

مقایسه الگوهای زمانی-مکانی و همبستگی مقیاسی شاخص‌های خشکسالی در جنوب شرق ایران با تأکید بر وضعیت دما و بارش سال‌های اخیر

چکیده

خشکسالی به‌عنوان یکی از مخرب‌ترین پدیده‌های اقلیمی، تهدیدی جدی برای امنیت آبی و غذایی مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شود. پژوهش حاضر با هدف تحلیل الگوهای زمانی-مکانی خشکسالی هواشناسی در استان سیستان و بلوچستان طی دوره ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۴ با استفاده از داده‌های شش ایستگاه سینوپتیک انجام شد. شاخص‌های SPI و SPEI در مقیاس‌های زمانی ۱، ۳، ۶ و ۱۲ ماهه محاسبه و روند آن‌ها با آزمون من-کندال با روش پیش‌سفید کردن و شیب سن ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که دمای منطقه روند افزایشی معناداری داشته و آزمون پتیت تغییر رژیم اقلیمی در سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۱ را تأیید کرد. تبخیرتعرق در ایستگاه زابل با میانگین ۸/۶۵ میلی‌متر بر روز در تابستان بیشترین مقدار را نشان داد. اگرچه در کلیه ایستگاه‌ها روند نزولی شاخص‌ها مشهود است، اما معنی‌داری آماری آن عمدتاً در مقیاس‌های بلندمدت (۱۲ ماهه) و به‌ویژه در ایستگاه زابل ثبت شد. با این حال، شاخص SPEI با نشان دادن روند نزولی در ایستگاه‌هایی که SPI فاقد روند معنادار است، شواهدی حاکی از ماهیت انرژی‌محور خشکسالی و غلبه اثرات گرمایش و تبخیرتعرق بر شرایط رطوبتی منطقه ارائه می‌دهد. همبستگی میان SPI و SPEI با افزایش مقیاس زمانی از ۰/۲۱ به ۰/۷۳ افزایش یافت که نشان‌دهنده غلبه نقش بارش در مقیاس‌های بلندمدت و تأثیرپذیری SPEI از نوسانات دمایی در مقیاس‌های کوتاه‌مدت است. ایستگاه چابهار نیز به‌دلیل موقعیت ساحلی-کمترین همبستگی را نشان داد. بر اساس نتایج، مدیریت خشکسالی در این منطقه باید بر کاهش تقاضای تبخیری و افزایش تاب‌آوری در برابر گرمایش متمرکز شود.

کلیدواژه‌ها: آزمون من-کندال، خشکسالی هواشناسی، شاخص SPI، شاخص SPEI، سیستان و بلوچستان.

مجله علمی پژوهشی
سیستان و بلوچستان
پژوهش‌های علمی
پایه علمی

Spatiotemporal Patterns and Scale-dependent Correlations of Drought Indices in Southeastern Iran with Emphasis on Recent Temperature and Precipitation Conditions

ABSTRACT

Drought, as one of the most destructive climatic phenomena, poses a serious threat to water and food security in arid and semi-arid regions. The present study aimed to analyze the spatio-temporal patterns of meteorological drought in Sistan and Baluchestan Province during the period 1990–2024 using data from six synoptic stations. The Standardized Precipitation Index (SPI) and the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) were calculated at 1-, 3-, 6-, and 12-month timescales, and their trends were evaluated using the Mann–Kendall test with pre-whitening and Sen's slope estimator. The results indicated a significant increasing trend in regional temperature, and the Pettitt test confirmed a climatic regime shift during 1998–2001. Evapotranspiration at Zabol station showed the highest values, with an average of 65.8 mm day^{-1} in summer. Although negative trends in the indices were observed across all stations, statistical significance was mainly detected at the long-term timescale (12 months), particularly at Zabol. Notably, SPEI exhibited negative trends even in stations where SPI showed no significant trend, providing evidence for the energy-driven nature of drought and the stronger influence of warming and evapotranspiration on regional moisture conditions. The correlation between SPI and SPEI increased from 0.21 to 0.73 with increasing timescale, suggesting the dominant role of precipitation at longer timescales and the sensitivity of SPEI to temperature variability at shorter timescales. Chabahar station, due to its coastal location, exhibited the lowest correlation. Based on these findings, drought management in the region should focus on reducing evaporative demand and enhancing resilience to warming.

Keywords: Mann–Kendall test, Meteorological drought, SPEI, SPI, Sistan and Baluchestan

مقدمه

خشکسالی یکی از ویرانگرترین مخاطرات طبیعی است که پیامدهای گسترده‌ای در ابعاد زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی به همراه دارد و به‌طور قابل‌توجهی جوامع انسانی در سراسر جهان را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. این پدیده از طریق کاهش فراوانی و دسترسی به منابع حیاتی نظیر آب، غذا، انرژی و خدمات اکوسیستمی، زمینه بروز بحران‌های ثانویه متعددی را فراهم می‌کند. در شدیدترین حالت، تداوم خشکسالی می‌تواند به ناامنی غذایی گسترده و حتی قحطی منجر شود (Ahmed et al., 2018). خشکسالی‌ها هر سال تأثیر قابل‌توجهی بر مناطق متعددی از جهان دارند و از نظر تأثیرگذاری از سایر بلایای طبیعی پیشی می‌گیرند (Mehdizadeh et al., 2020; Qutbudin et al., 2019).

بر اساس گزارش IPCC (2013)، خشکسالی به دوره‌ای از شرایط آب‌وهوایی غیرعادی خشک اطلاق می‌شود که به‌اندازه کافی تداوم یابد تا موجب ایجاد عدم تعادل قابل‌توجه در سامانه هیدرولوژیکی شود. به‌طور کلی، خشکسالی در همه نواحی اقلیمی رخ می‌دهد و به‌عنوان دریافت بارش کمتر از حد نرمال در یک منطقه تعریف می‌شود. این پدیده ناشی از چندین عامل طبیعی از جمله دمای بالا، بادهای شدید و کاهش بارندگی است (Ullah et al., 2020; Soñmez et al., 2005).

با توجه به ابعاد چندگانه این پدیده، خشکسالی معمولاً به چهار دسته اصلی تقسیم می‌شود: خشکسالی هواشناسی (فقدان بارش)، خشکسالی هیدرولوژیکی (کاهش رواناب سطحی)، خشکسالی کشاورزی (کاهش رطوبت خاک) و خشکسالی اجتماعی-اقتصادی (کاهش درآمد و رفاه عمومی) (Afshar et al., 2022; Salimi et al., 2021; Kheyri et al., 2023; Fawen et al., 2023; Zhang et al., 2023; Wang et al., 2023; Valenzuela-Morales et al., 2023). پیامدهای این پدیده فراتر از بخش آب بوده و چرخه کربن، منابع آب زیرزمینی، تولید ناخالص داخلی (GDP)، تولیدات کشاورزی و دامداری را نیز تحت‌تأثیر قرار می‌دهد (Hoover et al., 2022; de Medeiros et al., 2022; Zhou et al., 2023a; Zhou et al., 2023b; Xu et al., 2022; Du & Wang, 2023; Liu & Chen, 2021; Raza et al., 2023).

هیچ شاخص جهانی و یکتایی برای همه ابعاد خشکسالی وجود ندارد و این پدیده عموماً بر اساس اثرات آن و با استفاده از شاخص‌های کمی مبتنی بر متغیرهای اقلیمی محاسبه می‌شود (Svoboda & Fuchs, 2017). شاخص‌های متعددی برای پایش خشکسالی توسعه یافته‌اند؛ با این حال، انتخاب شاخص مناسب وابسته به شرایط اقلیمی منطقه، نوع خشکسالی مورد بررسی و در دسترس بودن داده‌های ورودی است. افزون بر این، مقیاس زمانی نقش تعیین‌کننده‌ای در پایش، طبقه‌بندی و تفسیر شدت خشکسالی دارد (Gurrapu et al., 2014). در این راستا، شاخص‌های SPI¹ و SPEI² به دلیل ماهیت استاندارد، انعطاف‌پذیری و قابلیت محاسبه در مقیاس‌های زمانی مختلف، از پرکاربردترین شاخص‌های خشکسالی هواشناسی به شمار می‌روند. شاخص SPI تنها بارش را به‌عنوان متغیر ورودی در نظر می‌گیرد، در حالی که SPEI علاوه بر بارش، اثر دما و تبخیر-تعرق پتانسیل را نیز در بر می‌گیرد و از این رو می‌تواند تأثیر گرمایش جهانی بر تعادل آبی را منعکس کند (Vicente et al., 2014; Trenberth et al., 2014; Dai, 2011; Serrano et al., 2014). این ویژگی SPEI را به شاخصی مناسب برای مناطق خشک و نیمه‌خشک تبدیل کرده است جایی که تبخیر-تعرق نقش مهمی در تشدید شرایط خشکسالی ایفاء می‌کند (Saeidipou et al., 2019).

با وجود تفاوت‌های مفهومی میان شاخص‌های مختلف خشکسالی، نتایج مطالعات مقایسه‌ای در اقلیم‌های مختلف همواره یکسان نبوده است. برخی پژوهش‌ها نشان داده‌اند که در شرایط گرمایش و افزایش تبخیر-تعرق، شاخص SPEI نسبت به SPI توانایی بیشتری در آشکارسازی تشدید خشکسالی دارد (Salimi et al., 2021; Vicente-Serrano et al., 2015). در مقابل، در برخی مطالعات انجام‌شده در ایران، SPI به‌عنوان شاخصی کارآمد و پایدار برای پایش خشکسالی معرفی شده است (Mahmoudi et al., 2019). همچنین، Liu et al. (2017) بیان کرده‌اند که تحلیل صرف روند SPI در مقیاس‌های زمانی مختلف برای درک کامل تغییرات خشکسالی کافی نیست و لازم است سایر شاخص‌ها نیز به‌صورت همزمان ارزیابی شوند. در ایران Sharafi & Ghaleni (2022) نشان دادند که SPEI در اقلیم‌های خشک‌تر واکنش سریع‌تری به تغییرات اقلیمی نشان می‌دهد، در حالی که در اقلیم‌های سردتر، رفتار SPI و RDI شباهت بیشتری دارد؛ موضوعی که پیش‌تر نیز توسط Tsakiris et al. (2007) در مقایسه SPI و RDI گزارش شده است. به همین ترتیب، Bazrafshan (2017) نشان داد که در اقلیم‌های خشک و بسیار خشک ایران، دما تأثیر تعیین‌کننده‌ای بر روند خشکسالی دارد و استفاده از SPEI نسبت به SPI در این مناطق، تصحیح مهمی در پایش خشکسالی ایجاد می‌کند. بنابراین، به نظر می‌رسد کارایی هر شاخص وابسته به شرایط اقلیمی، مقیاس زمانی و ویژگی‌های هیدروکلیماتولوژیک منطقه مورد مطالعه باشد و نمی‌توان یک شاخص را به‌طور مطلق برتر دانست.

مطالعات روند خشکسالی در ایران عمدتاً با استفاده از آزمون‌های ناپارامتری نظیر من-کندال³، شیب سن و آزمون پتیت⁴ انجام شده‌اند که به دلیل عدم نیاز به توزیع نرمال داده‌ها، کاربرد گسترده‌ای در تحلیل سری‌های زمانی اقلیمی دارند. نتایج این پژوهش‌ها نشان داده است که با افزایش مقیاس زمانی شاخص‌ها، روندهای خشک‌تر شدن با وضوح و معناداری بیشتری آشکار می‌شوند (Tabari et al., 2012; Kousari et al., 2014; Zarch et al., 2015; Dashtpajardi et al., 2015) را در مناطق مختلف ایران تأیید کرده‌اند (Lotfifard et al., 2022; Torabinezhad et al., 2023). در سطح منطقه‌ای، پژوهش‌هایی نیز در استان سیستان و بلوچستان به انجام رسیده است؛ بزرگزاده و همکاران (۱۴۰۳) شدت خشکسالی را در شهرستان سراوان ارزیابی کردند؛ سیاسر و سالاری (۱۴۰۲) پیش‌بینی احتمالات خشکسالی را با SPI در شش ایستگاه مشابه انجام دادند و براهویی و همکاران (۱۴۰۴) الگوهای زمانی-مکانی خشکسالی را در جنوب شرق ایران با رویکرد مبتنی بر روش گرافیکی تحلیل روند مطالعه کردند. با این حال، بررسی همزمان رفتار روندی شاخص‌های SPI و SPEI و مقایسه پاسخ آن‌ها در مقیاس‌های زمانی مختلف، به‌ویژه در استان‌های خشک و کم‌بررسی‌شده‌ای مانند سیستان و بلوچستان، همچنان نیازمند تحلیل دقیق‌تری است.

همچنین، بخش قابل توجهی از پژوهش‌های پیشین دوره‌های آماری محدود تا حدود سال‌های ۲۰۱۸ یا ۲۰۲۰ را پوشش داده‌اند و تحلیل روند خشکسالی در سال‌های اخیر، به‌ویژه در دهه‌ای که با افزایش بی‌سابقه دمای هوا همراه بوده است، کمتر مورد توجه

1 Standardized Precipitation Index

2 Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index

3 Mann-Kendall

4 Pettitt

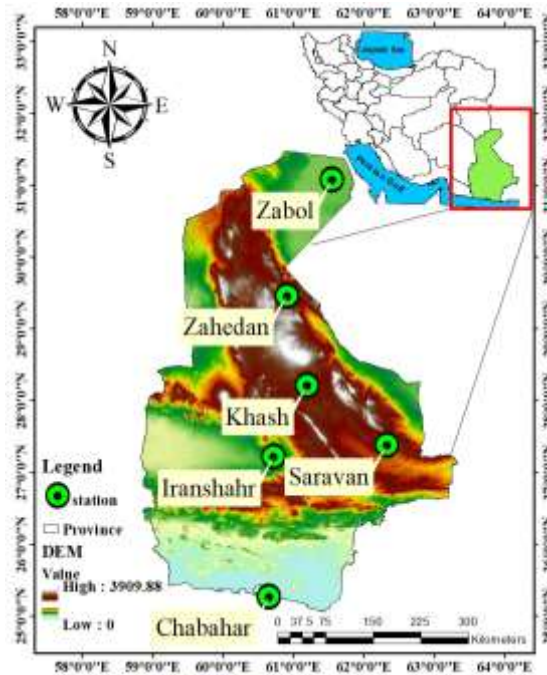
قرار گرفته است. از این رو، به روزرسانی تحلیل‌ها تا سال ۲۰۲۴ می‌تواند تصویر دقیق‌تری از وضعیت کنونی و تغییرات اخیر خشکسالی ارائه دهد.

استان سیستان و بلوچستان به‌عنوان یکی از خشک‌ترین مناطق ایران، به‌شدت در معرض پیامدهای خشکسالی قرار دارد. اقلیم خشک، نوسانات شدید بارش و وابستگی بالای معیشت محلی به منابع آب، آسیب‌پذیری این استان را در برابر رویدادهای حدی افزایش داده است. تشدید فراوانی و شدت خشکسالی‌ها در این منطقه، اثرات قابل‌توجهی بر کشاورزی، اقتصاد و امنیت معیشتی ساکنان داشته است (Omidvar et al., 2024). از این رو، شناخت دقیق الگوهای مکانی-زمانی خشکسالی برای برنامه‌ریزی و مدیریت پایدار منابع آب در این استان ضروری است. بر همین اساس، پژوهش حاضر با هدف تحلیل ویژگی‌های خشکسالی هواشناسی در استان سیستان و بلوچستان طی دوره ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۴ با استفاده از شاخص‌های SPI و SPEI، همراه با بررسی روند تغییرات خشکسالی به کمک آزمون‌های آماری روند و تحلیل همبستگی این شاخص‌ها در مقیاس‌های زمانی مختلف با هدف تعیین میزان همگرایی یا واگرایی رفتاری آن‌ها در شرایط اقلیمی منطقه انجام شده است.

داده‌ها و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

ایران در کمربند خشک جهان واقع شده است. به‌گونه‌ای که حدود ۶۴٪ درصد از مساحت آن (معادل ۱۰۵ میلیون هکتار) دارای اقلیم خشک یا نیمه‌خشک است (Mirzavand & Bagheri, 2020; Talebi, 2023). میانگین بارندگی سالانه در ایران کمتر از یک‌سوم میانگین جهانی بوده و از نظر زمانی و مکانی توزیع یکنواختی ندارد (Bahrami & Mahmoudi, 2020; Saemian et al., 2022). استان سیستان و بلوچستان یکی از پهناورترین استان‌های ایران است که مساحتی در حدود ۱۸۰۰۷۲۶ کیلومتر مربع را دربر می‌گیرد و بیش از ۱۱ درصد از کل مساحت کشور را شامل می‌شود. این استان در عرض‌های جغرافیایی $3^{\circ} 27'$ تا $31^{\circ} 27'$ عرض شمالی و $58^{\circ} 50'$ تا $63^{\circ} 21'$ طول شرقی واقع شده است. با وجود آن‌که این استان از نظر جمعیت در زمره کم‌تراکم‌ترین استان‌های ایران قرار دارد، با چالش‌های زیست‌محیطی متعددی روبه‌رو است. وقوع خشکسالی‌های مخرب و وزش بادهای ۱۲۰ روزه، که موجب افزایش نیاز آبی و تشدید خشکی محیط می‌شوند، اثرات منفی قابل‌توجهی بر شرایط طبیعی و انسانی استان بر جای می‌گذارند. بر این اساس، استان سیستان و بلوچستان در طبقه‌بندی اقلیمی کشور در زمره استان‌های خشک و بیابانی قرار می‌گیرد (شکل ۱) (Siasar et al., 2025). مشخصات جغرافیایی شش ایستگاه سینوپتیک مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه و ایستگاه‌های مورد مطالعه (منبع: یافته‌های تحقیق).

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های سینوپتیک مورد استفاده در مطالعه

ردیف	ایستگاه	کد ایستگاه	طول (°)	عرض (°)	ارتفاع (m)
۱	زابل	۴۰۸۲۹	۶۱/۵۴	۳۱/۸۹	۴۸۹/۲۰
۲	زاهدان	۴۰۸۵۶	۶۰/۹۰	۲۹/۴۷	۱۳۷۰/۰۰
۳	خاش	۴۰۸۷۰	۶۱/۱۹	۲۸/۲۲	۱۴۲۷/۰۰
۴	سراوان	۴۰۸۷۸	۶۲/۳۲	۲۷/۳۹	۱۸۲/۰۰
۵	ایرانشهر	۴۰۸۷۹	۴۵/۱۵	۳۶/۷۰	۱۴۴۳/۵۰
۶	چابهار	۴۰۸۹۸	۶۰/۶۵۱	۲۵/۲۸۱	۸

آماده‌سازی داده‌ها

داده‌های روزانه بارش، دمای حداقل و حداکثر، رطوبت نسبی، سرعت باد و ساعات آفتابی مربوط به شش ایستگاه سینوپتیک منتخب استان سیستان و بلوچستان طی دوره ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۴ از سازمان هواشناسی کشور دریافت گردید. این ایستگاه‌ها با توجه به پوشش جغرافیایی، قابلیت اطمینان داده و سابقه کامل ثبت داده‌ها انتخاب شدند. به منظور اطمینان از پیوستگی و کیفیت سری‌های زمانی، ابتدا داده‌های گمشده که کمتر از ۵ درصد کل داده‌ها را شامل می‌شدند، شناسایی و با استفاده از روش درون‌یابی خطی^۵ بازسازی شدند. سپس، کنترل کیفیت داده‌ها با استفاده از روش انحراف مطلق میانه (MAD) و آستانه ۲/۵ برابر MAD، برای شناسایی داده‌های پرت‌انجام گرفت. در ادامه، همگنی سری‌های زمانی ماهانه هر یک از پارامترهای هواشناسی با استفاده از آزمون استاندارد نرمال همگنی^۷ (SNHT) (Alexandersson, 1986) در سطح اطمینان ۹۵ درصد ارزیابی شد. سری‌های دمایی در همه ایستگاه‌ها همگن بودند، در حالی که سری‌های رطوبت نسبی و سرعت باد ناهمگن تشخیص داده شدند. به منظور رفع ناهمگنی، برای هر سری ناهمگن، روش منحنی دوگانه تجمعی (Double Mass Curve) با استفاده از ایستگاه‌های همجوار همگن

5. Linear Interpolation

6.outliers

7Standard Normal Homogeneity Test

به کار گرفته شد (Bickici Arikan & Kahya, 2019). پس از اعمال ضرایب اصلاحی، سری‌های زمانی اصلاح شده مجدداً با آزمون SNHT بررسی شدند و همگی همگن تشخیص داده شدند. در نهایت، سری‌های زمانی آماده شده برای محاسبه شاخص‌های خشکسالی SPI و SPEI مورد استفاده قرار گرفتند.

تمامی مراحل آماده‌سازی و تحلیل داده‌ها در این پژوهش با استفاده از برنامه‌نویسی پایتون (نسخه ۳،۱۳،۵) انجام شده است.

آزمون پتیت

آزمون پتیت (Pettitt, 1979) روشی ناپارامتری برای شناسایی نقطه تغییر در سری‌های زمانی است. این آزمون بر پایه مقایسه‌ی جفت سری پیوسته و با ناهمپوشانی زمانی، بنا شده است. مقایسه جفت سری‌های زمانی ناهمپوشان به صورت زیر تعریف شده است.

$$U_{t,T} = \sum_{i=1}^t \sum_{j=t+1}^T \text{sign}(x_i - x_j) \quad 1 \leq t < T \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن x_t مقدار متغیر مورد نظر در زمان t ، T تعداد کل مشاهدات و $\text{sign}(i < j)$ تابع علامت که برای مقادیر مثبت برابر با $+1$ ، برای مقادیر منفی برابر با -1 و برای مقدار صفر نیز برابر با صفر است؛ است. آماره نهایی آزمون پتیت، K_t ، از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$K_t = \max(|U_{t,T}|) \quad \text{رابطه ۲}$$

برای قضاوت درباره معنی‌داری نقطه تغییر^۸ مقدار بحرانی از رابطه (۳) محاسبه می‌شود. اگر آماره آزمون (K_t) از مقدار بحرانی کمتر باشد، فرض عدم وجود نقطه شکست معنی‌دار در سری پذیرفته می‌شود.

$$X_{k\alpha} = \left[\frac{-\ln(\alpha) * (n^3 + n^2)}{6} \right]^{0.5} \quad \text{رابطه ۳}$$

که در آن n ، تعداد داده‌ها؛ α ، سطح معنی‌داری و $X_{k\alpha}$ ، مقدار بحرانی آزمون است.

آزمون من-کندال

به منظور ارزیابی روند تغییرات سری‌های زمانی، ابتدا خودهمبستگی مرتبه اول داده‌ها مورد بررسی قرار گرفت. از آنجا که وجود خودهمبستگی می‌تواند منجر به خطای نوع اول (مثبت کاذب در تشخیص روند) در آزمون من-کندال شود، در صورت وجود خودهمبستگی معنادار، از روش پیش‌سفید کردن^۹ بر اساس رویکرد ارائه شده توسط (Von Storch 1999) استفاده گردید. در این روش، اثر خودهمبستگی مرتبه اول با استفاده از رابطه $Y_t = X_{t+1} - r_1 X_t$ از سری اصلی حذف شده و سپس آزمون من-کندال روی سری جدید Y_t اعمال می‌شود. پس از این اصلاح، آزمون ناپارامتری من-کندال برای تشخیص روند تغییرات اعمال گردید. کاربرد این آزمون در مطالعات مختلف برای تشخیص روند گسترش یافته است (Guhathakurta et al., 2010). پایه‌های اولیه این روش توسط من (۱۹۴۵) معرفی شد و سپس کندال (۱۹۷۵) آن را تکمیل و توسعه داد.

8Change Point
9Pre-Whitening
10Mann
11Kendall

برای اجرای این آزمون، مراحل زیر به ترتیب انجام می‌شود: ابتدا اختلاف میان تمام زوج‌های مشاهده‌ها محاسبه شده و پارامتر S مطابق رابطه (۴) به دست می‌آید سپس سپس تابع علامت مطابق رابطه (۵) بر روی اختلاف‌ها اعمال می‌شود، واریانس آماره S از طریق رابطه (۶) محاسبه می‌گردد. نهایتاً آماره Z با استفاده از رابطه (۷) تعیین می‌شود.

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n (x_j - x_k) \quad \text{رابطه (۴)}$$

$$\text{sgn}(X_j) = \begin{cases} +1 & ; X_j > X_k \\ 0 & ; X_j = X_k \\ -1 & ; X_j < X_k \end{cases} \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$\text{Var}(S) = \frac{(n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1)(2t_i+5))}{18} \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & ; S > 0 \\ 0 & ; S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & ; S < 0 \end{cases} \quad \text{رابطه (۷)}$$

که در آن n تعداد کل مشاهدات، m تعداد گروه‌های داده‌های تکراری، t_i تعداد داده‌های تکراری در گروه i ام و x_j و x_k به ترتیب داده‌های j ام و k ام سری زمانی هستند. در یک آزمون دو دامنه جهت روندیابی سری داده‌ها، فرض صفر در صورتی پذیرفته می‌شود که رابطه زیر برقرار باشد.

$$|Z| \leq Z_{\alpha/2} \quad \text{رابطه (۸)}$$

که در آن α سطح معنی‌داری و Z_{α} مقدار بحرانی توزیع نرمال استاندارد در سطح $\alpha/2$ است. مقدار مثبت آماره Z نشانه روند صعودی و مقدار منفی آن نشانه روند نزولی است.

برآوردگر شیب سن

روش برآورد شیب سن، نخستین بار توسط تیل (Theil, 1950) معرفی و سپس توسط سن (Sen, 1968) تکمیل و تعمیم داده شد. منطق این روش بر محاسبه یک شیب میانه برای سری زمانی و قضاوت در مورد معنی‌داری شیب به دست آمده در سطوح اعتماد مختلف استوار است. برای محاسبه شیب بین هر جفت داده مشاهده‌ای از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$Q = \frac{X_t - X_s}{t - s} \quad \text{رابطه (۹)}$$

که در آن X_t و X_s به ترتیب داده‌های مشاهده‌ای در زمان‌های t و s و یک واحد زمانی بعد از زمان s است. با اعمال رابطه (۹) برای هر دو جفت داده مشاهده‌ای، یک سری زمانی از شیب‌های محاسبه‌شده حاصل می‌شود که از محاسبه میانه این سری زمانی شیب خط روند (Q_{med}) به دست می‌آید. مقدار مثبت Q_{med} حاکی از صعودی بودن روند و مقدار منفی آن دال بر نزولی بودن روند است.

همبستگی پیرسون

در سال ۱۸۹۷، کارل پیرسون^۲ فرمول محاسبه همبستگی خطی میان دو متغیر را ارائه داد. این روش زمانی قابل استفاده است که مقیاس اندازه‌گیری داده‌ها، فاصله‌ای یا نسبی باشند. ضریب همبستگی پیرسون از رابطه (۱۰) به دست می‌آید.

$$r_{xy} = \frac{n \sum_{x \in X; y \in Y} xy - (\sum_{x \in X} x)(\sum_{y \in Y} y)}{\sqrt{[n \sum_{x \in X} x^2 - (\sum_{x \in X} x)^2][n \sum_{y \in Y} y^2 - (\sum_{y \in Y} y)^2]}} = \frac{Cov(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y} \quad \text{رابطه ۱۰}$$

که در آن، $Cov(X, Y)$ کواریانس متغیرهای تصادفی X و Y است؛ σ_X و σ_Y انحراف استاندارد متغیرهای تصادفی X و Y است. ضریب همبستگی در فاصله -۱ تا +۱ تغییر می‌کند. بنابراین علامت ضریب همبستگی جهت و مقدار آن، شدت همبستگی دو متغیر را نشان می‌دهد.

شاخص بارش استاندارد (SPI)

این شاخص اولین بار توسط McKee et al. (1993) ارائه گردید که در آن سری‌های زمانی در مقیاس i ماهه (۱، ۳، ۶، ...، i) با توزیع آماری گاما (Wu et al., 2007) برازش داده شده و متغیر تصادفی SPI مربوط به هر مقدار بارندگی در سطوح هم‌احتمال از منحنی احتمالات تجمعی نرمال استخراج می‌گردد. در پژوهش حاضر، شاخص SPI برای چهار گام زمانی مختلف یعنی SPI-1، SPI-3، SPI-6 و SPI-12 برآورد شده است تا خشکسالی‌های هواشناسی شناسایی شوند. حد آستانه طبقات و شدت خشکسالی برای شاخص SPI در جدول ۲ آمده است.

شاخص بارش-تبخیر تعرق پتانسیل استاندارد (SPEI)

در این مطالعه، به منظور تحلیل همزمان نوسانات اقلیمی، شاخص خشکسالی اقلیمی بارش-تبخیر تعرق پتانسیل استاندارد (SPEI) در پنجره‌های زمانی ۱، ۳، ۶ و ۱۲ ماهه محاسبه گردید. این شاخص برای نخستین بار توسط Vicente-Serrano et al. (2011) معرفی شد و به‌عنوان یک شاخص اقلیمی معرفی گردید. این شاخص مبتنی بر محاسبه تراز مندی آب اقلیمی^۳ است و برای محاسبه به داده‌های ماهانه بارندگی و تبخیر تعرق پتانسیل نیاز دارد. معادله تراز مندی آب اقلیمی به‌صورت زیر تعریف شده است:

$$D_i = P_i - PET_i \quad \text{رابطه ۱۱}$$

$$D_n^k = \sum_{i=0}^{k-1} P_{n-i} - PET_{n-i} \quad \text{رابطه ۱۲}$$

که در آن، P بارندگی، PET تبخیر تعرق پتانسیل، D اختلاف آن‌ها و i شماره ماه مورد نظر است. پس از محاسبه مقادیر D ، از رهیافتی همانند شاخص بارش استاندارد (SPI) برای محاسبه SPEI استفاده می‌شود. برای این منظور، ابتدا مجموع مقادیر متوالی سری D در پنجره‌های زمانی مختلف (سری X) محاسبه و در مرحله بعد یک توزیع احتمال لوگ-لجستیک سه پارامتری بر سری X برازش می‌یابد و مقدار SPEI با تبدیل هم‌احتمال توزیع لوگ-لجستیک به توزیع نرمال استاندارد استخراج می‌گردد (Vicente-Serrano et al., 2011).

روابط مختلفی برای محاسبه PET وجود دارد که در استفاده از هر یک از آن‌ها محدودیتی برای SPEI وجود ندارد. در صورتی که فقط داده‌های دمای هوا در دسترس باشد، روش تورنت‌وایت برای محاسبه تبخیر تعرق استفاده می‌شود. با توجه به نبود محدودیت

^۱Pearson
^۲limatic Water Balance

داده، در این پژوهش برای برآورد PET از روش پنمن-مانتیث فائو (Allen et al., 1998) استفاده شده است که نسبت به روش اولیه دقت بالاتری (Thornthwaite, 1948) دارد. کلاس‌های رطوبتی شاخص SPEI در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. طبقه‌بندی خشکسالی بر اساس شاخص SPI/SPEI

شاخص SPI/SPEI	طبقه‌بندی خشکسالی
$SPI/SPEI \geq 2$	ترسالی بسیار شدید
$1/5 \leq SPI/SPEI \leq 1/99$	ترسالی شدید
$1 \leq SPI/SPEI \leq 1/49$	ترسالی متوسط
$-0/99 \leq SPI/SPEI \leq 0/99$	نزدیک به نرمال
$-1 \leq SPI/SPEI \leq -1/49$	خشکسالی متوسط
$-1/5 \leq SPI/SPEI \leq -1/99$	خشکسالی شدید
$SPI/SPEI \leq -2$	خشکسالی بسیار شدید

نتایج و بحث

تحلیل رفتار سری‌های زمانی بارش، دما و تبخیر نقر

بررسی روند میانگین دمای ماهانه و مجموع بارش ماهانه در استان سیستان و بلوچستان طی دوره آماری ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۴، با استفاده از داده‌های ۶ ایستگاه هواشناسی سینوپتیک، تصویری روشن از ویژگی‌های اقلیمی این منطقه ارائه می‌دهد (شکل ۲). نمودار حاصل، افزایش تدریجی و پیوسته میانگین دمای ماهانه را در طی سه دهه گذشته آشکار می‌سازد؛ به طوری که مقادیر دما در سال‌های پایانی دوره آماری (۲۰۲۰-۲۰۲۴) به طور قابل توجهی بالاتر از ابتدای دوره (۱۹۹۰-۱۹۹۴) قرار دارد. این روند افزایشی، که شدت آن در ماه‌های گرم سال بیشتر نمایان است، با اثرات منطقه‌ای و جهانی گرمایش همسو بوده و نشان‌دهنده افزایش دمای بلندمدت در این استان است. نوسانات دمایی فصلی نیز همچنان پابرجا بوده، اما روند کلی، افزایش دمای میانگین را در بلندمدت تأیید می‌کند.

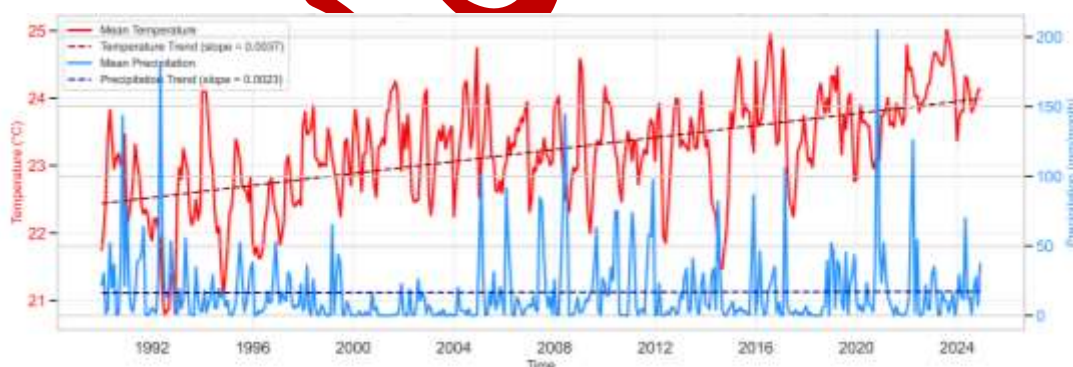
در مقابل، توزیع مجموع بارش ماهانه در همین دوره، الگوی پیچیده‌تر و پرنوسانی را به نمایش می‌گذارد. برخلاف روند نسبتاً پایدار دما، بارش در این استان فاقد یک روند صعودی یا نزولی مشخص بلندمدت است و عمدتاً تحت تأثیر رویدادهای جوی مقطعی و غیرقابل پیش‌بینی قرار دارد. در حالی که برخی ماه‌ها و سال‌ها، به ویژه در اوایل دوره آماری، بارش‌های بالاتر از میانگین بلندمدت ثبت شد، بخش بزرگی از دوره آماری با مقادیر بارش بسیار کم و نزدیک به صفر سپری شده است. این پراکندگی شدید و عدم وجود روند پایدار، مشخصه اقلیم خشک و نیمه‌خشک منطقه سیستان و بلوچستان است که وابستگی شدید آن به بارش‌های رگباری و رویدادهای نادر جوی را برجسته می‌سازد. نتایج این قسمت با مطالعات Omidvar et al. (2024) سازگار است.

نتایج آزمون پتیت (جدول ۳) نشان داد که دمای میانگین در اکثر ایستگاه‌های استان طی سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۱ دچار تغییر رژیم معنی‌دار شده و این الگو با گزارش‌های Siasar et al. (2025)، Keshavarz (2025)، Golian et al. (2015) و Bahrami et al. (2019) سازگار است. وقوع این نقاط شکست همزمان در اکثر ایستگاه‌ها، بازتاب یک گذار اقلیمی فراگیر در مقیاس منطقه‌ای است که متأثر از ترکیب چند عامل بزرگ مقیاس می‌باشد. پژوهش‌ها نشان می‌دهند که دوره ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۱ یکی از

شدیدترین و فراگیرترین دوره‌های خشکسالی در تاریخ ایران بوده است (Golian et al., 2015; Barlow et al., 2002; Barahooie et al., 2025).

عوامل اصلی این گذار اقلیمی عبارتند از: الف) رخداد تداومیافته و شدید فاز سرد انسو (La Niña) که به تغییر الگوهای گردش جوی منطقه انجامید (Golian et al., 2015; Barlow et al., 2002)، ب) تغییر در الگوهای بارش منطقه‌ای که منجر به ایجاد یک رابطه معکوس قوی بین بارش در شرق اقیانوس هند و جنوب غرب آسیا شد (Barlow et al., 2002; Deldarzehi et al., 2024) و ج) جابه‌جایی در سامانه‌های جوی بزرگ‌مقیاس مانند پرفشار عربستان که به استقرار یک پرفشار مانع‌زا بر روی منطقه انجامید (Barlow et al., 2002; Karimi et al., 2019). در مقابل، بارش-به‌جز ایستگاه زابل در سال ۱۹۹۸- فاقد نقطه تغییر معنی‌دار بوده و نوسانات آن بیشتر ماهیت طبیعی دارد؛ موضوعی که با یافته‌های درودی و همکاران (۱۴۰۰) دربارهٔ نبود روند ساختاری مشخص در بارش‌های منطقه همخوانی دارد. علاوه بر این، وقوع دیر هنگام نقطه شکست در چابهار (سال ۲۰۰۷) نشان‌دهندهٔ نقش تعدیل‌کنندهٔ اقیانوس هند و تفاوت بنیادی رفتار اقلیمی نواحی ساحلی نسبت به مناطق داخلی است. به عبارت دیگر، جرم حرارتی بالای آب‌های دریای عمان و اقیانوس هند از یک سو و اثرات تعدیل‌کنندگی بادهای موسمی (مونسون) در فصل تابستان از سوی دیگر، موجب شده‌اند که تبعات گرمایش جهانی با تأخیر بیشتری در این منطقه ساحلی نمایان شود (پوراصغر و همکاران، ۱۳۹۶). این تفاوت‌های مکانی در رفتار دما و بارش با الگوهای مکانی خشکسالی نیز سازگار است. (Lotfinasab and Siasar et al. (2025) Asaf et al. (2018) نیز گزارش کرده‌اند که شدت خشکسالی در جنوب شرق ایران دارای یک گرادیان شمال-جنوب است و ایستگاه‌های شمالی شرایط بارشی شدیدتر و مکرری را تجربه می‌کنند.

ترکیب این دو روند، یعنی افزایش همزمان دما و نوسانات شدید بارش، سناریوی چالش‌برانگیزی را برای استان سیستان و بلوچستان ترسیم می‌کند. افزایش دما می‌تواند منجر به افزایش تبخیرتورق، تشدید کمبود آب و افزایش احتمال وقوع و شدت خشکسالی شود، در حالی که عدم قطعیت در میزان و زمان بارش، برنامه‌ریزی در بخش‌های کشاورزی، منابع آب و مدیریت زیست‌محیطی را دشوارتر می‌سازد. این یافته‌ها ضرورت توجه ویژه به راهکارهای سازگاری با تغییرات اقلیمی، توسعه روش‌های نوین آبیاری و ارزیابی مستمر شاخص‌های خشکسالی را برای این استان برجسته می‌سازد.



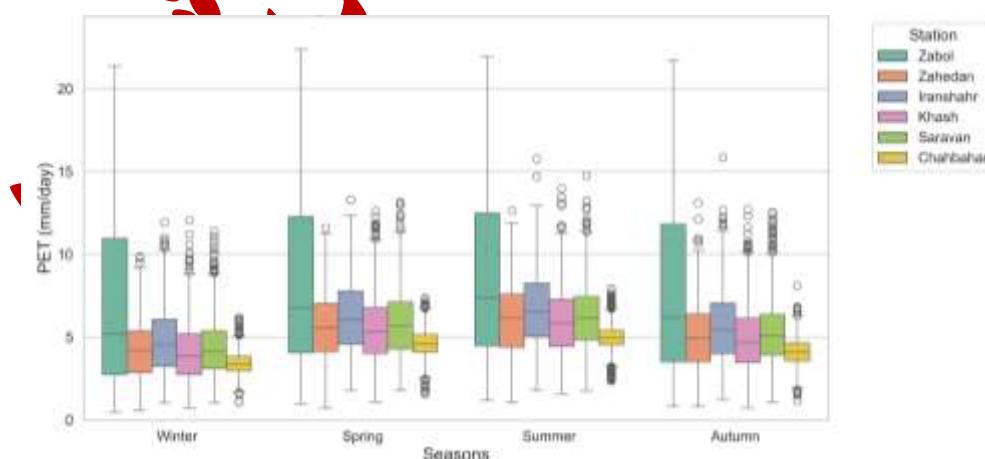
شکل ۲. روند زمانی دمای میانگین ماهانه و بارش ماهانه استان سیستان و بلوچستان طی دوره ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۴ (منبع: یافته‌های تحقیق).

توزیع فصلی تبخیرتورق (PET) در ایستگاه‌های مورد مطالعه طی دوره آماری ۱۹۹۰ تا ۲۰۲۴، الگوی مشخصی را در تمامی ایستگاه‌ها نشان می‌دهد (شکل ۳). مقادیر PET در همه ایستگاه‌ها در فصل تابستان بیشترین و در زمستان کمترین مقدار را دارند. میانگین PET در ایستگاه چابهار از ۳/۴۱ mm/day در زمستان تا حدود ۴/۹۸ mm/day در تابستان متغیر است و کمترین نوسان را در بین ایستگاه‌ها دارد. در ایستگاه‌های ایرانشهر، زاهدان، خاش و سراوان، میانگین PET در تابستان بین ۵/۹۶ mm/day تا ۶/۷۳ mm/day بوده و مقادیر انحراف معیار بین ۱/۷ تا ۲/۱ مشاهده شد.

ایستگاه زابل بیشترین مقدار PET را در تمامی فصول ثبت کرده است؛ میانگین زمستان $6/85$ mm/day و میانگین تابستان $8/65$ mm/day بوده و بیشینه‌های فصلی آن در برخی موارد از 21 mm/day تجاوز می‌کند. این ایستگاه همچنین بیشترین دامنه تغییرات و انحراف معیار (حدود $4/7$ تا 5 میلی‌متر بر روز) را دارد. بررسی چارک‌ها نشان می‌دهد که گستره توزیع داده‌ها در ایستگاه‌های ایرانشهر، زاهدان، خاش و سراوان بیشتر از چابهار و کمتر از زابل است. وجود نقاط پرت به‌ویژه در فصول گرم در زابل و ایرانشهر نیز مشاهده شد.

الگوی فصلی مشاهده‌شده در تمامی ایستگاه‌ها بیانگر نقش برجسته عوامل ترمودینامیکی منطقه در کنترل فرایند تبخیرتعرق است. افزایش دما، تابش خورشیدی، طول روز و کاهش رطوبت نسبی در فصل‌های گرم باعث افزایش شدید PET شده و اختلاف برجسته بین تابستان و زمستان را ایجاد کرده است. کم بودن مقادیر و دامنه تغییرات در چابهار مستقیماً با شرایط اقلیم ساحلی، رطوبت بالای هوا و اثر تعدیل‌کننده دریای عمان مرتبط است؛ این شرایط مانع افزایش شدید تبخیرتعرق شده و ثبات بیشتری نسبت به ایستگاه‌های داخلی ایجاد می‌کند. در مقابل، ایستگاه‌های ایرانشهر، زاهدان، خاش و سراوان که در مناطق نیمه‌خشک و خشک قرار دارند، به دلیل دریافت تابش بیشتر، رطوبت پایین‌تر و دمای بالاتر، مقادیر PET بزرگ‌تر و دامنه نوسانات بیشتری نشان می‌دهند. این تفاوت‌ها نشان می‌دهد که حتی درون یک استان، تنوع مکانی قابل توجهی در شدت تقاضای تبخیرتعرق وجود دارد.

ایستگاه زابل به‌طور واضح از سایر ایستگاه‌ها متمایز است؛ مقادیر بسیار بالا و دامنه وسیع تغییرات آن بیانگر تاثیر ترکیبی چند عامل از جمله خشکی شدید هوا، اختلاف دمایی روز و شب و به‌ویژه وزش بادهای 120 روزه است که سرعت انتقال جرم و گرما را افزایش داده و موجب جهش PET در بسیاری از روزهای سال می‌شود. وجود نقاط پرت متعدد، به‌خصوص در فصول گرم، نشان‌دهنده وقوع شرایط حدی مانند روزهای بسیار گرم یا دوره‌های تشدید وزش باد است که به‌طور مستقیم بر میزان تبخیرتعرق اثر می‌گذارند. علاوه بر این، مقایسه چارک‌ها بین ایستگاه‌ها نیز آشکار می‌سازد که با حرکت از ایستگاه ساحلی چابهار (با اقلیم مرطوب‌تر) به سمت ایستگاه‌های نیمه‌خشک و خشک داخلی (ایرانشهر، زاهدان، خاش و سراوان) و در نهایت به ایستگاه فوق‌خشک زابل در شمال استان، دامنه تغییرپذیری داده‌ها افزایش می‌یابد. این افزایش دامنه نه‌تنها بیانگر تفاوت اقلیمی است، بلکه اهمیت مدیریت تفکیک‌شده منابع آب را در مناطق مختلف استان برجسته می‌کند. زیرا مقادیر بالای PET، به‌ویژه در زابل و بخش‌هایی از ایرانشهر، نشان‌دهنده نیاز آبی بالاتر گیاهان و حساسیت بیشتر این مناطق به تنش خشکی است.



شکل ۳. نمودار باکس-پلات مقایسه فصلی PET روزانه (جعبه نشان‌دهنده دامنه بین‌چارکی (IQR)، خط وسط نشان‌دهنده میانه و شاخه‌ها نشان‌دهنده گستره داده‌های غیر پرت (تا $1/5$ برابر دامنه بین‌چارکی) در ایستگاه‌های استان سیستان و بلوچستان طی دوره $2024-1990$ (منبع: یافته‌های تحقیق).

جدول ۳. نتایج آزمون پتیت برای شناسایی نقاط تغییر در سری‌های زمانی سالانه دمای میانگین (Tmean) و بارش کل (P)

Tmean (°C)	P (mm)
------------	--------

ایستگاه	BP	K	BP	K
زابل	۱۹۹۸	۱۸۲*	۲۰۰۱	۲۳۰**
زاهدان	۱۹۹۸	۹۴ ^{NS}	۲۰۰۱	۲۲۸**
ایرانشهر	۱۹۹۸	۹۶ ^{NS}	۱۹۹۸	۲۱۲**
خاش	۱۹۹۸	۱۲۸ ^{NS}	۲۰۰۱	۲۱۸**
سراوان	۱۹۹۸	۹۰ ^{NS}	۲۰۰۱	۲۰۸**
چابهار	۲۰۱۹	۱۱۶ ^{NS}	۲۰۰۷	۲۵۶**

K: آماره پتیت، BP: نقطه شکست، ** معنی داری در سطح ۰/۰۱، * معنی داری در سطح ۰/۰۵ و ^{NS} عدم معنی داری.

پایش خشکسالی‌های هواشناسی

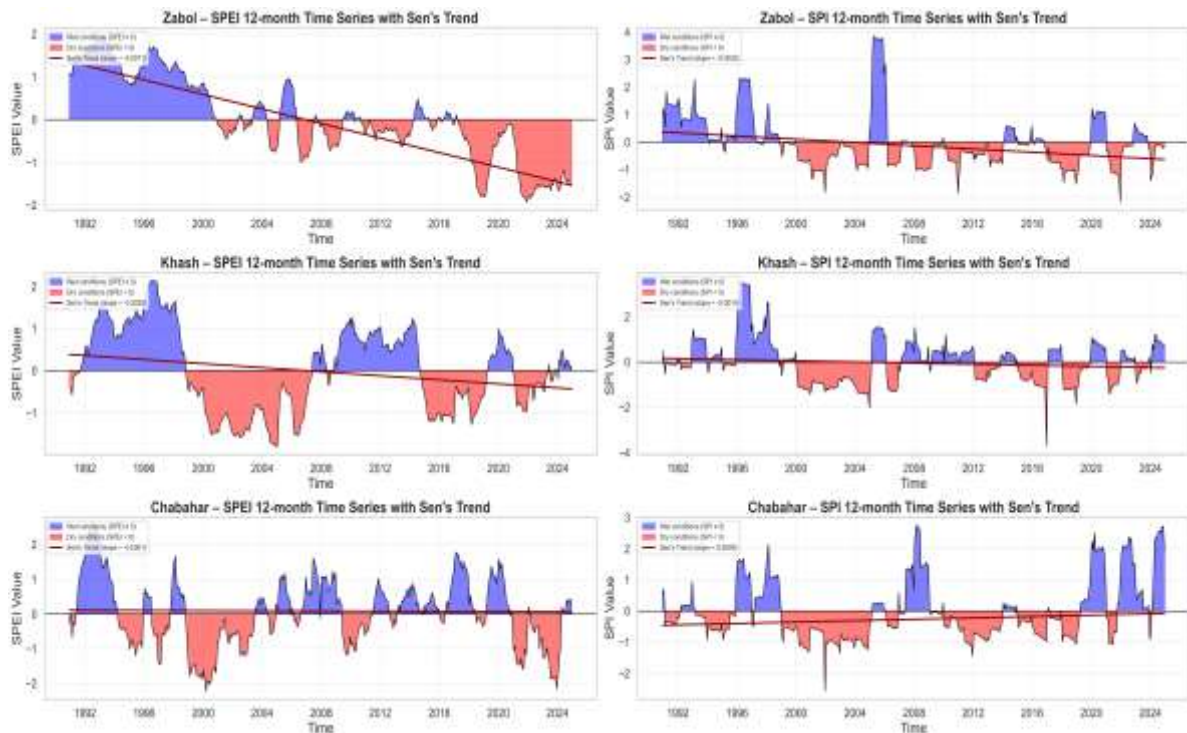
بررسی سری‌های زمانی شاخص SPI در مقیاس ۱۲ ماهه نشان می‌دهد که منطقه با نوسانات بارشی قابل توجهی در مقیاس‌های بین‌سالانه و چندساله مواجه بوده است. با توجه به اینکه مدیریت منابع آب در ایران و بسیاری از نواحی جهان عمدتاً بر پایه چرخه و تعادل آبی سالانه استوار است، در این پژوهش تحلیل بر روی همین مقیاس متمرکز شده است. الگوهای مشاهده‌شده نشان می‌دهد که دوره‌های خشکسالی بلندمدت فراگیر، بخش غالب رفتار اقلیمی منطقه را تشکیل می‌دهد و دوره‌های ترسالی، هرچند گاهی با شدت بالا ظاهر شده‌اند، اما عموماً کوتاه‌مدت، مقطعی و ناپایدار بوده‌اند. این الگو نشان‌دهنده کاهش پایداری رطوبتی در مقیاس اقلیمی و تقویت شرایط اقلیم خشک و نیمه‌خشک منطقه در دهه‌های اخیر است (شکل ۴).

روندهای محاسبه‌شده با روش شیب س در کلیه ایستگاه‌ها (نتایج برای ایستگاه‌های زابل، خاش و چابهار در شکل ۴ ارائه شده) نشان می‌دهد که شدت و تداوم خشکسالی‌ها پس از دهه ۲۰۰۰ افزایش یافته است. فراوانی دوره‌های ممتد با مقادیر منفی SPI و وقوع رخداد‌های شدید ($SPI < -2$) در بخش قابل توجهی از دوره مطالعه، حاکی از تضعیف سامانه‌های بارشی مؤثر از نظر فراوانی، مدت و شدت است. این الگو با تغییرات ساختاری شناسایی‌شده در آزمون پتیت نیز سازگار است که وقوع یک جهش اقلیمی در اواخر دهه ۱۹۹۰ و اوایل دهه ۲۰۰۰ را تأیید می‌کند. اگرچه در سال‌های پس از ۲۰۱۰ رخداد‌های ترسالی شدید مشاهده شده‌اند، اما اثر تجمعی آن‌ها کمتر از دوره‌های خشکسالی بلندمدت بوده و نتوانسته‌اند روند خشکی را خنثی کنند؛ موضوعی که نشانه‌ای از برهم خوردن تعادل آبی در اقلیم‌های خشک است. این یافته‌ها با نتایج Omidvar et al. (2024)، Mahmoudi et al. (2020) و Firoozi et al. (2020) همسو است.

شاخص SPEI-12 که علاوه بر بارش، تغییرات دما و تبخیر-تعرق را نیز لحاظ می‌کند، تصویر دقیق‌تری از شدت خشکسالی در منطقه ارائه می‌دهد. مقادیر منفی SPEI در بسیاری از دوره‌ها دامنه بزرگ‌تری نسبت به SPI داشته و نشان می‌دهد اتلاف رطوبت ناشی از گرمایش، نقش تعیین‌کننده‌ای در تشدید خشکسالی‌های اخیر داشته است. از اواخر دهه ۱۹۹۰ به بعد، شدت و تداوم خشکسالی‌ها در SPEI افزایش یافته است. روندهای منفی SPEI در تمام ایستگاه‌ها، و حتی شدیدتر از SPI در برخی نقاط، شواهدی حاکی از نقش مؤلفه‌های مرتبط با دما و تبخیر-تعرق در تشدید خشکسالی‌های بلندمدت منطقه ارائه می‌دهد. در سال‌هایی که بارش بهبود یافته، ماندگاری SPEI در مقادیر منفی می‌تواند نشان‌دهنده محدود شدن توان جبران اثرات تبخیر-تعرق توسط بارش باشد؛ موضوعی که با نتایج Vicente-Serrano et al. (2015) و Salimi et al. (2021) سازگار است که تأکید کرده‌اند SPEI به دلیل لحاظ کردن مؤلفه دما، نسبت به SPI شاخص دقیق‌تری برای ارزیابی شدت خشکسالی است.

مقایسه SPI و SPEI همچنین آشکار می‌کند که رخداد‌های ترسالی اخیر (به‌ویژه پس از ۲۰۱۹) که در SPI نمود بیشتری داشته‌اند، در SPEI کمتر برجسته هستند، زیرا بارش‌های شدید و کوتاه‌مدت گرچه سبب افزایش موقتی رطوبت شده‌اند، اما گرمایش منطقه موجب بازگشت سریع شاخص SPEI به مقادیر منفی شده است. این موضوع نشان می‌دهد که اقلیم استان حتی در سال‌های نسبتاً پربارش نیز تحت تنش رطوبتی پایدار قرار دارد.

به طور کلی، نتایج SPEI بیانگر آن است که خشکسالی‌های منطقه ماهیتی ترکیبی دارند و شواهد حاکی از آن است که مؤلفه‌های مرتبط با گرمایش و افزایش تقاضای تبخیری می‌توانند در کنار نوسانات بارش در تشدید شرایط خشکی نقش قابل توجهی داشته باشند. بنابراین، استفاده هم‌زمان از SPEI و SPI برای سیاست‌گذاری، پایش خشکسالی و مدیریت منابع آب ضروری است، زیرا SPEI تصویری واقع‌گرایانه‌تر از شرایط خشکی و تبخیرتقرق در اقلیم‌های گرم و خشک ارائه می‌دهد. این برداشت با نتایج Nouri & Homaei (2022) نیز همخوانی دارد که ضرورت گذار از رویکرد صرفاً بارشی به شاخص‌های مبتنی بر بارش-تبخیرتقرق را در مدیریت منابع آب ایران مطرح کرده‌اند.



شکل ۴. تغییرات زمانی شاخص SPEI-12 و SPI-12 در ایستگاه‌های زابل، خاش و چابهار (دوره آماری ۲۰۲۳-۱۹۹۰) (منبع: یافته‌های تحقیق).

تحلیل روند خشکسالی

تحلیل نتایج آزمون روند شاخص‌های SPI و SPEI در چهار مقیاس زمانی ۱، ۳، ۶ و ۱۲ ماهه (با اعمال روش پیش‌سفید کردن برای حذف اثر خودهمبستگی) نشان می‌دهد که الگوی غالب روند خشکسالی در ایستگاه‌های مورد مطالعه کاهش است، اما معنی‌داری آماری آن تقریباً منحصر به ایستگاه زابل (در مقیاس‌های بلندمدت) و در مواردی محدود مانند چابهار (در مقیاس شش‌ماهه SPI) است (جدول ۴). بررسی آماره Z نشان می‌دهد که در سایر ایستگاه‌ها، روندهای بلندمدت غالباً غیرمعنادار هستند، هرچند شیب سن منفی در SPEI حاکی از تأثیر دما است. این یافته‌ها حساسیت منطقه به گرمایش جهانی را برجسته می‌کند.

در مقیاس ۱۲ ماهه، ایستگاه زابل در هر دو شاخص SPI و SPEI دارای روند نزولی معنادار است، در حالی که ایستگاه‌های زاهدان، خاش، سراوان و ایرانشهر اگرچه دارای شیب سن منفی در شاخص SPEI هستند، اما این روندها در مقیاس ۱۲ ماهه از نظر آماری غیرمعنادار هستند. این تفاوت رفتاری نشان می‌دهد که شدت خشکسالی در زابل هم از نظر بارشی و هم از نظر اقلیمی-هیدرولوژیکی به صورت ساختاری و پایدار کاهش یافته است. در مقابل، در ایستگاه‌های زاهدان، خاش، سراوان و ایرانشهر، روند نزولی عمدتاً در شاخص SPEI مشهود است که نشان‌دهنده تأثیر غالب افزایش دما و تبخیرتقرق بر تشدید خشکسالی است، اما

این اثر در مقیاس بلندمدت هنوز به حدی نرسیده که از نظر آماری معنادار شود. این یافته‌ها نشان می‌دهد که نقش افزایش دما و تبخیر تعرق در تشدید خشکسالی‌های منطقه بسیار پررنگ است، زیرا حتی در ایستگاه‌هایی که روند بارشی معنادار نیست، شاخص مبتنی بر دما (SPEI) نیز در مقیاس بلندمدت روند نزولی (هرچند غیرمعنادار) را نشان می‌دهد. این یافته‌ها با نتایج Nouri & Homaei (2022) سازگار است؛ آن‌ها نشان داده‌اند که تفاوت روندهای SPEI و SPI برخاسته از تغییرات PET است.

بررسی مقیاس‌های کوتاه‌مدت (۱ و ۳ ماهه) نشان می‌دهد که پس از اعمال روش پیش‌سفید کردن، اکثر روندها در تمامی ایستگاه‌ها فاقد معنی‌داری آماری بوده و نوسانی و گذرا هستند (جدول ۴). این موضوع تأکید می‌کند که خشکسالی‌های کوتاه‌مدت بیشتر انعکاسی از نوسانات موقتی بارش‌اند و به دلیل وجود خودهمبستگی در داده‌های سری زمانی، تحلیل‌های آماری باید با دقت بیشتری انجام شوند تا از تفسیرهای نادرست جلوگیری شود. از مقیاس شش‌ماهه به بعد، فقط در شاخص SPEI و در ایستگاه زابل روند منفی معنادار مشاهده می‌شود. این الگو نشان می‌دهد که خشکسالی‌های میان‌مدت در این منطقه ماهیتی ساختاری‌تر دارند و عمدتاً تحت تأثیر تعادل انرژی (دما و تبخیر) هستند تا صرفاً کمبود بارش.

ایستگاه چابهار که اقلیم معتدل‌تر و رطوبت بیشتری دارد، در مقیاس شش‌ماهه SPI دارای روند مثبت معنادار است، اما در شاخص SPEI این روند معنادار نیست (نزولی و غیرمعنادار). این پدیده نشان می‌دهد، اگرچه بارش در چابهار روند افزایشی داشته، اما افزایش دما توانسته اثرات مثبت بارش را خنثی کند؛ موضوعی که بر نقش محوری گرمایش در تشدید خشکسالی‌ها در جنوب شرق کشور دلالت دارد. این توزیع فضایی با گزارش‌های پیشین از جمله Siasar et al. (2025) و Lotfinasab Asal et al. (2018) هماهنگ است که خشکسالی‌های شدیدتر را در نواحی شمالی‌تر این منطقه نشان داده‌اند.

شیب سن نیز این الگو را تأیید می‌کند. بر اساس جدول ۴، شیب سن در شاخص SPEI در همه ایستگاه‌ها منفی و قدرمطلق آن به‌وضوح از SPI بزرگ‌تر است. برای نمونه، در ایستگاه زابل شیب سن SPEI-12 (-۰/۰۰۷۱) حدود سه برابر SPI-12 (-۰/۰۰۲۵) است. در زاهدان این مقادیر به ترتیب -۰/۰۰۴۱ و -۰/۰۰۰۲ و در خاش -۰/۰۰۰۲ و -۰/۰۰۰۱ می‌باشد. در چابهار، شیب سن SPEI-12 (-۰/۰۰۰۱) ناچیز و نشان‌دهنده روند خنثی در اقلیم ساحلی است. با افزایش مقیاس زمانی از ۱ به ۱۲ ماهه، قدرمطلق شیب سن در SPEI به طور مداوم افزایش می‌یابد. این وضعیت تأیید می‌کند که شدت خشکسالی طی دوره مطالعه با سرعتی آهسته اما پایدار در حال افزایش است و این روند به‌ویژه در شاخص SPEI در مقیاس‌های بلندمدت الگویی پایدارتر پیدا می‌کند.

جدول ۴. نتایج آزمون من-کندال و شیب سن برای شاخص‌های SPEI و SPI طی دوره ۱۹۹۰-۲۰۲۴.

ایستگاه	پارامتر	SPI-1	SPI-3	SPI-6	SPI-12	SPEI-1	SPEI-3	SPEI-6	SPEI-12
زابل	Z	-۰/۰۷۶ ^{ns}	۰/۰۱۶ ^{ns}	-۱/۶۲۱ ^{ns}	-۲/۱۶۵*	-۷/۱۱۵**	-۴/۱۱۱**	-۳/۵۸۳**	-۲/۱۴۹*
	Sen	.	.	-۰/۰۱۱	-۰/۰۰۲۵	-۰/۰۰۵۶	-۰/۰۰۶۳	-۰/۰۰۶۷	-۰/۰۰۷۱
زاهدان	Z	۰/۱۵۴ ^{ns}	۰/۱۷۳ ^{ns}	-۰/۲۵۷ ^{ns}	-۰/۳۱۸ ^{ns}	-۴/۶۵۴**	-۲/۷۳۸**	-۱/۶۲۱ ^{ns}	-۱/۵۱۳ ^{ns}
	Sen	.	.	-۰/۰۰۱	-۰/۰۰۰۲	-۰/۰۰۲۷	-۰/۰۰۳۲	-۰/۰۰۳۵	-۰/۰۰۴۱
خاش	Z	-۰/۱۲۹ ^{ns}	۰/۳۵۲ ^{ns}	۰/۰۴۹ ^{ns}	-۱/۰۱۶ ^{ns}	-۲/۲۲۲*	-۱/۴۵۱ ^{ns}	-۰/۷۳۶ ^{ns}	-۱/۲۴۵ ^{ns}
	Sen	.	۰/۰۰۰۱	.	-۰/۰۰۱	-۰/۰۰۱۵	-۰/۰۰۱۶	-۰/۰۰۱۸	-۰/۰۰۰۲
سراوان	Z	-۰/۴۴۴ ^{ns}	۰/۱۷۳ ^{ns}	۰/۱۸ ^{ns}	۱/۱۴۱ ^{ns}	-۳/۰۵۹**	-۱/۳۴۴ ^{ns}	-۱/۰۳۴ ^{ns}	۰/۱۱۳ ^{ns}
	Sen	-۰/۰۰۱۹	-۰/۰۰۰۲	-۰/۰۰۲۳	۰/۰۰۲۶
ایران‌شهر	Z	-۰/۴۶۱ ^{ns}	۰/۹۵۵ ^{ns}	۱/۶۵۸ ^{ns}	۱/۱۷۹ ^{ns}	-۲/۳۱۵*	-۱/۱۹۱ ^{ns}	-۰/۶۶۵ ^{ns}	-۰/۳۸۳ ^{ns}
	Sen	.	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۱۱	-۰/۰۰۱۵	-۰/۰۰۱۵	-۰/۰۰۱۱	-۰/۰۰۰۳
چابهار	Z	۰/۸۱۱ ^{ns}	۱/۹۲۹ ^{ns}	۲/۱۶۸*	۱/۷۱۵ ^{ns}	-۰/۴۴۴ ^{ns}	-۰/۲۹۹ ^{ns}	۰/۰۲۷ ^{ns}	-۰/۶۳ ^{ns}
	Sen	.	۰/۰۰۰۶	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۰۹	-۰/۰۰۰۳	-۰/۰۰۰۲	-۰/۰۰۰۲	-۰/۰۰۰۱

** معنی‌داری در سطح ۰/۰۱، * معنی‌داری در سطح ۰/۰۵ و ^{ns} عدم معنی‌داری.

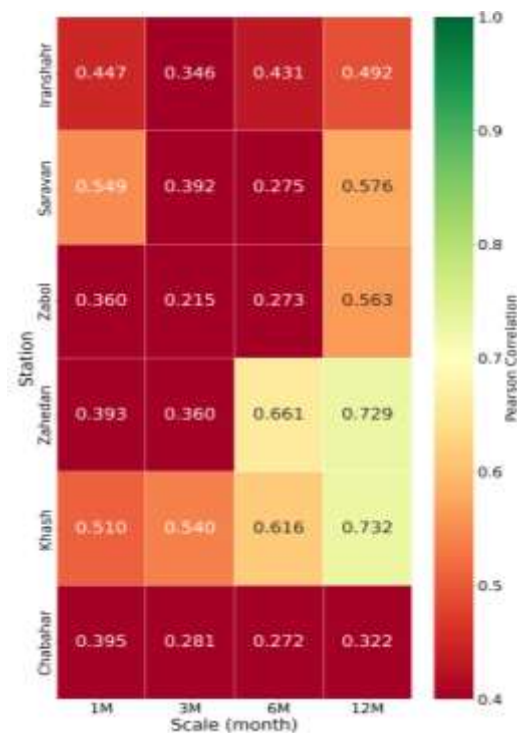
تحلیل همپوشانی و همبستگی بین SPI و SPEI

تحلیل ضرایب همبستگی پیرسون میان شاخص‌های SPI و SPEI در مقیاس‌های زمانی مختلف نشان می‌دهد که رفتار این دو شاخص به‌طور معناداری به اندازه مقیاس و شرایط اقلیمی ایستگاه‌ها وابسته است (شکل ۵). در مقیاس‌های کوتاه‌مدت یک و سه‌ماهه، مقادیر همبستگی نسبتاً پایین بوده و عمدتاً در بازه‌ای بین ۰/۲۱ تا ۰/۵۴ قرار می‌گیرند. این موضوع بیانگر نقش برجسته‌ی نوسانات دما و تبخیر-تعرق در شکل‌دهی SPEI در بازه‌های زمانی کوتاه است؛ عواملی که باعث می‌شوند SPEI در این دوره‌ها رفتاری متفاوت‌تر از SPI داشته باشد. برای نمونه، در مقیاس سه‌ماهه، ایستگاه‌های چابهار و زابل به ترتیب با مقادیر ۰/۲۸۱ و ۰/۲۱۵ پایین‌ترین ضرایب همبستگی را در میان ایستگاه‌ها نشان داده‌اند. این مقادیر پایین نشان‌دهنده آن است که در مناطق بسیار مرطوب یا بسیار خشک، نوسانات انرژی و رطوبت سطحی می‌توانند نقش تعیین‌کننده‌تری در SPEI داشته باشند و موجب واگرایی بیشتر میان دو شاخص شوند. این یافته‌ها با نتایج (2017) Bazrafshan سازگار است؛ وی نشان داد که در مقیاس ۱۲ ماهه، همبستگی SPEI مبتنی بر دما با SPI در نواحی مرطوب بالا بوده اما در مناطق خشک به دلیل حساسیت بیشتر شاخص به مؤلفه‌های حرارتی کاهش می‌یابد.

با افزایش مقیاس زمانی به سطح شش‌ماهه، همبستگی‌ها به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابند. در این مقیاس، ایستگاه‌های زاهدان (۰/۶۶۱) و خاش (۰/۶۱۶) بیشترین میزان همگرایی را نشان می‌دهند که حاکی از کاهش اثرات نوسانی دما و افزایش نقش الگوهای بارشی در تعیین هر دو شاخص است. این روند در مقیاس ۱۲ ماهه به اوج خود می‌رسد؛ جایی که همبستگی‌ها به‌طور معناداری بالا می‌روند و رفتار SPI و SPEI تقریباً همگرا می‌شود. بیشترین مقدار همبستگی در این مقیاس مربوط به ایستگاه خاش (۰/۷۳۲) است و پس از آن زاهدان با مقدار ۰/۷۲۹ قرار دارد. این مقادیر بالا نشان می‌دهند که در ارزیابی خشکسالی‌های بلندمدت، اثرات حرارتی تعدیل شده و هر دو شاخص بیشتر تحت تأثیر ترکیب بلندمدت بارش و ناهنجاری‌های رطوبتی قرار می‌گیرند.

بررسی تفاوت‌های مکانی نیز الگوهای مهمی را آشکار می‌کند. ایستگاه چابهار به‌طور پیوسته کمترین همبستگی‌ها را در مقیاس‌های مختلف از خود نشان می‌دهد (به‌ویژه در مقیاس‌های کوتاه‌مدت)، که دلیل آن را می‌توان در شرایط ساحلی، رطوبت نسبی بالاتر و تفاوت الگوی تبخیر-تعرق نسبت به نواحی داخلی جستجو کرد. در مقابل، ایستگاه زاهدان و خاش که در اقلیم‌های خشک‌تر و گرم‌تر واقع شده‌اند، در مقیاس‌های بلندمدت همبستگی‌های بسیار بالاتری ثبت می‌کنند و نشان می‌دهند که اثرات دمایی در این مناطق با افزایش مقیاس زمانی بیشتر هموار می‌شود. ایستگاه‌های ایرانشهر، سراوان و زابل نیز الگوی افزایشی مشابهی را نشان می‌دهند، هرچند سطح همبستگی آن‌ها نسبت به خاش و زاهدان پایین‌تر باقی می‌ماند.

به‌طور کلی، روند افزایشی همبستگی از مقیاس‌های کوتاه‌مدت به بلندمدت نشان می‌دهد که SPI و SPEI در ارزیابی خشکسالی‌های کوتاه‌مدت به دلیل تأثیرپذیری SPEI از تبخیر-تعرق رفتار متفاوت‌تری دارند، اما در ارزیابی خشکسالی‌های میان‌مدت و بلندمدت، به‌واسطه غلبه نقش بارش، رفتار آن‌ها به‌طور قابل‌توجهی همگرا می‌شود. این الگوی زمانی-مکانی، ویژگی بارز اقلیم جنوب‌شرق ایران را منعکس می‌کند؛ جایی که ترکیب اثرات رطوبتی، دمایی و اقلیم ساحلی-بیابانی موجب تفاوت در میزان همپوشانی دو شاخص در مقیاس‌های مختلف می‌شود.



شکل ۵. تغییرات ضریب همبستگی بین SPEI و SPI در مقیاس‌های زمانی مختلف برای شش ایستگاه مورد مطالعه (منبع: یافته‌های تحقیق).

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش با هدف تبیین الگوهای زمانی-مکانی خشکسالی در استان سیستان و بلوچستان، دو شاخص SPI و SPEI در مقیاس‌های زمانی ۱، ۳، ۶ و ۱۲ ماهه محاسبه و برای شش ایستگاه ایرانشهر، سراوان، زابل، زاهدان، خاش و چابهار تحلیل شدند. پیام‌های کلیدی این مطالعه به شرح زیر است:

(۱) خشکسالی در منطقه به‌طور فزاینده‌ای انرژی‌محور شده است. افزایش پایدار PET در تمام ایستگاه‌ها، به‌ویژه در زابل، زاهدان، خاش و سراوان، نشان‌دهنده آن است که فشار انرژی سطحی و تقاضای تبخیری، ستون اصلی پایداری خشکسالی‌های اخیر بوده است. گذار اقلیمی اواخر دهه ۱۹۹۰، که از طریق آزمون پتیت ثبت شد، نقطه عطفی در تغییر رژیم حرارتی منطقه به‌شمار می‌رود.

(۲) روندهای معنادار خشکسالی محدود و عمدتاً در مقیاس بلندمدت مشاهده می‌شوند. پس از حذف اثر خودهمبستگی، تنها ایستگاه زابل در مقیاس ۱۲ ماهه دارای روند نزولی معنادار در هر دو شاخص SPI و SPEI می‌باشد. با این وجود در سایر ایستگاه‌ها (زاهدان، خاش، سراوان و ایرانشهر) روند نزولی در شاخص SPEI مشهودتر و پررنگ‌تر از شاخص SPI است. تغییرات کوتاه‌مدت همچنان رفتاری گذرا و فاقد ساختار دارند، اما از مقیاس بلندمدت به بعد، اثرات گرمایش و افزایش PET بر رفتار خشکسالی غالب شده و در شاخص SPEI به‌وضوح قابل ردیابی است.

(۳) همبستگی SPI و SPEI از مقیاس کوتاه به بلندمدت افزایش می‌یابد. این الگو نشان می‌دهد که در بازه‌های زمانی طولانی، نقش بارش غالب می‌شود و هر دو شاخص به‌سمت یکدیگر همگرا می‌شوند؛ با این حال واگرایی شدید در مقیاس‌های کوتاه نشان می‌دهد که اثر انرژی سطحی، خشکسالی را در مراحل اولیه شکل‌دهی کنترل می‌کند. این الگو در ایستگاه‌های خشک داخلی (زاهدان و خاش) بیشتر از چابهار است.

به طور کلی، یافته‌ها آشکار می‌سازد که خشکسالی در سیستان و بلوچستان حاصل همپوشانی سه فرآیند کلیدی است: (۱) افزایش دمای ساختاری و تغییر رژیم حرارتی، (۲) روند افزایشی معنادار تبخیر و تعرق پتانسیل (PET) و تشدید تقاضای تبخیری جو و (۳) کاهش بازده اقلیمی بارش در احیای رطوبت بلندمدت. این سه عامل با هم موجب شکل‌گیری یک خشکسالی انرژی‌تقویت‌شونده شده‌اند؛ وضعیتی که در آن حتی سال‌های نسبتاً مرطوب نیز توان تعدیل تنش خشکی را ندارند و ناهنجاری‌های رطوبتی در مقیاس اقلیمی ماندگار می‌شود.

با وجود استفاده از داده‌های شش ایستگاه سینوپتیک که پوشش نسبتاً مناسبی از استان ارائه می‌دهند، پژوهش‌های آتی می‌تواند با گسترش شبکه ایستگاهی یا استفاده از داده‌های ماهواره‌ای تنوع مکانی خشکسالی را با جزئیات بیشتری تحلیل کنند. نتایج این پژوهش با رعایت شرایطی نظیر بررسی همگنی و خودهمبستگی داده‌ها و انطباق شرایط اقلیمی، قابلیت تعمیم به سایر مناطق خشک و نیمه‌خشک را دارد. با وجود این، یافته‌ها ضرورت گذار از رویکردهای سنتی به سمت مدیریت انطباقی و پیشگیرانه را آشکار می‌سازد. بر این مبنای پیشنهاد می‌شود سامانه پایش و هشدار زودهنگام مبتنی بر SPEI، با مؤلفه‌های زیر طراحی شود (با اولویت ایستگاه‌هایی نظیر زابل که روندهای نزولی ساختاری دارند): پایش پیوسته داده‌ها، محاسبه بلادرنگ SPEI-3 (برای تصمیم‌گیری‌های سریع زراعی) و SPEI-12 (برای برنامه‌ریزی‌های کلان منابع آب)، تعریف آستانه‌های هشدار بر اساس طبقه‌بندی استاندارد شدت خشکسالی (جدول ۲) و بستر اطلاع‌رسانی. آستانه‌های هشدار (ملایم، متوسط، شدید و خیلی شدید) منطبق بر مقادیر استاندارد SPEI است. در لایه‌ی اجرایی نیز، با توجه به تشدید خشکسالی‌های انرژی‌محور در نتایج این پژوهش، مقابله با این پدیده مستلزم اقداماتی عملیاتی نظیر بازنگری در الگوی کشت متناسب با توان اکولوژیک جدید، ارتقای تکنولوژی‌های آبیاری جهت مهار تقاضای تبخیری و ترویج ارقام مقاوم به تنش‌های حرارتی است تا از این طریق، تاب‌آوری جوامع محلی در برابر این پدیده فزاینده تقویت شود.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

منابع

- براهویی، دانیال، حمیدیان پور، محسن. و شجاع، فائزه. (۱۴۰۴). شناسایی الگوهای زمانی و مکانی خشکسالی در جنوب شرق ایران با رویکردی مبتنی بر روش گرافیکی تحلیل روند. *پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی*، ۵۷ (۲)، ۷۷-۹۸.
- بزرگزاده، محمدانور، جهانتیغ، حسین، ریگی، محمدرضا. و محمدی، محتبی. (۱۴۰۳). ارزیابی جامع شدت خشکسالی با رویکرد چند شاخصی در شهرستان سراوان استان سیستان و بلوچستان. *پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی*، ۵ (۲۰)، ۱۹-۳۲.
- پوراصغر، فرناز، قائمی، هوشنگ، جهانبخش، سعید. و ساری صراف، بهروز. (۱۳۹۶). تأثیر دمای سطح آب اقیانوس هند بر تغییرات بارش نیمه جنوبی کشور. *جغرافیا و برنامه ریزی محیطی*، ۲۸ (۲)، ۱۴۵-۱۶۶.
- ترابی‌نژاد، 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). *آب و خاک*، ۳۷ (۳)، ۴۷۳-۴۸۶.
- درودی، هادی، خسروشاهی، محمد. و شهابی، معصومه. (۱۴۰۰). بررسی تغییرات روند خشکسالی و عوامل اقلیمی در استان سیستان و بلوچستان. *مجله مهندسی اکوسیستم بیابان*، ۱۰ (۳۲)، ۱۵-۳۰.
- دلدارزهی، زاهد، محمودی، پیمان. و خسروی، محمود. (۱۴۰۳). سازوکارهای انتقال رطوبت دریای عرب در خشکسالی‌ها و ترسالی‌های فراگیر ایران. *جغرافیا و برنامه ریزی محیطی*، ۳۵ (۱)، ۴۵-۷۲.

سیاسر، هادی. و سالاری، امیر. (۱۴۰۲). پیش‌بینی احتمال وقوع خشکسالی با استفاده از زنجیره مارکوف (مطالعه موردی: روستاهای استان سیستان و بلوچستان). *راهبردهای توسعه روستایی*، ۱۰ (۳)، ۳۸۷-۴۰۲.

کریمی، مصطفی، خوش‌اخلاق، فرامرز، شمسی‌پور، علی‌اکبر. و نوروزی، فهیمه. (۱۳۹۸). الگوهای گردشی پر ارتفاع جنب حاره‌ای عربستان در تراز میانی و ارتباط آن با بارش ایران. *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۲۳ (۶۹)، ۲۳۳-۲۵۵.

References

Afshar, M.H., Bulut, B., Duzenli, E., Amjad, M., & Yilmaz, M. (2022). Global spatiotemporal consistency between meteorological and soil moisture drought indices. *Agric. For. Meteorol.* 316, 108848.

Ahmed, K, Shahid, S., & Nawaz, N. (2018). Impacts of climate variability and change on seasonal drought characteristics of Pakistan. *Atmospheric Research*, 214, 364-374. 10.1016/j.atmosres.2018.08.020.

Alexandersson, H. (1986) A homogeneity test applied to precipitation data. *Journal of Climatology*, 6(6), 661-675.

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop Evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56. Fao, Rome, 300(9), D05109.

Bahrami, M., & Mahmoudi, M.R. (2020). Rainfall modelling using backward generalized estimating equations: a case study for Fasa plain, Iran. *Meteorol Atmos Phys* 132, 771-779.

Bahrami, M., Bazrkar, S., & Zarei, A.R. (2019). Modeling, prediction and trend assessment of drought in Iran using standardized precipitation index. *J Water Clim Change*, 10(1), 181-196.

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> (In Persian)

Bazrafshan, J. (2017). Effect of air temperature on historical trend of long-term droughts in different climates of Iran. *Water Resources Management*, 31(14), 4683-4698.

Bickici Arıkan, B., & Kahya, E. (2019). Homogeneity revisited: analysis of updated precipitation series in Turkey. *Theoretical and Applied Climatology*, 135(1), 211-220.

Bozorgzadeh, M., Jahantigh, H., Rigi, M. & Mohammadi, M. (2024). comprehensive assessment of drought severity with multi-indicator approach in saravan city-sistan and baluchistan province. *ournal of Climate Change Research*, 5(20), 19-32. (In Persian)

Dai, A. (2011). Drought under global warming: a review. *Wiley Interdiscip. Rev Clim Chang.* 2, 45-65. <https://doi.org/10.1002/wcc.81>

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)

Dashtpajardi, M. M., Kousari, M. R., Vagharfard, H., Ghonchehpour, D., Hosseini, M. E., & Ahani, H. (2015). An investigation of drought magnitude trend during 1975-2005 in arid and semi-arid regions of Iran. *Environmental earth sciences*, 73(3), 1231-1244.

de Medeiros, F.J., Gomes, R.d.S., Coutinho, M.D.L., & Lima, K.C. (2022). Meteorological droughts and water resources: Historical and future perspectives for Rio Grande do Norte state, Northeast Brazil. *Int. J. Climatol*, 42, 6976-6995.

Deldarzehi, Z., Mahmoudi, P. & Khosravi, M. (2024). Arabian Sea's Moisture Transfer Mechanisms in Pervasive Dry and Wet Periods of Iran. *Geography and Environmental Planning*, 35(1), 45-72. (In Persian)

- Du, W., & Wang, G. (2013). Intra-event spatial correlations for cumulative absolute velocity, arias intensity, and spectral accelerations based on regional site conditions. *Bull. Seismol. Soc. Am*, 103, 1117–1129.
- Fawen, L., Manjing, Z., Yong, Z., & Rengui, J. (2023). Influence of irrigation and groundwater on the propagation of meteorological drought to agricultural drought. *Agric. Water Manag*, 277, 108099.
- Firoozi, F., Mahmoudi, P., Jahanshahi, S.M.A., Tavousi, T., Liu., Y., & Liang, Zh. (2020). Modeling changes trend of time series of land surface temperature (LST) using satellite remote sensing productions (case study: Sistan plain in east of Iran). *Arab J Geosci*, 13, 367. <https://doi.org/10.1007/s12517-020-05314-w>
- Golian, S., Mazdiyasi, O., & AghaKouchak, A. (2015). Trends in meteorological and agricultural droughts in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 119(3), 679–688.
- Guhathakurta, P., Menon, P., Mazumdar, A. B., & Sreejith, O. P. (2010). Changes in extreme rainfall events and flood risk in India during the last century. National Climatic Centre, *Research Report*, 3, 1-20.
- Gurrapu, S., Chipanshi, A., Sauchyn, D., & Howard, A. (2014). Comparison of the SPI and SPEI on predicting drought conditions and streamflow in the Canadian prairies. In: 28th Conference on Hydrology and the 26th Conference on Climate Variability and Change. *American Meteorological Society*, Georgia, p7.
- Hoover, D.L., Hajek, O.L., Smith, M.D., Wilkins, K., Slette, I.J., & Knapp, A.K. (2022). Compound hydroclimatic extremes in a semi-arid grassland: Drought, deluge, and the carbon cycle. *Glob. Chang. Biol*, 28, 2611–2621.
- IPCC. (2013). Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Field, C. B., Barros, V., Stocker, T. F., Qin, D., Dokken, D. J., Ebi, K. L., Mastrandrea, M. D., Mach, K. J., Plattner, G.-K., Allen, S. K., Tignor, M. & Midgley, P. M., eds), Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- Karimi, M., Khoshakhlagh, F., Shamsi por, A. A. and noruzi, F. (2019). Arabian subtropical High Pressure circulation patterns in the middle troposphere and its relationship with Iran's Precipitation. *Journal of Geography and Planning*, 23(69), 233-255. (In Persian)
- Kendall, M.G. (1975). Rank Correlation Methods, 4th edition, Charles Griffin, London.
- Keshavarz, A. (2025). Trends in Meteorological Drought in Iran Using the SPI Index and Mann-Kendall Test: A Comprehensive Review. *Journal of Asian Geography*, 4 (2), 79-83.
- 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. *Environ. Sci. Pollut. Res*, 30, 43619–43640.
- Kousari, M. R., Dastorani, M. T., Niazi, Y., Soheili, E., Hayatzadeh, M., & Chezgi, J. (2014). Trend detection of drought in arid and semi-arid regions of Iran based on implementation of reconnaissance drought index (RDI) and application of non-parametrical statistical method. *Water resources management*, 28(7), 1857-1872.
- Liu, L., Liao, J., Chen, X., Zhou, G., Su, Y., Xiang, Z., ... & Shao, H. (2017). The Microwave Temperature Vegetation Drought Index (MTVDI) based on AMSR-E brightness temperatures for long-term drought assessment across China (2003–2010). *Remote Sensing of Environment*, 199, 302-320.
- Liu, Y., & Chen, J. (2021). Socioeconomic risk of droughts under a 2.0 C warmer climate: Assessment of population and GDP exposures to droughts in China. *Int. J. Climatol*. 41, E380–E391.

- Lotfinasab Asal, S., Dost, G. A., & Khosroshahi, M. (2018). Assessment and application of geostatistics in identifying and analyzing drought characteristics of Jazmourian watershed. *Watershed Manage Res.* 1(18), 12-25.
- Lotfirad, M., Esmacili-Gisavandani, H., & Adib, A. (2022). Drought monitoring and prediction using SPI, SPEI, and random forest model in various climates of Iran. *Journal of Water and Climate Change*, 13(2), 383-406.
- Mahmoudi, P., Rigi, A., & Miri Kamak, M. (2019). A comparative study of precipitation-based drought indices with the aim of selecting the best index for drought monitoring in Iran: P. Mahmoudi et al. *Theoretical and Applied Climatology*, 137(3), 3123-3138.
- Mahmoudi, P., Shirazi, S.A., Firoozi, F., Jahanshahi, S.M.A., & Mazhar, N. (2020). Detection of land cover changes in Balouchestan (shared between Iran, Pakistan, and Afghanistan) using the MODIS Land Cover Product. *Arab. J. Geosci*, 13, 1-14.
- Mann, H.B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 245-259.
- 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. American Meteorological Society, 17(22), 179-183.
- Mehdizadeh, S, Ahmadi, F, Mehr, AD, & Safari, MJS. (2020). Drought modeling using classic time series and hybrid wavelet-gene expression programming models. *Journal of Hydrology*, 587, Article 125017.10.1016/j.jhydrol.2020.125017.
- Mirzavand, M., & Bagheri, R. (2020). The water crisis in Iran: development or destruction? *World Water Policy*, 6(1), 89-97.
- Nouri, M., & Homae, M. (2020). Drought trend, frequency and extremity across a wide range of climates over Iran. *Meteorological Applications*, 27(2), e1899.
- Omidvar, K., Nabavizadeh, M., Rosta, I., & Olafsson, H. (2024). Remote sensing-based drought monitoring in Iran's sistan and balouchestan province. *Atmosphere*, 15(10), 1211.
- Pearson, K. (1897). Mathematical contributions to the theory of evolution. on a form of spurious correlation which may arise when indices are used in the measurement of organs. *Proceedings of the royal society of London*, 60 (359-367), 489-498.
- Pettitt, A. N. (1979). A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem *Journal of the Royal Statistical Society Series C (Applied Statistics)*, 28, 126-135. <https://doi.org/10.2307/2346729>
- Pourasghar, F., Ghaemi, H., Jahanbakhsh, S. & Sarisarraf, B. (2017). Variability of Precipitation in Southern Part of Iran and Linkage to Indian Ocean Sea Surface Temperature. *Geography and Environmental Planning*, 28(2), 145-166. (In Persian)
- Qutbudin, I, Shiru, MS, Sharafati, A, Ahmed, K, Al-Ansari, N, Yaseen, ZM, Shahid, S, & Wang, X. (2019). Seasonal drought pattern changes due to climate variability: Case study in Afghanistan. *Water*, 11 (5), 1096.10.3390/w11051096.
- Raza, A., Mubarik, M.S., Sharif, R., Habib, M., Jabeen, W., Zhang, C., Chen, H., Chen, Z.H., Siddique, K.H., & Zhuang, W. (2023). Developing drought-smart, ready-to-grow future crops. *Plant Genome*. 16, e20279.
- Saeidipou, M., Radmanesh, F., & Eslamian, S. (2019). Meteorological drought monitoring using the multivariate index of SPEI (case study: Karun Basin). *AUT J Civ Eng*, 3, 85-92. <https://doi.org/10.22060/ajce.2018.14740.5494>
- Saemian, P., Tourian, M.J., AghaKouchak, A., Madani, K., & Sneeuw, N. (2022). How much water did Iran lose over the last two decades? *J Hydrology: Reg Stud*, 41, 101095,

Salimi, H., Asadi, E., & Darbandi, S. (2021). Meteorological and hydrological drought monitoring using several drought indices. *Applied Water Science*, 11(2), 1-10.

Sen, P.K. (1968). Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379-1389.

Sharafi, S., & Ghaleni, M. M. (2022). Spatial assessment of drought features over different climates and seasons across Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 147(3), 941-957.

Siasar, H. & Salari, A. (2023). Predicting the probability of droughts using SPI drought index based on Markov chain model (Case study: Villages of Sistan and Baluchistan province). *Rural Development Strategies*, 10(3), 387-402. (In Persian)

Siasar, H., Salari, A., Bahrami, M., & Hamidifar, H. (2025). Integrating remote sensing and meteorological analysis for monitoring drought conditions in arid regions: a case study from Sistan and Baluchistan province, Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 156(5), 291.

Soñmez, F.K., Koemuescue, A.U., Erkan, A., & Turgu, E. (2005). An analysis of spatial and temporal dimension of drought vulnerability in Turkey using the standardized precipitation index. *Natural Hazards*, 35, 243–264.

Svoboda, M., & Fuchs, B. (2017). Handbook of Drought Indicators and Indices Thorntwaite CW (1948) An approach toward a rational classification of climate. *Geogr Rev*, 38, 55. <https://doi.org/10.2307/210739>

Tabari, H., Abghari, H., & Hosseinzadeh Talaei, P. J. H. P. (2012). Temporal trends and spatial characteristics of drought and rainfall in arid and semiarid regions of Iran. *Hydrological processes*, 26(22), 3351-3361.

Talebi, M. (2023). Water crisis in Iran and its security consequences. *J Hydraulic Struct*, 8(4), 17-28.

Theil, H. (1950). A rank invariant method of linear and Polynomial regression analysis, Part3. Netherlands Akademik van Wettenschappen, Proceedings, 53, 1379-1412.

Thorntwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical review*, 38(1), 55-94.

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. doi: 10.22067/jsw.2023.81322.1257 (In Persian)

Trenberth, KE., Dai, A., van der Schrier, G., Jones, PD., Barichivich, J., Briffa, KR., & Sheffield, J. (2014). Global warming and changes in drought. *Nat Clim Chang*, 4, 17–22. <https://doi.org/10.1038/nclimate2067>

Tsakiris, G., Pangalou, D., & Vangelis, H. (2007). Regional drought assessment based on the reconnaissance drought index (RDI). *J Water Resour Manage*, 21, 821–833. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9105-4>

Ullah, I., Yuanjie, Z., Ali, S., & Rahman, G. (2020). Rainfall and drought variability in spatial and temporal context in Lop Nor region, South Xinjiang, China, during 1981–2018. *Arabian Journal of Geosciences*, 13, 1–13.

Valenzuela-Morales, G., Hernández-Téllez, M., Fonseca-Ortiz, C., Gómez-Albores, M., Esquivel-Ocadiz, A., Arévalo-Mejía, R., Mejía-Olivares, A., & Mastachi-Loza, C. (2023). Climatic and socioeconomic regionalization of the meteorological drought in Mexico using a predictive algorithm. *Nat. Hazards*, 117, 1381–1403.

Vicente-Serrano, S. M., Van der Schrier, G., Beguería, S., Azorin-Molina, C., & Lopez-Moreno, J. I. (2015). Contribution of precipitation and reference evapotranspiration to drought indices under different climates. *Journal of Hydrology*, 526, 42-54.

Vicente-Serrano, S.M., Lopez-Moreno, J-I., Beguería, S., Lorenzo-Lacruz, J., Sanchez-Lorenzo, A., García-Ruiz, J.M., Azorin-Molina, C., Morán-Tejeda, E., Revuelto, J., Trigo, R., Coelho, F., & Espejo, F. (2014). Evidence of increasing drought severity caused by temperature rise in southern Europe. *Environ Res, Lett* 9, 044001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/4/044001>

Visente Serrano, S.M., López-Moreno, J.I., Drummond, A., Gimeno, L., Nieto, R., Morán-Tejeda, E., & Zabalza, J. (2011). Effects of warming processes on droughts and water resources in the NW Iberian Peninsula, (1930-2006). *Climate Research*, 48, pp. 203-212.

Von Storch, H. (1999). Misuses of statistical analysis in climate research. In: Analysis of climate variability. *Springer*, pp 11-26.

Wang, T., Tu, X., Singh, V.P.; Chen, X., Lin, K., Zhou, Z., & Tan, Y. (2023). Assessment of future socioeconomic drought based on CMIP6: Evolution, driving factors and propagation. *J. Hydrol.* 617, 129009.

Wu, H., Svoboda, M. D., Hayes, M. J., Wilhite, D. A., & Wen, F. (2007). Appropriate application of the standardized precipitation index in arid locations and dry seasons.

Xu, J., Zhou, G., Su, S., Cao, Q., & Tian, Z. (2022). The development of a rigorous model for bathymetric mapping from multispectral satellite-images. *Remote Sens.* 14, 2495.

Zarch, M. A. A., Sivakumar, B., & Sharma, A. (2015). Droughts in a warming climate: A global assessment of Standardized precipitation index (SPI) and Reconnaissance drought index (RDI). *Journal of hydrology*, 526, 183-195.

Zhang, F., Cui, N., Guo, S., Yue, Q., Jiang, S., Zhu, B., & Yu, X. (2023). Irrigation strategy optimization in irrigation districts with seasonal agricultural drought in southwest China: A copula-based stochastic multi objective approach. *Agric. Water Manag.* 282, 108293.

Zhou, G., Lin, G., Liu, Z., Zhou, X., Li, W., Li, X., & Deng, R. (2023a). An optical system for suppression of laser echo energy from the water surface on single-band bathymetric LiDAR. *Opt. Lasers Eng.* 163, 107468.

Zhou, G., Zhang, H., Xu, C., Zhou, X., Liu, Z., Zhao, D., Lin, J., & Wu, G. (2023b). A real-time data acquisition system for single-band bathymetric LiDAR. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 61, 1–21.

Spatiotemporal Patterns and Scale-dependent Correlations of Drought Indices in Southeastern Iran with Emphasis on Recent Temperature and Precipitation Conditions

ABSTRACT

Introduction

Drought is one of the most destructive natural hazards, causing far-reaching environmental, economic, and social consequences. It disrupts regional water balances through reduced precipitation, increased temperatures, and intensified evapotranspiration, leading to secondary crises such as food insecurity, groundwater depletion, and ecosystem degradation. In Iran, Sistan and Baluchestan province — characterised by an arid to hyper-arid climate, extreme precipitation variability, and a local economy heavily dependent on water-sensitive sectors (agriculture, livestock, and wetlands) — exhibits high vulnerability to drought. Previous studies in this region have predominantly relied on univariate indices such as the Standardised Precipitation Index (SPI) and have generally covered statistical periods ending around 2018 or 2020. Consequently, the influence of the unprecedented warming observed during the last decade (2014–2024) on drought intensification remains underexplored. Moreover, a comparative assessment of SPI and the Standardised Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) across multiple time scales (1, 3, 6, and 12 months) — and under the specific thermodynamic conditions of southeastern Iran — is still lacking. Against this background, the present study has four main objectives: (1) to characterise meteorological drought in Sistan and Baluchestan over the period 1990–2024 using SPI and SPEI; (2) to detect temporal trends and abrupt change points in drought severity; (3) to compare the behaviour of the two indices across different accumulation scales; and (4) to evaluate the degree of convergence/divergence between SPI and SPEI as a function of climate type (coastal vs. interior arid).

Method

This applied research follows a quantitative-analytical design. The study area is Sistan and Baluchestan province ($\approx 180,726 \text{ km}^2$), located in southeastern Iran, bordering Afghanistan and Pakistan. Daily meteorological data — precipitation, minimum and maximum temperature, relative humidity, wind speed, and sunshine hours — were obtained from six synoptic stations (Zabol, Zahedan, Iranshahr, Khash, Saravan, and Chabahar) for the period 1990–2024 from the Iran Meteorological Organization. Missing values were reconstructed using linear interpolation and correlation-based infilling. Homogeneity of the time series was verified using the SNHT (Standard Normal Homogeneity Test) at $\alpha = 0.05$. The FAO Penman-Monteith method, which accounts for radiation, humidity, and wind, was used to estimate reference evapotranspiration (ET_0) for SPEI calculation. SPI and SPEI were computed at four-time scales (1, 3, 6, and 12 months) following the widely accepted gamma and log-logistic distribution fits, respectively. To ensure robust trend analysis, the pre-whitening procedure was applied to remove the effect of serial correlation. The non-parametric Mann–Kendall test was then used to detect monotonic trends, and Sen's slope estimator quantified the magnitude of change. The Pettitt test ($\alpha = 0.05$

and 0.01) identified potential abrupt change points in mean annual temperature and total precipitation. Pearson's correlation coefficient was calculated between SPI and SPEI at each station and time scale to examine behavioural convergence.

Results and Discussion

Mean annual temperature exhibited a significant increasing trend ($p < 0.01$) at all six stations. The Pettitt test detected a coherent breakpoint around 1998–2001 at Zabol, Zahedan, Khash, Saravan, and Iranshahr, while Chabahar (coastal) showed a later shift in 2007. In contrast, annual precipitation displayed no significant structural trend; only Zabol had a detectable breakpoint (1998). The lack of a precipitation trend coexists with a marked rise in potential evapotranspiration (PET). The highest PET values were recorded at Zabol (summer mean 8.65 mm day^{-1} , with daily extremes exceeding 21 mm day^{-1}), followed by the interior arid stations (Iranshahr, Zahedan, Khash, Saravan $\approx 5.7\text{--}6.7 \text{ mm day}^{-1}$). Chabahar showed the lowest PET and the smallest seasonal range due to maritime moderation.

The SPI-12 series revealed that long-term drought episodes dominate the study period; pluvial events, although occasionally intense, were short-lived and insufficient to offset the cumulative moisture deficit. SPEI-12 indicated consistently more severe and prolonged droughts than SPI, especially after 2000, highlighting the exacerbating role of increased evaporative demand. The Mann–Kendall trend analysis on the 12-month scale showed a significant decreasing trend for both SPI and SPEI only at Zabol ($Z = -2.165$ for SPI, and -2.149 for SPEI; $p < 0.05$). At Zahedan, Khash, Saravan, and Iranshahr, SPEI exhibited negative Sen's slopes (e.g., $-0.0041 \text{ year}^{-1}$ at Zahedan) that were not statistically significant, but the contrast with SPI (which had near-zero slopes) suggests a detectable thermal-evaporative signal. No significant trends were found at short scales (1- and 3-month) after pre-whitening. Interestingly, at Chabahar, a significant positive trend was observed for SPI-6 ($Z = 2.168$, $p < 0.05$), indicating a wetting tendency in mid-scale precipitation, but this was cancelled in SPEI-6 (non-significant negative slope), implying that increased temperature and PET have offset the rainfall gain.

Pearson correlation between SPI and SPEI increased systematically from short to long accumulation scales: from $\approx 0.21\text{--}0.54$ at 1–3 months to $\approx 0.66\text{--}0.73$ at 12 months. The highest 12-month correlation was found at Khash (0.732) and Zahedan (0.729), and the lowest at Chabahar and Zabol at short scales. This scale-dependent convergence confirms that at longer time scales, precipitation becomes the dominant driver of both indices, whereas at short scales, surface energy fluxes control SPEI more strongly.

Conclusions

Drought in Sistan and Baluchestan province results from the interaction of three key processes: (i) structural temperature increase and thermal regime shift (with a breakpoint in the late 1990s), (ii) sustained growth of potential evapotranspiration (especially in Zabol and interior areas), and (iii) reduced precipitation efficiency in restoring long-term moisture. These factors have led to an energy-amplified drought. SPEI provides a more realistic picture of drought severity because it accounts for temperature. Significant decreasing trends were observed only at Zabol (at long scales), indicating a structural aridity effect in the northern part of the

province. At other stations, although trends are non-significant, the difference between SPI and SPEI reveals the decisive role of temperature. The increasing correlation between the two indices at long scales indicates that precipitation dominates over long periods, but divergence at short scales suggests that surface energy controls drought in its early stages. Overall, water resource management in this province should focus on reducing water demand, curbing evapotranspiration, and enhancing resilience to warming, because precipitation alone cannot compensate for the moisture deficit. It is recommended to establish an early warning and monitoring system based on SPEI (prioritizing Zabol station), revise cropping patterns, and adopt modern irrigation technologies.

Keywords: *Mann–Kendall test, Meteorological drought, SPEI, SPI, Sistan and Baluchestan.*

ویراستاری نشده