

Groundwater drought hazard zoning and relationship between meteorological and hydrological drought indices in the Urmia aquifer

Samaneh Dadafarid¹ , Mahdi Erfanian^{2*} , Behzad Hessari³ , Khadijeh Javan⁴ 

¹ Ph.D Student, Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran

^{2*} Associate Professor, Department of Rangeland and Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran

³ Associate Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Urmia University, Urmia, Iran,

⁴ Associate Professor, Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, Urmia University, Urmia, Iran

Extended Abstract

Introduction

In recent years, the study of climate change has gained significant importance due to the exposure of many regions to climate change conditions. Iran, with its predominantly arid and semi-arid climate, is no exception. Groundwater is a vital resource for Iran's drinking water, agriculture, and industry, playing a crucial role in its economic development. The horticulture and agriculture sectors in the Urmia aquifer plain heavily depend on groundwater resources. Over the past three decades, reductions in precipitation and excessive extraction of water resources for agricultural and other purposes have led to severe drought, causing irreparable damage to agriculture, industry, and human life. Groundwater drought is characterized by reduced groundwater levels or storage and is influenced by natural and human-induced factors, such as climate change and excessive groundwater extraction. The SPI and SPEI are commonly used to monitor meteorological drought, while the SGI measures hydrological drought. This study examines sustainable management and protection strategies for the Urmia aquifer, with a focus on the impacts of climate change and drought on its groundwater resources. The findings highlight the need for climate change adaptation measures.

Materials and Methods

To analyze the status of the Urmia aquifer, monthly groundwater depth data from piezometers within the aquifer were used to calculate the SGI index. Monthly precipitation data from the Urmia meteorological station in the aquifer plain were utilized to derive the SPI and SPEI indices. The analysis used monthly data from the Urmia aquifer, providing consistent 20-year datasets for each month. While 30 years are generally recommended as the standard for drought indices, statistical tools such as the correlation coefficient (CC), coefficient of determination (R^2), root mean square error (RMSE), Hanna and Heinold index (HH), kappa coefficient (k), Cramer coefficient (V), and class correlation percentage were employed to compare and validate the SPI and SPEI indices for both 20- and 30-year periods. The Pearson correlation coefficient was used to compare SPI and SPEI at 3-, 6-, 9-, and 12-month scales with the monthly SGI index. ArcGIS generated a groundwater drought hazard zoning map, ranking each piezometer based on drought severity, duration, and hazard. The drought severity and duration values were classified into five classes using the Jenks natural interval classification method. The final drought risk values, graded from 1 to 9, were assigned to areas covered by each piezometer using the Thiessen polygon method. Additionally, the correlation for different time lags was estimated to analyze the impact on the correlation between meteorological and hydrological drought indices.

Results and Discussion

The SPI and SPEI indices from 2001 to 2021 exhibited a strong positive correlation with those calculated from 1991 to 2021. Based on the Pearson coefficient, evaluating the correlation between the SPI and SPEI indices and the SGI index at 3- to 12-month time scales for each piezometer revealed that correlations were insignificant at the 3- and 6-month scales in most piezometers. However, the highest correlations between SGI and SPEI were observed at 9- and 12-month scales. Applying a time lag initially improved correlations across all scales, but correlations diminished beyond a certain point. On average, a time lag of 3 to 5 months increased the correlation. Analysis of the duration and intensity of hydrological drought events indicated that areas with prolonged but low-intensity droughts remained in a drought state for extended periods, struggling to return to equilibrium. Conversely, areas with shorter but more intense droughts experienced intense droughts over short periods; however, despite the severity, they managed to return to equilibrium. These findings provide practical implications for understanding and predicting drought conditions, offering valuable information for effective groundwater management strategies.

Conclusion

This study investigated the relationship between the hydrological drought SGI derived from groundwater level data and meteorological drought indices over a 20-year statistical period (2001-2021). The shorter analysis period was due to the lack of statistical data and the adequate correspondence between the 20-year monthly data for meteorological drought indices (SPI and SPEI) and the drought index time series obtained from 30-year monthly data. The hydrological drought index (SGI) in the piezometers, which correlated significantly with the drought indices (SPI, SPEI), is primarily influenced by climatic conditions. The low correlation between SPI, SPEI, and the SGI index can be principally attributed to human factors. Groundwater extraction and social and economic issues are the primary causes of drought in aquifer regions with low SPI-SGI correlation. By assessing drought duration and severity across Thiessen polygons affected by the piezometer, a hydrological drought risk zoning map was developed for the Urmia aquifer. The results indicated that hazard levels 9 and 8 dominated the southern areas of the aquifer, covering 14% and 13% of the surface area, respectively. This map can be a critical tool for selecting the most suitable methods to maintain groundwater level balance. Management plans in high-risk areas should prioritize monitoring human activities, such as drilling and water withdrawal, as well as changes in crop patterns and the implementation of artificial recharge projects. Climatic factors exerted heterogeneous effects on the occurrence of hydrological drought across the entire aquifer. These measures can substantially help planners and managers in the Urmia Lake Restoration Headquarters and the Regional Water Organization.

Keywords: Piezometer, Correlation Coefficient, Hazard Assessment, SGI Index.

Article Type: Research Article

Acknowledgment

We sincerely thank Urmia University for its support of this doctoral project and the West Azerbaijan Water Authority for providing the groundwater data.

Conflicts of Interest

The authors of this article declared no conflict of interest regarding the authorship or publication of this article.

Data Availability Statement

The datasets are available upon reasonable request from the corresponding author.

Authors' Contribution

Samaneh Dadafarid: Data preparation, analysis, computations, and writing the original draft.

Mahdi Erfanian: Supervise, conceptualize, discuss, and edit the final manuscript.

Behzad Hessari: Discussion, interpretation, and editing of the manuscript draft.

Khadijeh Javan: Drought Analysis and editing-manuscript draft.

*Corresponding Author, E-mail: m.erfanian@urmia.ac.ir

Citation: Dadafarid, S., Erfanian, M., Hessari, B. & Javan, Kh. (2025). Groundwater drought hazard zoning and relationship between meteorological and hydrological drought indices in the Urmia aquifer, *Water and Soil Management and Modelling*, 5(2):272-289.

doi: 10.22098/mmws.2025.16234.1519

Received: 21 November 2024, Received in revised form: 04 February 2025, Accepted: 05 February 2025, Published online: 22 June 2025.

Water and Soil Management and Modeling, Year 2025, Vol. 5, No 2, pp. 272-289.

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili© Author(s)





پهنه بندی خطر خشکسالی آب زیرزمینی و ارتباط شاخص های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیک در آبخوان ارومیه

سمانه دادآفرید^۱، مهدی عرفانیان^{۲*}، بهزاد حصاری^۳، خدیجه جوان^۴

^۱ دانشجوی دکتری، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
^۲ دانشیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
^۳ دانشیار، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
^۴ دانشیار، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

چکیده

بخش وسیعی از آب شرب، کشاورزی و صنعت مورد نیاز کشور از آب های زیرزمینی تأمین می شود و نقش به سزایی در توسعه اقتصادی کشور دارد. داده های ماهانه تراز آب زیرزمینی ۴۳ پیزومتر در محدوده آبخوان ارومیه به مدت ۲۰ سال مورد ارزیابی قرار گرفت. با توجه به این که دوره آماری ۳۰ ساله برای اکثر روش های شاخص خشکسالی تعمیم داده شده است؛ لذا از معیارهای ضریب همبستگی، ضریب تعیین، ریشه میانگین مربعات خطا، هانا و هینولد، ضریب کاپا، ضریب کرامر و درصد همبستگی طبقات برای مقایسه و اعتبارسنجی میزان همبستگی شاخص SPI و SPEI در دوره آماری ۲۰ ساله با دوره آماری ۳۰ ساله استفاده شد. برای مقایسه میزان همبستگی SPI و SPEI در مقیاس های ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه با شاخص ماهانه SGI از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شد. از نرم افزار ArcGIS به منظور تهیه نقشه پهنه بندی خطر خشکسالی آب زیرزمینی استفاده شد. در نقشه پهنه بندی برای هر پیزومتر، بر اساس شدت، تداوم و خطر خشکسالی رتبه تخصیص داده شده است. به منظور تحلیل تأثیر تأخیر زمانی بر ارتباط شاخص های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیک، میزان همبستگی با تأخیرهای زمانی مختلف، برآورد شد. میزان همبستگی شاخص SPI و SPEI محاسبه شده با استفاده از ۲۰ سال داده (۱۳۸۱-۱۴۰۰) با داده های ۲۰ سال متناظر شاخص SPI و SPEI محاسبه شده با استفاده از ۳۰ سال داده (۱۴۰۰-۱۳۷۱) نشان دهنده همبستگی قوی داده ها با یکدیگر بود. در مقیاس زمانی ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماه بهترین میزان همبستگی شاخص SGI با شاخص SPEI در مقیاس های زمانی ۹ و ۱۲ ماهه محقق شد. در مقیاس های ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه با ایجاد تأخیر زمانی، ابتدا میزان همبستگی افزایش و سپس کاهش یافت. به طور متوسط، تأخیر زمانی ۳ تا ۵ ماهه موجب افزایش میزان همبستگی گردید. خشکسالی در پیزومترهایی که همبستگی زیاد با شاخص های SPI و SPEI دارند، ناشی از شرایط اقلیمی است و میزان همبستگی پایین SPI و SPEI با شاخص SGI، ناشی از عوامل انسانی است. نقش عوامل اقلیمی در وقوع خشکسالی هیدرولوژیک در سطح آبخوان یکسان نبوده و نواحی جنوبی آبخوان که همبستگی کمتری را با شاخص های اقلیمی داشتند جزء طبقات پرخطر در پهنه بندی خطر خشکسالی آب زیرزمینی قرار گرفتند.

واژه های کلیدی: پیزومتر، ضریب همبستگی، ارزیابی خطر، شاخص SGI.

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: m.erfaniaan@urmia.ac.ir

استناد: دادآفرید، سمانه، عرفانیان، مهدی، حصاری، بهزاد، و جوان، خدیجه (۱۴۰۴). پهنه بندی خطر خشکسالی آب زیرزمینی و ارتباط شاخص های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیک در آبخوان ارومیه. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۵ (۲): ۲۷۲-۲۸۹.
doi: 10.22098/mmws.2025.16234.1519

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۰۱، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۱۶، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۱۷ تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۱/۱۷

مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۴، دوره ۵، شماره ۲، صفحه ۲۷۲ تا ۲۸۹.

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی © نویسندگان



۱- مقدمه

در سال‌های اخیر به‌علت مواجهه بسیاری از مناطق جهان با شرایط تغییر اقلیم، اهمیت مطالعه الگوی تغییرات پدیده‌های اقلیمی افزایش یافته است و کشور ایران هم با اقلیم خشک و نیمه‌خشک در بیش‌تر مناطق آن، از این قاعده مستثنی نیست (Abdollahi Asadabadi et al., 2017). در ایران، بخش وسیعی از آب‌شرب، کشاورزی و صنعت از آب‌های زیرزمینی تأمین می‌شود و آب زیرزمینی نقش به‌سزایی در توسعه اقتصادی کشور دارد. آب‌های زیرزمینی، تحت شرایط تغییر اقلیم در مقایسه با سایر منابع سطحی، به‌عنوان مهم‌ترین منبع تأمین آب مخصوصاً هنگام وقوع خشکسالی‌های بلندمدت هواشناسی محسوب می‌شوند (Hellwig et al., 2020). خشکسالی آب زیرزمینی در صورتی اتفاق می‌افتد که سطح ایستابی به‌دنبال کاهش نفوذ نزولات جوی و تغذیه آب به سفره آب زیرزمینی، به‌طور پیوسته پایین‌تر رود. معمولاً این پدیده به‌صورت تدریجی به‌دنبال کاهش نزولات جوی، وقوع خشکسالی هواشناسی شروع شده و با برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی توسط انسان، شدت می‌یابد (Van Lanen and Peters, 2000). انسان وقتی از وقوع خشکسالی آب‌های زیرزمینی آگاه می‌شود که از شروع آن، مدت زمان طولانی گذشته است و خسارات جبران‌ناپذیری به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک به همراه دارد. از این رو تشخیص، شناسایی و پیش‌بینی خشکسالی آب‌های زیرزمینی ضروری است (Guo et al., 2021). مدیریت خشکسالی شامل فعالیت‌های مورد نیاز برای شناسایی، احتمال قرار گرفتن در معرض خطر و مقابله یا سازگاری با خطر است. تحلیل خطر خشکسالی، بخش اساسی در مدیریت بحران خشکسالی محسوب می‌شود. هدف از مدیریت خشکسالی این است که با اتخاذ راهکارهای مناسب و سازگار، برای کاهش خسارات ناشی از آن، اقدام مناسب را انجام داد. در این راستا، تحلیل خطر خشکسالی به تعیین و اولویت‌بندی راهکارهای مناسب، کمک می‌کند (FID, 2021).

تاکنون شاخص‌های مختلفی در تحلیل خشکسالی (شروع، پایان، شدت و تداوم)، شامل شاخص شدت خشکسالی پالمر^۱ (Palmer, 1965)، شاخص خشکسالی رطوبت خاک^۲ (Hollinger et al., 1993)، شاخص خشکسالی شناسایی^۳ (Zarei et al., 2019) و شاخص بارش استاندارد شده^۴ (McKee et al., 1993) مورد استفاده قرار گرفته است. علاوه بر

این‌ها، شاخص‌هایی برای ارزیابی خشکسالی منابع آب زیرزمینی پیشنهاد شده است. به‌عنوان مثال می‌توان از شاخص استاندارد شده سطح آب زیرزمینی^۵ (Bloomfield and Marchant, 2013)، شاخص خشکسالی آب زیرزمینی^۶ (Mendicino et al., 2008) و شاخص استاندارد سطح آب (Bhuiyan, 2004) نام برد. مروری بر مطالعات انجام شده در ایران بیانگر این مطلب است که از SPI و SGI به‌عنوان دو شاخص متداول، می‌توان به‌ترتیب در پایش خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیک (آب زیرزمینی)، استفاده کرد. به‌منظور استخراج شاخص SPI فقط به مقادیر بارش ثبت شده در یک ایستگاه هواشناسی در یک دوره آماری معین نیاز است. نظر به این که، مقدار قابل‌توجهی از بارش از طریق فرآیند تبخیر و تعرق از دسترس خارج می‌شود، استفاده از شاخص SPEI^۷ در تحلیل‌های خشکسالی توصیه شده است (Abramopoulos et al., 1988). شاخص منابع آب زیرزمینی^۸ در ایتالیا (منطقه کالابریا^۹) برای تحلیل خشکسالی هیدرولوژیک در یک دوره آماری ۴۰ ساله، مورد ارزیابی قرار گرفت. (Mendicino et al., 2008) نتایج آن‌ها نشان داد شاخص GRI در پایش خشکسالی منطقه مذکور در مقایسه با سایر شاخص‌ها، عملکرد بهتری داشته است. (Abu Arra and Şişman, 2024) ماتریس نوآورانه طبقه‌بندی خشکسالی را برای مقایسه شاخص‌های خشکسالی هواشناسی بر اساس آمار دوره‌های آماری کوتاه و بلندمدت در چند ایستگاه هواشناسی معرفی کردند. این پژوهش در سه اقلیم مختلف شامل ایستگاه دورهام در انگلستان، ایستگاه فلوریا در ترکیه و ایستگاه کاراپینار در ترکیه انجام شده است. شاخص SPI با مقیاس زمانی ۳ و ۱۲ ماهه برای سال‌های آماری مختلف در هر ایستگاه محاسبه شده است. شاخص SPI ۱۲ ماهه با دوره آماری ۳۰ ساله، بیش‌ترین همبستگی را با دوره مرجع (۹۰ ساله) داشته است. آن‌ها نشان دادند دوره ۱۰ ساله به‌عنوان یک دوره زمانی قابل‌قبول در مقیاس کوتاه‌مدت و دوره ۲۰ ساله برای بازه‌های زمانی طولانی‌تر، برای استخراج شاخص‌های هواشناسی قابل استفاده است.

در مطالعه‌ای (Abhishek et al., 2021) برای حوزه آبخیز رودخانه کریشنا^{۱۰} در هندوستان، شاخص خشکسالی هیدرولوژیک SGI محاسبه‌ای در پی‌زومترها را با شاخص‌های SPI و SPEI ایستگاه‌های هواشناسی در مقیاس‌های زمانی ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۲۴

^۶ Standardized Groundwater Level Index (SGI)

^۷ Standardized Precipitation Evapotranspiration Index

^۸ Groundwater Resource Index (GRI)

^۹ Calabria

^{۱۰} Krishna river

^۱ Palmer Drought Severity Index (PDSI)

^۲ Soil Moisture Deficit Index (SMDI)

^۳ Reclamation Drought Index (RDI)

^۴ Standardized Precipitation Index (SPI)

^۵ Standardized Groundwater Level Index (SGLI)

مورد بررسی جامع قرار نگرفته است. با توجه به وضعیت بحرانی دریاچه ارومیه، تحلیل خشکسالی آب زیرزمینی و شناسایی مناطق خطر در سطح آبخوان از نظر شدت و تداوم خشکسالی هیدرولوژیک به‌عنوان گام ضروری در مدیریت منابع آب است. در این پژوهش اثر سایر عوامل مؤثر در منابع آب زیرزمینی شامل برداشت یا پمپاژ آب، تغذیه مصنوعی، کاربری اراضی و الگوی کشت در سطح دشت و اثر دخالت‌های انسانی روی تغییرات حجم مفید آبخوان و نوسانات سطح ایستابی، بررسی نشده است که این موضوع باید در قالب تحلیل جامع خشکسالی، مورد ارزیابی قرار گیرد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز دریاچه ارومیه با وسعتی بالغ بر ۵۲۰۰۰ کیلومتر مربع شامل دشت آبخوان‌های تبریز، ارومیه، مراغه، مهاباد، میاندوآب، نقده، سلماس، آذرشهر و اشنویه است. آبخوان دشت ارومیه بین طول شرقی ۴۴ درجه و ۲۰ دقیقه و ۴۵ درجه و ۲۰ دقیقه و عرض شمالی ۳۷ درجه و ۵ دقیقه و ۳۸ درجه و ۵ دقیقه قرار گرفته است (شکل ۱). این آبخوان دارای مساحتی در حدود ۸۶۸ کیلومتر مربع بوده و دارای اقلیم مدیترانه‌ای است. میانگین سالانه دما و بارش به ترتیب برابر ۱۱/۵۲ درجه سانتی‌گراد و ۳۴۶/۳ میلی‌متر است (Amiri, 2019). رودخانه‌های نازلوچای، روضه‌چای، شهرچای و باراندوزچای از محدوده آبخوان ارومیه به دریاچه ارومیه می‌رسند. باغداری و کشاورزی در دشت ارومیه تا حد زیادی به منابع آب زیرزمینی وابسته است و کاهش نزولات جوی و افزایش بهره‌برداری از منابع آب برای مصارف کشاورزی و سایر موارد در طول سه دهه اخیر، این دشت را در معرض خشکسالی جدی قرار داده است که باعث وارد شدن زیان و خسارات جبران‌ناپذیر به بخش کشاورزی، صنعت و جامعه انسانی شده است. این آبخوان شامل ۷۱ چاه پیزومتر است که فقط ۴۳ چاه دارای اندازه‌گیری ماهانه عمق آب زیرزمینی در یک دوره مشترک آماری ۲۰ ساله می‌باشند. میانگین تراز آب زیرزمینی ۲۰ ساله بر اساس داده‌های موجود آبخوان برابر ۱۲۹۷/۲ متر است.

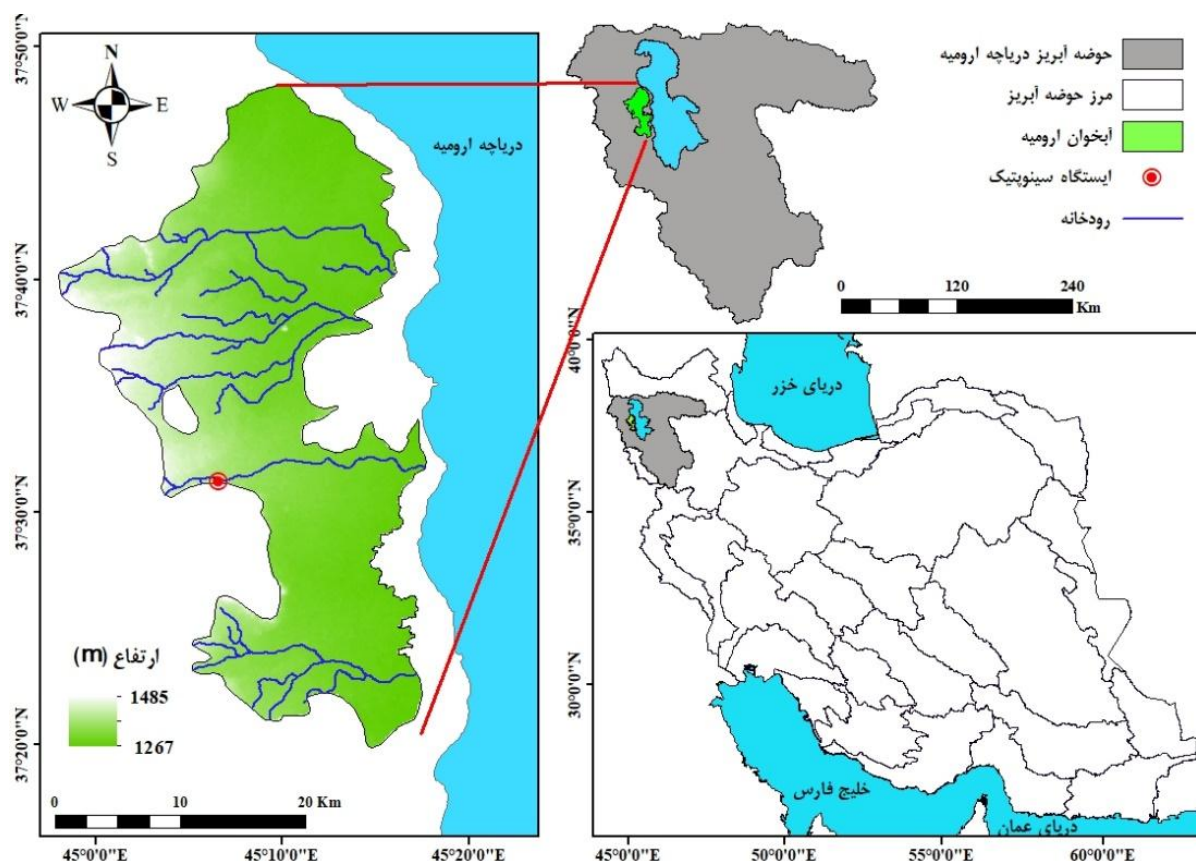
ماهه مقایسه کردند. آن‌ها پیزومترها را در سه خوشه یا کلاستر C1، C2 و C3 گروه‌بندی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد در خوشه‌های C1 و C2 شاخص SPEI در مقیاس ۱۲ و ۲۴ ماهه، رفتار مشابه داشتند، چون در منطقه نیمه‌خشک قرار داشته است. خوشه C3 شامل ایستگاه‌های واقع در ناحیه مرطوب بوده که تأثیر عامل بارندگی نسبت به تبخیر و تعرق در محاسبه خشکسالی، غالب‌تر است. (Sharafi et al., 2020) ارزیابی ریسک خشکسالی را بر اساس دو معیار خطر خشکسالی SPI و SDI^۱ در استان کرمانشاه در دوره ۲۰۱۵-۱۹۸۵ انجام دادند و نقشه خطر خشکسالی را در سه سطح خشکسالی شدید، خیلی شدید و بحرانی تهیه کردند. بر اساس یافته‌های Li and Rodell (2015) در آمریکا و Soleimani Motlagh et al. (2017) در دشت الشتر شهرستان خرم‌آباد، بیش‌ترین همبستگی بین شاخص SPI و شاخص خشکسالی آب زیرزمینی، در مقیاس زمانی ۲۴ ماهه مشاهده شده است. (Bazrafshan et al., 2016) تأثیر خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی بر منابع آب زیرزمینی بیابان‌های ساحلی در جنوب ایران را در دوره ۲۰۱۱-۱۹۹۱ با استفاده از شاخص‌های SPI و GRI بررسی کردند و نتیجه گرفتند، GRI در مقیاس ۴۸ ماهه با شاخص‌های SPI و SRI^۲ رابطه معناداری داشته است.

(Fotouhi et al., 2014) در تالاب مهارلو استان فارس، ماتریس ریسک خشکسالی را بر اساس دو معیار آسیب‌پذیری و احتمال وقوع خطر ترسیم کردند. هر یک از این معیارها دارای پنج درجه از خیلی کم تا خیلی زیاد بوده‌اند. نتایج پژوهش آن‌ها نشان داد افزایش دما، تغییر کاربری اراضی، افت سطح ایستابی چاه‌ها و خشک‌شدن چشمه‌ها از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار در افزایش ریسک خشکسالی می‌باشند. در خصوص بررسی خشکسالی در آبخوان‌های واقع در حوضه آبریز دریاچه ارومیه، مطالعات مختلفی انجام شده است که از آن جمله می‌توان به (Shokoohi and Morovati, 2014; Zahedi and Ghavidel Rahimi, 2016; Javadzadeh et al., 2020; Sadeghfam et al., 2022) اشاره کرد.

تاکنون خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیک در آبخوان ارومیه و ارتباط بین شاخص‌های مختلف در مقیاس‌های زمانی مختلف

¹ Streamflow Drought Index

² Standardized Runoff Index



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران و حوضه آبریز دریاچه ارومیه

Figure 1- The location of the study area in Iran and Urmia Lake Basin

برای محاسبه شاخص‌های خشکسالی SPI, SPEI, SGI سری زمانی متغیر مورد مطالعه شامل بارش، اختلاف بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل، تراز آب زیرزمینی، در مقیاس زمانی ماهانه، آماده شد. پس از آن، یک تابع چگالی آماری مناسب برای هر سری زمانی داده‌ها برازش داده شد. سپس شاخص‌های خشکسالی SPI و SPEI داده‌های ایستگاه سینوپتیک ارومیه و شاخص خشکسالی SGI هر یک از پیرومترهای آبخوان ارومیه با استفاده از بسته نرم‌افزار آماری (SPEI) در محیط R محاسبه شد. برای محاسبه شاخص SPEI اختلاف بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل به‌عنوان سری زمانی ماهانه، مورد استفاده قرار گرفت (Vicente-Serrano et al., 2010). در این پژوهش از روش هارگریوز^۱ به‌دلیل نیاز به حداقل داده‌ها و در دسترس بودن پارامترها برای برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل ماهانه براساس رابطه (۱) استفاده شد (Burman and Pochop, 1994; Allen et al., 1998):

$$ET = 0.0023(Ra)(T + 17.8)\sqrt{T_{max} - T_{min}} \quad (1)$$

که ET میانگین روزانه تبخیر و تعرق (میلی‌متر در روز)، Ra شدت تابش فرازمینی ماهانه، T میانگین دما، T_{max} میانگین دمای

۲-۲- شاخص‌های خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیک

خشکسالی آب‌های زیرزمینی به‌صورت کاهش تراز یا ذخیره آب‌های زیرزمینی، ناشی از عوامل طبیعی و انسانی مانند تغییرات اقلیمی و برداشت یا پمپاژ زیاد آب، ظاهر می‌شود. به‌منظور تحلیل وضعیت آبخوان، از داده‌های ماهانه اندازه‌گیری شده عمق آب زیرزمینی در پیرومترهای آبخوان برای استخراج شاخص SGI از داده‌های ماهانه بارش ایستگاه هواشناسی ارومیه واقع در دشت آبخوان برای استخراج دو شاخص هواشناسی SPI و SPEI استفاده شد. همان‌طور که قبلاً ذکر شد از این شاخص‌ها در سایر مناطق دنیا و ایران، در تحلیل خشکسالی به‌طور گسترده استفاده شده است (Leelaruban et al., 2017; Yeh and Chang, 2019; Guo et al., 2021; Song et al., 2023). شاخص SGI یا شاخص استاندارد شده آب زیرزمینی، مشابه شاخص بارش استاندارد شده SPI و شاخص SPEI است که بر اساس بهترین توزیع آماری برازش یافته با سری زمانی ماهانه عمق آب زیرزمینی در هر پیرومتر به سهولت در هر مقیاس زمانی (۱ تا ۲۴ ماهه) قابل استخراج است.

^۱ Hargreaves

آبخوان، موجود بوده است. از دوره آماری ۳۰ ساله ۱۳۷۱ تا ۱۴۰۰ به‌عنوان دوره زمانی مرجع در استخراج شاخص‌های خشکسالی هواشناسی استفاده شد. همچنین، شاخص‌های خشکسالی SPI و SPEI و شاخص هیدرولوژیک SGI بر اساس داده‌های ماهانه در دوره آماری ۲۰ ساله (۱۴۰۰-۱۳۸۱) استخراج شد. لازم به ذکر است تعداد رویدادهای خشکسالی، شدت و تداوم در هر رویداد به مقیاس زمانی بستگی دارد. به‌عبارت دیگر تعداد رویدادها در مقیاس‌های زمانی بزرگ‌تر، کم‌تر بوده ولی تداوم آن بیش‌تر است. در SPI یا SPEI ۳ ماهه، تعداد رویدادهای بیش‌تری از خشکسالی از نمودار آن‌ها قابل استخراج است (Mohseni, 2015; Saravi et al., 2005; Bazrafshan, 2015). در این پژوهش، شاخص‌های خشکسالی در مقیاس زمانی ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه محاسبه شد. مطابقت سری‌زمانی شاخص‌های خشکسالی هواشناسی در دوره آماری ۳۰ و ۲۰ ساله با یکدیگر بررسی شدند. در واقع اثر طول دوره آماری در استخراج شاخص‌ها مورد بررسی قرار گرفته است.

۴-۲- معیارهای ارزیابی همبستگی و تطابق شاخص‌های خشکسالی هواشناسی

معیارهای آماری مورد استفاده برای مقایسه و اعتبارسنجی میزان همبستگی شاخص SPI و SPEI در دوره آماری ۲۰ ساله با دوره آماری مرجع (۳۰ ساله) شامل ضریب همبستگی (CC)، ضریب تعیین (R^2)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، معیار هانا و هینولد (HH)، ضریب کاپا (k)، ضریب کرامر (V) و درصد همبستگی طبقات، در جدول ۱ ارائه شده است.

حداکثر ماهانه و T_{min} میانگین دمای حداقل (سانتی‌گراد) در ماه مورد نظر است (Hargreaves and Samani, 1982)؛ بنابراین برای همراه در طول دوره آماری، مقدار تبخیر و تعرق به‌دست آمد و با حاصل ضرب آن در تعداد روزهای ماه، مقدار ماهانه ET برآورد شد. مقدار شاخص SGI با استفاده از مقادیر تراز آب زیرزمینی که از توزیع آماری نرمال تبعیت می‌کنند، براساس رابطه (۲) محاسبه شد.

$$SGI_{y,m} = \frac{D_{y,m} - \mu_{D,m}}{\sigma_{D,m}} \quad (2)$$

که $SGI_{y,m}$ بیانگر شاخص استاندارد شده آب زیرزمینی در سال y و ماه m است. D در واقع عمق آب زیرزمینی ایستابی در پیژومتر (متر) است. $\mu_{D,m}$ و $\sigma_{D,m}$ به‌ترتیب برابر میانگین و انحراف معیار D در دوره آماری برای ماه مورد نظر در پیژومتر مورد مطالعه می‌باشند (Mendicino et al, 2008).

۲-۳- انتخاب دوره آماری

دوره زمانی بر محاسبات شاخص خشکسالی و نتایج به‌دست آمده تأثیر می‌گذارد. (McKee et al. 1993) استفاده از حداقل ۳۰ سال داده بارش ماهانه را برای ارزیابی SPI پیشنهاد کردند. همچنین، سازمان جهانی هواشناسی، استفاده از یک دوره آماری ۳۰ ساله مقادیر بارش و دما را برای پژوهش‌ها اقلیمی توصیه کرده است (WMO, 2008). لذا در بیش‌تر پژوهش‌ها گذشته، دوره آماری ۳۰ ساله در استخراج شاخص‌های خشکسالی و هیدرولوژیک، مبنا قرار گرفته است (Svoboda et al., 2012). در پژوهش حاضر، داده‌های ماهانه سطح آب زیرزمینی، فقط در دوره آماری ۱۳۸۱ تا ۱۴۰۰ (۲۰ سال) در ۴۳ پیژومتر واقع در

جدول ۱- معیارهای آماری برای ارزیابی همبستگی و تطابق شاخص‌های خشکسالی

Table 1- Statistical criteria to evaluate relationship and agreement between drought indices

Criterion	Equation	Range	Reference
Correlation Coefficient	$IC = \frac{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})(T_i - \bar{T})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2}}$	(-1) - (1)	(Pearson, 1907)
Coefficient of Determination	$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})(T_i - \bar{T})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2}} \right]^2$	(0) - (1)	(Wright, 1921)
Root Mean Square Error	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_i - R_i)^2}$	(0) - (∞)	(Hampel, 1974)
Hanna and Heinold	$HH = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - R_i)^2}{\sum_{i=1}^n T_i R_i}}$	(0) - (∞)	(Hanna and Heinold, 1985)
Kappa	$K = \frac{N \sum_{i=1}^k X_{ii} - \sum_{i=1}^k (X_{i+} \times X_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^k (X_{i+} \times X_{+i})}$	(-1) - (+1)	(Cohen, 1960)
Cramer	$V = \sqrt{\frac{x^2/n}{\min(k-1, r-1)}}$	(-1) - (+1)	(Cramér, 1999)
Class Correlation Percentage	$\frac{\text{Number of same classes of data}}{\text{Total number of data}} \times 100$	(0) - (100)	(Abu Arra and Şişman, 2024)

R = مقدار شاخص خشکسالی در دوره مرجع ۳۰ ساله، T = مقدار شاخص خشکسالی در دوره زمانی ۲۰ ساله، n = تعداد ماه، $\bar{R}$ = میانگین شاخص خشکسالی هواشناسی در دوره مرجع، $\bar{T}$ = میانگین شاخص خشکسالی در دوره زمانی، N = تعداد کل داده ها، X_{i+} = فراوانی هر طبقه خشکسالی در دوره مرجع، X_{+i} = فراوانی هر طبقه خشکسالی در دوره زمانی، X_{ii} = فراوانی طبقات مشابه شدت خشکسالی، K = تعداد طبقات شدت خشکسالی در دوره مرجع، T = تعداد طبقات شدت خشکسالی در دوره زمانی، d^2 = آماره کای مربع

۲-۵- ماتریس ارزیابی خطر خشکسالی

ارزیابی جامع خطر خشکسالی بر اساس تحلیل رویدادهای خشکسالی از نظر درجه شدت، تداوم و وسعت اثر آن در یک منطقه، صورت می گیرد. در پژوهش حاضر، شدت و تداوم خشکسالی هر کدام در ۵ درجه یا سطح تعریف شد. افزایش مقدار عناصر این ماتریس، نشان دهنده درجه خطر خشکسالی است (Sadeghfam et al., 2022).

در هر پیرومتر در دوره آماری مورد مطالعه، بزرگترین رویداد خشکسالی هیدرولوژیک SGI از نظر تداوم و شدت خشکسالی، استخراج شد. مقادیر تداوم و شدت ۴۳ پیرومتر به تفکیک بر اساس روش طبقه بندی بازه های طبیعی جنکز^۱ در ۵ طبقه قرار گرفت؛ بنابراین برای بزرگترین رویداد خشکسالی در هر پیرومتر مقادیر ۱ تا ۵ از نظر تداوم و شدت مشخص شد و مطابق جدول ۳، درجه خطر ترکیبی آن استخراج شد. در واقع در هر پیرومتر، به طولانی ترین یا شدیدترین خشکسالی، درجه خطر نهایی از ۱ تا ۹ تعلق گرفت. درجات خطر با در نظر گرفتن شدت و تداوم خشکسالی های مهم در هر پیرومتر به دست آمد. به عنوان مثال در یک پیرومتر اگر شدت و تداوم خشکسالی هیدرولوژیک، هر دو در طبقه ۵ قرار داشت، درجه نهایی خطر برابر ۹ در نظر گرفته شد (Sadeghfam et al., 2022).

۲-۶- پهنه بندی خطر خشکسالی آب زیرزمینی

در ابتدا، محدوده تحت پوشش هر پیرومتر بر اساس چندضلعی تیسن، ترسیم شد. بدین منظور از نرم افزار ArcGIS استفاده شد (شکل ۲). با مشخص بودن درجه خطر خشکسالی هر پیرومتر در نهایت نقشه های درجه خطر تمام چندضلعی ها از نظر شدت، تداوم و شدت-تداوم (جدول ۳) به دست آمد.

برای هر شاخص خشکسالی و بر اساس جدول ۲، شدت خشکسالی یا ترسالی، طبقات و فراوانی هر طبقه، استخراج شد. شاخص های خشکسالی که بر اساس دوره مرجع ۳۰ ساله استخراج شدند با شاخص های خشکسالی استخراج شده از دوره ۲۰ ساله، با هم مقایسه شد و بر اساس معیارهای جدول ۱ میزان همبستگی یا تطابق آن ها مورد ارزیابی قرار گرفت.

به منظور یافتن میزان انطباق طبقه های شاخص های SPI و SPEI محاسبه شده با استفاده از داده های زمان مرجع و شاخص های SPI و SPEI محاسبه شده با استفاده از ۲۰ سال داده از یک ماتریس طبقه بندی خشکسالی استفاده شد (Abu Arra and Şişman, 2024). هر مقدار برای هر ماه از هر دو سناریو بر اساس طبقه بندی خشکسالی مقایسه شد. به منظور تحلیل میزان ارتباط بین خشکسالی های هواشناسی و هیدرولوژیک و خشکسالی آب زیرزمینی، میزان همبستگی SPI و SPEI ۳ ماهه، ۶ ماهه، ۹ ماهه و ۱۲ ماهه با شاخص SGI، از ضریب همبستگی پیرسون (CC) استفاده شد. به منظور تحلیل تأثیر تأخیر زمانی، ارتباط شاخص های خشکسالی و هیدرولوژیک در هر پیرومتر با بیشترین ضریب همبستگی در تأخیرهای ۱ تا ۱۲ ماهه مورد بررسی قرار گرفت.

جدول ۲- طبقه بندی شدت خشکسالی

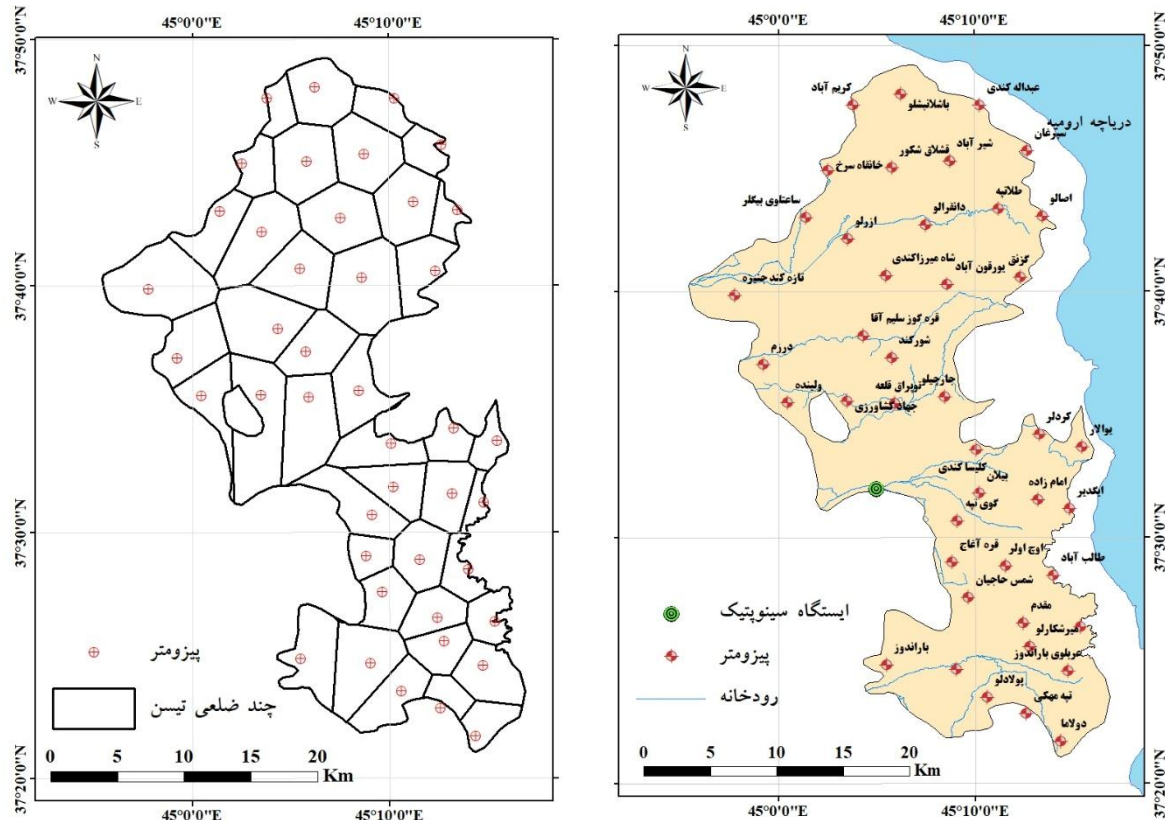
Table 2- Classification of drought severity (McKee et al., 1993; Nalbantis and Tasakiris, 2009)

Classification	Drought index
Extremely humid	> +2
Very humid	+1.5 to +2
Medium wet	+1 to +1.5
Normal	-1 to 1
Medium dry	-1.5 to -1
Very dry	-2 to -1.5
Extremely dry	< -2

جدول ۳- ماتریس درجه بندی خطر خشکسالی

Table 3- Drought hazard rating matrix

Drought Severity					Degree	Title
5	4	3	2	1		
5	4	3	2	1	1	Drought Duration
6	5	4	3	2	2	
7	6	5	4	3	3	
8	7	6	5	4	4	
9	8	7	6	5	5	



شکل ۲- موقعیت پیزومترها و چندضلعی تیسسن در آبخوان ارومیه
Figure 2- Location of piezometers and Thiessen polygons in Urmia aquifer

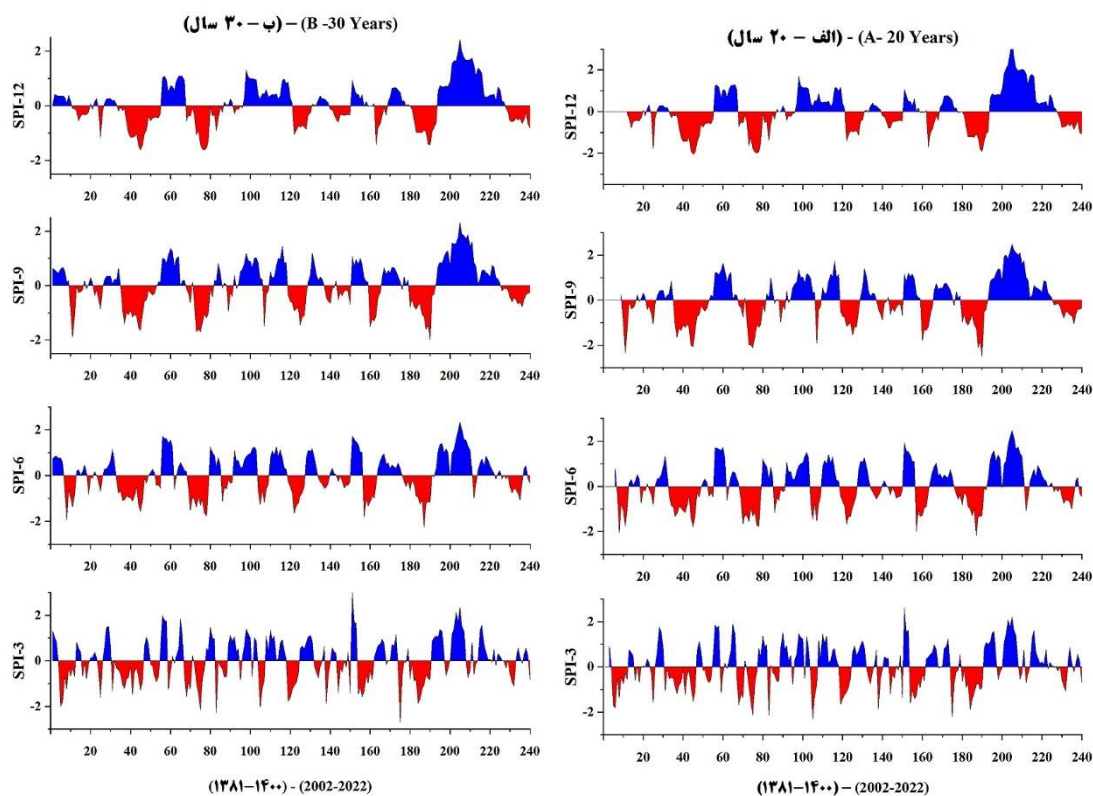
درصد همبستگی، می‌توان گفت در مقیاس‌های زمانی ۳ و ۶ ماهه، همبستگی و تطابق بین شاخص‌های خشکسالی بین دوره ۲۰ و ۳۰ ساله، بیش‌تر است. نتایج پژوهش نشان می‌دهد می‌توان بر اساس داده‌های ۲۰ ساله بارش و تبخیر و تعرق، شاخص‌های خشکسالی هواشناسی را با صحت قابل قبول و مشابه دوره ۳۰ ساله استخراج کرد؛ بنابراین، دوره ۲۰ ساله ۱۴۰۰-۱۳۸۱ به‌منظور تحلیل ارتباط بین شاخص‌های هواشناسی و هیدرولوژیک، مبنا قرار گرفت چون داده‌های پیزومتر فقط برای این دوره در دسترس بوده است.

در پژوهش (McKee et al., 1993; WMO, 2012) بر استفاده از حداقل دوره آماری ۳۰ ساله مقادیر ماهانه بارش برای محاسبه و تحلیل خشکسالی هواشناسی SPI تأکید دارند. اگرچه این موضوع به‌صورت پیش‌فرض شاید به‌عنوان محدودیت پژوهش محسوب شود، اما مقایسه شاخص‌های خشکسالی بر اساس داده‌های ۲۰ و ۳۰ ساله، این پیش‌فرض را رد کرد. در این راستا، نتایج پژوهش (Abu Arra and Şişman, 2024) هم نشان داد که استفاده از ۲۰ سال داده ماهانه برای ارائه شاخص خشکسالی در مقیاس‌های زمانی ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه می‌تواند اغلب، قابل قبول باشد.

۳- نتایج و بحث

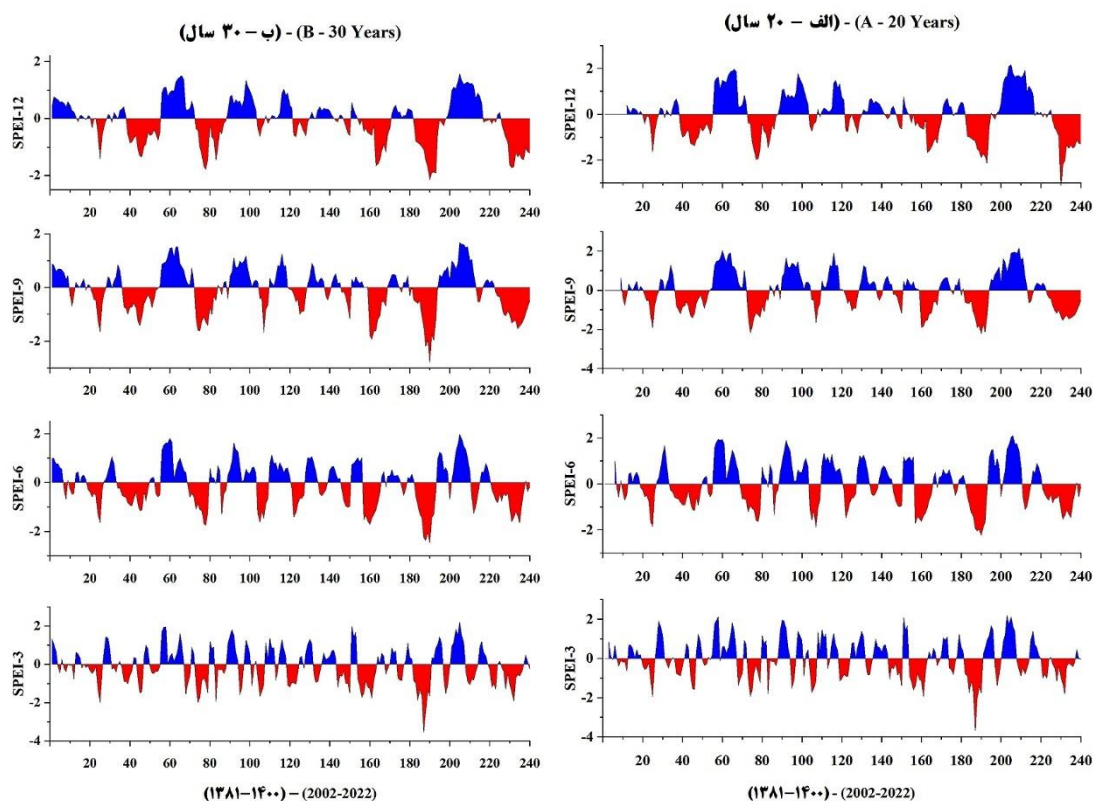
مقایسه دوره متناظر ۲۰ ساله محاسبه شده در دوره‌های ۲۰ و ۳۰ ساله (مرجع)، نشان‌دهنده تطابق زیاد نمودار یا سری زمانی شاخص خشکسالی بالأخص در مقیاس‌های زمانی کوتاه‌مدت است (شکل ۳ و ۴). به عبارت دیگر، نمودارهای شاخص‌های خشکسالی در دوره ۲۰ ساله و دوره مرجع ۳۰ ساله، تطابق یا شباهت زیادی دارند.

میزان همبستگی و ضرایب تطابق سری زمانی شاخص‌های SPI و SPEI دوره ۲۰ ساله (۱۴۰۰-۱۳۸۱) و دوره ۳۰ ساله (۱۴۰۰-۱۳۷۱) نشان‌دهنده همبستگی مثبت و قوی بین شاخص‌ها در دوره‌های کوتاه و مرجع است. نگاه دقیق‌تر به مقادیر جدول ۴ نشان می‌دهد میزان همبستگی و تطابق شاخص‌ها، در مقیاس‌های زمانی ۳ تا ۱۲ ماه، کمی متفاوت می‌باشند ولی در کل در تمامی مقیاس‌های زمانی ضریب همبستگی و ضریب تعیین بزرگ‌تر از ۰/۹، جذر میانگین مربعات خطا و ضریب هانا و هینولد کم‌تر از ۰/۳، ضریب کاپا و ضریب کرامر بزرگ‌تر از ۰/۵ و درصد همبستگی طبقات بزرگ‌تر از ۷۵ درصد می‌باشد و به‌طور کلی نتایج به‌دست آمده، رضایت‌بخش یا قابل قبول می‌باشند. بر اساس معیارهای جذر میانگین مربعات خطا، ضریب کاپا، ضریب کرامر و



شکل ۳- شاخص SPI ماهانه (۱۳۸۱-۱۴۰۰) در مقیاس زمانی ۳ تا ۱۲ ماهه (الف - ۲۰ ساله ب - ۳۰ ساله)

Figure 3- Monthly SPI index (2002-2022) on 3-12 month time scales (a: 20 years, b: 30 years)



شکل ۴- شاخص SPEI ماهانه (۱۳۸۱-۱۴۰۰) در مقیاس زمانی ۳ تا ۱۲ ماهه (الف - ۲۰ ساله ب - ۳۰ ساله)

Figure 4- Monthly SPEI index (2002-2022) on 3-12 month time scales (a: 20 years, b: 30 year)

جدول ۴- همبستگی و تطابق شاخص‌های SPI و SPEI ماهانه بر اساس داده‌ها در دوره‌های ۲۰ و ۳۰ ساله

Table 4 - Correlation and agreement between monthly SPI and SPEI indices based on 20- and 30-years data

Drought Index	SPI				SPEI			
Time Scale	3	6	9	12	3	6	9	12
Correlation Coefficient	0.991	0.996	0.997	0.997	0.988	0.990	0.990	0.986
Coefficient of Determination	0.982	0.991	0.994	0.993	0.975	0.980	0.979	0.973
Root Mean Square Error	0.138	0.109	0.162	0.223	0.194	0.187	0.218	0.256
Hanna and Heinold	0.145	0.119	0.183	0.262	0.198	0.201	0.245	0.293
Kappa	0.847	0.795	0.638	0.446	0.733	0.705	0.623	0.532
Cramer	0.88	0.77	0.68	0.64	0.73	0.69	0.64	0.66
Class Correlation Percentage	92.50	89.58	82.92	77.08	85.83	85.42	81.67	78.75

علت که عامل پدید آورنده خشکسالی برای مدت‌های طولانی بر آبخوان تأثیر گذاشته است. همچنین، چندضلعی‌هایی که در نقشه شدت خشکسالی دارای ارزش بیش‌تری نسبت به نقشه تداوم خشکسالی هستند نشان‌دهنده مناطقی می‌باشند که خشکسالی دارای شدت بیش‌تر و با تداوم کم‌تر است و گویای این موضوع است که پیرومتر در مدت‌زمان کوتاه، خشکسالی‌های با شدت بزرگ را تجربه کرده است و با وجود بزرگ بودن شدت قادر بوده است مجدداً به حالت تعادل بازگردد به این علت که عامل پدید آورنده خشکسالی برای مدت کوتاهی بر آبخوان تأثیر گذاشته است. طبقات خطر خشکسالی ۱ تا ۹ به ترتیب برابر ۱۶، ۱۸، ۱۰، ۱۰، ۱۲، ۲، ۵، ۱۳ و ۱۴ درصد از مساحت کل آبخوان ارومیه را پوشش می‌دهند.

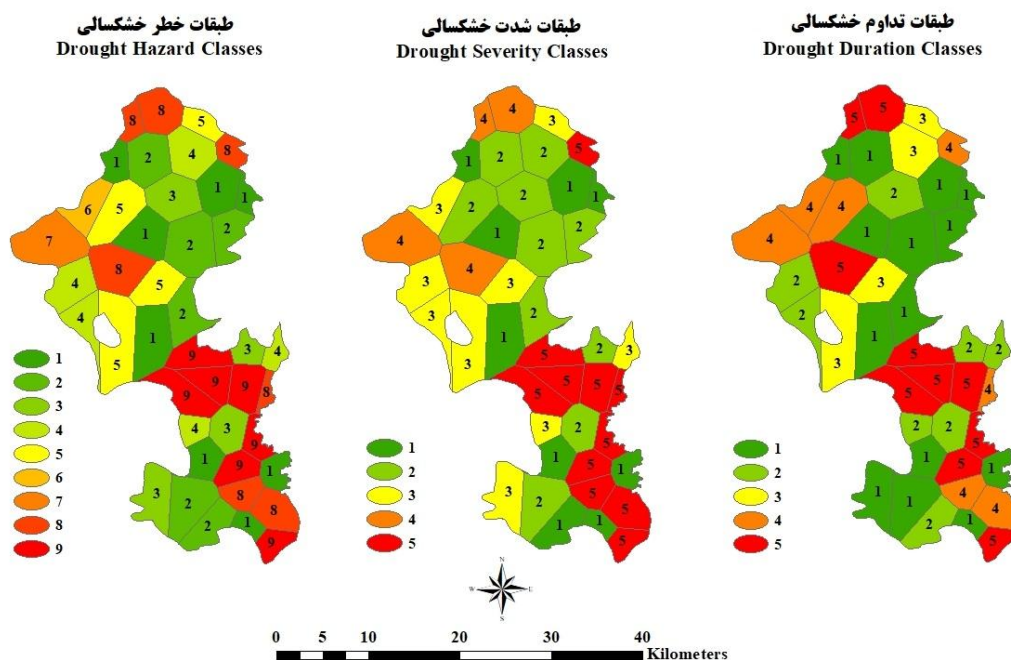
تحلیل مقادیر تداوم و شدت وقایع خشکسالی هیدرولوژیک در ۴۳ پیرومتر مورد مطالعه جدول ۵ نشان داد که پیرومتر بیلان با تداوم خشکسالی ۸۶ ماه (۷ سال) طولانی‌ترین خشکسالی و پیرومتر امام‌زاده با شدت خشکسالی ۹۰/۶ شدیدترین خشکسالی را نشان دادند.

پهنه‌بندی خطر خشکسالی آب زیرزمینی براساس تداوم و شدت خشکسالی با روش طبقه‌بندی جنکز در پنج طبقه انجام شد (شکل ۵). چندضلعی‌های تیسین با مقادیر بزرگ‌تر تداوم نسبت به شدت خشکسالی، نشان‌دهنده مناطقی است که خشکسالی دارای تداوم طولانی‌تری با شدت کم‌تر بوده است. در واقع پیرومتر مرتبط با آن چندضلعی با وجود شدت کم، برای مدت طولانی در وضعیت خشکسالی بوده و قادر به بازگشت به حالت تعادل نیست به این

جدول ۵- حداکثر تداوم و شدت خشکسالی مشاهده‌ای بر اساس شاخص SGI

Table 5- The maximum duration and intensity of drought events based on SGI index

Number	Name	Max Drought Duration (Month)	Max Drought Severity	Number	Name	Max Drought Duration (Month)	Max Drought Severity
1	Taze Kand-e Jenizeh	66	47.6	23	Shur Kand	37	45.3
2	Saatluy-e Beyglar	42	37.8	24	Danqaralu	23	21.1
3	Moqaddam	80	76.2	25	Jihad-e Keshavari	39	43.4
4	Birlan	86	82.2	26	Shirabad	31	30.9
5	Geoy Tape	84	78.4	27	Shah Mirza Kandi	21	20.5
6	Qaraguz-e Salimaqa	76	63.1	28	Taze Kand-e Ordushahi	18	15.8
7	Dulama	85	74.2	29	Yorqunabad	19	30.5
8	Tappeh Maki	20	19.4	30	Sopurghan	67	76.2
9	Owzarlu	42	28.3	31	Abdollah Kandi	41	36.7
10	Qeshlaq-e Shakur	22	26.4	32	Saatluy-e Baranduz	21	31
11	Karimabad	74	61.2	33	Bashlan Beshlu	72	61.2
12	Baran Duz	21	34.2	34	Jarchelu	18	24.3
13	Kelisa Kandi	85	79.6	35	Tala Tappeh	18	13.7
14	Emamzadeh	81	90.6	36	Owsalu	19	16.8
15	Arabluy-e Baran Duz	58	63.9	37	Darazam	26	39.9
16	Mirshekarlu	66	79.2	38	Tupraq Qaleh	18	15.6
17	Shams-e Hajjian	9	16.8	39	Qarah Aghaj	24	37
18	Taleb Abad	81	86	40	Yuvalar	27	45.3
19	Fuladlu	26	21	41	Kordlar	30	25.2
20	Igdir	62	75.7	42	Khaneqah Sorkh	20	19.5
21	Gaznaq	22	31.1	43	Valindeh	28	41.7
22	Owch Ovlar	26	25.2				

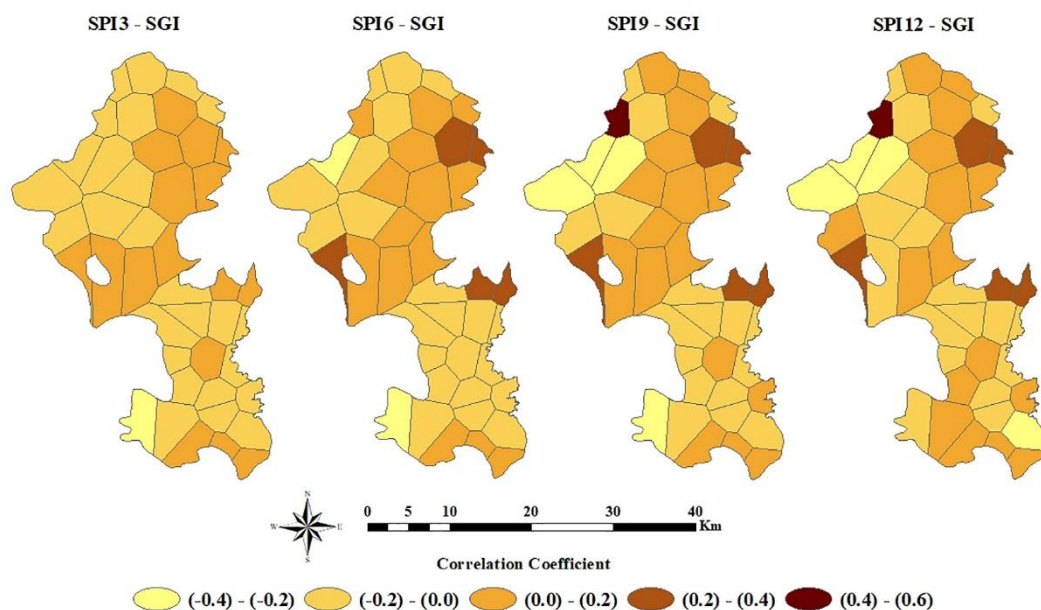


شکل ۵- پهنه‌بندی خطر خشکسالی هیدرولوژیک در آبخوان ارومیه بر اساس شاخص SGI

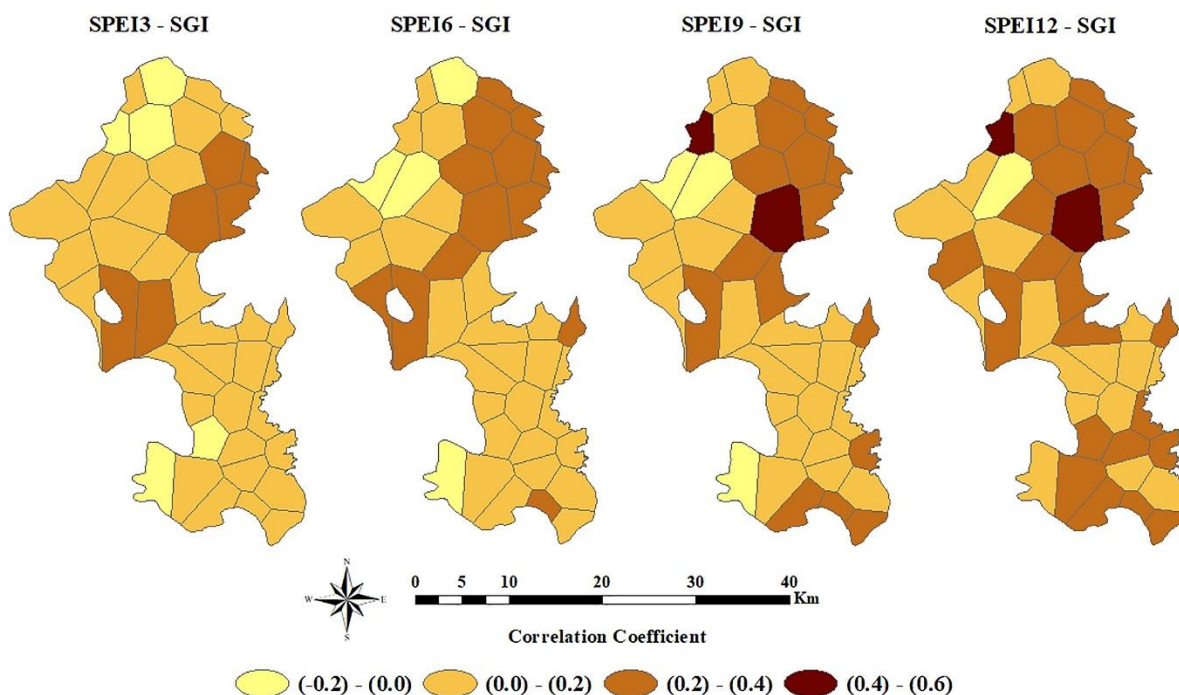
Figure 5- Hydrologic hazard map in Urmia aquifer based on SGI index

مقادیر ضریب همبستگی نیز افزایش می‌یابد. ضرایب همبستگی در هر مقیاس زمانی در شاخص SPEI در بیش‌تر پی‌زومترها مقادیر بزرگ‌تر و بالاتر از صفر دارند و در شاخص SPI این مقادیر کوچک‌تر بوده و نزدیک به صفر و یا کم‌تر از صفر است. این بدین معنی است که در بیش‌تر پی‌زومترها، شاخص SGI با شاخص SPI همبستگی ندارند. در هر یک از پی‌زومترها میزان همبستگی شاخص SGI با هر دو شاخص هواشناسی SPI و SPEI در مقیاس‌های زمانی مختلف، متغیر است، ولی می‌توان گفت میزان ضریب همبستگی، در مقیاس‌های زمانی ۹ و ۱۲ ماهه بیش‌تر می‌باشند.

ارزیابی میزان همبستگی شاخص‌های SPI و SPEI با شاخص SGI نشان داد که ضرایب پی‌رسون محاسبه شده SPI3-SGI بین ۰/۲۳- تا ۰/۱۷، SPI6-SGI بین ۰/۲۵- تا ۰/۳۱، SPI9-SGI بین ۰/۲۸- تا ۰/۴۴، SPI12-SGI بین ۰/۳۷- تا ۰/۵۷، SPEI3-SGI بین ۰/۱۲- تا ۰/۲۶، SPEI6-SGI بین ۰/۰۷- تا ۰/۳۴، SPEI12-SGI بین ۰/۱۱- تا ۰/۴۴ و SPEI12-SGI بین ۰/۱۱- تا ۰/۴۸ می‌باشد. با بررسی نقشه تغییرات مکانی ضرایب همبستگی به تفکیک برای دو شاخص SPI و SGI شکل ۶ و دو شاخص SPEI و SGI شکل ۷ در سطح آبخوان، مشاهده می‌شود که با افزایش مقیاس زمانی،



شکل ۶- تغییرات مکانی ضریب همبستگی پیرسون بین شاخص‌های SPI و SGI در آبخوان ارومیه
Figure 6- Spatial variability of Pearson correlation between SPI and SGI indices in Urmia aquifer



شکل ۷- تغییرات مکانی ضریب همبستگی پیرسون بین شاخص‌های SPEI و SGI در آبخوان ارومیه
Figure 7- Spatial variability of the Pearson correlation between SPEI and SGI indices in Urmia aquifer

خشکسالی هیدرولوژیک در هر یک از پیژومترها نشان می‌دهند. در مقیاس زمانی ۳ و ۶ ماهه مقادیر ضریب همبستگی در اکثریت پیژومترها معنادار نمی‌باشند. در مقیاس‌های زمانی ۹ و ۱۲ ماهه پیژومترهای ولینده و خانقاه سرخ، همبستگی بالاتری با شاخص SPI دارند. تعداد پیژومترهای که با شاخص SPEI

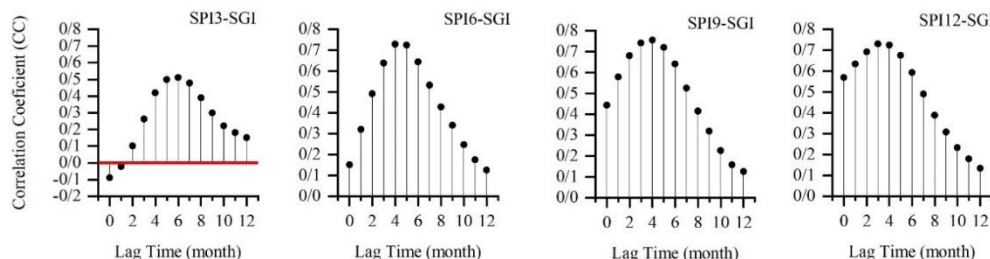
بالا تر بودن میزان ضریب همبستگی بین شاخص SGI و هر یک از شاخص‌های هواشناسی در مقیاس‌های بزرگ‌تر، بیانگر این موضوع است که تغییرات اقلیمی (کاهش باران و افزایش دما) که باعث وقوع خشکسالی هواشناسی می‌شوند، اثر خود را بعد از ۶ تا ۱۲ ماهه روی کاهش سطح آب ایستابی و وقوع

همبستگی بالاتری دارند به مراتب بیش‌تر از شاخص SPI است. در این خصوص، می‌توان پیرومترهای خانقاه سرخ، یورگون آباد، گزنق، اوصالو، تپه مهکی، پولادلو، شیر آباد و دانقرالو را نام برد. شاخص هیدرولوژیک SGI در پیرومتر خانقاه سرخ در مقیاس‌های زمانی ۹ و ۱۲ ماهه با شاخص‌های هواشناسی، بیش‌ترین همبستگی را نشان داد. به‌منظور درک بهتر میزان و زمان تأثیر خشکسالی هواشناسی در وقوع خشکسالی هیدرولوژیک، در پژوهش حاضر، فقط نتایج تحلیل همبستگی بین شاخص‌ها در این پیرومتر ارائه شده است (شکل‌های ۸ و ۹). در تأخیر زمانی صفر (بدون تأخیر)، میزان همبستگی بالایی به‌ویژه در مقیاس‌های زمانی ۳ و ۶ ماهه مشاهده نمی‌شود. در مقیاس‌های ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه با ایجاد تأخیر زمانی، ابتدا میزان همبستگی افزایش و سپس کاهش نشان داد. به‌طور متوسط، تأخیر زمانی ۳ تا ۵ ماهه موجب افزایش میزان همبستگی گردید. این موضوع نشان می‌دهد تأثیر شرایط اقلیمی روی آب زیرزمینی در پیرومتر خانقاه سرخ با تأخیر ۳ تا ۵ ماهه، اثر خود را نشان می‌دهد. افزایش میزان همبستگی تا $0.75/SPI$ در ۹ ماهه با تأخیر زمانی ۴ ماهه، نشان‌دهنده ارتباط قوی و مثبت خشکسالی‌های هواشناسی با شاخص SGI است. شاید بتوان این‌طور نتیجه گرفت که درصد قابل توجهی از خشکسالی آب زیرزمینی در خانقاه سرخ در اثر وقوع خشکسالی‌های هواشناسی گذشته و درصد کم‌تری مربوط به فعالیت‌های انسانی و اضافه برداشت آب از آبخوان باشد. ذکر این نکته ضروری است که تحلیل همبستگی بین شاخص‌ها بدون در نظر گرفتن اثر سایر عوامل مانند میزان برداشت آب چاه‌ها، کاربری اراضی، الگوی کشت و فعالیت‌های انسانی و غیره انجام شده است که این موضوع بهتر است در پژوهش‌های آینده در این آبخوان به‌طور دقیق‌تر مورد بررسی قرار گیرد.

در مطالعه‌ای Sadeghfam et al. (2022) با مقایسه دوره بازگشت خشکسالی هواشناسی و خشکسالی آب زیرزمینی در آبخوان‌های حوضه دریاچه ارومیه شدت تأثیر فعالیت‌های انسانی در خشکسالی آب زیرزمینی را در آبخوان‌های حوضه دریاچه ارومیه نشان دادند. Abhishek et al. (2021) نیز برای همبستگی شاخص خشکسالی آب زیرزمینی و شاخص‌های اقلیمی مقیاس‌های زمانی ۱۲، ۱۸ و ۲۴ ماه را معرفی کردند. نتایج پژوهش (Soleimani et al., 2014; Chamanpira et al., 2017) نیز همبستگی شاخص SPI و خشکسالی آب

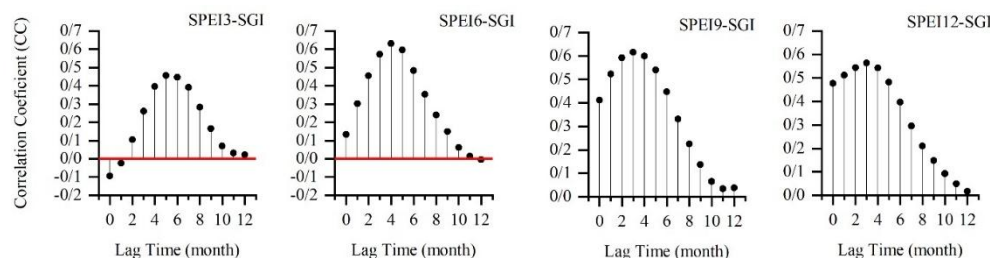
زیرزمینی را در مقیاس زمانی ۲۴ ماه نشان داد. در صورتی که داده‌های ماهانه تراز آب در دوره آماری طولانی‌تر در سطح آبخوان وجود داشت (بیش‌تر از ۲۰ سال)، میزان همبستگی بین شاخص‌ها در مقیاس‌های بلندمدت ۱۸ و ۲۴ ماهه نیز قابل محاسبه بود. لذا تحلیل‌ها مطابق جدول ۴ در مقیاس‌های ۳ تا ۱۲ ماه انجام شد. با توجه به اینکه منابع آب زیرزمینی تحت تأثیر معیارها و عوامل مختلفی شامل معیارهای توپوگرافی، هیدرولوژی، زمین‌شناسی، اقتصادی-اجتماعی، پوشش گیاهی و برداشت از طریق چاه‌های بهره‌برداری هستند؛ ولی میزان تأثیر در مناطق مختلف متفاوت است؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که خشکسالی در پیرومترها که همبستگی بالایی با شاخص‌های خشکسالی اقلیمی دارند ناشی از شرایط اقلیمی هست و در پیرومترهایی که میزان همبستگی کمی با شاخص‌های هواشناسی دارند ناشی از عواملی غیر از شرایط اقلیمی هست که با توجه به توپوگرافی و زمین‌شناسی تقریباً یکنواخت در منطقه مورد مطالعه میزان برداشت از منابع آب زیرزمینی به‌دست بشر و بر اثر مسائل اقتصادی و اجتماعی مهم‌ترین عامل خشکسالی در مناطقی است که پیرومترها با شاخص‌های هواشناسی همبستگی ندارند که با نتایج پژوهش Sadeghfam et al. (2022) همخوانی دارد.

مشابه با پژوهش حاضر، Tavusi et al. (2012) پهنه‌بندی شدت خشکسالی بر اساس بارش و تبخیر و تعرق در ایران را ارائه کردند. بعلاوه، Sharafi et al. (2020) نقشه خطر خشکسالی منابع آب سطحی را ارائه کردند. همان‌طور که ذکر شد، پهنه‌بندی خطر خشکسالی آب زیرزمینی برای آبخوان ارومیه از نظر شدت، تداوم و شدت-تداوم برای اولین بار ارائه شده است. اگرچه در مطالعات دیگری نقشه خشکسالی آب زیرزمینی با استفاده از سایر روش‌ها ارائه شده است. همچون Nakhaei et al. (2023) که در آبخوان هشتگرد استان البرز با درونیابی شاخص SGI در ۲۱ پیرومتر، نقشه تغییرات مکانی-زمانی خشکسالی آب زیرزمینی را ارائه کردند. بر اساس نقشه تغییرات مکانی، طبقات خطر ۹ و ۸ به‌ترتیب ۱۴ و ۱۳ درصد از کل آبخوان را تشکیل می‌دهند که به‌عنوان مناطق بحرانی و آسیب‌پذیر از نظر خشکسالی آب زیرزمینی محسوب می‌شوند لذا ضروری است که برنامه‌های مدیریتی از جمله نظارت دقیق بر میزان بهره‌برداری از آب زیرزمینی و اجرای برنامه‌های تغذیه مصنوعی، در پهنه‌های مربوطه اعمال گردد.



شکل ۸ - همبستگی شاخص‌های SPI و SGI با تأخیر زمانی ۰ تا ۱۲ ماهه در پیزومتر خانقاه سرخ

Figure 8 - Correlation between SPI and SGI indices with 0-12 lag times at Khangah Sorkh piezometer



شکل ۹ - همبستگی شاخص‌های SPEI و SGI با تأخیر زمانی ۰ تا ۱۲ ماهه در پیزومتر خانقاه سرخ

Figure 9 - Correlation between SPEI and SGI indices with 0-12 lag times at Khangah Sorkh piezometer

۴

داشت بعد از گذشت ۳ تا ۵ ماه اثرات خود را به صورت خشکسالی هیدرولوژیک و کاهش سطح ایستابی در پیزومترها نشان دهد؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که خشکسالی در پیزومترهایی که همبستگی بالایی با شاخص‌های خشکسالی هواشناسی دارند ناشی از کاهش مقادیر بارش یا افزایش دما است. در پیزومترهایی با همبستگی پایین با شاخص‌های هواشناسی می‌توان این طور نتیجه‌گیری گرفت با توجه به توپوگرافی و زمین‌شناسی تقریباً یکنواخت منطقه مورد مطالعه، میزان برداشت از منابع آب زیرزمینی و مسائل اقتصادی و اجتماعی، مهم‌ترین عامل وقوع خشکسالی هیدرولوژیک در این پیزومترها می‌باشد به عبارت دیگر نقش عوامل اقلیمی در وقوع خشکسالی هیدرولوژیک در سطح آبخوان به صورت یکسان مشاهده نمی‌شود و عوامل انسانی باعث کاهش شدید سطح ایستابی شده است. نقشه پهنه‌بندی میزان همبستگی بین شاخص SGI با شاخص‌های SPI و SPEI می‌تواند راهنمای مفیدی در مدیریت برداشت از منابع آب زیرزمینی باشد.

تقسیم‌بندی سطح آبخوان به چندضلعی‌های تیسین بر اساس موقعیت پیزومتر و تخصیص رتبه خطر خشکسالی به هر یک از سطوح تأثیر بر اساس ماتریس درجه‌بندی خطر خشکسالی، منجر به تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر خشکسالی آب زیرزمینی در این پژوهش شد. محدوده آبخوان به چندضلعی‌هایی با درجه خطر خشکسالی ۱ تا ۵ بر اساس رتبه‌بندی شدت و تداوم خشکسالی کلاسه‌بندی شد. این نقشه در انتخاب روش‌های مناسب برای حفظ تعادل تراز آب زیرزمینی، بسیار مفید است. درجه‌بندی خطر خشکسالی هیدرولوژیک از نظر شدت و تداوم (درجه‌بندی ترکیبی) نتایج نشان داد که طبقات خطر ۹ و ۸ در

- نتیجه‌گیری

تحلیل همبستگی و درجه تطابق بین شاخص‌های هواشناسی خشکسالی (SPI و SPEI) بر اساس داده‌های ماهانه ۲۰ ساله با سری زمانی شاخص خشکسالی به دست آمده با داده‌های ماهانه ۳۰ ساله نشان داد شاخص‌های به دست آمده از دوره ۲۰ ساله و ۳۰ ساله (دوره مرجع) در مقیاس‌های زمانی ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه بسیار مشابهت داشته و درجه همبستگی بالایی در ایستگاه هواشناسی ارومیه دارند. لذا ارتباط بین خشکسالی هیدرولوژیک SGI بر اساس داده‌های تراز سطح آب زیرزمینی در طول دوره آماری ۲۰ ساله (۱۳۸۱-۱۴۰۰) به دلیل نبود آمار بیش‌تر، با شاخص‌های خشکسالی هواشناسی دوره آماری مشابه، مورد بررسی قرار گرفت. همچنین، مقادیر ضرایب همبستگی و درجه تطابق بین شاخص‌های SPI و SPEI با شاخص هیدرولوژیک SGI با تأخیرهای زمانی و بدون تأخیر، مورد ارزیابی قرار گرفت.

نقشه تغییرات مکانی ضریب همبستگی در سطح آبخوان ارومیه، می‌تواند اطلاعات مفیدی را برای وضع سیاست‌های لازم، تعیین میزان پمپاژ آب در شرایط خشکسالی هواشناسی و مدیریت مؤثر منابع آب زیرزمینی فراهم سازد. نتایج پژوهش نشان داد پدیده خشکسالی آب زیرزمینی با کاهش مقادیر بارش و تبخیر و ترق سطح آبخوان در ارتباط بوده و بیش‌ترین میزان همبستگی در ۴۳ پیزومتر مورد مطالعه در مقیاس‌های زمانی ۹ و ۱۲ ماهه و در بخش شمال غرب آبخوان مشاهده گردید. در نظر گرفتن تأخیر زمانی ۳ تا ۵ ماه، میزان همبستگی شاخص‌های هواشناسی با شاخص هیدرولوژیک را افزایش می‌دهد. این بدان معنی است اگر خشکسالی هواشناسی رخ دهد، می‌توان انتظار

مناطق جنوبی آبخوان مشاهده می شود که به ترتیب برابر ۱۴ و ۱۳ درصد از سطح آن را شامل می شوند. برنامه های مدیریتی در این مناطق شامل نظارت بر فعالیت های انسانی شامل حفر چاه، نظارت بر برداشت آب، تغییر الگوی کشت و پروژه های تغذیه مصنوعی باید به عنوان اولویت اول توسط برنامه ریزان و مدیران در ستاد احیاء دریاچه ارومیه و سازمان آب منطقه ای در نظر گرفته شود.

سپاسگزاری

صمیمانه از دانشگاه ارومیه به خاطر حمایت از این پروژه دکتری و از سازمان آب منطقه ای استان آذربایجان غربی جهت دسترسی به داده های آب های زیرزمینی تشکر می کنیم.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می دارند که هیچ گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

دسترسی به داده ها

نویسندگان این مقاله هیچگونه تضاد منافی در رابطه با تألیف یا انتشار این مقاله اعلام نکردند.

مشارکت نویسندگان

سمانه دادآفرید: آماده سازی داده ها، محاسبات، تهیه پیش نویس؛ **مهدی عرفانیان:** نظارت پژوهش، روش شناسی، ویرایش مقاله؛ **بهزاد حصاری:** ویرایش پیش نویس، بحث؛ **خدیجه جوان:** ویرایش پیش نویس، تحلیل خشکسالی، بحث.

منابع

- امیری، وهاب (۱۳۹۹). بررسی پتانسیل نفوذ شورابه به منابع آب زیرزمینی با استفاده از مدل سازی عددی مطالعه موردی: آبخوان ساحلی ارومیه. *مخاطرات محیط طبیعی*، ۲۶، ۱۶۱-۱۸۴.
doi:10.22111/jneh.2020.32772.1601
Abramopoulos, F., Rosenzweig, C., & Choudhury, B. (1988). Improved ground hydrology calculations for global climate models (GCMs): Soil water movement and evapotranspiration. *Journal of Climate*, 921-941. doi:10.1175/1520-0442(1988)001%3C0921:IGHCFG%3E2.0.CO;2
Abu Arra, A., & Şişman, E. (2024). Innovative Drought Classification Matrix and Acceptable Time Period for Temporal Drought Evaluation. *Water Resources Management*, 1-23. doi:10.1007/s11269-024-03793-0
Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines

بذرافشان، جواد (۱۳۸۱). مطالعه تطبیقی برخی شاخص های خشکسالی هواشناسی در چند نمونه اقلیمی ایران، پایان نامه کارشناسی ارشد هواشناسی کشاورزی، دانشگاه تهران، کرج.

زاهدی، مجید، و قویدل رحیمی، یوسف (۱۳۸۶). تعیین آستانه خشکسالی و محاسبه میزان بارش قابل اعتماد ایستگاه های حوضه آبریز دریاچه ارومیه. *پژوهش های جغرافیایی*، ۵۹، ۲۱-۳۴.

شکوهی، علیرضا و مروتی، رضا (۱۳۹۳). ارزیابی عملکرد شاخص های شناسایی خشکسالی و بارش استاندارد از وضعیت خشکسالی حوضه دریاچه ارومیه. *مهندسی و مدیریت آبخیز*، ۶(۳)، ۲۳۲-۲۴۶. doi:10.22092/ijwmse.2014.101628

طاوسی، تقی، منصوری دانشور، محمدرضا و موقری، علیرضا (۱۳۹۱). پهنه بندی شدت خشکی در ایران با استفاده از مدل تخریب و ترقق هارگریوز-سامانی بر مبنای توپوگرافی رقومی DEM. *جغرافیا و پایداری محیط (پژوهش نامه جغرافیایی)*، ۳(۳)، ۹۵-۱۱۰.

عبداللهی اسدآبادی، سجاد، آخوندعلی، علی محمد و میرعباسی نجف آبادی، رسول (۱۳۹۷). مدل سازی احتمالاتی و داده مبنای بارش-رواناب با بهره گیری از توابع چند متغیره مفصل. *هفدهمین کنفرانس هیدرولیک، دانشگاه شهرکرد، ایران*.

فتوحی، صمد، مصباح، سیدحمید، و صدری، سعیده (۱۳۹۳). شناسایی و تحلیل ماتریس ریسک خشک شدن تالاب مهارلو و پیامدهای آن بر محیط. *اکوبیولوژی تالاب (تالاب)*، ۶(۲۰)، ۵۴-۴۳.

محسنی ساروی، محسن، صفدری، علی اکبر، تقیان، بهرام، و مهدوی، محمد (۱۳۸۳). تحلیل شدت، مدت، فراوانی و گستره خشکسالی های حوزه کارون به کمک شاخص بارش استاندارد (SPI). *منابع طبیعی ایران*، ۵۷(۴)، ۶۰۷-۶۲۰.

نخعی، محمد، محبی تفرشی، امین و سعدی، توفیق (۱۴۰۲). ارزیابی و پهنه بندی مکانی-زمانی خطر خشکسالی آب های زیرزمینی در آبخوان هشتگرد توسط شاخص منبع آب زیرزمینی. *زمین شناسی مهندسی*، ۱۷(۲)، ۴۴۴-۴۶۴.

doi:10.22034/JEG.2023.17.4.1019771

References

- Abdollahi Asadabadi, S., Akhondali, A.M., & Mirabbasi Najafabadi, R. (2017). Probabilistic and data-based modeling of rainfall-runoff using detailed multivariate functions. *The 17th Iranian Hydraulic Conference*, Shahrekord, Iran. [In Persian]
Abhishek, A., Kinouchi, T., & Sayama, T. (2021). A comprehensive assessment of water storage dynamics and hydroclimatic extremes in the Chao Phraya River Basin during 2002–2020. *Journal of Hydrology*, 603, 126868. doi:10.1016/j.jhydrol.2021.126868

- for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage, *FAO Paper 56*, 300(9), D05109.
- Amiri, V. (2019). Investigation of the saltwater intrusion potential into groundwater resources using numerical modeling (case study: Urmia coastal aquifer). *Journal of Natural Environment Hazards*, 26), 161-184. doi:10.22111/jneh.2020.32772.1601 [In Persian]
- Bazrafshan, J. (2015). Comparative study of some meteorological drought indicators in some climatic samples of Iran. Master's thesis in Agricultural Meteorology, University of Tehran, Karaj. [In Persian]
- Bazrafshan, O., Parandin, F., & Farokhzadeh, B. (2016). Assessment of hydro-meteorological drought effects on groundwater resources in Hormozgan region-South of Iran. *Ecopersia*, 4(4), 1569-1584. doi:10.1001.1.23222700.2016.4.4.2.9
- Bhuiyan, C. (2004). Various drought indices for monitoring drought condition in Aravalli terrain of India, *Proceedings of the XXth ISPRS Congress*, Istanbul, Turkey, pp. 12-23
- Bloomfield, J., Marchant, B. (2013). Analysis of groundwater drought building on the standardized precipitation index approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(12), 4769-4787. doi:10.5194/hess-17-4769-2013
- Burman, R., & Pochop, L. (1994). Evaporation, evapotranspiration, and climatic data. Amsterdam, Elsevier, 278 pages.
- Chamanpira, G., Zehtabian, G., Ahmadi, H., & Malekian, A. (2014). Effect of drought on groundwater resources in order to optimize utilization management, case study: Plain Alashtar. *Watershed Engineering and Management*, 6(1), 10-20. doi:10.22092/ijwmse.2014.101733 [In Persian]
- Cohen, J. (1960). A coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and psychological measurement*, 20(1), 37-46. doi:10.1177/001316446002000104
- Cramér, H. (1999). *Mathematical methods of statistics*. Princeton University Press, 575 pages.
- FID. (2011). Risk Management in DFID. (Online PDF), 1-16, Retrieved from <https://assets.publishing.service.gov.uk/>
- Fotouhi, S., Mesbah, S.H., & Sadri, S. (2014). Identifying and analyzing drying risk matrix of Maharlou wetland and its outcomes in the environment. *Journal of Wetland Ecobiology*, 20, 43-54. [In Persian]
- Guo, M., Yue, W., Wang, T., Zheng, N., & Wu, L. (2021). Assessing the use of standardized groundwater index for quantifying groundwater drought over the conterminous US. *Journal of Hydrology*, 598, 126227. doi:10.1016/j.jhydrol.2021.126227
- Hampel, F.R. (1974). The influence curve and its role in robust estimation. *Journal of the American Statistical Association*, 69(346), 383-393. doi:10.1080/01621459.1974.10482962
- Hanna, S.R., & Heinold, D.W. (1985). Development and application of a simple method for evaluating air quality models. American Petroleum Institute.
- Hargreaves, G.H., & Samani, Z.A. (1982). Estimating potential evapotranspiration. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, 108(3), 225-230. doi:10.1061/JRCEA4.0001390
- Hellwig, J., De Graaf, I.E.M., Weiler, M., & Stahl, K. (2020). Large-scale assessment of delayed groundwater responses to drought. *Water Resources Research*, 56(2), e2019WR025441. doi:10.1029/2019WR025441
- Hollinger, S., Isard, S., Welford, M. (1993). A new soil moisture drought index for predicting crop yields. *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*. USA, Anaheim, CA, Pp. 187-190.
- Javadzadeh, H., Ataie-Ashtiani, B., Hosseini, S.M., & Simmons, C.T. (2020). Interaction of lake-groundwater levels using cross-correlation analysis: A case study of Lake Urmia Basin, Iran. *Science of The Total Environment*, 729, 138822. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.138822
- Leelaruban, N., Padmanabhan, G., & Oduor, P. (2017). Examining the relationship between drought indices and groundwater levels. *Water*, 9(2), 82. doi:10.3390/w9020082
- Li, B., & Rodell, M. (2015). Evaluation of a model-based groundwater drought indicator in the conterminous US. *Journal of Hydrology*, 526, 78-88. doi:10.1016/j.jhydrol.2014.09.027
- 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*. USA, Anaheim, CA, Pp. 179-183.
- Mendicino, G., Senatore, A., & Versace, P. (2008). A Groundwater Resource Index (GRI) for drought monitoring and forecasting in a Mediterranean climate. *Journal of Hydrology*, 357(3-4), 282-302. doi:10.1016/j.jhydrol.2008.05.005
- Mohseni Saravi, M., Safdari, A., Saqhafian, B., & Mahdavi, M. (2005). Severity, Frequency, Duration and Area Analysis of Karoon Basin Droughts Using the Standardized Precipitation Index (SPI). *Iranian Journal of Natural Resources*, 57(4), 607-620. [In Persian]
- Nakhaei, M., Mohebbi Tafreshi, A., & Saadi, T. (2023). Assessment and spatio-temporal zoning of groundwater drought risk in

- Hashtgerd aquifer by groundwater resource index. *Journal of Engineering Geology*, 17(4), 444-464.
doi:10.22034/JEG.2023.17.4.1019771 [In Persian]
- Nalbantis, I., & Tsakiris, G. (2009). Assessment of hydrological drought revisited. *Water Resources Management*, 23(5), 881-897. doi:10.1007/s11269-008-9305-1
- Palmer, W.C. (1965). Meteorological drought. Department of Commerce, Weather Bureau. 45, 1-58.
- Pearson, K. (1907). Mathematical Contribution to the theory of Evolution. A first study of the statistics of pulmonary tuberculosis. *Biometrika*, 5(4), 478-478. doi:10.2307/2331696
- Sadeghfam, S., Mirahmadi, R., Khatibi, R., Mirabbasi, R., & Nadiri, A.A. (2022). Investigating meteorological groundwater droughts by copula to study anthropogenic impacts. *Scientific Reports*. 12(1), 8285. doi:10.1038/s41598-022-11768-7
- Sharafi, L., Zarafshani, K., Keshavarz, M., Azadi, H., & Van Passel, S. (2020). Drought risk assessment: Towards drought early warning system and sustainable environment in western Iran. *Ecological Indicators*, 114, 106276. doi:10.1016/j.ecolind.2020.106276
- Shokoohi, A., & Morovati, R. (2014). An investigation on the Urmia Lake Basin drought using RDI and SPI indices. *Watershed Engineering and Management*. 6(3) 232-246. doi:10.22092/ijwmse.2014.101628 [In Persian]
- Soleimani Motlagh, M., Ghasemieh, H., Talebi, A., & Abdollahi, K. (2017). Identification and analysis of drought propagation of groundwater during past and future periods. *Water Resources Management*, 31, 109-125. doi:10.1007/s11269-016-1513-5
- Song, G.Y., Hu, H.H., & Yang, M.S. (2023). Practice a reflection on extreme drought prevention in Chongqing in 2022. *Express Water Resources & Hydropower Information*, 44, 8-13. doi:10.15974/j.cnki.slsdkb.2023.04.001
- Svoboda, M., Hayes, M., & Wood, D. (2012). Standardized Precipitation Index: User guide. Geneva, Switzerland.
- Tavoosi, T., Mansuri Daneshvar, M.R., & Movaqqari, A. (2012). The zonation of aridity intensity in Iran using Hargreaves-Samani evapotranspiration model based on digital elevation model (DEM). *Geography and Environmental Sustainability*, 2(4), 95-110. [In Persian]
- Van Lanen, H.A., & Peters, E. (2000). Definition, effects and assessment of groundwater droughts. Pp. 49-61, In: *Drought and drought mitigation in Europe*. Springer- Netherlands. doi:10.1007/978-94-015-9472-1_4
- 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. doi:10.1175/2009JCLI2909.1
- WMO, (2008). Manual on Low-Flow Estimation and Prediction. World Meteorological Organization. Geneva, Switzerland.
- WMO, (2012). Climate and meteorological information requirements for water management. World Meteorological Organization. Geneva, Switzerland.
- Wright, S. (1921). Correlation and causation. *Journal of Agricultural Research*, 20(7), 557-585.
- Yeh, H.F., & Chang, C.F. (2019). Using standardized groundwater index and standardized precipitation index to assess drought characteristics of the Kaoping River Basin, Taiwan. *Water Resources*, 46(5), 670-678. doi:10.1134/S0097807819050105
- Zahedi, M., & Ghavidel Rahimi, Y. (2016). The Determination of drought threshold and computations of dependable rainfall rate for stations of Urmia Lake drainage basin. *Geographical Research Quarterly*. 39(7):21-34. [In Persian]
- Zarei, A.R., Moghimi, M.M. & Bahrami, M. (2019). Comparison of reconnaissance drought index (RDI) and effective reconnaissance drought index (eRDI) to evaluate drought severity. *Sustainable Water Resources Management*, 5, 1345-1356. doi:10.1007/s40899-019-00310-9