

Meteorological drought monitoring based on SPI and mRAI indices in the Urmia Lake Basin

Sepideh Hadipour ¹, Mahdi Erfanian ^{2*}, Sima Kazempour Choursi ³

¹ M.Sc., Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran

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

³ Ph.D., Department of Watershed Management, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran

Extended Abstract

Introduction

Drought, a pervasive meteorological phenomenon, is driven by insufficient precipitation and linked to climatic factors. Its escalating frequency challenges natural resource management, water security, and mitigation efforts. This complex hazard is categorized into four types: meteorological, agricultural, hydrological, and socio-economic. Accurate drought monitoring relies on robust indicators, such as the Standardized Precipitation Index (SPI) and the modified Rainfall Anomaly Index (mRAI), both of which are precipitation-dependent. Acquiring reliable, spatially representative rainfall series remains a global challenge. The Global Precipitation Climatology Centre (GPCC) global dataset provides a crucial, quality-controlled, rain-gauge-based resource that addresses this data scarcity. Given Iran's limited and unevenly distributed rain gauge stations, global datasets like GPCC are indispensable. Previous research has confirmed the efficacy of the GPCC data in conjunction with the SPI and mRAI indices for comprehensive spatial and temporal drought analysis. Building on this, this research generates high-resolution drought severity maps for the Urmia Lake basin across multiple timescales using GPCC monthly precipitation data and both SPI and mRAI indices. This provides an essential tool for proactive drought monitoring in this ecologically sensitive, water-stressed region. The Urmia Lake basin, a vital ecological and economic area, has faced severe and prolonged drought, resulting in a dramatic decline in lake levels, increased dust storms, and significant socio-economic challenges. The urgent need for accurate and timely drought monitoring is thus highlighted. Effective monitoring is essential for developing sustainable water management strategies and mitigating adverse impacts on this vulnerable ecosystem. This research directly addresses this critical need by providing a substantive approach for informed management.

Materials and Methods

Drought analysis for the Urmia Lake Basin utilized monthly precipitation data from synoptic stations and the global GPCC dataset. The accuracy of GPCC data in estimating monthly precipitation at the studied synoptic stations was rigorously evaluated using R^2 , RMSE, MAE, and PBIAS over the 1991–2020 period. Subsequently, raster maps of monthly precipitation for the Urmia Lake Basin were prepared using GPCC data for the same period. Drought severity maps of the Urmia Lake basin were then produced based on SPI and mRAI indices at 1-, 3-, 6-, 9-, and 12-month timescales, using GPCC precipitation data from 1991 to 2020. A comparative analysis identified critically vulnerable areas across drought severity classes (weak, moderate, severe, and very severe). Furthermore, the agreement between SPI and mRAI severity classes at different timescales was quantitatively assessed using the Kappa statistic and Cramer's V coefficient.

Results and Discussion

Evaluation results conclusively demonstrated the acceptable accuracy of GPCC data in estimating monthly precipitation at all studied synoptic stations ($R^2 = 0.91$, RMSE = 10.83). Analysis of the 30 years revealed consistently the highest average monthly rainfall in the western, southwestern, and southern regions of the basin across all investigated timescales. A direct comparison of drought index values at the Urmia and Tabriz stations revealed strong concordance between the SPI and mRAI indices at timescales of 3, 6, 9, and 12 months. Quantitatively, Kappa and Cramer's V coefficient values at these timescales across all stations were notably high: 0.851 and 0.837 (3 months), 0.863 and 0.847 (6 months), 0.867 and 0.850 (9 months), and 0.929 and 0.912 (12 months), respectively. These robust statistical measures confirm a significant relationship between the SPI and mRAI drought indices for assessing drought conditions at both individual and collective stations across varying timescales. Importantly, SPI-3 and mRAI-3 indices identified moderate drought affecting most areas of the Urmia Lake Basin in October 1995, 2001, and 2002; from October to December 2010; and in October and November

2019. Furthermore, based on SPI-6 and mRAI6 indices, the entire Urmia Lake basin experienced mild to severe drought, with extreme drought in localized regions, from October to November of the mentioned years (excluding December 2002).

Conclusion

The accuracy of GPCC data for monthly precipitation estimation at Urmia Lake Basin synoptic stations is confirmed. This validates GPCC as a foundational dataset for calculating SPI and mRAI drought indices at 3-, 6-, 9-, and 12-month timescales, enabling detailed delineation of drought severity zones across the basin (1991–2020). A critical finding is the consistent strong agreement between SPI and mRAI indices across different timescales, demonstrated by index value comparisons. High Kappa and Cramer's V coefficients further substantiate this correlation in drought class identification. Essentially, the spatial distribution of drought severity, as measured by both SPI and mRAI (at 3, 6, 9, and 12-month timescales), shows a compelling agreement throughout the 1991–2020 period. Despite the utility of the GPCC data, potential estimation errors from synoptic stations necessitate rigorous calibration using advanced methods, such as linear and quantile regression. Given GPCC's 0.25-degree spatial resolution, future research should downscale this dataset, e.g., via geographically weighted regression, to identify finer-resolution drought zones, which is crucial for localized water resource management in the Urmia Lake basin.

Keywords: Global Gridded Precipitation, Rainfall Anomaly, Spatial Drought Analysis, Urmia

Article Type: Research Article

Acknowledgement

The authors sincerely thank the Iran Meteorological Organization (IRIMO) for providing the monthly precipitation data. Additionally, we would like to extend our profound gratitude to the anonymous reviewers and the editor.

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

Sepideh Hadipour: Data preparation, analysis, computations, and writing the original draft; **Mahdi Erfanian:** Supervise, conceptualize, discuss, and edit the final manuscript; **Sima Kazempour Choursi:** Drought analysis, visualization, coding, and editing of the manuscript.

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

Citation: Hadipour, S., Erfanian, M., and Kazempour Choursi, S. (2025) Meteorological drought monitoring based on SPI and mRAI indices in the Urmia Lake basin. *Water and Soil Management and Modelling*, 5(3), 351-373.

doi: 10.22098/mmws.2025.17802.1625

Received: 11 July 2025, Received in revised form: 28 July 2025, Accepted: 03 August 2025, Published online: 23 September 2025.

Water and Soil Management and Modeling, Year 2025, Vol. 5, No. 3, pp. 351-373.

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





پایش خشک سالی هواشناسی بر اساس شاخص های SPI و mRAI در حوضه آبریز دریاچه ارومیه

سپیده هادی پور^۱، مهدی عرفانیان^{۲*}، سیما کاظم پور چورسی^۳

^۱ دانش آموخته ارشد، گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

^{۲*} دانشیار، گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

^۳ دانش آموخته دکتری، گروه آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

چکیده

خشک سالی، پدیده ای طبیعی است که به طور مکرر رخ می دهد و تأثیرات قابل توجهی بر کشاورزی، فعالیت های اجتماعی-اقتصادی و اکوسیستم طبیعی به ویژه در مناطق حساس از نظر بوم شناختی دارد. این مطالعه با هدف ارزیابی و پایش خشک سالی هواشناسی حوضه آبریز دریاچه ارومیه با استفاده از شاخص استاندارد شده بارش (SPI) و شاخص آنومالی بارش اصلاح شده (mRAI) در مقیاس های زمانی ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه طی دوره آماری ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۰ انجام شد. برای محاسبه این شاخص ها، از داده های جهانی بارش ماهانه GPCC با قدرت تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه به عنوان پایگاه شبکه ای جهانی در غلبه بر محدودیت تعداد پایین و پراکنش نامناسب ایستگاه های باران سنجی در منطقه، استفاده شد. صحت داده های GPCC در تخمین بارش ماهانه ایستگاه های سینوپتیک مورد مطالعه با استفاده از معیارهای آماری R^2 ، RMSE، MAE و PBIAS ارزیابی شد. نتایج ارزیابی با R^2 برابر ۰/۹۱ و RMSE برابر ۱۰/۸۳، دقت قابل قبول پایگاه بارش GPCC را نشان داد. برای مقایسه طبقات شدت خشک سالی به دست آمده از دو شاخص SPI و mRAI در مقیاس های زمانی مختلف، از آماره کاپا (Kappa) و ضریب Cramer's V بهره گرفته شد. مقادیر آماره کاپا و ضریب Cramer's V برای مقیاس های زمانی مختلف در ایستگاه ها به ترتیب ۰/۸۵۱ و ۰/۸۳۷ (۳ ماهه)، ۰/۸۶۳ و ۰/۸۴۷ (۶ ماهه)، ۰/۸۶۷ و ۰/۸۵۰ (۹ ماهه)، و ۰/۹۲۹ و ۰/۹۱۲ (۱۲ ماهه) به دست آمد. نتایج به وضوح نشان داد که تطابق آماری بین طبقات شدت خشک سالی شاخص های SPI و mRAI در مقیاس های زمانی ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه وجود دارد. این آماره ها (در سطح ۱ درصد)، وجود یک رابطه معنی دار را بین شاخص های خشک سالی SPI و mRAI و در ارزیابی شرایط خشک سالی در مقیاس ایستگاه های سینوپتیک و کل حوضه بیان می کنند. یافته های پژوهش بر کاربرد موثر داده های GPCC و همخوانی دو شاخص در پایش خشک سالی هواشناسی حوضه آبریز دریاچه ارومیه تأکید دارد و استفاده از داده های این پایگاه بارش در پژوهش های مدیریت منابع آب و هیدرولوژی حوضه توصیه می شود.

واژه های کلیدی: ارومیه، بارش شبکه ای جهانی، تحلیل مکانی خشک سالی، ناهنجاری بارش

نوع مقاله: پژوهشی

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

استناد: هادی پور، س.، عرفانیان، م. و کاظم پور چورسی، س. (۱۴۰۴) پایش خشک سالی هواشناسی بر اساس شاخص های SPI و mRAI در حوضه آبریز دریاچه ارومیه. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۳)، ۳۷۳-۳۵۱.

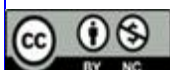
doi: 10.22098/mmws.2025.17802.1625

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۲۰، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۰۶، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۲، تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۷/۰۱

مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۴، دوره ۵، شماره ۳، صفحه ۳۵۱ تا ۳۷۳.

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



شد که ارتباط بین SPI و RAI قوی‌تر و معنی‌دارتر از ارتباط SPI با سایر شاخص‌هاست. در یک پژوهش قابل‌توجه اخیر، خشکسالی حوضه آبریز دریاچه ارومیه بر اساس شاخص SPI و شاخص mRAI در مقیاس سه ماهه در دوره آماری ۱۹ ساله ۲۰۰۱-۲۰۱۹ بررسی شده است. پس از کالیبراسیون (تصحیح) داده‌های ماهانه بارش ماهواره TRMM و ریزمقیاس‌سازی مکانی با روش رگرسیون وزنی جغرافیایی، شاخص‌های خشکسالی استخراج شد. نتایج ارزیابی طبقات شدت خشکسالی با استفاده از شاخص‌های مذکور در ۱۲ ایستگاه سینوپتیک، نشان‌دهنده همبستگی و تطابق بالای طبقات خشکسالی بین این دو شاخص بوده است (Kazempour Choursi et al., 2024). بر اساس یافته‌های پژوهش مذکور و جمع‌بندی یافته‌های سایر پژوهشگران، می‌توان ادعا کرد استفاده از محصولات جهانی بارش در شرایط ایران که با کمبود شدید ایستگاه‌های اندازه‌گیری بارش و با پراکنش نامناسب ایستگاه‌های سینوپتیک و باران‌سنجی مواجه است، امری اجتناب‌ناپذیر است. با وجود پژوهش‌های متعدد در خصوص خشکسالی در ایران، بیش‌تر پژوهش‌ها در مقیاس ایستگاه انجام شده‌اند و کمبود تحلیل‌های مکانی جامع با استفاده از داده‌های رستری با دقت مکانی مناسب‌تر از پایگاه شبکه‌ای بارش، همچنان یک شکاف پژوهشی است. لذا این ضرورت وجود دارد که پایگاه جهانی بارش GPCC که بر اساس یافته‌های پژوهشی داخل و خارج (Araghi and Adamowski, 2024)، از صحت بالایی برخوردار است در تحلیل خشکسالی، تهیه نقشه‌های رقومی بارش و شدت خشکسالی مورد ارزیابی جامع قرار گیرد. این پژوهش برای اولین بار با بهره‌گیری از داده‌های جهانی GPCC، نقشه‌های رستری شدت خشکسالی (۱، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه) در مقیاس حوضه را بر اساس شاخص‌های SPI و mRAI در دوره آماری ۳۰ ساله ۱۹۹۱-۲۰۲۰ تولید می‌کند.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز دریاچه ارومیه با مساحت ۵۱۸۷۶ کیلومتر مربع بین ۳۷ درجه و ۴ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۱۷ دقیقه عرض جغرافیایی و ۴۵ درجه و ۱۳ دقیقه تا ۴۶ درجه طول جغرافیایی در شمال غرب ایران واقع شده است (شکل ۱). اقلیم حوضه از نوع خشک و نیمه‌خشک است که عمدتاً تحت تأثیر کوه‌های اطراف دریاچه است. اختلاف

پایش خشکسالی حوضه آبریز کارون بزرگ بررسی کردند. با استفاده از شاخص SPI و داده‌های بارش ماهانه ۱۳ ایستگاه سینوپتیک طی دوره آماری ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۶، مشخص شد که شاخص‌های خشکسالی مبتنی بر داده‌های GPCC، ERA5 و PCDR تطابق آماری قوی‌تری با SPI مشاهداتی دارند. به‌علاوه، با استفاده از شاخص خشکسالی RDI^۴ و داده‌های بارش ماهانه GPCC و CRU^۵، خشکسالی حوضه آبریز دریاچه ارومیه از سال ۱۹۵۵ تا ۲۰۱۵ بررسی شد (Sadeghian Aghkandi et al., 2023). نتایج نشان داد که داده‌های شبکه‌ای CRU و GPCC عملکرد مناسبی در برآورد مؤلفه‌های هیدرولوژیک دارند و استفاده از آن‌ها در مناطق فاقد داده‌های زمینی توصیه می‌شود. Hānsel et al., (2016) مدل‌های اقلیمی منطقه‌ای را برای ارزیابی شاخص اصلاح شده آنومالی بارش mRAI^۶ به‌عنوان جایگزین شاخص SPI استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که دو شاخص در تمام مقیاس‌های زمانی مورد مطالعه، همبستگی بالایی با مقادیر ایستگاه‌ها و داده‌های میانگین منطقه‌ای دارند، اما mRAI در ارزیابی روند ناهنجاری یا آنومالی‌های بارش نتایج بهتری را ارائه می‌کند. Javan et al., (2016) شاخص‌های خشکسالی درصد بارش نرمال^۷، استاندارد بارش سالانه^۸، RAI و SPI را برای پایش خشکسالی حوضه آبریز دریاچه ارومیه ارزیابی کردند. مقایسه این شاخص‌ها بر اساس طبقات خشکسالی در دوره آماری ۱۳۴۵ تا ۱۳۸۴ نشان داد که PNPI در مقیاس ۱۲ ماهه مناسب نیست و SPI و RAI عملکرد بهتری دارند و به واقعیت نزدیک‌ترند. Raziei (2021) شاخص RAI را به‌عنوان جایگزینی برای SPI در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران به‌دلیل بالا بودن مقادیر صفر در داده‌های بارش ارائه کرد. مقایسه این دو شاخص در ۴۵ ایستگاه سینوپتیک ایران در مقیاس‌های زمانی ۱ تا ۱۲ ماهه نشان داد که هر دو شاخص، در تمام ایستگاه‌ها به‌ویژه در مقیاس‌های ۶، ۹ و ۱۲ ماهه، همبستگی و تشابه بالایی دارند. به اعتقاد ایشان شاخص RAI در ایستگاه‌های خشک و نیمه‌خشک در مقیاس ماهانه به‌دلیل وجود داده‌های صفر، دقت بیش‌تری نسبت به SPI دارد. Sutapa et al., (2024) شاخص‌های خشکسالی SPI، RAI، شاخص تمرکز بارش^۹ و دوره تمرکز بارش^{۱۰} را با داده‌های ماهانه طی دوره ۱۹۸۵ تا ۲۰۲۱ در حوضه آبخیز پالو^{۱۱} مقایسه کردند. با استفاده از ضرایب همبستگی پیرسون، اسپیرمن و معیارهای خطا، مشخص

⁶ Modified Rainfall Anomaly Index

⁷ Percent of Normal Precipitation Index (PNPI)

⁸ Standardize Index of Annual Precipitation (SIAP)

⁹ Precipitation Concentration Index (PCI)

¹⁰ Precipitation Concentration Period (PCP)

¹¹ Palu

¹ European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

² Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications

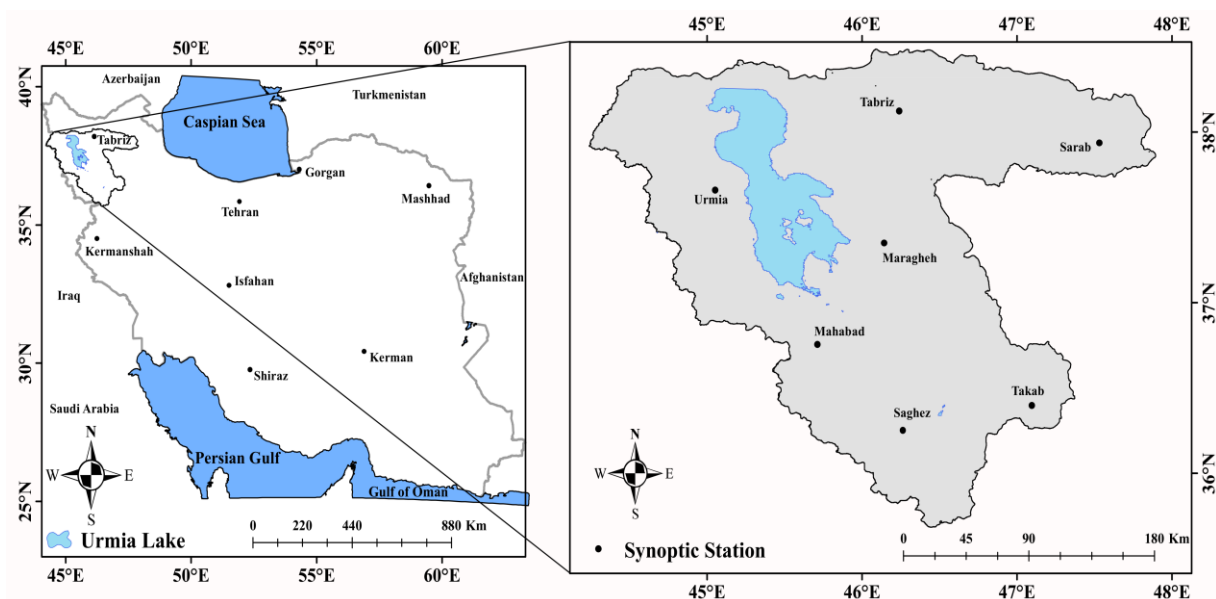
³ PERSIANN Climate Data Record

⁴ Reconnaissance Drought Index

⁵ Climatic Research Unit

سطح آب وضعیت بحرانی دارد. تغییر اقلیم نقش اساسی در ایجاد این بحران داشته است (Bashirian et al., 2020). خشک سالی می تواند تأثیرات مخرب بر تمام موجودات زنده حوضه دریاچه ارومیه داشته باشد. وقوع رویدادهای مکرر و متوالی خشک سالی، وقوع طوفان های نمک، زیست بوم یا اکوسیستم های منطقه را به طور جدی تهدید می کنند (Shirmohammadi et al., 2020). بنابراین پایش خشک سالی این حوضه به منظور مدیریت پایدار منابع طبیعی و زیست بوم آن از اهمیت به سزایی برخوردار است.

ارتفاع بین مرتفع ترین و پست ترین نقاط حوضه حدود ۲۵۷۶ متر است (Javan et al., 2016). کاربری اراضی حوضه شامل سفره های زیرزمینی، مرتع و زمین های کشاورزی است. حداقل و حداکثر دمای مشاهده ای در دوره آماری مورد مطالعه به ترتیب برابر ۴/۳ و ۱۷/۷ درجه سانتی گراد است و میانگین بارندگی سالانه برابر ۳۱۵ میلی متر است (Heydari et al., 2020). دریاچه ارومیه که در گذشته بزرگ ترین دریاچه داخلی ایران و یکی از بزرگ ترین دریاچه های آب شور جهان بود، در حال حاضر به دلیل کاهش شدید



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوضه آبریز دریاچه ارومیه و ایستگاه های سینوپتیک انتخابی
Figure 1. Geographical location of Urmia Lake Basin and selected synoptic stations

۷۵۱۰۰ ایستگاه در سراسر جهان است (Basheer and Elagib, 2016). صحت داده های این پایگاه در ایستگاه های هواشناسی ایران، بسیار خوب گزارش شده است (Halabian and Ghasemi, 2021). از این رو در پژوهش حاضر، محصول GPCC نسخه ۲۰۲۲ V با قدرت تفکیک مکانی ۰/۲۵×۰/۲۵ در مقیاس ماهانه در دوره آماری ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۰ مورد استفاده قرار گرفت (داده های بارش این پایگاه تا سال ۲۰۲۰ قابل دسترس بوده است). پیش پردازش داده های GPCC شامل تفکیک و برش داده ها در محیط نرم افزار ArcGIS Pro انجام شد. به منظور ارزیابی صحت داده ها، مقدار بارش ماهانه GPCC بر اساس مختصات ایستگاه های مورد مطالعه، استخراج و با مقادیر مشاهداتی مقایسه شد.

۲-۲- داده های بارش ماهانه

۲-۲-۱- داده های ایستگاه های سینوپتیک

داده های بارندگی ماهانه ایستگاه های سینوپتیک واقع در حوضه آبریز دریاچه ارومیه برای دوره آماری ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۰ از سازمان هواشناسی کشور اخذ شدند. مشخصات جغرافیایی ایستگاه های مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است.

۲-۲-۲- داده های جهانی بارش GPCC

در مطالعه حاضر، برای استخراج شاخص های خشک سالی هواشناسی از داده های مرکز اقلیم شناسی بارش جهانی^۱ GPCC استفاده شد. این مجموعه داده در مقیاس ماهانه برای دوره ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۰ از سایت سرویس هواشناسی آلمان (Deutscher Wetterdienst: DWD) دریافت شد. پایگاه GPCC تخمین های بارندگی جهانی را ارائه می کند که بر اساس اندازه گیری بارش حدود

^۱ https://opendata.dwd.de/climate_environment

جدول ۱- مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه

Table 1. Geographical characteristics of the studied synoptic stations

No.	Station	Longitude (DMS)	Latitude (DMS)
1	Mahabad	45°43'11"	36°45'01"
2	Maragheh	46°08'-59"	37°21'02"
3	Saghez	46°16'12"	36°15'03"
4	Sarab	47°31'-48"	37°55'47"
5	Tabriz	46°14'24"	38°07'11"
6	Takab	47°06'00"	36°23'59"
7	Urmia	45°03'36"	37°39'35"

al., 2024). در مورد کارایی شاخص RAI در اقلیم خشک و فوق‌خشک که اغلب سری زمانی ماهانه بارش دارای چولگی زیاد و با درصد فراوانی بالا از نظر وجود داده‌های صفر، اطلاعات زیادی وجود ندارد. برای حل مشکل تأثیر منفی وجود داده‌های صفر در محاسبه شاخص RAI، Raziei (2021) برای مناطقی که داده‌های بارندگی ناقص و تعداد زیادی داده‌ی صفر دارند، شاخص mRAI را پیشنهاد کرده است. شاخص RAI اصلاح شده (mRAI) به‌صورت زیر محاسبه می‌شود (Hänsel et al., 2016):

$$mRAI = SF \frac{(P_i - \bar{P})}{(\bar{E}_n - \bar{P})} \quad (1)$$

$$mRAI = SF \frac{(P_i - \bar{P})}{(\bar{E}_x - \bar{P})} \quad (2)$$

که در آن P_i بارندگی در ماه i ام و $\bar{P}$ میانگین بارندگی در طی دوره مطالعاتی است. ضریب مقیاس SF حدهای پایین (رابطه ۱) و حدهای بالا (رابطه ۲) را محدود می‌کند و برای $P_i \geq \bar{P}$ مثبت و برای $P_i < \bar{P}$ منفی است. Raziei (2021) برای تصحیح شاخص RAI برای همخوانی بیشتر با شاخص SPI بالاخص در نواحی خشک و نیمه خشک ایران نشان داد باید از $\bar{E}_x$ یا میانگین بارش‌های بالای صدک ۹۰ و $\bar{E}_n$ یا میانگین بارش‌های زیر صدک ۱۰ در روابط مذکور در استخراج شاخص اصلاح شده RAI استفاده شود. در این پژوهش، ضریب مقیاس SF با توجه شرایط اقلیمی حوضه و به‌دلیل همخوانی نتایج با شاخص SPI برابر ۱/۴ در نظر گرفته شد و استفاده از مقادیر بهینه این ضریب در هر یک از مناطق اقلیمی ایران ضروری است. طبقه‌بندی استاندارد شدت خشکسالی شاخص‌های SPI، RAI و mRAI در جدول ۲ ارائه شده است و طبقات این جدول مبنای کار قرار گرفته است (Kazempour Choursi et al., 2024).

۳-۲- شاخص‌های خشکسالی هواشناسی

۳-۲-۱- شاخص بارش استاندارد شده (SPI)

شاخص بارش استاندارد شده (SPI) توسط McKee et al., (1993) برای تحلیل خشکسالی هواشناسی ارائه شده است. طبقه‌بندی شدت خشکسالی بر اساس مقادیر SPI در جدول ۲ ارائه شده است. مقادیر مثبت SPI نشان‌دهنده بارش بیش‌تر از نرمال (میانگین بلند مدت) و مقادیر منفی نشان‌دهنده بارش کم‌تر از نرمال و وقوع خشکسالی هستند. لازم به ذکر است چون مقادیر تجمعی بارش در ایستگاه‌های سینوپتیک در مقیاس‌های زمانی مختلف (سه ماهه و بالاتر)، از توزیع آماری نرمال تبعیت می‌کند، لذا با فرض پیروی داده‌های بارش پایگاه GPCC از توزیع نرمال، شاخص خشکسالی SPI هر سلول محاسبه شده است. این شاخص منعکس‌کننده اثرات خشکسالی بر منابع مختلف آب است (Fluixá-Sanmartín, 2018). SPI سه ماهه، شرایط رطوبتی کوتاه‌مدت و میان‌مدت را منعکس کرده و تخمین فصلی بارش را ارائه می‌کند. SPI شش ماهه روندهای فصلی تا میان مدت بارش را نشان می‌دهد و ممکن است در نشان دادن ناهنجاری یا آنومالی بارش در فصول مختلف، بسیار مؤثر باشد. شاخص SPI ۱۲ تا ۲۴ ماهه، الگوهای بارش بلندمدت را منعکس می‌کنند و معمولاً به جریان رودخانه، سطح مخزن و حتی سطح آب زیرزمینی در مقیاس زمانی طولانی‌تر مرتبط است. در این مطالعه، نقشه‌های رستری شاخص‌های خشکسالی SPI و mRAI در مقیاس‌های زمانی ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS Pro برای سطح حوضه تهیه شده است (با قدرت تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه، و اندازه سلول برابر ۲۵ کیلومتر).

۳-۲-۲- شاخص اصلاح شده آنومالی بارش (mRAI)

شاخص آنومالی بارش (RAI) توسط Van-Rooy (1965) برای نشان دادن دوره‌های کم‌آبی و خشکسالی ارائه شده است. RAI به‌عنوان یک شاخص خشکسالی هواشناسی، از یک روش رتبه‌بندی ساده برای امتیازدهی به میزان ناهنجاری یا آنومالی‌های مثبت و منفی بارندگی، استفاده می‌کند (Keyantash and Dracup, 2002; Raziei, 2021; Kazempour Choursi et

جدول ۲- طبقه بندی شدت خشک سالی بر اساس شاخص های SPI و mRAI

Table 2. The classification of drought severity based on SPI and Mrai

Severity Class	Original SPI (McKee et al., 1993)	Original RAI (Van-Rooy, 1965)	SPI and Mrai (Hänse et al., 2016)
Without Drought	> -0.5	> -0.5	> -0.5
Mild Drought	$-1.0 < SPI \leq -0.5$	$-1.0 < RAI \leq -0.5$	-0.99 to -0.5
Moderate Drought	$-1.5 < SPI \leq -1.0$	$-2.0 < RAI \leq -1.0$	-1.49 to -1.00
Severe Drought	$-2.0 < SPI \leq -1.5$	$-3.0 < RAI \leq -2.0$	-1.99 to -1.50
Extreme Drought	≤ -2.0	≤ -3.0	≤ -2.0

نقشه ها از جغرافیایی به سیستم مرکاتور معکوس (UTM) و تهیه نقشه های رستری بارش به دست آمده از پایگاه شبکه ای بارش (قدرت تفکیک ۲۵ کیلومتر) در محیط نرم افزار ArcGIS Pro انجام شد. نقشه های شدت خشک سالی در مقیاس حوضه بر اساس شاخص های SPI و mRAI در مقیاس های زمانی ۱، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه بر اساس داده های بارش GPCC طی دوره آماری ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۰ تولید شدند. طبقات شدت خشک سالی های مختلف (ضعیف، متوسط، شدید، بسیار شدید) در حوضه با هم مقایسه شده و نواحی بحرانی یا آسیب پذیر، شناسایی شدند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ارزیابی صحت داده های بارش

صحت داده های جهانی بارش GPCC در مقیاس ماهانه با استفاده از معیارهای آماری ضریب تعیین (R^2)، میانگین قدر مطلق خطا (MAE)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE) و درصد اریبی (PBIAS) در ایستگاه های سینوپتیک مورد مطالعه از سال ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۰ مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج ارزیابی داده های ماهانه بارش GPCC در هر یک از ایستگاه های سینوپتیک و کل داده ها در جدول ۳ ارائه شده است. مشاهده می شود که مقدار ضریب تعیین در تمامی ایستگاه ها بالای ۰/۸۶ و در کل داده ها ۰/۹۱ برآورد شده است. مقدار PBIAS در ایستگاه تبریز منفی است که نشان می دهد GPCC بارش ماهانه ایستگاه تبریز را کمتر از مقدار واقعی برآورد کرده است. معیار MAE و RMSE در کل داده ها به ترتیب ۶/۳۱ و ۹/۹۲ محاسبه شده است. به طور کلی می توان نتیجه گرفت که داده های GPCC در تخمین بارش ماهانه در ایستگاه های سینوپتیک حوضه از دقت قابل قبولی برخوردارند. نتایج مطالعات Raziei et al. (2011) و Saemian et al. (2021) و Sadeghian Aghkandi et al. (2023) بیان گر این واقعیت می باشند. بنابراین، به منظور تحلیل خشک سالی حوضه آبریز دریاچه ارومیه بر اساس شاخص های SPI و mRAI از داده های شبکه ای بارش GPCC استفاده شده است. استفاده از روش های آماری مانند رگرسیون چندکی و رگرسیون وزنی جغرافیایی برای ریزمقیاس سازی داده های بارش ماهواره TRMM در این حوضه نشان می دهد که کالیبراسیون (واسنجی) پایگاه های بارش و ریزمقیاس سازی داده های شبکه ای بارش می تواند باعث کاهش

۲-۴- ارزیابی صحت داده های بارش و تطابق طبقات خشک سالی

صحت داده های بارش GPCC در ایستگاه های سینوپتیک مورد مطالعه با استفاده از معیارهای آماری مختلف شامل ضریب تعیین R^2 ، جذر میانگین مربعات خطا RMSE، میانگین قدر مطلق خطا MAE و درصد اریبی PBIAS در دوره آماری ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۰ مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفت (روابط ۳ تا ۶). ضریب تعیین R^2 معیاری است که مقدار آن بین ۰ و ۱ متغیر است و مقادیر نزدیک به ۱ نشان دهنده همبستگی بالای داده های مشاهده ای و GPCC است. RMSE میانگین تفاوت بین مقادیر GPCC و مقادیر مشاهده ای را اندازه گیری می کند. مقدار MAE میانگین خطای مطلق را نشان می دهد و مقدار کمتر آن مانند RMSE ارتباط قوی بین دو منبع داده را نشان می دهد. PBIAS درصد تمایل مقادیر GPCC به بزرگ تر یا کوچک تر بودن نسبت به مقادیر مشاهده ای ایستگاه ها را نشان می دهد. مقادیر مثبت درصد PBIAS برآورد بیش از مقدار واقعی (بیش برآورد) و مقادیر منفی آن، برآورد کمتر از مقدار واقعی (کم برآورد) را نشان می دهد. برای مقایسه طبقات شدت خشک سالی به دست آمده از دو شاخص SPI و mRAI و ارزیابی صحت طبقات در مقیاس های زمانی مورد مطالعه از آماره کاپا (Kappa) و ضریب Cramer's V استفاده شد (Kazempour Choursi et al., 2024):

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_{GPCC} - P_{Obs})^2}{\sum_{i=1}^n (P_{Obs} - \bar{P})^2} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_{GPCC} - P_{Obs})^2} \quad (4)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |P_{GPCC} - P_{Obs}| \quad (5)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (P_{GPCC} - P_{Obs})}{\sum_{i=1}^n P_{Obs}} \times 100 \quad (6)$$

که در آن، Pobs مقادیر مشاهده ای، PGPCC داده های بارندگی پایگاه GPCC و $\bar{P}$ میانگین بارندگی مشاهده ای است.

۲-۵- تهیه نقشه های شدت خشک سالی

نقشه های رستری بارش ماهانه حوضه آبریز دریاچه ارومیه طی سال های ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۰ بر اساس داده های GPCC تهیه شدند. پیش پردازش داده های GPCC (برش و تبدیل سیستم مختصات

ماه‌های ژانویه تا آوریل بیشترین مقدار میانگین بارندگی در نواحی جنوب، غرب و جنوب‌غربی حوضه رخ داده است. در ماه‌های ژوئن تا سپتامبر بیشتر نواحی حوضه بارندگی کم‌تر از ۱۰ میلی‌متر را تجربه کرده است. از ماه اکتبر تا دسامبر میانگین بارندگی روند افزایشی دارد.

خطای مقادیر بارش شبکه‌ای شود (Kazempour Choursi et al., 2024). لذا استفاده از روش‌های آماری ذکر شده، می‌تواند باعث کاهش درصد خطای پایگاه GPCC و افزایش قدرت تفکیک مکانی را به دنبال داشته باشد و نقشه‌های شدت خشکسالی را با قدرت تفکیک مکانی بالاتر (۱۰۰۰ متر) و خطای کم‌تر ارائه کرد. توزیع مکانی میانگین بارندگی ماهانه بر اساس داده‌های بارش جهانی GPCC در شکل ۲ ارائه شده است. مشاهده می‌شود که در

جدول ۳- ارزیابی آماری داده‌های بارش ماهانه GPCC در ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه

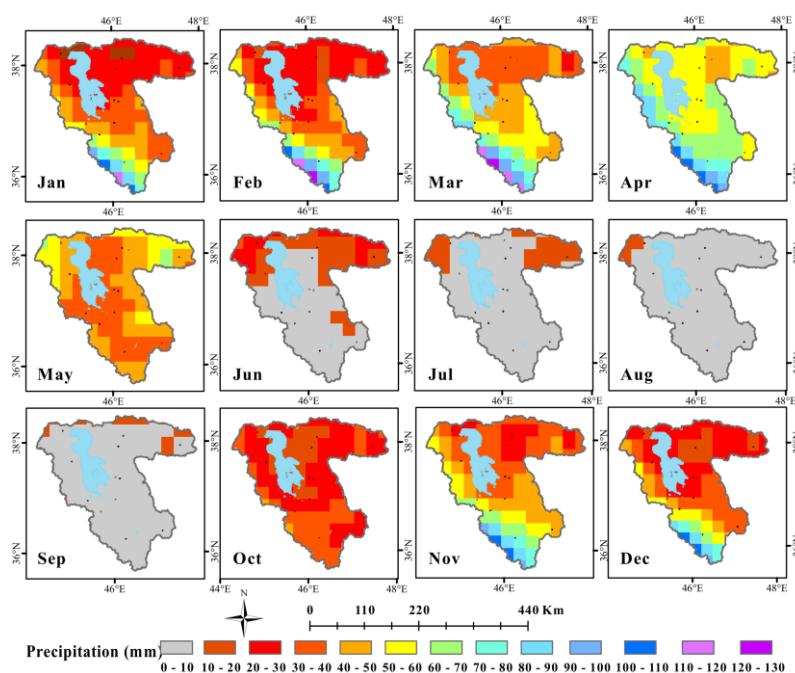
Table 3. Statistical evaluation of GPCC monthly precipitation data at the studied synoptic stations

Station	R ²	MAE (mm)	RMSE (mm)	PBIAS (%)
Mahabad	0.914	7.345	12.377	13.014
Maragheh	0.951	4.142	6.116	7.966
Saghez	0.936	7.901	12.627	11.972
Sarab	0.864	5.995	8.677	17.029
Tabriz	0.912	4.451	6.239	-2.342
Takab	0.868	6.922	10.576	8.445
Urmia	0.901	7.471	10.587	17.335
Total	0.913	6.318	9.915	10.835

شکل ۳ مشاهده می‌شود که بیش‌ترین میانگین بارندگی ماهانه در دوره آماری ۳۰ ساله در تمام مقیاس‌های زمانی در نواحی غربی، جنوب‌غربی و جنوب حوضه رخ داده است. مقادیر شاخص‌های خشکسالی SPI و mRAI در مقیاس‌های ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه در ایستگاه‌های سینوپتیک ارومیه و تبریز به‌عنوان نمونه مقایسه شدند (شکل‌های ۴ و ۵). نتایج نشان می‌دهد که شاخص SPI در مقیاس‌های مذکور دارای تطابق خوبی با شاخص mRAI در ایستگاه‌های سینوپتیک طی دوره آماری ۳۰ ساله از سال ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۰ است.

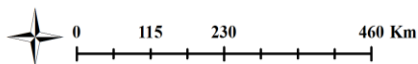
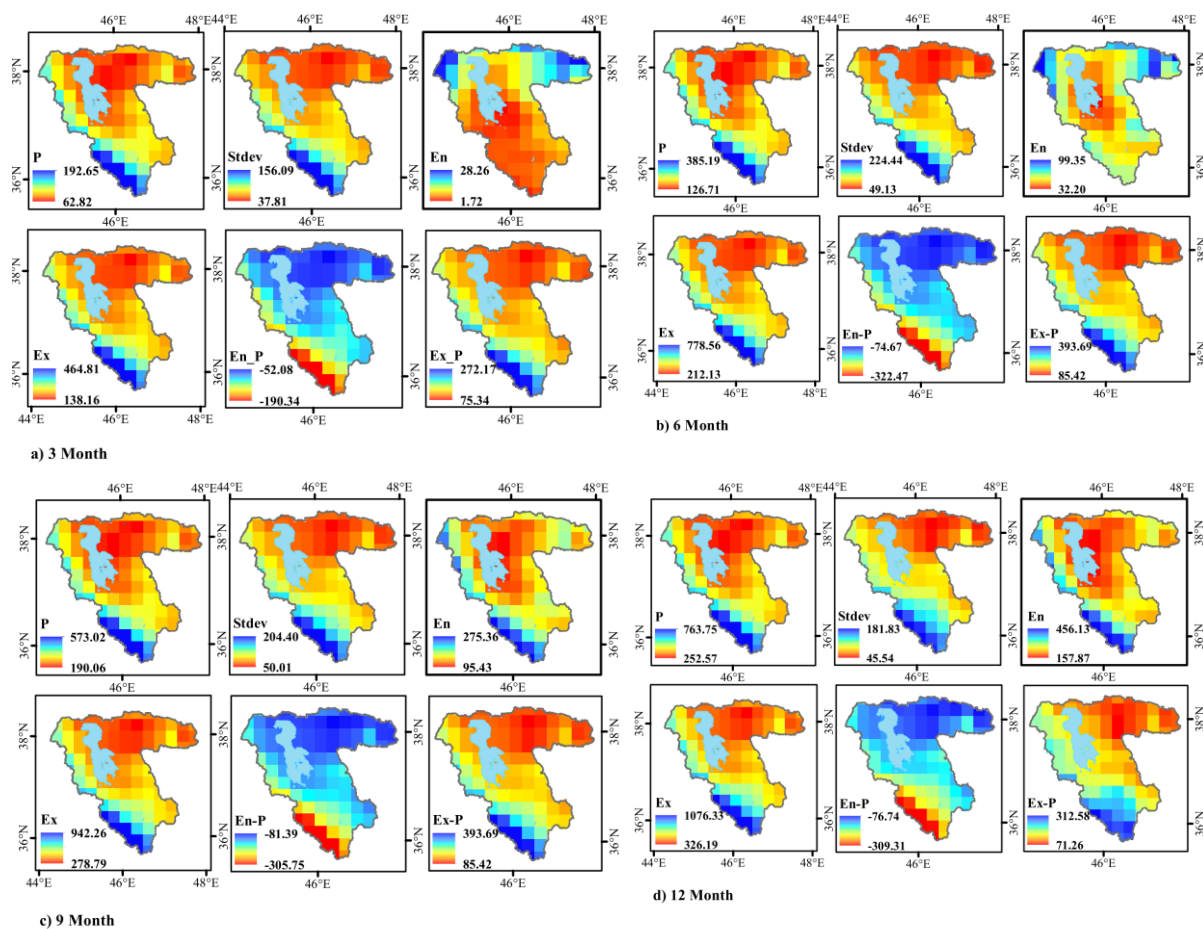
۳-۲- ارزیابی تطابق طبقات خشکسالی

نقشه‌های شاخص‌های خشکسالی SPI و mRAI با استفاده از داده‌های شبکه‌ای بارش GPCC در مقیاس‌های زمانی ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه در مقیاس حوضه از سال ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۰ تهیه شدند. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، مقدار ضریب مقیاس (SF) با استفاده از مقایسه مقادیر و فراوانی طبقات خشکسالی به‌دست آمده از شاخص‌های SPI و mRAI مشاهده‌ای در حوضه (۷ ایستگاه) در مقیاس‌های ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه برابر با ۱/۴ در نظر گرفته شد. پارامترهای آماری مورد استفاده در محاسبه شاخص‌های SPI و mRAI با مقیاس‌های زمانی مختلف در شکل ۳ ارائه شده‌اند. در



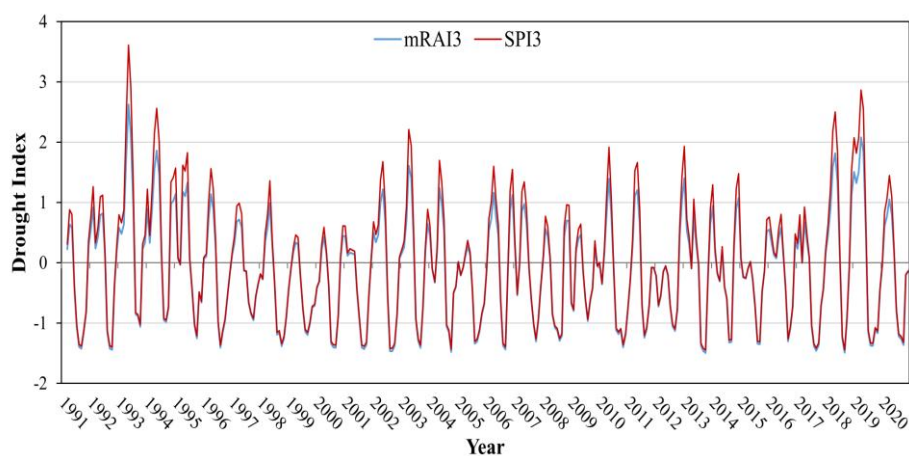
شکل ۲- توزیع مکانی میانگین بارندگی ماهانه داده‌های GPCC در حوضه آبریز دریاچه ارومیه (۱۹۹۱-۲۰۲۰)

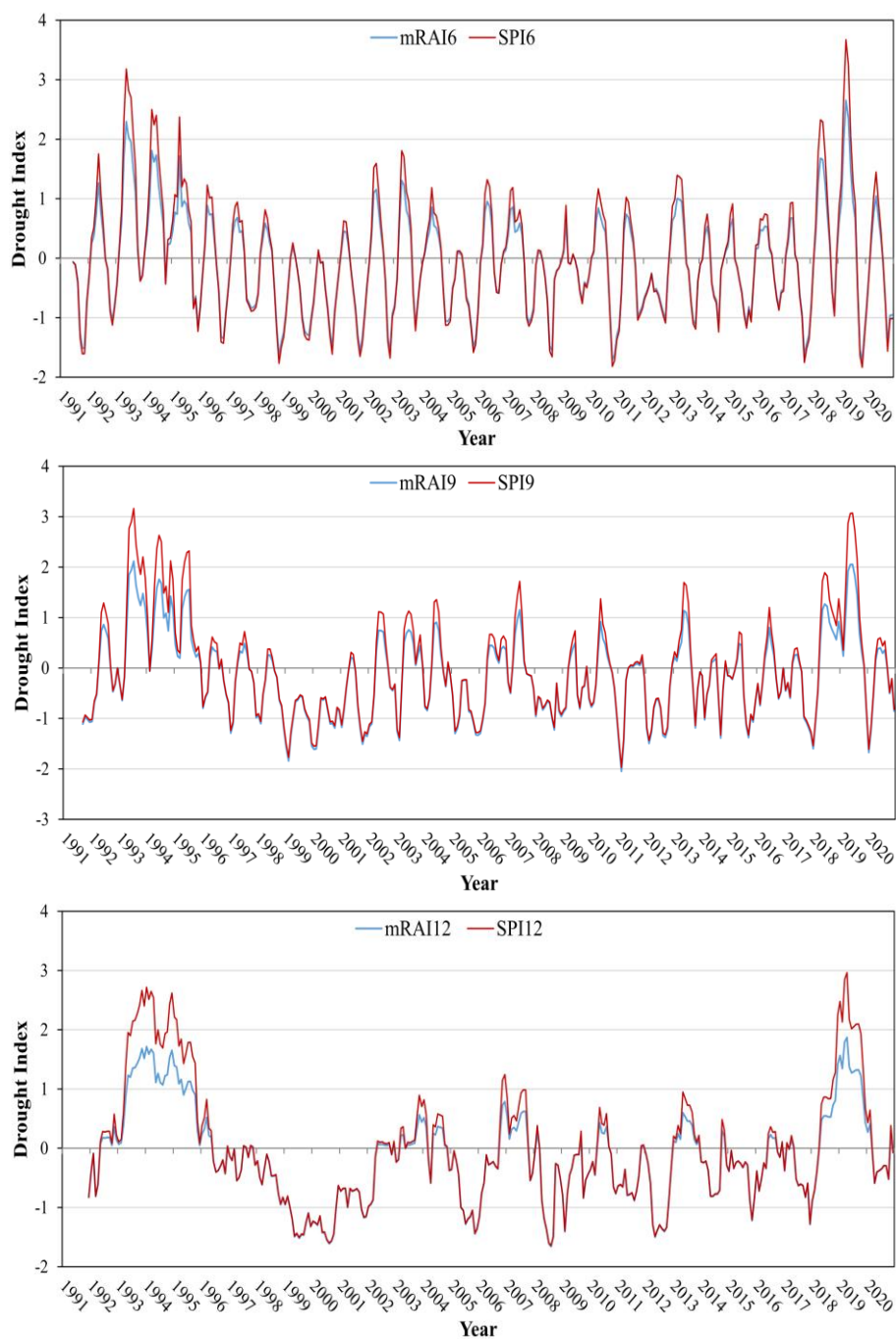
Figure 2. The spatial map of mean monthly precipitation from GPCC data in the Urmia Lake basin (1991-2020)



شکل ۳- تغییرپذیری مکانی پارامترهای مورد استفاده در محاسبه شاخص های SPI و mRAI در مقیاس های زمانی مختلف

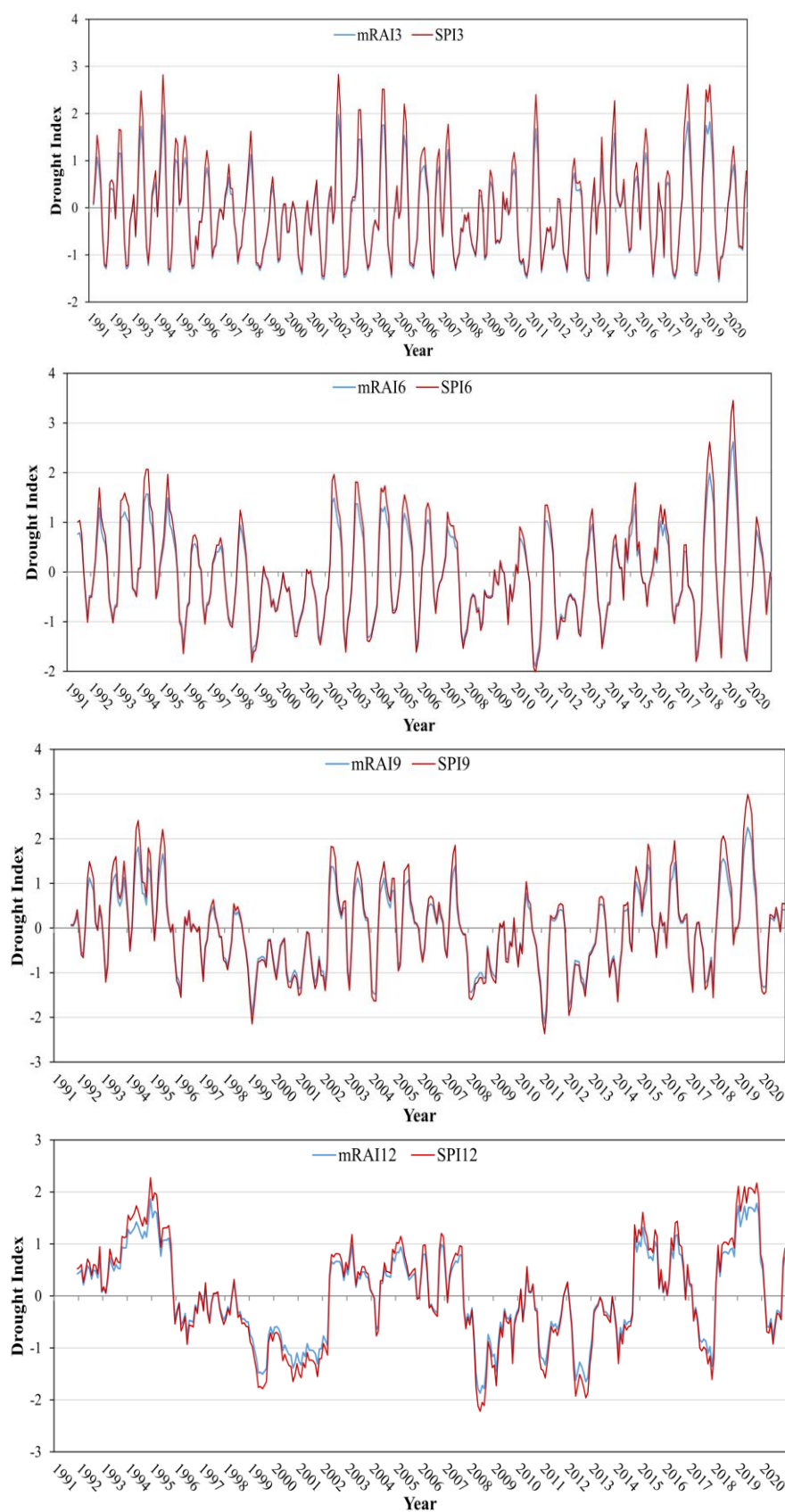
Figure 3. Spatial variability of the parameters used in the calculation of SPI and mRAI indices at various timescales





شکل ۴- مقادیر شاخص‌های SPI و mRAI در ایستگاه ارومیه از سال ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۰ در مقیاس‌های زمانی مختلف

Figure 4. SPI and mRAI values at Urmia station from 1991 to 2020 at various timescales



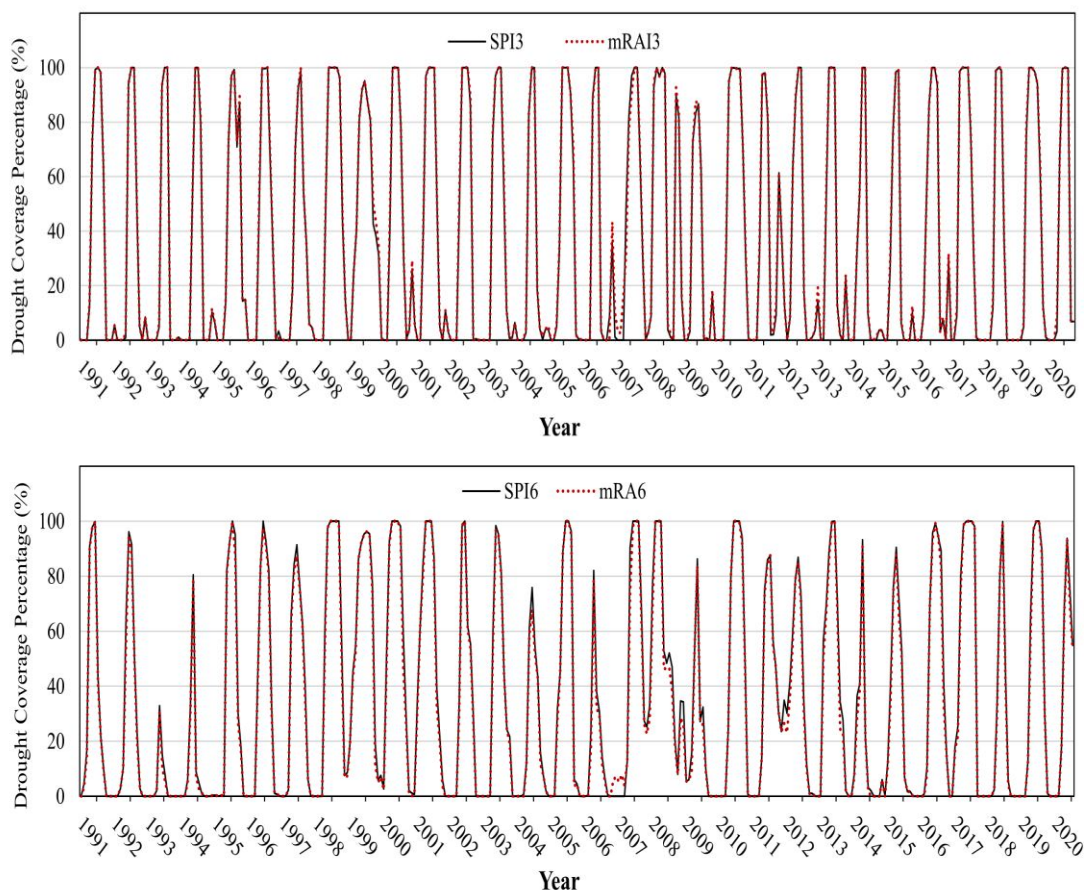
شکل ۵- مقادیر شاخص های SPI و mRAI در ایستگاه تبریز از سال ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۰ در مقیاس های زمانی مختلف

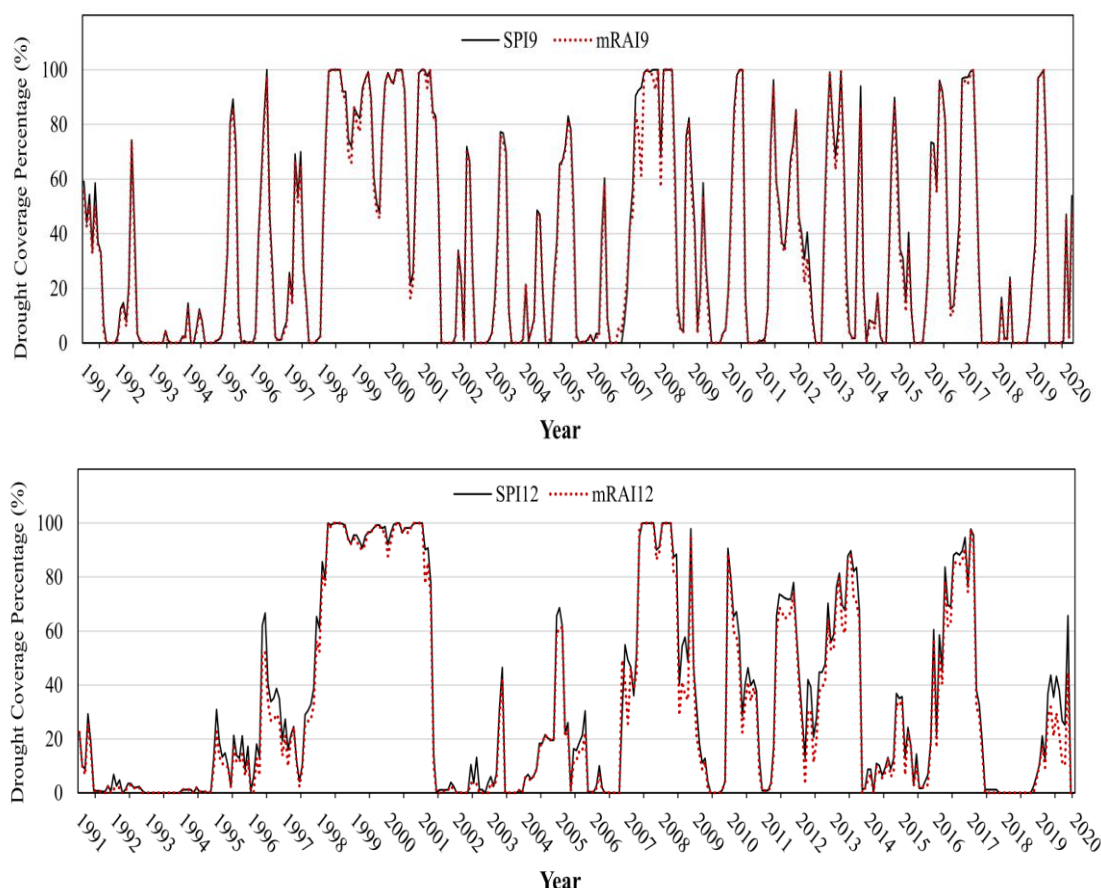
Figure 5. SPI and mRAI values at Tabriz station from 1991 to 2020 at various timescales

نوامبر ۱۹۹۸ و ۱۹۹۹؛ اکتبر و نوامبر ۲۰۰۷، سپتامبر تا دسامبر ۲۰۱۰ تقریباً کل سطح حوضه، تحت خشکسالی (متوسط تا شدید) قرار گرفته است.

بر اساس شاخص‌های SPI-9 و mRAI-9 دسامبر ۱۹۹۸؛ ژانویه تا آوریل ۱۹۹۹؛ ژانویه، فوریه و دسامبر ۲۰۰۰؛ ژانویه، فوریه، سپتامبر، اکتبر و دسامبر ۲۰۰۱؛ ژوئن تا سپتامبر، نوامبر و دسامبر ۲۰۰۸؛ فوریه و مارس ۲۰۱۱؛ اکتبر تا دسامبر ۲۰۱۷؛ دسامبر ۲۰۱۹ و ژانویه و فوریه ۲۰۲۰، کل سطح حوضه خشکسالی ضعیف تا متوسط را تجربه کرده است. در ماه‌های مارس تا دسامبر ۱۹۹۹؛ آوریل تا دسامبر ۲۰۰۰؛ ژانویه تا دسامبر ۲۰۰۱؛ ژوئن تا سپتامبر ۲۰۰۸؛ ژانویه تا مارس ۲۰۰۹؛ و اکتبر ۲۰۱۹، تقریباً کل سطح حوضه بر اساس شاخص‌های SPI-12 و mRAI-12 تحت خشکسالی (ضعیف تا شدید) قرار گرفته است (شکل ۶).

شدت خشکسالی شاخص‌های SPI و mRAI در سطح حوضه با استفاده از جدول ۲ در مقیاس‌های زمانی مورد مطالعه طبقه‌بندی و درصد طبقات خشکسالی برای هر ماه از سال ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۰ محاسبه شدند. شکل ۶ درصد طبقات خشکسالی (ضعیف، متوسط و شدید) شاخص‌های مذکور در مقیاس حوضه در دوره آماری ۳۰ ساله در مقیاس‌های ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج می‌توان گفت شاخص SPI و شاخص mRAI در مقیاس‌های زمانی مختلف در اکثر ماه‌های سال دارای تطابق بسیار خوبی می‌باشند. نتایج شکل ۶ نشان می‌دهد که بر اساس شاخص‌های SPI-3 و mRAI-3 ماه‌های سپتامبر و اکتبر سال‌های ۱۹۹۱ تا ۱۹۹۳، ۱۹۹۵ تا ۱۹۹۷، ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۵، ۲۰۱۲، ۲۰۱۳، ۲۰۱۶، ۲۰۱۹؛ آگوست و سپتامبر ۱۹۹۴، ۲۰۰۰، ۲۰۰۸، ۲۰۰۶، ۲۰۱۴، ۲۰۱۵، ۲۰۱۷، ۲۰۱۸، ۲۰۲۰؛ آگوست تا





شکل ۶- درصد طبقات خشک سالی در سطح حوزه بر اساس شاخص های SPI و mRAI در مقیاس های زمانی مختلف

Figure 6. The percentage of detected drought classes at the basin scale based on SPI and mRAI indices at various timescales

۲۰۰۵ مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج آن ها نشان دهنده عملکرد خوب شاخص RAI در تخمین دوره های خشک سالی و ترسالی شدید است. نتایج RAI اصلی در مناطقی با تغییرپذیری زیاد بارندگی به واقعیت نزدیک تر است. سری های زمانی دوره های ترسالی و خشک سالی ۲۹ ایستگاه سینوپتیک در شمال غرب ایران توسط Montaseri et al., (2016) ارزیابی شدند. نتایج آن ها نشان داد که شاخص RAI اصلی مقادیر ترسالی و خشک سالی را بیش تر از شاخص SPI برآورد کرده است. شاخص های RAI و SPI دارای همبستگی بالایی در تعیین روند تغییرات دوره های ترسالی و خشک سالی هستند که می توان از هر دو شاخص صرفاً در این زمینه استفاده کرد.

تطابق طبقات شدت خشک سالی شاخص های SPI و mRAI در مقیاس های زمانی مورد مطالعه با استفاده از آماره کاپا (Kappa) و ضریب Cramer's V در ایستگاه های سینوپتیک ارزیابی شدند. مقادیر آماره Kappa و ضریب Cramer's V بین دو شاخص خشک سالی برای مقیاس های ۳، ۶ و ۱۲ ماهه در جدول ۴ ارائه شده است. مقدار آماره Kappa و ضریب Cramer's V در مقیاس های زمانی ۳، ۶ و ۱۲ ماهه در کل ایستگاه ها به ترتیب برابر ۰/۸۵۱ و ۰/۸۳۷، ۰/۸۶۳ و ۰/۸۴۷، ۰/۸۶۷ و ۰/۸۵۰، و ۰/۹۲۹ و ۰/۹۱۲ در سطح معنی داری ۱ درصد، به دست آمده است. نتایج بیان گر وجود ارتباط معنادار آماری بین شاخص های خشک سالی SPI و mRAI در ارزیابی شرایط خشک سالی در هر یک ایستگاه های سینوپتیک مورد مطالعه و کل ایستگاه ها در مقیاس های زمانی مختلف است که با نتایج مطالعات قبلی مطابقت دارد (Hänsel et al., 2016; Raziei, 2021; Kazempour, 2024).

در مطالعه Javan et al., (2026) خشک سالی حوضه آبریز دریاچه ارومیه در مقیاس ایستگاهی با استفاده از شاخص های RAI اصلی، SIAP، PNPI و SPI در مقیاس سالانه از سال ۱۹۶۶ تا

جدول ۴- مقادیر آماره کاپا و کرامر بر اساس فراوانی طبقات دو شاخص SPI و mRAI در مقیاس‌های زمانی مختلف

Table 4. The Kappa and Cramer's V statistics based on the frequency of classes at SPI and mRAI indices at various timescales

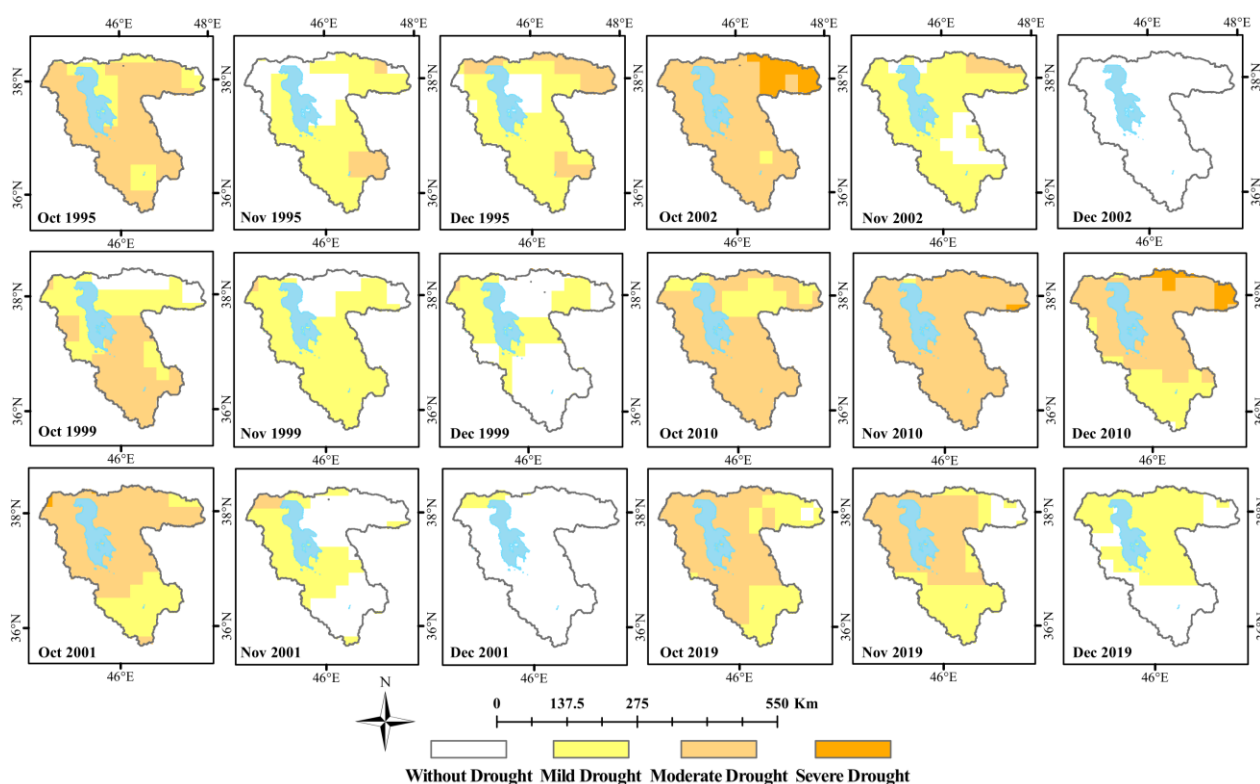
Timescale	Station	Kappa	Cramer's V
3-month	Mahabad	0.938	0.912
	Maragheh	0.948	0.931
	Saghez	0.895	0.873
	Sarab	0.963	0.950
	Tabriz	0.948	0.947
	Takab	0.984	0.978
	Urmia	0.984	0.980
	Urmia Lake Basin	0.851	0.837
6-month	Mahabad	0.888	0.868
	Maragheh	0.962	0.955
	Saghez	0.952	0.953
	Sarab	0.898	0.896
	Tabriz	0.873	0.853
	Takab	0.816	0.794
	Urmia	0.913	0.881
	Urmia Lake Basin	0.863	0.847
9-month	Mahabad	0.921	0.926
	Maragheh	0.912	0.894
	Saghez	0.927	0.926
	Sarab	0.749	0.737
	Tabriz	0.823	0.815
	Takab	0.904	0.880
	Urmia	0.958	0.957
	Urmia Lake Basin	0.867	0.850
12-month	Mahabad	0.791	0.733
	Maragheh	0.786	0.805
	Saghez	0.731	0.704
	Sarab	0.606	0.640
	Tabriz	0.698	0.701
	Takab	0.788	0.780
	Urmia	0.977	0.969
	Urmia Lake Basin	0.929	0.914

می‌شود که تقریباً کل حوضه در ماه‌های اکتبر تا نوامبر سال‌های مذکور (بجز دسامبر ۲۰۰۲) خشک‌سالی ضعیف تا شدید و در برخی مواد خشک‌سالی بسیار شدید را تجربه کرده است. نتایج توزیع مکانی شدت خشک‌سالی حوضه بر اساس شاخص‌های SPI-9 و mRAI-9 نشان می‌دهد که در ماه‌های اکتبر تا دسامبر سال‌های ۱۹۹۵ و ۲۰۰۲ خشک‌سالی با شدت کم‌تر و در مساحت کم‌تری رخ داده است. تقریباً کل سطح حوضه در دسامبر ۱۹۹۹، اکتبر تا دسامبر ۲۰۰۱، دسامبر ۲۰۱۰ و ۲۰۱۹ تحت تأثیر خشک‌سالی ضعیف تا متوسط است (شکل‌های ۱۱ و ۱۲).

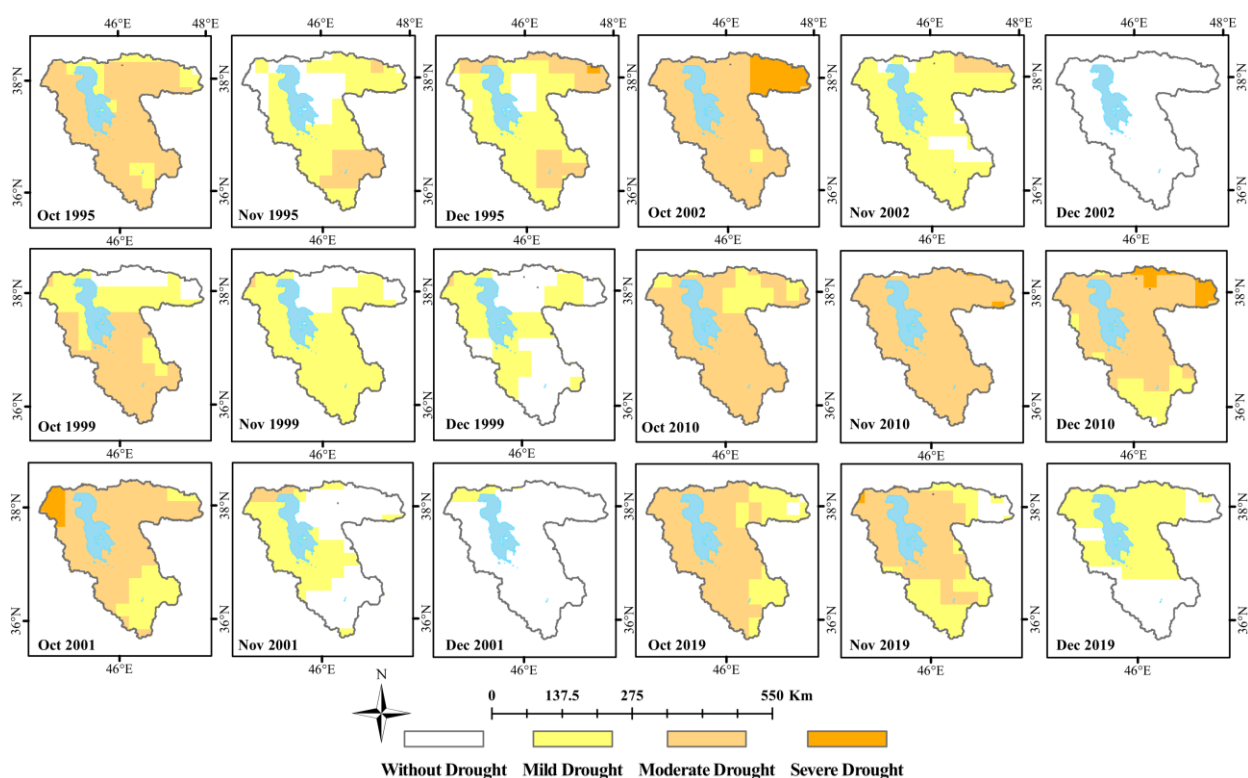
حوضه آبریز دریاچه ارومیه بر اساس شاخص‌های SPI-12 و mRAI-12 در ماه‌های اکتبر تا دسامبر سال‌های ۱۹۹۹ و ۲۰۰۱، نوامبر و دسامبر سال ۲۰۱۰ در اکثر نواحی خشک‌سالی را تجربه کرده است. نتایج نشان می‌دهد که در سال‌های ۱۹۹۵، ۲۰۰۲ و ۲۰۱۹ خشک‌سالی ناچیزی (ضعیف تا متوسط) در برخی نواحی اتفاق افتاده است (شکل‌های ۱۳ و ۱۴).

نقشه‌های شدت خشک‌سالی بر اساس شاخص‌های SPI و mRAI در مقیاس‌های زمانی مختلف برای ماه‌هایی با مقدار بارندگی بالا از جمله اکتبر، نوامبر و دسامبر در طول سال‌های ۱۹۹۵، ۱۹۹۹، ۲۰۰۱، ۲۰۰۲، ۲۰۱۰ و ۲۰۱۹ به‌ترتیب در شکل‌های ۷ تا ۱۴ ارائه شده است. سال‌های مذکور بر اساس میانگین بارندگی ۳۰ ساله ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه، شدیدترین خشک‌سالی‌ها در بیش‌تر مناطق حوضه رخ داده است. نتایج نشان می‌دهد که بر اساس شاخص‌های SPI-3 و mRAI-3 در اکتبر سال‌های ۱۹۹۵، ۲۰۰۱ و ۲۰۰۲؛ اکتبر تا دسامبر سال ۲۰۱۰؛ اکتبر و نوامبر ۲۰۱۹ بیش‌تر نواحی حوضه تحت تأثیر خشک‌سالی متوسط بوده است (شکل‌های ۷ و ۸).

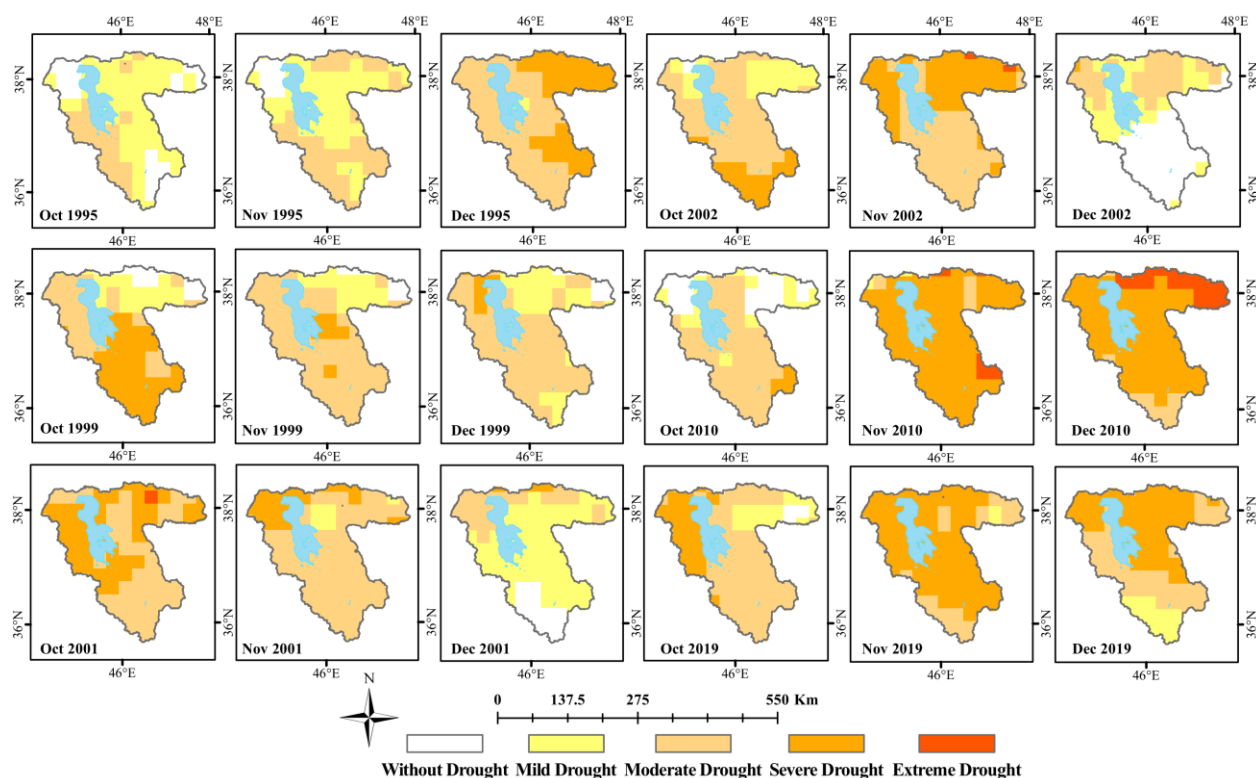
شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان می‌دهند که شدت خشک‌سالی در سطح حوضه در ماه‌های اکتبر، نوامبر و دسامبر سال‌های ۱۹۹۵، ۱۹۹۹، ۲۰۰۱، ۲۰۰۲ و ۲۰۱۰ بر اساس شاخص‌های SPI-6 و mRAI-6 نسبت به مقیاس زمانی سه ماهه بیش‌تر است. مشاهده



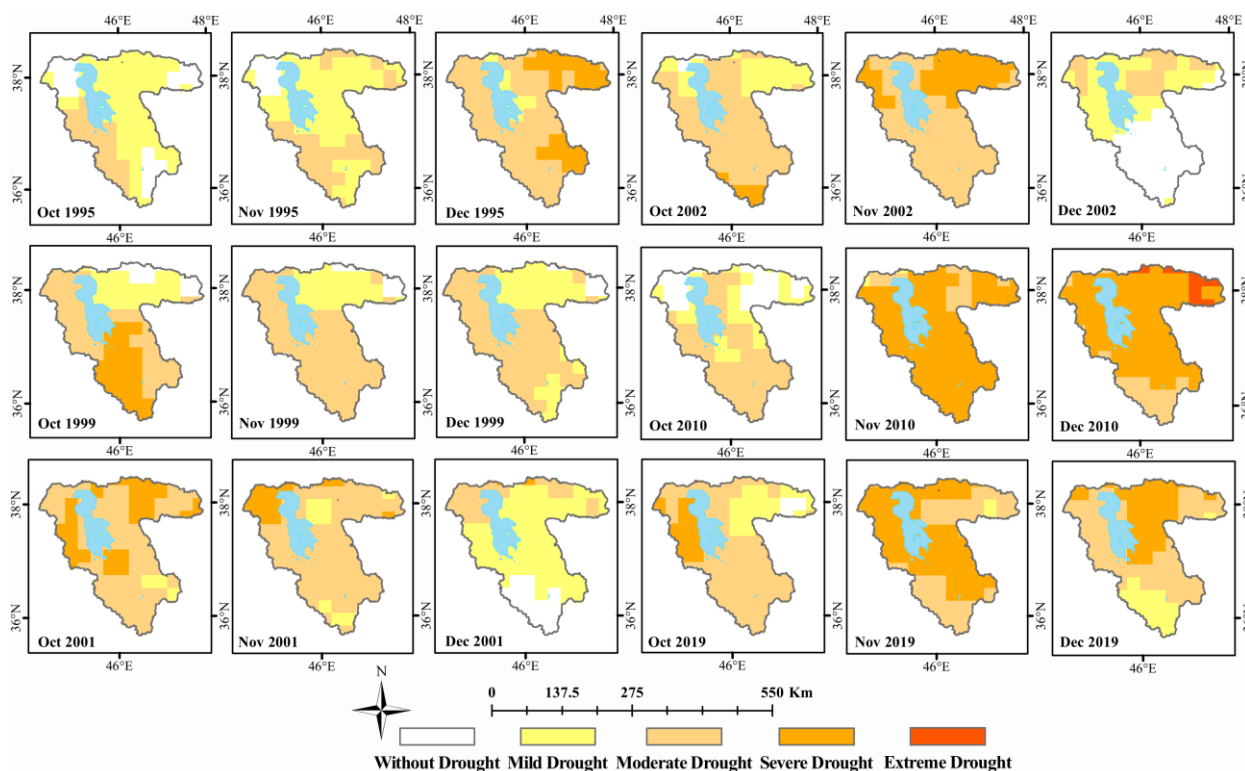
شکل ۷- توزیع مکانی شدت خشک سالی بر اساس SPI-3 در حوضه آبریز دریاچه ارومیه
Figure 7. Spatial distribution of drought severity based on the SPI-3 index at the basin scale



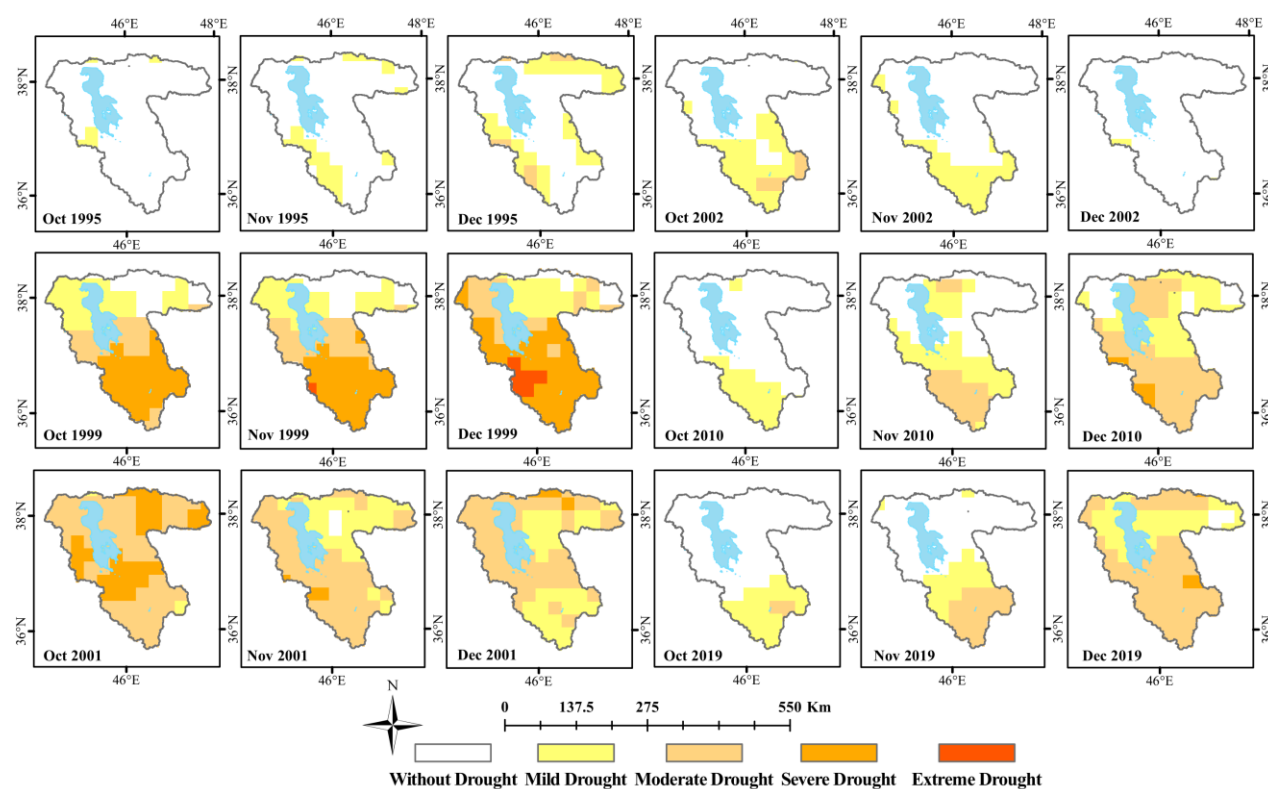
شکل ۸- توزیع مکانی شدت خشک سالی بر اساس mRAI3 در حوضه آبریز دریاچه ارومیه
Figure 8. Spatial distribution of drought severity based on the mRAI3 index at the basin scale



شکل ۹- توزیع مکانی شدت خشکسالی بر اساس SPI-6 در حوضه آبریز دریاچه ارومیه
Figure 9. Spatial distribution of drought severity based on the SPI-6 index at the basin scale

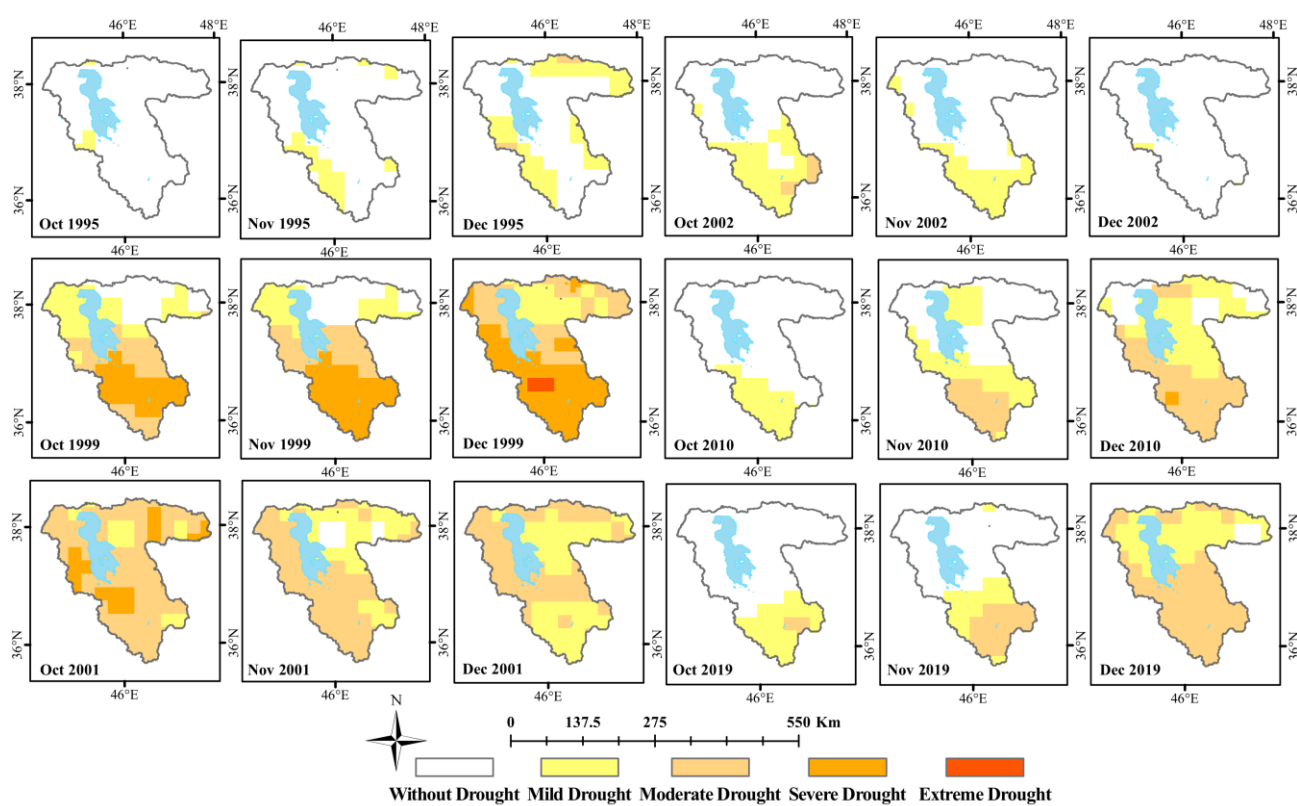


شکل ۱۰- توزیع مکانی شدت خشکسالی بر اساس mRAI6 در حوضه آبریز دریاچه ارومیه
Figure 10. Spatial distribution of drought severity based on the mRAI6 index at the basin scale



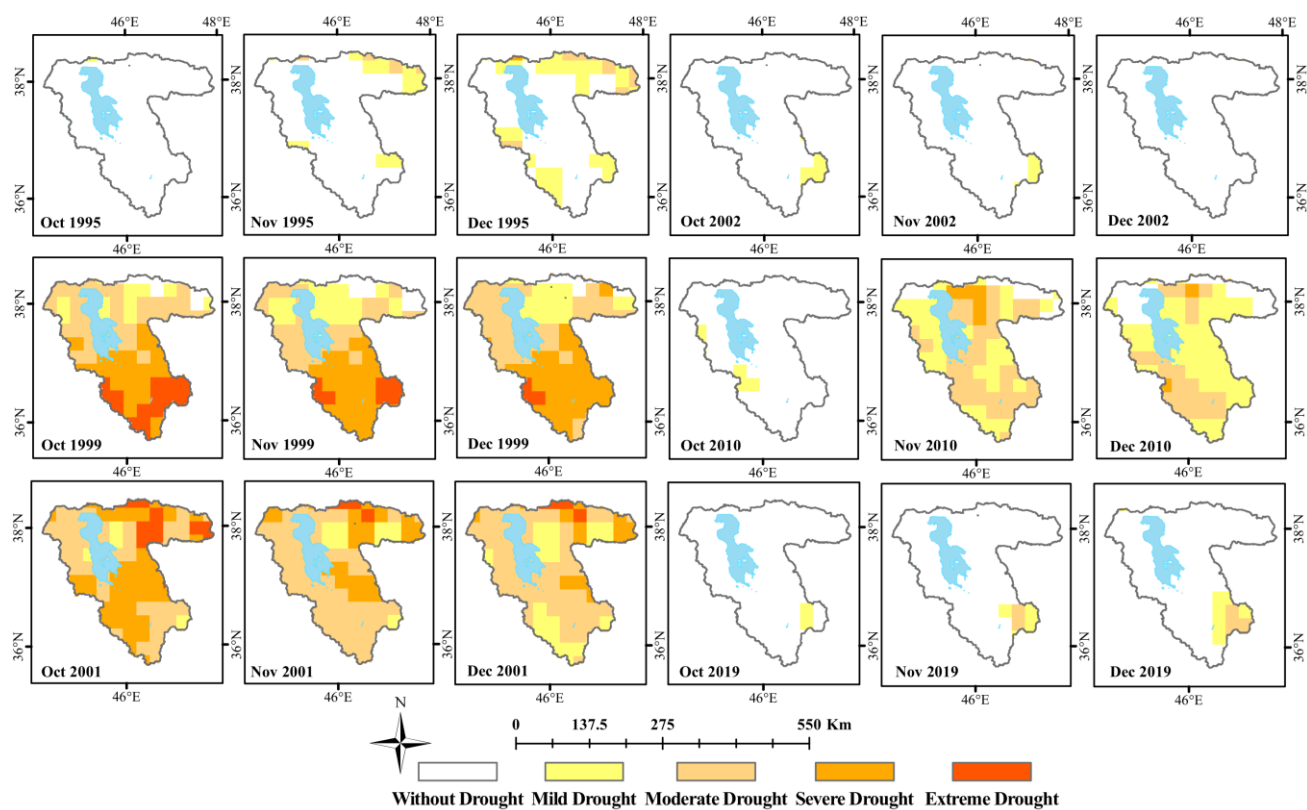
شکل ۱۱- توزیع مکانی شدت خشک سالی بر اساس SPI-9 در حوضه آبریز دریاچه ارومیه

Figure 11. Spatial distribution of drought severity based on the SPI-9 index at the basin scale

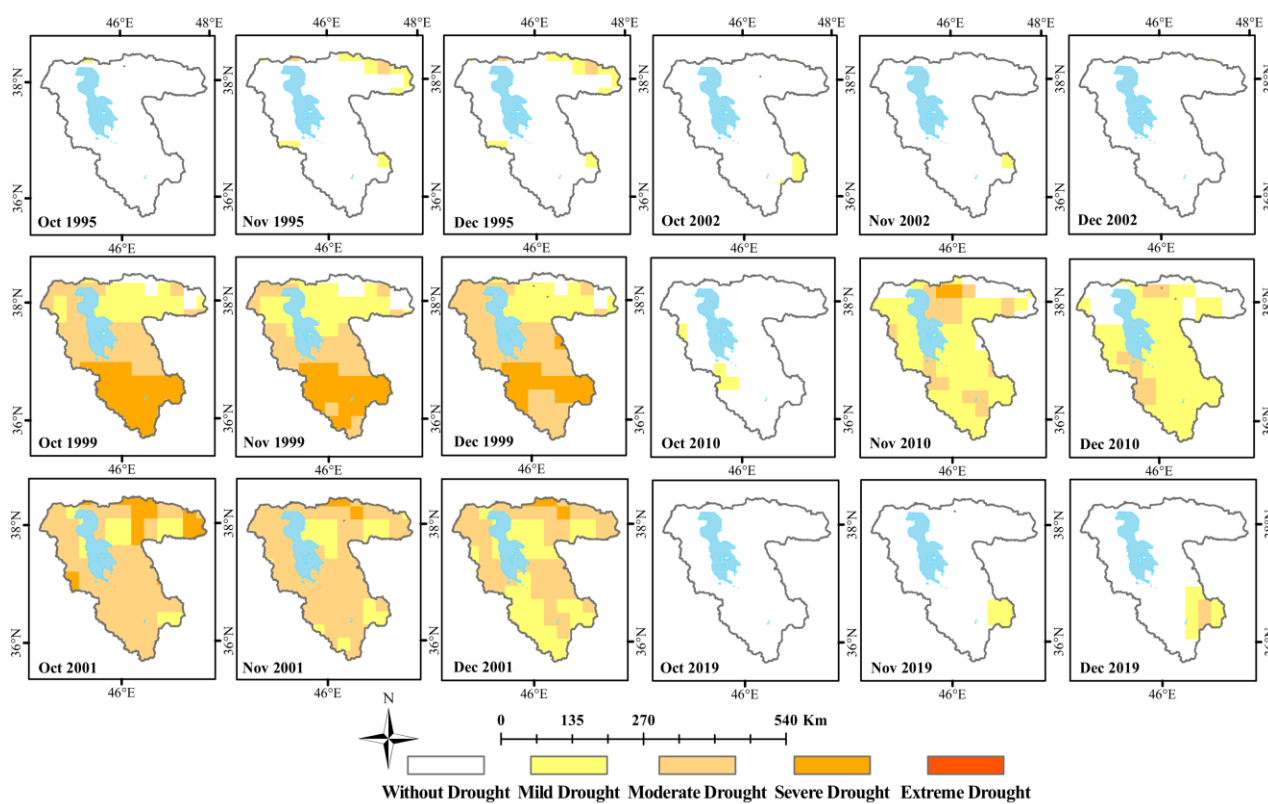


شکل ۱۲- توزیع مکانی شدت خشک سالی بر اساس mRAI9 در حوضه آبریز دریاچه ارومیه

Figure 12. Spatial distribution of drought severity based on the mRAI9 index at the basin scale



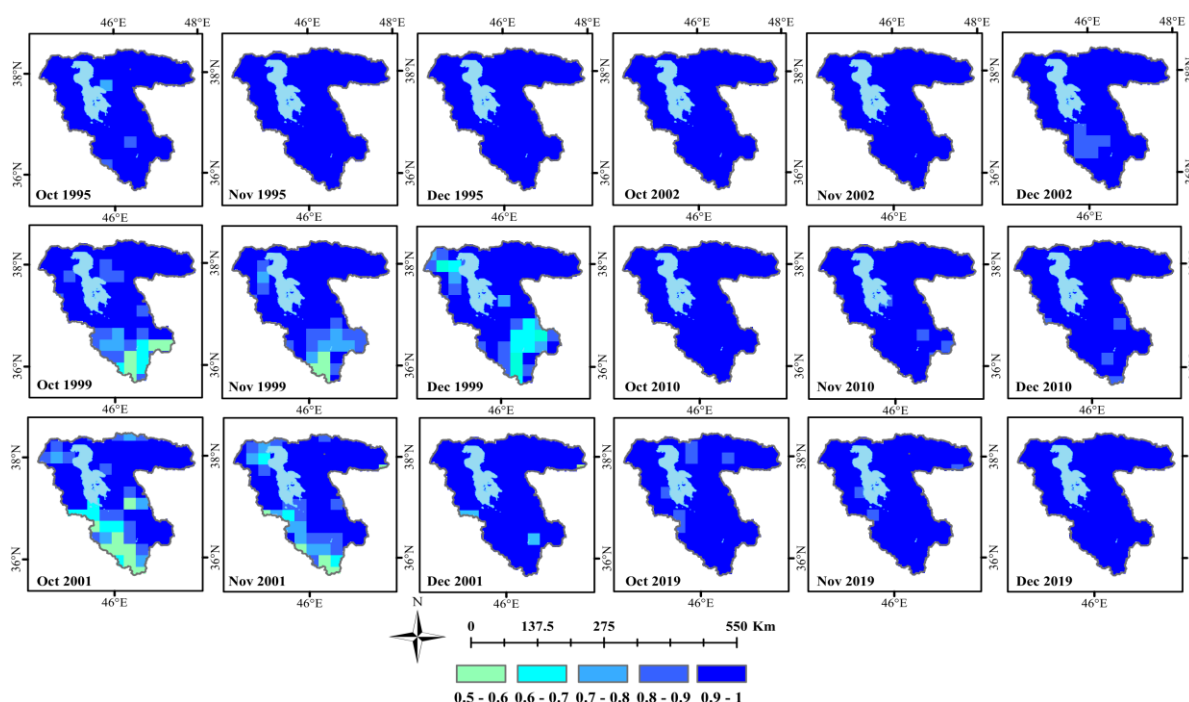
شکل ۱۳- توزیع مکانی شدت خشکسالی بر اساس SPI-12 در حوضه آبریز دریاچه ارومیه
Figure 13. Spatial distribution of drought severity based on the SPI-12 index at the basin scale



شکل ۱۴- توزیع مکانی شدت خشکسالی بر اساس mRAI12 در حوضه آبریز دریاچه ارومیه
Figure 14. Spatial distribution of drought severity based on the mRAI12 index at the basin scale

سازگار است. با این حال، در نوامبر تا دسامبر سال ۱۹۹۹ و اکتبر ۲۰۰۱، ضریب همبستگی در بخش محدودی از حوضه در بازه ۰/۵ تا ۰/۸ قرار دارد که حاکی از همبستگی متوسط و وجود تفاوت‌های منطقه‌ای یا تأثیر شرایط اقلیمی و محیطی خاص در آن سال است. بارش‌های نامنظم یا کاهش یافته در برخی مناطق می‌تواند باعث شود که mRAI و SPI رفتار متفاوتی نشان دهند (Ekpetere et al., 2025). این تفاوت به دلیل روش‌های محاسباتی متفاوت این دو شاخص است، که mRAI را به تغییرات بلندمدت در سری زمانی بارش و SPI را به توزیع نرمال حساس تر می‌کند.

نقشه‌های ضریب همبستگی پیرسون بین شاخص‌های SPI و mRAI در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه تهیه و ارائه شده‌اند (شکل ۱۵). نتایج نشان می‌دهد که در ماه‌های نوامبر تا دسامبر سال‌های ۱۹۹۵، ۲۰۰۲، ۲۰۱۰ و ۲۰۱۹ مقدار ضریب همبستگی در بیش‌تر سطح حوضه بالای ۰/۹ است. این مقادیر بیانگر وجود رابطه خطی قوی و مثبت بین دو شاخص مذکور است که می‌تواند به هماهنگی قابل توجه در الگوهای زمانی و مکانی این شاخص‌ها در بازه‌های زمانی ذکر شده نسبت داده شود. این نتیجه با یافته‌های مطالعات مشابه از جمله (Raziei (2021 و Hānsel et al., 2016 که همبستگی بالای ۰/۹ بین SPI و mRAI را گزارش کرده‌اند،



شکل ۱۵- ضریب همبستگی پیرسون بین شاخص‌های SPI-12 و mRAI-12
Figure 15. Pearson correlation coefficient between the SPI-12 and mRAI-12 indices

حال در مناطقی که داده‌های بارندگی در بیش‌تر ماه‌ها صفر بوده و یا اغلب داده‌ها ناقص هستند، محاسبه شاخص mRAI مناسب‌تر است. لذا می‌توان شاخص mRAI را به عنوان شاخصی قابل استفاده و مناسب برای آب و هوای خشک معرفی کرد. در استفاده از داده‌های پایگاه شبکه‌ای بارش، برخی محدودیت‌ها و مشکلات وجود دارد. در این ارتباط می‌توان گفت قدرت تفکیک مکانی داده‌های GPCC (۰/۲۵ درجه، معادل تقریبی ۲۵ کیلومتر) در مناطق با پیچیدگی‌های توپوگرافیک بالا ممکن است به کاهش دقت تخمین بارش منجر شود. علاوه بر این، وابستگی به داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک محدود و عدم اعمال تصحیحات مکانی برای خطاهای داده‌های شبکه‌ای می‌تواند بر صحت نتایج تأثیر بگذارد. پیشنهاد می‌شود از روش‌های ریز مقیاس و تصحیح خطای

۴- نتیجه گیری

ارزیابی داده‌های بارش GPCC نشان داد که این مجموعه داده از دقت بالایی برای تخمین بارش ماهانه در حوضه آبریز دریاچه ارومیه برخوردار است و برای محاسبه شاخص‌های خشک‌سالی SPI و mRAI در مقیاس‌های زمانی ۳، ۶، ۹، و ۱۲ ماهه مناسب است. مقایسه این شاخص‌ها در دوره ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۰ همبستگی قوی و تطابق بالای آن‌ها را در ارزیابی شدت خشک‌سالی در ایستگاه‌های سینوپتیک و کل حوضه را تأیید کرد. توزیع مکانی شدت خشک‌سالی شاخص‌های SPI و mRAI در مقیاس‌های زمانی ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه و توزیع مقادیر شاخص‌ها بین طبقه‌های مختلف خشک‌سالی نشان‌دهنده تطابق بسیار قوی بین SPI و mRAI طی دوره آماری ۳۰ ساله (۱۹۹۱ تا ۲۰۲۰) است. با این

دست‌رسی به داده‌ها

داده‌ها و نقشه‌های مرتبط با شاخص‌های خشکسالی، با درخواست از نویسنده مسئول، صرفاً برای اهداف پژوهشی فراهم است.

مشارکت نویسندگان

سپیده هادی‌پور: آماده‌سازی داده‌ها، تجزیه و تحلیل، محاسبات، تهیه پیش‌نویس؛ مهدی عرفانیان: نظارت پژوهش، مفهوم‌سازی، بحث، ویرایش مقاله؛ سیما کاظم‌پور چورسی: تحلیل خشکسالی، برنامه‌نویسی، تولید نقشه‌ها، ویرایش مقاله.

منابع

حلییان، امیرحسین، و قاسمی‌سیانی، علی (۱۴۰۰). بررسی روند مکانی و زمانی بارش در حوضه خزر با استفاده از داده‌های مرکز اقلیم‌شناسی بارش جهان. مهندسی و مدیریت آب، ۱۳(۲): ۲۸۳-۲۹۴. doi: 10.22092/ijwmse.2020.125399.1610

صادقیان آق‌کندی، مرضیه، رضایی، حسین، خلیلی، کیوان، و احمدی، فرشاد (۱۴۰۲). کاربرد داده‌های شبکه‌ای CRU و GPCC در تحلیل خشکسالی‌های بلند مدت حوضه آبریز دریاچه ارومیه. پژوهش‌های حفاظت آب و خاک، ۳۰(۳): ۱۲۵-۱۰۷. doi: 10.22069/jwsc.2024.21431.3654

منتصری، مجید، امیرعطایی، بابک، و خلیلی، کیوان (۱۳۹۵). تحلیل روند تغییرات زمانی و مکانی دوره‌های خشکسالی و ترسالی شمال غرب کشور بر اساس دو شاخص خشکسالی SPI و RAI. آب و خاک، ۳۰(۲): ۶۷۱-۶۵۵. doi: 10.22067/jsw.v30i2.39679

نویدی نساج، بهزاد، ظهرا، نرگس، نیکبخت شهپازی، علیرضا، و فتحیان، حسین (۱۴۰۰). ارزیابی داده‌های بارش شبکه‌بندی جهانی در پایش خشکسالی (مطالعه موردی: حوضه آبریز کارون بزرگ). حفاظت منابع آب و خاک، ۱۰(۳): ۷۹-۹۶.

قبل از تولید نقشه‌های خشکسالی در سایر مناطق ایران استفاده شود. تصحیح خطا و کالیبراسیون پایگاه بارش بر اساس روش‌های آماری پیشرفته مانند رگرسیون چندکی و رگرسیون وزنی جغرافیایی می‌تواند باعث کاهش خطای داده‌های شبکه‌ای بارش شود. داده‌های بارش GPCC دارای قدرت تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه (حدود ۲۵ کیلومتر) می‌باشند. پیشنهاد می‌شود که این مجموعه داده‌های بارش برای تعیین پهنه‌های شدت خشکسالی با استفاده از روش‌های آماری نظیر رگرسیون وزنی جغرافیایی یا الگوریتم‌های یادگیری ماشین ریزمقیاس‌سازی شوند تا امکان تولید نقشه‌های بارش و شدت خشکسالی با رزولوشن مکانی بالا (زیر ۱۰۰۰ متر) فراهم شود. این اقدامات می‌تواند دقت تحلیل‌های خشکسالی را در مناطق با اقلیم‌های متنوع بهبود بخشد و به مدیریت بهتر منابع آب کمک کند. در مطالعه حاضر، تحلیل روند زمانی مانند آزمون من-کندال یا شیب سن انجام نشده است. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، از روش‌های ایستایی و ناپایستگی در تحلیل روند شاخص‌های خشکسالی استفاده شود تا درک بهتری از الگوهای بلندمدت به‌دست آید.

سپاسگزاری

نویسندگان از سازمان هواشناسی ایران برای ارائه داده‌های بارش ماهانه صمیمانه قدرانی می‌کنند. همچنین، مراتب سپاس خود را به داوران ناشناس و ویراستار مجله برای نظرات، پیشنهادات ارزشمند و چشم‌گیر آنان ابراز می‌دارند که به ارتقای کیفی مقاله، کمک شایانی کرد.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تضاد منافی در خصوص نگارش و انتشار مطالب و نتایج این پژوهش ندارند.

References

- Araghi A, & Adamowski, J. (2024). Assessment of 30 gridded precipitation datasets over different climates on a country scale. *Earth Science Informatics*, 17, 1301-1313. doi: 10.1007/s12145-023-01215-0
- Basheer, M., & Elagib, N. A. (2019). Performance of satellite-based and GPCC 7.0 rainfall products in an extremely data-scarce country in the Nile Basin. *Atmospheric Research*, 215, 128-140. doi: 10.1016/j.atmosres.2018.08.028.
- Bashirian, F., Rahimi, D., Movahedi, S., & Zakerinejad, R. (2020). Water level instability analysis of Urmia Lake Basin in the northwest of Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 13, 1-14. doi: 10.1007/s12517-020-5207-1.

- Bayissa, Y., Tadesse, T., Demisse, G., & Shiferaw, A. (2017). Evaluation of satellite-based rainfall estimates and application to monitor meteorological drought for the Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Remote Sensing*, 9(7), 669. doi: 10.3390/rs9070669.
- Bhalme, H. N., & Mooley, D. A. (1980). Large-scale droughts/floods and monsoon circulation. *Monthly Weather Review*, 108, 1197-1211. doi: 10.1175/1520-0493(1980)108<1197:LSDAMC>2.0.CO;2.
- Chen, L., Brun, P., Buri, P., Fatichi, S., Gessler, A., McCarthy, M. J., Pellicciotti, F., Stocker, B., & Karger, D. N. (2025). Global increase in the occurrence and impact of multiyear droughts. *Science*, 387(6731), 278-284. doi: 10.1126/science.ado4245.

- Ekpetere, K. O. (2025). Development and evaluation of the modified and standardized rainfall anomaly indices for extreme variability analysis. *Journal of Environmental Management*, 375, 124160. doi: 10.1016/j.jenvman.2025.124160.
- Fluixá-Sanmartín, J., Pan, D., Fischer, L., Orłowsky, B., García-Hernández, J., Jordan, F., Haemmig, Ch., Zhang, F., & Xu, J. (2018). Searching for the optimal drought index and timescale combination to detect drought: A case study from the lower Jinsha River basin, China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(1), 889-910. doi: 10.5194/hess-22-889-2018.
- Javan, K., Azizzadeh, M. R., & Yousefi, S. (2016). An Investigation and assessment of meteorological drought in Lake Urmia Basin using drought indices and probabilistic methods. *Natural Environment Change*, 2(2), 153-164.
- Halabian, A., & Ghasemi Siani, A. (2021). Analysis of the spatial and temporal trend in precipitation on Caspian basin using GPCP data. *Watershed Engineering and Management*, 13(2), 283-294. doi: 10.22092/ijwmse.2020.125399.1610. [In Persian]
- Hänsel, S., Schucknecht, A., & Matschullat, J. (2016). The Modified Rainfall Anomaly Index (mRAI)—is this an alternative to the Standardized Precipitation Index (SPI) in evaluating future extreme precipitation characteristics?. *Theoretical and Applied Climatology*, 123, 827-844. doi: 10.1007/s00704-015-1389-y.
- Heydari Tashah Kabood, S., Hosseini, S. A., & Heydari Tashah Kabood, A. (2020). Investigating the effects of climate change on stream flows of Urmia Lake basin in Iran. *Modeling Earth Systems and Environment*, 6, 329-339. doi: 10.1007/s40808-019-00681-0.
- Karavitis, C. A., Alexandris, S., Tsesmelis, D. E., & Athanasopoulos, G. (2011). Application of the standardized precipitation index (SPI) in Greece. *Water*, 3(3), 787-805. doi: 10.3390/w3030787.
- Kazempour Choursi, S., Erfanian, M., Abghari, H., Miryaghoubzadeh, M., & Javan, K. (2024). Enhancing drought monitoring through spatial downscaling: A geographically weighted regression approach using TRMM 3B43 precipitation in the Urmia Lake Basin. *Earth Science Informatics*, 17, 1-26. doi: 10.1007/s12145-024-01324-4.
- Keyantash, J., & Dracup, J. A. (2002). The quantification of drought: an evaluation of drought indices. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(8), 1167-1180. doi: 10.1175/1520-0477-83.8.1167.
- Lu, J., Jia, L., Menenti, M., Yan, Y., Zheng, C., & Zhou, J. (2018). Performance of the standardized precipitation index based on the TMPA and CMORPH precipitation products for drought monitoring in China. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 11(5), 1387-1396. doi: 10.1109/JSTARS.2018.2810163.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to timescales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, 17(22), 179-183.
- Manzano, A., Clemente, M. A., Morata, A., Luna, M. Y., Beguería, S., Vicente-Serrano, S. M., & Martín, M. L. (2019). Analysis of the atmospheric circulation pattern effects over SPEI drought index in Spain. *Atmospheric Research*, 230, 104630. doi: 10.1016/j.atmosres.2019.104630.
- Mishra, A. K., & Desai, V. R. (2005). Spatial and temporal drought analysis in the Kansabati river basin, India. *International Journal of River Basin Management*, 3(1), 31-41. doi: 10.1080/15715124.2005.9635243.
- Montaseri, M., Amirataee, B., & Khalili, K. (2016). Identification of trend in spatial and temporal dry and wet periods in northwest of Iran based on SPI and RAI indices. *Water and Soil*, 30(2), 655-671. doi: 10.22067/jsw.v30i2.39679. [In Persian]
- Navidi, N. B., Zohrabi, N., Nikbakht, S. A., & Fathian, H. (2021). Evaluation of global gridded precipitation datasets for drought monitoring (case study: great Karoon watershed). *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, 10(3), 79-96. [In Persian]
- Mpelasoka, F., Hennessy, K., Jones, R., & Bates, B. (2008). Comparison of suitable drought indices for climate change impacts assessment over Australia towards resource management. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 28(10), 1283-1292. doi: 10.1002/joc.1649.
- Palmer, W. C. (1965). Meteorological drought. US Department of Commerce, Weather Bureau.
- Patel, N. R., Chopra, P., & Dadhwal, V. K. (2007). Analyzing spatial patterns of meteorological drought using standardized precipitation index. *Meteorological Applications: A journal of forecasting, practical applications, training techniques and modelling*, 14(4), 329-336. doi: 10.1002/met.33.
- Raziei, T. (2021). Revisiting the rainfall anomaly index to serve as a simplified standardized precipitation index. *Journal of Hydrology*, 602, 126761. doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.126761.

- Raziei, T., Bordi, I., & Pereira, L. S. (2011). An application of GPCC and NCEP/NCAR datasets for drought variability analysis in Iran. *Water Resources Management*, 25, 1075-1086. doi: 10.1007/s11269-010-9657-1.
- Sadeghian Aghkandi, M., Rezaie, H., Khalili, K., & Ahmadi, F. (2023). Using of CRU and GPCC data base in the analysis of long-term droughts in the Urmia Lake basin. *Journal of Water and Soil Conservation*, 30(3), 107-125. doi: 10.22069/jwsc.2024.21431.3654. [In Persian]
- Saemian, P., Hosseini-Moghari, S. M., Fatehi, I., Shoarinezhad, V., Modiri, E., Tourian, M. J., Tang, Q., Nowak, W., Bárdossy, A., & Sneeuw, N. (2021). Comprehensive evaluation of precipitation datasets over Iran. *Journal of Hydrology*, 603, 127054. doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.127054.
- Schneider U, Hänsel, S, Finger, P, Rustemeier, E, & Ziese, M. (2022). GPCC full data monthly product version 2022 at 0.25°: monthly land-surface precipitation from rain-gauges built on GTS-based and historical data. Global Precipitation Climatology Centre (GPCC), Deutscher Wetterdienst (DWD). doi: 10.5676/DWD_GPCC/FD_M_V2022_025.
- Shirmohammadi, B., Malekian, A., Salajegheh, A., Taheri, B., Azarnivand, H., Malek, Z., & Verburg, P. H. (2020). Scenario analysis for integrated water resources management under future land use change in the Urmia Lake region, Iran. *Land Use Policy*, 90, 104299. doi: 10.1016/j.landusepol.2019.104299.
- Spinoni, J., Naumann, G., Vogt, J., & Barbosa, P. (2015). European drought climatologies and trends based on a multi-indicator approach. *Global and Planetary Change*, 127, 50-57. doi: 10.1016/j.gloplacha.2015.01.012.
- Stagge, J. H., Tallaksen, L. M., Gudmundsson, L., Van Loon, A. F., & Stahl, K. (2016). Response to comment on 'candidate distributions for climatological drought indices (SPI and SPEI)'. *International Journal of Climatology*, 36(4). doi: 10.1002/joc.4564.
- Sutapa, I. W., Arafat, Y., Lipu, S., & Rustiati, N. B. (2024). A comparative study of SPI, PCI, PCD, and RAI methods for estimating drought in the Palu River Basin, Indonesia. In IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science*, 1311(1), 1-15 IOP Publishing. doi: 10.1088/1755-1315/1311/1/012056.
- Tang, G., Ma, Y., Long, D., Zhong, L., & Hong, Y. (2016). Evaluation of GPM Day-1 IMERG and TMPA Version-7 legacy products over Mainland China at multiple spatiotemporal scales. *Journal of Hydrology*, 533, 152-167. doi: 10.1016/j.jhydrol.2015.12.008.
- Van-Rooy, M. (1965). A Rainfall Anomaly Index (RAI), independent of the time and space. *Notos*, 14: 43-48.
- 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.
- Wang, W., Ertsen, M. W., Svoboda, M. D., & Hafeez, M. (2016). Propagation of drought: from meteorological drought to agricultural and hydrological drought. *Advances in Meteorology*, 2016. doi: 10.1155/2016/6547209.
- Wei, L., Jiang, S., Ren, L., Yuan, F., & Zhang, L. (2019). Performance of two long-term satellite-based and GPCC 8.0 precipitation products for drought monitoring over the Yellow River Basin in China. *Sustainability*, 11(18), 4969. doi: 10.3390/su11184969.
- Xiang, Y., Chen, J., Li, L., Peng, T., & Yin, Z. (2021). Evaluation of eight global precipitation datasets in hydrological modeling. *Remote Sensing*, 13(14), 2831. doi: 10.3390/rs1314283.
- Xiong, H., Han, J., & Yang, Y. (2025). Propagation from meteorological to hydrological drought: characteristics and influencing factors. *Water Resources Research*, 61(4), e2024WR037765. doi: 10.1029/2024WR037765
- Zhong, R., Chen, X., Lai, C., Wang, Z., Lian, Y., Yu, H., & Wu, X. (2019). Drought monitoring utility of satellite-based precipitation products across mainland China. *Journal of Hydrology*, 568, 343-359. doi: 10.1016/j.jhydrol.2018.10.072.