

Identification of Spatiotemporal Drought Patterns in Southeastern Iran Using a Graphical Trend Analysis Approach

Danial Barahooie¹, Mohsen Hamidianpour² , Faeze Shoja³

1. Department of Physical Geography, Faculty of Geography and Environmental Planning, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

Email: brahooeidanial@gmail.com

2. (Corresponding Author) Department of Physical Geography, Faculty of Geography and Environmental Planning, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

Email: mhamidianpour@gep.usb.ac.ir

3. Department of Physical Geography, University of Tehran, Teheran, Iran

Email: faeze.shoja@pgs.usb.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article History:

Received:

28 April 2024

Received in revised form:

3 July 2025

Accepted:

11 August 2025

Available online:

16 September 2025

Keywords:

Desertification,

Albedo,

Mond Basin,

Environmental Changes,

Google Earth Engine.

ABSTRACT

Southeastern Iran, characterized by an arid climate, has recently experienced acute drought conditions and significant water scarcity. This study examines the spatiotemporal dynamics of drought and associated climatic parameters in the region. Minimum and maximum temperature and precipitation data from 20 meteorological stations (1995–2018) were obtained from the Iran Meteorological Organization. The Standardized Precipitation–Evapotranspiration Index (SPEI) was subsequently calculated, and its time series analyzed to quantify drought characteristics, including intensity, duration, severity, and frequency. Trends in climatic parameters were assessed using the Innovative Trend Analysis (ITA) method. Results show that the region experienced pronounced wet conditions until the end of 1997, followed by increasingly intense and prolonged drought events from the late 1990s onward. Within this period, the most extreme drought was observed in Chabahar in 2009 (SPEI = –4.4), while the wettest condition occurred in Anar in 1996 (SPEI = 2.5). Additionally, the greatest drought intensity was recorded at Bam (–1.48), the highest frequency in Khash (18.75%), and the most severe drought conditions in Baft, Qeshm Island, and Bam (–12.06, –11.65, and –11.35, respectively). These locations represent the most critically affected zones within the study region. The ITA results further revealed a significant upward trend in summer temperatures and a pronounced decline in precipitation during the cold season. The observed decline in SPEI values across wet categories underscores the direct influence of climate change on regional water resources.

Cite this article: Barahooie, D., Hamidianpour, M., & Shoja, F. (2025). Identification of Spatiotemporal Drought Patterns in Southeastern Iran Using a Graphical Trend Analysis Approach. *Physical Geography Research Quarterly*, 57 (2), 77-98.

<http://doi.org/10.22059/jphgr.2025.398145.1007893>



© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press

Extended Abstract

Introduction

Drought represents one of the most persistent and insidious environmental hazards confronting arid and semi-arid regions worldwide. It develops gradually, often without a distinct onset or termination, yet generates profound and enduring socio-economic and environmental repercussions. Unlike abrupt extreme weather events such as floods or cyclones, droughts unfold silently, progressively undermining ecosystems, human livelihoods, and economic stability. According to the World Meteorological Organization (WMO), droughts accounted for 34% of all disaster-related fatalities worldwide between 1970 and 2019.

In southeastern Iran—a region marked by aridity, elevated temperatures, and highly variable rainfall—the frequency, intensity, and duration of drought events have intensified in recent decades. These changes are driven by climate change, atmospheric circulation anomalies, and insufficient water management infrastructure. Given these challenges, understanding the spatiotemporal dynamics of drought is crucial for effective resource planning, evidence-based policy formulation, and the development of robust disaster mitigation strategies.

Methodology

This study investigates the temporal and spatial dynamics of drought in southeastern Iran through a quantitative framework grounded in climatological and hydrometeorological analysis. The study area covers approximately one-quarter of Iran's territory, including the provinces of Sistan and Baluchestan and Kerman, along with parts of Hormozgan, South Khorasan, Yazd, and Fars. This region is characterized by hyper-arid to semi-arid climatic zones, with mean annual precipitation ranging from 68 to 214 mm and average temperatures between 14°C and 27°C.

Climatic data—including minimum and maximum daily temperatures as well as total monthly precipitation—were obtained from 20 synoptic meteorological stations across the study area for the period 1995–2018. The Standardized Precipitation–

Evapotranspiration Index (SPEI) was employed as the principal drought indicator because of its capacity to integrate precipitation and temperature anomalies. SPEI values were calculated on a 12-month timescale to represent long-term hydrological drought conditions. To examine the temporal characteristics of drought events—including severity, duration, intensity, and frequency—the study applied Run Theory, which identifies uninterrupted sequences of negative SPEI values exceeding a defined threshold.

In addition, the Innovative Trend Analysis (ITA) method was employed to detect trends in temperature, precipitation, and drought behavior. ITA offers a non-parametric graphical approach that circumvents assumptions related to data distribution, autocorrelation, and seasonality. By dividing time series into two sub-periods, independently ranking the values, and comparing their distributions against a 1:1 reference line, ITA yields nuanced insights into concealed or nonlinear trends that conventional tests (e.g., Mann–Kendall) may fail to detect.

Results and discussion

SPEI-based drought monitoring revealed that, until 1997, southeastern Iran experienced moderate to extreme wet conditions, particularly at stations in Kerman Province such as Anar, Shahr-e Babak, and Rafsanjan, where SPEI values exceeded +2.5 in 1996. From the late 1990s onward, however, the frequency and persistence of drought events increased markedly. The periods 1998–2002, 2006, and 2008–2012 emerged as the driest intervals within the study period. Stations in Sistan and Baluchestan—such as Zahedan, Zabol, Zahak, Iranshahr, and Khash—exhibited the greatest SPEI fluctuations, with prolonged drought durations of 5 to 7 years.

The most extreme drought was recorded at Chabahar in 2009, where SPEI dropped to −4.4, signifying an exceptional event. By contrast, Anar experienced the wettest year in 1996, with an SPEI of +2.5. Run Theory analysis further quantified drought characteristics: average intensity ranged from −1.15 to −1.48 across stations, while

magnitude values extended from -4.5 to below -12 , with the most severe conditions recorded in Bam, Baft, and Qeshm. Drought frequency varied between 10% and 19% across the region, with Khash, Saravan, and Zabol exhibiting the highest recurrence rates.

Spatial analysis revealed a clear pattern: lowland coastal areas, including southern Hormozgan and Sistan, exhibited the highest drought susceptibility due to elevated temperatures and intense evapotranspiration, whereas upland regions such as Kerman and its surroundings experienced comparatively more favorable moisture conditions. Seasonal maps of SPEI distribution corroborated this spatial contrast, particularly during winter and spring.

Trend analysis using ITA revealed significant increases in maximum temperatures, particularly during summer, consistent with broader global warming patterns. Minimum temperatures increased during spring, summer, and autumn, but declined significantly in winter. Winter precipitation exhibited a pronounced declining trend, particularly within the 80–120 mm range. These shifts in temperature and precipitation patterns culminated in a downward trend in SPEI values, particularly within categories denoting moderate to extreme wetness. These transitions reflect not only increasing aridity but also the weakening of historically wet periods, underscoring the intensification of drought across the study region.

Conclusion

This study demonstrates that southeastern Iran is experiencing pronounced climatic shifts, characterized by declining precipitation, rising temperatures, and increasingly severe and prolonged droughts. These trends pose serious risks to water availability, agricultural sustainability, and the overall resilience of the region. The findings underscore the urgent need for adaptive climate strategies and sustainable water management policies to mitigate the intensifying impacts of climate change in this highly vulnerable region.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

Authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work declaration of competing interest none.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to all the scientific consultants of this paper.

شناسایی الگوهای زمانی و مکانی خشک‌سالی در جنوب شرق ایران با رویکردی مبتنی بر روش گرافیکی تحلیل روند

دانیال براهویی^۱، محسن حمیدیان پور^۲ ، فائزه شجاع^۳

۱- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران. رایانامه: brahooeidanial@gmail.com

۲- نویسنده مسئول، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران. رایانامه: mhamidianpour@gep.usb.ac.ir

۳- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: faeze.shoja@pgs.usb.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۰۲/۰۸

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۴/۰۴/۱۲

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۵/۲۰

تاریخ چاپ:

۱۴۰۴/۰۶/۲۵

واژگان کلیدی:

جنوب شرق ایران،

تئوری Run،

تغییرات اقلیمی،

ITA،

SPEI

مشخصه‌های

خشک‌سالی،

منطقه جنوب شرق ایران جز نواحی کم باران و خشک محسوب می‌شود که در سال‌های اخیر با خشک‌سالی و کم‌آبی شدید روبه‌رو شده است. در این پژوهش، به‌منظور بررسی الگوهای خشک‌سالی در جنوب شرق ایران و شناخت رفتار پارامترهای اقلیمی در این منطقه، مقادیر کمینه و بیشینه دما و همچنین بارش ۲۰ ایستگاه سینوپتیک طی دوره آماری ۲۰۱۸-۱۹۹۵ از سازمان هواشناسی کشور دریافت شد. سپس با محاسبه شاخص SPEI و تحلیل سری‌های زمانی این شاخص، مشخصه‌های مختلف خشک‌سالی از جمله شدت، مدت، بزرگی و فراوانی رویدادهای خشک‌سالی تعیین گردید. در ادامه با کاربرد آزمون روند نوآورانه (ITA)، معنی‌داری روند پارامترهای اقلیمی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که منطقه مورد مطالعه تا پایان سال ۱۹۹۷ تحت تأثیر ترسالی‌های شدید بوده و از اواخر دهه ۱۹۹۰، خشک‌سالی‌ها با شدت و تداوم بیشتری رخ داده‌اند. در این بازه شدیدترین خشک‌سالی با مقدار SPEI ۴/۴- در سال ۲۰۰۹ در چابهار و مرطوب‌ترین وضعیت با شاخص ۵/۲ در سال ۱۹۹۶ در انار ثبت گردیده است. همچنین ایستگاه بم با ثبت وخیم‌ترین شدت خشک‌سالی (۱/۴۸-)، خاش بیش‌ترین فراوانی (۱۸/۷۵ درصد) و بافت، جزیره قشم و بم با بیشترین مقادیر شاخص بزرگی خشک‌سالی (به ترتیب ۱۲/۰۶-، ۱۱/۶۵- و ۱۱/۳۵-)، بحرانی‌ترین وضعیت را در محدوده پژوهشی داشتند. نتایج آزمون ITA نیز بیانگر شیب مثبت و روند افزایشی معنی‌دار دما در تابستان و کاهش معنی‌دار بارش در دوره سرد سال بود؛ این تغییرات به‌وضوح در روند نزولی SPEI در طبقات مرطوب شاخص مشاهده گردید که بیانگر آسیب‌پذیری وضعیت آبی منطقه در برابر تغییرات اقلیمی اخیر است.

استناد: براهویی، دانیال؛ حمیدیان‌پور، محسن و شجاع، فائزه (۱۴۰۳). شناسایی الگوهای زمانی و مکانی خشک‌سالی در جنوب شرق ایران با رویکردی مبتنی بر روش گرافیکی تحلیل روند. *مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۷ (۲)، ۷۷-۹۸.

<http://doi.org/10.22059/jphgr.2025.398145.1007893>

مقدمه

خشک‌سالی، پدیده‌ای مخرب با پیامدهای گسترده اجتماعی-اقتصادی، ۳۴٪ از تلفات بلایای جهانی در دوره ۱۹۷۰-۲۰۱۹ را به خود اختصاص داده است (Tabari & Willems, 2022; WMO, 2021). این مخاطره تدریجی، برخلاف سایر بلایا، آغاز و پایان مشخصی ندارد و می‌تواند در مناطق خشک و نیمه‌خشک هفته‌ها تا قرن‌ها به طول انجامد (WMO, 2023; Kartal, 2023). در حال حاضر، فراوانی و شدت خشک‌سالی‌ها رو به افزایش بوده و بر گرمایش جهانی، بقای انسان و توسعه پایدار تأثیر قابل‌توجهی دارد (Thomas & Prasannakumar, 2016). عوامل پیچیده‌ای همچون عدم توسعه پروژه‌های حفظ آب، قطع بی‌رویه منابع جنگلی و گردش غیرعادی جو، بر خشک‌سالی در مناطق شدیداً خشک تأثیر می‌گذارند (Min et al., 2011).

با توجه به عدم قطعیت زمان وقوع خشک‌سالی، توسعه سیاست‌های مقابله‌ای نیازمند اطلاعات دقیق از مشخصه‌های آن است (Burton et al., 2013; Jain et al., 2015). پایش و واکاوی خشک‌سالی با استفاده از شاخص‌های گوناگون، برای پیش‌بینی و کاهش اثرات نامطلوب آن ضروری است (Chandrasekara et al., 2021; Verma et al., 2021; Patel et al., 2022). این شاخص‌ها، با استفاده از پارامترهای هیدرو-اقلیمی، مقادیر عددی را ارائه می‌دهند (Verma et al., 2022). در میان بیش از ۱۵۰ شاخص موجود، شاخص بارش استاندارد (SPEI) (McKee et al., 1993) و شاخص بارش تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) (Vicente-Serrano et al., 2010) از پرکاربردترین‌ها هستند.

شاخص SPEI، با در نظر گرفتن تفاوت بین تبخیر و تعرق بالقوه و بارندگی تجمعی در مقیاس‌های زمانی مختلف، شاخصی مناسب برای ارزیابی تأثیر افزایش دما بر شدت خشک‌سالی است (Vicente-Serrano et al., 2010; Beguería et al., 2014; Manzano et al., 2019). این شاخص به‌طور گسترده برای پایش شدت، کمی‌سازی و تحلیل ویژگی‌های خشک‌سالی در سراسر جهان استفاده می‌شود (Potop et al., 2012; Asong et al., 2018; Pandžić et al., 2020; Wang et al., 2021). پژوهش‌های زیادی، از جمله (Polong et al., 2019) در کنیا، (Ngunvava et al., 2019) در شرق آفریقا، و (Bazrafshan et al., 2019) در ایران، برتری SPEI را در پایش خشک‌سالی و پاسخگویی سریع‌تر به تغییرات اقلیمی نشان داده‌اند. (Fung et al., 2020) نیز اهمیت دما را در شکل‌گیری خشک‌سالی با افزایش مقیاس زمانی تأیید کردند و SPEI را برای خشک‌سالی‌های میان‌مدت و بلندمدت مناسب‌تر دانستند.

پژوهش‌های کنونی در ایران نیز بر اهمیت SPEI و بررسی ویژگی‌های خشک‌سالی تأکید دارند. (Hailesilassie et al., 2023) در اتیوپی به افزایش شدت و فراوانی خشک‌سالی‌ها در دهه‌های پسین اشاره کردند. (Parsamehr et al., 2018) افزایش روند شدت خشک‌سالی در استان فارس را طی دهه اخیر گزارش دادند. (2023) Torabinezhad et al. فراوانی بیشتر خشک‌سالی در غرب، جنوب غرب، سواحل خلیج فارس و شمال غرب ایران را نشان دادند. (Rezaei et al., 2024) نیز با تحلیل ویژگی خشک‌سالی‌های ایران به کاهش فراوانی با افزایش مقیاس‌های زمانی و افزایش تداوم، بزرگی و شدت اشاره کردند. همچنین، بیشینه فراوانی خشک‌سالی در جنوب شرق و شرق کشور و کمینه آن در سواحل شمالی و جنوب غرب ایران مشاهده شده است.

در سال‌های پسین، تغییرات اقلیم جهانی به‌طور چشمگیری بر چرخه هیدرولوژیکی تأثیر گذاشته و منجر به افزایش شدت و فراوانی رویدادهای شدید، از جمله افزایش دما، تغییر در الگوهای بارش، خشک‌سالی و... در سراسر جهان شده است ((Strzepek et al., 2010; Cai et al., 2014; Haile et al., 2020; Philip et al., 2020). منطقه جنوب شرق ایران که ذاتاً جزو نواحی خشک و کم‌باران کشور محسوب می‌شود، در سال‌های اخیر با تشدید بحران خشک‌سالی و

کم‌آبی مواجه شده است. گزارش‌های اخیر نشان می‌دهد که این روند نه تنها متوقف نشده، بلکه ابعاد وخیم‌تری نیز یافته است. به عنوان نمونه، بر اساس شاخص SPEI یک‌ساله منتهی به آبان ماه ۱۴۰۳، حدود ۹۷/۸٪ از مساحت استان سیستان و بلوچستان تحت تأثیر درجات مختلف خشک‌سالی قرار داشته که از این میان، ۴۴/۹٪ آن با "خشک‌سالی بسیار شدید" دست‌وپنجه نرم می‌کند. این شرایط بحرانی، که با کاهش ۹۳ درصدی بارش در سال زراعی جاری نسبت به میانگین بلندمدت همراه بوده، تداوم یک دوره خشک‌سالی بلندمدت بیش از دو دهه‌ای را تأیید می‌کند استمرار این روند، هم‌زمان با پیش‌بینی افزایش ۱ تا ۲ درجه‌ای دمای هوا نسبت به نرمال، می‌تواند تبعات جبران‌ناپذیری بر منابع آب، کشاورزی و امنیت زیستی منطقه در پی داشته باشد (خبرگزاری ایسنا، ۱۴۰۳: <https://www.isna.ir/news/1403100402606>). این شرایط، اهمیت تحلیل دقیق الگوهای خشک‌سالی را دوچندان می‌کند. مطالعات پیشین در این منطقه جنبه‌های مختلفی از این پدیده را واکاوی کرده‌اند؛ برخی به مقایسه شاخص‌های مبتنی بر بارش پرداخته‌اند (Hejazizadeh et al., 2021)، برخی دیگر بر تحلیل همدیدی بارش زمستانه متمرکز بوده‌اند (Moradi, 2020) و گروهی نیز با استفاده از مدل‌های اقلیمی به پیش‌بینی روندهای آبی دما و بارش پرداخته‌اند (Farzaneh et al., 2021; Safarzaie et al., 2023). اخیراً نیز Kashki & Ghorbani (۱۴۰۳) با استفاده از شاخص‌های هیدرولوژیکی به روند افزایشی شدت و مدت خشک‌سالی‌ها اشاره کرده‌اند.

با وجود این پژوهش‌های ارزشمند، یک شکاف پژوهشی ویژه‌ای در تحلیل جامع الگوهای زمانی و مکانی خشک‌سالی اقلیمی در منطقه مورد مطالعه وجود دارد. پژوهش پیش‌رو تلاش دارد تا با یک رویکرد ترکیبی، درک عمیق‌تری از دینامیک خشک‌سالی در منطقه ارائه دهد. در این راستا، نخست مشخصه‌های بنیادین خشک‌سالی با استفاده از شاخص SPEI و تئوری ران استخراج می‌گردد. سپس، به عنوان وجه تمایز اصلی این پژوهش، روند تغییرات پارامترهای اقلیمی با استفاده از روش گرافیکی تحلیل روند نوآورانه (ITA) ارزیابی خواهد شد. این روش، برخلاف آزمون‌های روند کلاسیک، قادر است روندهای پنهان و غیرخطی را در بازه‌های مختلف مقادیر (داده‌های کم، متوسط و زیاد) آشکار سازد و تفسیری بصری و دقیق از تغییرات ارائه دهد. بنابراین، هدف مطالعه پیش‌رو ارائه یک تحلیل چندبعدی از خشک‌سالی در جنوب شرق ایران با تمرکز بر شناسایی الگوهای روند پیچیده است تا به تدوین استراتژی‌های مؤثرتر مدیریت منابع آب کمک نماید.

روش پژوهش

داده‌های مورد نیاز برای این پژوهش شامل پارامترهای اقلیمی دمای کمینه، دمای بیشینه و بارش در مقیاس ماهانه، برای ۲۰ ایستگاه سینوپتیک منتخب واقع در منطقه مطالعاتی می‌باشد. این داده‌ها از سازمان هواشناسی کشور برای یک دوره آماری ۲۴ ساله (۱۹۹۵-۲۰۱۸) دریافت و پس از بررسی و کنترل کیفی، برای محاسبات بعدی آماده‌سازی شدند. پراکنش ایستگاه‌های سینوپتیک مورد مطالعه در شکل ۱ نشان داده شده است.

این پژوهش با هدف شناسایی الگوهای زمانی و مکانی خشک‌سالی در جنوب شرق ایران و تحلیل روندهای تغییرات اقلیمی، در سه مرحله اصلی و به ترتیب زیر انجام شده است. جزئیات کامل هر یک از این مراحل در بخش‌های بعدی به تفکیک ارائه خواهد شد:

محاسبه شاخص خشک‌سالی SPEI: در گام نخست، با استفاده از داده‌های اقلیمی شامل بارش، دمای کمینه و دمای بیشینه، شاخص SPEI در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه برای ایستگاه‌های منتخب محاسبه گردید. این شاخص به عنوان یک ابزار کلیدی برای ارزیابی مشخصه‌های خشک‌سالی عمل می‌کند.

تحلیل ویژگی‌های خشک‌سالی بر اساس تئوری ران: پس از استخراج مقادیر شاخص SPEI، برای شناسایی و کمی‌سازی خصوصیات مهم رویدادهای خشک‌سالی، از رویکرد تئوری ران بهره گرفته شد. در این مرحله، ویژگی‌هایی نظیر مدت‌زمان (Duration)، بزرگی (Severity)، شدت (Intensity) و فراوانی (Frequency) رویدادهای خشک‌سالی تعیین و تحلیل شدند. نظریه ران (Run theory) عموماً برای شناسایی رویدادهای فاجعه‌مورد استفاده قرار می‌گیرد. مزیت اصلی این نظریه در قابلیت خودکارسازی شناسایی رویدادها نهفته است که از ذهنیت‌گرایی و عدم قطعیت ناشی از قضاوت دستی جلوگیری می‌کند (Jin et al., 2023, Sun et al., 2023b). بر اساس این رویکرد، یک رویداد فاجعه زمانی رخ داده تلقی می‌شود که شاخص به زیر یک آستانه مشخص کاهش یابد و این وضعیت برای مدت‌زمانی معین ادامه پیدا کند (Ling et al., 2024).

تحلیل روند تغییرات اقلیمی با آزمون نوآورانه (ITA^1): در مرحله نهایی، به منظور بررسی روندهای معنی‌دار در سری‌های زمانی پارامترهای اقلیمی (بارش، دماهای کمینه و بیشینه) و همچنین شاخص SPEI در منطقه مطالعاتی، از آزمون ITA استفاده شد. این آزمون قادر است روندهای پنهان و غیرخطی را که ممکن است با سایر روش‌ها قابل تشخیص نباشند، شناسایی کند.

شاخص خشک‌سالی SPEI

شاخص‌های SPI و SPEI به طور گسترده در سراسر جهان برای پایش خشک‌سالی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این شاخص‌ها را می‌توان در مقیاس‌های زمانی مختلفی مانند ۱، ۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ ماه محاسبه کرد که هر کدام معرف انواع مختلف خشک‌سالی هستند. در پایش خشک‌سالی، از مقیاس زمانی کوتاه‌مدت (۱ ماه یا ۳ ماه) برای ارزیابی خشک‌سالی هواشناسی استفاده می‌شود. مقیاس زمانی ۳ ماهه یا ۶ ماهه معمولاً برای خشک‌سالی کشاورزی به کار می‌رود، درحالی‌که مقیاس‌های زمانی بزرگ‌تر مانند ۱۲ یا ۲۴ ماه برای توصیف خشک‌سالی هیدرولوژیکی و منابع آب مناسب‌تر است (Mishra & Singh, 2010). با توجه به اهمیت مسئله آب در منطقه مورد مطالعه، در پژوهش حاضر شاخص SPEI در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه مورد استفاده قرار گرفته است.

شاخص SPEI در مقیاس‌های زمانی مختلف از معادله ساده بیلان آب یعنی تفاوت بین بارندگی و تبخیر و تعرق پتانسیل بر اساس رویکرد تورنت وایت به دست می‌آید. با در نظر گرفتن تبخیر و تعرق پتانسیل (PET) تفاوت بین بارندگی (P) و تبخیر و تعرق پتانسیل برای ماه (i) مطابق رابطه ۱ محاسبه می‌گردد:

$$D_i = P_i - PET_i \quad \text{رابطه (۱)}$$

مقادیر D نیز از رابطه ۲ به دست می‌آید:

$$\sum_{i=0}^{k-1} (P_{n-i} - PET_{n-i}) \quad \text{رابطه (۲)}$$

در رابطه ۲، k (ماه‌ها) مقیاس زمانی موردنظر و n ماه موردنظر در محاسبه است. یک توزیع سه پارامتری برای محاسبه شاخص خشک‌سالی نیاز است تا بتواند مقادیر منفی در داده‌های D را پوشش دهد. نتایج انتخاب مناسب‌ترین تابع توزیع نشان داده است که تابع لجستیک لگاریتمی برازش خوبی بر سری زمانی داده‌ها در مقیاس‌های زمانی مختلف دارد. شکل کلی تابع چگالی احتمال این تابع به صورت رابطه ۳ می‌باشد (Vicente-Serrano et al., 2010):

$$F(X) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{X - \gamma}{\alpha} \right)^{\beta-1} \left[1 + \left(\frac{X - \gamma}{\alpha} \right)^{\beta} \right]^{-2} \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در آن α ، γ و β به ترتیب پارامترهای مقیاس، شکل و اصلی برای مقادیر Di در دامنه $\gamma > D < \infty$ می‌باشند. بدین ترتیب پس از محاسبه تابع توزیع تجمعی و تبدیل آن به مقادیر نرمال مقادیر شاخص SPEI استخراج می‌گردد که ارزش‌های مثبت بیانگر مثبت بودن بیلان آب و مقادیر منفی نشان‌دهنده منفی بودن بیلان آب است. این شاخص می‌تواند برای پایش دوره‌های خشک و مرطوب مورد استفاده قرار گیرد. خشکسالی هنگامی شروع می‌شود که مقادیر شاخص به منفی یک برسد و با مثبت شدن آن خاتمه می‌یابد (نصرتی، ۱۳۹۴). در جدول ۱ طبقات مختلف شاخص SPEI ارائه شده است.

جدول ۱. طبقات شاخص خشکسالی SPEI

Mositure Category	SPEI
Extremely wet	≥ 2
Very wet	1.5 to 1.99
Moderately wet	1 to 1.49
Near normal	-0.99 to 0.99
Moderately dry	-1 to -1.49
Severely dry	-1.5 to -1.99
Extremely dry	≤ -2

تحلیل ویژگی‌های خشکسالی مبتنی بر تئوری ران (Theory of Runs)

پس از محاسبه سری زمانی شاخص خشکسالی SPEI، گام بعدی شناسایی و تفکیک رویدادهای خشکسالی مجزا و کمی سازی مشخصه‌های اصلی آن‌ها است. برای این منظور، از تئوری ران (Theory of Runs) استفاده می‌شود که یک روش استاندارد و قدرتمند برای تحلیل سری‌های زمانی هیدرولوژیکی است (Yevjevich, 1967). در این رویکرد، سری زمانی داده‌ها (مقادیر ماهانه SPEI) با یک سطح آستانه مشخص مقایسه می‌شود. در مطالعات خشکسالی، این آستانه معمولاً صفر یا مقداری منفی (مانند -۱) در نظر گرفته می‌شود. بر اساس این تئوری، یک "ران منفی" (Negative Run) - که معادل یک رویداد خشکسالی است - زمانی آغاز می‌شود که مقدار شاخص SPEI از سطح آستانه پایین‌تر رفته و تا زمانی که مقدار شاخص به بالای این آستانه بازنگردد، ادامه می‌یابد. به این ترتیب، تئوری ران این امکان را فراهم می‌سازد که رویدادهای خشکسالی به صورت عینی و سیستماتیک از دل سری زمانی پیوسته استخراج شوند. خروجی این روش، امکان محاسبه چهار ویژگی اصلی برای هر رویداد خشکسالی را فراهم می‌سازد که به درک چندی از این پدیده کمک شایانی می‌کند (Wang et al., 2022):

مدت خشکسالی (Duration): مدت زمان وقوع یک سطح مشخص از خشکسالی، از شروع (t_n) تا پایان (t_p) (رابطه ۴):

$$\text{Duration} = t_n - t_p \quad \text{(رابطه ۴)}$$

بزرگی خشکسالی (Severity): به مجموع مقادیر شاخص SPEI در طول دوره‌های خشکسالی اشاره دارد. به عبارت دیگر، بزرگی خشکسالی نشان‌دهنده میزان انحراف بارش و دما از شرایط نرمال در طول دوره خشکسالی است (رابطه ۵).

$$\text{Severity} = \sum_{t_p}^{t_n} (\text{SPEI}) \quad \text{(رابطه ۵)}$$

شدت خشک‌سالی (Intensity): این مشخصه، متوسط بزرگی خشک‌سالی در هر واحد زمانی (ماه) را نشان می‌دهد و از نسبت بزرگی خشک‌سالی (Severity) به مدت آن (Duration) به دست می‌آید. (رابطه ۶).

$$\text{Intensity} = \frac{\text{Drought severity}}{\text{Drought duration}} \quad (\text{رابطه ۶})$$

فراوانی خشک‌سالی (Frequency): فراوانی خشک‌سالی را نیز می‌توان به‌عنوان نسبت تعداد رویدادهای خشک‌سالی به کل تعداد سال‌های دوره مورد مطالعه تعریف کرد.

تحلیل روند ITA

در سال‌های اخیر، روش تحلیل روند نوآورانه (ITA) که توسط سن (۲۰۱۲، ۲۰۱۷) توسعه یافته، به‌طور گسترده‌ای برای مطالعه روند متغیرهای هیدرولوژیکی و هواشناسی در بسیاری از مناطق مورد استفاده قرار گرفته است (Kisi, 2015; Wu et al., 2018; Caloiero et al., 2017). در مقایسه با سایر رویکردهای ناپارامتری، این روش ساده و شهودی، کاربرد کلی‌تری دارد و مستقل از فرض‌های توزیعی، دوره‌های فصلی، همبستگی سری زمانی و حجم داده‌ها است (Swain et al., 2022). همچنین برخی از روندهای ناشناخته‌ای که با استفاده از آزمون من-کندال کلاسیک آشکار نشده‌اند، با استفاده از روش‌شناسی ITA قابل‌شناسایی بوده و روندهای پنهان بحرانی در نمودار قابل تشخیص هستند (Alifurjiang et al., 2023).

اولین گام در روش ITA، طبقه‌بندی داده‌های سری زمانی هیدرو-اقلیم‌شناسی به دو زیر سری برابر و رتبه‌بندی مستقل داده‌ها است (Wu & Qian, 2017). در واقع قبل از اعمال ITA بر هر سری زمانی خاص، داده‌ها باید به دو زیر سری تقسیم شوند. سپس داده‌های هر زیر سری به ترتیب صعودی (یا نزولی) مرتب می‌شوند. علاوه بر این، نمودار با محور ۱:۱ (۴۵ درجه) بدون روند به دو مثلث جداگانه تقسیم می‌گردد که نشان‌دهنده روند افزایشی (مساحت بالای خط ۱:۱) و کاهشی (مساحت زیر خط ۱:۱) داده‌های سری زمانی است (Aher & Yadav, 2021). به عبارتی، اگر نقاط داده در قسمت مثلثی بالایی خط ۱:۱ قرار گیرند، روند مثبت و اگر در قسمت مثلثی پایینی خط ۱:۱ قرار گیرند، روند منفی نشان داده می‌شود (Şen & Aksu, 2021). نقاط پراکنده نمایش داده‌شده بر روی نمودارهای خط ۱:۱ برای تفسیر جامع‌تر به سه خوشه کلامی پایین، متوسط و بالا تقسیم می‌شوند. برای تخمین روند، آماره S_{ITA} به‌صورت زیر محاسبه می‌شود (Roy et al., 2024):

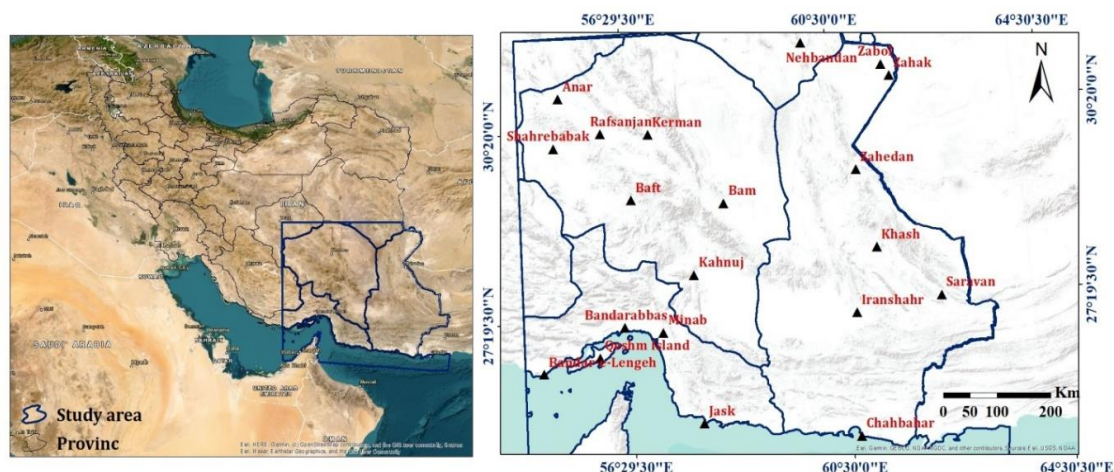
$$S_{ITA} = \frac{2(\overline{X_i} - \overline{X_j})}{n} \quad (\text{رابطه ۷})$$

در رابطه بالا، S_{ITA} ، شیب بر اساس روش ITA است، n حجم نمونه، X_i و X_j نیز به ترتیب میانگین مقادیر نیمه اول و دوم سری هستند. اگر مقدار شیب محاسبه‌شده، s ، زیر یک مقدار بحرانی، S_{ITA} باقی بماند، فرضیه صفر (H_0) عدم وجود روند معنی‌دار، را نمی‌توان رد کرد. درحالی‌که فرضیه جایگزین (H_a) وجود یک روند معنی‌دار در سری‌های زمانی قابل اجرا است. اگر $s > S_{ITA}$ باشد. علاوه بر این، تابع توزیع احتمال (PDF) برای ارزیابی اهمیت ITA استفاده می‌شود. اگر فاصله اطمینان یک PDF استاندارد دارای میانگین صفر و انحراف استاندارد (δ_s) شیب ITA در سطح معنی‌داری α باشد، آنگاه معادله (۸)، حد اطمینان (CL) روند را نشان می‌دهد.

$$CL_{(1-\alpha)} = 0 \pm S_{ITA}\delta_s \quad (\text{رابطه ۸})$$

محدوده مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش یک چهارم ایران را در برمی‌گیرد که در مختصات جغرافیایی ۲۵ درجه ۵۵ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۱۰ دقیقه عرض شمالی و ۵۳ درجه و ۵۰ دقیقه تا ۶۳ درجه و ۳۰ دقیقه طول شرقی قرار گرفته است. این محدوده از لحاظ مرزهای سیاسی دو استان سیستان و بلوچستان و کرمان را به‌طور کامل و قسمتی از استان‌های هرمزگان، خراسان جنوبی، یزد و فارس را شامل می‌شود (شکل ۱). جنوب شرق ایران از لحاظ اقلیمی به دو بخش فراخشک و نیمه‌خشک طبقه‌بندی شده است؛ میانگین بارش این منطقه بین ۶۸ تا ۲۱۴ میلی‌متر و میانگین دمای آن بین ۱۴ تا ۲۷ درجه سلسیوس متغیر می‌باشد. مطابق با پژوهش‌های پیشین هرچه از سمت شرق به غرب منطقه مورد مطالعه پیشروی کرده افزایش بارش و کاهش دما و از سمت شمال به جنوب افزایش دما و افزایش بارش را می‌توان مشاهده نمود. طبقات ارتفاعی جنوب شرق ایران شامل دو نقطه ارتفاعی مؤثر در اقلیم منطقه، تفتان در استان سیستان و بلوچستان و رشته‌کوه جبال بارز در استان کرمان است که بیشترین ارتفاع آن‌ها به ۴۳۱۷ متر می‌رسد. از ویژگی‌های طبیعی دیگر جنوب شرق ایران، گسترش چاله‌های وسیع مستقل و نیمه‌مستقلی چون دشت سیستان، بیابان لوت و دشت میناب است که در فواصل رشته‌کوه‌های منفرد قرار دارند و از کمترین بارش و بیشترین دما بهره‌مند می‌باشند که این خود نشان‌دهنده حاکمیت شرایط زیست‌اقلیمی خشک در آن‌ها است (Vaziri Mehr, et al., 2022).



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

یافته‌ها

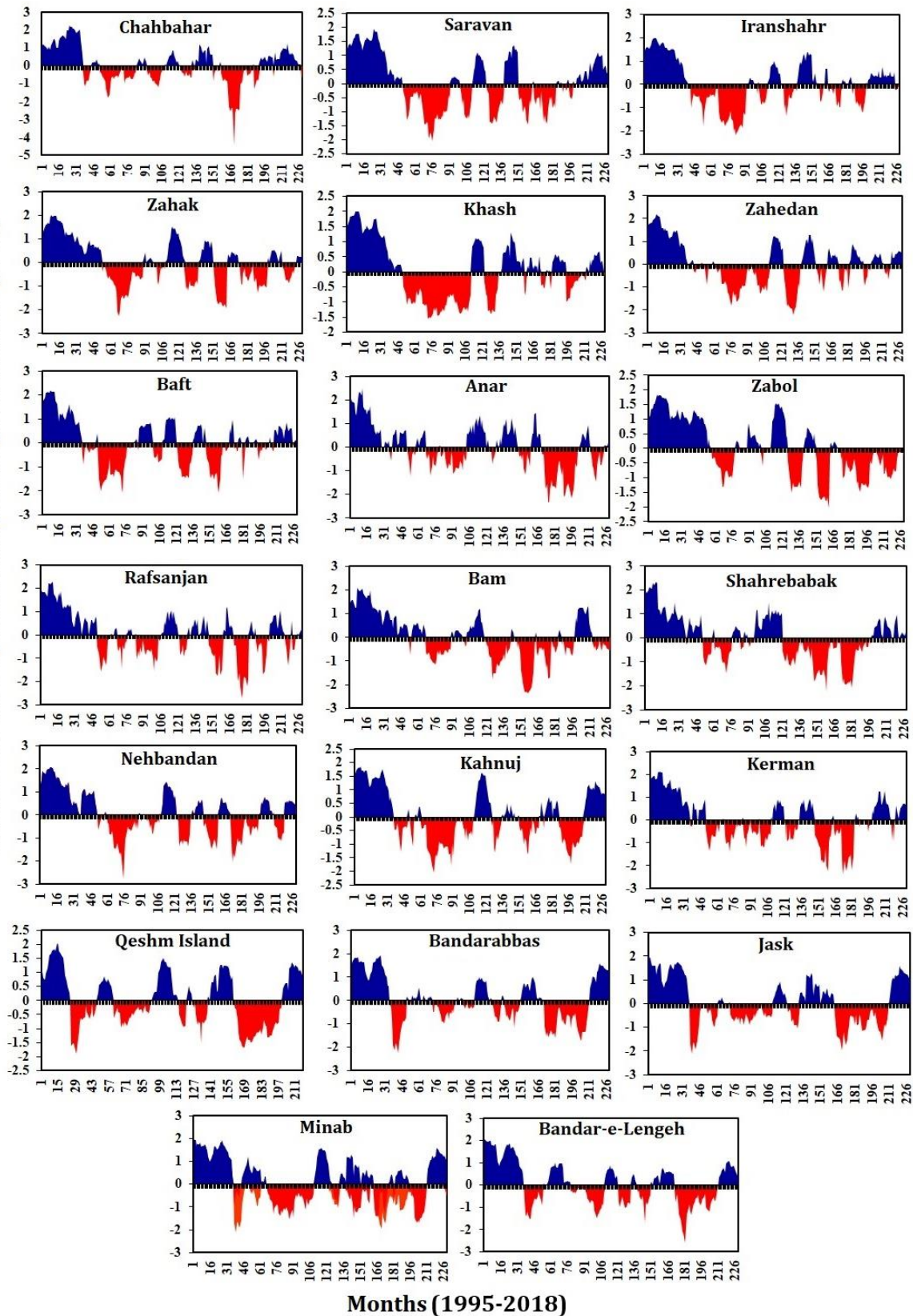
تحلیل روندهای زمانی و تغییرات فضایی خشک‌سالی در منطقه مطالعاتی بر اساس شاخص SPEI

شکل ۲ تغییرات شاخص تبخیر-تعرق استاندارد شده را به تفکیک ایستگاه‌های مورد مطالعه طی دوره ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۸ نشان می‌دهد. بررسی تغییرات زمانی خشک‌سالی بر مبنای شاخص SPEI حاکی از این است که بیشتر ایستگاه‌های منطقه، الگوی نسبتاً مشابهی از خشک‌سالی را تجربه کرده‌اند. همان‌گونه که در شکل ۲ ملاحظه می‌شود، دوره‌های خشک و مرطوب به‌صورت متناوب طی بازه زمانی مورد مطالعه رخ داده و آغاز و خاتمه دوره‌های خشک‌سالی در کل منطقه هم‌زمان بوده است. نتایج حاصل از ارزیابی شاخص SPEI برای ایستگاه‌های سینوپتیک منتخب حاکی از تسلط شرایط مرطوب بر منطقه تا پایان سال ۱۹۹۷ است. میانگین مقادیر SPEI در این دوره، از ۱/۵۵ تا ۱/۹۴ متغیر است که بیانگر وقوع ترسالی‌های متوسط تا شدید در جنوب شرق ایران می‌باشد. شدیدترین ترسالی‌ها و بیشترین مقادیر شاخص

در این سال‌ها در ایستگاه‌های واقع در استان کرمان (بافت، شهربابک، انار، کرمان و رفسنجان) مشاهده می‌گردد. به‌طوری‌که در بخش قابل‌توجهی از سال ۱۹۹۶، ضریب SPEI در این ایستگاه‌ها به بیش از ۲ رسیده که نشان‌دهنده ترسالی‌های بسیار شدید در این مناطق است. از سوی دیگر، سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۲، ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۲ و همچنین سال ۲۰۰۶ بر اساس محاسبات شاخص SPEI، خشک‌ترین سال‌های آماری بوده‌اند و کمترین مقادیر شاخص را به خود اختصاص داده‌اند. این امر نشان‌دهنده کاهش قابل‌توجه بارندگی در این سال‌ها است. همچنین، ایستگاه‌های هواشناسی واقع در استان سیستان و بلوچستان از جمله زاهدان، زابل، زهک، سراوان، ایرانشهر و خاش در مقایسه با سایر ایستگاه‌ها، نوسانات و شدت خشک‌سالی بیشتری را تجربه کرده‌اند.

بررسی سری زمانی تغییرات شاخص SPEI نشان می‌دهد که در سال‌های اخیر، افزون بر اینکه رخداد خشک‌سالی‌ها بیشتر شده، تداوم بیشتری نیز پیدا کرده است. بیشترین دوره‌های تداوم خشک‌سالی مربوط به ایستگاه‌های شهربابک، بم، خاش، جاسک، ایرانشهر، زابل، زاهدان، سراوان و کهنوج با ۵ تا ۷ سال است. دامنه تغییرات شاخص SPEI در بیشتر ایستگاه‌های سینوپتیک موردبررسی بین ± 2 قرار دارد؛ با این حال، در برخی ایستگاه‌ها تغییرات بیشتری مشاهده می‌شود. برای مثال، پایین‌ترین ضریب SPEI در حوضه مطالعاتی برابر با $4/4-$ متعلق به ایستگاه چابهار است که نشان‌دهنده شدیدترین حالت خشک‌سالی در منطقه بوده و در سال ۲۰۰۹ رخ داده است. بالاترین ضریب SPEI نیز که معرف مرطوب‌ترین سال مورد مطالعه می‌باشد، مربوط به ایستگاه انار با ضریب $2/5$ و سپس ایستگاه شهربابک با ضریب $2/3$ است که در سال ۱۹۹۶ اتفاق افتاده است. به‌طور کلی، ایستگاه‌های واقع در شمال غرب منطقه مطالعاتی و استان کرمان نسبت به ایستگاه‌های جنوب شرق و جنوب (استان‌های سیستان و بلوچستان و هرمزگان) شرایط مطلوب‌تری دارند. به‌طور خلاصه، نتایج آماری نشان می‌دهد که تمام ایستگاه‌های منتخب مورد مطالعه در دوره آماری، تحت تأثیر خشک‌سالی‌های متعدد قرار داشته‌اند و دوره‌های خشک طولانی‌تر از دوره‌های مرطوب بوده است.

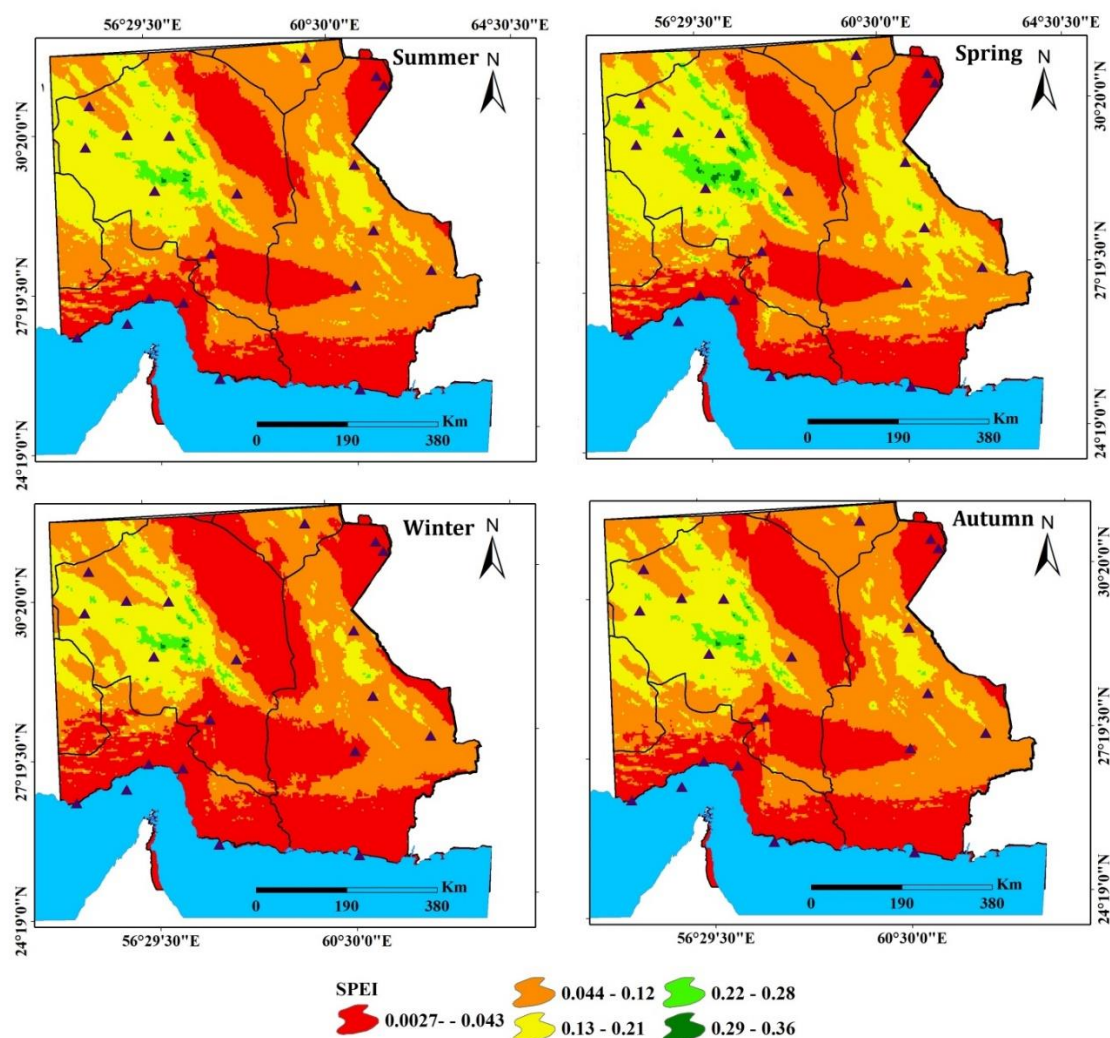
Standardised Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)



Months (1995-2018)

شکل ۲. نوسانات شاخص SPEI در ایستگاه‌های منتخب و شناسایی دوره‌های خشک و مرطوب

در شکل ۳ توزیع مکانی شاخص SPEI مبتنی بر معادلات رگرسیونی و بر پایه مدل ارتفاعی رقومی در منطقه مورد پ نشان داده شده است. در یک دید کلی، اگرچه به طور متوسط، شرایط اقلیمی منطقه، در حالت نرمال قرار دارد، اما عرض‌های جنوبی و ایستگاه‌های واقع روی خط ساحلی، مستعد خشک‌سالی‌های مکرر هستند که به دلیل قرارگیری در ارتفاعات پایین‌تر، دمای بالاتر و تبخیر و تعرق بیشتر، شرایط خشک‌تری را تجربه می‌کنند؛ این مهم به‌ویژه در فصل زمستان، در بخش قابل‌توجهی از حوضه مطالعاتی به‌وضوح قابل‌مشاهده است؛ حاکمیت طیف رنگی قرمز در این نواحی، نشان‌دهنده مقادیر منفی شاخص SPEI و غلبه دوره‌های خشک در این بخش از حوضه است. برعکس، مناطق مرتفع‌تر، مانند نواحی کوهستانی اطراف شهرهای کرمان، رفسنجان، انار، شهر بابک و خاش، به دلیل دماهای پایین‌تر و بارش بیشتر، شرایط مرطوب‌تری را نشان می‌دهند. گسترش طیف رنگی سبز نیز در این محدوده که در نقشه‌های فصلی (شکل ۳)، پهنه هم‌مقدار SPEI بین ۰/۲۲ تا ۰/۳۶ را نشان می‌دهد، بیانگر رابطه معکوس بین ارتفاع و خشک‌سالی است؛ این پهنه به‌خصوص در فصل بهار، وسعت بیش‌تری را نسبت به سایر فصل‌ها به خود اختصاص داده است.

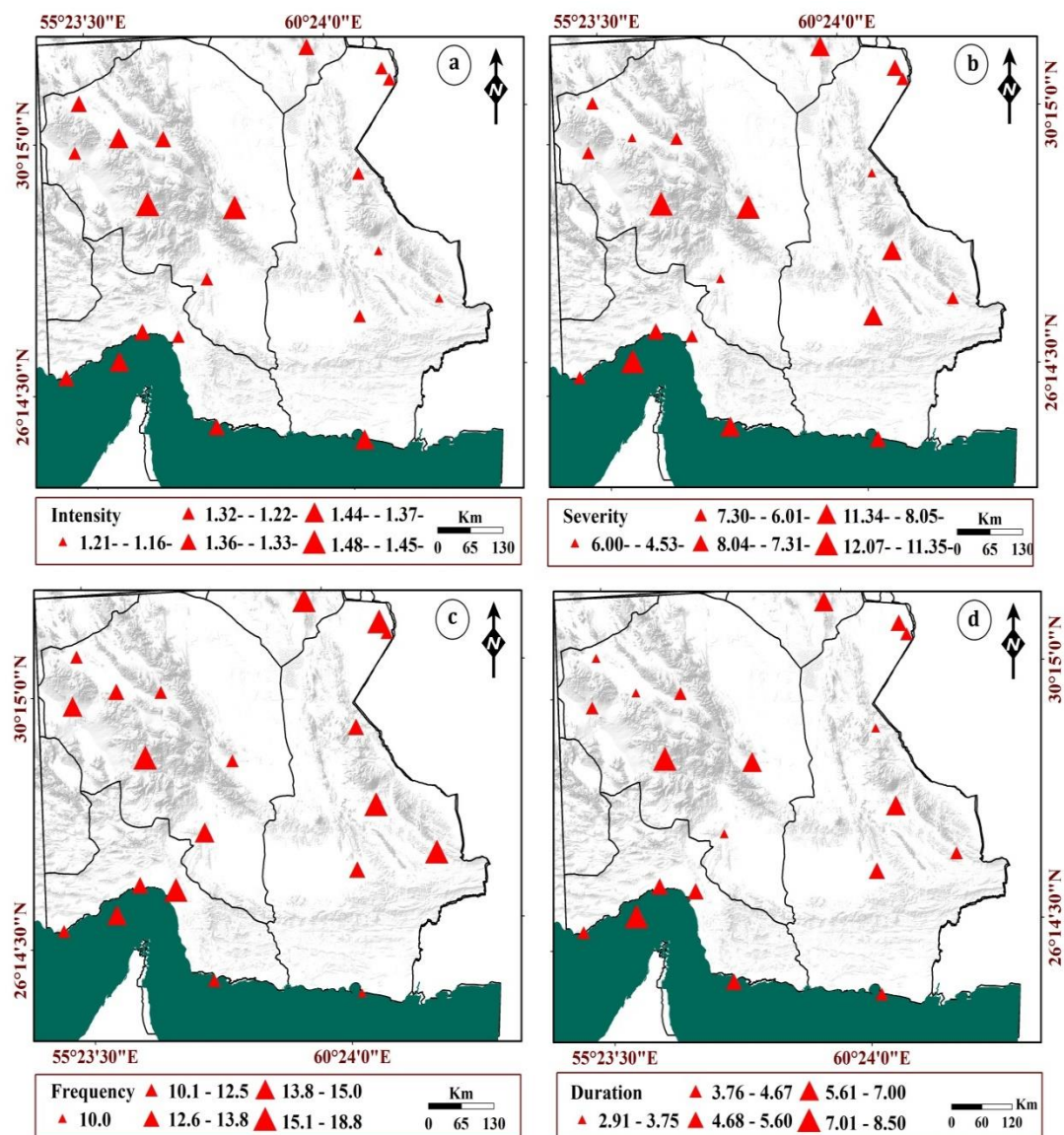


شکل ۳. تغییرپذیری مکانی شاخص SPEI در جنوب شرق ایران

الگوی مکانی ویژگی‌های خشک‌سالی (شدت، مدت، بزرگی، فراوانی) در منطقه مطالعاتی

به‌منظور شناسایی الگوهای مکانی و درک عمیق از ماهیت خشک‌سالی در منطقه، چهار مشخصه اصلی شامل فراوانی، مدت، بزرگی و شدت با استفاده از تئوری ران استخراج و تحلیل گردید. تحلیل یکپارچه این ویژگی‌ها نشان می‌دهد که صرفاً بررسی یک مشخصه به‌تنهایی کافی نبوده و مناطق مختلف جنوب شرق ایران، ویژگی‌های متفاوتی از خشک‌سالی را تجربه می‌کنند که نیازمند بررسی ترکیبی این مؤلفه‌هاست. نتایج این تحلیل نشان می‌دهد که بالاترین فراوانی وقوع خشک‌سالی متعلق به ایستگاه خاش با $18/75\%$ درصد است و پس‌از آن ایستگاه‌های سراوان، بافت، زابل، نهبندان و میناب (با فراوانی بین 16% تا $17/5\%$ درصد) قرار دارند. اما برای پاسخ به این پرسش کلیدی که این خشک‌سالی‌های پرتکرار چه ماهیتی دارند، باید سایر مشخصه‌ها را نیز در نظر گرفت. در ایستگاه خاش، باوجود فراوانی بالا، میانگین مدت خشک‌سالی ($3/6$ ماه) و شدت آن ($-1/15$) در رده‌های میانی قرار دارد. این الگو بیانگر حاکمیت خشک‌سالی‌های «مکرر و مزمن» است؛ به این معنا که منطقه به‌طور مداوم با دوره‌های خشک مواجه است، اما لزوماً هر رویداد به‌تنهایی دارای بالاترین درجه شدت یا طولانی‌ترین تداوم نیست. این وضعیت استرس دائمی بر منابع آب سطحی و کشاورزی دیم وارد می‌کند. در مقابل این الگوی مکرر، رویکرد کاملاً متفاوتی در سایر نقاط بحرانی منطقه مشاهده می‌شود که می‌توان آن را خشک‌سالی‌های «ماندگار و شدید» نامید. ایستگاه‌هایی مانند جزیره قشم، بافت و بم با ثبت طولانی‌ترین تداوم خشک‌سالی که به ترتیب به $8/5$ ، $8/4$ و 7 ماه می‌رسد، مشخص می‌شوند. این ماندگاری بالا، حتی با فراوانی کمتر، منجر به اثرات تخریبی به‌مراتب عمیق‌تری می‌شود. این موضوع به‌وضوح در مشخصه‌های شدت و بزرگی نمایان است؛ ایستگاه بم با ثبت شدیدترین متوسط ماهانه ($-1/48$) و ایستگاه‌های بافت، جزیره قشم و بم با ثبت بیشترین مقادیر بزرگی یا وخامت تجمعی (به ترتیب $-12/06$ ، $-11/65$ و $-11/35$) بحرانی‌ترین وضعیت را نشان می‌دهند.

در یک جمع‌بندی مکانی، می‌توان دریافت که بیشترین تداوم و وخامت خشک‌سالی در نواحی جنوب شرقی، شمال شرقی و مرکزی حوضه مطالعاتی متمرکز است، درحالی‌که کمترین مقادیر مربوط به نواحی شمال غربی (شهرستان‌های کرمان، رفسنجان، انار و شهر بابک) می‌باشد. این تفاوت در ویژگی خشک‌سالی‌ها اهمیت بالایی در مدیریت منابع آب دارد. برای مثال، در منطقه‌ای با الگوی خشک‌سالی مکرر (مانند خاش)، راهکارهای مدیریت ریسک کوتاه‌مدت و افزایش تاب‌آوری کشاورزی در اولویت است، درحالی‌که در مناطق با الگوی خشک‌سالی ماندگار (مانند بم و قشم)، تمرکز باید بر مدیریت استراتژیک منابع آب زیرزمینی، کنترل برداشت و افزایش بهره‌وری آب در بلندمدت باشد. بنابراین، تحلیل ترکیبی این مشخصه‌ها تصویری جامع‌تر و کاربردی‌تر برای برنامه‌ریزی و سیاست‌گذاری‌های منطقه‌ای ارائه می‌دهد.



شکل ۴. توزیع فضایی ویژگی‌های خشک‌سالی در دوره ۱۹۹۵-۲۰۱۸

آزمون گرافیکی ITA جهت شناسایی رفتار متغیرها در دوره مورد مطالعه

به منظور تحلیل روند کلی و شناسایی الگوی غالب تغییرات در سطح منطقه، ابتدا سری‌های زمانی میانگین منطقه‌ای برای هر یک از متغیرهای مورد مطالعه (دما، بارش و SPEI) محاسبه گردید. برای این کار، در هر گام زمانی (ماهانه)، مقادیر مربوط به هر متغیر در تمام ۲۰ ایستگاه سینوپتیک میانگین‌گیری شد تا یک سری زمانی واحد و نماینده برای کل منطقه جنوب شرق ایران به دست آید. در ادامه، آزمون ITA بر روی این سری‌های زمانی میانگین منطقه‌ای اعمال گردید. برای این هدف سری‌های دما و بارش و شاخص SPEI به دو زیر سری ۱۲ ساله (از ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۸) تقسیم گردید (شکل ۵). پراکندگی نقاط در امتداد خط ۴۵ درجه نشان‌دهنده وضعیت روند در سری زمانی مورد بررسی است؛ جایی که نقاط به خط ۱:۱ نزدیک‌تر هستند بیانگر کمترین نوسان‌های متغیر و چنانچه از این خط دورتر باشند حاکی از تغییرات شدید می‌باشد. همچنین با توجه به اینکه اعداد به صورت صعودی مرتب‌شده‌اند نقاط زیرخط نشان‌دهنده کاهش

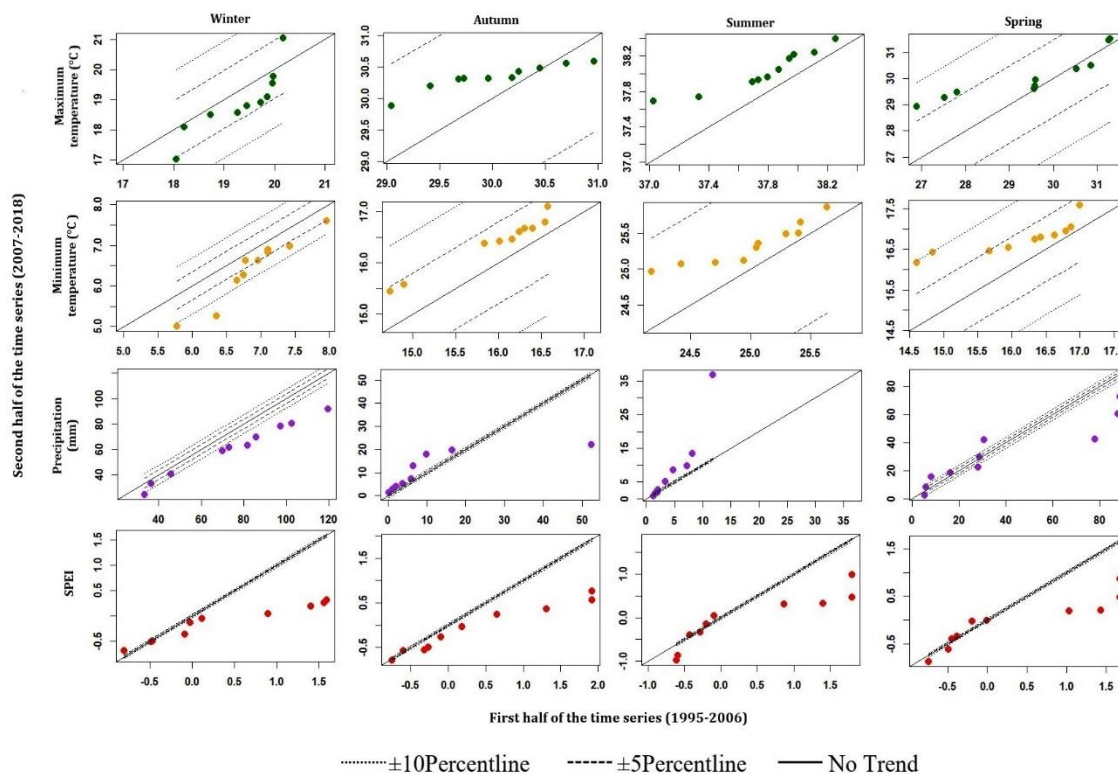
مقادیر در ۱۲ سال دوره دوم نسبت به دوره اول است و اگر بالای خط باشند بیانگر افزایش مقادیر است. در ادامه باندهای اطمینان ۵ و ۱۰ درصد نیز جهت ارائه تحلیل بهتر نتایج ترسیم گردید.

مطابق شکل ۵، تحلیل گرافیکی دمای بیشینه حاکی از تنوع قابل توجه این پارامتر در فصل‌های مختلف سال است. در فصل زمستان، اکثر نقاط داده‌ای که دمای کمتر از ۲۰ درجه سلسیوس را نشان می‌دهند، زیرخط هویت ۱:۱ قرار گرفته‌اند که نشان‌دهنده روند نزولی آماری معنی‌دار پارامتر دما در این بازه دمایی است. در مقابل، برای دماهای بالاتر از ۲۰ درجه، روند کلی افزایشی است. این وضعیت در فصل پاییز کاملاً متفاوت است؛ در این فصل روند افزایشی دما در محدوده دمایی بین ۲۹ تا ۳۰/۵ به‌وضوح مشاهده می‌شود و دماهای بالای ۳۱ درجه تغییرات کاهشی دارند. در تابستان، تمامی نقاط داده‌ای بالای خط ۴۵ درجه قرار گرفته‌اند که نشان‌دهنده روند افزایشی قابل توجه دمای بیشینه و شدت گرمایش هوا در این فصل است. این نتایج با روند گرمایش جهانی و افزایش فرکانس و شدت امواج گرمایی در مناطق خشک و نیمه‌خشک همخوانی دارد. در بهار نوسانات دما در منطقه مورد مطالعه بیش از سایر فصل‌ها است به‌طوری‌که مقادیر کم و بالای دما روند افزایشی و محدوده وسط، تغییرات کاهشی و بدون روندی را نشان می‌دهند.

قرارگیری مقادیر دمای کمینه در فصول بهار، تابستان و پاییز بالای خط ۴۵ درجه نشان‌دهنده شیب مثبت قابل توجه این پارامتر و افزایش تدریجی دمای کمینه به‌ویژه در فصول گرم سال است؛ در مقابل در زمستان تمام محدوده‌های دمایی دارای شیب منفی هستند و به‌طور معنی‌داری پایین‌تر از باند اطمینان ۱۰ درصد قرار گرفته‌اند که نشان‌دهنده روند نزولی آماری قوی دمای کمینه است. این کاهش دمای کمینه در فصل زمستان، می‌تواند ناشی از عوامل مختلفی از جمله افزایش پوشش ابر، افزایش رطوبت نسبی و یا تغییرات در الگوهای گردش عمومی جو باشد.

وضعیت یادشده برای بارش نیز به همین شکل مشاهده می‌گردد؛ در زمستان، تمامی نقاط داده‌ای مربوط به بارش زیرخط هویت ۱:۱ قرار گرفته‌اند. به‌ویژه، مقادیر بارش در محدوده ۸۰ تا ۱۲۰ میلی‌متر به‌طور معنی‌داری پایین‌تر از باند اطمینان ۱۰ درصد قرار گرفته‌اند که نشان‌دهنده کاهش قابل توجه بارش در این بازه است. در فصل بهار نیز، روند کلی بارش نزولی است، هرچند شدت این کاهش در تمام بازه‌های بارشی یکسان نیست. در مقابل، در فصول تابستان و پاییز که به‌طور کلی بارش کمی در منطقه مشاهده می‌شود، روند بارش در بازه ۵ تا ۱۰ میلی‌متر افزایشی است. بالین‌حال، برای سایر بازه‌های بارشی، روند مشخصی مشاهده نمی‌شود (شکل ۵).

تغییرات سه متغیر مذکور روند شاخص SPEI را در جنوب شرق ایران تحت تأثیر قرار داده است. نتایج آزمون گرافیکی روند نشان می‌دهد که شاخص موردنظر در منطقه مطالعاتی، به‌ویژه در محدوده نرمال مثبت تا ترسالی شدید، روند نزولی آماری معنی‌داری را طی سال‌های اخیر تجربه کرده است. تمامی نقاط داده‌ای مربوط به این محدوده، به‌طور معنی‌داری پایین‌تر از باند اطمینان ۱۰ درصد قرار گرفته‌اند که نشان‌دهنده کاهش قابل توجه شاخص SPEI و افزایش شدت و فراوانی خشک‌سالی است. این روند نزولی، بیانگر کاهش بارندگی و افزایش تبخیر و تعرق در منطقه است. محدوده نرمال منفی نیز در فصل بهار و تابستان روند کاهشی و در پاییز و زمستان روند خاصی را نشان نمی‌دهد.



شکل ۵. نتایج آزمون گرافیکی روند برای متغیرهای موردبررسی

بحث

این مطالعه نشان می‌دهد که ایستگاه‌های بررسی‌شده در سال‌های اخیر الگوی مشابهی از خشک‌سالی را تجربه کرده‌اند. دوره‌های خشک و مرطوب به صورت متناوب رخ داده و آغاز و پایان خشک‌سالی‌ها هم‌زمان بوده است. همچنین، ایستگاه‌های استان سیستان و بلوچستان نوسانات و شدت خشک‌سالی بیشتری نسبت به سایر ایستگاه‌ها داشته‌اند. افزون بر این، تحلیل سری زمانی تغییرات شاخص SPEI نشان می‌دهد که در سال‌های پسین، علاوه بر افزایش فراوانی رخداد خشک‌سالی‌ها، مدت‌زمان آن‌ها نیز طولانی‌تر شده است. در این باره، مهدی‌زاده سولا و همکاران (۱۴۰۴) نشان دادند که از دهه ۲۰۰۰ به بعد، خشک‌سالی‌ها در ایران به طور چشمگیری شدیدتر، طولانی‌تر و پایدارتر شده‌اند. خوشه‌های خشک‌سالی بزرگ‌تر و بادوام‌تر شده و مناطق بیشتری را درگیر کرده‌اند. همچنین، در نقاط بحرانی منطقه، الگوی خشک‌سالی‌های «ماندگار و شدید» مشاهده می‌شود. در حالی که پژوهش‌های پیشین (Beheshti Rad, 2015; Kahkhakohan et al., 2019) به درستی بر خشک‌سالی شدید در نواحی جنوبی و شرقی تأکید کرده‌اند، این پژوهش با تحلیل یکپارچه ویژگی‌های خشک‌سالی نشان داد که سرشت این پدیده در مناطق مختلف یکسان نیست. ایستگاه‌هایی مانند جزیره قشم، بافت و بم با ثبت طولانی‌ترین تداوم خشک‌سالی (به ترتیب ۸/۵، ۸/۴ و ۷ ماه) مشخص می‌شوند. این ماندگاری بالا، حتی با فراوانی کمتر، اثرات تخریبی عمیق‌تری به همراه دارد. به‌ویژه، ایستگاه بم با ثبت شدیدترین متوسط ماهانه (۱/۴۸-) و ایستگاه‌های بافت و قشم با بیشترین مقادیر وخامت تجمعی (به ترتیب -۱۲/۰۶، -۱۱/۶۵ و -۱۱/۳۵) وضعیت بحرانی‌تری را نشان می‌دهند. در همین راستا محمودی و همکاران (۲۰۲۴) به این نتیجه رسیدند که مدت خشک‌سالی به‌ویژه در مناطق شرقی، جنوب شرقی و مرکزی ایران روند افزایشی قابل‌توجهی داشته است، به‌طوری‌که در برخی نواحی شیب افزایشی خشک‌سالی پذیری به ۰/۲۲۸ در طول دوره ۶۴ ساله رسیده است. این یافته‌ها نشان می‌دهد که خشک‌سالی‌ها در این مناطق نه تنها فراوان‌تر، بلکه پایدارتر و طولانی‌تر شده‌اند. این نوع

خشک‌سالی‌های طولانی‌مدت، اثر مستقیم بر منابع آب‌های زیرزمینی و ذخایر استراتژیک آب دارد، زیرا دوره‌های طولانی کمبود آب، فرصت بازایی را از آبخوان‌ها سلب کرده و می‌تواند منجر به خسارات جبران‌ناپذیر هیدرولوژیکی گردد (Rajabzade et al., 2021).

در بررسی روند خشک‌سالی با بهره‌گیری از روش نوآورانه ITA، نتایج نشان دادند که دگرگونی در ساختار خشک‌سالی‌ها را می‌توان از منظر مکانیزم‌های اقلیمی تفسیر کرد. برخلاف پژوهش‌های پیشین در منطقه (مانند Zare Abianeh و همکاران، ۲۰۱۵؛ Darroudi و همکاران، ۲۰۲۲) که بر افزایش دما و کاهش بارندگی تأکید داشتند، تحلیل این پژوهش با استفاده از آزمون ITA به کشف یک الگوی پنهان و مهم منجر شد: کاهش معنادار شاخص SPEI در بازه‌های مرطوب، که از نظر آماری قابل توجه است. این یافته نشان می‌دهد که منطقه نه‌تنها با خشک‌سالی‌های شدیدتر مواجه است، بلکه توانایی خود را برای ورود به دوره‌های ترسالی و احیای منابع آبی نیز به‌طور چشمگیری از دست داده است. کاهش تدریجی و ساختاری دوره‌های مرطوب، همراه با افت بارندگی در فصل‌های سرد و افزایش دمای تابستان، موجب شده خشک‌سالی‌ها طولانی‌تر، شدیدتر و پایدارتر شوند. این نتایج، نگاه ما به تغییرات اقلیمی را از سطح توصیفی به سطح تحلیلی و مبتنی بر سازوکارهای علمی ارتقا می‌دهد.

نتیجه‌گیری

ناهنجاری و نوسان در روند پارامترهای اقلیمی از جمله بارش و دما یکی از ویژگی‌های طبیعی چرخه اتمسفری می‌باشد که موجب اختلال در اکوسیستم‌های طبیعی شده است. خشک‌سالی‌ها نشانه روشنی از این نوسانات هستند که بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک دنیا را با شدت‌های مختلف هرساله در برمی‌گیرند. پژوهش حاضر با هدف فراتر رفتن از تحلیل‌های توصیفی مرسوم و ارائه یک درک چندبعدی و مکانیزم‌محور از الگوهای خشک‌سالی در جنوب شرق ایران انجام شد. برای این منظور، یک رویکرد ترکیبی شامل شاخص SPEI، تئوری ران برای استخراج مشخصه‌های خشک‌سالی و آزمون گرافیکی ITA برای شناسایی تغییرات غیرخطی به کار گرفته شد. نتایج کلی نشان داد که منطقه از اواخر دهه ۱۹۹۰، شاهد یک تغییر رژیم اقلیمی از شرایط عمدتاً مرطوب (به‌ویژه تا سال ۱۹۹۷) به سمت غلبه خشک‌سالی‌های شدیدتر و طولانی مدت‌تر بوده است؛ به‌طوری‌که ایستگاه‌های واقع در استان سیستان و بلوچستان نوسانات شدیدتری را تجربه کرده‌اند و طولانی‌ترین دوره‌های خشک‌سالی (۵ تا ۷ سال) در ایستگاه‌هایی نظیر شهربابک، بم، خاش و جاسک مشاهده شد. در این بازه، شدیدترین رویداد خشک‌سالی در سال ۲۰۰۹ در ایستگاه چاپهار (SPEI: -) 4.4 و مرطوب‌ترین وضعیت در سال ۱۹۹۶ در ایستگاه انار (SPEI: 2.5) به ثبت رسید.

فراتر از این همسویی کلی با یافته‌های پیشین، نوآوری اصلی و ارزش‌افزوده این پژوهش در تفکیک و شناسایی «الگوهای غالب» و ماهیت متفاوت خشک‌سالی در سطح منطقه نهفته است. برای مثال، الگوی غالب در ایستگاه خاش، وقوع خشک‌سالی‌های «مزمّن و مکرر» است که با فراوانی بالا اما شدت و تداوم متوسط مشخص می‌شود. در مقابل، در ایستگاه‌هایی مانند بم، بافت و جزیره قشم، الگوی غالب به‌صورت رویدادهایی «شدید و ماندگار» تعریف می‌شود که با فراوانی کمتر اما تداوم بسیار طولانی و وخامت تجمعی بالا همراه است. این تفکیک میان الگوهای مختلف خشک‌سالی، یک یافته جدید و کاربردی است که نشان می‌دهد استراتژی‌های مدیریت ریسک باید به‌جای یک رویکرد واحد، بر اساس ساختار و الگوی غالب خشک‌سالی در هر زیر منطقه سفارشی‌سازی شوند.

این تغییر در ماهیت خشک‌سالی، به‌صورت مکانیزم‌محور توسط نتایج آزمون ITA قابل تبیین است. به بیانی، تحلیل ITA در این پژوهش یک یافته پنهان و کلیدی را آشکار ساخت: روند نزولی شاخص SPEI به‌طور خاص در طبقات مرطوب شاخص، از نظر آماری بسیار معنی‌دار است. این نتیجه جدید نشان می‌دهد که منطقه نه‌تنها در حال خشک‌تر شدن است، بلکه ظرفیت خود برای تجربه دوره‌های ترسالی و بازیابی منابع آب را نیز به‌سرعت از دست می‌دهد. این تضعیف سیستماتیک دوره‌های مرطوب، در کنار کاهش بارش در فصول سرد و افزایش شدید دما در تابستان، دلیل اصلی طولانی‌تر و شدیدتر شدن رویدادهای خشک‌سالی و تغییر ماهیت آن‌ها به سمت حالت‌های ماندگارتر است. این یافته، درک ما را از دینامیک تغییر اقلیم در منطقه از یک مشاهده صرف به یک تحلیل مکانیزم‌محور ارتقا می‌دهد.

در مجموع، یافته‌های پژوهش پیش‌رو با ارائه یک تحلیل چندوجهی نشان داد که نواحی جنوب شرقی کشور نه‌تنها با تشدید خشک‌سالی، بلکه با تغییر در ماهیت و ساختار آن روبرو هستند که منجر به وقوع خشک‌سالی‌های شدیدتر و طولانی مدت تر خواهد شد. این درک عمیق‌تر الگوهای نوین خشک‌سالی، تأکید می‌کند که تدوین و اجرای برنامه‌های جامع سازگاری با تغییرات اقلیم، به‌منظور کاهش آسیب‌پذیری منطقه در برابر ابعاد مختلف این پدیده، امری ضروری و فوری است.

حامی مالی

این مقاله حامی مالی ندارد.

سهم نویسندگان

در این پژوهش که مستخرج از پایان‌نامه کارشناسی ارشد آقای دانیال براهویی می‌باشد سهم نویسندگان به شرح زیر مشخص می‌شود: آقای دانیال براهویی مسئول جمع‌آوری داده‌ها، پردازش داده‌ها و انجام محاسبات و نگارش پیش‌نویس نخستین را بر عهده داشته است و آقای محسن حمیدیان پور (استاد راهنما) و فائزه شجاع (استاد مشاور) در طراحی مفهومی، تدوین روش‌شناسی، راهنمای نگارش پیش‌نویس، بازبینی و ویرایش، اعتبارسنجی و تهیه تصاویر مشارکت داشته‌اند.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافی در ارتباط با نویسندگی یا انتشار مقاله ندارند.

تقدیر و تشکر

از داوران محترم دفاع پایان‌نامه و مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی که با راهنمایی‌های تخصصی و سازنده خود موجب ارتقای کیفیت و غنای علمی این پژوهش شدند، صمیمانه سپاسگزارم.

منابع

- بهشتی راد، مسعود. (۱۳۹۴). بررسی تغییرات مکانی خشک‌سالی با روش‌های زمین‌آماري و شاخص توزیع استاندارد در استان کرمان. نشریه مهندسی آبیاری و آب/ایران، ۵(۴)، ۱۱۸-۱۳۰.
- پارسامهر، امیرحسین؛ مبین، محمدحسین و خسروانی، زهرا. (۱۳۹۷). استفاده از تئوری RUN در تحلیل شدت، مدت و دوره بازگشت خشک‌سالی (مطالعه موردی: استان فارس). /کوهیدرولوژی، ۵(۲)، ۴۷۱-۴۸۱.
- <https://doi.org/10.22059/ije.2018.234602.621>
- ترابی نژاد، نسترن؛ زرین، آذر و داداشی رودباری، عباسعلی. (۱۴۰۲). بررسی انواع خشک‌سالی و مشخصه‌های آن در ایران با استفاده از شاخص بارش تبخیر-تعرق استاندارد شده (SPEI). آب‌وخاک، ۳۷(۳)، ۴۷۳-۴۸۶.
- <https://doi.org/10.22067/jsw.2023.81322.1257>

- حجازی زاده، زهرا؛ پژوه، فرشاد و شکیب، هانیه. (۱۴۰۰). واکاوی و مقایسه چند شاخص خشک‌سالی اقلیمی و تعیین بهترین شاخص در جنوب شرق ایران. *جغرافیا (فصلنامه علمی انجمن جغرافیایی ایران)*، ۱۹ (۶۸)، ۵-۲۱. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.27172996.1400.19.1.1.3>
- درودی، هادی؛ خسروشاهی، محمد و شهابی، معصومه. (۱۴۰۱). بررسی تغییرات روند خشک‌سالی و عوامل اقلیمی در استان سیستان و بلوچستان. *مهندسی اکوسیستم بیابان*، ۱۰ (۳۲)، ۱۵-۳۰. doi: 10.22052/deej.2021.10.32.11
- دین‌پژوه، یعقوب و شفائی، سمیه. (۱۳۹۷). تحلیل مشخصه‌های خشک‌سالی‌های تبریز (۱۹۵۱-۲۰۱۵). *دانش آب‌و خاک*، ۲۸ (۳)، ۱۱۷-۱۳۰.
- رجب‌زاده، سمیه؛ مساعدی، ابوالفضل و قبائی سوق، محمد. (۱۴۰۰). ارزیابی خشک‌سالی‌های هواشناسی، هیدرولوژیک و آب زیرزمینی در دشت کاشمر و بردسکن و بررسی ارتباط آن‌ها با یکدیگر. *سامانه‌های سطوح آبگیر باران*، ۹ (۱)، ۵۵-۷۱.
- رضایی، سارا؛ میری، جعفر و معصوم پور سماکوش، مرتضی. (۱۴۰۳). تحلیل ویژگی‌های خشک‌سالی (شدت، مدت، بزرگی) ایران بر اساس شاخص خشک‌سالی چند متغیره. *فناوری‌های پیشرفته در بهره‌وری آب*، ۴ (۱)، ۸۲-۹۸. <https://doi.org/10.22126/atwe.2024.10319.1114>
- زارع ایبانه، حمید؛ سبزی پرور، علی‌اکبر؛ معروفی، صفر؛ قیامی، فرشته؛ میرمسعودی، سیده شقایق و کاظمی، آزاده. (۱۳۹۴). تحلیل و پایش خشک‌سالی هواشناسی منطقه سیستان و بلوچستان. *علوم و تکنولوژی محیط‌زیست*، ۱۷ (۱)، ۴۹-۶۱.
- عراقی زاده، محسن؛ سلاجقه، مریم؛ نجفی، زهرا و عرب پور، مهدیه. (۱۳۹۴). بررسی تغییرات خشک‌سالی در استان کرمان با توجه به روند دما و بارش با استفاده از ضریب من‌کندال. دومین همایش ملی صیانت از منابع طبیعی و محیط‌زیست، اردبیل.
- فرزانه، مهسا؛ اربابی سبزواری، آزاده؛ دریاباری، سیدجمال الدین و اسدیان، فریده. (۱۴۰۰). دورنمایی از شرایط اقلیمی دهه‌های آینده در پهنه جنوب شرق کشور. *پژوهش‌های اقلیم‌شناسی*، ۴۶ (۴)، ۱۴۷-۱۶۰.
- کاشکی، عبدالرضا و قربانی، حسین. (۱۴۰۳). ارزیابی تغییرات بلندمدت مشخصه‌های مخاطرات خشک‌سالی و سیل در حوضه‌های آبریز جنوب شرق ایران. *پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی*، ۵ (۱۹)، ۵۵-۷۴. <https://doi.org/10.30488/ccr.2024.461031.1224>
- کهنخاکهن، محمدصادق؛ رنجبر فردویی، ابوالفضل؛ موسوی، سیدحجت و ولی، عباسعلی. (۱۳۹۸). ارزیابی پویایی خشک‌سالی در استان سیستان و بلوچستان با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای MODIS (2000-2015). *تحقیقات مرتع و بیابان ایران*، ۲۶ (۳)، ۷۷۱-۷۵۴. <https://doi.org/10.22092/ijrdr.2019.120029>
- مرادی، محمد. (۱۳۹۹). آشکارسازی و تحلیل ناهنجاری بارش زمستانه در جنوب شرق ایران. *جغرافیا و روابط انسانی*، ۳ (۱)، ۹۶-۱۱۳. <https://doi.org/10.22034/gahr.2020.109953>
- مزیدی، احمد و بهاء‌الدین بیگی، حسن. (۱۴۰۰). مطالعه روند دما، بارش و سرعت باد، در مناطق شمالی و غربی استان کرمان با استفاده از آزمون‌های پارامتری و ناپارامتری. *جغرافیا و روابط انسانی*، ۴ (۲)، ۲۴۶-۲۵۴. <https://doi.org/10.22034/gahr.2021.296784.1587>
- مهدی زاده سولا، جواد؛ قویدل رحیمی، یوسف و فرج زاده، منوچهر. (۱۴۰۴). تحلیل ساختار و تغییر رژیم خشک‌سالی در ایران با رویکرد خوشه‌بندی سه‌بعدی. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۱۴ (۳)، ۹۳-۱۱۵. doi: 10.22067/geoh.2025.94525.1597
- نصرتی، کاظم. (۱۳۹۴). ارزیابی شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) جهت شناسایی خشک‌سالی در اقلیم‌های مختلف ایران. *علوم محیطی*، ۱۲ (۴)، ۶۳-۷۴.
- وزیری‌مهر، محدثه؛ حمیدیان پور، محسن؛ خسروی، محمود و نظری‌پور، حمید. (۱۴۰۱). الگوهای گردشی جو و دوره‌های فرین تر و خشک فصل زمستان در جنوب شرق ایران. *فیزیک زمین و فضا*، ۴۸ (۳)، ۶۵۶-۶۴۱. doi: 10.22059/jesphys.2022.327069.1007337

References

- Aher, M. C., & Yadav, S. M. (2021). Assessment of rainfall trend and variability of semi-arid regions of Upper and Middle Godavari basin, India. *Journal of Water and Climate Change*, 12(8), 3992-4006. <https://doi.org/10.2166/wcc.2021.044>
- Alifujiang, Y., Abuduwaili, J., & Abliz, A. (2023). Precipitation trend identification with a modified innovative trend analysis technique over Lake Issyk-Kul, Kyrgyzstan. *Journal of Water and Climate Change*, 14(6), 1798-1815. <https://doi.org/10.2166/wcc.2023.413>
- Araqi-zadeh, M., Salajeqeh, M., Najfi, Z., & Arabpour, M. (2015). *Analysis of drought changes in Kerman Province considering temperature and precipitation trends using the Mann-Kendall test*. 2nd Conference on Conservation Natural Resources and Environment, Ardabil. [In Persian].
- Asong, Z. E., Wheeler, H. S., Bonsal, B., Razavi, S., & Kurkute, S. (2018). Historical drought patterns over Canada and their teleconnections with large-scale climate signals. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(6), 3105-3124. <https://doi.org/10.5194/hess-22-3105-2018>
- Bazrafshan, O., Mahmoudzadeh, F., Asgari Nezhad, A., & Bazrafshan, J. (2019). Adaptive evaluation of SPI, RDI, and SPEI indices in analyzing the trend of intensity, duration, and frequency of drought in arid and semi-arid regions of Iran. *Irrigation Sciences and Engineering*, 42(3), 117-131. <https://doi.org/10.22055/jise.2017.22113.1585>. [In Persian].
- Beguieria, S., Vicente-Serrano, S. M., Reig, F., & Latorre, B. (2014). Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *International Journal of Climatology*, 34(10), 3001-3023. <https://doi.org/10.1002/joc.3887>
- Beheshti Rad, M. (2015). Spatial variation of drought using geostatistical methods and the standard normal distribution index in Kerman Province. *Iranian Journal of Water Engineering*, 5(4), 118-130. [In Persian].
- Burton, A., Glenis, V., Jones, M. R., & Kilsby, C. G. (2013). Models of daily rainfall cross-correlation for the United Kingdom. *Environmental Modelling & Software*, 49, 22-33. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.06.001>
- Cai, W., Purich, A., Cowan, T., van Rensch, P., & Weller, E. (2014). Did climate change-induced rainfall trends contribute to the Australian Millennium Drought?. *Journal of Climate*, 27(9), 3145-3168. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00322.1>
- Caloiero, T., Coscarelli, R., & Ferrari, E. (2018). Application of the innovative trend analysis method for the trend analysis of rainfall anomalies in southern Italy. *Water Resources Management*, 32, 4971-4983. <https://doi.org/10.1007/s11269-018-2117-z>
- Chandrasekara, S. S., Kwon, H. H., Vithanage, M., Obeysekera, J., & Kim, T. W. (2021). Drought in South Asia: A review of drought assessment and prediction in South Asian countries. *Atmosphere*, 12(3), 369. <https://doi.org/10.3390/atmos12030369>
- Darroudi, H., Khosroshahi, M., & Shahabi, M. (2022). Investigating variations in climatic factors and drought trends in Sistan and Baluchestan Province. *Desert Ecosystem Engineering*, 10(32), 15-30. doi: 10.22052/deej.2021.10.32.11. [In Persian]
- Dinpashoh, Y., & Shafaei, S. (2018). Analysis of Drought Characteristics of Tabriz (1951-2015). *Water and Soil Science*, 28(3), 117-130. [In Persian].
- Farzaneh, M., Arbabi Sabzevari, A., Daryabari, J., & Asadian, F. (2021). Climatic variable forecasting for future decades in South East Area of Iran. *Journal of Climate Research*, 1400(45), 97-11249. [In Persian].
- Fung, K. F., Huang, Y. F., & Koo, C. H. (2020). Assessing drought conditions through temporal pattern, spatial characteristic and operational accuracy indicated by SPI and SPEI: case analysis for Peninsular Malaysia. *Natural Hazards*, 103, 2071-2101. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04072-y>
- Haile, G. G., Tang, Q., Hosseini-Moghari, S. M., Liu, X., Gebremicael, T. G., Leng, G., ... & Yun, X. (2020). Projected impacts of climate change on drought patterns over East Africa. *Earth's Future*, 8(7), e2020EF001502. <https://doi.org/10.1029/2020EF001502>

- Hailesilassie, W. T., Ayenew, T., & Tekleab, S. (2023). A comparative study of drought characteristics using meteorological drought indices over the central main Ethiopian Rift. *Hydrology Research*, 54(3), 313-329. <https://doi.org/10.2166/nh.2023.091>
- Hejazizadeh, Z., Pajoo, F., & Shakiba, H. (2021). Analyzing the accuracy of drought indicators and determining the best climatic indicators in southeastern Iran. *Geography*, 19(68), 5-21. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.27172996.1400.19.1.1.3> [In Persian]
- Jain, V. K., Pandey, R. P., Jain, M. K., & Byun, H. R. (2015). Comparison of drought indices for appraisal of drought characteristics in the Ken River Basin. *Weather and Climate Extremes*, 8, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2015.05.002>
- Jin, H., Li, X., Zhang, Y., He, L., Zhang, G., & Ma, W. (2023). Prospective evolution of meteorological drought in the Haihe River Basin and its connection with large-scale atmospheric circulations using CMIP6 multimodel ensemble. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 128(23), e2023JD038954. <https://doi.org/10.1029/2023JD038954>
- Kahkhakohan, M. S., Rajbar Fordoie, A., Mousavi, S. H., & Vali, A. (2019). Assessment of drought dynamics in Sistan and Baluchestan province using MODIS satellite data (2000-2015). *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 26(3), 754-771. <https://doi.org/10.22092/ijrdr.2019.120029> [In Persian].
- Kartal, V. (2023). Assessment of drought using different tests and drought indices in Elazig, Turkey. *Water Science & Technology*, 88(7), 1767-1794. <https://doi.org/10.2166/wst.2023.315>
- Kashki, A. and Ghorbani, H. (2024). Faculty of Geography and Environmental Sciences, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran,. *Climate Change Research*, 5(19), 55-74. <https://doi.org/10.30488/ccr.2024.461031.1224>. [In Persian].
- Kashki, A., & Ghorbani, H. (2024). Faculty of Geography and Environmental Sciences, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran. *Climate Change Research*, 5(19), 55-74. <https://doi.org/10.30488/ccr.2024.461031.122449>. [In Persian].
- Khaleghbakht, A., Mishiri, S. R., & Mahdavi, M. (2014). Assessment of climatic drought characteristics in the Larestan region. *Regional Planning*, 4(13), 103-120. [In Persian]
- Kisi, O. (2015). An innovative method for trend analysis of monthly pan evaporations. *Journal of Hydrology*, 527, 1123-1129. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.009>
- Ling, Z., Shu, L., Wang, D., Yin, X., Lu, C., & Liu, B. (2024). Characteristics of groundwater drought and its propagation dynamics with meteorological drought in the Sanjiang Plain, China: Irrigated versus nonirrigated areas. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 54, 101911. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101911>.
- Mahdizadeh Soula, J., Ghavidel Rahimi, Y. and Farajzadeh, M. (2025). Structural Analysis and Regime Shift of Drought in Iran Using a Three-Dimensional Clustering Approach. *Journal of Geography and Environmental Hazards*. 14(3), 93-115. doi: 10.22067/geoch.2025.94525.1597. [In Persian].
- Mahmoudi, P., Maity, R., Amir Jahanshahi, S. M., & Chanda, K. (2024). Changing pattern of drought proneness across Iran. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 48(December), 4709-4729. <https://doi.org/10.1007/s40996-024-01579-3>.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104630>
- Mazidi, A., & Bahaaddinbeygi, H. (2021). Study of temperature, precipitation and wind speed trends in the northern and western regions of Kerman province using parametric and non-parametric tests. *Geography and Human Relationships*, 4(2), 246-254. <https://doi.org/10.22034/gahr.2021.296784.1587>. [In Persian].
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology* (pp. 179-183). [AMS_Relationship_Drought_Frequency_Time_Scales_1993.pdf](https://ams.confex.com/ams/Relationship_Drought_Frequency_Time_Scales_1993.pdf)

- Mehta, D., Waikhom, S., Yadav, V., Lukhi, Z., Eslamian, S., & Furze, J. N. (2022). Trend analysis of rainfall: A case study of Surat City in Gujarat, Western India. In *Earth Systems Protection and Sustainability* 2 (pp. 191-202). https://doi.org/10.1007/978-3-030-98584-4_8.
- Min, S. K., Zhang, X., Zwiers, F. W., & Hegerl, G. C. (2011). Human contribution to more-intense precipitation extremes. *Nature*, 470(7334), 378-381. <http://dx.doi.org/10.1038/nature09763>
- Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1-2), 202-216. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012>
- Moradi, M. (2020). Detection and analysis of winter precipitation over south east of Iran. *Geography and Human Relationships*, 3(1), 96-113. <https://doi.org/10.22034/gahr.2020.10995349> [In Persian].
- Moradi, M. (2020). Detection and analysis of winter precipitation over south east of Iran. *Geography and Human Relationships*, 3(1), 96-113. <https://doi.org/10.22034/gahr.2020.109953>. [In Persian].
- Nguvava, M., Abiodun, B. J., & Otieno, F. (2019). Projecting drought characteristics over East African basins at specific global warming levels. *Atmospheric Research*, 228, 41-54. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.05.008>
- Nosrati, K. (2014). Assessment of Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) for drought identification in different climates of Iran. *Environmental Sciences*, 12(4), 63-74. [In Persian]
- Pandžić, K., Likso, T., Curić, O., Mesić, M., Pejić, I., & Pasarić, Z. (2020). Drought indices for the Zagreb-Grič Observatory with an overview of drought damage in agriculture in Croatia. *Theoretical and Applied Climatology*, 142, 555-567. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03330-0>
- Parsamehr, A. H., Mobin, M. H., & Khosravani, Z. (2018). Using run theory to analysis of drought severity – duration – return period (Case Study: Fars Province). *Iranian Journal of Ecohydrology*, 5(2), 471-481. <https://doi.org/10.22059/ije.2018.234602.621>. [In Persian]
- Patel, P., Mehta, D., Waikhom, S., & Patel, K. (2021). Analysis of rainfall variability and drought over Bardoli region. In *International Conference on Hydraulics, Water Resources and Coastal Engineering* (pp. 245-255). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-8524-9_20.
- Philip, S. Y., Kew, S. F., Van Der Wiel, K., Wanders, N., & Van Oldenborgh, G. J. (2020). Regional differentiation in climate change induced drought trends in the Netherlands. *Environmental Research Letters*, 15(9), 094081. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab97ca>
- Polong, F., Chen, H., Sun, S., & Ongoma, V. (2019). Temporal and spatial evolution of the standard precipitation evapotranspiration index (SPEI) in the Tana River Basin, Kenya. *Theoretical and Applied Climatology*, 138, 777-792. <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02858-0>
- Potop, V., Možný, M., & Soukup, J. (2012). Drought evolution at various time scales in the lowland regions and their impact on vegetable crops in the Czech Republic. *Agricultural and Forest Meteorology*, 156, 121-133. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.01.002>
- Rajabzade, S., Mosaedi, A., & Ghabaei Sough, M. (2021). Assessment of meteorological, hydrological and groundwater droughts in the Kashmar and the Bardaskan plains and their relationship with each other. *Journal of Rainwater Catchment Systems*, 9(1), 55-71. [In Persian]
- Rezaei, S., Masoompour Samakosh, J., & Miri, M. (2024). Analysis of drought characteristics (severity, duration, magnitude) in Iran based on multivariate standardized drought index. *Advanced Technologies in Water Efficiency*, 4(1), 82-98. <https://doi.org/10.22126/atwe.2024.10319.1114> [In Persian]
- Roy, S. K., Morshed, A., Mojumder, P., Hasan, M. M., & Islam, A. S. (2024). Innovative trend analysis technique with fuzzy logic and K-means clustering approach for identification of homogenous rainfall region: A long-term rainfall data analysis over Bangladesh. *Quaternary Science Advances*, 15, 100227. <https://doi.org/10.1016/j.qsa.2024.100227>
- Safarzaie, N., Entezarree, A., & Saheb zadeh, B. (2023). Analysis and study of future atmospheric hazards in southeastern urban areas of Iran. , 1(2), e174156. <https://doi.org/10.22034/mpsh.2023.379557.1030> [In Persian]

- Sen, K., & Aksu, H. (2021). Trend analysis of observed standard duration maximum precipitation for Istanbul. *Teknik Dergi*, 32(1), 10495-10514. <https://doi.org/10.18400/tekderg.647558>
- Strzepek, K., Yohe, G., Neumann, J., & Boehlert, B. (2010). Characterizing changes in drought risk for the United States from climate change. *Environmental Research Letters*, 5(4), 044012. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/5/4/044012>
- Sun, H., Sun, X., Chen, J., Deng, X., Yang, Y., Qin, H., ... & Zhang, W. (2023). Different types of meteorological drought and their impact on agriculture in Central China. *Journal of Hydrology*, 627, 130423. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130423>
- Swain, S., Sahoo, S., Taloor, A. K., Mishra, S. K., & Pandey, A. (2022). Exploring recent groundwater level changes using Innovative Trend Analysis (ITA) technique over three districts of Jharkhand, India. *Groundwater for Sustainable Development*, 18, 100783. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2022.100783>
- Tabari, H., & Willems, P. (2022). Trivariate analysis of changes in drought characteristics in the CMIP6 multimodel ensemble at global warming levels of 1.5, 2, and 3 C. *Journal of Climate*, 35(18), 5823-5837. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-21-0993.1>
- Thomas, J., & Prasannakumar, V. (2016). Temporal analysis of rainfall (1871–2012) and drought characteristics over a tropical monsoon-dominated State (Kerala) of India. *Journal of Hydrology*, 534, 266-280. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.013>
- Torabinezhad, N., Zarrin, A., & Dadashi-Roudbari, A. (2023). Analysis of different types of droughts and their characteristics in Iran using the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI). *Water and Soil*, 37(3), 473-486. <https://doi.org/10.22067/jsw.2023.81322.1257> [In Persian]
- Vazirimehr, M., Hamidianpour, M., Khosravi, M. and Nazaripour, H. (2022). Atmospheric circulation types and winter extreme dry/wet spells in the southeast district of Iran. *Journal of the Earth and Space Physics*, 48(3), 641-656. doi: 10.22059/jesphys.2022.327069.1007337. [In Persian]
- Verma, S., Prasad, A. D., & Verma, M. K. (2021). Trend analysis and rainfall variability of monthly rainfall in Sheonath River Basin, Chhattisgarh. In *Recent Trends in Civil Engineering: Select Proceedings of ICRTICE 2019* (pp. 777-790). Springer Singapore. http://dx.doi.org/10.1007/978-981-15-5195-6_58
- Verma, S., Prasad, A. D., & Verma, M. K. (2022). Time series modelling and forecasting of mean annual rainfall over MRP complex region Chhattisgarh associated with climate variability. In *Recent Advances in Sustainable Environment: Select Proceedings of RAISe 2022* (pp. 51-67). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-5077-3_5
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696-1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Wang, Q., Zeng, J., Qi, J., Zhang, X., Zeng, Y., Shui, W., ... & Cong, J. (2021). A multi-scale daily SPEI dataset for drought characterization at observation stations over mainland China from 1961 to 2018. *Earth System Science Data*, 13(2), 331-341. <https://doi.org/10.5194/essd-13-331-2021>
- Wang, Q., Zhang, R., Qi, J., Zeng, J., Wu, J., Shui, W., ... & Li, J. (2022). An improved daily standardized precipitation index dataset for mainland China from 1961 to 2018. *Scientific Data*, 9(1), 124. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01201-z>
- World Meteorological Organization. (2021). *Atlas of mortality and economic losses from weather, climate, and water extremes (1970–2019)* (WMO-1267). https://library.wmo.int/index.php?lvl=notice_display&id=21930#_YubOcnZBzIU
- World Meteorological Organization. (2023). Guidelines on the definition and characterization of extreme weather and climate events (WMO-No. 1310). Deutscher Wetterdienst. https://rcc.dwd.de/DWD-RCC/EN/overview/documents/01_wmo_guidelines.html
- Wu, H., & Qian, H. (2017). Innovative trend analysis of annual and seasonal rainfall and extreme values in Shaanxi, China, since the 1950s. *International Journal of Climatology*, 37(5), 2582-2592. <https://doi.org/10.1002/joc.4866>
- Yevjevich, V. M. (1967). *An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts* (Vol. 23). Colorado State University. <https://hdl.handle.net/10217/61303>

Zare Abianeh, H., Sabziparvar, A., Marofi, S., Ghiyami, F., Mirmasoudi, S. S., & Kazemi, A. (2015). Analysis and monitoring of meteorological droughts in the region of Sistan and Baluchestan. *Environmental Science and Technology*, 17(1), 49-61. [In Persian].