً در بخش‌های مختلف توزیع تکرار نمی‌شود. از این رو، تغییرات SPEI در حوضه را نمی‌توان تنها با یک روند کلی برای کل سری زمانی توصیف کرد و تفاوت ساختار روند در بخش‌های مختلف توزیع، یکی از ویژگی‌های مهم الگوی مشاهده‌شده در ایستگاه‌های مورد مطالعه است.

یافته‌های حاصل از CETA بیانگر آن است که ناهمگنی روند SPEI تنها در تفاوت میان ایستگاه‌ها خلاصه نمی‌شود، بلکه در ساختار درونی توزیع شاخص نیز قابل مشاهده است. تفاوت میان جهت و مقدار شیب‌های Us، Ls و Ps نشان می‌دهد که بخش‌های مختلف توزیع شاخص در همه نقاط حوضه از رفتار روندی یکسانی برخوردار نیستند. این الگو، اهمیت بررسی روند در سطوح مختلف توزیع را در کنار روند کلی شاخص نشان می‌دهد و می‌تواند اطلاعات مکملی درباره ساختار تغییرات SPEI فراهم کند. در این چارچوب، نتایج به تغییرات روندی بخش‌های مختلف توزیع مربوط است و تفسیر ویژگی‌هایی مانند شدت، فراوانی، مدت و تداوم رخدادهای خشکسالی نیازمند تحلیل مستقل این مشخصه‌هاست.

از نظر کاربردی، نتایج پژوهش می‌تواند در پایش تغییرات شرایط رطوبتی و شناسایی تفاوت‌های مکانی رفتار SPEI در حوضهٔ آبریز دریاچه ارومیه مورد استفاده قرار گیرد. توجه به ساختار روند در بخش‌های مختلف توزیع شاخص، در کنار روند کلی، امکان شناسایی دقیق‌تر نواحی دارای رفتار متفاوت را فراهم می‌کند و می‌تواند به عنوان یکی از منابع اطلاعاتی در ارزیابی شرایط رطوبتی، مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی سازگاری با تغییرات اقلیمی در حوضه مورد توجه قرار گیرد. در مجموع، یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که بررسی هم‌زمان روند کلی و ساختار روند در بخش‌های مختلف توزیع SPEI، تصویر جامع‌تری از ناهمگنی زمانی و مکانی تغییرات شاخص در حوضه آبریز دریاچه ارومیه ارائه می‌کند.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

سپاسگزاری

این مقاله از طرح دوره دستیار پژوهشی به قرارداد شماره ۱۸۸۱/۱۰ و تحت حمایت دانشگاه ارومیه استخراج شده است.

References

Ahmadebrahimpour, E., Aminnejad, B., & Khalili, K. (2019). Assessing future drought conditions under a changing climate: a case study of the Lake Urmia basin in Iran. *Water Supply*, *19*(6), 1851-1861. https://doi.org/10.2166/ws.2019.062

Ahmadi, M., Paimozd, S., & Rahimi, M. (2021). Comparison of Hydrological and Meteorological Drought Monitoring using RDI and EDI Indices. *Environment and Water Engineering, 7*(4), 683-696. [In Persian] https://doi.org/10.22034/jewe.2021.276629.1531

Almorox, J., Quej, V. H., & Martí, P. (2015). Global performance ranking of temperature-based approaches for evapotranspiration estimation considering Köppen climate classes. *Journal of Hydrology*, *528*, 514-522. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.057

Bazrafshan, J. (2017). Effect of air temperature on historical trend of long-term droughts in different climates of Iran. *Water Resources Management*, *31*(14), 4683-4698. https://doi.org/10.1007/s11269-017-1773-8

Bazrafshan, O., Mahmoudzadeh, F., Asgari Nezhad, A., & Bazrafshan, J. (2019). Adaptive Evaluation of SPI, RDI, and SPEI indices in Analyzing the Trend of Intensity, Duration, and Frequency of Drought in Arid and Semi-Arid Regions of Iran. *Irrigation Sciences and Engineering, 42*(3), 117-131. [In Persian] https://doi.org/10.22055/jise.2017.22113.1585

Beguería, S., Vicente-Serrano, S. M., Reig, F., & Latorre, B. (2014). Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *International Journal of Climatology*, *34*(10), 3001-3023. https://doi.org/10.1002/joc.3887

Ceribasi, G., Ceyhunlu, A. I., & Ahmed, N. (2021). Innovative trend pivot analysis method (ITPAM): a case study for precipitation data of Susurluk Basin in Turkey. *Acta Geophysica*, *69*(4), 1465-1480. https://doi.org/10.1007/s11600-021-00605-6

Ceyhunlu, A. I., & Ceribasi, G. (2024). Changes in precipitation and air temperature over Turkey using innovative trend pivot analysis method. *Journal of Water and Climate Change*, *15*(5), 2446-2463. https://doi.org/10.2166/wcc.2024.041

Ceyhunlu, A. I., & Cuma, M. (2025). Assessing the impact of climate change on meteorological parameters in the Sakarya River Basin using advanced trend analysis methods. *Physics and Chemistry of the Earth*, Parts A/B/C, 104061. https://doi.org/10.1016/j.pce.2025.104061

Danandeh Mehr, A., Sorman, A. U., Kahya, E., & Hesami Afshar, M. (2020). Climate change impacts on meteorological drought using SPI and SPEI: case study of Ankara, Turkey. *Hydrological Sciences Journal*, *65*(2), 254-268. https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1691218

Davarpanah, S., Erfanian, M., & Javan, Kh. (2021). Assessment of Climate Change Impacts on Drought and Wet Spells in Lake Urmia Basin. *Pure and Applied Geophysics*, *178*(2), 545-563. https://doi.org/10.1007/s00024-021-02656-8

Dinpashoh, Y., Jahanbakhsh-Asl, S., & Mosavi-Jahani, L. (2023). Evaluation of the three empirical models in estimation of potential evapotranspiration (Case study: Urmia Lake basin). *Water and Soil Science*, *33*(3), 21-32. [In Persian] https://doi.org/10.22034/WS.2021.46416.2419

Gaznavi, M., Mosaedi, A., & Ghabaei Sough, M. (2021). The Impact of Breakpoints in Rainfall Time Series on Drought Characteristics Changes (Case Study: Tabriz and Arak Stations, Iran). *Water and Soil*, *35*(3), 409-425. [In Persian] https://doi.org/10.22067/jsw.2021.14899.0

Habibi, M., Babaeian, I., & Schöner, W. (2021). Changing causes of drought in the Urmia Lake Basin—increasing influence of evaporation and disappearing snow cover. *Water*, *13*(22), 3273. https://doi.org/10.3390/w13223273

Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, *1*(2), 96-99. http://dx.doi.org/10.13031/2013.26773

Heydari, A, & Rahimi, M. (2026). Analysis and comparison of SPI and SPEI indices in meteorological drought assessment (Case study: West of Iran). *Climate and Ecosystem of Arid and Semi-arid Regions, 2*(2), 75-97. [In Persian] https://doi.org/ 10.22075/ceasr.2025.31743.1020

Javan, K. (2021). Identification of hydrological drought trends in the Lake Urmia Basin. *Journal of Hydrogeomorphology*, *7*(25), 138-119. [In Persian] https://doi.org/ 10.22034/hyd.2021.43326.1562

Javan, Kh., Azizzadeh, M. R., Bashiri, H., & Shahriar, F. (2015). Zoning SPI and DI Drought Indices Using Rainfall Network Data in Northwest of Iran. *Physical Geography Quarterly, 8*(29), 117-130. [In Persian] https://sanad.iau.ir/en/Journal/jopg/Article/983135

Kampragou, E., Apostolaki, S., Manoli, E., Froebrich, J., & Assimacopoulos, D. (2011). Towards the harmonization of water-related policies for managing drought risks across the EU. *Environmental Science & Policy, 14*(7), 815-824. https://doi.org/10.1016/j.envsci.2011.04.001

Karbalaee, A. R., Shoja, F., Ashrafi, S., & Kamangar, M. (2025). Short-Term Droughts Projection in Iran: A Comprehensive Analysis Based on the SSP5-8.5 Scenario. *Geography and Environmental Hazards, 14*(4), 129-152. [In Persian] https://doi.org/10.22067/geoeh.2025.94153.1586

Khadr, M. (2016). Forecasting of meteorological drought using Hidden Markov Model (case study: the upper Blue Nile river basin, Ethiopia). *Ain Shams Engineering Journal, 7*(1), 47–56. https://doi.org/10.1016/j.asej.2015.11.005

Khalili, S. V., Mahtabi, G., Nikbakht, J., & Mohammadi, M. I. (2023). Investigating the Relationship between Hydrological and Meteorological Droughts Using SPI, RDI and SDI Indices with an Emphasis on Comparing Two Different Methods of Calculating ET0 (Case Study: Sufi Chai Basin of Maragheh). *Irrigation and Water Engineering*, *14*(2), 257-280. [In Persian] https://doi.org/10.22125/iwe.2023.354331.1661

Mahdizadeh Soula, J., Ghavidel Rahimi, Y., & Farajzadeh, M. (2025). Structural Analysis and Regime Shift of Drought in Iran Using a Three-Dimensional Clustering Approach. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, *14*(3), 93-115. [In Persian] https://doi.org/10.22067/geoeh.2025.94525.1597

Mahdizadeh, J., Ghavidel, Y., & Farajzadeh, M. (2025). High-resolution spatiotemporal analysis of drought dynamics in Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, *197*(9), 1005. https://doi.org/10.1007/s10661-025-14443-2

McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology (pp. 179–184). American

Meteorological Society, Anaheim, California, USA. https://www.academia.edu/127253016/The_relationship_of_drought_frequency_and_duration_to_time_scales

Mirgol, B., Nazari, M., Etedali, H. R., & Zamanian, K. (2021). Past and future drought trends, duration, and frequency in the semi-arid Urmia Lake Basin under a changing climate. *Meteorological Applications*, *28*(4), e2009. https://doi.org/10.1002/met.2009

Mirhashemi, H., Sharafi, S., & Ariyantabar, H. (2021). The Determining Tourism Climate Calendar and Testing Trend Based on RayMan and ITA Model (Case study: Plodokhtar County). *Journal of Geographical Studies of Mountainous Areas*, *2*(2), 71-89. [In Persian] https://doi.org/ 10.52547/gsma.2.2.67

Mirzayi Hasanlo, A., Abghari, H., & Erfanian, M. (2020). Evaluation of SPEI Drought Index and Trend Analysis Using Nonparametric Methods in the Selected Stations of Urmia lake Basin. *Journal of Watershed Management Research, 11*(22), 175-187. [In Persian] https://doi.org/10.52547/jwmr.11.22.175

Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. J*ournal of Hydrology, 391*(1-2), 202-216. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012

Modaresi, F., Oskouei, E. A., Janvanshiri, Z., & Bajgiran, I. S. (2025). Modified Crossing Empirical Trend Analysis (MCETA) for meteorological time series. *Journal of Hydrology*, *656*, 133003. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.133003

Navabi, N., Moghaddasi, M., & Gangi, N. (2021). Assessment of Agricultural Drought Monitoring Using Various Indices based on Ground-based and Remote Sensing Data (Case Study: Lake Urima Basin). *Watershed Engineering and Management*, *13*(1), 1-12. [In Persian] https://doi.org/10.22092/ijwmse.2020.126860.1684

Pawar, U., Ceyhunlu, A. I., Ceribasi, G., & Şimşek, O. (2025). Assessment of Meteorological Drought Risk in Marathwada Region (India) with Crossing Empirical Trend Analysis. *Pure and Applied Geophysics*, *182*(7), 2913-2938. https://doi.org/10.1007/s00024-025-03728-9

Pokhrel, Y., Felfelani, F., Satoh, Y., Boulange, J., Burek, P., Gädeke, A., ... & Wada, Y. (2021). Global terrestrial water storage and drought severity under climate change. *Nature Climate Change*, *11*(3), 226-233. https://doi.org/10.1038/s41558-020-00972-w

Samiei, S., & Alijanian, M. (2025). A comprehensive spatiotemporal and risk reduction drought assessment study utilizing SPEI index for Urmia Lake Basin, Iran. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, *58*, 102203. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102203

Sedaghat Nejad, M., Mosaedi, A., Ghahraman, B., & Saadatpour, A. (2024). Determining the optimal geostatistical method for drought monitoring based on different drought indices and its application in Neishabour Plain. *Journal of the Earth and Space Physics, 50*(1), 125-147. [In Persian] https://doi.org/10.22059/jesphys.2023.351663.1007475

Şen, Z. (2012). Innovative trend analysis methodology. *Journal of Hydrologic Engineering*, *17*(9), 1042-1046. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000556

Sen, Z. (2022). Crossing empirical trend analysis (CETA) at risk levels in hydro-meteorological time series. *Theoretical and Applied Climatology*, *148*(1), 145-163. https://doi.org/10.1007/s00704-022-03946-4

Sepaskhah, A. R., & Razzaghi, F. (2009). Evaluation of the adjusted Thornthwaite and Hargreaves-Samani methods for estimation of daily evapotranspiration in a semi-arid region of Iran. *Archives of Agronomy and Soil Science*, *55*(1), 51-66. https://doi.org/10.1080/03650340802383148

Shirmohammadi, B., Rostami, M., Varamesh, S., Jaafari, A., & Taie Semiromi, M. (2024). Future climate-driven drought events across Lake Urmia, Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, *196*(1), 24. https://doi.org/10.1007/s10661-023-12181-x

Şimşek, O., Ceyhunlu, A. I., Ceribasi, G., & Keskiner, A. D. (2024). Evaluation of long-term meteorological drought in the Aras and Coruh Basins with Crossing Empirical Trend Analysis. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, *135*, 103611. https://doi.org/ 10.1016/j.pce.2024.103611

Sobhani, B., Zengir, V. S., & Kianian, M. K. (2019). Drought monitoring in the Lake Urmia basin in Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, *12*(15), 448. https://doi.org/10.1007/s12517-019-4571-1

Soufi, M., Alijani, B., Borna, R., & Asadian, F. (2021). Predicting Possible Land Repurposing in the Urmia Lake Basin Based on Remote Sensing Data. *Geographical Space, 21*(7), 74-55. [In Persian] http://geographical-space.iau-ahar.ac.ir/article-1-3509-en.html

Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, *23*(7), 1696-1718. https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1

Zhang, R., Bento, V. A., Qi, J., Xu, F., Wu, J., Qiu, J., … & Wang, Q. (2023). The first high spatial resolution multi-scale daily SPI and SPEI raster dataset for drought monitoring and evaluating over China from 1979 to 2018. *Big Earth Data*, *7*(3), 860-885. https://doi.org/10.1080/20964471.2022.2148331