

Reliability Assessment of Gridded SPI Data for Monitoring Meteorological Drought in Southeastern Iran

Hamid Nazaripour^{1,*} , Abdolvahid Sabori¹ 

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

*Corresponding Author: h.nazaripour@gep.usb.ac.ir

Abstract Extended

Introduction

Drought is a gradual and complex natural hazard with a slow onset and long-lasting impacts, making accurate monitoring essential for effective management, particularly in arid and semi-arid regions. However, precise drought monitoring in areas with high climatic variability and limited access to long-term, homogeneous station data—such as southeastern Iran—poses a serious challenge. This region, covering about one-fourth of Iran's area, has sparse station networks and scarce long-term precipitation records. Global gridded databases integrating remote sensing, numerical models, and ground observations, such as SPIbase derived from GPCC precipitation data, can serve as suitable substitutes for data-sparse areas. However, the accuracy of these datasets may vary across climatic zones. Therefore, evaluating gridded indices against station-based data is necessary to ensure correlation, agreement, and effectiveness in drought monitoring. While previous studies have assessed satellite-based products, composite databases like SPIbase have received less attention, and no dedicated assessment has been conducted for southeastern Iran. This study aims to investigate the correlation and agreement between station-based SPI and gridded SPIbase at multiple time scales (1, 3, 6, 9, and 12 months) to ensure reliable substitution in southeastern Iran.

Methods and Materials

Southeastern Iran, covering 435,767 km² (26.44% of Iran), extends from 55°E to the eastern international border and from 32°N to the Persian Gulf and Gulf of Oman coastlines. The region includes large depressions such as the Lut Desert and Jazmurian Basin, central highlands like Hazar and Lalezar, and eastern highlands such as Taftan and Bazman. It exhibits the highest topographical and climatic diversity in Iran, including hyper-arid stations like Bam, Zabol, and Zahedan.

Two data types were used. First, monthly precipitation totals from 8 meteorological stations (Bam, Bandar Abbas, Chabahar, Zabol, Saravan, Iranshahr, Kerman, and Zahedan) for 1986–2024 were obtained from the Iran Meteorological Organization. Second, gridded SPIbase data (gpcc-spi-gamma) derived from GPCC precipitation data were extracted from the NOAA/NCEI database at 1° spatial resolution and multiple time scales. Gridded SPI values at each station were calculated using inverse distance weighting, with minimum and maximum contributing cells set at 4 and 8. Topographic criteria excluded cells with elevation differences exceeding 500 m, prioritized similar elevations in mountainous areas, and limited the radius in flat areas to prevent excessive smoothing.

The SPI was calculated for each station at 1, 3, 6, 9, and 12-month scales by fitting a gamma distribution to cumulative precipitation series and transforming cumulative probabilities to a standard normal distribution. Pearson's linear correlation coefficient was used to quantify the strength and direction of the relationship between station-based and gridded SPI. Weighted Cohen's Kappa assessed agreement after converting continuous SPI values into 8 ordinal drought categories, assigning different weights to different degrees of disagreement. Bland-Altman plots evaluated agreement and identified systematic differences by plotting differences against means and calculating limits of agreement ($\pm 1.96 \times \text{SD}$). All analyses were performed in MATLAB.

Results and Discussion

At the 1-month scale, correlations ranged from 0.49 (Bam) to 0.72 (Kerman and Zabol), with Kappa values from 0.34 (Chabahar) to 0.70 (Bandar Abbas). Bland-Altman ranges were relatively wide, particularly for Bam. Hyper-arid stations showed moderate agreement, while others showed fair to

moderate agreement. At the 3-month scale, correlations improved from 0.64 (Zabol) to 0.84 (Chabahar), with Kappa values from 0.43 (Zabol) to 0.78 (Kerman). Coastal stations showed the highest correlations, while Bam and Zabol remained lower. Aggregation over 3 months reduced short-term variability and better captured drought signals. At the 6-month scale, correlations further improved from 0.72 (Bam) to 0.89 (Chabahar), with Kappa values from 0.49 (Bam) to 0.79 (Kerman). Bland-Altman ranges narrowed, indicating improved agreement. At the 9-month scale, correlations ranged from 0.75 (Bam) to 0.91 (Kerman, Bandar Abbas, and Chabahar), with Kappa values from 0.50 (Bam) to 0.83 (Kerman). Zahedan showed a correlation of 0.91 and Kappa of 0.79, while Saravan showed 0.85 and 0.73. At the 12-month scale, correlations ranged from 0.76 (Bam) to 0.94 (Bandar Abbas), with Kappa values from 0.53 (Bam) to 0.86 (Kerman). Bland-Altman ranges were narrowest, indicating the best agreement. Kerman showed the highest Kappa (0.86), while its correlation coefficient was 0.91. Overall, correlation and agreement systematically increased from shorter to longer time scales, consistent with the SPI's nature, as longer accumulation periods integrate precipitation anomalies and reduce noise. Hyper-arid stations consistently showed lower correlations and agreement, particularly at short time scales, attributed to extreme climatic conditions including very low annual precipitation, high temporal variability, and irregular rainfall regimes. Weighted Kappa values indicated substantial to moderate agreement at longer scales, with Kerman showing the highest agreement. Bland-Altman limits narrowed progressively, indicating better reproduction of station-based SPI at longer accumulation periods, with small mean differences suggesting no systematic bias.

Conclusion

This study assessed the reliability of gridded SPIbase for drought monitoring in southeastern Iran by comparing it with station-based SPI at multiple time scales over 1986–2024. Strong correlations and substantial agreement were found across most stations, particularly at longer time scales (6, 9, and 12 months), where correlation coefficients exceeded 0.75, and Kappa values indicated moderate to substantial agreement. Reliability improved progressively from shorter to longer time scales, indicating that the gridded dataset is more suitable for long-term drought monitoring. However, at short time scales (1 and 3 months), and particularly in hyper-arid stations such as Bam and Zabol, agreement was moderate, and substitution requires caution and supplementary evaluation due to extreme climatic conditions, very low rainfall, high temporal variability, and irregular precipitation regimes. As a key conclusion, gridded SPIbase can serve as a suitable and reliable substitute for station-based data for long-term drought monitoring (6, 9, and 12 months) across most stations in southeastern Iran. Given its broad spatial coverage and high temporal and spatial resolution, this global database can provide valuable data for drought monitoring in data-sparse regions. The findings are not universally applicable and depend on time scale and station location. For short-term monitoring in hyper-arid stations, SPIbase should be used with caution and supplementary evaluations. This study did not quantify the inherent uncertainty of gridded data arising from integration of station data, numerical models, remote sensing, interpolation, and probability distribution fitting. Future research should address uncertainty analysis, confidence intervals, and the quantitative contribution of data quality factors to observed differences.

Keywords: Standardized Precipitation Index, Weighted Cohen's Kappa, Drought, Pearson's linear correlation, Bland-Altman plots.

ارزیابی قابلیت اطمینان داده‌های شبکه‌ای شاخص استاندارد شده بارش برای پایش خشکسالی هواشناسی در جنوب شرق ایران

حمید نظری پور^{۱*}، عبدالوحید صبوری^۱

۱- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

*رایانامه نویسنده مسئول: h.nazaripour@gep.usb.ac.ir

چکیده

پایش خشکسالی یکی از عوامل مهم و کلیدی در مدیریت خشکسالی در مناطق مستعد است. اما پایش دقیق خشکسالی در مناطق مختلف جغرافیایی به‌ویژه در مناطقی که از تنوع اقلیمی بالا برخوردارند و دسترسی به داده‌های ایستگاهی بلندمدت و همگن در آن‌ها محدود است (مانند، جنوب شرق ایران)، چالش جدی محسوب می‌شود؛ بنابراین، استفاده از پایگاه‌های داده‌های شبکه‌ای جهانی که مبتنی بر تلفیق داده‌های سنجش از دور، مدل‌های عددی و داده‌های اندازه‌گیری شده هستند، می‌توانند جایگزینی مناسب برای نواحی فاقد داده کافی باشند. با این وجود، دقت این داده‌ها در مناطق مختلف اقلیمی می‌تواند متفاوت باشد؛ لذا ارزیابی عملکرد شاخص مبتنی بر داده‌های شبکه‌ای نسبت به داده‌های ایستگاهی، گامی ضروری جهت اطمینان از میزان همبستگی، توافق و عملکرد این شاخص در پایش خشکسالی می‌باشد. پژوهش جاری به دنبال بررسی میزان همبستگی و توافق بین شاخص استاندارد شده بارش ایستگاهی (SPI) و شبکه‌ای (SPIbase) به عنوان ابزارهای پایش خشکسالی در مقیاس‌های زمانی مختلف (۱، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه) است تا از جایگزینی و استفاده از داده‌های شبکه‌ای با داده‌های ایستگاهی اطمینان حاصل کند. شاخص استاندارد شده بارش ایستگاهی (SPI) بر مبنای داده‌های بارش در سطح ۸ ایستگاه هواشناسی در جنوب شرق ایران در دوره آماری ۱۹۸۶ تا ۲۰۲۴ محاسبه شده است. شاخص بارش استاندارد شده شبکه‌ای (SPIbase) نیز از داده‌های بارش مرکز اقلیم‌شناسی بارش جهانی (GPCC) برای دوره مشابه، استخراج شده‌اند. ارزیابی هماهنگی و میزان توافق بین این شاخص‌ها از طریق آزمون‌های همبستگی خطی پیرسون، کاپای کوهن وزن دار و نمودار بلند - آلتمن انجام گرفته است. نتایج نشان داد که همبستگی قوی و توافق زیاد بین شاخص مبتنی بر داده‌های شبکه‌ای و ایستگاهی در اکثر ایستگاه‌های منطقه جنوب شرق ایران برقرار بوده است. به طور کلی، میزان همبستگی از مقیاس‌های کوتاه‌تر (۱ و ۳ ماهه) به مقیاس‌های بلندتر (۶، ۹ و ۱۲ ماهه) افزایشی بوده است. به عنوان یک رهیافت اصلی، می‌توان بیان کرد که شاخص استاندارد شده بارش شبکه‌ای در مقیاس‌های بلندمدت (۶، ۹ و ۱۲ ماهه) در اکثر ایستگاه‌های جنوب شرق ایران، جایگزین مناسب و قابل اعتمادی برای داده‌های ایستگاهی در پایش خشکسالی است. با این حال، در مقیاس‌های کوتاه‌مدت (۱ و ۳ ماهه) و به‌ویژه در ایستگاه‌های فراخشک مانند بم و زابل، توافق در سطح متوسط بوده و جایگزینی نیازمند احتیاط و ارزیابی تکمیلی است.

واژه‌های کلیدی: شاخص استاندارد شده بارش، کاپای کوهن وزن دار، ضریب همبستگی پیرسون، نمودار بلند - آلتمن.

در دو سده اخیر بروز پدیده گرمایش جهانی و تغییرات اقلیمی ناشی از فعالیت‌های انسانی باعث افزایش وقوع و شدت رخدادهای حدی از جمله خشکسالی در سطح جهان شده است (Ghazi *et al.*, 2025). خشکسالی به دلیل شروع آهسته و تأثیرات بلندمدت آن به عنوان یکی از پیچیده‌ترین بلایای طبیعی شناخته می‌شود (Yildırım & Aşık, 2018) که اثرات آن بر کشاورزی، اکوسیستم و اقتصاد در مناطق مختلف در تحقیقات متعددی گزارش شده است (Alawsi *et al.*, 2022). تفاوت این پدیده با سایر بلایای طبیعی در این است که این پدیده به تدریج و در یک دوره‌ی زمانی نسبتاً طولانی عمل می‌کند، به‌طوری‌که اثرات آن پس از چند سال و با تأخیر بیشتری نسبت به سایر حوادث طبیعی ظاهر می‌شود. تعیین تاریخ دقیق آغاز و پایان خشکسالی‌ها هرگز امکان‌پذیر نیست (Keyantash and Dracup, 2002)، زیرا ویژگی‌های و مشخصه‌های خشکسالی (شدت، فراوانی) ممکن است با گذشت زمان در اثر تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی دچار تغییر شوند (Nazaripour *et al.*, 2022). این مسئله اهمیت پایش خشکسالی، به منظور پیش‌بینی احتمال رخداد آن در آینده را نشان می‌دهد (Firat *et al.*, 2021; Khayat *et al.*, 2026). با پایش وضعیت رطوبتی و تغییرپذیری بارش در دوره حال، می‌توان به مدیریت این پدیده و برقراری آمادگی جهت کاهش اثرات و شدت خسارات آن در سطوح مختلف جامعه کمک و راهکارهایی برای سازگاری و کاهش آسیب‌پذیری سیستم‌های منابع آب هر منطقه با پیشامدهای محتمل به دست آورد (Ojha *et al.*, 2021)؛ لذا پایش خشکسالی یکی مهم‌ترین عوامل در مدیریت خشکسالی است و عبارت است از سامانه‌ای که به‌وسیله آن می‌توان پارامترهای اقلیمی و هیدرولوژیک و تغییرات آن‌ها را به‌طور پیوسته دیده‌بانی و احتمال وقوع، شدت و وسعت تحت پوشش خشکسالی را برآورد کرد (Zambrano *et al.*, 2016). برای توصیف و پایش خشکسالی، شاخص‌های اقلیمی مختلفی توسعه یافته است. از معمول‌ترین این شاخص‌ها می‌توان به شاخص شدت خشکسالی کشاورزی پالمر^۱، شاخص استاندارد شده بارش^۲ و شاخص استاندارد شده بارش - تبخیر و تعرق^۳ که به طور گسترده‌تری نسبت به بقیه شاخص‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد، اشاره نمود (Poodineh *et al.*, 2026; Zargar *et al.*, 2024; Rahnama *et al.*, 2024; 2011). شاخص استاندارد شده بارش که توسط مک‌کی و همکاران در سال ۱۹۹۳، در دانشگاه کلرادو توسعه یافته است (Mckee *et al.*, 1993)، صرفاً برپایه داده بارش عمل می‌کند. این ویژگی که استفاده از آن را بسیار ساده و محاسبه‌اش را آسان می‌کند، در عین حال به دلیل نقش بنیادین و محوری بارش در شکل‌گیری خشکسالی‌های هواشناسی، یک مزیت کلیدی محسوب می‌شود. زیرا، کمبود بارش، بنیادی‌ترین و شهودی‌ترین معیار برای تعریف خشکسالی است. به همین دلیل، سازمان جهانی هواشناسی^۴، در سال ۲۰۰۹، این شاخص را به عنوان شاخص اصلی خشکسالی هواشناسی برای استفاده کشورها توصیه کرده است. مزیت دیگر این شاخص، قابلیت محاسبه آن در مقیاس‌های زمانی متعدد است. این ویژگی انعطاف‌پذیری بالایی به آن می‌دهد، به طوری که می‌توان از آن برای پایش انواع خشکسالی در مقیاس‌های زمانی مختلف استفاده کرد (Engdaw *et al.*, 2022; Mwape *et al.*, 2025). با این حال، این شاخص تنها کمبود بارش را مدنظر قرار می‌دهد و تأثیر دما و تبخیر و تعرق را نادیده می‌گیرد (Vicente-Serrano *et al.*, 2010)؛ بنابراین در شرایط تغییر اقلیم و گرمایش زمین که دما نقشی فزاینده در تشدید خشکی ایفا می‌کند، این یک محدودیت مهم محسوب می‌شود (Singh *et al.*, 2020). به همین دلیل شاخص استاندارد شده بارش - تبخیر و تعرق، به عنوان جایگزینی حساس به دما توسعه یافته است (Helmi & Shahidi, 2023). محاسبه شاخص استاندارد شده بارش - تبخیر و تعرق، نیازمند داده‌های بلندمدت و با کیفیت تبخیر و تعرق است که خود به پارامترهای متعددی مانند دما، رطوبت نسبی، سرعت باد و غیره وابسته است. در بسیاری از مناطق، به‌مانند مناطق جنوب شرق ایران، دسترسی به این داده‌ها با محدودیت‌های جدی مواجه است.

با وجود این محدودیت نظری، شاخص استاندارد شده بارش، همچنان در میان پژوهشگران و سازمان‌های پایش خشکسالی از اقبال بسیار بالایی برخوردار است. دلیل اصلی این امر، دسترسی دشوار، پرهزینه و گاه غیرممکن به داده‌های باکیفیت تبخیر و تعرق در بسیاری از مناطق جهان، به ویژه کشورهای در حال توسعه و مناطق با ایستگاه‌های هواشناسی محدود، است. در مقابل،

¹ Palmer Drought Severity Index (PDSI)

² Standardized Precipitation Index (SPI)

³ Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)

⁴ World Meteorological Organization

داده‌های بارش به‌عنوان ابتدایی‌ترین پارامتر هواشناسی، در اغلب ایستگاه‌ها با پوشش زمانی بلندمدت و کیفیت قابل قبول در دسترس هستند. این مزیت عملی باعث شده است که حتی در مناطقی با پوشش کامل داده، پژوهشگران ترجیح دهند به جای درگیر شدن با پیچیدگی‌های محاسباتی و عدم قطعیت‌های مدل‌های تبخیر و تعرق، از شاخص ساده و قابل اعتماد، شاخص استاندارد شده بارش، استفاده کنند (Singh et al., 2023; Delghandi et al., 2023). به عبارت دیگر، شاخص استاندارد شده بارش، نه به دلیل برتری نظری، بلکه به دلیل کاربردپذیری و در دسترس بودن داده‌های آن همچنان به عنوان پُرکاربردترین شاخص خشکسالی در مطالعات جهانی شناخته می‌شود (Carbone et al., 2018).

محاسبه شاخص استاندارد شده بارش در سطح ایستگاه‌های هواشناسی نیازمند داده‌های بارش ماهانه با دقت زمانی بالاست. در مناطق گسترده و کم‌برخوردار با تنوع اقلیمی زیاد، محدودیت دسترسی به داده‌های ایستگاهی بلندمدت و یکنواخت، چالشی جدی در پایش دقیق شرایط خشکسالی ایجاد می‌کند؛ بنابراین، استفاده از داده‌های شبکه‌بندی شده جهانی که مبتنی بر تلفیق داده‌های سنجش از دور، مدل‌های عددی و داده‌های اندازه‌گیری شده هستند، می‌توانند جایگزینی مناسب برای نواحی فاقد داده‌های کافی باشند. جنوب شرق ایران نیز از این قاعده مستثنی نیست؛ این منطقه با وسعتی حدود یک‌چهارم کشور، از تنوع توپوگرافی و اقلیمی گسترده برخوردار بوده، اما شبکه ایستگاهی آن پراکنده بوده و داده‌های بارش بلندمدت و همگن در بسیاری از نقاط آن در دسترس نیست. این کمبود داده، پایش دقیق خشکسالی را با چالش جدی مواجه کرده است. در سال‌های اخیر، پایگاه‌های داده شبکه‌ای جهانی که از تلفیق مشاهدات ایستگاهی، مدل‌های عددی و داده‌های سنجش از دور تولید می‌شوند، به‌عنوان جایگزین یا مکمل داده‌های ایستگاهی مورد توجه قرار گرفته‌اند. پایگاه شبکه‌بندی شاخص خشکسالی SPI که بر پایه داده‌های بارش GPCC بنا شده است، یکی از این منابع است که شاخص استاندارد شده بارش را در مقیاس‌های زمانی مختلف ارائه می‌دهد.

ممکن است دقت این پایگاه‌های داده در مناطق مختلف، خصوصاً در اقلیم‌های خشک، نیمه‌خشک، و کوهستانی متفاوت باشد؛ لذا ارزیابی عملکرد شاخص‌های منتج از پایگاه‌های شبکه‌بندی شده نسبت به شاخص‌های محاسباتی در سطح ایستگاه‌ها، گامی ضروری جهت اطمینان از میزان همبستگی، توافق و عملکرد این شاخص‌ها در پایش خشکسالی می‌باشد. برای ارزیابی پایگاه‌های جهانی بارش شبکه‌بندی شده در سالیان اخیر تحقیقاتی انجام شده است (Imran et al., 2023; Satge et al., 2020). در سال‌های اخیر، ارزیابی پایگاه‌های داده ماهواره‌ای و شبکه‌بندی شده متعددی برای پایش خشکسالی در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران انجام شده است. کاظم‌زاده و همکاران (۲۰۲۲) عملکرد چندین پایگاه داده بارش (CHIRPS, TRMM TMPA 3B43 v7 و PERSIANN-CDR) را در تشخیص خشکسالی در اقلیم‌های مختلف ایران ارزیابی کرده‌اند. نتایج آن‌ها نشان داده است که TRMM TMPA 3B43 v7 و PERSIANN-CDR در مناطق خشک عمدتاً بیش‌برآورد و CHIRPS کم‌برآورد دارد. همچنین، ضریب همبستگی ماهانه این محصولات با داده‌های ایستگاهی در اقلیم‌های خشک تنها ۰/۳ بوده، درحالی‌که این مقدار در اقلیم‌های مرطوب به ۰/۶ می‌رسد. TRMM TMPA 3B43 v7 و PERSIANN-CDR در تشخیص رخداد‌های خشکسالی در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک عملکرد بهتری نسبت به CHIRPS نشان داده‌اند (Kazemzadeh et al., 2022). کیخسروی‌کیانی و همکاران (۲۰۲۵) نیز کاربرد سه محصول بارش ماهواره‌ای (GPM IMERG, CMORPH و PDIR-Now) را در پایش خشکسالی در جنوب غرب ایران بررسی نموده‌اند. نتایج آن‌ها نشان داده است که GPM IMERG بهترین عملکرد را در پایش خشکسالی داشته، اما CMORPH در مناطق مرتفع کم‌برآوردی قابل ملاحظه‌ای را نشان می‌دهد (Keikhsoravi et al., 2025). در مطالعه دیگر، قابلیت کاربرد محصولات ماهواره‌ای و بازتحلیل شده بارش با مقیاس ماهانه برای پایش خشکسالی در شمال شرق ایران ارزیابی شده است. در این مطالعه چهار محصول شامل GPM IMERG, PERSIANN-CDR, TRMM TMPA 3B43 v7 و ERA5 با داده‌های بلندمدت بارش ماهانه مشاهداتی از نظر سوگیری سیستماتیک و مهارت پیش‌بینی مقایسه شده‌اند. نتایج نشان داده است که محصولات GPM IMERG و TRMM TMPA 3B43 v7 در تشخیص رویدادهای خشکسالی، عملکرد بهتری داشته‌اند (Shirmohammadi-Aliakbarkhani et al., 2025). با هدف بهبود دقت داده‌های بارش ماهواره‌ای و بازتحلیل در جنوب غرب ایران، تعداد ۵ مجموعه بارش (PERSIANN-CDR, ERA5, CRU و NCEP CFSR, APHRODITE) ارزیابی شده‌اند. خروجی بارش مجموعه داده پنج‌گانه با هدف کاهش خطای تخمین بارش، تلفیق شده و نتایج بیانگر کاهش قابل ملاحظه خطا بوده است؛ بنابراین استفاده از داده‌های تلفیقی، راهکاری مناسب برای

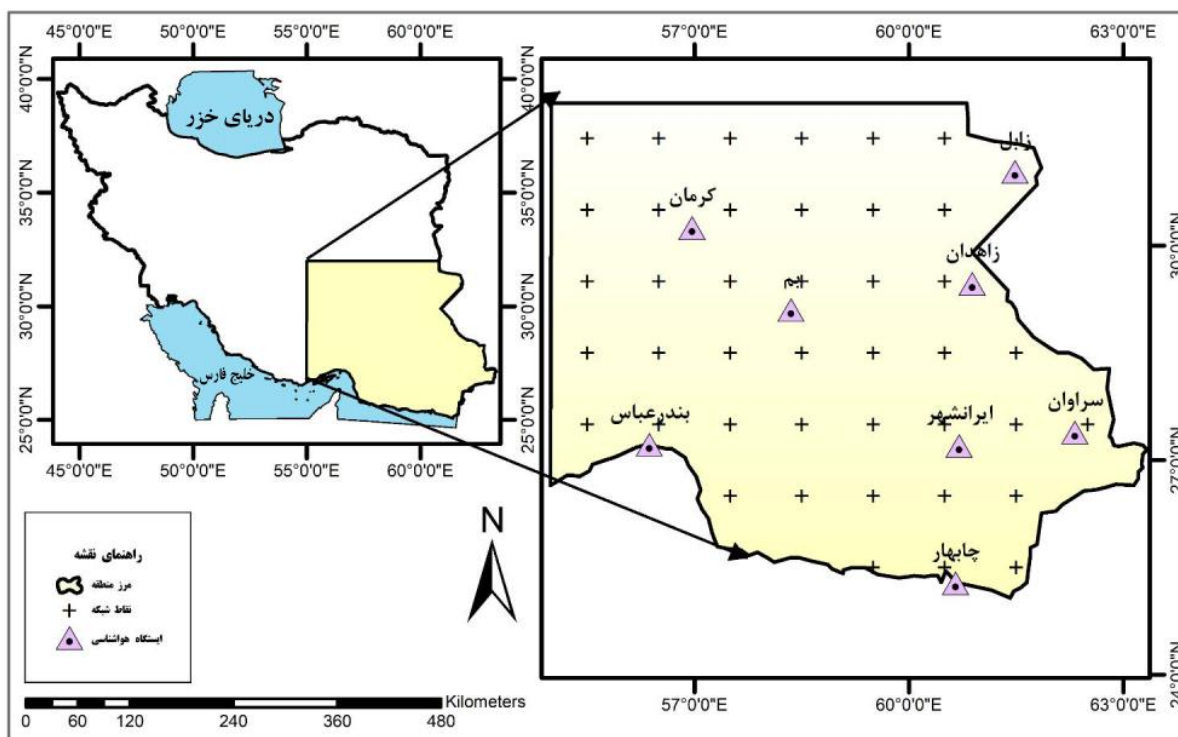
کاهش خطا و افزایش دقت پیشنهاد شده است (Jafarpour *et al.*, 2022). لشکری و همکاران (۲۰۱۸) نیز عملکرد چهار محصول بارش شبکه‌بندی‌شده (AgMERRA و APHRODITE, PERSIANN, TRMM) را در پیش‌بینی عملکرد گند دیم در اقلیم شمال شرق ایران بررسی نموده‌اند. نتایج آن‌ها نشان داده است که AgMERRA و APHRODITE بالاترین ضریب همبستگی و شاخص توافق را با داده‌های ایستگاهی داشته‌اند و شبیه‌سازی عملکرد دانه گندم با استفاده از این داده‌ها، همبستگی بالایی با شبیه‌سازی مبتنی بر داده‌های مشاهده‌ای نشان داده است (Lashkari *et al.*, 2018).

با این حال، این مطالعات عمدتاً بر محصولات ماهواره‌ای متمرکز بوده‌اند و پایگاه‌های داده ترکیبی که از تلفیق مشاهدات ایستگاهی، مدل‌های عددی و داده‌های سنجش از دور تولید می‌شوند، کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. پایگاه داده SPIbase برپایه داده‌های بارش GPCC بنا شده که یک محصول شبکه‌بندی‌شده مبتنی بر تلفیق داده‌های ایستگاهی و ماهواره‌ای است و ماهیت آن را محصولات صرفاً ماهواره‌ای متفاوت می‌باشد. تاکنون، ارزیابی اختصاصی دقت SPIbase در منطقه جنوب شرق ایران انجام نشده است. این منطقه دارای بالاترین تنوع توپوگرافی و اقلیمی در ایران است و شامل ایستگاه‌های فراخشی مانند بم، زابل و زاهدان می‌باشد که شرایط اقلیمی آن‌ها با سایر مناطق کشور تفاوت اساسی دارد؛ بنابراین، ارزیابی اختصاصی SPIbase با تمرکز بر منطقه جنوب شرق ایران، شکاف دانشی مهمی را پر می‌کند و می‌تواند مبنایی برای کاربرد مطمئن این پایگاه در پایش خشکسالی در یکی از خشک‌ترین و کم‌داده‌ترین مناطق کشور فراهم آورد؛ بنابراین، شکاف دانش در زمینه ارزیابی دقت پایگاه‌های داده جهانی خشکسالی در مناطقی به مانند جنوب شرق ایران، اصلی‌ترین هدف انجام این پژوهش به شمار می‌رود. از این رو، هدف غایی این پژوهش، ارزیابی قابلیت اطمینان به پایگاه شبکه‌ای شاخص استاندارد شده بارش در بازتاب شرایط واقعی خشکسالی در جنوب شرق ایران است.

مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه

جنوب شرق ایران (شکل ۱) با مساحت ۴۳۵۷۶۷ کیلومترمربع، حدود ۲۶/۴۴ درصد از مساحت ایران را شامل می‌شود که از ۵۵ درجه طول شرقی تا مرز بین‌المللی در شرق سو و از ۳۲ درجه عرض شمالی تا مرز خط ساحلی در سواحل خلیج فارس و خلیج عمان در جنوب سو را شامل می‌گردد. این تعریف در مطالعات پیشین نیز برای اشاره به این پهنه به کار رفته است (Vazirimehr *et al.*, 2022; Nazaripour *et al.*, 2022). این بخش که شامل یک چهارم از گستره ایران می‌باشد دارای توپوگرافی متنوعی می‌باشد. دشت‌های وسیع و فرونشست‌های بزرگ مانند بیابان لوت و چاله جازموریان با کمترین ارتفاع تا ارتفاعات مرکزی نظیر هزار و لاله‌زار و همچنین ارتفاعات شرقی مانند تفتان و بزمان با بیشینه ارتفاع را در درون خود جای دارد (Vazirimehr *et al.*, 2022). علاوه بر تنوع توپوگرافی، به دلیل تأثیرپذیری از الگوهای اقلیمی متفاوت، دارای پیچیدگی‌های اقلیمی نیز می‌باشد. پیچیدگی‌های اقلیمی این منطقه عمدتاً حاصل تأثیرپذیری هم‌زمان از دو الگوی بزرگ مقیاس جوی، شامل بادهای غربی عرض میانه و مونسون جنوب شرقی می‌باشد. علیرغم این تنوع، اقلیم غالب منطقه به عنوان گرم و خشک شناخته می‌شود. این ویژگی‌های توپوگرافی و اقلیمی، منطقه را به یکی از پیچیده‌ترین و در عین حال آسیب‌پذیرترین نواحی ایران از نظر منابع آبی و مخاطرات اقلیمی تبدیل کرده است (Nazaripour *et al.*, 2022; Farzaneh *et al.*, 2021). دورنمای آینده نشان می‌دهد که جنوب شرق ایران در آینده نزدیک خشکسالی‌های شدیدتری را تجربه خواهد کرد و اجرای فوری استراتژی‌های مدیریتی مؤثر در بخش‌هایی مانند کشاورزی، آب و انرژی را ضروری می‌سازد (Shoja *et al.*, 2025; Barahooie *et al.*, 2025).



شکل ۱. محدوده جنوب شرق ایران و موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه

Fig 1. Location map of the study area and selected meteorological stations

داده‌ها

داده‌های مورد استفاده در پژوهش حاضر شامل دو نوع داده می‌باشد. (۱) سری‌های زمانی مجموع بارندگی ماهانه از تعداد ۸ ایستگاه هواشناسی همدید در دوره آماری ۱۹۸۶ تا ۲۰۲۴ که از سازمان هواشناسی کشور اخذ شده و برای محاسبه شاخص استاندارد شده بارش استفاده می‌گردد. این دوره زمانی بلندترین بازه زمانی برای داده بارش ثبت شده در ایستگاه‌های هواشناسی در منطقه مورد مطالعه است. اطلاعات مربوط به ایستگاه‌ها در جدول (۱) و موقعیت جغرافیایی آن‌ها در شکل (۱) نمایش داده شده است. (۲) دسته دوم داده‌ها، شامل داده‌های شبکه‌بندی شاخص استاندارد شده بارش است. این پایگاه داده جهانی، اطلاعات بلندمدتی درباره خشکسالی در مقیاس جهانی با قدرت تفکیک یک درجه قوسی را ارائه می‌دهد. این پایگاه داده دارای ویژگی چند مقیاسی بوده و مقیاس‌های زمانی را بین ۱ تا ۷۲ ماه ارائه می‌کند. این داده‌ها بر اساس اطلاعات ماهانه بارندگی از داده‌های بارش مرکز اقلیم‌شناسی بارش جهانی^۵ محاسبه شده است. شاخص استاندارد شده بارش شبکه‌ای در دو نسخه داده با توزیع گاما و پیرسون در این پایگاه داده موجود می‌باشد که در این پژوهش از نسخه توزیع گاما متناسب با داده‌های ایستگاهی، استفاده می‌شود. این پایگاه داده، به صورت دسترسی آزاد در پیوند (<https://www.ncei.noaa.gov/pub/data/nidus/gpcc/spi->) قابل دستیابی است. این پایگاه داده، یک محصول جهانی و شبکه‌ای از شاخص استاندارد شده بارش است که توسط مرکز ملی اطلاعات محیطی سازمان ملی اقیانوسی و جوی ایالات متحده^۶، تولید و منتشر می‌گردد. برای استخراج یاخسته‌های موجود برای منطقه مورد مطالعه این پژوهش (شکل ۱) با بهره‌گیری از تابع inpolygon در محیط برنامه‌نویسی متلب، اقدام شده و یک ریزپایگاه داده به ابعاد $SPI_{468 \times 41}$ ایجاد گردیده است. در این پایگاه داده، سطرها بیانگر زمان و ستون‌ها بیانگر سلول (مکان) می‌باشند. مقیاس‌های ۱، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه از شاخص استاندارد شده بارش شبکه‌ای متناظر با شاخص استاندارد شده بارش ایستگاهی انتخاب گردیده‌اند. محاسبه شاخص استاندارد شده بارش شبکه‌ای برای موقعیت هر یک از ایستگاه‌های هواشناسی با میانگین نقاط شبکه‌ای پیرامون ایستگاه‌های هواشناسی انجام شده است. برای این منظور از قاعده وزن‌دهی عکس فاصله

⁵ Global Precipitation Climatology Centre

⁶ NOAA/NCEI

استفاده شده است؛ به گونه‌ای که یاخته‌های نزدیک‌تر به موقعیت ایستگاه هواشناسی، از وزن بیشتری برخوردار باشند. علاوه بر این، ملاحظات هیدرواقليمی و شرایط توپوگرافی نیز در تعداد یاخته‌های تأثیرگذار بوده است (Poodineh et al., 2026). حداقل تعداد یاخته‌های مشارکت‌کننده ۴ و حداکثر ۸ تعیین گردیده است. وزن هر یاخته برابر با عکس مجذور فاصله اقلیدسی ($w_i = 1 / d_i^2$) آن از موقعیت ایستگاه هواشناسی در نظر گرفته شده و سپس نرمال گردیده است. در صورتی که تعداد یاخته‌ها کمتر از حداقل بود، با افزایش شعاع تأثیر، حداقل تعداد یاخته‌ها تأمین شد. معیارهای توپوگرافی و هیدرواقليمی نیز به صورت زیر اعمال شدند: (۱) یاخته‌هایی که دارای اختلاف ارتفاع بیش از حد (بیش از ۵۰۰ متر) با ایستگاه هواشناسی بود، حذف شدند؛ (۲) در موقعیت‌های کوهستانی، اولویت با یاخته‌های هم‌ارتفاع بود تا شعاع تأثیر. در حالی که در موقعیت‌های مکانی هموار، برای جلوگیری از هموارسازی بیش از حد، شعاع تأثیر محدودتر اعمال گردید.

جدول ۱. مشخصات اقلیمی و ارتفاعی ایستگاه‌های هواشناسی در منطقه مورد مطالعه

ردیف ایستگاه	نام ایستگاه	ارتفاع (متر بالاتر از سطح دریای آزاد)	بارش (میلی‌متر)	دما (سلسیوس)
Station No.	Station Name	Elevation (m a.s.l.)	Precipitation (mm)	Temperature (°C)
1	بم Bam	1066.9	53.70	24.15
2	بندرعباس Bandar Abbas	9.8	161.9	27.16
3	چابهار Chabahars	8	122.8	26.54
4	زابل Zabol	489.2	50.92	22.87
5	سراوان Saravan	1182	108	22.39
6	ایران‌شهر Iranshahr	591.1	106	27.20
7	کرمان Kerman	1754	124.14	16.55
8	زاهدان Zahedan	1370	74.46	19.10

لازم به ذکر است که داده‌های SPIbase به عنوان یک محصول شبکه‌بندی شده، وابسته به عدم قطعیت داده‌های پایه بارش GPCC، روش‌های درون‌یابی و برازش توزیع احتمال است؛ بنابراین تفکیک کمی این عدم قطعیت‌ها در چارچوب این پژوهش امکان‌پذیر نمی‌باشد.

روش‌شناسی

شاخص استاندارد شده بارش

شاخص استاندارد شده بارش (SPI)، یک شاخص پُرکاربرد برای ارزیابی خشکسالی هواشناختی در مقیاس‌های زمانی مختلف (مانند ۳، ۶، ۱۲، ۱۸ و ۲۴ ماهه) است. روش محاسبه این شاخص در مراحل زیر تشریح شده است:

۱- به ازای مقیاس زمانی مشخص a ، بارش تجمعی ماه n م در سال‌های مختلف، به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$x_a^n(t) = \sum_{i=j-a+1}^j x(i), j = 12(t-1) + n \quad (1)$$

در این جا، x ثبت بارش ماهانه از سال های N ، t شاخص سالانه (از ۱ تا N)، و n یک ماه مشخص (ژانویه، فوریه و غیره تا دسامبر) است.

۲- سپس سری های بارش تجمعی توسط یک تابع چگالی احتمال برازش می شوند که در آن توزیع گاما برای مطالعه جاری مدنظر قرار دارد و توسط رابطه (۲) نمایش داده می شوند.

$$f(x_a^n | \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma^\mu \Gamma(\mu)} (x_a^n)^{\mu-1} e^{-\frac{x_a^n}{\sigma}}, \quad x_a^n > 0 \quad (2)$$

۳- سپس احتمال تجمعی یک رویداد بارش معین، برای یک مقیاس زمانی و ماه مشخص، تعیین می گردد. مقدار شاخص استاندارد شده بارش (SPI)، با استفاده از رابطه (۳) و با تبدیل توزیع احتمال تجمعی به توزیع نرمال استاندارد با میانگین صفر و واریانس یک، به دست می آید:

$$x_k = \varphi^{-1}(k) \quad (3)$$

که در آن، x_k نشان دهنده چندک احتمال تجمعی k و φ^{-1} تابع معکوس از توزیع احتمال تجمعی برای یک توزیع نرمال φ است. طبقه بندی خشکسالی مبتنی بر شاخص استاندارد شده بارش (SPI)، در جدول (۲) ارائه شده است (Santos et al., 2018).

جدول ۲. توزیع احتمال شاخص استاندارد شده بارش و طبقه بندی خشکسالی
Table 2. Probability distribution of SPI and drought classification

احتمال (درصد) Probability (%)	رده خشکسالی Drought Category	رده ترتیبی Ordinal Category	مقادیر شاخص SPI Value
2.28%	ترسالی بسیار شدید Extreme Wet	8	≥ 2.0
4.41%	ترسالی شدید Sever Wet	7	$1.5 \leq SPI < 2.0$
9.18%	ترسالی متوسط Moderate Wet	6	$1.0 \leq SPI < 1.5$
34.13%	ترسالی خفیف Mild Wet	5	$0.0 \leq SPI < 1.5$
34.13%	خشکسالی خفیف Mild Drought	4	$0.0 > SPI > -1.0$
9.18%	خشکسالی متوسط Moderate Drought	3	$-1.0 \geq SPI > -1.5$
4.41%	خشکسالی شدید Severe Drought	2	$-1.5 \geq SPI > -2.0$
2.28%	خشکسالی خیلی شدید Extreme Drought	1	≥ -2.0

ارزیابی هماهنگی بین شاخص استاندارد شده بارش ایستگاهی و شبکه ای

آزمون رابطه خطی بین شاخص استاندارد شده بارش ایستگاهی و شبکه ای با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون انجام شده است. ضریب همبستگی پیرسون، رایج ترین تکنیک آماری است که برای نشان دادن میزان همبستگی قوی جفت متغیرها به کار گرفته می شود. دامنه این ضریب همبستگی بین $+1$ (رابطه خطی مثبت کامل) تا -1 (رابطه خطی منفی کامل) متغیر است. ارزش صفر بیانگر عدم وجود هرگونه رابطه خطی بین متغیرها می باشد (Adler & Parmryd., 2010). استفاده از ضریب

همبستگی پیرسون برای توصیف میزان توافق بین متغیرها می‌تواند گمراه کننده باشد. از این رو، در مطالعه جاری، ضریب همبستگی پیرسون صرفاً برای آزمون قدرت و جهت رابطه مورد استفاده قرار گرفته است. عبارت ریاضی ضریب همبستگی پیرسون که با r نشان داده می‌شود بین شاخص شاخص استاندارد شده بارش ایستگاهی و شبکه‌ای که به ترتیب با متغیرهای X و Y نشان داده شده‌اند به صورت رابطه ۴ است:

$$r = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2 \sum (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (4)$$

که در آن، X_i و Y_i به ترتیب نشان‌دهنده داده‌های مربوط به متغیرهای شاخص استاندارد شده بارش ایستگاهی و شبکه‌ای می‌باشند. $\bar{X}$ و $\bar{Y}$ به ترتیب میانگین متغیرهای شاخص استاندارد شده بارش ایستگاهی و شبکه‌ای می‌باشند. صورت کسر نمایانگر کواریانس بین شاخص استاندارد شده بارش ایستگاهی و شبکه‌ای بوده که میزان تغییرات همزمان این دو متغیر را اندازه‌گیری می‌کند. مخرج کسر نیز حاصل ضرب انحراف معیارهای دو شاخص استاندارد شده بارش ایستگاهی و شبکه‌ای بوده که نشانگر پراکندگی هر متغیر به صورت جداگانه می‌باشد.

جدول ۳. تفسیر مقادیر ضریب همبستگی پیرسون

Table 3. Interpretation of Pearson Correlation Coefficient values

قدر مطلق مقدار ضریب همبستگی Range of absolute correlation coefficient	سطح همبستگی Strength of Correlation
$0 \leq r < 0.1$	همبستگی بسیار ضعیف (بدون رابطه) Very weak correlation (No correlation)
$0.1 \leq r < 0.30$	همبستگی ضعیف weak correlation
$0.30 \leq r < 0.50$	همبستگی متوسط Moderate correlation
$0.50 \leq r < 0.70$	همبستگی نسبتاً قوی Fairly strong correlation
$0.70 \leq r < 0.90$	همبستگی قوی Strong Correlation
$0.90 \leq r \leq 1.00$	همبستگی بسیار قوی Very Strong Correlation

ارزیابی توافق بین شاخص استاندارد شده بارش ایستگاهی و شبکه‌ای

آزمون توافق بین شاخص استاندارد شده بارش ایستگاهی و شبکه‌ای با ضریب کاپای کوهن وزن دار و نمودار بلند - آلتمن انجام شده است. آماره کاپای کوهن وزن دار با داده‌های ترتیبی یا اسمی به خوبی عمل می‌کند؛ بنابراین، مقادیر پوستره هر یک از روش‌های ارزیابی (شاخص شاخص استاندارد شده بارش ایستگاهی و شبکه‌ای) به داده‌های ترتیبی با ۸ طبقه تبدیل شده‌اند که در جدول (۲) ارائه شده است. سپس، داده‌های تبدیل شده هر روش سنجش برای محاسبه میزان توافق با استفاده از آماره کاپای کوهن وزن دار به کار گرفته شده است. برخلاف کاپای ساده که تمامی عدم توافقات را به یک اندازه در نظر می‌گیرد، کاپای وزن دار با اختصاص وزن‌های متفاوت به درجات مختلف عدم توافق، شدت انحراف بین طبقات را نیز در محاسبه لحاظ می‌کند. این ویژگی برای متغیرهای ترتیبی مانند طبقات خشکسالی که فاصله بین آن‌ها از نظر معنایی یکسان نیست، مناسب‌تر بوده و تخمین واقع‌بینانه‌تری از میزان توافق ارائه می‌دهد (Warrens., 2013).

چنانچه فرض شود r بیانگر تعداد طبقات و $\pi_{ij} = (i, j = 1, 2, \dots, r)$ بیانگر نسبت آزمودنی‌های باشد که به ترتیب توسط ارزیاب اول در طبقه i و ارزیاب دوم در طبقه j طبقه‌بندی شده باشند؛ آن‌گاه، کاپای کوهن غیروزی (ساده) از طریق زیر محاسبه می‌گردد:

$$\kappa = \frac{O - E}{1 - E} = \frac{\sum_{i=1}^r \pi_{ii} - \sum_{j=1}^r \pi_j + \pi + j}{1 - \sum_{j=1}^r \pi_j + \pi + j} \quad (5)$$

که در آن، $O = \sum_{i=1}^r \pi_{ii}$ توافق مشاهده شده نسبی بین ارزیاب‌ها و $E = \sum_{j=1}^r \pi_j + \pi + j$ احتمال فرضی توافق شانسی است. اما چنانچه، فرض شود w_{ij} یک وزن مربعی $w_{ij}^q = 1 - \frac{(i-j)^2}{(r-1)^2}$ یا یک وزن خطی $w_{ij}^l = 1 - \frac{|i-j|}{|r-1|}$ باشد، کاپای وزن‌دار معمولاً به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\kappa_w = \frac{O_w - E_w}{1 - E_w} = \frac{\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r w_{ij} \pi_{ii} - \sum_{j=1}^r \sum_{i=1}^r w_{ij} \pi_i + \pi + j}{1 - \sum_{j=1}^r \sum_{i=1}^r w_{ij} \pi_i + \pi + j} \quad (6)$$

که در آن، $O_w = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r w_{ij} \pi_{ii}$ توافق مشاهده شده وزن‌دار بین ارزیاب‌ها و $E_w = \sum_{j=1}^r \sum_{i=1}^r w_{ij} \pi_i + \pi + j$ توافق مورد انتظار وزن‌دار است. چنانچه تعداد طبقات (r) برابر ۲ باشد، کاپای ساده، کاپای خطی و کاپای مربعی در آن صورت هم‌مقدار (برابر) می‌شوند (Khalil, 2026). مقادیر کاپا معمولاً از -۱ تا +۱ متغیر است. مقادیر بالای کاپا نشان‌دهنده سطوح توافق قوی‌تر است. هنگامی که کاپا برابر با ۱ باشد، توافق کامل وجود دارد؛ کاپای برابر با صفر نشان می‌دهد که توافق به اندازه‌ای است که صرفاً بر اساس شانس انتظار می‌رود؛ و کاپای کمتر از صفر بیانگر توافقی ضعیف‌تر از حد مورد انتظار بر اساس شانس است؛ این حالت به ندرت رخ می‌دهد (جدول ۴).

جدول ۴. تفسیر مقادیر آماره کاپای کوهن وزن‌دار

Table 4. Interpretation Cohen's weighted kappa

سطح توافق	مقادیر کاپا
Level of agreement	Kappa value
کمتر از شانس توافق	$\kappa < 0$
Less than chance agreement	
توافق اندک	$0 \leq \kappa < 0.20$
Slight agreement	
توافق نسبی	$0.20 \leq \kappa < 0.40$
Fair agreement	
توافق متوسط	$0.40 \leq \kappa < 0.60$
Moderate agreement	
توافق زیاد	$0.60 \leq \kappa < 0.80$
Substantial agreement	
توافق تقریباً کامل	$0.80 \leq \kappa < 1.00$
Near perfect agreement	
توافق کامل	1
Perfect agreement	

نمودار بلند - آلتمن که از آن با عنوان نمودار اختلاف یا تفاوت نیز یاد می‌شود، یک روش گرافیکی به منظور مقایسه دو اندازه‌گیری بوده و بینشی در مورد سطح توافق میان روش‌ها فراهم می‌کند. در این نمودار، تفاوت بین جفت مقادارها بر روی محور y در برابر میانگین همان جفت مقادارها بر روی محور x نمایش داده می‌شود (Bland and Altman, 1986). این نمودار حدود توافق را تعیین می‌کند و با محاسبه میانگین و انحراف معیار تفاوت‌ها، میزان توافق میان دو اندازه‌گیری کمی را به صورت عددی بیان می‌کند؛ موضوعی که به درک دامنه توافق بین روش‌ها کمک می‌کند (Watson and Petrie, 2010). مراحل تولید نمودار بلند - آلتمن با جایگزینی x و y به ترتیب با شاخص استاندارد شده بارش ایستگاهی و شبکه‌ای به شرح زیر است:

(۱) محاسبه اختلاف بین دو اندازه‌گیری برای هر آزمودنی:

$$d_i = X_i - Y_i \quad (7)$$

که در آن، X_i و Y_i اندازه‌گیری‌های حاصل از دو روش مختلف برای موضوع i می‌باشند که به ترتیب شاخص استاندارد شده

بارش ایستگاهی و شبکه‌ای هستند.

(۲) محاسبه میانگین هر دو اندازه‌گیری برای هر موضوع:

$$\bar{M}_i = \frac{X_i + Y_i}{2} \quad (۸)$$

(۳) رسم اختلاف‌ها ($d_i = X_i - Y_i$) روی محور Y و در مقابل میانگین ($\bar{M}_i = (X_i + Y_i)/2$) روی محور X .

(۴) محاسبه میانگین اختلاف یا آریبی:

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i \quad (۹)$$

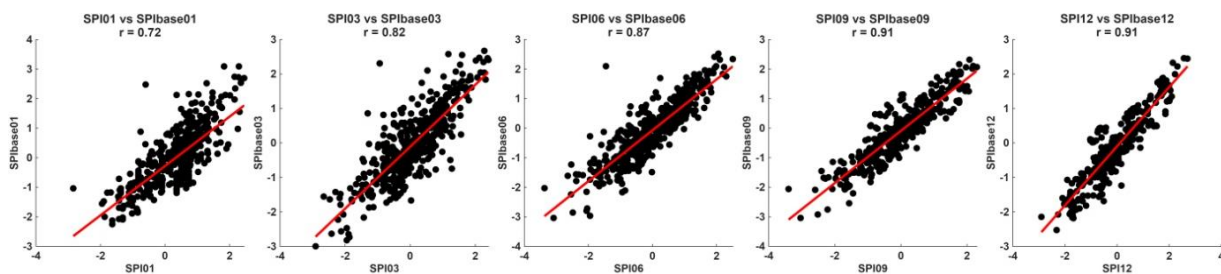
(۵) محاسبه انحراف معیار اختلاف‌ها:

$$S_d = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2} \quad (۱۰)$$

(۶) محاسبه حدود توافق: این حدود معمولاً بین ± 1.96 برابر انحراف معیار اختلاف‌ها در نظر گرفته می‌شود؛ بنابراین حدود بالایی از توافق برابر $\bar{d} + (1.96 \times S_d)$ و حدود پایینی از توافق برابر $\bar{d} - (1.96 \times S_d)$ می‌باشد. سپس این محدوده‌ها به صورت خطوط افقی در نمودار بلند - آلتمن رسم می‌شوند.

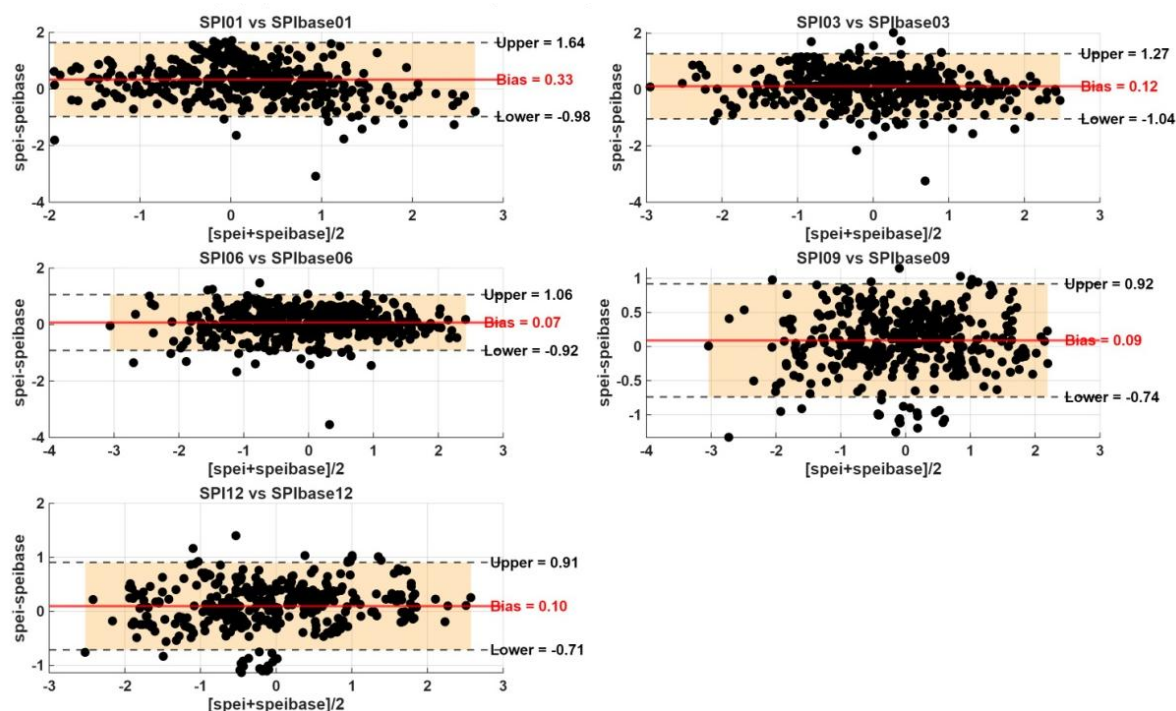
نتایج و بحث

محاسبه مقدار ضریب همبستگی خطی پیرسون، ضریب کاپای کوهن وزن‌دار و نمودار بلند - آلتمن برای ارزیابی میزان همبستگی و توافق بین دو شاخص استاندارد شده بارش ایستگاهی و شبکه‌ای از طریق برنامه‌نویسی در محیط نرم‌افزار متلب انجام و این ضریب برای هریک از مقیاس‌های زمانی (۱، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه) محاسبه شده است. نتایج عددی این محاسبات در جدول‌های ۵ تا ۹ به تفکیک مقیاس‌های زمانی آورده شده است. نمونه‌ای از خروجی تصویری ضرایب همبستگی (شکل ۲) و نمودار بلند - آلتمن (شکل ۳) برای یک ایستگاه نمونه (کرمان) ارائه شده است.



شکل ۲. مقدار ضریب همبستگی بین SPI و SPIbase در مقیاس‌های زمانی مختلف در ایستگاه نمونه (کرمان).

Fig 2. The correlation coefficient value between SPI and SPIbase at different time scales at the sample station (Kerman).



شکل ۳. نمودارهای بلند - آلتمن بین SPI و SPIbase در مقیاس‌های زمانی متناظر در ایستگاه نمونه (کرمان).

Fig 3. Bland-Altman plots between SPI and SPIbase at corresponding time scales in the sample station (Kerman).

ایستگاه‌های مورد مطالعه در جنوب شرق ایران دارای تنوع توپوگرافی و تنوع اقلیمی زیاد می‌باشند. ایستگاه هواشناسی کرمان با ارتفاع حدود ۱۷۵۴ متر از سطح دریا و مجموع میانگین بارش سالانه ۱۲۴/۱۴ میلی‌متر و میانگین دمای ۱۶/۵۵ درجه سلسیوس به عنوان مرتفع‌ترین و سردترین ایستگاه در بین ایستگاه‌های مورد مطالعه می‌باشد. میزان همبستگی خطی پیرسون بین مقادیر شاخص استاندارد شده بارش ایستگاهی و شبکه‌ای در این ایستگاه برای تمامی مقیاس‌های زمانی در محدوده همبستگی قوی و بسیار قوی قرار دارد. هرچه مقیاس‌های زمانی بلندتر می‌شود، میزان همبستگی بین شاخص استاندارد شده بارش ایستگاهی و شبکه‌ای، افزایش می‌یابد. در واقع مقیاس‌های زمانی کوتاه (یک ماهه) بیانگر خشکسالی هواشناسی، مقیاس‌های میانی (شش ماهه) بیانگر خشکسالی کشاورزی و مقیاس‌های بلندتر (۱۲ ماهه) بیانگر خشکسالی هیدرولوژیکی هستند. مقادیر شاخص کاپای کوهن‌وزن دار که برای ارزیابی میزان توافق در بیان وضعیت خشکسالی شاخص استاندارد شده بارش ایستگاهی و شبکه‌ای در مقیاس‌های زمانی مختلف بررسی گردیده، مقدار آن در ایستگاه کرمان در مقیاس یک ماهه، دارای توافق زیاد، و در مقیاس‌های بالاتر از یک ماهه در دامنه توافق بسیار زیاد (تقریباً کامل) قرار دارد. همچنین نتایج کمی توسط نمودارهای بلند - آلتمن (تفاوت) نیز تأیید شده است. زیرا در همه نمودارها، نقاط به طور تصادفی و بدون الگوی خاص در اطراف خط میانگین پراکنده شده‌اند که این نشانه‌ای از توافق خوب بین دو شاخص در بیان وضعیت خشکسالی در این ایستگاه می‌باشند. محدوده توافق بین دو روش در تمامی مقیاس‌های اندازه‌گیری اختلاف چندانی نداشته و خیلی اندک می‌باشد؛ لذا می‌توان گفت، اختلاف چندانی بین شاخص شاخص استاندارد شده بارش ایستگاهی و شبکه‌ای در پایش خشکسالی این ایستگاه وجود ندارد.

جدول ۵. خلاصه آزمون‌های هماهنگی و توافق بین SPI و SPIbase یک ماهه در جنوب شرق ایران

Table 5. Summary of correlation and agreement tests between SPI and SPIbase at the 1-month scale over southeastern Iran.

Station	Kappa (κ^*)	Perarson (r^{**})	Bland-Altman (Range)
ایستگاه	ضریب کاپا	ضریب پیرسون	دامنه بلند - آلتمن
Kerman	0.65	0.72	Upper= +1.64 , Lower= -0.98
Bam	0.43	0.49	Upper= +2.18 , Lower= -1.16
Bandar Abbas	0.70	0.65	Upper= +1.78 , Lower= -0.99
Chabahar	0.34	0.55	Upper= +1.99 , Lower= -0.97

Iranshahr	0.61	0.67	Upper= +1.53 , Lower= -1.02
Zahedan	0.55	0.67	Upper= +2.00 , Lower= -1.40
Zabol	0.43	0.72	Upper= +1.24 , Lower= -0.96
Saravan	0.62	0.65	Upper= +1.72 , Lower= -1.21

ایستگاه بم با ارتفاع ۱۰۶۷ متر و مجموع میانگین بارش سالانه ۵۳/۷۰ میلی متر و میانگین دمای سالانه ۲۴/۱۵ درجه سلسیوس به عنوان یکی از ایستگاه‌های دارای ویژگی اقلیمی بسیار گرم و خشک و از کم بارش‌ترین ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه است. میزان همبستگی خطی پیرسون بین مقادیر شاخص استاندارد شده بارش ایستگاهی و شبکه‌ای در این ایستگاه برای مقیاس یک ماهه متوسط هست، اما برای مقیاس‌های زمانی بالاتر (۶ ماهه تا ۱۲ ماهه) در محدوده همبستگی قوی و بسیار قوی قرار دارد. این میزان از همبستگی با افزایش مقیاس زمانی، بیشتر نیز می‌شود، به گونه‌ای که میزان همبستگی در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه در محدود همبستگی بسیار قوی قرار دارد. دلیل کاهش میزان همبستگی در ایستگاه هواشناسی بم (در مقیاس زمانی یک ماهه) می‌تواند ناشی از موقعیت بیابانی و اقلیم گرم و خشک باشد. مقدار آماره کاپای کوهن وزن دار به همراه خلاصه نمودارهای تفاوت، برای ارزیابی توافقی در بیان وضعیت خشکسالی بین شاخص استاندارد شده بارش ایستگاهی و شبکه‌ای در ایستگاه بم و سایر ایستگاه‌ها در مقیاس‌های زمانی مختلف در جداول ۵ تا ۹ آورده شده است. میزان توافقی کاپای کوهن وزن دار در مقیاس زمانی یک تا شش ماهه برای ایستگاه بم در دامنه (+۰/۴۰ تا +۰/۶۰) بوده که بیانگر توافقی متوسط می‌باشد، اما در مقیاس‌های ۹ و ۱۲ ماهه دامنه توافقی در محدوده توافقی قوی قرار دارد. براساس نتایج نمودارهای بلند - آلتمن، (محدوده بالا و پایین) یعنی محدوده‌ای که انتظار می‌رود ۹۵٪ از تفاوت‌های بین شاخص استاندارد شده بارش ایستگاهی و شبکه‌ای در آن محدوده قرار بگیرند. برای بررسی اعتبار و قابلیت اعتماد به شاخص‌های شاخص استاندارد شده بارش ایستگاهی و شبکه‌ای، نتایج این نمودارها نیز در جداول ۵ تا ۹ آورده شده است؛ بنابراین، نمودارهای بلند - آلتمن این نتیجه را تقویت می‌کنند که هر دو شاخص ارزیابی‌های قابل مقایسه‌ای از خشکسالی در ایستگاه‌های مورد نظر ارائه می‌دهند. در همه نمودارها، نقاط به طور تصادفی و بدون الگوی خاصی در اطراف خط میانگین پراکنده بوده‌اند، بنابراین اختلاف چندانی بین شاخص استاندارد شده بارش ایستگاهی و شبکه‌ای در بیان وضعیت خشکسالی در این ایستگاه وجود ندارد.

جدول ۶. خلاصه آزمون‌های هماهنگی و توافقی بین SPI و SPIbase سه ماهه در جنوب شرق ایران
Table 6. Summary of correlation and agreement tests between SPI and SPIbase at the 3-month scale over southeastern Iran.

Station ایستگاه	Kappa (κ^*) ضریب کاپا	Perarson (r^{**}) ضریب پیرسون	Bland-Altman (Range) دامنه بلند - آلتمن
Kerman	0.78	0.82	Upper= +1.27 , Lower= -1.04
Bam	0.47	0.67	Upper= +1.62 , Lower= -1.22
Bandar Abbas	0.70	0.80	Upper= +1.40 , Lower= -1.08
Chabahar	0.74	0.84	Upper= +1.39 , Lower= -0.96
Iranshahr	0.64	0.78	Upper= +1.33 , Lower= -1.19
Zahedan	0.68	0.82	Upper= +1.18 , Lower= -0.95
Zabol	0.43	0.64	Upper= +1.24 , Lower= -1.09
Saravan	0.66	0.77	Upper= +1.47 , Lower= -1.30

ایستگاه‌های ساحلی منطقه مورد مطالعه (بندرعباس و چابهار) به ترتیب با ارتفاع ۹/۸ و ۸ متر، مجموع بارش سالانه ۱۶۲ و ۱۲۳ میل متر و میانگین دمای سالانه ۲۷/۱۶ و ۲۶/۵۴ درجه سلسیوس از کم ارتفاع‌ترین ایستگاه‌های منطقه با اقلیم گرم و مرطوب مشخص می‌شوند. میزان همبستگی بین مقادیر شاخص استاندارد شده بارش ایستگاهی و شبکه‌ای در این ایستگاه‌ها در مقیاس یک ماهه در دامنه همبستگی نسبتاً قوی و در مقیاس‌های بالاتر از یک ماهه در دامنه قوی و بسیار قوی قرار دارد. علاوه بر آن، میزان همبستگی از مقیاس‌های زمانی کوتاه مدت (۱ و ۳ ماهه) به مقیاس‌های زمانی طولانی‌تر (۶، ۹ و ۱۲) نیز افزایش می‌یابد. میزان توافقی در بیان وضعیت خشکسالی توسط شاخص استاندارد شده بارش ایستگاهی و شبکه‌ای در ایستگاه‌های بندرعباس و چابهار نیز در تمامی مقیاس‌های زمانی توسط آزمون کاپای کوهن وزن دار و نمودار بلند - آلتمن بررسی و خلاصه نتایج آن در

جداول ۵ تا ۹ آورده شده است. مقادیر آماره کاپای کوهن وزن دار در مقیاس زمانی یک ماهه در ایستگاه چابهار در دامنه توافق متوسط و در ایستگاه بندرعباس در دامنه توافق زیاد قرار دارد و برای سایر مقیاس‌های بالاتر از یک ماهه مقدار آماره کاپای کوهن در هر دو ایستگاه‌ها در دامنه توافق زیاد قرار دارد.

جدول ۷. خلاصه آزمون‌های هماهنگی و توافق بین SPI و SPIbase شش ماهه در جنوب شرق ایران
Table 7. Summary of correlation and agreement tests between SPI and SPIbase at the 6-month scale over southeastern Iran.

Station ایستگاه	Kappa (κ^*) ضریب کاپا	Perarson (r^{**}) ضریب پیرسون	Bland-Altman (Range) دامنه بلند - آلتمن
Kerman	0.79	0.78	Upper= +1.06 , Lower= -0.92
Bam	0.49	0.72	Upper= +1.39 , Lower= -1.34
Bandar Abbas	0.72	0.85	Upper= +1.26 , Lower= -1.04
Chabahar	0.76	0.89	Upper= +1.10 , Lower= -1.00
Iranshahr	0.68	0.82	Upper= +1.21 , Lower= -1.15
Zahedan	0.70	0.78	Upper= +1.04 , Lower= -0.90
Zabol	0.68	0.83	Upper= +1.20 , Lower= -1.90
Saravan	0.69	0.81	Upper= +1.32 , Lower= -1.31

ایستگاه‌های زابل و ایرانشهر به ترتیب با ارتفاع ۴۸۹ و ۵۹۱ متر، مجموع میانگین بارش سالانه ۵۱ و ۱۰۵ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه ۲۲/۸۷ و ۲۷/۲۰ درجه سلسیوس به عنوان ایستگاه‌های کم‌بارش و گرم شناخته می‌شوند. میزان همبستگی بین مقادیر شاخص استاندارد شده بارش ایستگاهی و شبکه‌ای در ایستگاه زابل به ترتیب (۰/۶۴، ۰/۷۲، ۰/۸۳، ۰/۸۵، ۰/۸۵) و در ایستگاه ایرانشهر (۰/۶۷، ۰/۷۸، ۰/۸۲، ۰/۸۸، ۰/۹۱) می‌باشد. این ضرایب همبستگی در هر دو ایستگاه در مقیاس زمانی یک ماهه در محدوده نسبتاً قوی و در مقیاس‌های (۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه) در محدوده همبستگی قوی قرار دارد. همچنین میزان همبستگی بین شاخص استاندارد شده بارش ایستگاهی و شبکه‌ای در مقیاس‌های زمانی بلندتر نسبت به مقیاس‌های زمانی کوتاه‌تر افزایش می‌یابد. مقادیر آماره کاپای کوهن وزن دار برای ایستگاه زابل در مقیاس ۱ ماهه در دامنه توافق متوسط و در مقیاس‌های ۳ تا ۱۲ ماهه برای هر دو ایستگاه زابل و ایرانشهر در محدوده توافق زیاد قرار دارد. مقدار آماره کاپای کوهن در مقیاس‌های زمانی کوچک‌تر (مانند ۱ و ۳ ماهه) که عمدتاً بیانگر خشکسالی هواشناسی می‌باشند در محدوده مرز توافق زیاد می‌باشد؛ بنابراین در ایستگاه‌های مذکور، توافق شاخص استاندارد شده بارش ایستگاهی و شبکه‌ای در نمایش وضعیت خشکسالی‌ها (بویژه خشکسالی‌های کشاورزی و هیدرولوژیکی) زیاد می‌باشد. نمودارهای بلند - آلتمن نیز بیانگر سطح بالایی از همخوانی بین شاخص استاندارد شده بارش ایستگاهی و شبکه‌ای در این دو ایستگاه در تمامی مقیاس‌های مورد بررسی است؛ لذا این نمودارها این نتیجه را می‌رساند که هر دو شاخص، ارزیابی‌های قابل مقایسه‌ای از خشکسالی در این ایستگاه‌ها ارائه می‌دهند.

ایستگاه هواشناسی زاهدان با ارتفاع ۱۳۷۰ متر، مجموع میانگین بارش سالانه ۷۶/۴۶ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه ۱۹/۱۰ درجه سلسیوس به عنوان دومین ایستگاه مرتفع و نسبتاً خنک بعد از ایستگاه کرمان می‌باشد. میزان همبستگی بین مقادیر شاخص استاندارد شده بارش ایستگاهی و شبکه‌ای در مقیاس‌های ۱، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه در این ایستگاه به ترتیب (۰/۶۷، ۰/۸۲، ۰/۸۷، ۰/۹۱، ۰/۹۲) می‌باشد. این ضرایب همبستگی در محدوده همبستگی قوی قرار دارند، و مثل تمام ایستگاه‌های دیگر میزان آن از مقیاس‌های زمانی کوتاه به مقیاس‌های زمانی طولانی‌تر افزایش می‌یابد. مقدار آماره کاپای کوهن وزن دار به همراه خلاصه نمودارهای تفاوت، برای بیان توافق بین وضعیت خشکسالی شاخص‌های شاخص استاندارد شده بارش ایستگاهی و شبکه‌ای در ایستگاه زاهدان در مقیاس‌های زمانی متفاوت در جداول ۵ تا ۹ آورده شده است. مقادیر آماره کاپای کوهن وزن دار در تمامی مقیاس‌های زمانی در این ایستگاه در دامنه (+۰/۶ تا +۰/۸۰) بوده که بیانگر توافق زیاد می‌باشد.

جدول ۸. خلاصه آزمون‌های هماهنگی و توافق بین SPI و SPIbase نه ماهه در جنوب شرق ایران

Table 8. Summary of correlation and agreement tests between SPI and SPIbase at the 9-month scale over southeastern Iran.

Station ایستگاه	Kappa (κ^*) ضریب کاپا	Perarson (r^{**}) ضریب پیرسون	Bland-Altman (Range) دامنه بلند - آلتمن
Kerman	0.83	0.91	Upper= +0.92 , Lower= -0.74
Bam	0.50	0.75	Upper= +1.34 , Lower= -1.33
Bandar Abbas	0.81	0.91	Upper= +1.06 , Lower= -0.80
Chabahar	0.80	0.91	Upper= +0.98 , Lower= -0.98
Iranshahr	0.76	0.88	Upper= +0.96 , Lower= -0.97
Zahedan	0.79	0.91	Upper= +0.91 , Lower= -0.75
Zabol	0.74	0.85	Upper= +1.18 , Lower= -0.87
Saravan	0.73	0.84	Upper= +1.17 , Lower= -1.22

ایستگاه هواشناسی سراوان با ارتفاع ۱۱۸۲ متر، مجموع میانگین بارش سالانه ۱۰۸ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه ۲۲/۳۹ درجه سلسیوس به عنوان ایستگاه نسبتاً مرتفع در میان ارتفاعات جنوب شرقی ایران با تأثیرپذیری غالب از اقلیم مونسونی جنوب شرقی می‌باشد. میزان همبستگی بین مقادیر شاخص استاندارد شده بارش ایستگاهی و شبکه‌ای در مقیاس‌های ۱، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه در این ایستگاه به ترتیب (۰/۶۵، ۰/۷۷، ۰/۸۱، ۰/۸۴، ۰/۸۵) می‌باشد. این ضرایب همبستگی در محدوده همبستگی قوی قرار دارند، و مثل تمام ایستگاه‌های دیگر میزان آن از مقیاس‌های زمانی کوتاه به مقیاس‌های زمانی طولانی‌تر افزایش می‌یابد. مقدار آماره کاپای کوهن‌وزن‌دار به همراه خلاصه نمودارهای تفاوت، برای بیان توافق بین وضعیت خشکسالی شاخص‌های شاخص استاندارد شده بارش ایستگاهی و شبکه‌ای در ایستگاه زاهدان در مقیاس‌های زمانی متفاوت در جدول ۵ تا ۹ آورده شده است. مقادیر آماره کاپای کوهن‌وزن‌دار در تمامی مقیاس‌های زمانی در این ایستگاه در دامنه (۰/۶ تا ۰/۸۰) بوده که بیانگر توافق زیاد می‌باشد.

جدول ۹. خلاصه آزمون‌های هماهنگی و توافق بین SPI و SPIbase دوازده ماهه در جنوب شرق ایران

Table 9. Summary of correlation and agreement tests between SPI and SPIbase at the 12-month scale over southeastern Iran.

Station ایستگاه	Kappa (κ^*) ضریب کاپا	Perarson (r^{**}) ضریب پیرسون	Bland-Altman (Range) دامنه بلند - آلتمن
Kerman	0.86	0.91	Upper= +1.64 , Lower= -0.98
Bam	0.53	0.76	Upper= +2.18 , Lower= -1.16
Bandar Abbas	0.84	0.94	Upper= +1.78 , Lower= -0.99
Chabahar	0.81	0.91	Upper= +1.99 , Lower= -0.97
Iranshahr	0.81	0.91	Upper= +1.53 , Lower= -1.02
Zahedan	0.80	0.92	Upper= +2.00 , Lower= -1.40
Zabol	0.76	0.85	Upper= +1.24 , Lower= -0.96
Saravan	0.72	0.85	Upper= +1.72 , Lower= -1.21

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به منظور بررسی همبستگی و توافق میان شاخص استاندارد شده بارش ایستگاهی و شبکه‌ای جهت ارزیابی قابلیت اطمینان به پایگاه شبکه‌ای شاخص استاندارد شده بارش در بازتاب شرایط واقعی خشکسالی در جنوب شرق ایران است. برای رسیدن به این مقصود، داده‌های بارش ماهانه ۸ ایستگاه هواشناسی در دوره‌ی آماری ۱۹۸۶ تا ۲۰۲۴ میلادی از سازمان هواشناسی کشور اخذ شد. شاخص استاندارد شده بارش ایستگاهی بر اساس داده‌های بارش ایستگاهی در مقیاس‌های زمانی ۱، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه، محاسبه شد. در سوی دیگر، داده‌های شبکه‌بندی شاخص استاندارد شده بارش در دوره و مقیاس مشابه با داده‌های ایستگاهی که بر اساس اطلاعات ماهانه بارندگی از داده‌های بارش مرکز اقلیم‌شناسی بارش جهانی توسعه یافته، برای منطقه مورد مطالعه استخراج گردید. محاسبه شاخص استاندارد شده بارش شبکه‌ای برای موقعیت هر یک از ایستگاه‌های هواشناسی با میانگین

نقاط شبکه‌ای پیرامون ایستگاه‌های هواشناسی انجام شده است. برای این منظور از قاعده وزن‌دهی عکس فاصله استفاده شده است؛ به گونه‌ای که یاخته‌های نزدیک‌تر به موقعیت ایستگاه هواشناسی، از وزن بیشتری برخوردار باشند. علاوه بر این، ملاحظات هیدرواقلمی و شرایط توپوگرافی نیز در تعداد یاخته‌های تأثیرگذار بوده است. از آزمون همبستگی خطی پیرسون برای بررسی درجه همبستگی و هماهنگی بین دو شاخص و از آزمون کاپای کوهن وزن‌دار و نمودار بلند - آلتمن برای سنجش میزان توافق و تفاوت بین این دو شاخص در پایش وضعیت خشکسالی در جنوب شرق ایران استفاده شد. یافته‌ها نشان دادند که میزان همبستگی خطی پیرسون بین مقادیر شاخص استاندارد شده بارش ایستگاهی محاسبه شده در سطح ایستگاه‌های هواشناسی و شاخص استاندارد شده بارش شبکه‌ای استخراج شده از پایگاه داده‌های شبکه‌ای، در اغلب ایستگاه‌ها، در دامنه همبستگی قوی (۰/۶۰ تا ۰/۹۰) قرار دارد، حتی مقدار همبستگی در برخی از ایستگاه‌ها (مانند؛ کرمان، زاهدان و چابهار) نزدیک به همبستگی بسیار قوی بود. فقط در ایستگاه‌های با ویژگی‌های اقلیمی بسیار گرم (مانند؛ بم و زابل)، میزان همبستگی در مقیاس‌های کوتاه‌تر کمی پایین بود و در سطح متوسط تا نسبتاً قوی قرار داشت. لازم به ذکر است که کاهش همبستگی در ایستگاه‌های بم و زابل، در این پژوهش به صورت یک فرضیه بر پایه موقعیت بیابانی و اقلیم گرم و خشک آن‌ها مطرح شده است، نه یک تحلیل علی قطعی. این اقلیم به طور ذاتی با بارش کم، پراکندگی زمانی زیاد، تعداد کم روزهای بارانی و رژیم بارش نامنظم همراه است. با این حال، بررسی کمی سهم هر یک از این عوامل، از جمله کیفیت داده‌های ایستگاهی و شبکه‌ای، نیازمند پژوهش‌های اختصاصی آینده است.

بصورت کلی، میزان همبستگی از مقیاس‌های کوتاه‌تر (۱ و ۳ ماهه) به مقیاس‌های بلندتر (۶، ۹ و ۱۲ ماهه) افزایش را نشان می‌دهد. با توجه به مقادیر آزمون کاپای کوهن وزن‌دار، میزان توافق نیز بین شاخص استاندارد شده بارش ایستگاهی و شبکه‌ای، در بیان وضعیت‌های خشکسالی در اکثر ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه در دامنه توافق زیاد قرار داشت؛ لذا شاخص استاندارد شده بارش ایستگاهی و شبکه‌ای شباهت‌های زیاد در پایش خشکسالی و توافق زیاد در بیان وضعیت خشکسالی داشتند. البته میزان توافق در بیان وضعیت‌های خشکسالی در ایستگاه‌های خشک‌تر و گرم‌تر در مقیاس زمانی کوتاه (۱ تا ۳ ماهه) نسبت به ایستگاه‌های مرطوب‌تر، سردتر و مرتفع‌اندکی کاهش داشت. با توجه به آزمون‌های انجام شده و تجزیه و تحلیل‌های صورت گرفته، می‌توان گفت شاخص استاندارد شده بارش شبکه‌ای دارای همبستگی مناسب و توافق خوب با شاخص استاندارد شده بارش ایستگاهی می‌باشد و با اطمینان و دقت بالا می‌تواند در ایستگاه‌های جنوب شرق ایران قابل جایگزین با داده‌های ایستگاهی باشد. داده‌های این پایگاه جهانی با توجه به پوشش وسیع مکانی و وضوح زمانی و مکانی بالا، به‌ویژه برای مناطق فاقد ایستگاه مثل جنوب شرق ایران، می‌تواند داده‌های مناسبی برای پایش خشکسالی فراهم کند. با این حال، این نتیجه‌گیری کلی نیست و به مقیاس زمانی و موقعیت ایستگاه بستگی دارد. به طور کلی، شاخص استاندارد شده بارش شبکه‌ای، در جنوب شرق ایران، به‌ویژه برای پایش بلندمدت خشکسالی و در ایستگاه‌های غیر فراخشک، جایگزین مناسب و قابل اعتمادی برای داده‌های ایستگاهی است. برای پایش کوتاه‌مدت خشکسالی هواشناسی در ایستگاه‌های فراخشک، استفاده از آن باید با احتیاط و همراه با ارزیابی‌های تکمیلی انجام شود. این نتیجه‌گیری مشروط، تصویری واقع‌بینانه‌تر از قابلیت‌ها و محدودیت‌های شاخص استاندارد شده بارش شبکه‌ای در منطقه ارائه می‌دهد.

در این پژوهش، هدف اصلی ارزیابی همبستگی و توافق بین شاخص استاندارد شده بارش ایستگاهی و شبکه‌ای برای پایش خشکسالی بود و نه برآورد کمی عدم قطعیت ذاتی این داده‌ها. با این حال، باید توجه داشت که داده‌های بارش ایستگاهی ممکن است دارای خطای اندازه‌گیری، ناهمگنی و نقص داده باشند و داده‌های شبکه‌ای نیز از تلفیق داده‌های ایستگاهی، مدل‌های عددی و سنجش از دور و همچنین درون‌یابی و برازش توزیع احتمال حاصل می‌شوند و بنابراین عدم قطعیت ساختاری دارند. تفکیک کمی این عدم قطعیت‌ها در چارچوب این پژوهش امکان‌پذیر نبود؛ لذا تحلیل عدم قطعیت و فواصل اطمینان می‌تواند موضوع پژوهش‌های آتی باشد.

سپاسگزاری

از سازمان هواشناسی کشور و مرکز ملی اطلاعات محیطی سازمان ملی اقیانوسی و جوی ایالات متحده، به ترتیب جهت تأمین رایگان داده‌های ایستگاهی و شبکه‌ای مورد استفاده در این پژوهش و از داوران ناشناس مجله پژوهش‌های خشکسالی و تغییر

منابع

- Adler, J., & Parmryd, I. (2010). Quantifying colocalization by correlation: The Pearson correlation coefficient is superior to the Mander's overlap coefficient. *Cytometry Part A*, 77A(8), 733–742. Portico. <https://doi.org/10.1002/cyto.a.20896>
- Alawsi, M. A., Zubaidi, S. L., Al-Bdairi, N. S. S., Al-Ansari, N., & Hashim, K. (2022). Drought Forecasting: A Review and Assessment of the Hybrid Techniques and Data Pre-Processing. *Hydrology*, 9(7), 115. <https://doi.org/10.3390/hydrology9070115>
- Barahooie, D., Hamidianpour, M., and Shoja, F. (2025). Identification of Spatiotemporal Drought Patterns in Southeastern Iran Using a Graphical Trend Analysis Approach. *Physical Geography Research*, 57(2), 77-98. doi: 10.22059/jphgr.2025.398145.1007893
- Bland, J. M., & Altman, D. G. (1986). Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *The Lancet*, 327(8476), 307–310. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(86\)90837-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(86)90837-8)
- Carbone, G. J., Lu, J., & Brunetti, M. (2018). Estimating uncertainty associated with the standardized precipitation index. *International Journal of Climatology*, 38(S1), e607–e616. <https://doi.org/10.1002/joc.5393>
- Engdaw, G., Legesse, A., Mohammed, Y., & Likissa, D. (2022). Analysis of Meteorological Drought using Standardized Precipitation Index (SPI) and Reconnaissance Drought Index (RDIst) at Bilate basin, Southern Ethiopia. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1664681/v1>
- Farzaneh, M., Arbabi Sabzevari, A., Daryabari, S. J., and Asadian, F. (2021). Perspectives on Climatic Conditions of the Next Decades in the Southeast of the Country. *Journal of Climate Research*, 1400(46), 147-160.
- Ghazi, B., Salehi, H., Przybylak, R., & Pospieszynska, A. (2025). Assessment of drought conditions under climate change scenarios in Central Europe (Poland) using the standardized precipitation index (SPI). *Climate Services*, 39, 100591. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2025.100591>
- Imran, H. M., Kala, J., Uddin, S., Saiful Islam, A. K. M., & Acharya, N. (2023). Spatiotemporal analysis of temperature and precipitation extremes over Bangladesh using a novel gridded observational dataset. *Weather and Climate Extremes*, 39, 100544. <https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100544>
- Jafarpour, M., Adib, A., & Lotfird, M. (2022). Improving the accuracy of satellite and reanalysis precipitation data by their ensemble usage. *Applied Water Science*, 12(9). <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01750-z>
- Kazemzadeh, M., Noori, Z., Alipour, H., Jamali, S., Akbari, J., Ghorbanian, A., & Duan, Z. (2022). Detecting drought events over Iran during 1983–2017 using satellite and ground-based precipitation observations. *Atmospheric Research*, 269, 106052. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106052>
- Keikhosravi-Kiany, M. S., & Balling, R. C. (2025). Utility of satellite precipitation products for drought monitoring (case study: southwestern regions in Iran). *Natural Hazards*, 121(6), 6467–6497. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-07055-5>
- Keyantash, J., & Dracup, J. A. (2002). The Quantification of Drought: An Evaluation of Drought Indices. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(8), 1167–1180. <https://doi.org/10.1175/1520-0477-83.8.1167>
- Khalil, A. (2026). Comparative Performance of Rainfall-Based Drought Indices for Drought Monitoring in the Mae Klong River Basin, Thailand. *Pure and Applied Geophysics*, 183(2), 745–772. <https://doi.org/10.1007/s00024-025-03896-8>
- Lashkari, A., Salehnia, N., Asadi, S., Paymard, P., Zare, H., & Bannayan, M. (2018). Evaluation of different gridded rainfall datasets for rainfed wheat yield prediction in an arid environment. *International Journal of Biometeorology*, 62(8), 1543–1556. <https://doi.org/10.1007/s00484-018-1555-x>
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *8th Conference on Applied Climatology* (pp. 179–184). American Meteorological Society.
- Mwape, A., Hayes, M., Bathke, D. J., Smith, K. H., Mahmood, R., & Jones, E. (2025). Drought Management in Zambia: Insights from the 2023/2024 Drought. *Climate*, 13(11), 227. <https://doi.org/10.3390/cli13110227>
- Nazaripour H, Hamidianpour M, Khosravi M, Vazirimehr M. Variability of Drought Frequency and Intensity in Iran using SPEI. *Journal of water and soil science*. 26 (4), 233-247. <https://doi.org/10.47176/jwss.26.4.45861>
- Ojha, N., Merlin, O., Suere, C., & Escorihuela, M. J. (2021). Extending the Spatio-Temporal Applicability of DISPATCH Soil Moisture Downscaling Algorithm: A Study Case Using SMAP, MODIS and Sentinel-3 Data. *Frontiers in Environmental Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.555216>
- Poodineh, N., Nazaripour, H., and Khosravi, M. (2026). Reliability Assessment of Gridded SPEI (SPEIbase) in Iran's Catchments. *Water and Soil*, 39(6), 589-610. <https://doi.org/10.22067/jsw.2026.97825.1527>
- Rahnama, S., Shahidi, A., Yaghoobzadeh, M., & Mehran, A. A. (2024). Comparison of different drought monitoring indices in different climatic conditions in Iran. *Atmosfera*, 38. <https://doi.org/10.20937/atm.53319>

Santos, C. A. G., Brasil Neto, R. M., da Silva, R. M., & dos Santos, D. C. (2018). Innovative approach for geospatial drought severity classification: a case study of Paraíba state, Brazil. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 33(2), 545–562. <https://doi.org/10.1007/s00477-018-1619-9>

Satgé, F., Hussain, Y., Molina-Carpio, J., Pillco, R., Laugner, C., Akhter, G., & Bonnet, M. P. (2020). Reliability of SM2RAIN precipitation datasets in comparison to gauge observations and hydrological modelling over arid regions. *International Journal of Climatology*, 41(S1). <https://doi.org/10.1002/joc.6704>.

Shirmohammadi–Aliakbarhani, Z., Akbari, A., Rajabi Jaghargh, M., & Cox, J. P. (2025). Assessing the Standardized Precipitation Index Utilizing Satellite-Based and Reanalyzed Precipitation Products in a Semi-Arid Region, Iran. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 53(10), 3393–3407. <https://doi.org/10.1007/s12524-025-02152-9>

Shoja, F., Hamidianpour, M., & Barahooie, D. (2025). Forecasting climate change effects on drought using the Decadal Climate Prediction Project in arid and semi-arid regions of southeastern Iran. *Natural Hazards*, 121(13), 15553–15580. <https://doi.org/10.1007/s11069-025-07405-x>

Singh, G. R., Dhanya, C. T., & Chakravorty, A. (2020). Investigating the divergence between Standardized Precipitation Index (SPI) and Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) in defining drought over different climate zones of India. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (p. 454). <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-454>

Singh, I., Mishra, A. K., & Suryavanshi, S. (2023). Assessing Extreme Drought Using the Standardized Precipitation Index (SPI) in the Harohar-Punpun Basin, Bihar, India. *International Journal of Environment and Climate Change*, 13(9), 1689–1697. <https://doi.org/10.9734/ijecc/2023/v13i92399>

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. <https://doi.org/10.22059/jesphys.2022.327069.1007337>

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>

Warrens, M. J. (2013). Conditional inequalities between Cohen's kappa and weighted kappas. *Statistical Methodology*, 10(1), 14–22. <https://doi.org/10.1016/j.stamet.2012.05.004>

Watson, P. F., & Petrie, A. (2010). Method agreement analysis: A review of correct methodology. *Theriogenology*, 73(9), 1167–1179. <https://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2010.01.003>

Yildirim, T., & Asik, S. (2018). Index-based Assessment of Agricultural Drought using Remote Sensing in the Semi-arid Region of Western Turkey. *Tarım Bilimleri Dergisi*, 24(4), 510–516. <https://doi.org/10.15832/ankutbd.337136>

Zambrano, F., Lillo-Saavedra, M., Verbist, K., & Lagos, O. (2016). Sixteen Years of Agricultural Drought Assessment of the BioBío Region in Chile Using a 250 m Resolution Vegetation Condition Index (VCI). *Remote Sensing*, 8(6), 530. <https://doi.org/10.3390/rs8060530>

Zargar, A., Sadiq, R., Naser, B., & Khan, F. I. (2011). A review of drought indices. *Environmental Reviews*, 19(NA), 333–349. <https://doi.org/10.1139/a11-013>

Khayat, Amirabadizadeh, M and Akhondi, Z. (2026). Assessment of the Intensity and Duration of Meteorological Drought in South Khorasan Province in the Mid-Term Future Horizon. *Journal of Drought and Climate Change Research*, 4(1), 181–202. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2025.10060.1169>

Delghandi, M., Joorablou, S., and Ganji Nowroozi. (2023). The Impact of Climate Change on Severity, Duration, and Magnitude of Drought using SPI and RDI in Semnan Region. *Journal of Drought and Climate Change Research*, 1(1), 1–18. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2023.5909.1004>

Helmi, M and Shahidi, A . (2023). The Use of SPI and SPEI Indices in Evaluating the Effect of Drought on the Quality of Surface Water Resources (Case Study: Kashafrud River). *Journal of Drought and Climate Change Research*, 1(1), 83–96. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2023.6023.1008>