

Analysis of meteorological drought characteristics in Iran using high-resolution TerraClimate data and the runs theory

Ayub Mirzaei Hassanlu¹ , Mahdi Erfanian^{2*} , Sima Kazempour Choursi³ 

¹ Ph.D., 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, Iran

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

Extended Abstract

Introduction

Drought is one of the most significant natural hazards in arid and semi-arid regions, affecting water resources, agriculture, vegetation, and human health. Iran, located in the arid belt of the world, frequently experiences severe and prolonged droughts, which have intensified in recent decades due to climate change and precipitation variability. Assessing drought characteristics and monitoring is essential for effective water resource management and risk reduction. Drought can be classified as meteorological, agricultural, or hydrological, depending on the component of the hydrological cycle affected. Traditional drought monitoring relies on sparse ground-based station data, which often has limited coverage and spatial resolution. High-resolution gridded climate datasets, such as TerraClimate, provide long-term monthly data on precipitation, temperature, evapotranspiration, and other hydrological variables, overcoming the limitations of sparse station networks. The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI), a widely used meteorological drought index, integrates precipitation and potential evapotranspiration to quantify drought intensity and duration more realistically, particularly under changing climatic conditions. Event-based approaches, such as the Runs Theory, enable the identification and characterization of drought episodes, including their duration, intensity, magnitude (severity), and interevent intervals. This study applies SPEI and the runs theory to high-resolution TerraClimate data (1985–2024) to assess drought characteristics across Iran. At the national scale, this framework enables detailed spatiotemporal analysis of short-, medium-, and long-term droughts, providing valuable information for water management, agricultural planning, and climate adaptation strategies.

Materials and Methods

TerraClimate gridded data (1985–2024), comprising monthly precipitation and potential evapotranspiration at a spatial resolution of 1/24° (approximately 4 km), were employed. The SPEI at pixel level was computed at 3-, 9-, and 12-month timescales to evaluate short-, medium-, and long-term drought events. Calculation involved: (1) derivation of the monthly climatic water balance (precipitation minus potential evapotranspiration); and (2) standardisation using a three-parameter log-logistic probability distribution and transferring the probability value to a normal distribution. Drought events were delineated using the run theory, with monthly percentile thresholds applied to account for seasonal variability and consecutive drought periods. Principal drought characteristics included duration, magnitude or severity, intensity, inter-event intervals, and event frequency over the period 1985–2024. Trend analysis used the modified Mann-Kendall test to identify significant spatiotemporal changes in SPEI, with serial correlation adjusted for. All analyses were performed in Python, using a raster-based dataset to ensure comprehensive spatial coverage and to detect localized patterns that are often undetected by station networks. This integrated approach—combining multi-timescale drought assessment, event-based characterisation, and trend detection—provides a thorough evaluation of drought risk and dynamics across Iran's arid, semi-arid, and relatively humid regions.

Results and Discussion

Drought conditions in Iran intensified in duration, severity, and spatial extent from 1985 to 2024, exhibiting considerable regional heterogeneity. Seasonal or short-term (3-month) droughts occurred frequently in northern Iran, whereas the central, eastern, and southeastern arid regions experienced longer and more intense droughts. At the 9-month timescale, droughts extended regionally, revealing persistent water deficits in the central and eastern areas. Annual or long-term (12-month) droughts affected nearly the entire country, sparing only narrow northern coastal zones, and underscoring widespread hydrological stress. Analyses of cumulative severity and intensity indicated disproportionate impacts in central and southeastern Iran, aligning with prior reports of elevated drought

risk in these zones. Event frequency revealed that arid regions experienced fewer but more severe and persistent droughts, suggesting delayed recovery and accumulated hydrological deficits. The modified Mann-Kendall test detected significant negative trends in SPEI across more than 95% of the country at the 3-month timescale, over 99% at the 9-month timescale, and nationwide at the 12-month scale. These trends reflect a progression from localized seasonal droughts to pervasive national-scale phenomena, extending even to historically wetter northern areas. High-resolution gridded datasets demonstrated clear advantages over traditional station-based methods in resolving fine-scale and regional drought patterns. The combination of SPEI and run theory provides a robust framework for characterising drought properties, temporal evolution, and spatial variability, offering essential insights for water resource management and climate adaptation.

Conclusion

This analysis provides a comprehensive evaluation of drought characteristics and trends in Iran from 1985 to 2024, based on high-resolution TerraClimate data, SPEI, and run theory. Results show increased drought duration, intensity, and spatial extent, particularly in central, eastern, and southeastern regions, with a shift from seasonal events to persistent nationwide hydrological stress. Run theory enabled precise quantification of duration, severity, intensity, and inter-event intervals, highlighting limitations of station-based monitoring in resolving fine-scale dynamics. Nationwide significant negative SPEI trends underscore escalating hydrological drought and the need for multi-timescale, data-informed management approaches. The framework serves as an operational tool for early warning, climate adaptation, agricultural planning, and water allocation, with potential application to other arid and semi-arid regions worldwide. Integration of high-resolution gridded data, multi-timescale indices, and event-based analysis enhances resilience to climate variability and supports evidence-based policy for sustainable water and agricultural management. This transferable methodology facilitates broader national and regional drought risk assessment.

Keywords: Drought events, SPEI, Trend detection, TerraClimate.

Article Type: Research Article

Acknowledgment

We extend our gratitude to the anonymous reviewers and the editor for their valuable comments and suggestions.

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

Ayub Mirzaei Hassanlu: Data preparation, investigation, computations, visualization, and drafting the manuscript; **Mahdi Erfanian:** Supervision, conceptualization, discussion, validation, and editing the final version of the manuscript; **Sima Kazempour Choursi:** Analysis, computations, visualization, and drafting the manuscript.

***Corresponding Author, E-mail:** m.erfanian@urmia.ac.ir; erfanian.ma@gmail.com

Citation: Mirzaei Hassanlu, A., Erfanian, M., & Kazempour Choursi, S. (2026). Analysis of meteorological drought characteristics in Iran using high-resolution TerraClimate data and the runs theory. *Water and Soil Management and Modeling*, 6(3), 111-130.

doi: 10.22098/mmws.2026.19172.1766

Received: 31 December 2025, Received in revised form: 18 February 2026, Accepted: 07 March 2026, Published online: 27 August 2026.

Water and Soil Management and Modeling, Year 2026, Vol. 6, No. 3, pp. 111-130.

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)





تحلیل ویژگی های خشکسالی هواشناسی ایران با داده های قدرت تفکیک بالای TerraClimate و نظریه دنباله ها

ایوب میرزائی حسنلو^۱، مهدی عرفانیان^{۲*}، سیما کاظم پور چورسی^۳

^۱ دانش آموخته دکتری، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
^{۲*} دانشیار، گروه آبخیزداری، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
^۳ دانش آموخته دکتری، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

چکیده

خشکسالی از مهم ترین مخاطرات اقلیمی در مناطق خشک و نیمه خشک است. در دهه های اخیر، تداوم، شدت، فراوانی خشکسالی ها تحت تأثیر تغییرات به طور چشمگیری افزایش یافته است. پهنه ایران به دلیل موقعیت جغرافیایی و نوسانات بارش، به طور گسترده در معرض خشکسالی قرار دارد. تحلیل خشکسالی در دو مقیاس مکانی و زمانی به منظور مدیریت منابع آب، اهمیت اساسی دارد. در این پژوهش برای اولین بار در ایران، شاخص خشکسالی هواشناسی SPEI یا شاخص استاندارد شده تفاضل بارش و تبخیر-تعرق پتانسیل در مقیاس های زمانی ۳، ۹ و ۱۲ ماهه با استفاده از داده های ماهانه پایگاه جهانی TerraClimate (قدرت تفکیک مکانی ۴ کیلومتر یا یک چهارم درجه) به صورت شبکه رستری ۰/۰۴ درجه در دوره آماری ۱۹۸۵-۲۰۲۴ استخراج شد. در هر پیکسل با، ویژگی های خشکسالی ها شامل تداوم، شدت، بزرگی، فاصله و فراوانی یا تعداد رخدادها با استفاده از نظریه دنباله ها (Runs Theory) و آستانه های صدکی استخراج شد. بعلاوه، از آزمون من-کندال اصلاح شده (MMK) برای تحلیل روند شاخص SPEI در هر پیکسل از ایران (۴*۴ کیلومتر) استفاده شد. نتایج نشان داد با افزایش مقیاس زمانی (۳ تا ۱۲ ماه)، تداوم، بزرگی و فاصله رخدادها، به طور چشمگیری افزایش داشته اما شدت خشکسالی، کاهش می یابد. مناطق مرکزی، شرقی و جنوب شرقی ایران، طولانی ترین تداوم، بیشترین شدت خشکسالی هواشناسی را تجربه کردند. در مقیاس ۱۲ ماهه، ویژگی های خشکسالی تقریباً در سراسر ایران به طور یکنواخت می باشد. تحلیل خشکسالی در حوضه های آبریز اصلی نشان داد، حوضه دریاچه خزر، کمترین و حوضه های مرکزی، شرقی-هامون و سرخس-قره قوم، بیشترین آسیب پذیری از نظر خشکسالی را دارند. آزمون MMK روند کاهشی معنادار شاخص SPEI را در پهنه ایران، بیش از ۹۵ درصد در مقیاس ۳ ماهه، بیش از ۹۹ درصد در مقیاس ۹ ماهه و ۱۰۰ درصد در مقیاس ۱۲ ماهه نشان می دهد. نتایج پژوهش نشان می دهد استفاده از داده های شبکه ای اقلیمی با قدرت تفکیک بالای پایگاه TerraClimate و نظریه دنباله ها، امکان پایش سریع خشکسالی هواشناسی را در تمام مناطق ایران فراهم ساخته و به عنوان ابزار مؤثر در برنامه ریزی منابع آب توصیه می شود.

واژه های کلیدی: وقایع خشکسالی، تشخیص روند، SPEI، TerraClimate

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: erfaniyan.ma@gmail.com ; m.erfaniyan@urmia.ac.ir

استناد: میرزائی حسنلو، ایوب، عرفانیان، مهدی، و کاظم پور چورسی، سیما (۱۴۰۵). تحلیل ویژگی های خشکسالی هواشناسی ایران با داده های قدرت تفکیک بالای TerraClimate و نظریه دنباله ها. *مدل سازی و مدیریت آب و خاک*، ۶(۳)، ۱۱۱-۱۳۰.

doi:10.22098/mmws.2026.19172.1766

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۱۰ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۱۲ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۰۵

مدل سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۵ دوره ۶ شماره ۳، صفحه ۱۱۱ تا ۱۳۰.

© نویسندگان

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی



۱- مقدمه

خشکسالی به عنوان یکی از پدیده های طبیعی، در نتیجه کمبود طولانی مدت منابع آب (بارش، رواناب، دبی، رطوبت خاک، تراز مخازن و سطح ایستابی) در یک بازه زمانی کوتاه تا بلند مدت رخ می دهد و اثرات منفی گسترده روی بخش های مختلف از جمله کشاورزی، منابع آب، پوشش گیاهی و سلامت انسان به ویژه در کشورهای در حال توسعه دارد (Liu et al., 2024). خشکسالی را می توان بر اساس میزان کمبود آب در چرخه هیدرولوژیک به انواع مختلف شامل خشکسالی هواشناسی، هیدرولوژیک و خشکسالی زراعی طبقه بندی کرد (Quiring and Ganesh, 2010). پدیده خشکسالی با کمبود آب و تغییر شدید مولفه های بیلان آب، گسترش می یابد که در مقیاس های مختلف بر اکوسیستم ها و جوامع انسانی اثر می گذارد. این پدیده از مخرب و پرهزینه ترین بلایای طبیعی در جهان شناخته می شود (Keyantash and Dracup, 2002). ایران به عنوان کشوری واقع در کمربند خشک و نیمه خشک جهان به طور مکرر با خشکسالی های شدید و ممتد مواجه بوده است (Ansari Amoli et al., 2022). در دهه های اخیر، تغییر اقلیم و تأثیرپذیری آن از الگوهای پیوند از دور به افزایش ویژگی های پدیده خشکسالی (شدت، تداوم و فراوانی) در مناطق مختلف ایران منجر شده است (Momeni Damaneh et al., 2025). شناسایی، تحلیل و پایش الگوهای زمانی و مکانی خشکسالی، گام اساسی در مدیریت منابع آب و کاهش آسیب پذیری مناطق اقلیمی ایران به شمار می رود (Shiravand and Bayat, 2023). تحلیل، کمی سازی و پایش خشکسالی، نقش اساسی در مدیریت ریسک و تحقق اثربخش سیاست های سازگاری با تغییر اقلیم ایفا می کند. تحلیل خشکسالی به داده های دقیق بارش وابسته است که نقش کلیدی در ارزیابی کمبود آب و شدت خشکسالی دارد. به طور سنتی، پایش خشکسالی بر اساس داده های زمینی ایستگاه های هواشناسی و باران سنج ها انجام می شود و در مناطق با تعداد و پراکنش ایستگاه محدود، استفاده از داده های اقلیمی جایگزین و قابل اعتماد (بارش و دما) اهمیت زیادی دارد. امروزه پایگاه و منابع گسترده برای دستیابی به داده های هیدرواقلمی در سطح جهانی به صورت شبکه ای یا رستری وجود دارد که امکان شناسایی تغییرات اقلیمی و تحلیل روندها را به طور جامع فراهم می کنند. در میان این منابع، TerraClimate داده های بلندمدت با قدرت تفکیک مکانی یا درجه وضوح مکانی بالا (حدود ۴ کیلومتر، ۰/۰۴ درجه)، مجموعه داده های هیدرواقلمی شامل بارش، دمای حداکثر، دمای حداقل

و تبخیر و تعرق پتانسیل را ارائه می دهد و محدودیت های داده های زمینی را برطرف می کند (Abatzoglou et al., 2018). شاخص های خشکسالی هواشناسی به عنوان پرکاربردترین ابزار برای کمی سازی و توصیف خشکسالی ها شناخته می شوند (Heim, 2002; Mukherjee et al., 2018). تنوع گسترده ای از این شاخص ها وجود دارد که هر یک مزایا و محدودیت های خاص خود را دارند و اغلب آن ها امکان تحلیل شدت و مدت خشکسالی فراهم می کنند (Mishra & Singh, 2010; Mukherjee et al., 2018). برخی از این شاخص ها به منظور ارزیابی خشکسالی هیدرولوژیک (دبی رودخانه، تراز مخزن، سطح ایستابی، رطوبت خاک) ارائه شده اند. تعداد زیادی شاخص خشکسالی تاکنون توسعه یافته است که می توان به شاخص شدت خشکسالی پالمر^۱ (Palmer, 1965)، شاخص بارش استاندارد شده SPI^۲ (McKee, 1993) و شاخص استاندارد شده بارش-تبخیر و تعرق SPEI^۳ (Vicente-Serrano et al., 2010) اشاره کرد که با کمبود آب در چرخه هیدرولوژیک، کاهش رطوبت خاک و عملکرد محصولات زراعی، همبستگی دارند (Bachmair et al., 2018; Yuan et al., 2020). شاخص خشکسالی هواشناسی SPEI به طور گسترده در ایران و خارج مورد استفاده قرار گرفته است. در مقایسه با شاخص SPI، شاخص SPEI بدلیل وابستگی به مقادیر بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل، بعنوان شاخص مناسب تر معرفی شده است (Burić et al., 2024). نتایج پژوهش Mostafazadeh and Zabihi (2016) در استان کردستان نشان می دهد اگرچه بین مقادیر SPI و SPEI همبستگی معنی داری وجود دارد اما تفاوت در ساختار محاسباتی این دو شاخص موجب بروز اختلاف در الگوی وقوع و تداوم دوره های خشکسالی می شود به گونه ای که شاخص SPEI توانایی بیشتری در شناسایی دوره های خشکسالی بلندمدت دارد. بعلاوه، SPEI نسبت به شاخص پالمر محدودیت کمتری دارد زیرا به ظرفیت زراعی (رطوبت خاک)، وابسته نیست و در هر مقیاس زمانی قابل استفاده است (Peng et al., 2024). (Salvacion, 2021) با کاربرد داده های بلندمدت TerraClimate، و تحلیل خشکسالی هواشناسی با شاخص های SPI و SPEI نشان داد پهنه بندی خطر خشکسالی بر اساس داده های اقلیمی شبکه جهانی، در برنامه ریزی منابع آب، کشاورزی و محیط زیست، کاربرد اساسی دارد. (Hamarash et al., 2022) خشکسالی هواشناسی در مناطق نیمه خشک ایران را با TerraClimate و شاخص های PDSI، SPI و SPEI ارزیابی کرده و تأکید کردند این داده ها، جایگزین

³ Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)

¹ Palmer Drought Severity Index (PDSI)

² Standardized Precipitation Index (SPI)

et al. (2024) به تحلیل مکانی-زمانی خشکسالی در شمال غرب ایران با استفاده از شاخص PDI⁴ طی دوره ۳۵ ساله (۲۰۲۱-۱۹۸۷) پرداختند. نتایج نشان داد که حدود ۸۵ درصد ایستگاه‌ها روند افزایشی خشکسالی داشته‌اند و در بازه زمانی ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۷ بیشتر ایستگاه‌ها خشکسالی را تجربه کرده‌اند. همچنین شاخص PDI به دلیل سادگی و در نظرگیری همزمان دما و بارش، ابزار مناسبی برای پایش خشکسالی در منطقه ارزیابی شده است. Mohammadi et al., (2025) در استان خوزستان نشان دادند سری زمانی دما، روند افزایشی معنی‌داری داشته و مقادیر بارش در دوره‌های اقلیمی آینده، روند کاهشی دارند. پایش خشکسالی با استفاده از شاخص‌های SPI و SPEI بیانگر وقوع خشکسالی‌های خفیف تا شدید در دهه‌های اخیر بود و پیش‌نگری آن‌ها بیانگر تشدید خشکسالی و افزایش ریسک بیابان‌زایی در مناطق کشاورزی است. جمع‌بندی پژوهش‌های انجام شده در ارتباط با شاخص‌های خشکسالی در ایران بیانگر این واقعیت است که تحلیل خشکسالی به منظور تدوین برنامه‌ریزی جامع برای مدیریت منابع آب و کاهش آسیب‌پذیری، امری ضروری است و استفاده از روش‌های زمین آماری در تهیه نقشه‌های خشکسالی با توجه به تعداد کم و پراکنش نامناسب ایستگاه‌های هواشناسی، با خطا و عدم قطعیت زیاد همراه می‌باشد و استفاده از داده‌های جهانی شبکه‌ای بارش و دما، اجتناب ناپذیر است. بنابراین در پژوهش حاضر، استخراج و تحلیل ویژگی‌های خشکسالی براساس نظریه دنباله‌ها (Runs Theory) در مقیاس پیکسل (۴ کیلومتر) با استفاده از داده‌های اقلیمی شبکه‌ای TerraClimate، امکان ارزیابی دقیق‌تر خشکسالی هواشناسی در مقیاس‌های زمانی کوتاه، میان و بلند مدت را در ایران فراهم شده است و مشکلات روش‌های زمین آماری را به طور قابل ملاحظه برطرف کرده است. این پژوهش با رویکرد نوآورانه‌ای به بررسی خشکسالی در ایران می‌پردازد که با استفاده از داده‌های شبکه‌ای بارش و تبخیر-ترقق پتانسیل با دقت مکانی بالا پایگاه TerraClimate، شاخص خشکسالی هواشناسی SPEI در سه مقیاس زمانی (۳، ۹ و ۱۲ ماهه) در سلول‌های دربرگیرنده ایران، محاسبه شده است. برخلاف پژوهش‌های گذشته که در مناطق محدود جغرافیایی و براساس شاخص SPI بدون لحاظ تبخیر-ترقق، انجام شده است، این پژوهش براساس نظریه دنباله‌ها، آستانه‌های صدکی ماهانه (صدک‌های ۱۵، ۳۰ و ۵۰) را اعمال کرده و ویژگی‌های خشکسالی شامل مداوم (Duration)، بزرگی (Magnitude)، شدت (Intensity)، فاصله بین رویدادها (Interval) و تعداد رویدادهای خشکسالی (Total Events) در هر پیکسل در دوره

مناسب برای داده‌های اقلیمی در مناطق با ایستگاه‌های محدود یا فاقد ایستگاه‌های هواشناسی است. Kamruzzaman et al. (2022) با استفاده از داده‌های ماهانه بارش و دما از ۲۹ ایستگاه هواشناسی بنگلادش در دوره ۲۰۱۸-۱۹۸۰، شاخص‌های SPI و SPEI را در مقیاس‌های زمانی مختلف محاسبه کرده و ویژگی‌های مکانی-زمانی خشکسالی را در هفت منطقه هیدرولوژیکی کشور بررسی نمودند. نتایج نشان داد که روند خشکسالی در اغلب مناطق افزایشی بوده و شدت و فراوانی خشکسالی از جنوب به سمت شمال جابه‌جا شده است؛ به‌طوری‌که نقاط داغ خشکسالی عمدتاً در ناحیه باریند^۱ و حوضه رود تیستا^۲ متمرکز بوده و SPEI نسبت به SPI حساسیت بیشتری به تغییرات دمایی و تقاضای تبخیری اتمسفر از خود نشان داد. Keune et al. (2025) با بهره‌گیری از داده‌های بازتحلیل ERA5، شاخص‌های SPI و SPEI را در مقیاس‌های زمانی ۱ تا ۴۸ ماهه برای کل جهان از سال ۱۹۴۰ تا زمان حال محاسبه کردند. نتایج نشان داد که این شاخص‌ها با رزولوشن ۰/۲۵ درجه، پوشش بلندمدت و قابلیت ارزیابی عدم قطعیت دارند و در مقایسه با محصولات GPCC و SPEIbase، الگوهای خشکسالی مشابهی را با دقت بالاتر و پوشش گسترده‌تر بازسازی می‌کنند؛ به‌ویژه SPEI به دلیل در نظر گرفتن تبخیر و ترقق، در مناطق خشک و نیمه‌خشک عملکرد بهتری نشان می‌دهد. استفاده از پایگاه‌های شبکه‌ای جهانی بارش و دما به دلیل تعداد بسیار کم ایستگاه‌های هواشناسی و پراکنش مکانی نامناسب آن‌ها در ایران، اجتناب ناپذیر است. Kheyruri et al., (2023) با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای NASA POWER و شاخص‌های SPI و SPEI، تغییرات مکانی و زمانی خشکسالی را در ایستگاه‌های ایران در دوره آماری ۱۹۸۱ تا ۲۰۲۰ بررسی کرده و نشان دادند که ویژگی‌هایی خشکسالی شامل تداوم و شدت در مناطق مختلف ایران، متفاوت بوده و مناطق مرکزی، شرقی و جنوب‌شرقی ایران، بیشترین آسیب‌پذیری را دارند. پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد تحلیل شاخص‌های خشکسالی با داده‌های ماهواره‌ای یا شبکه‌ای (Grid)، الگوهای مکانی و زمانی خشکسالی را با دقت مکانی بالاتر ممکن می‌سازد. بعلاوه، Shirmohammadi AliakbarKhani et al., (2024) شاخص‌های خشکی دومارتن و فائو را با استفاده از داده‌های TerraClimate در سامانه گوگل ارث انجین^۳ در ۱۰ ایستگاه هواشناسی واقع در استان خراسان رضوی در دوره آماری ۲۰۲۱-۲۰۰۰ استخراج و مقایسه کردند. آن‌ها بر دقت بالای داده‌های اقلیمی این پایگاه تاکید کردند. Mirzaei Hassanlu

دریاچه ارومیه (ULB^3)، حوضه مرکزی (CB^4)، حوضه شرقی-هامون (EHB^5) و حوضه سرخس-قره‌قوم (SQB^6) (Khaleghi and Surian, 2019). تنوع جغرافیایی و توپوگرافی ایران که تحت تأثیر رشته‌کوه‌ها و دریاهای پیرامون آن شکل گرفته است، عامل اصلی در ایجاد گوناگونی اقلیمی و تنوع زیست‌بوم‌های ایران به‌شمار می‌رود. میانگین بارش سالانه ایران در یک دوره آماری ۵۰ ساله حدود ۲۵۰ میلی‌متر برآورد شده است (Helali et al., 2021). این مقدار در مقایسه با میانگین جهانی بارش سالانه که در حدود ۸۵۰ میلی‌متر گزارش شده است، بیانگر آن است که بیشتر مناطق ایران در گروه اقلیمی خشک و نیمه خشک قرار می‌گیرد (Khaghani et al., 2025). توزیع مکانی بارش در ایران، ناهمگنی قابل‌توجهی دارد به‌گونه‌ای که در نواحی ساحلی دریای خزر، میزان بارش سالانه از ۱۰۰۰ میلی‌متر فراتر می‌رود در حالی که در بخش‌های مرکزی فلات ایران، مقدار آن به حدود ۵۰ میلی‌متر محدود می‌شود (Zarei and Eslamian 2017). از نظر تغییرات توپوگرافی، بالاترین نقطه ایران، قله دماوند با ارتفاع ۵۵۹۷ متر از سطح دریا در رشته‌کوه البرز است و پایین‌ترین نقطه در ناحیه جنوبی دریاچه خزر قرار دارد و ارتفاع آن ۲۷ متر پایین‌تر از سطح دریا است. موقعیت جغرافیایی و مرزهای شش حوضه آبریز اصلی ایران در شکل ۱ ارائه شده است.

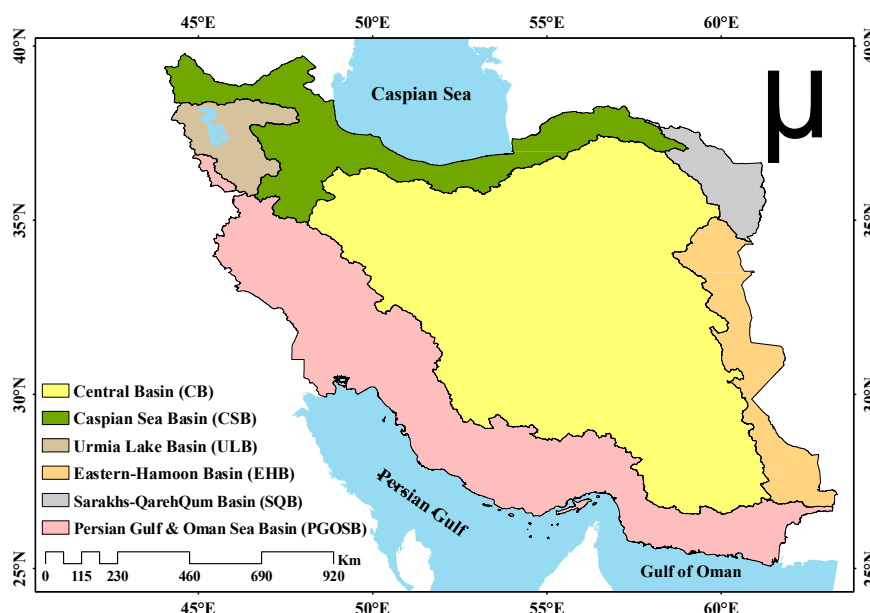
زمانی ۱۹۸۵-۲۰۲۴ بدست آمده است. ترکیب داده‌های اقلیمی شبکه‌ای و روش آستانه محور، امکان شناسایی الگوهای زمانی-مکانی خشکسالی را به طور دقیق‌تر، فراهم کرده است. لذا تمایز چشمگیر از نظر نوع داده‌ها و مقیاس مکانی در مقایسه با پژوهش‌های انجام شده در ایران دارد. نقشه‌های استخراج شده می‌تواند بعنوان مبنا و الگوی نوین در مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی سازگاری با تغییرات اقلیم در سطح ملی، مورد استفاده قرار گیرد.

هدف این پژوهش، ارزیابی مکانی خشکسالی در ایران با شاخص SPEI در دوره آماری ۴۰ ساله (۱۹۸۵ تا ۲۰۲۴) و تحلیل کمی ویژگی‌های خشکسالی بر اساس نظریه دنباله‌ها است. بر این اساس، توزیع زمانی و مکانی مشخصات خشکسالی، در مقیاس ایران و به صورت پیکسل پایه انجام می‌شود.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

ایران در بخش جنوب‌غربی قاره آسیا و در محدوده‌ای بین ۲۵ تا ۴۰ درجه عرض شمالی و ۴۴ تا ۶۳ درجه طول شرقی واقع شده و مساحتی حدود ۱/۶۴ میلیون کیلومتر مربع را در برمی‌گیرد (شکل ۱). بر اساس طبقه‌بندی وزارت نیرو، رودخانه‌های ایران را می‌توان در شش حوضه آبریز اصلی دسته‌بندی کرد: حوضه دریای خزر (CSB^1)، حوضه خلیج فارس و دریای عمان ($PGOSB^2$)، حوضه



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و مرزهای شش حوضه آبریز اصلی ایران
Figure 1. Geographical location and boundaries of the six major basins in Iran

⁴ Central Basin

⁵ Eastern-Hamoon Basin

⁶ Sarakhs-Qareh Qum Basin

¹ Caspian Sea Basin

² Persian Gulf and Oman Sea Basin

³ Urmia Lake Basin

۲-۲- داده‌های اقلیمی Terraclimate

از چالش‌های اصلی در تحلیل رویدادهای شدید هیدرواقلیمی مانند خشکسالی، محدودیت دسترسی به داده‌های طولانی مدت و مشاهدات اقلیمی قابل اعتماد است. برای حل مشکل، محصولات اقلیمی چندمنبعی توسعه یافته است که داده‌های ایستگاهی، ماهواره‌ای و بازتحلیل را ترکیب می‌کنند. در میان آن‌ها، مجموعه داده TerraClimate جایگاه ویژه‌ای دارد چون داده‌های ماهانه اقلیمی را با قدرت تفکیک مکانی ۰/۰۴ درجه برای کل جهان از سال ۱۹۵۸ تاکنون ارائه می‌دهد (Alemu et al., 2025). پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد پایگاه داده بارش TerraClimate به دلیل دقت بالا در برآورد متغیرهای کلیدی اقلیمی و درجه وضوح مکانی مناسب، منبع قابل اعتمادی برای محاسبه شاخص‌های خشکسالی در شرایط اقلیمی ایران محسوب می‌شود (Araghi et al., 2023). در یک پژوهش جامع دیگر، مقایسه پایگاه‌های مختلف داده بارش نشان داد دو پایگاه داده شبکه‌ای GPCC و TerraClimate بهترین عملکرد را در برآورد بارش ماهانه در اغلب ایستگاه‌های هواشناسی ایران دارند (Araghi & Adamowski, 2024).

پایگاه داده‌ای TerraClimate از روش درونیابی با پشتیبانی داده‌های اقلیمی^۱ بهره می‌گیرد. روشی که در آن، میانگین‌های اقلیمی با درجه وضوح مکانی بالا از پایگاه داده WorldClim با داده‌های ماهانه با وضوح پایین‌تر از منابع دیگر تلفیق می‌شوند (Abatzoglou et al., 2018). این مجموعه داده شامل متغیرهای هیدرواقلیمی از جمله حداقل و حداکثر دمای هوا، بارش، رطوبت خاک، رواناب، شاخص شدت خشکسالی پالمر (PDSI)، تبخیر و تعرق واقعی (AET^۲) و تبخیر و تعرق پتانسیل (PET^۳) می‌باشد. در TerraClimate مقدار تبخیر و تعرق پتانسیل بر اساس معادله پنمن مونتیت (Penman-Monteith) محاسبه می‌شود که در آن تابش خالص سطح، کسری فشار بخار آب، شار گرمایی خاک و شیب منحنی دما-فشار بخار اشباع لحاظ شده است (Lemenkova, 2022). ارزیابی و اعتبارسنجی انواع پایگاه داده شبکه‌ای نشان داده است داده‌های TerraClimate در اقلیم‌های متنوع ایران از صحت و همبستگی بالا با مشاهدات زمینی (دما و بارش) برخوردارند و استفاده از این پایگاه در مطالعات هیدرولوژیکی و اقلیمی توصیه شده است (Solaimani and Ahmadi, 2024). بنابراین در پژوهش حاضر، داده‌های ماهانه بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل در دوره (۱۹۸۵-۲۰۲۴) با فرمت NetCDF از وبسایت TerraClimate دانلود شده است. <https://www.climatologylab.org/terraclimate.html>

تحلیل خشکسالی ایران با استفاده از شاخص SPEI و پردازش و استخراج ویژگی‌های خشکسالی در مقیاس پیکسل (۰/۰۴ درجه) با برنامه‌نویسی پایتون انجام شد. نقشه‌های رستری خروجی (فرمت tif) در برنامه پایتون تولید شده است.

۳-۲- شاخص خشکسالی SPEI

شاخص SPEI خشکسالی را بر اساس تفاضل مقادیر بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل در هر مقیاس زمانی ارزیابی می‌کند. این شاخص چون از تبخیر و تعرق پتانسیل استفاده می‌کند در مقایسه با شاخص‌های خشکسالی مانند SPI که تنها بر پایه بارش است، نمایش واقع‌بینانه‌تری از خشکسالی ارائه می‌دهد (Chen et al., 2024). در این پژوهش، شاخص SPEI برای مقیاس‌های زمانی مختلف (۳، ۹ و ۱۲ ماه) با استفاده از داده‌های ماهانه بارش و تبخیر-تعرق پتانسیل بدست آمده از پایگاه داده TerraClimate از سال ۱۹۸۵ تا ۲۰۲۴ به صورت شبکه‌ای و با استفاده از برنامه‌نویسی Python محاسبه شد. محاسبه شاخص SPEI شامل دو مرحله است (Vicente-Serrano et al., 2010): مرحله اول، محاسبه کسر آب (D=P-PET) و سپس تجمیع زمانی این کسری در بازه‌های زمانی مختلف (۳، ۹ و ۱۲ ماهه) در دوره ۱۹۸۵-۲۰۲۴ از رابطه ۱ محاسبه می‌شود.

$$D_i = P_i - PET_i \quad (1)$$

مرحله دوم، برازش سری زمانی تجمعی (۳، ۹ و ۱۲ ماهه) کسر آب با توزیع آماری log-logistic (با سه پارامتر مکان γ ، مقیاس α و شکل β) و محاسبه شاخص SPEI پیکسل براساس توزیع نرمال استاندارد از روابط ۲ و ۳ محاسبه می‌شود.

$$f(x) = \beta \left(\frac{x - \gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1} \left[1 + \left(\frac{x - \gamma}{\alpha} \right)^{\beta} \right]^{-2} \quad (2)$$

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x - \gamma} \right)^{\beta} \right]^{-1} \quad (3)$$

طبقات ترسالی و خشکسالی براساس شاخص SPEI در جدول ۱ نشان داده شده است (Vicente-Serrano et al. 2010).

جدول ۱- طبقه‌بندی شاخص خشکسالی SPEI

Category	SPEI
Extremely Wet	+2 or more
Very Wet	+1.5 to +1.99
Moderate Wet	+1.0 to +1.49
Normal	0.99 to -0.99
Moderate Dry	-1.0 to -1.49
Very Dry	-1.5 to -1.99
Extreme Dry	-2.0 and less

³ Potential Evapotranspiration¹ Climatologically Aided Interpolation² Actual Evapotranspiration

۲-۴- آزمون من-کندال اصلاح شده (MMK¹)

آزمون من-کندال اصلاح شده (MMK) از روش های متداول در تحلیل سری های زمانی متغیرها و شاخص های اقلیمی است و برای شناسایی وجود یا عدم وجود روند (نزولی یا صعودی معنی دار) به کار می رود و ممکن است ناشی از تغییرات تدریجی طبیعی یا اثرات اقلیمی حاصل از فعالیت های انسانی باشند (Liu et al., 2020). این آزمون ناپارامتری به منظور تعدیل اثر خودهمبستگی (Auto-Correlation) در سری های زمانی توسعه یافته است (Hamed and Rao, 1998) و با در نظر گرفتن همبستگی سریالی، خطر شناسایی روندهای کاذب افزایشی یا کاهششی ناشی از خودهمبستگی مثبت یا منفی را کاهش می دهد (Momenian et al., 2025). آزمون MMK برای تشخیص وجود روند نزولی یا صعودی معنی دار سری زمانی SPEI در مقیاس های زمانی مختلف (۳، ۹ و ۱۲ ماهه) مورد استفاده قرار گرفت. در این روش، واریانس آماره من-کندال (Var(S)) بر اساس میزان خودهمبستگی موجود در داده ها اصلاح می شود (Akter et al., 2025). ضریب خودهمبستگی داده ها با استفاده از روابط ۴ تا ۶ زیر محاسبه می شود:

$$Var(S)^* = Var(S) \times \left(\frac{n}{n^*}\right) \quad (4)$$

$$\left(\frac{n}{n^*}\right) = 1 + \left(\frac{2}{n(n-1)(n-2)}\right) \times \sum_{k=1}^{n-1} (n-k)(n-k-1)(n-k-2)r_k \quad (5)$$

$$r_k = \frac{\left(\frac{1}{n-k}\right) \sum_{i=1}^{n-k} (x_i - \bar{x})(x_{i+k} - \bar{x})}{\left(\frac{1}{n}\right) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (6)$$

$\frac{n}{n^*}$ نشان دهنده ضریب اصلاح شده برای داده های دارای خودهمبستگی و r_k نشان دهنده ضریب خودهمبستگی k ام است. n تعداد داده ها و $\bar{x}$ میانگین مشاهدات را نشان می دهد.

۲-۵- نظریه دنباله ها (Runs Theory)

در پژوهش حاضر، برای شناسایی رخداد های خشکسالی از نظریه دنباله ها با رویکرد نوین استفاده از درصدهای آستانه^۲ استفاده شد. به جای اعمال آستانه ثابت (روش متداول)، آستانه ها به صورت ماهانه تعیین می شود تا تغییرات فصلی شاخص خشکسالی در نظر گرفته شود. برای هر ماه در طول دوره آماری، ۴۰ مقدار شاخص SPEI وجود دارد که از روی آن ها صدک های ۱۵، ۳۰ و ۵۰ استخراج می شود و مقدار شاخص SPEI یک ماه با

این سه آستانه مقایسه می شود. در این روش، سه آستانه بر اساس درصدهای شاخص خشکسالی استخراج می شود: صدک ۵۰ (R₀) به عنوان مرز بین شرایط مرطوب و خشک، صدک ۳۰ (R₁) به عنوان مرز بین خشک و خشکسالی خفیف و صدک ۱۵ (R₂) به عنوان مرز بین خشکسالی خفیف و متوسط است (Xie and Tian, 2011; Zhou et al., 2014). بعد از تعیین مقادیر آستانه، ماه های با مقدار شاخص کمتر از R₁ به عنوان ماه های خشک شناسایی شد و ماه های متوالی خشک به عنوان یک رخداد خشکسالی مستقل در نظر گرفته شد. رخداد های با تداوم یک ماه به عنوان خشکسالی خفیف در نظر گرفته شد. در صورتی که فاصله بین دو رخداد متوالی کمتر از شش ماه باشد و شاخص بین R₁ و R₀ قرار داشته باشد، رخداد ها با هم ترکیب می شوند. رخداد های تک ماهه با شاخص کمتر از R₂ به عنوان رخداد مستقل معتبر در نظر گرفته شد و سایر رخداد های تک ماهه حذف شد (Li et al., 2024). در مرحله بعد، ویژگی های هر رخداد خشکسالی (Event) شامل تداوم (Duration, D)، بزرگی (Magnitude, M) و شدت (Intensity = M/D) استخراج شد. با مشخص شدن رویداد های خشکسالی، میانگین فاصله زمانی بین رخداد ها (Interval) و فراوانی رخداد ها (Total Events) در دوره آماری ۲۰۲۴-۱۹۸۵ بدست آمد. بزرگی یک رویداد خشکسالی (مترادف واژه Severity) از قدرمطلق مجموع مقادیر منفی شاخص SPEI بدست می آید (Li et al., 2024). این روش با در نظر گرفتن تغییرات فصلی و ماهانه شاخص خشکسالی و ثبت دقیق رخداد های کوتاه مدت یا پراکنده، امکان شناسایی واقع بینانه تر رخداد های خشکسالی را فراهم می کند. بر خلاف روش سنتی نظریه دنباله ها که تنها از یک آستانه ثابت استفاده می کند و ممکن است برخی خشکسالی های واقعی را نادیده بگیرد یا به اشتباه ترکیب کند. روش پیشنهادی در پژوهش حاضر با به کارگیری آستانه های ماهانه درصدی و ترکیب رخداد ها بر اساس تداوم، فاصله، شدت و تعداد رخداد ها، دقت شناسایی و محاسبه ویژگی های رخداد های خشکسالی را افزایش می دهد و انعطاف پذیری بیشتری برای تحلیل رخداد های خشکسالی در طول دوره آماری فراهم می کند. داده های ماهانه SPEI استخراج شده از مجموعه داده های TerraClimate به صورت شبکه ای وارد محیط Python شدند و سپس پردازش های لازم برای محاسبه تمام ویژگی های خشکسالی انجام گرفت.

¹ Modified Mann-Kendall trend test

² Threshold Percentiles

۳- نتایج و بحث

۳-۱- ویژگی‌های خشکسالی

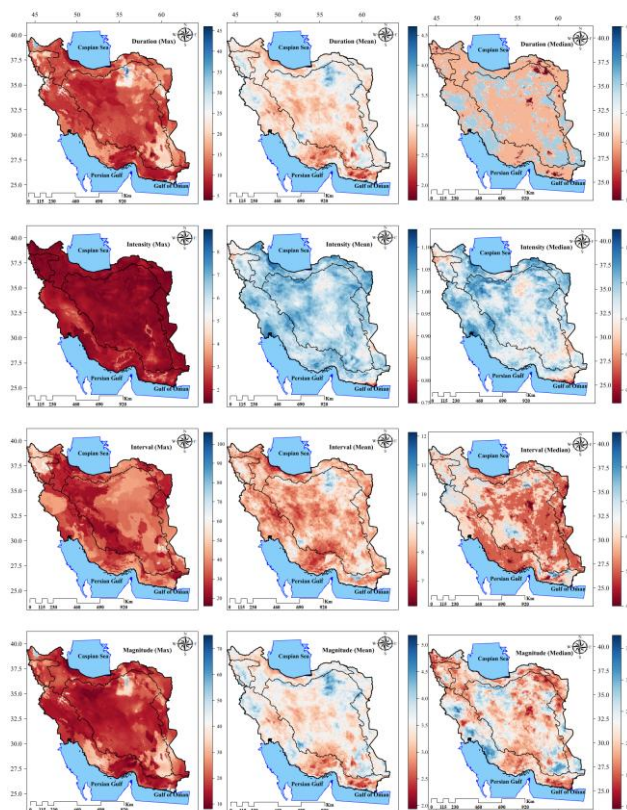
شاخص استاندارد شده بارش - تبخیر و تعرق به عنوان شاخص خشکسالی هواشناسی در مقیاس‌های زمانی ۳، ۹ و ۱۲ ماهه برای دوره ۱۹۸۵ تا ۲۰۲۴ با استفاده از داده‌های TerraClimate به صورت رستری محاسبه شد تا ویژگی‌های خشکسالی در مقیاس کوتاه مدت، میان مدت و بلندمدت در هر پیکسل، تحلیل شود. رخدادهای خشکسالی بر پایه نظریه دنباله‌ها و آستانه‌های صدک ماهانه شناسایی شد. ویژگی‌های هر رخداد شامل تداوم، شدت، بزرگی، فاصله بین رخدادها، محاسبه شد. نقشه‌های رستری میانگین، میانه و حداکثر هر ویژگی خشکسالی به ترتیب برای مقیاس‌های زمانی ۳، ۹ و ۱۲ ماهه ارائه شده است.

در مقیاس ۳ ماهه (شکل ۲)، نقشه‌های تداوم نشان می‌دهند طولانی‌ترین رخدادها خشکسالی فصلی، در جنوب غرب ایران (خوزستان، بوشهر، کهگیلویه و بویراحمد و غرب فارس)، دشت لوت و نواحی شرقی و جنوب شرقی متمرکز رخ داده است در حالی که سواحل دریاچه خزر، دامنه‌های البرز و زاگرس غربی کوتاه‌ترین تداوم را تجربه کردند. نقشه‌های شدت خشکسالی، بزرگترین مقدار را در نواحی جنوب غربی، مرکزی و شرقی نشان می‌دهند در حالی که مناطق شمالی و شمال غربی، کمترین مقدار شدت را تجربه کردند. از نظر بزرگی، بالاترین مقادیر در جنوب غرب، کویر لوت و شرق ایران؛ و نواحی شمالی کمترین مقدار را نشان می‌دهند. نقشه‌های فاصله بین رخدادها، طولانی‌ترین فاصله زمانی را در نواحی خشک مرکزی و جنوب شرقی و کوتاه‌ترین فاصله را در مناطق شمالی و زاگرس غربی آشکار می‌سازند. تحلیل روزهای خشک متوالی (CDD¹) نیز این الگوهای مکانی را تأیید می‌کند و افزایش‌های معناداری را در مناطق جنوبی و مرکزی نشان می‌دهد؛ به طوری که شهرهایی مانند بندرعباس، کرمان و یزد به دلیل قرارگیری در نواحی خشک، خوشه‌های با خطر بالای خشکسالی را تشکیل می‌دهند (Chaparinia et al., 2025). در مقابل، شهرهای شمالی مانند رشت، ارومیه و تبریز به سبب مجاورت با منابع رطوبتی و اثرات توپوگرافی کوهستانی، در خوشه‌های با خطر پایین خشکسالی قرار می‌گیرند (Chaparinia et al., 2025).

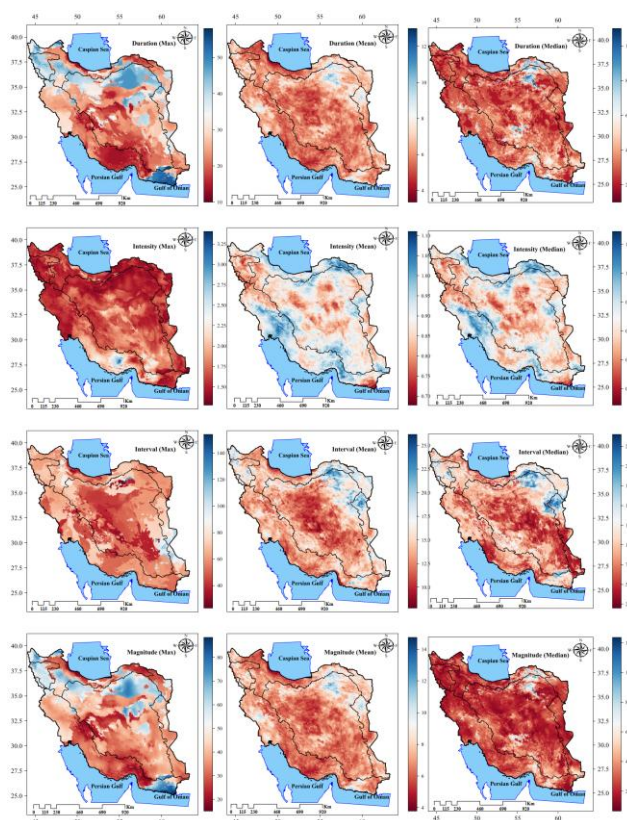
به طور خلاصه بر اساس نقشه‌های بدست آمده در مقیاس ۳ ماهه می‌توان گفت خشکسالی‌های کوتاه مدت و فصلی در نیمه جنوبی و شرقی ایران به مراتب طولانی‌تر و شدیدتر از نواحی

مرطوب شمالی و غربی هستند که این مناطق را به کانون آسیب پذیری اقلیمی ایران در مقیاس فصلی تبدیل می‌کند. در مقیاس زمانی میان مدت ۹ ماهه (شکل ۳)، الگوهای مکانی ویژگی‌های خشکسالی، تغییر قابل توجهی نسبت به مقیاس ۳ ماهه نشان می‌دهند و تمایز مکانی بین مناطق خشک و مرطوب به مراتب واضح تر و یکنواخت تر شده است. نقشه‌های تداوم خشکسالی، حاکی از آن است که تقریباً تمام نواحی مرکزی، شرقی و جنوب شرقی ایران (به ویژه کویر مرکزی، دشت لوت، کرمان، سیستان و بلوچستان، خراسان جنوبی و بخش‌های وسیعی از فارس و هرمزگان)، طولانی‌ترین تداوم خشکسالی میان مدت را تجربه کرده‌اند، در حالی که تنها نوار باریکی در شمال کشور (سواحل خزر و دامنه‌های البرز) و بخش‌هایی از زاگرس غربی همچنان کوتاه‌ترین تداوم خشکسالی را نشان می‌دهند. این الگو نشان‌دهنده گسترش قابل توجه مناطق دارای خشکسالی پایدار میان مدت به سمت غرب و شمال غرب نسبت به مقیاس کوتاه مدت (سه ماهه) است. مناطق مرکزی و شرقی کشور به طور یکنواخت، بیشترین شدت خشکسالی (پتانسل آسیب پذیری بالا) را نشان می‌دهند و نواحی شمالی و غربی که در مقیاس ۳ ماهه کمترین مقادیر را داشتند، در مقیاس ۹ ماهه، شدت به مراتب بالاتری را ثبت کردند اگرچه کمترین مقدار شدت را در کل کشور دارند. در نقشه‌های فاصله بین رخدادها (Interval)، مناطق خشک مرکزی و جنوب شرقی، طولانی‌ترین فاصله زمانی بین خشکسالی‌ها را دارند اما برخلاف مقیاس ۳ ماهه، مناطق شمالی و زاگرس نیز فاصله زمانی نسبتاً طولانی‌تری را نشان می‌دهند که بیانگر کاهش قابل توجه فراوانی رخدادهای مرطوب جبران کننده در مقیاس میان مدت (۹ ماهه) است. یافته‌های پژوهش در مقیاس ۹ ماهه نشان‌دهنده تغییر الگوی خشکسالی از محلی به منطقه‌ای و فراگیر است به طوری که تقریباً تمام نیمه شرقی و مرکزی ایران به طور همگن تحت تأثیر خشکسالی‌های میان مدت طولانی، شدید و با بزرگی بالا قرار دارند و فقط نوار شمالی و بخش‌هایی از زاگرس به عنوان مناطق نسبتاً مقاوم و سازگار با خشکسالی مشاهده می‌شوند. این نتایج می‌تواند آسیب پذیری بالای بخش بزرگی از پهنه وسیع ایران را در برابر وقوع خشکسالی‌های میان مدت (۹ ماهه) نشان دهد.

¹ Consecutive Dry Days



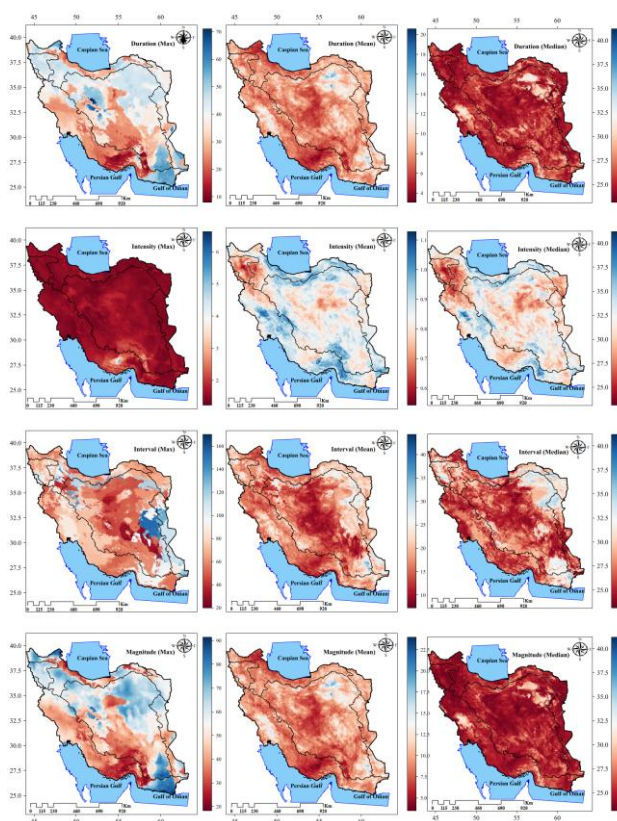
شکل ۲- توزیع مکانی ویژگی‌های خشکسالی بر اساس SPEI ۳ ماهه
Figure 2. Spatial drought characteristics from 3-month SPEI



شکل ۳- توزیع مکانی ویژگی‌های خشکسالی بر اساس SPEI ۹ ماهه
Figure 3. Spatial drought characteristics from 9-month SPEI

بزرگی را نشان می‌دهند. تفاوت بین مناطق خشک و مرطوب به حداقل رسیده و حتی نواحی شمالی نیز شدت و بزرگی (پتانسیل آسیب‌پذیری) قابل توجه را نشان می‌دهند. نقشه‌های فاصله بین رخدادها نیز طولانی‌ترین فاصله را در مناطق مرکزی، شرقی و جنوبی کشور نشان می‌دهند. مناطق شمالی همچنان کوتاه‌ترین فاصله را نشان می‌دهند اما فاصله بین خشکسالی نسبت به مقیاس‌های ۳ و ۹ ماهه به‌طور چشمگیری افزایش یافته است. در مقیاس ۱۲ ماهه ویژگی‌های خشکسالی ایران، به‌طور فراگیر می‌باشد. به‌جز نوار باریک سواحل خزر و دامنه‌های شمالی البرز، تقریباً تمام کشور تحت تأثیر رخدادهای خشکسالی بسیار طولانی، شدید و با بزرگی زیاد قرار دارند. این نتایج نشان می‌دهد در مقیاس سالانه، خشکسالی از یک پدیده محلی و فصلی به یک چالش سراسری و پایدار تبدیل شده و قلمرو ایران را در معرض ریسک وقوع خشکسالی هواشناسی بلندمدت قرار می‌دهد.

در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه (شکل ۴)، الگوهای مکانی ویژگی‌های خشکسالی به حداکثر یکنواختی می‌رسند و تقریباً کل پهنه کشور به جز نوار باریک شمالی تحت رژیم خشکسالی پایدار، شدید و با بزرگی بالا قرار می‌گیرد. نقشه‌های تداوم نشان می‌دهند که طولانی‌ترین رخدادهای خشکسالی سالانه در نواحی مرکزی، شرقی، جنوب‌شرقی و حتی بخش‌های وسیعی از جنوب‌غرب و غرب کشور (به‌ویژه کویر مرکزی، دشت لوت، سیستان و بلوچستان، خراسان‌ها، کرمان، یزد و بخش‌های عمده‌ای از زاگرس مرکزی و جنوبی)، به‌طور یکنواخت حاکم است. تنها سواحل خزر و دامنه‌های شمالی البرز همچنان کوتاه‌ترین تداوم خشکسالی را در مقیاس سالانه نشان می‌دهند هرچند این مناطق نسبت به مقیاس‌های کوتاه‌تر و میان‌مدت، تداوم به‌مراتب بیشتری را تجربه می‌کنند. نقشه‌های شدت و بزرگی خشکسالی، این یکنواختی را با وضوح بیشتری تأیید می‌کنند. تقریباً تمام نیمه شرقی، مرکزی و جنوبی کشور به‌طور همگن بیشترین شدت و



شکل ۴- توزیع مکانی ویژگی‌های خشکسالی بر اساس SPEI ۱۲ ماهه

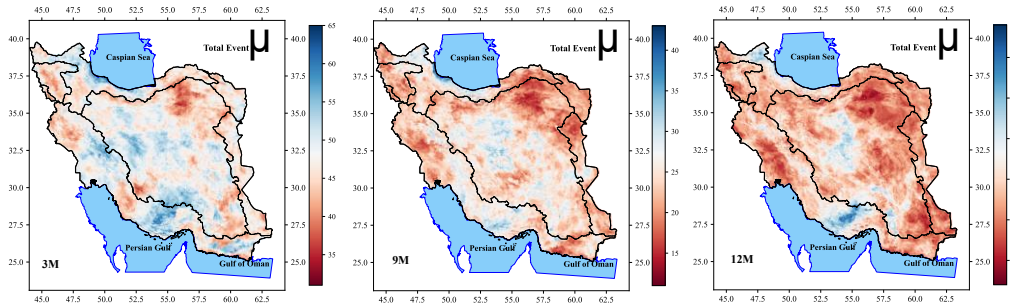
Figure 4. Spatial drought characteristics from 12-month SPEI

مشاهده می‌شود در حالی که مناطق خشک مرکزی، شرقی و جنوب‌شرقی کمترین تعداد یا فراوانی را تجربه کردند. با افزایش مقیاس زمانی (۹ و ۱۲ ماه)، تعداد رخدادها در تمام کشور به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد و الگوی یکنواخت‌تر دارند به‌طوری که

شکل ۵ تعداد کل رخدادهای خشکسالی شناسایی شده را در سه مقیاس زمانی ۳، ۹ و ۱۲ ماهه نشان می‌دهد. در مقیاس فصلی (۳ ماهه)، بیشترین فراوانی رخداد در نوار شمالی کشور (سواحل خزر، گیلان، مازندران، گلستان) و دامنه‌های زاگرس غربی و مرکزی

تبدیل شده است و تعداد اندک رخدادها در این نواحی بیانگر شدت و تداوم بالای هر رخداد و در نتیجه آسیب‌پذیری بیشتر این مناطق در مقیاس‌های میان مدت و بلندمدت می‌باشد.

در مقیاس سالانه تقریباً سراسر ایران کمتر از یک تا دو رخداد مجزا در طول ۴۰ سال را تجربه می‌کند. این نتایج تأیید می‌کند در مناطق خشک و نیمه‌خشک مرکزی و شرقی ایران، خشکسالی به‌جای پدیده‌ای پرتکرار و کوتاه‌مدت، به حالتی مداوم و فراگیر



۵- توزیع مکانی تعداد رخدادهای خشکسالی بر اساس شاخص SPEI در مقیاس‌های ۳، ۹ و ۱۲ ماهه
Figure 5. Spatial distribution of SPEI-based drought events at 3-, 9-, and 12-month scales

جدول ۲، تحلیل ویژگی‌های خشکسالی با استفاده از شاخص استاندارد شده بارش- تبخیر و تعرق و بر پایه نظریه دنباله‌ها را در مقیاس‌های زمانی ۳، ۹ و ۱۲ ماهه در شش حوضه آبریز اصلی ایران نشان می‌دهد. با افزایش مقیاس زمانی، ویژگی‌های خشکسالی شامل تداوم، فاصله بین رخدادهای و بزرگی به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد اما شدت به‌دلیل طولانی‌تر شدن رخدادهای کاهش می‌یابد. در همه مقیاس‌ها، حوضه دریای خزر (CSB) کمترین مقادیر تداوم، فاصله بین رخدادهای و بزرگی را نشان داد و به‌عنوان مرطوب‌ترین حوضه، کمترین آسیب‌پذیری را در برابر خشکسالی‌های کوتاه‌مدت تا بلندمدت نشان می‌دهد. حوضه‌های

مرکزی (CB)، شرقی-هامون (EHB) و سرخس-قره‌قوم (SQB) به ویژه در مقیاس‌های ۹ و ۱۲ ماهه، بالاترین مقدار تداوم (تا بیش از ۹ ماه در EHB)، فاصله بین رخدادهای (تا میانگین بیش از ۲۲ ماه در EHB) و بزرگی (تا میانگین بیش از ۱۰ واحد) را تجربه کردند که بیانگر رخدادهای خشکسالی طولانی‌تر، پایدارتر و با مقدار بزرگی بیشتر به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک مرکزی و شرقی ایران است. این تفاوت‌های منطقه‌ای که در شکل‌های ۲ تا ۴ به وضوح قابل مشاهده است حاکی از این است که نواحی جنوبی و شرقی ایران، کانون آسیب‌پذیری (در معرض خطر) در برابر خشکسالی‌های میان مدت و بلندمدت هستند.

جدول ۲- مشخصات ویژگی‌های خشکسالی در حوضه‌های آبریز اصلی ایران بر اساس شاخص SPEI در دوره آماری ۱۹۸۵-۲۰۲۴

Scale	Basin	Duration (months)			Magnitude			Intensity			Interval (months)		
		Max	Mean	Median	Max	Mean	Median	Max	Mean	Median	Max	Mean	Median
SPEI3	CB*	12.72	3.03	2.26	18.51	3.47	2.13	1.89	1.00	0.96	33.25	8.21	5.56
	ULB	14.91	3.15	2.07	21.24	3.57	1.92	1.77	0.97	0.91	42.99	8.35	6.19
	CSB	12.63	3.01	2.07	18.38	3.45	1.99	1.86	1.00	0.97	32.48	8.01	5.89
	EHB	13.97	3.12	2.39	20.74	3.57	2.18	1.80	0.99	0.94	34.56	8.28	5.13
	SQB	14.05	3.08	1.96	18.77	3.57	1.84	1.78	1.03	0.99	28.86	8.11	5.27
	PGOSB	12.14	2.93	2.33	18.44	3.33	2.18	2.20	1.01	0.96	34.56	8.06	5.68
SPEI9	CB	28.21	6.16	3.46	42.13	6.99	2.80	1.67	0.88	0.80	56.25	13.84	8.86
	ULB	37.22	6.51	2.68	52.60	7.49	1.99	1.57	0.83	0.76	66.16	15.76	12.07
	CSB	30.37	6.01	3.45	43.77	7.00	2.89	1.58	0.90	0.85	64.23	14.91	10.12
	EHB	29.21	6.78	3.39	39.75	7.79	2.70	1.62	0.88	0.81	77.34	16.61	9.26
	SQB	28.07	6.96	3.85	38.51	8.12	3.11	1.54	0.91	0.82	57.64	17.31	12.61
	PGOSB	24.90	6.05	3.42	37.44	6.91	2.95	1.79	0.91	0.84	58.47	13.72	8.73
SPEI12	CB	37.30	8.34	4.33	53.91	9.49	3.41	1.60	0.84	0.77	69.69	16.58	10.29
	ULB	43.12	8.42	3.11	61.18	9.61	1.92	1.52	0.72	0.61	78.69	19.57	14.43
	CSB	38.23	7.79	3.81	54.90	8.93	3.09	1.52	0.85	0.78	73.93	17.85	11.50
	EHB	40.58	9.21	3.83	52.83	10.66	2.89	1.51	0.85	0.77	104.77	22.17	11.59
	SQB	38.67	8.78	3.43	55.27	10.29	2.41	1.49	0.83	0.71	71.56	21.47	17.42
	PGOSB	30.91	7.89	4.58	44.39	8.97	3.71	1.70	0.87	0.78	71.59	17.03	9.52

* Central Basin (CB), Urmia Lake Basin (ULB), Caspian Sea Basin (CSB); Eastern-Hamoon Basin (EHB), Persian Gulf and Oman Sea Basin (PGOSB), Sarakhs-Qareh Qum Basin (SQB), Persian Gulf and Oman Sea Basin (PGOSB).

فارس و دریای عمان از سال ۲۰۰۹ وارد شرایط خشکسالی شدند و این وضعیت به تدریج گسترش یافت، به گونه‌ای که تا سال ۲۰۲۱ تقریباً تمامی حوضه‌های آبریز کشور با خشکسالی مواجه بوده‌اند. در این چارچوب، دوره ۲۰۱۷-۲۰۱۹ به عنوان شدیدترین رخداد خشکسالی آب زیرزمینی در دهه‌های اخیر شناخته می‌شود؛ طی این بازه، آبخوان‌های حوضه‌های مرکزی، خزری و شرقی که از سال ۲۰۱۶ وارد فاز خشکسالی شده بودند، با تشدید قابل توجه کسری ذخایر آب زیرزمینی روبه‌رو شدند (Kashani et al., 2025). نتایج نشان می‌دهد مناطق خشک مرکزی و شرقی با خشکسالی‌های مخرب‌تر (از نظر بزرگی خشکسالی) مواجه بوده‌اند. پژوهش‌های اخیر نیز حاکی از آن است که به‌طور کلی، شدت و فراوانی خشکسالی از شمال به جنوب و از غرب به شرق ایران افزایش می‌یابد (Torkaman Pary et al., 2024). بخش‌های مرکزی و غربی کشور که با پوشش گیاهی تنک و اراضی برهنه مشخص می‌شوند، بیشترین تأثیر را از خشکسالی‌های شدید می‌پذیرند و اغلب خشکسالی‌های شدید و طولانی‌مدت را تجربه می‌کنند (Torkaman Pary et al., 2024). در مقابل، مناطق شمالی نزدیک به دریای خزر با پوشش متراکم درختی، مقادیر به‌مراتب کمتری از شدت خشکسالی را نشان می‌دهند (Torkaman Pary et al., 2024).

جدول ۳ میانگین تعداد رخداد‌های خشکسالی هواشناسی را در سه مقیاس زمانی برای شش حوضه آبریز اصلی ایران نشان می‌دهد. در مقیاس کوتاه‌مدت (SPEI3)، میانگین تعداد رخدادها در تمام حوضه‌ها حدود ۴۶ تا ۴۸ بار در دوره ۴۰ ساله ۱۹۸۵ تا ۲۰۲۴ داشتند که بیانگر وقوع تقریباً سالانه یا حتی چندبار در سال خشکسالی‌های فصلی در سراسر ایران می‌باشد. با افزایش مقیاس زمانی به ۹ و ۱۲ ماه، تعداد رخدادها به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد و به حدود ۲۰ تا ۲۴ در SPEI9 و ۱۶ تا ۱۹ در SPEI12 می‌رسد. این کاهش تعداد رویدادها، نشان‌دهنده آن است خشکسالی‌های میان‌مدت و بلندمدت کمتر رخ می‌دهند اما به دلیل ادغام رویدادهای کوتاه‌مدت متوالی، پایدارتر و شدیدتر هستند. در مقیاس‌های ۹ و ۱۲ ماهه، حوضه‌های خشک‌تر مانند مرکزی (CB) و شرقی-هامون (EHB) کمترین تعداد رخداد را دارند (به ترتیب ۱۸/۰۵ و ۱۵/۹۹ در SPEI12) که همراه با مقادیر بالایی تداوم و فاصله بین رخدادها (جدول ۲)، تأیید می‌کند خشکسالی‌ها در این مناطق تمایل به طولانی‌تر شدن دارند در حالی که حوضه آبریز مرطوب دریاچه خزر (CSB) و خلیج فارس و دریای عمان (PGOSB) تعداد بیشتر رخداد خشکسالی را تجربه کردند که بیانگر رویدادهای کوتاه‌تر و متناوب‌تر است. از سوی دیگر، خشکسالی آب زیرزمینی در ایران از اواخر دهه ۲۰۰۰ به بعد به یک بحران فراگیر تبدیل شده است. آبخوان‌های حوضه‌های خلیج

جدول ۳- میانگین تعداد رخداد‌های خشکسالی حوضه‌های آبریز اصلی ایران بر اساس شاخص SPEI در دوره آماری ۱۹۸۵-۲۰۲۴

Table 3. Mean drought frequency in Iran's major basins derived from SPEI (1985–2024)

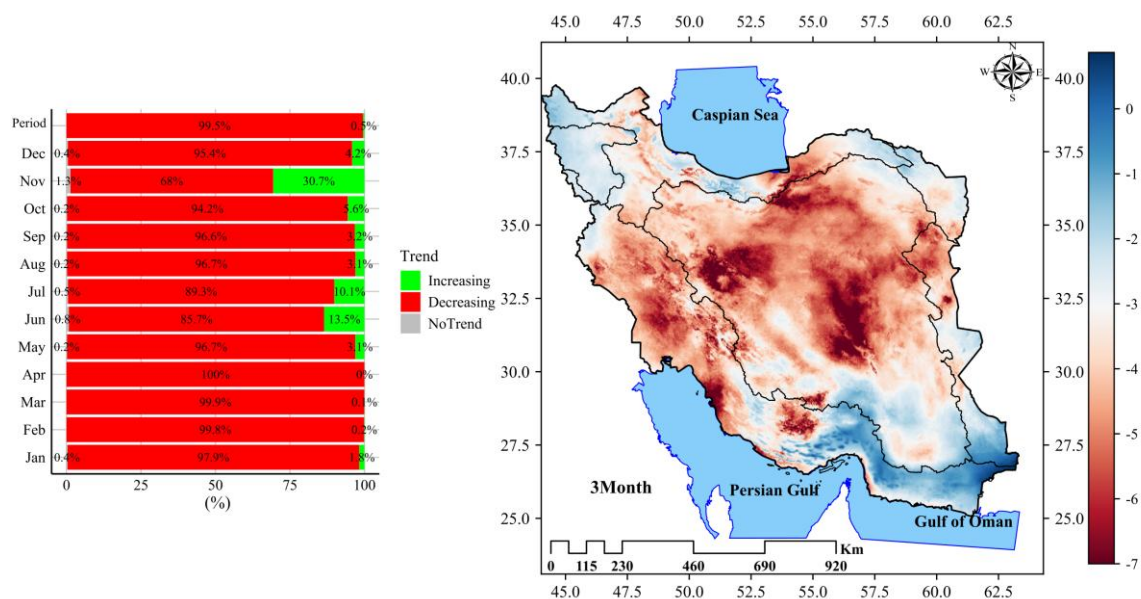
Scale	Basin	Total Events
SPEI3	CB	47.46
	ULB	45.95
	CSB	48.10
	EHB	46.19
	SQB	46.87
	PGOSB	48.30
SPEI9	CB	23.92
	ULB	22.57
	CSB	24.32
	EHB	21.66
	SQB	20.83
	PGOSB	24.29
SPEI12	CB	18.05
	ULB	17.57
	CSB	19.13
	EHB	15.99
	SQB	16.59
	PGOSB	19.20

* Central Basin (CB), Urmia Lake Basin (ULB), Caspian Sea Basin (CSB); Eastern-Hamoon Basin (EHB), Persian Gulf and Oman Sea Basin (PGOSB), Sarakhs-Qareh Qum Basin (SQB), Persian Gulf and Oman Sea Basin (PGOSB).

درصد و در اسفند به ۹۹/۸ درصد می‌رسد. حتی در آبان ماه، ۹۵/۴ درصد مساحت کشور، روند کاهشی معنی‌دار را تجربه کردند. این نتایج بیانگر تشدید و فراگیر خشکسالی‌های هواشناسی کوتاه‌مدت در ایران در دوره آماری ۱۹۸۵-۲۰۲۴ است و نشان‌دهنده کاهش مقادیر بارش در مقیاس فصلی می‌باشد. نکته قابل توجه این است که خشکسالی می‌تواند در هر نقطه‌ای از ایران، فارغ از شرایط اقلیمی محلی، رخ دهند؛ به این معنا که حتی مناطق مرطوب شمالی، شمال غربی و غربی که بارش سالانه بالایی دریافت می‌کنند نیز ممکن است با ویژگی‌های خشکسالی شدید مواجه شوند. این آسیب‌پذیری گسترده بیش از ۸۴ درصد از ایستگاه‌های هواشناسی را دربر می‌گیرد که روندهای منفی در شاخص‌های بارش نشان می‌دهند (Ghaedi, 2021).

۳-۲- تحلیل روند شاخص SPEI

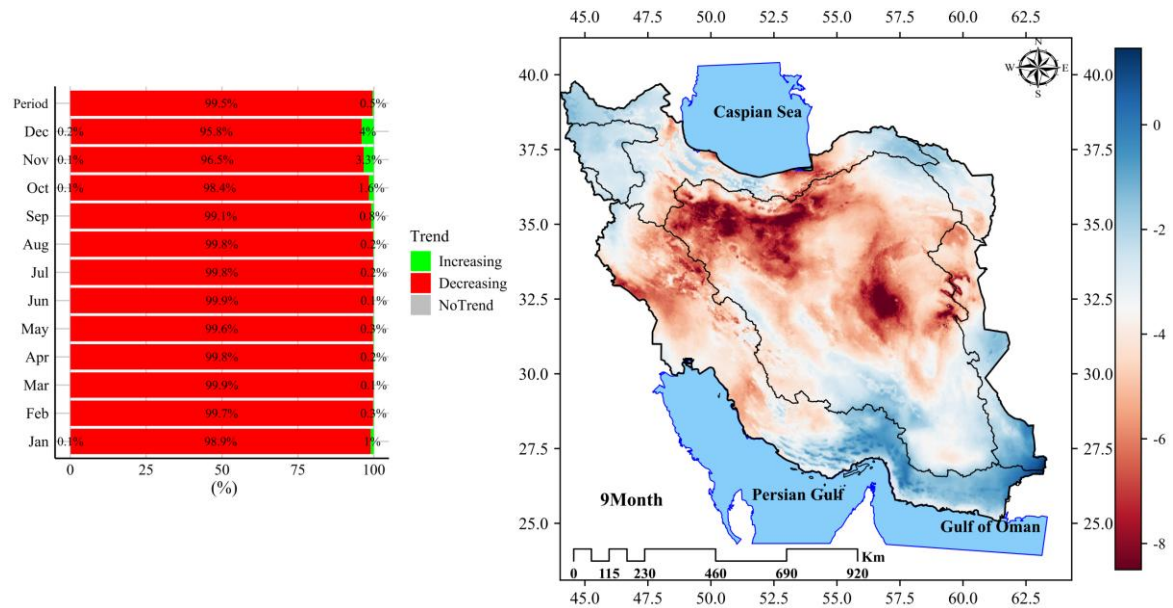
شکل ۶ نتایج آزمون من‌کندال اصلاح‌شده (MMK) را برای شاخص SPEI در مقیاس ۳ ماهه در سطح اطمینان ۹۵ درصد ارائه می‌دهد. نقشه سمت راست نشان می‌دهد روند نزولی معنی‌دار ($p < 0.05$) در بیش از ۹۵ درصد مساحت کشور رخ داده است و هیچ نقطه‌ای، روند افزایشی معنی‌دار تجربه نکرده است. نواحی بسیار محدودی در شمال غرب و سواحل جنوب دریاچه خزر فاقد روند نزولی معنی‌دار بودند. نمودار میله‌ای سمت چپ، درصد مساحت تحت روند نزولی را به تفکیک ماه نشان می‌دهد. در تمام ماه‌های سال، بیش از ۹۴ درصد ایران روند نزولی معنی‌دار داشته است که در اردیبهشت ماه به ۱۰۰ درصد، در فروردین به ۹۹/۹



شکل ۶- تحلیل روند ماهانه شاخص SPEI در مقیاس ۳ ماهه بر اساس آزمون من‌کندال اصلاح‌شده (سطح اطمینان ۹۵٪)
Figure 6. Monthly trend analysis of 3-month SPEI using modified Mann-Kendall test (95% confidence level)

روند نزولی معنی‌دار را تجربه کردند. درصد مساحت با روند صعودی معنی‌دار در هیچ ماهی از ۰/۵ درصد تجاوز نمی‌کند. این نتایج بیانگر تشدید و تقریباً فراگیر خشکسالی‌های میان‌مدت در ایران در دوره آماری ۱۹۸۵-۲۰۲۴ است. این نتایج نشان می‌دهد روند نزولی کسر آب (P-PET) در مقیاس ۹ ماهه به یک پدیده فراگیر در سطح ایران تبدیل شده و حتی نواحی مرطوب شمالی نیز، روند نزولی را نشان می‌دهند.

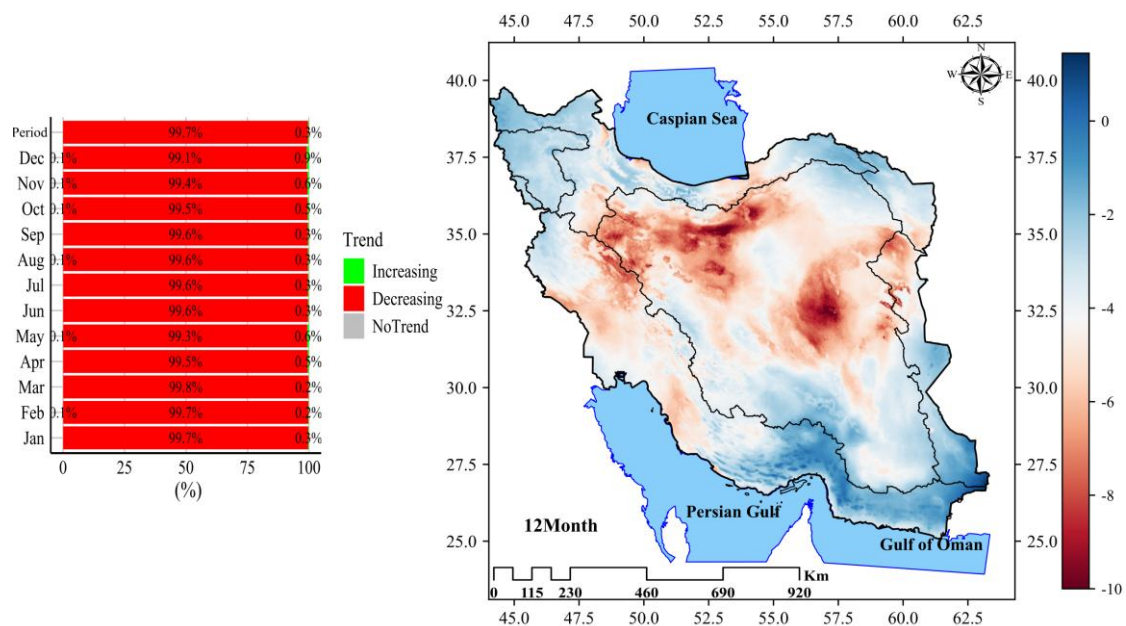
شکل ۷ نتایج آزمون من‌کندال اصلاح‌شده (MMK) را برای شاخص SPEI در مقیاس ۹ ماهه (سطح اطمینان ۹۵ درصد) نشان می‌دهد. نقشه سمت راست نشان‌دهنده روند کاهشی معنی‌دار تقریباً در پهنه ایران است. به‌طوری‌که تنها نقاط بسیار پراکنده‌ای در شمال غرب و سواحل خزر روند صعودی معنی‌دار (سبز) دارند و بخش‌های وسیعی از مرکز، شرق و جنوب مقادیر Z کمتر از ۴/۵- را تجربه کردند. نمودار میله‌ای سمت چپ تأیید می‌کند در تمام ماه‌های سال بیش از ۹۹ درصد مساحت ایران



شکل ۷- تحلیل روند ماهانه شاخص SPEI در مقیاس ۹ ماهه بر اساس آزمون من کندال اصلاح شده (سطح اطمینان ۹۵٪)
Figure 7. Monthly trend analysis of 9-month SPEI using modified Mann-Kendall test (95% confidence level)

در تمام ماه‌های سال، ۹۹/۷ تا ۹۹/۹ درصد مساحت ایران روند نزولی معنی‌دار را تجربه کرده است. این نتایج نشان‌دهنده تشدید و فراگیر خشکسالی هواشناسی بلندمدت در ایران در دوره آماری ۱۹۸۵-۲۰۲۴ است و بیانگر آن است در مقیاس سالانه، کاهش کسر آب (روند نزولی)، به پدیده یکنواخت و با شدت زیاد تبدیل شده است و تمام مناطق کشور از جمله نواحی مرطوب شمالی را به‌طور کامل در بر گرفته است.

شکل ۸ نتایج آزمون من کندال اصلاح شده (MMK) را برای شاخص SPEI در مقیاس ۱۲ ماهه (سطح اطمینان ۹۵ درصد) نشان می‌دهد. نقشه سمت راست بیانگر روند نزولی معنی‌دار در تمام مساحت کشور است. هیچ نقطه‌ای روند افزایشی معنی‌دار (سبز) یا حتی فاقد روند (خاکستری) ندارد و مقادیر آماره Z در بخش‌های وسیعی از مرکز، شرق و جنوب ایران به کمتر از -۱۰ می‌رسد که نشان‌دهنده شدیدترین روند نزولی ثبت شده در میان سه مقیاس زمانی است. نمودار میله‌ای سمت چپ تأیید می‌کند



شکل ۸- تحلیل روند ماهانه شاخص SPEI در مقیاس ۱۲ ماهه بر اساس آزمون من کندال اصلاح شده (سطح اطمینان ۹۵٪)
Figure 8. Monthly trend analysis of 12-month SPEI using modified Mann-Kendall test (95% confidence level)

به طور خلاصه، نمودارها و نقشه‌های مربوط به تحلیل روند شاخص SPEI در مقیاس‌های ۳، ۹ و ۱۲ ماهه (شکل‌های ۶، ۷ و ۸) نشان‌دهنده تشدید و فراگیر شدن ویژگی‌های خشکسالی در ایران در دوره اقلیمی ۲۰۲۴-۱۹۸۵ است. در مقیاس ۳ ماهه، بیش از ۹۵ درصد مساحت کشور، روند نزولی معنی‌دار را تجربه کردند و مقیاس ۹ ماهه، روند نزولی بیشتر شده است (بیش از ۹۹ درصد مساحت) و در مقیاس ۱۲ ماهه، روند نزولی معنی‌دار به‌طور کامل کل کشور را در بر می‌گیرد. یافته‌های پژوهش بیانگر این است با افزایش مقیاس زمانی، خشکسالی از یک پدیده فصلی با تأثیرات محلی به یک چالش بزرگ مقیاس تبدیل شده است که می‌تواند باعث انتشار خشکسالی از هواشناسی به هیدرولوژیک و کشاورزی به صورت فراگیر تبدیل شود و حتی مناطق مرطوب شمالی ایران نیز در معرض پیامدهای خشکسالی شدید قرار گیرند و پیامدهای منفی آن بر منابع آب و امنیت غذایی سرتاسر ایران، بروز کند.

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد خشکسالی در ایران به‌عنوان پدیده‌ای فراگیر و با شدت و تداوم متغیر، از رخدادهای کوتاه‌مدت فصلی تا خشکسالی‌های سالانه و بلندمدت تغییر می‌کند. ماهیت رخدادهای خشکسالی بسته به مدت‌زمان آن‌ها تفاوت قابل‌توجهی دارد. خشکسالی‌های کوتاه‌مدت (۳، ۶ و ۹ ماهه) شدیدتر اما کوتاه‌تر شده‌اند و در عین حال شدت کلی کمتری را نشان می‌دهند، در حالی‌که خشکسالی‌های بلندمدت (۱۲، ۱۸ و ۲۴ ماهه) تغییرات معناداری در مدت، شدت از خود نشان نداده‌اند (Mianabadi et al., 2022). این الگو نشان می‌دهد که ایران بیش از آنکه با خشکسالی‌های چندساله و ممتد مواجه باشد، با دوره‌های خشک شدید اما کوتاه‌مدت و پرتکرار روبه‌رو است. تحلیل داده‌های شبکه‌ای TerraClimate و شاخص SPEI در مقیاس‌های زمانی ۳، ۹ و ۱۲ ماهه حاکی از ناهمگنی مکانی و زمانی خشکسالی در مناطق اقلیمی و حوضه‌های آبریز اصلی ایران بوده و مناطق مرکزی، شرقی و جنوب‌شرقی، بیشترین آسیب‌پذیری را از نظر شدت، تداوم و بزرگی نشان دادند. این یافته‌ها با پژوهش‌های انجام شده در خصوص افزایش شدت و فراوانی خشکسالی در ایران همخوانی دارد (Nazaripour et al., 2021; Mahdizadeh et al., 2025). همچنین، یافته‌های پژوهش حاضر با نتایج Kheyri et al. (2023) هم‌خوانی داشته و نشان می‌دهد ویژگی‌های خشکسالی شامل تداوم، شدت و فواصل رخدادهای خشکسالی، تغییرات زمانی و مکانی دارند. علاوه بر این، برآوردهای آینده ایران حاکی از حرکت به‌سوی خشکسالی‌های پرتکرارتر اما کم‌شدت‌تر است. اگرچه انتظار می‌رود فراوانی خشکسالی در بیشتر مناطق کشور، به‌ویژه در نواحی مرکزی، شرقی و جنوب‌شرقی، به‌طور

قابل‌توجهی افزایش یابد، اما مدت‌زمان، شدت خشکسالی‌ها کاهش خواهد یافت (Asadi-RahimBeygi et al., 2025). این امر نشان می‌دهد که خشکسالی‌های آینده در ایران در مقایسه با الگوهای تاریخی، با فراوانی بیشتر اما تداوم کوتاه‌تر و شدت کمتر مشخص خواهند شد (Asadi-RahimBeygi et al., 2025). تفاوت بارز این پژوهش و پژوهش‌های گذشته، در استفاده از داده‌های شبکه‌ای TerraClimate و تحلیل رویداد محور با چارچوب نوآورانه در نظریه دنباله‌ها است که امکان شناسایی دقیق‌تر خشکسالی‌های میان‌مدت و بلندمدت را فراهم می‌کند و چارچوب مناسب و عملی‌تر را به منظور پایش و مدیریت خشکسالی در سطح ملی ارائه می‌دهد. علاوه بر شدت و تداوم خشکسالی، آنچه که این پژوهش را برجسته می‌کند، در نظر گرفتن فاصله بین رخدادهای خشکسالی است. تداوم خشکسالی، نشانه‌ای از کندی در بازیابی یا ریکاوری اقلیم است و با مفهوم پایداری خشکسالی در پژوهش (Noorisameleh et al., 2021) همخوانی دارد. نتایج آزمون MMK نشان داد روند نزولی شاخص SPEI تقریباً در تمام کشور رخ داده است. با افزایش مقیاس زمانی، خشکسالی از یک پدیده فصلی و محلی به یک چالش هیدرولوژیک، کشاورزی و زیستی بلندمدت تبدیل می‌شود. این یافته‌ها تأکید می‌کند مدیریت ریسک خشکسالی در ایران نیازمند پایش چندمقیاسی، استفاده از داده‌های با وضوح مکانی بالا و سیاست‌های سازگاری با تغییر اقلیم بر مشخصات خشکسالی در هر منطقه است. کاربرد شاخص SPEI بر اساس داده‌های TerraClimate و روش آستانه محور نظریه دنباله‌ها، چارچوب جامع را در آشکارسازی خشکسالی‌های کوتاه‌مدت، میان‌مدت و بلندمدت فراهم می‌کند. این رویکرد می‌تواند زیربنای قوی را برای توسعه مدل‌های پیش‌بینی خشکسالی، ارزیابی سناریوهای تغییر اقلیم و مدیریت منابع آب کشور فراهم کند.

۴- نتیجه‌گیری

این پژوهش با استفاده از داده‌های رستری TerraClimate و محاسبه شاخص SPEI در مقیاس‌های ۳، ۹ و ۱۲ ماهه، همراه با چارچوب نوآورانه نظریه دنباله‌ها و آستانه‌های صدکی ماهانه، تحلیل جامعی از ویژگی‌های خشکسالی هواشناسی ایران در دوره ۲۰۲۴-۱۹۸۵ ارائه داد. ترکیب داده‌های شبکه‌ای با تفکیک مکانی ۴ کیلومتر و رویکرد رویدادمحور، امکان شناسایی دقیق‌تر الگوهای پویایی خشکسالی را نسبت به روش‌های سنتی ایستگاهی فراهم کرد. یافته‌ها نشان می‌دهد که با افزایش مقیاس زمانی، خشکسالی از پدیده‌ای فصلی و محلی به یک فرآیند فراگیر و پایدار تبدیل می‌شود؛ به‌طوری‌که روند نزولی معنادار SPEI در بیش از ۹۵ درصد مساحت کشور در مقیاس کوتاه‌مدت و تقریباً

این پژوهش ارائه شد، می‌تواند در طراحی سیستم‌های هشدار زودهنگام خشکسالی، ارزیابی تاب‌آوری اکوسیستم‌ها و مدیریت بحران به‌کار رود. این پژوهش بر ضرورت استفاده از داده‌های شبکه‌ای در سامانه‌های مدیریت خطر خشکسالی، تحلیل چندمقیاسی و پایش خشکسالی در مقیاس‌های زمانی مختلف ماهانه تا ۲۴ ماه تأکید دارد. رویکردی که می‌تواند نقش تعیین‌کننده در کاهش آسیب‌پذیری اقلیمی ایران و افزایش کارایی تصمیم‌سازی در بخش آب ایفا کند. پیشنهاد می‌شود تحقیقات آینده بر زنجیره انتقال خشکسالی به بخش‌های هیدرولوژیکی و کشاورزی، مدل‌سازی سناریوهای آبی و ارزیابی اثرات اجتماعی-اقتصادی تمرکز کنند تا راهکارهای مؤثرتری برای کاهش آسیب‌پذیری اقلیمی و تأمین امنیت آب و غذا در ایران فراهم شود.

تضاد منافع نویسندگان

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

دسترسی به داده‌ها

دسترسی به داده‌های بارش و نقشه‌های رقوم خشکسالی، با درخواست از نویسنده مسئول میسر می‌باشد.

نظارت، مفهوم‌سازی، بحث، اعتبارسنجی و ویرایش نسخه نهایی مقاله: **سینا کاظم‌پور چورسی**: تحلیل، محاسبات، مصورسازی، نگارش پیش‌نویس.

۱۰۰ درصد در مقیاس سالانه مشاهده شد. در مناطق خشک مرکزی، شرقی و جنوب‌شرقی، تداوم رخدادها به بیش از ۹ ماه، فاصله بین رخدادها به بیش از ۲۲ ماه و بزرگی به بیش از ۱۰ واحد رسید، در حالی که تعداد رخدادها از حدود ۴۶-۴۸ مورد در مقیاس فصلی به ۱۶-۱۹ مورد در مقیاس ۱۲ ماهه کاهش یافت و حوضه خزر کمترین آسیب‌پذیری را نشان داد. این الگوها بیانگر گذار به خشکسالی‌های طولانی‌مدت، کم‌تکرار اما با شدت و پایداری بالا هستند که حتی نواحی مرطوب شمالی را نیز درگیر کرده است. این پژوهش بر این نکته اساسی تأکید دارد تحلیل شدت، تداوم، گستره و بزرگی خشکسالی در ایران را نمی‌توان با رویکردهای کلاسیک مبتنی بر داده‌های ایستگاهی انجام داد زیرا پراکندگی مکانی محدود و ناهمگنی ایستگاه‌های زمینی، قادر به نمایش تغییرات و الگوهای منطقه‌ای خشکسالی نیست. پایش دما، بارش و خشکسالی با قدرت تفکیک مکانی بالا با استفاده از پایگاه‌های شبکه‌ای TerraClimate، توانایی شناسایی الگوهای خشکسالی و تعیین مناطق آسیب‌پذیر را به‌طور قابل‌توجه ممکن می‌سازد و به عنوان مبنای قابل‌اعتماد برای برنامه‌ریزی منابع آب، مدیریت کشاورزی و سیاست‌گذاری در برنامه‌های سازگاری با تغییر اقلیمی در سطح ملی مورد استفاده قرار گیرد. بعلاوه، چارچوب نوآورانه مبتنی بر نظریه دنباله‌ها و شاخص SPEI که در

مشارکت نویسندگان

ایوب میرزائی حسنلو: آماده‌سازی داده‌ها، انجام پژوهش، محاسبات، مصورسازی، نگارش پیش‌نویس؛ **مهدی عرفانیان**:

منابع

استفاده از نرم‌افزار R (بررسی موردی: استان کردستان). فیزیک زمین و فضا، ۴۲(۳)، ۶۴۳-۶۳۳. doi:10.22059/jesphys.2016.57881
میرزائی حسنلو، ا.، عرفانیان، م. و جوان، خدیجه (۱۴۰۳). تحلیل زمانی و مکانی شاخص خشکسالی PDI در منطقه شمال غرب ایران. مهندسی اکوسیستم بیابان، ۱۲(۴۰)، ۲۸-۱۳. doi: 10.22052/deej.2024.254336.1044
نظری‌پور، حمید، حمیدیان‌پور، محسن، خسروی، محمود، و وزیری، محدثه (۱۴۰۱). تغییرپذیری فراوانی و شدت خشکسالی در ایران با استفاده از شاخص استاندارد شده بارش-تبخیر تعرق. علوم آب و خاک، ۲۶(۴)، ۲۴۷-۲۳۳. doi:10.47176/jwss.26.4.45861.۲۳۳

شیرمحمدی علی‌اکبرخانی، زهرا، صابرعلی، سید فرهاد، نستری نصرآبادی، حسین، و میرزائی، سید محمد جواد (۱۴۰۳). ارزیابی شاخص‌های خشکی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای موجود در سامانه گوگل ارث انجین. مهندسی آبیاری و آب/ایران، ۱۵(۵۷)، ۳۶-۲۱. doi: 10.22125/iwe.2024.429308.1776
محمدی، نیلوفر، حجازی‌زاده، زهرا، ضیاییان فیروزآبادی، پرویز، کربلایی دوری، علیرضا، گله‌بان، اسلام، و علوی‌پناه، کاظم (۱۴۰۴). ارزیابی اثرات تغییر اقلیم بر دمای سطح زمین و خطر خشکسالی در کاربری کشاورزی استان خوزستان. مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، doi: 10.22098/mmws.2025.18202.1658
مصطفی‌زاده، رثوف، و ذبیحی، محسن (۱۳۹۵). تحلیل و مقایسه شاخص‌های SPI و SPEI در ارزیابی خشکسالی هواشناسی با

References

Abatzoglou, J. T., Dobrowski, S. Z., Parks, S. A., & Hegewisch, K. C. (2018). TerraClimate, a high-resolution global dataset of monthly

climate and climatic water balance from 1958–2015. *Scientific Data*, 5(1), 1-12. doi: 10.1038/sdata.2017.191.

- Akter, M. L., Rahman, M. N., Azim, S. A., Rony, M. R. H., Sohel, M. S., & Abdo, H. G. (2025). Estimation of drought trends and comparison between SPI and SPEI with prediction using machine learning models in Rangpur, Bangladesh. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 9(2), 596-610. doi: 10.1080/24749508.2023.2254003.
- Alemu, M. M., Zaitchick, B. F., Enku, T., Worqlul, A. W., Yimer, E. A., & van Griensven, A. (2025). Evaluating hydroclimate dynamics: Trend analysis and change detection for enhanced drought monitoring in the upper Blue Nile basin. *Journal of Water and Climate Change*, 16(8), 2519-2537. doi: 10.2166/wcc.2025.054
- Ansari Amoli, A., Aghighi, H., & Lopez-Baeza, E. (2022). Drought risk evaluation in Iran by using geospatial technologies. *Remote Sensing*, 14(13), 3096. doi: 10.3390/rs14133096.
- Araghi, A., & Adamowski, J. F. (2024). Assessment of 30 gridded precipitation datasets over different climates on a country scale. *Earth Science Informatics*, 17(2), 1301-1313. doi: 10.1007/s12145-023-01215-0.
- Araghi, A., Martinez, C. J., & Adamowski, J. F. (2023). Evaluation of TerraClimate gridded data across diverse climates in Iran. *Earth Science Informatics*, 16(2), 1347-1358. doi: 10.1007/s12145-023-00967-z.
- Asadi-RahimBeygi, N., Mofidi, A., Zarrin, A., & Dadashi-Roudbari, A. (2025). Near-term climate extremes in Iran based on compound hazards analysis. *Scientific Reports*, 15(1), 4384. doi:10.1038/s41598-025-29026-x.
- Bachmair, S., Tanguy, M., Hannaford, J., & Stahl, K. (2018). How well do meteorological indicators represent agricultural and forest drought across Europe?. *Environmental Research Letters*, 13(3), 034042. doi: 10.1088/1748-9326/aaafda.
- Burić, D., Mihajlović, J., Doderović, M., & Mijanović, I. (2024). Comparative analysis of SPI and SPEI drought indices for Montenegro and the impact of teleconnections. *Journal of Water and Climate Change*, 15(10), 5149-5168. doi: 10.2166/wcc.2024.238.
- Chaparinia, F., Hadei, M., Yaghmaeian, K., Hadi, M., & Naddafi, K. (2025). Evaluation of climate indices related to water resources in Iran over the past 3 decades. *Scientific Reports*, 15(1), 11846. doi: 10.1038/s41598-025-95370-7.
- Chen, Y., Taylor, P., Cuddy, S., Wahid, S., Penton, D., & Karim, F. (2024). Inferring vegetation response to drought at multiscale from long-term satellite imagery and meteorological data in Afghanistan. *Ecological Indicators*, 158, 111567. doi: 10.1016/j.ecolind.2024.111567.
- Ghaedi, S. (2021). Anomalies of precipitation and drought in objectively derived climate regions of Iran. *Hungarian Geographical Bulletin*, 70(2), 163-174. doi: 10.15201/hungeobull.70.2.5.
- Hamarash, H., Hamad, R., & Rasul, A. (2022). Meteorological drought in semi-arid regions: A case study of Iran. *Journal of Arid Land*, 14(11), 1212-1233. doi: 10.1007/s40333-022-0106-9.
- Hamed, K. H., & Rao, A. R. (1998). A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology*, 204(1-4), 182-196. doi: 10.1016/S0022-1694(97)00125-X.
- Heim Jr, R. R. (2002). A review of twentieth-century drought indices used in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(8), 1149-1166. doi: 10.1175/1520-0477-83.8.1149.
- Helali, J., Momenzadeh, H., Oskouei, E. A., Lotfi, M., & Hosseini, S. A. (2021). Trend and ENSO-based analysis of last spring frost and chilling in Iran. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 133(4), 1203-1221. doi: 10.1007/s00703-021-00804-2.
- Kamruzzaman, M., Almazroui, M., Salam, M. A., Mondol, M. A. H., Rahman, M. M., Deb, L., ... & Islam, A. R. M. T. (2022). Spatiotemporal drought analysis in Bangladesh using the standardized precipitation index (SPI) and standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI). *Scientific Reports*, 12(1), 20694. doi: 10.1038/s41598-022-24146-0.
- Kashani, A., & Safavi, H. R. (2025). Assessing groundwater drought in Iran using GRACE data and machine learning. *Scientific Reports*, 15(1), 14671. doi: 10.1038/s41598-025-99342-9.
- Keune, J., Di Giuseppe, F., Barnard, C., Damasio da Costa, E., & Wetterhall, F. (2025). ERA5–Drought: Global drought indices based on ECMWF reanalysis. *Scientific Data*, 12(1), 616. doi:10.1038/s41597-025-04896-y.
- 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.
- Khaghani, Z., Sharafati, A., Kheyruri, Y., Hameed, A. S., & Ariyaei, A. (2025). A fuzzy-based approach for clustering the meteorological drought over Iran. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 39(2), 697-723. doi: 10.1007/s00477-024-02891-0.
- Khaleghi, S., & Surian, N. (2019). Channel adjustments in Iranian rivers: a review. *Water*, 11(4), 672. doi: 10.3390/w11040672.
- Kheyruri, Y., Nikaein, E., & Sharafati, A. (2023). Spatial monitoring of meteorological drought characteristics based on the NASA POWER precipitation product over various regions of

- Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(15), 43619-43640. doi: 10.1007/s11356-023-25283-3.
- Lemenkova, P. (2022). Mapping climate parameters over the Territory of Botswana using GMT and gridded surface data from TerraClimate. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11(9), 473. doi: 10.3390/ijgi11090473.
- Li, L., Peng, Q., Wang, M., Cao, Y., Gu, X., & Cai, H. (2024). Quantitative analysis of vegetation drought propagation process and uncertainty in the Yellow River Basin. *Agricultural Water Management*, 295, 108775. doi: 10.1016/j.agwat.2024.108775.
- Liu, X., Yu, S., Yang, Z., Dong, J., & Peng, J. (2024). The first global multi-timescale daily SPEI dataset from 1982 to 2021. *Scientific Data*, 11(1), 223. doi: 10.1038/s41597-024-03047-z.
- Liu, Y., Zhang, K., Li, Z., Liu, Z., Wang, J., & Huang, P. (2020). A hybrid runoff generation modelling framework based on spatial combination of three runoff generation schemes for semi-humid and semi-arid watersheds. *Journal of Hydrology*, 590, 125440. doi: 10.1016/j.jhydrol.2020.125440.
- Mahdizadeh, J., Ghavidel, Y., & Farajzadeh, M. (2025). High-resolution spatiotemporal analysis of drought dynamics in Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 197(9), 1005. doi: <https://doi.org/10.1007/s10661-025-14443-2>.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, 17(22), 179-183.
- Mianabadi, A., Salari, K., & Pourmohamad, Y. (2022). Drought monitoring using the long-term CHIRPS precipitation over Southeastern Iran. *Applied Water Science*, 12, 183. doi:10.1007/s13201-022-01705-4.
- Mirzaei Hassanlu, A., Erfanian, M., & Javan, Kh. (2024). Spatial and Temporal Analysis of PDI Drought Index in the Northwest Zone of Iran. *Desert Ecosystem Engineering*, 12(40): 13-28. 10.22052/deej.2024.254336.1044. [In Persian]
- Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1-2), 202-216. doi: 10.1016/j.jhydrol.2010.07.012.
- Mohammadi, N., Hedjazizadeh, Z., Zeaiean Firouzabadi, P., Karbalaee Doree, A., Galehban, E., & Alavi Panah, K. (2025). Assessment of the impacts of climate change on land surface temperature and drought risk in agricultural land use in Khuzestan province. *Water and Soil Management and Modelling*. doi: 10.22098/mmws.2025.18202.1658. [In Persian]
- Momeni Damaneh, J., Tajbakhsh, S. M., & Tamassoki, E. (2025). Assessing the impact of global meteorological signals on drought occurrence in Iran. *Water and Soil Management and Modelling*, 5(Special Issue : Climate Change and Effects on Water and Soil), 62-87. doi: 10.22098/mmws.2025.17690.1616.
- Momenian, P., Alaei, N., & Mostafazadeh, R. (2025). Spatiotemporal changes in river flow seasonality and predictability using Colwell indices in Northwestern Iran. *Scientific Reports*. doi: 10.1038/s41598-025-33205-1.
- Mostafazadeh, R., & Zabihi, M. (2016). Comparison of SPI and SPEI indices to meteorological drought assessment using R programming (Case study: Kurdistan Province). *Journal of the Earth and Space Physics*, 42(3), 633-643. doi: 10.22059/jesphys.2016.57881. [In Persian]
- Mukherjee, S., Mishra, A., & Trenberth, K. E. (2018). Climate change and drought: a perspective on drought indices. *Current Climate Change Reports*, 4(2), 145-163. doi: 10.1007/s40641-018-0098-x.
- Nazaripour, H., Hamidianpour, M., Khosravi, M., & Vaziri, M. (2022). Variability of drought frequency and intensity in Iran using SPEI. *Journal of Water and Soil Science*, 26(4), 233-247. doi: 10.47176/jwss.26.4.45861. [In Persian]
- Noorisameleh, Z., Gough, W. A., & Mirza, M. M. Q. (2021). Persistence and spatial-temporal variability of drought severity in Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(35), 48808-48822. doi: 10.1007/s11356-021-14100-4.
- Palmer, W. C. (1965). Meteorological drought. U.S. Department of Commerce Weather Bureau, p. 58.
- Peng, L., Sheffield, J., Wei, Z., Ek, M., & Wood, E. F. (2024). An enhanced Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI) drought-monitoring method integrating land surface characteristics. *Earth System Dynamics*, 15(5), 1277-1300. doi: 10.5194/esd-15-1277-2024.
- Quiring, S. M., & Ganesh, S. (2010). Evaluating the utility of the Vegetation Condition Index (VCI) for monitoring meteorological drought in Texas. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150(3), 330-339. doi: 10.1016/j.agrformet.2009.11.015.
- Salvacion, A. R. (2021). Mapping meteorological drought hazard in the Philippines using SPI and SPEI. *Spatial Information Research*, 29(6), 949-960. doi: 10.1007/s41324-021-00402-9.
- Shiravand, H., & Bayat, A. (2023). Vulnerability and drought risk assessment in Iran based on fuzzy logic and hierarchical analysis.

- Theoretical and Applied Climatology*, 151(3-4), 1323-1335. doi: 10.1007/s00704-022-04323-x.
- Shirmohammadi Aliakbarkhani, Z., Saberali, S. F., Nastari Nasrabadi, H., & Mirzaei, S. M. J. (2024). Drought index assessment with satellite data available in Google Earth Engine. *Irrigation and Water Engineering*, 15(1), 21-36. doi: 10.22125/iwe.2024.429308.1776. [In Persian]
- Solaimani, K., & Ahmadi, S. B. (2024). Evaluation of TerraClimate gridded data in investigating the changes of reference evapotranspiration in different climates of Iran. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 52, 101678. doi: 10.1016/j.ejrh.2024.101678.
- Torkaman Pary, At., Rastgoo, p., Opp, C., Zeuss, D & Abera, T.A. (2024). Impacts of drought severity and frequency on natural vegetation across Iran. *Water*, 16(22), 3334. doi:10.3390/w16223334.
- 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.
- Xie, W., & Tian, H. (2011). Study on the application of five drought indexes in Anhui Province. *Meteorological Monthly*, 37 (4), 503–507.
- Yuan, S., Quiring, S. M., & Zhao, C. (2020). Evaluating the utility of drought indices as soil moisture proxies for drought monitoring and land–atmosphere interactions. *Journal of Hydrometeorology*, 21(9), 2157-2175. doi: 10.1175/JHM-D-20-0022.1.
- Zarei, A. R., & Eslamian, S. (2017). Trend assessment of precipitation and drought index (SPI) using parametric and non-parametric trend analysis methods (case study: arid regions of southern Iran). *International Journal of Hydrology Science and Technology*, 7(1), 12-38. doi: 10.1504/IJHST.2017.080957.
- Zhou, Y. L., Zhou, P., Jin, J. L., & Li, J. (2014). Establishment of hydrological drought index based on sources of regional water supply and its application to drought frequency analysis for Kunming. *Journal of Hydraulic Engineering*, 45(9), 1038-1047. doi: 10.13243/j.cnki.slxb.2014.09.004.