

Reliability Assessment of Gridded SPEI (SPEIbase) in Iran's Catchments

N. Poodineh¹, H. Nazaripour^{1*}, M. Khosravi¹

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

(* - Corresponding Author Email: h.nazaripour@gep.usb.ac.ir)

Received: 17 February 2026

Revised: 13 April 2026

Accepted: 19 April 2026

Available Online: 19 April 2026

How to cite this article:

Poodineh, N., Nazaripour, H., & Khosravi, M. (2026). Reliability assessment of gridded SPEI (SPEIbase) in Iran's Catchments. *Journal of Water and Soil*, 39(6), 589-610. (In Persian with English abstract).

<https://doi.org/10.22067/jsw.2026.97825.1527>

Introduction

Drought is one of the most complex and costly natural disasters, and its accurate monitoring is essential for water resources management and vulnerability reduction. The Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index (SPEI), as a bivariate index, utilizes precipitation and temperature data (to estimate evapotranspiration) and has gained widespread application due to its multiscalar nature and sensitivity to climate change. However, limited access to long-term and uniform station-based data in a country with high climatic diversity and complex topography like Iran poses a significant challenge for accurate drought monitoring. The global gridded database SPEIbase, with a spatial resolution of 0.5 arc degrees, has been developed by integrating satellite data, climate models, and in-situ measurements. This study aims to evaluate the reliability of SPEIbase compared to station-based data across Iran's catchments to assess the feasibility of substituting this database due to its extensive spatial coverage and easier accessibility.

Materials and Methods

Two datasets were used in this research: 1) Station data including monthly precipitation time series and monthly mean temperature from 43 meteorological stations in Iran for the statistical period 1986-2023, obtained from the Iran Meteorological Organization (IRIMO). 2) Gridded SPEIbase data, version 2.11, based on the CRU TS 4.09 dataset, extracted for the same period from the Climatic Research Unit (CRU) at the University of East Anglia. The station-based SPEI was calculated using potential evapotranspiration estimated via the Thornthwaite method at time scales of 1, 3, 6, 9, and 12 months. The SPEIbase index, based on potential evapotranspiration estimated via the FAO-56 Penman-Monteith method, was extracted for the corresponding period. The concordance and agreement between the two indices were evaluated using three statistical methods: 1) Pearson's correlation coefficient to assess linear relationship, 2) Weighted Cohen's Kappa statistic to measure agreement in drought classes (8 classes ranging from extreme drought to extremely wet), and 3) Bland-Altman plots to examine limits of agreement and systematic bias.

Results and Discussion

Findings indicated that the Pearson correlation coefficient between SPEI and SPEIbase fell within the strong correlation range (0.70 to 0.90) for most stations and catchments in Iran. The highest correlations were observed at stations in mountainous areas, such as Khorramabad (0.92), Hamedan (0.87), and Urmia (0.86) at the 12-month scale. Conversely, coastal and lowland stations like Bandar Abbas, Ramsar, and Babolsar showed relatively weaker correlations (0.63 to 0.67) at shorter time scales. Results from the Weighted Cohen's Kappa statistic also demonstrated substantial agreement (0.60 to 0.80) in drought classification between the two indices in



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jsw.2026.97825.1527>

mountainous regions and moderate agreement (0.40 to 0.60) in lowland and coastal areas. Bland-Altman plots revealed narrow limits of agreement and random scatter of points around the mean line, indicating no significant systematic bias. A key finding was the increase in correlation and agreement with increasing time scale; the highest agreement was observed at 9 and 12-month scales (hydrological drought) and the lowest at the 1-month scale (meteorological drought). Bam station, with a mean annual precipitation of approximately 53.7 mm, exhibited the lowest correlation (0.64) and agreement (0.39) at the 12-month scale, possibly due to hyper-arid conditions and limitations of evapotranspiration estimation methods in such climates. Constructed violin plots confirmed the concentration of correlation and kappa coefficients at higher ranges with increasing time scale.

Conclusion

The SPEIbase database demonstrates suitable accuracy for drought monitoring across Iran's catchments and shows high concordance and agreement with station-based data in many regions, particularly mountainous areas. As the time scale increases from 1 to 12 months, correlation and agreement improve, indicating higher reliability of this database for monitoring agricultural and hydrological droughts. In coastal and lowland regions, especially at shorter time scales, caution is recommended when using this database. Given its extensive spatial coverage, appropriate temporal resolution, and free accessibility, SPEIbase can serve as a reliable alternative to station-based data in data-sparse regions or areas with incomplete records. It is suggested that future research calculate station-based SPEI using the FAO-56 Penman-Monteith method to evaluate the impact of the evapotranspiration estimation method on the level of agreement with SPEIbase.

Acknowledgement

The authors would like to thank the Iran Meteorological Organization (IRIMO) for providing the meteorological data used in this research free of charge.

Keywords: Bland and Altman plot, Degree of agreement, Drought, Pearson's correlation coefficient, Weighted Cohen's Kappa

ارزیابی قابلیت اطمینان داده‌های شبکه‌بندی شاخص استاندارد شده بارش - تبخیر و تعرق در حوضه‌های آبریز ایران

نادیا پودینه^۱ - حمید نظری پور^{۱*} - محمود خسروی^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۳۰

چکیده

شاخص استاندارد شده بارش - تبخیر و تعرق (SPEI)، از پرکاربردترین شاخص‌های ارزیابی خشکسالی در سطح جهان به شمار می‌رود. این شاخص، از متغیرهای بارش و دما (به منظور تخمین تبخیر و تعرق) به عنوان داده‌های ورودی خود برای ارزیابی خشکسالی استفاده می‌کند و به این ترتیب به عنوان یک شاخص دومتغیره خشکسالی شناخته می‌شود. محدودیت دسترسی به داده‌های ایستگاهی بلندمدت و یکنواخت در گستره‌هایی با پیچیدگی ناهمواری و تنوع اقلیمی زیاد (به مانند ایران)، چالش جدی برای پایش دقیق شرایط خشکسالی ایجاد می‌کند. در این راستا، پایگاه داده شبکه‌بندی شده جهانی از این شاخص (SPEIbase) مبتنی بر تلفیق داده‌های ماهواره‌ای، مدل‌های اقلیمی و داده‌های اندازه‌گیری شده، توسعه داده شده است. بنابراین، این پژوهش به بررسی سطح توافقی بین SPEI و SPEIbase به عنوان ابزارهای ارزیابی خشکسالی در مقیاس‌های زمانی ۱، ۳، ۶ و ۱۲ ماهه متمرکز است تا قابلیت اطمینان به جایگزینی آن را به دلیل وضوح زمانی و مکانی بالا و دسترسی سریع‌تر فراهم نماید. ارزیابی میزان هماهنگی و توافقی بین SPEI و SPEIbase از طریق آزمون همبستگی خطی پیرسون، آزمون وزن‌دار کاپای کوهن و نمودار بلند-آلتمن انجام گرفته است. شاخص SPEI بر مبنای داده‌های بارش و دمای مقیاس ماهانه از ۴۳ ایستگاه هواشناسی ایران در دوره ۱۹۸۶ تا ۲۰۲۳ و بر پایه برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل مبتنی بر معادله تورنتویت محاسبه شده است. شاخص SPEIbase نیز که بر مبنای مجموعه داده‌های سری زمانی اقلیمی نسخه ۴/۰۹ واحد تحقیقات اقلیمی و بر پایه برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل مبتنی بر معادله پنمن - مانتیث فائو ۵۶، محاسبه شده برای دوره مشابه استخراج شده است. یافته‌ها بیانگر ضریب همبستگی قوی و توافقی زیاد بین SPEI و SPEIbase در اکثر مناطق ایران است. به طور کلی، میزان همبستگی از مقیاس‌های کوتاه‌تر (۱ و ۳ ماهه) به مقیاس‌های بلندتر (۶ و ۱۲ ماهه) افزایش دارد. به عنوان یافته کلی، SPEIbase در بسیاری از مناطق ایران، به ویژه در نواحی کوهستانی، قابلیت جایگزینی برای داده‌های ایستگاهی را دارا می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: آزمون وزن‌دار کاپای کوهن، خشکسالی، درجه توافقی، ضریب همبستگی پیرسون، نمودار بلند-آلتمن

مقدمه

خشکسالی برای پایش و تعیین کمیت شدت، مدت، فراوانی و گستره مکانی خشکسالی در مقیاس‌های منطقه‌ای و به‌ویژه محلی ضروری هستند. سیستم‌های پایش خشکسالی سامانه‌های اطلاعاتی بی‌درنگ هستند که بر داده‌های شدت خشکسالی متمرکز شده‌اند. آنها برای تعیین شروع و توسعه خشکسالی و تعیین میزان فضایی خشکسالی در هر زمان مفید هستند (Vicente-Serrano et al., 2022). با توجه به تغییرات اقلیمی و افزایش وقوع رخداد‌های حدی مانند خشکسالی‌های شدید،

خشکسالی یکی از پیچیده‌ترین و مخرب‌ترین بلایای طبیعی در سطح جهان بوده و ویرانی زیست‌محیطی و اقتصادی در مناطق مختلف جهان به بار آورده است. خشکسالی به دلیل تأثیرات ناشی از تعامل میان کاهش بارندگی و تقاضای انسانی برای تأمین آب شناخته شده است (Bisht et al., 2023). مجموعه داده‌های با وضوح بالا از معیارهای

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

(*)- نویسنده مسئول: (Email: h.nazaripour@gep.usb.ac.ir)

(Peña-Gallardo et al., 2019; Ahmadalipour et al., 2017). محاسبه SPEI در سطح ایستگاه‌های هواشناسی، نیازمند داده‌های زمانی با دقت بالا شامل بارش ماهانه و دمای هوا (به‌منظور تخمین تبخیر و تعرق) است. در کشورهای گسترده و با تنوع اقلیمی زیاد مانند ایران، محدودیت دسترسی به داده‌های ایستگاهی بلندمدت و یکنواخت، به‌ویژه در مناطق کم‌برخوردار، چالشی جدی در پایش دقیق شرایط اقلیمی ایجاد می‌کند (Raziei et al., 2009). در این راستا، استفاده از پایگاه‌های داده شبکه‌بندی شده جهانی مانند SPEIbase که مبتنی بر تلفیق داده‌های ماهواره‌ای، مدل‌های اقلیمی و داده‌های اندازه‌گیری شده هستند، به‌عنوان جایگزینی مناسب برای نواحی فاقد داده‌های کافی مطرح می‌گردد. با این وجود، دقت این پایگاه داده در مناطق مختلف، خصوصاً در اقلیم‌های خشک، نیمه‌خشک، و کوهستانی ایران، ممکن است متفاوت باشد. بنابراین، ارزیابی عملکرد شاخص SPEI استخراج‌شده از پایگاه‌های شبکه‌بندی شده در مقایسه با داده‌های ایستگاهی، گامی ضروری برای اطمینان از کارایی این منابع در تحلیل‌های منطقه‌ای و تصمیم‌گیری‌های مدیریتی محسوب می‌شود (Nikdad et al., 2023).

چندین پایگاه داده مربوط به پایش خشکسالی در سطح جهانی تهیه شده است. با این حال، شاخص‌های خشکسالی جهانی کنونی تنها با وضوح فضایی درشت‌تر (بیش از ۵۰ کیلومتر) در دسترس هستند (Gebrechorkos et al., 2023). در این بین پایگاه داده شبکه‌بندی شده خشکسالی شاخص استاندارد تبخیر-بارش (SPEI) یک از پایگاه‌های داده با وضوح بالا، می‌باشد که دوره‌ای به نسبت طولانی از ۱۹۸۱ تا ۲۰۲۴ را پوشش می‌دهد. این پایگاه داده بر اساس بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل ماهانه از واحد تحقیقات دانشگاه انگلیای شرقی است که از ژانویه ۱۰۹۱ شروع و به محض دسترسی به داده‌های جدید، بروز می‌شود. پایگاه داده SPEI بر اساس تخمین تبخیر و تعرق پتانسیل از معادله پنمن - مانتیث (FAO-56) است. این یک تفاوت عمده با توجه به پایش خشکسالی جهانی SPEI است که از معادله تورنت‌ویت برای برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل استفاده می‌کند. روش پنمن - مانتیث یک روش برتر در برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل در نظر گرفته می‌شود و بنابراین SPEIbase برای اکثر موارد از جمله تجزیه و تحلیل اقلیم‌شناسی طولانی‌مدت توصیه می‌شود. استفاده از جدیدترین نسخه این پایگاه داده توصیه می‌شود، اما همه نسخه‌های آن در دسترس هستند. SPEI v.2.11 جدیدترین نسخه این پایگاه داده است که از مجموعه داده‌های CRU TS 4.09 که دوره بین ژانویه ۱۹۰۱ تا دسامبر ۲۰۲۴ را در برمی‌گیرد، محاسبه می‌گردد.

با وجود مزیت‌های استفاده از این پایگاه‌ها برای پُرکردن خلأ داده‌ای، میزان تطابق نتایج آن‌ها با داده‌های واقعی ایستگاهی در مناطق مختلف همچنان محل تردید است (Mehran et al., 2015). عملکرد این پایگاه‌ها ممکن است تحت تأثیر شرایط اقلیمی گوناگون کشور،

استفاده از منابع داده‌ای با پوشش زمانی بلندمدت و دقت بالا بیش از پیش اهمیت یافته است (Gebrechorkos et al., 2023). پایش خشکسالی و بررسی تغییرپذیری بارش با هدف برقراری آمادگی در برابر اثرات خشکسالی و ایجاد استراتژی‌های کاهش آسیب‌پذیری سیستم‌های منابع آب هر منطقه، امری ضروری است (Ojha et al., 2021).

یکی از چالش‌های اساسی در مطالعات اقلیم‌شناسی و مدیریت منابع آب، پایش دقیق خشکسالی در مناطق مختلف جغرافیایی به‌ویژه در کشورهایی با ناهمواری پیچیده و تنوع اقلیمی زیاد مانند ایران است. خشکسالی پدیده‌ای پیچیده و چندبعدی است که ارزیابی آن تنها بر پایه یک متغیر (بارش) کافی نیست؛ چرا که تبخیر و تعرق نیز نقش تعیین‌کننده‌ای در تعیین تراز آبی مناطق دارد. در سال‌های اخیر، ابزارهای سنجش خشکسالی از طریق شاخص‌های اقلیمی توسعه چشم‌گیری یافته‌اند. در این میان، شاخص استاندارد شده بارش-تبخیر و تعرق (SPEI)، به‌عنوان ابزاری توسعه‌یافته برای بررسی جامع‌تر خشکسالی، در سال‌های اخیر توجه گسترده‌ای را به خود جلب کرده است. با این حال، دقت آن به شدت وابسته به کیفیت و صحت داده‌های ورودی است (Vicente-Serrano et al., 2010). این شاخص به‌دلیل در نظر گرفتن همزمان دو مؤلفه مهم بارش و تبخیر و تعرق، توانسته است دید بهتری نسبت به شدت و تداوم خشکسالی‌ها ارائه دهد. از این رو، شاخص استاندارد شده بارش-تبخیر و تعرق (SPEI) یک شاخص خشکسالی چندمقیاسی بر اساس داده‌های اقلیمی است که می‌توان از آن برای تعیین شروع، طول مدت و بزرگی شرایط خشکسالی با توجه به شرایط عادی در انواع سیستم‌های طبیعی و مدیریت شده مانند محصولات زراعی، اکوسیستم‌ها، رودخانه‌ها، منابع آبی و غیره استفاده کرد (Nazaripour et al., 2022). شاخص‌های خشکسالی باید از نظر آماری قوی بوده و به راحتی با یک روش محاسباتی واضح و قابل درک محاسبه شوند (Keyantash & Dracup, 2002). تمامی این الزامات توسط SPEI برآورده شده است (Brands et al., 2025). با این حال، یک مزیت مهم SPEI نسبت به سایر شاخص‌های خشکسالی پُرکاربرد که تأثیر تبخیر و تعرق (PET) را بر شدت خشکسالی در نظر می‌گیرند این است که ویژگی‌های چندمقیاسی آن امکان شناسایی انواع مختلف خشکسالی و اثرات آن را در زمینه گرمایش جهانی فراهم می‌کند (Manzano et al., 2019). این ویژگی به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک که تبخیر و تعرق نقش مهمی در کمبود منابع آبی دارد، اهمیت دوچندان می‌یابد. همچنین، SPEI دارای ماهیت چندمقیاسی است و می‌تواند برای تحلیل خشکسالی در بازه‌های زمانی مختلف (از یک ماهه تا چند ساله) مورد استفاده قرار گیرد، در حالی که شاخص‌هایی مانند PDSI فاقد این انعطاف‌پذیری زمانی هستند. به همین دلیل، SPEI به‌عنوان شاخصی جامع‌تر و حساس‌تر نسبت به تغییرات اقلیمی، در بسیاری از مطالعات اقلیمی و منابع آب توصیه شده است

دانشگاه انگلیای شرقی تهیه شده و از ژانویه ۱۹۰۱ آغاز شده است، و به محض در دسترس قرار گرفتن داده‌های جدید بروز رسانی می‌شود. پایگاه داده SPEIbase شامل مقادیر استاندارد شده برای پیکسل‌های خشکی است. در برخی موارد نادر که امکان دستیابی به تطابق مناسب با توزیع لجستیک - لگاریتمی وجود نداشته، که منجر به مقدار NAN (غیر عددی) در پایگاه داده شده است. پایگاه داده SPEIbase بر اساس برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل پنمن - مانیت ۵۶-FAO استوار است. این تفاوت عمده‌ای با پایش جهانی خشکسالی SPEI دارد که از برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل تورنت ویت استفاده می‌کند. روش پنمن - مونیت به عنوان روشی برتر شناخته می‌شود، بنابراین SPEIbase برای اکثر کاربردها، از جمله تحلیل‌های اقلیمی بلندمدت، توصیه می‌شود. یک نمونه نقشه جهانی از شاخص شبکه‌بندی شده SPEIbase در (شکل ۲) ارائه شده است. نسخه‌های متفاوتی از این پایگاه داده موجود می‌باشد. در این پژوهش از نسخه بروز این پایگاه داده که SPEIbase ۲.11 نامیده می‌شود، استفاده شده است. این نسخه از پایگاه داده، دوره ژانویه ۱۹۰۱ تا دسامبر ۲۰۲۴ را پوشش می‌دهد و بر مبنای مجموعه داده‌های سری‌های زمانی اقلیمی واحد تحقیقات اقلیمی CRU TC V.4.09 دانشگاه انگلیای شرقی محاسبه شده است. این مجموعه داده در https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_4.09 موجود است. این پروژه با حمایت مالی و علمی چندین نهاد مهم، از جمله شورای تحقیقات محیط‌زیست طبیعی بریتانیا (NERC) و وزارت انرژی ایالات متحده آمریکا، ایجاد شده است. پشتیبانی بلندمدت این مجموعه داده اقلیمی در حال حاضر توسط مرکز ملی علوم جوی بریتانیا (NCAS) تأمین می‌شود.

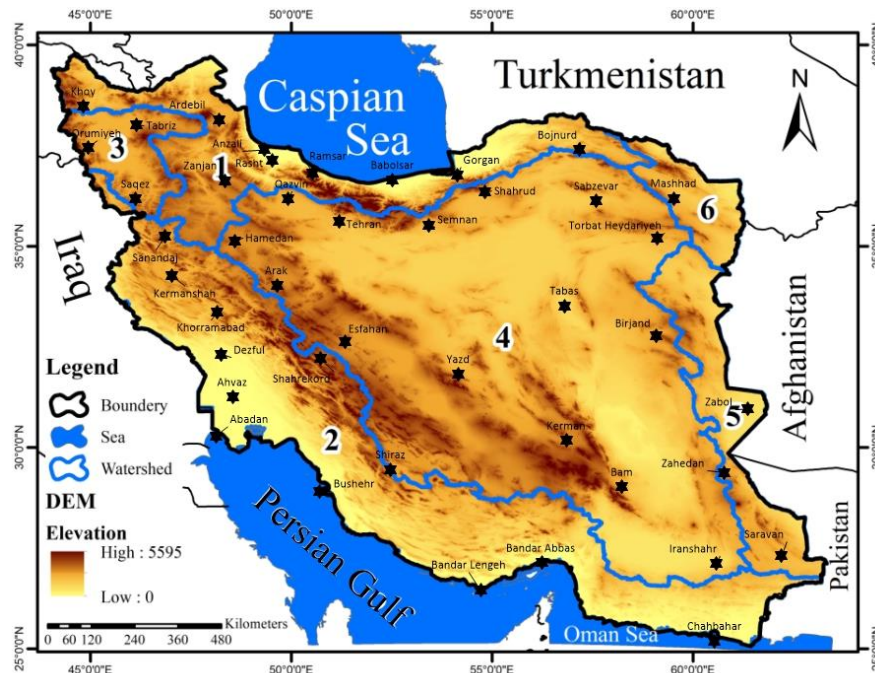
با بهره‌گیری از تابع `inpolygon` در محیط برنامه‌نویسی متلب، یاخته‌های موجود در گستره ایران استخراج شده‌اند (شکل ۲). با اعمال مرز بین‌المللی، تعداد ۶۲۱ یاخته در درون قلمرو ایران قرار گرفت. بنابراین، یک پایگاه داده جدید به ابعاد `SPEIbase456x621` ایجاد گردید. در این پایگاه داده، سطرها بیانگر زمان و ستون‌ها بیانگر یاخته (مکان) می‌باشند. از آن‌جا که شاخص SPEIbase دارای ویژگی چند مقیاسی می‌باشد، مقیاس‌های ۱، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ بر اساس مرور منابع انتخاب گردیدند. استخراج SPEIbase برای ایستگاه‌های هواشناسی با میانگین حداکثر نه نقطه پیرامونی ایستگاه هواشناسی انتخاب شده است. به گونه‌ای که ایستگاه هواشناسی در مرکز این نقاط قرار بگیرد. تعداد یاخته‌های مورد استفاده در ایستگاه‌های هواشناسی واقع در مرزها کاهش می‌یابد. ملاحظات هیدرواقلیمی مانند حوضه‌های آبریز و شرایط توپوگرافی نیز در انتخاب تعداد یاخته‌ها تأثیرگذار بوده است.

مانند اقلیم خشک مناطق مرکزی ایران، یا اقلیم کوهستانی، دچار نوسان شود. از این‌رو، ارزیابی دقت پایگاه SPEIbase در مقایسه با داده‌های زمینی در حوضه‌های آبریز مختلف، گامی حیاتی برای افزایش اعتمادپذیری این داده‌ها در تصمیم‌گیری‌های مدیریتی، مدل‌سازی‌های اقلیمی و برنامه‌ریزی منابع طبیعی به شمار می‌آید. عمده تحقیقات در سالیان اخیر پیرامون ارزیابی پایگاه‌های جهانی بارش شبکه‌بندی شده صورت گرفته است (Imran et al., 2023; Satge et al., 2020). با این وجود، تحقیقات بسیار کمی به ارزیابی دقت پایگاه‌های شبکه‌بندی خشکسالی پرداخته است. در مجموع، خلأ دانش در زمینه ارزیابی دقت پایگاه‌های داده جهانی خشکسالی مانند SPEIbase در مناطق متنوع اقلیمی ایران، از اصلی‌ترین انگیزه‌های انجام این پژوهش به شمار می‌رود. علی‌رغم مزایای بالقوه این پایگاه‌ها در پوشش گسترده و در دسترس بودن داده، عدم شناخت کافی از میزان دقت و قابلیت اعتماد آن‌ها در سطوح محلی، تصمیم‌گیری‌های مدیریتی را با چالش مواجه می‌کند. این پژوهش، با هدف ارزیابی دقت پایگاه SPEIbase عملکرد آن در بازتاب شرایط واقعی خشکسالی در حوضه‌های آبریز مختلف ایران و تحت اقلیم‌های متنوع مورد بررسی قرار دهد تا قابلیت اطمینان آن برای استفاده در مطالعات آینده سنجیده شود.

داده و روش‌شناسی

داده‌های این پژوهش، دو دسته می‌باشند. ۱) دسته نخست شامل سری‌های زمانی مجموع بارندگی ماهانه و میانگین دمای ماهانه از تعداد ۴۳ ایستگاه هواشناسی در دوره ۱۹۸۶ تا ۲۰۲۳ می‌باشند. این داده‌ها با درخواست کتبی از آرشیو سازمان هواشناسی کشور تهیه شده‌اند. این دوره زمانی بیشترین بازه زمانی مشترک برای داده‌های دما و به‌ویژه بارش ثبت شده در ایستگاه‌های هواشناسی ایران است. از طرف دیگر، این بازه زمانی دارای کمترین داده گمشده در سری‌های زمانی دما و بارش می‌باشد. اطلاعات مربوط به ایستگاه‌ها در (جدول ۱) و موقعیت جغرافیایی آن‌ها به همراه حوضه‌های آبریز شش‌گانه ایران در (شکل ۱) نمایش داده شده است.

دسته دوم داده‌ها شامل داده‌های شبکه‌بندی شده شاخص بارش - تبخیر و تعرق است که اصطلاحاً SPEIbase نامیده می‌شود. این پایگاه داده جهانی، اطلاعات بلندمدت و قابل اعتمادی درباره خشکسالی در مقیاس جهانی با قدرت تفکیک ۰/۵ درجه قوسی را ارائه می‌دهد. این پایگاه داده دارای ویژگی چند مقیاسی بوده و مقیاس‌های زمانی شاخص SPEI را بین ۱ تا ۴۸ ماه ارائه می‌کند. این داده‌ها بر اساس اطلاعات ماهانه بارندگی و تبخیر و تعرق پتانسیل از واحد تحقیقات اقلیمی



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوزه‌های آبریز ایران و ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه
Figure 1- Geographical location of Iran's catchments and studied meteorological stations

(Lweendo *et al.*, 2017). روش پنمن- مانتیت از نظر فیزیکی دقیق‌ترین و قابل اعتمادترین روش محسوب می‌گردد (Allen *et al.*, 2000). اما نیازهای داده‌ای آن (مانند دمای هوا، رطوبت نسبی، باد و تابش خالص) استفاده از آن را در مقایسه با سایر روش‌ها دشوارتر می‌سازد. مدل هارگریوز مدلی ساده‌تر است، اما همچنان به دو پارامتر هواشناسی، دما (میانگین، بیشینه و کمینه) و تابش ورودی، نیاز دارد (Tukimat *et al.*, 2012; Hargreaves & Samani, 1985). در حالی که، روش تورنتویت تنها به داده دما نیاز دارد. اگرچه روش تورنتویت به داده‌های کمتری نیاز دارد، اما در مناطقی که با شرایط جغرافیایی اولیه توسعه این روش تفاوت دارند، مقدار PET را بیش از حد برآورد می‌کند (Allen *et al.*, 1998; Tukimat *et al.*, 2012). بنابراین در این مطالعه، با توجه به محدودیت داده‌ها، از روش تورنتویت برای محاسبه تبخیر و تعرق پتانسیل به عنوان ورودی شاخص SPEI در سطح ایستگاه‌های هواشناسی استفاده می‌گردد که بر پایه میانگین ماهانه دما و عرض جغرافیایی ایستگاه هواشناسی استوار است. در حالی که، پایگاه داده شاخص SPEIbase بر اساس برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل با استفاده از روش پنمن- مانتیت FAO-56 بنا شده است (Vicente-Serrano *et al.*, 2010). در آخر شاخص SPEI، که حاصل تفاوت بین بارش (P) و PET ماهانه است، با استفاده از معادله (۱) به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

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

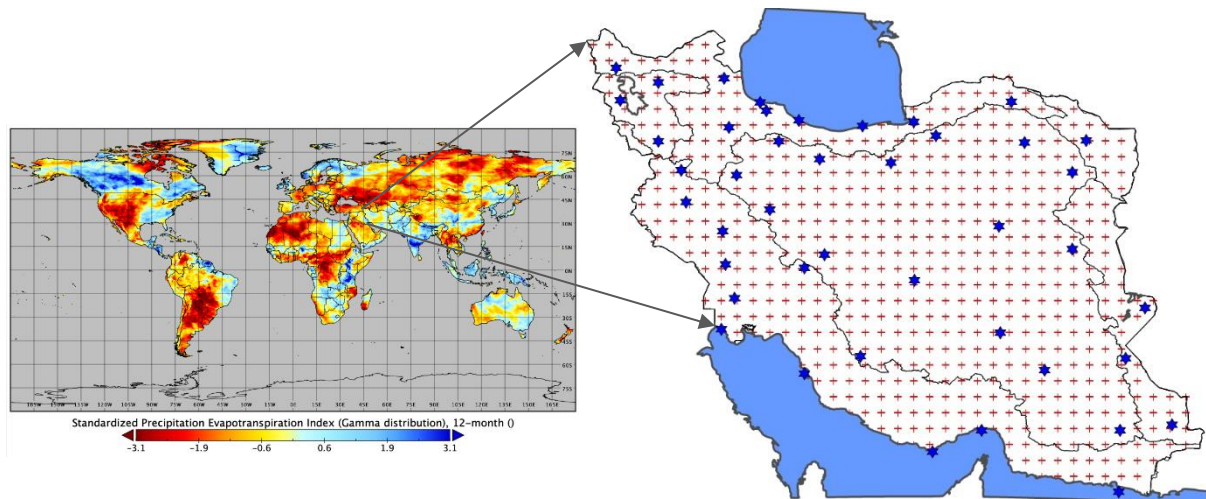
شاخص استاندارد شده بارش- تبخیر و تعرق با وجود مقبولیت گسترده‌تر، شاخص استاندارد شده بارش (SPI) از بین تمامی شرایط جوی که بر شدت خشکسالی تأثیر می‌گذارند، تنها بارش را در نظر می‌گیرد. شرایط جوی که ممکن است بر وقوع و شدت خشکسالی تأثیر بگذارند شامل بارندگی، دما، سرعت باد و رطوبت می‌باشد. برای اطمینان از شمول یک عنصر جوی دیگر در محاسبات، شاخص استاندارد شده بارش- تبخیر و تعرق (SPEI)، توسط (Vicente-Serrano *et al.*, 2010) ارائه شده است. شاخص SPEI به روشی مشابه SPI محاسبه می‌گردد، اما تغییرات دما را به عنوان بخشی از تحلیل‌های خود لحاظ می‌کند (Lweendo *et al.*, 2017). این شاخص، سادگی، ماهیت چند زمانه‌ای و قابلیت تفسیر آماری شاخص SPI را حفظ نموده و در عین حال توانسته است معیاری جامع‌تر برای سنجش تغییرپذیری اقلیم در یک منطقه ارائه دهد (Tefera *et al.*, 2019). درج تبخیر و تعرق پتانسیل (PET) موجب ایجاد تفاوت محسوسی در مقادیر شاخص می‌شود که تأیید می‌کند SPEI یک شاخص اساساً متفاوت نسبت به SPI ارائه می‌دهد. در نتیجه، SPEI به عنوان جایگزینی برای SPI جهت کمی‌سازی انحراف از نرمال در تراز آب اقلیمی تجمعی و با لحاظ تبخیر و تعرق پتانسیل پیشنهاد می‌شود (Stagge *et al.*, 2015).

معادلات متعددی برای مدل‌سازی تبخیر- تعرق پتانسیل وجود دارد (از قبیل معادله تورنتویت، معادله پنمن- مانتیت، معادله هارگریوز و غیره). با این حال، شاخص SPEI به هیچ معادله خاصی وابسته نیست

جدول ۱- مشخصات اقلیمی و ارتفاعی ایستگاه‌های هواشناسی مورد مطالعه

Table 1- Climatic and altitude characteristics of the studied meteorological stations

ردیف NO.	ایستگاه Station	ارتفاع Elev (m)	بارش P (mm)	دما T (C)	ردیف NO.	ایستگاه Station	ارتفاع Elev (m)	بارش P (mm)	دما T (C)
1	آبادان Abadan	6.6	149.69	26.51	23	مشهد Mashhad	922.2	236.79	15.75
2	اهواز Ahvaz	22.5	215.87	26.42	24	ارومیه Urmia	1328	311.78	11.79
3	اراک Arak	1702.8	300.15	14.23	25	قزوین Qazvin	1279.1	306.31	14.55
4	اردبیل Ardabil	1335.2	272.18	9.63	26	رامسر Ramsar	-20	1249.94	16.83
5	بابلسر Babolsar	-21	906.68	17.90	27	رشت Rasht	-8.6	1308.08	16.73
6	بم Bam	1066.9	53.70	24.15	28	سبزوار Sabzvar	962	180.47	18.51
7	انزلی Anzali	23.6	1743.44	16.88	29	سنندج Sanandaj	1373.4	385.82	14.30
8	بندر لنگه Bandar Lengeh	22.7	121.17	27.26	30	سقز Saqez	1522.8	453.07	11.11
9	بندرعباس Bandar Abbas	9.8	161.90	27.16	31	سراوان Saravan	1182	107.98	22.39
10	بیرجند Birjand	1491	151.31	16.67	32	سمنان Semnan	1127	132.04	18.66
11	بجنورد Bojnurd	1150	248.09	13.58	33	شهرکرد Sharkurd	2048.9	314.59	11.43
12	بوشهر Bushher	9	251.76	25.44	34	شاهرود Shahrud	1325.2	150.83	15.44
13	چابهار Chabahar	8	122.79	26.54	35	شیراز Shiraz	1488	314.32	18.56
14	دزفول Dezful	143	395.28	24.57	36	طیس Tabas	711	79.53	23.03
15	اصفهان Isfahan	1551.9	128.55	17.09	37	تبریز Tabriz	1361		13.44
16	گرگان Gorgan	2	498.79	18.01	38	تهران Tehran	1191		18.38
17	همدان Hamedan	1740.8	303.71	11.90	39	تربت حیدریه Torbat heydarieh	1451		14.50
18	ایران شهر Iranshahr	591.1	105.96	27.20	40	یزد Yazd	1230.2		20.29
19	کرمان Kerman	1754	124.14	16.55	41	زابل Zabol	489.2		22.87
20	کرمانشاه Kermanshah	1318.5	411.35	15.37	42	زاهدان Zahedan	1370		19.10
21	خرم‌آباد Khorramabad	1147.8	479.31	17.04	43	زنجان Zanjan	1659.4		11.58
22	خوی Khoy	1103.4	263.87	12.85					



شکل ۲- نقشه جهانی نمونه از شاخص SPEIbase (سمت چپ) و موقعیت یاخته‌های استخراجی از آن برای ایران (سمت راست)
Figure 2- Global map of the SPEIbase sample (left) and the location of extracted cells from it for Iran (right).

جدول ۲- معیارهای طبقه‌بندی برای شاخص‌های خشکسالی SPEI و SPEIbase

Table 2- Classification criteria for SPEI and SPEIbase

رده	شرح	رده ترتیبی	مقادیر SPEI و SPEIbase
Catagory	Description	Ordinal class	SPEI and SPEIbase values
W3	ترسالی بسیار شدید Extremely wet	8	> 2.00
W2	ترسالی شدید Very wet	7	1.5 to 1.99
W1	ترسالی متوسط Moderately wet	6	1.00 to 1.49
W0	ترسالی خفیف Mildly wet	5	0 to 0.99
D0	خشکسالی خفیف Mild drought	4	0 to -0.99
D1	خشکسالی متوسط Moderate drought	3	-1.0 to -1.49
D2	خشکسالی شدید Severe drought	2	-1.5 to -1.99
D3	خشکسالی خیلی شدید Extreme drought	1	< -2.00

ع ۹ و ۱۲ ماهه با استفاده از بسته SPEI (Beguería & Vicente-
Serrano, 2023) در نرم‌افزار R محاسبه گردیده است. طبقه‌بندی
شاخص SPEI و SPEIbase در (جدول ۲) ارائه شده است.

ارزیابی رابطه خطی بین SPEI و SPEIbase

آزمون رابطه خطی بین SPEI و SPEIbase با استفاده از ضریب
همبستگی پیرسون که ضریب همبستگی گشتاوری نیز نامیده می‌شود،
انجام شد. به نقل از گیوارینا (Giavarina, 2015) ضریب همبستگی
پیرسون پیرسون، رایج‌ترین تکنیک آماری است که برای نشان دادن

که در آن، PET ماهانه با استفاده از معادله تورنت‌ویت (معادله ۲)
به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$PET = 1.6K \left(\frac{10T}{I} \right)^m \quad (2)$$

که در آن PET تبخیر و تعرق پتانسیل ماهانه، T دمای میانگین و
I شاخص گرمایی است که از مجموع ۱۲ مقدار شاخص ماهانه محاسبه
می‌گردد. m یک ضریب وابسته به شاخص گرمایی و K نیز یک فاکتور
تصحیح است که بر اساس ماه و عرض جغرافیایی محاسبه می‌گردد
(Vicente-Serrano et al., 2010).

بر اساس این مفهوم، شاخص SPEI در مقیاس‌های زمانی ۱، ۳،

آماره کاپای کوهن

ارزیابی میزان توافق بین دو یا چند روش سنجش، در رشته‌های مختلف رایج است (Gwet, 2008). آماره کاپا برای اندازه‌گیری توافق در مقیاس اسمی بین جفت‌روش‌های سنجش معرفی شده است (Fleiss, 1971). هنگام ارزیابی میزان توافق بین روش‌ها، آزمون‌های توافق میان دو یا چند روش باید شامل آماری باشد که امکان توافق یا عدم توافق صرفاً بر اساس شانس را در نظر بگیرد. با توجه به اینکه آماره کاپا قابلیت رفع این مسئله را دارد، به‌عنوان یکی از رایج‌ترین آماره‌ها برای این منظور گزارش شده است (Viera & Garrett, 2005). آماره کاپا را می‌توان از کاپای کوهن (Cohen, 1960) و یا کاپای فلیس (Fleiss, 1971) محاسبه کرد. کاپای کوهن برای ارزیابی میزان توافق، زمانی به کار می‌رود که یا دو روش سنجش با یک آزمون واحد وجود داشته باشد، یا یک روش سنجش با دو آزمون؛ در حالی که کاپای فلیس توسعه‌یافته کاپای کوهن برای سه ارزیاب (اندازه‌گیری) یا بیشتر است (Tefera et al., 2019). علاوه بر این، فرض حاکم بر کاپای کوهن این است که روش‌های سنجش به‌طور هدفمند انتخاب و ثابت در نظر گرفته می‌شوند، اما در کاپای فلیس، فرض بر این است که روش‌های سنجش به‌طور تصادفی از یک جمعیت بزرگ‌تر انتخاب شده‌اند. از این رو، بر اساس این مفروضات، آماره کاپای کوهن برای این مطالعه مناسب تشخیص داده شد و به‌منظور آزمون میزان توافق بین SPEI و SPEIbase به‌عنوان ابزارهای ارزیابی خشکسالی مورد استفاده قرار گرفت. اما از آنجاکه آماره کاپا با داده‌های ترتیبی یا اسمی به خوبی عمل می‌کند، مقادیر پیوسته هر یک از روش‌های سنجش (یعنی SPEI و SPEIbase) به داده‌های ترتیبی (با ۸ طبقه) تبدیل شدند، همان‌طور که در (جدول ۲) نشان داده شده است. سپس داده‌های تبدیل‌شده هر روش سنجش برای محاسبه میزان توافق با استفاده از آماره کاپای کوهن به کار گرفته شد.

میزان همبستگی قوی جفت‌متغیرها با یکدیگر به کار می‌رود. دامنه ضریب همبستگی پیرسون بین مثبت یک (رابطه خطی مثبت کامل) تا منفی یک (رابطه خطی منفی کامل) متغیر است (جدول ۳). مقدار صفر نشان‌دهنده عدم وجود هرگونه رابطه خطی بین متغیرها است (Adler & Parmryd, 2010). استفاده از ضریب همبستگی پیرسون پیرسون برای توصیف میزان توافق بین متغیرها می‌تواند گمراه‌کننده باشد (Bland & Altman, 2010). از این رو، در مطالعه حاضر، ضریب همبستگی پیرسون صرفاً برای آزمون قدرت و جهت رابطه خطی بین دو شاخص خشکسالی در هر مقیاس زمانی مورد استفاده قرار گرفته است.

عبارت ریاضی ضریب همبستگی پیرسون، که با r نشان داده می‌شود بین SPEI و SPEIbase که به‌ترتیب با متغیرهای X و Y نمایش داده شده‌اند، به‌صورت زیر است (رابطه ۳):

$$r = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2 \sum (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (3)$$

که X_i و Y_i به‌ترتیب نشان‌دهنده داده‌های نقطه‌ای در مجموعه داده‌های مربوط به متغیرهای X (SPEI) و Y (SPEIbase) می‌باشند. $\bar{X}$ و $\bar{Y}$ نیز به‌ترتیب میانگین (میانگین حسابی) مجموعه داده‌های متغیرهای X (SPEI) و Y (SPEIbase) می‌باشند. صورت کسر نمایان‌گر کوواریانس بین SPEI و SPEIbase بوده که میزان تغییرات همزمان این دو متغیر را اندازه‌گیری می‌کند. مخرج کسر حاصل‌ضرب انحراف معیارهای SPEI و SPEIbase بوده که نشان‌دهنده پراکندگی (تغییرپذیری) هر متغیر به‌صورت جداگانه است.

ارزیابی توافق میان SPEI و SPEIbase

جدول ۳- تفسیر مقادیر ضریب همبستگی پیرسون (Schober et al., 2018)

Table 3- Interpretation of Pearson Correlation Coefficient values (Schober et al., 2018)

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

وزن دار است. چنانچه تعداد طبقات (r) برابر ۲ باشد، کاپای ساده، کاپای خطی و کاپای مربعی در آن صورت هم مقدار (برابر) می شوند. مقادیر کاپا معمولاً از ۱- تا ۱+ متغیر است. مقادیر بالای کاپا نشان دهنده سطوح توافق قوی تر است. هنگامی که کاپا برابر با ۱ باشد، توافق کامل وجود دارد؛ کاپای برابر با صفر نشان می دهد که توافق به اندازه ای است که صرفاً بر اساس شانس انتظار می رود؛ و کاپای کمتر از صفر بیانگر توافقی ضعیف تر از حد مورد انتظار بر اساس شانس است؛ این حالت به ندرت رخ می دهد (جدول ۴).

نمودار بلند-آلتمن

به طور کلی درست است که هیچ دو روش متفاوتی نمی توانند دقیقاً نتیجه یکسانی ارائه دهند، به گونه ای که در هیچ نقطه ای تفاوتی در مقادیر خود نداشته باشند (Bland & Altman, 2010). از این رو، هنگام مقایسه میان روش ها، هدف آن است که دانسته شود نتایج دو روش تا چه میزان با یکدیگر تفاوت دارند. نمودار بلند-آلتمن، که از آن با عنوان نمودار اختلاف یا تفاوت نیز یاد می شود، بینشی در مورد سطح توافق میان روش ها فراهم می کند. این یک روش گرافیکی انتخابی به منظور مقایسه دو اندازه گیری بوده و در آن تفاوت بین جفت مقادیر بر روی محور y در برابر میانگین همان جفت مقادیرها بر روی محور x نمایش داده می شود. این نمودار حدود توافق را تعیین می کند و با محاسبه میانگین و انحراف معیار تفاوت ها، میزان توافق میان دو اندازه گیری کمی را به صورت عددی بیان می کند؛ موضوعی که به درک دامنه توافق بین روش ها کمک می کند (Giavarina, 2015; Watson & Petrie, 2010).

برخلاف کاپای ساده که تمامی عدم توافقات را به یک اندازه در نظر می گیرد، کاپای وزن دار با اختصاص وزن های متفاوت به درجات مختلف عدم توافق، شدت انحراف بین طبقات را نیز در محاسبه لحاظ می کند. این ویژگی برای متغیرهای ترتیبی مانند طبقات خشکسالی که فاصله بین آن ها از نظر معنایی یکسان نیست، مناسب تر بوده و تخمین واقع بینانه تری از میزان توافق ارائه می دهد (Warrens, 2013). فرض کنید r بیانگر تعداد طبقات و $\pi_{ij} = (i, j = 1, 2, \dots, r)$ بیانگر نسبت آزمودنی های باشد که به ترتیب توسط ارزیابی اول در طبقه i و ارزیابی دوم در طبقه j طبقه بندی شده اند. کاپای کوهن غیروزی (ساده) از طریق زیر محاسبه می گردد:

$$\kappa = \frac{O - E}{1 - E} = \frac{\sum_{i=1}^r \pi_{ii} - \sum_{j=1}^r \pi_j + \pi + j}{1 - \sum_{j=1}^r \pi_j + \pi + j} \quad (4)$$

که در آن، $O = \sum_{i=1}^r \pi_{ii}$ توافق مشاهده شده نسبی بین ارزیابان و $E = \sum_{j=1}^r \pi_j + \pi + j$ احتمال فرضی توافق شانس است. فرض کنید 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 وزن دار معمولاً به صورت زیر تعریف می شود:

$$\kappa_w = \frac{O_w - E_w}{1 - E_w} = \frac{\sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r w_{ij} \pi_{ii} - \sum_{j=1}^r \sum_{i=1}^r w_{ij} \pi_i + \pi + j}{1 - \sum_{j=1}^r \sum_{i=1}^r w_{ij} \pi_i + \pi + j} \quad (5)$$

که در آن، $O_w = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r w_{ij} \pi_{ii}$ توافق مشاهده شده وزن دار بین ارزیابان و $E_w = \sum_{j=1}^r \sum_{i=1}^r w_{ij} \pi_i + \pi + j$ توافق مورد انتظار

جدول ۴- تفسیر مقادیر آماره کاپای کوهن وزن دار (Landis & Koch, 1977)
Table 4- Interpretation Cohen's weighted kappa (Landis & Koch, 1977)

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

نتایج و بحث

مقدار ضریب همبستگی خطی پیرسون برای ارزیابی میزان همخوانی و هماهنگی بین دو شاخص SPEI و SPEIbase از طریق برنامه‌نویسی در محیط نرم‌افزار R-Studio انجام گرفته است. این ضریب همبستگی برای هر یک از مقیاس‌های زمانی ۱، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه انجام گرفته است. نمونه‌ای از خروجی این محاسبات در (شکل ۳) برای ایستگاه نمونه (مشهد) نمایش داده شده است. نتایج عددی این محاسبات در جدول‌های ۵ تا ۹ به تفکیک مقیاس‌های زمانی آورده شده است. مازاد بر این، بیان تصویری مقایسه سری‌های زمانی از شاخص SPEI و SPEIbase نیز مقیاس‌های زمانی متناظر، انجام شده است. نمونه‌ای از خروجی این محاسبات در (شکل ۴) برای ایستگاه نمونه (مشهد) نمایش داده شده است. ضریب کاپای کوهن وزن‌دار جهت ارزیابی میزان توافق بین وضعیت‌های خشکسالی منتج از شاخص‌های SPEI و SPEIbase نیز از طریق برنامه‌نویسی در محیط نرم‌افزار MATLAB برای هر یک از مقیاس‌های زمانی ۵ گانه انجام گرفته است. نتایج عددی این محاسبات نیز در (جدول ۵)، (جدول ۶)، (جدول ۷)، (جدول ۸) و (جدول ۹) به تفکیک مقیاس‌های زمانی آورده شده است. بیان گرافیکی تحلیل توافق نیز از طریق ترسیم نمودارهای بلند-آلتمن در در محیط نرم‌افزار MATLAB فراهم شده است. نمونه‌ای از خروجی نمودارهای تفاوت در (شکل ۵) برای ایستگاه نمونه (مشهد) نمایش داده شده است. چنانچه در این نمودارها، نقاط به‌طور تصادفی و بدون الگوی خاص در اطراف خط میانگین پراکنده باشند، نشانه‌ای از توافق توافق خوب بین شاخص‌های SPEI و SPEIbase در نمایش وضعیت خشکسالی می‌باشد. علاوه بر این، خط میانگین اختلاف‌ها (بایاس) نیز نبایستی صفر باشد. زیرا همان‌طور که قبلاً بیان شد هیچ دو روش متفاوت، نمی‌توانند دقیقاً نتیجه یکسانی ارائه دهند.

با این حال، این که چه میزان تفاوت میان روش‌ها قابل قبول بوده و به‌عنوان توافق در نظر گرفته شود، موضوعی است که به قضاوت شخصی بستگی دارد (Bland & Altman, 2010).

مراحل تولید نمودار بلند-آلتمن با جایگزینی x و y به ترتیب با SPEI و SPEIbase به شرح زیر است:

۱. محاسبه اختلاف بین دو اندازه‌گیری برای هر آزمودنی (معادله ۶).

$$d_i = X_i - Y_i \quad (6)$$

که در آن X_i و Y_i اندازه‌گیری‌های حاصل از دو روش مختلف برای موضوع i می‌باشند که SPEI و SPEIbase هستند.

۲. محاسبه میانگین هر دو اندازه‌گیری برای هر موضوع (معادله ۷):

$$\bar{M}_i = \frac{X_i + Y_i}{2} \quad (7)$$

۳. رسم اختلاف‌ها ($d_i = \text{SPEI}_i - \text{SPEIbase}_i$) روی محور y و در مقابل میانگین ($\bar{M}_i = (\text{SPEI}_i + \text{SPEIbase}_i)/2$) روی محور x .

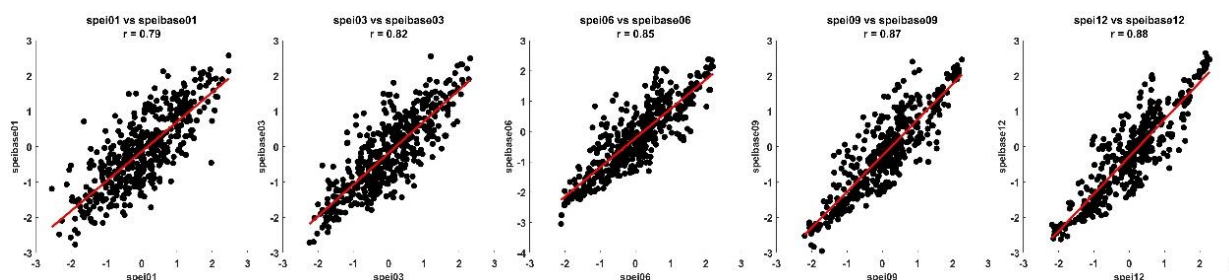
۴. محاسبه میانگین اختلاف یا آریبی (معادله ۸):

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i \quad (8)$$

۵. محاسبه انحراف معیار اختلاف‌ها (معادله ۹):

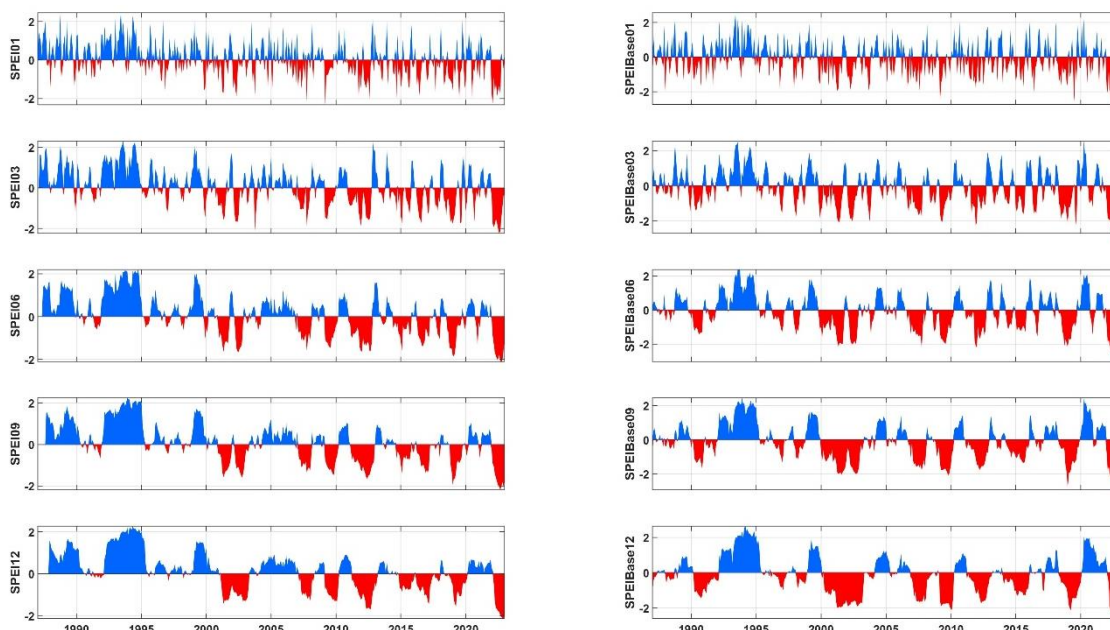
$$S_d = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2} \quad (9)$$

۶. محاسبه حدود توافق، این حدود معمولاً برابر با ± 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 به‌صورت خطوط افقی در نمودار بلند-آلتمن رسم می‌شوند.



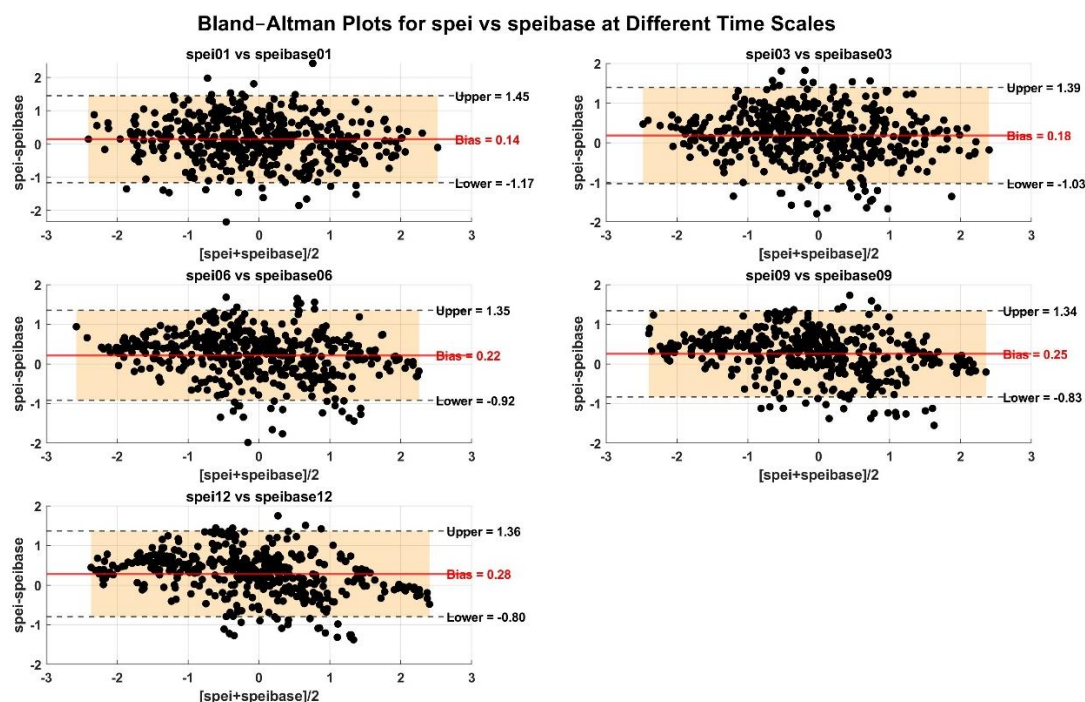
شکل ۳- مقدار ضریب همبستگی بین SPEI و SPEIbase در مقیاس‌های زمانی مختلف در ایستگاه نمونه (مشهد)

Figure 3- The correlation coefficient value between SPEI and SPEIbase at different time scales at the sample station (Mashhad)



شکل ۴- سری زمانی شاخص‌های SPEI و SPEIbase در مقیاس‌های زمانی متناظر در ایستگاه نمونه (مشهد)

Figure 4- Time series of SPEI and SPEIbase indices at corresponding time scales at the sample station (Mashhad)



شکل ۵- نمودارهای بلند-آلتمن بین SPEI و SPEIbase در مقیاس‌های زمانی متناظر در ایستگاه نمونه (مشهد)

Figure 5- Bland-Altman plots between SPEI and SPEIbase at corresponding time scales in the sample station (Mashhad)

ارتفاع زیاد) و جلگه‌ای (کم ارتفاع) می‌باشند. میزان همبستگی خطی پیروسون بین مقادیر SPEI و SPEIbase در ایستگاه‌های در مناطق کوهستانی (به‌مانند، خوی، اردبیل و زنجان) قرار دارند در تمامی مقیاس‌های زمانی همواره در محدوده همبستگی قوی قرار دارد. در

حوضه آبریز دریای خزر به‌عنوان حوضه آبریز شماره (۱) از تقسیمات حوضه‌های آبریز ایران، در نوار شمالی ایران و پُربارش‌ترین حوضه آبریز می‌باشد که نقش کلیدی در تأمین منابع آبی آن دارد. ایستگاه‌های واقع در این حوضه آبریز ترکیبی از موقعیت کوهستانی

(به‌عنوان مثال، ۱ ماهه) بیانگر خشکسالی هواشناسی، مقیاس‌های میانی (به‌عنوان مثال، ۶ ماهه) بیانگر خشکسالی کشاورزی و مقیاس‌های بلندتر (به‌عنوان مثال، ۱۲ ماهه) بیانگر خشکسالی هیدرولوژیکی می‌باشند.

مقابل، میزان همبستگی در بین ایستگاه‌های که در سواحل دریای خزر و در مناطق جلگه‌ای کم‌ارتفاع (به‌مانند، انزلی، رشت، رامسر، بابلسر و گرگان) قرار دارند اندکی کاهش یافته؛ ولیکن همواره بین دامنه همبستگی نسبتاً قوی و قوی در نوسان می‌باشد. میزان همبستگی بین شاخص‌های SPEI و SPEIbase در مقیاس‌های زمانی بلندتر نسبت به مقیاس‌های زمانی کوتاه‌تر افزایش می‌یابد. مقیاس‌های زمانی کوتاه

جدول ۵- خلاصه آزمون‌های هماهنگی و توافق بین SPEI و SPEIbase یک ماهه در حوضه‌های آبریز ایران
Table 5- Summary of correlation and agreement tests between SPEI and SPEIbase at the 1-month scale over Iranian catchments

Station ایستگاه	Catchment No. شماره حوضه	Kappa (κ^*) ضریب کاپا	Perarson (r^{**}) ضریب پیرسون	Bland-Altman (Range) دامنه بلند- آلتمن
Khoy	1	0.64	0.76	Upper= +1.51 , Lower= -1.21
Ardabil		0.58	0.71	Upper= +1.60 , Lower= -1.30
Zanjan		0.57	0.75	Upper= +1.55 , Lower= -1.19
Anzali		0.57	0.70	Upper= +1.56 , Lower= -1.38
Rasht		0.63	0.77	Upper= +1.42 , Lower= -1.25
Ramsar		0.53	0.63	Upper= +1.79 , Lower= -1.53
Babolsar		0.52	0.67	Upper= +1.79 , Lower= -1.40
Gorgan		0.52	0.66	Upper= +1.76 , Lower= -1.50
Bojnurd	2	0.54	0.67	Upper= +1.71 , Lower= -1.09
Sanandaj		0.56	0.76	Upper= +1.91 , Lower= -1.04
Kermanshah		0.61	0.78	Upper= +1.87 , Lower= -0.92
Khoramabad		0.56	0.76	Upper= +1.82 , Lower= -1.01
Dezful		0.47	0.60	Upper= +2.25 , Lower= -1.35
Ahvaz		0.56	0.72	Upper= +1.99 , Lower= -1.07
Sahrkourd		0.53	0.36	Upper= +2.02 , Lower= -1.34
Abadan		0.55	0.71	Upper= +2.01 , Lower= -1.07
Boshehr		0.54	0.60	Upper= +2.93 , Lower= -2.01
Shiraz		0.50	0.67	Upper= +2.02 , Lower= -1.25
Bandar lengheh		0.42	0.61	Upper= +2.37 , Lower= -1.13
Bandar Abbas		0.34	0.59	Upper= +2.49 , Lower= -1.21
Bandar Chabahar	3	0.44	0.63	Upper= +2.21 , Lower= -1.39
Tabriz		0.69	0.79	Upper= +1.55 , Lower= -1.08
Urmia		0.67	0.79	Upper= +1.59 , Lower= -1.08
Saqez	4	0.59	0.71	Upper= +1.79 , Lower= -1.12
Semnan		0.62	0.76	Upper= +1.65 , Lower= -1.08
Shahrud		0.58	0.69	Upper= +1.75 , Lower= -1.41
Sabzvar		0.62	0.68	Upper= +1.71 , Lower= -1.44
Torbat Heydarieh		0.63	0.75	Upper= +1.56 , Lower= -1.33
Tabas		0.56	0.74	Upper= +1.99 , Lower= -1.08
Birjand		0.52	0.72	Upper= +1.85 , Lower= -1.30
Bam		0.51	0.67	Upper= +2.17 , Lower= -1.17
Iranshahr		0.54	0.71	Upper= +1.94 , Lower= -1.26
Kerman		0.55	0.75	Upper= +2.05 , Lower= -1.00
Yazd		0.53	0.70	Upper= +2.04 , Lower= -1.07
Isfahan		0.55	0.72	Upper= +1.91 , Lower= -1.10
Hamedan		0.65	0.81	Upper= +1.51 , Lower= -0.95
Qazvin		0.64	0.77	Upper= +1.50 , Lower= -1.15
Tehran		0.64	0.76	Upper= +1.62 , Lower= -1.20
Arak		0.50	0.63	Upper= +1.99 , Lower= -1.42
Zabol	5	0.58	0.74	Upper= +1.78 , Lower= -1.13
Zahedan		0.55	0.67	Upper= +2.00 , Lower= -1.40
Saravan		0.54	0.71	Upper= +1.97 , Lower= -1.31
Mashhad	6	0.67	0.79	Upper= +1.45 , Lower= -1.17

مقیاس‌های زمانی کوتاه (۱ و ۳ ماهه) در دامنه همبستگی نسبتاً قوی و در مقیاس‌های زمانی بلندتر (۶، ۹ و ۱۲ ماهه) در دامنه همبستگی قوی قرار دارد. بنابراین، میزان همبستگی بین مقادیر SPEI و SPEIbase در ایستگاه‌های کم‌ارتفاع، عرض جغرافیایی پایین و موقعیت‌های جلگه‌ای و همچنین ایستگاه‌های بسیار مرتفع در مقیاس‌های زمانی کوتاه (خشکسالی هواشناسی و کشاورزی) چندان قوی نمی‌باشد.

نتایج آماره کاپای کوهن وزن‌دار نیز توافقی‌های متفاوت را در بیان وضعیت خشکسالی در حوضه آبریز خلیج فارس و دریای عمان نشان می‌دهد. مقادیر آماره کاپای کوهن در مقیاس‌های زمانی در دامنه متفاوت از توافق نوسان دارد. مقدار آماره کاپای کوهن در ایستگاه‌های اقلیم کوهستانی در دامنه توافق زیاد و در ایستگاه‌های اقلیم جلگه‌ای گرم در دامنه توافق متوسط قرار دارد. در ایستگاه‌های سنجند، کرمانشاه و خرم‌آباد توافق در مقیاس‌های زمانی کوتاه (۱ ماهه) در محدوده متوسط و در مقیاس‌های زمانی بلندتر (۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه) در محدوده توافق زیاد قرار دارد. وضعیت توافق بین SPEI و SPEIbase در ایستگاه‌های دزفول و اهواز در نمایش وضعیت خشکسالی هرچند در دامنه توافق متوسط قرار دارد، اما به شدت نزدیک به دامنه توافق زیاد می‌باشد. طبق نتایج نمودارهای بلند-آلتمن (محدوده بالا و پایین یعنی محدوده‌ای که انتظار می‌رود ۹۵٪ از تفاوت‌های بین مقادیر SPEI و SPEIbase در آن محدوده قرار بگیرند) نیز برای بررسی اعتبار و قابلیت اعتماد به شاخص‌های SPEI و SPEIbase نیز در **جدول ۵** تا ۹ آورده شده است. قدر مطلق دامنه بالا (اعداد مثبت) بزرگتر از مقادیر دامنه پایین می‌باشد که به معنی آن است که انحرافات مثبت بزرگ‌تر و گسترده‌تر از انحرافات منفی می‌باشد. این وضعیت در سایر حوضه‌های آبریز نیز مشهود بود. به این مفهوم که SPEIbase وضعیت‌های خفیف، متوسط و شدید خشکسالی بیان شده در شاخص SPEI را با وضعیت‌های متوسط، شدید و خیلی‌شدید بیان می‌کند.

حوضه آبریز دریاچه ارومیه به‌عنوان حوضه آبریز شماره (۳) از تقسیمات حوضه‌های آبریز ایران، در شمال‌غرب ایران و یک حوضه آبریز بسته می‌باشد. ایستگاه‌های این حوضه آبریز (تبریز، ارومیه و سقز) در موقعیت کوهستانی (ارتفاع بالای ۱۰۰۰ متر) و عرض جغرافیایی بالا قرار دارند. مقادیر ضریب همبستگی بین شاخص‌های SPEI و SPEIbase در هر سه ایستگاه هواشناسی و همچنین مقیاس‌های زمانی ۵ گانه (۱، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه) در محدوده همبستگی قوی قرار دارند. به‌عنوان نمونه، این مقادیر برای ایستگاه ارومیه، در مقیاس‌های ۱، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه به ترتیب ۰/۷۹، ۰/۸۴، ۰/۸۵، ۰/۸۵ و ۰/۸۶ می‌باشد (**جدول ۵** تا ۹). به مانند سایر حوضه‌های آبریز، میزان همبستگی در مقیاس‌های زمانی بلندتر نسبت به مقیاس‌های زمانی کوتاه‌تر افزایش می‌یابد.

مقادیر آماره کاپای کوهن وزن‌دار در راستای ارزیابی توافق بیان وضعیت خشکسالی بین SPEI و SPEIbase در مقیاس‌های زمانی در دامنه متفاوت از توافق نوسان دارد. به طور کلی، مقدار آماره کاپای کوهن در ایستگاه‌های اقلیم کوهستانی در دامنه توافق زیاد و در ایستگاه‌های اقلیم جلگه‌ای معتدل در دامنه توافق متوسط قرار دارد. این نتایج کمی توسط نمودارهای تفاوت (نشان داده نشده) نیز تقویت و تأیید می‌گردد. زیرا در همه نمودارها، نقاط به طور تصادفی و بدون الگوی خاص در اطراف خط میانگین پراکنده بوده و نشانه‌ای از توافق خوب بین دو شاخص در بیان وضعیت خشکسالی می‌باشند. خط میانگین اختلاف‌ها (بایاس) نیز صفر نبوده و نشان می‌دهد که یکی از روش‌ها به‌طور نظام‌مند بیشتر یا کمتر اندازه‌گیری می‌کند. بنابراین یک خطای نظام‌مند هرچند جزئی بین این روش اندازه‌گیری خشکسالی وجود دارد. محدوده توافق بین دو روش در تمامی مقیاس‌های اندازه‌گیری اختلاف چندان نداشت و باریک می‌باشند؛ بنابراین اختلاف چندان بین شاخص شاخص SPEI و SPEIbase در نمایش خشکسالی وجود ندارد.

حوضه آبریز حوضه آبریز خلیج فارس و دریای عمان به‌عنوان حوضه آبریز شماره (۲) از تقسیمات حوضه‌های آبریز ایران، در نوار جنوبی ایران کشیده‌ترین حوضه آبریز ایران می‌باشد. بالاترین تفاوت ارتفاعی و عرض جغرافیایی و تنوع اقلیمی را در بین سایر حوضه‌های آبریز دارا می‌باشند. ایستگاه‌های واقع در این حوضه آبریز نیز ترکیبی از موقعیت کوهستانی (ارتفاع زیاد) و جلگه‌ای (کم ارتفاع) می‌باشند. میزان همبستگی خطی پیرسون بین مقادیر SPEI و SPEIbase در ایستگاه‌های غربی حوضه با عرض جغرافیایی بالاتر (به مانند، سنجند، کرمانشاه و خرم‌آباد)، همواره در تمامی مقیاس‌های زمانی در دامنه همبستگی قوی قرار دارند. این میزان از همبستگی با افزایش مقیاس زمانی، بیشتر نیز می‌گردد؛ به گونه‌ای که این میزان همبستگی در ایستگاه خرم‌آباد در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه در محدوده همبستگی بسیار قوی قرار دارد. میزان همبستگی در مقیاس‌های زمانی کوتاه (۱ و ۳ ماهه) در ایستگاه هواشناسی شهرکرد که مرتفع‌ترین ایستگاه هواشناسی حوضه محسوب می‌گردد در دامنه همبستگی متوسط و در مقیاس‌های زمانی بلندتر (۶، ۹ و ۱۲ ماهه) در دامنه همبستگی قوی قرار داد. دلیل اُفت میزان همبستگی در ایستگاه هواشناسی شهرکرد (به‌ویژه در مقیاس‌های زمانی کوتاه) می‌تواند تابعی از ارتفاع زیاد و اقلیم برفی (Raziei, 2017) متأثر از آن باشد. میزان همبستگی بین مقادیر SPEI و SPEIbase در ایستگاه هواشناسی شیراز که از لحاظ عرض جغرافیایی در میانه حوضه آبریز قرار دارد، تقریباً در تمامی مقیاس‌های زمانی در دامنه همبستگی قوی قرار دارد. میزان همبستگی بین مقادیر SPEI و SPEIbase در ایستگاه‌های کم‌ارتفاع، عرض جغرافیایی پایین و موقعیت‌های جلگه‌ای (به مانند آبادان، بوشهر، بندر لنگه، بندر عباس و بندر چابهار) متفاوت می‌باشد. به گونه‌ای که میزان همبستگی در در

نیز بین وضعیت‌های خشکسالی در آماره کاپای کوهن وزن دار مشاهده می‌گردد. زیرا، مقادیر آماره کاپای کوهن در تمامی مقیاس‌های زمانی در دامنه $+0/6$ تا $+0/80$ بوده که بیان گر توافق زیاد می‌باشد. محدوده باریک توافق در تمامی مقیاس‌های زمانی طبق نمودارهای اختلاف نیز بررسی شده است.

مقدار آماره کاپای کوهن وزن دار به همراه خلاصه نمودارهای تفاوت، برای ارزیابی توافق در بیان وضعیت خشکسالی بین SPEI و SPEIbase در حوضه آبریز دریاچه ارومیه در مقیاس‌های زمانی متفاوت در جدول‌های ۵ تا ۹ آورده شده است. مشابه توافق قوی بین SPEI و SPEIbase در آزمون‌های همبستگی خطی پیرسون، یک توافق زیاد

جدول ۶- خلاصه آزمون‌های هماهنگی و توافق بین SPEI و SPEIbase سه‌ماهه در حوضه‌های آبریز ایران

Table 6- Summary of correlation and agreement tests between SPEI and SPEIbase at the 3-month scale over Iranian catchments

Station ایستگاه	Catchment No. شماره حوضه	Kappa (κ^*) ضریب کاپا	Perarson (r^{**}) ضریب پیرسون	Bland-Altman (Range) دامنه بلند-آلتمن
Khoy	1	0.69	0.80	Upper= +1.48 , Lower= -1.08
Ardabil		0.62	0.71	Upper= +1.67 , Lower= -1.22
Zanjan		0.66	0.81	Upper= +1.47 , Lower= -1.00
Anzali		0.58	0.69	Upper= +1.65 , Lower= -1.38
Rasht		0.67	0.75	Upper= +1.54 , Lower= -1.29
Ramsar		0.44	0.56	Upper= +2.00 , Lower= -1.66
Babolsar		0.53	0.65	Upper= +1.91 , Lower= -1.40
Gorgan		0.53	0.67	Upper= +1.78 , Lower= -1.39
Bojnurd	2	0.52	0.71	Upper= +1.73 , Lower= -1.28
Sanandaj		0.61	0.81	Upper= +1.81 , Lower= -0.84
Kermanshah		0.62	0.84	Upper= +1.71 , Lower= -0.64
Khoramabad		0.63	0.82	Upper= +1.70 , Lower= -0.79
Dezful		0.46	0.60	Upper= +2.32 , Lower= -1.31
Ahvaz		0.56	0.73	Upper= +2.03 , Lower= -1.01
Sahrkourd		0.57	0.42	Upper= +1.92 , Lower= -1.18
Abadan		0.54	0.69	Upper= +2.15 , Lower= -1.10
Boshehr		0.55	0.65	Upper= +3.03 , Lower= -2.06
Shiraz		0.55	0.70	Upper= +1.95 , Lower= -1.17
Bandar lengeh		0.49	0.69	Upper= +2.25 , Lower= -0.87
Bandar Abbas		0.41	0.64	Upper= +2.43 , Lower= -0.97
Bandar Chabahar	3	0.47	0.67	Upper= +2.17 , Lower= -1.15
Tabriz		0.72	0.82	Upper= +1.55 , Lower= -0.93
Urmia		0.62	0.84	Upper= +1.55 , Lower= -0.89
Sagez	4	0.64	0.71	Upper= +1.81 , Lower= -1.01
Semnan		0.64	0.78	Upper= +1.69 , Lower= -0.94
Shahrud		0.62	0.72	Upper= +1.75 , Lower= -1.24
Sabzvar		0.65	0.72	Upper= +1.67 , Lower= -1.29
Torbat Heydari		0.68	0.79	Upper= +1.47 , Lower= -1.17
Tabas		0.53	0.72	Upper= +2.09 , Lower= -1.00
Birjand		0.60	0.77	Upper= +1.77 , Lower= -1.06
Bam		0.45	0.65	Upper= +2.32 , Lower= -1.05
Iranshahr		0.51	0.71	Upper= +2.08 , Lower= -1.21
Kerman		0.56	0.76	Upper= +2.10 , Lower= -0.89
Yazd		0.50	0.71	Upper= +2.11 , Lower= -0.94
Isfahan		0.46	0.70	Upper= +2.01 , Lower= -1.09
Hamedan		0.66	0.84	Upper= +1.47 , Lower= -0.78
Qazvin		0.68	0.82	Upper= +1.44 , Lower= -0.99
Tehran		0.66	0.79	Upper= +1.61 , Lower= -0.99
Arak		0.53	0.64	Upper= +2.01 , Lower= -1.33
Zabol	5	0.54	0.76	Upper= +1.88 , Lower= -0.99
Zahedan		0.63	0.71	Upper= +2.02 , Lower= -1.20
Saravan		0.54	0.71	Upper= +1.95 , Lower= -1.38
Mashhad	6	0.74	0.82	Upper= +1.39 , Lower= -1.03

۵۰ میلی‌متر از جمله کم‌بارش‌ترین نقاط ایران می‌باشد و به شدت به منابع آب فرامرزی وابسته است. میزان همبستگی بین مقادیر شاخص‌های SPEI و SPEIbase در ایستگاه زابل به ترتیب، ۰/۷۴، ۰/۷۶، ۰/۸۱، ۰/۸۳ و ۰/۸۴ می‌باشد. این مقادیر برای ایستگاه هواشناسی زاهدان به ترتیب ۰/۶۷، ۰/۷۱، ۰/۷۷، ۰/۸۳ و ۰/۸۵ و برای ایستگاه هواشناسی سراوان به ترتیب ۰/۷۱، ۰/۷۱، ۰/۷۵، ۰/۸۰ و ۰/۸۳ می‌باشد. این ضرایب همبستگی در هر سه ایستگاه هواشناسی و همچنین مقیاس‌های زمانی ۵ گانه (۱، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه) در محدوده همبستگی قوی قرار دارند. میزان همبستگی بین شاخص‌های SPEI و SPEIbase در مقیاس‌های زمانی بلندتر نسبت به مقیاس‌های زمانی کوتاه‌تر افزایش می‌یابد. مشابه توافق قوی بین SPEI و SPEIbase در آزمون همبستگی خطی پیرسون، یک توافق زیاد نیز بین وضعیت‌های خشکسالی در آماره کاپای کوهن وزن‌دار مشاهده می‌گردد. زیرا، مقادیر آماره کاپای کوهن وزن‌دار در تمامی مقیاس‌های زمانی در دامنه ۰/۶+ تا ۰/۸۰+ بوده که بیان‌گر توافق زیاد می‌باشد. مقدار آماره کاپای کوهن در مقیاس‌های زمانی کوچکتر (مانند ۱ و ۳) که عمدتاً بیانگر خشکسالی هواشناسی می‌باشند در محدوده مرز توافق زیاد می‌باشد. بنابراین در حوضه آبریز مرزی شرق توافق شاخص‌های SPEI و SPEIbase در نمایش وضعیت خشکسالی‌ها (بوژه خشکسالی‌های کشاورزی و هیدرولوژیکی) زیاد می‌باشد. نمودارهای تفاوت نیز بیانگر سطح بالایی از همخوانی بین شاخص‌های SPEI و SPEIbase در حوضه آبریز مرزی شرق در تمامی مقیاس‌های مورد بررسی بوده است. بنابراین، این نمودارها این نتیجه را تقویت می‌کنند که هر دو شاخص، ارزیابی‌های قابل مقایسه‌ای از خشکسالی در حوضه آبریز مرزی شرق ارائه می‌دهند.

حوضه آبریز قره‌قوم به عنوان حوضه آبریز شماره (۶) از تقسیمات حوضه‌های آبریز ایران، کوچک‌ترین حوضه آبریز ایران و یک حوضه فرامرزی در شمال شرق می‌باشد. ایستگاه هواشناسی مشهد، نماینده این حوضه آبریز می‌باشد. میزان همبستگی بین مقادیر شاخص‌های SPEI و SPEIbase در مقیاس‌های ۱، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه به ترتیب، ۰/۷۹، ۰/۸۲، ۰/۸۵، ۰/۸۷ و ۰/۸۶ می‌باشد. این ضرایب همبستگی در محدوده همبستگی قوی قرار داشته و میزان آن از مقیاس‌های زمانی کوتاه (۱ و ۳ ماهه) به مقیاس‌های زمانی طولانی‌تر (۶، ۹ و ۱۲ ماهه) افزایش می‌یابد. مقدار آماره کاپای کوهن وزن‌دار به همراه خلاصه نمودار تفاوت، برای بیان توافق بین وضعیت خشکسالی بین SPEI و SPEIbase در حوضه آبریز قره‌قوم در مقیاس‌های زمانی متفاوت در جدول‌های ۵ تا ۹ آورده شده است.

این نمودارها بیانگر سطح بالایی از همخوانی بین شاخص‌های SPEI و SPEIbase در حوضه آبریز دریاچه ارومیه در تمامی مقیاس‌های مورد بررسی بوده است. بنابراین، نمودارهای بلند-آلتن این نتیجه را تقویت می‌کنند که هر دو شاخص ارزیابی‌های قابل مقایسه‌ای از خشکسالی در حوضه آبریز دریاچه ارومیه ارائه می‌دهند. در همه نمودارها، نقاط به‌طور تصادفی و بدون الگوی خاصی در اطراف خط میانگین پراکنده بوده؛ بنابراین اختلاف چندانی بین شاخص شاخص SPEI و SPEIbase در بیان وضعیت خشکسالی وجود ندارد.

حوضه آبریز فلات مرکزی ایران به‌عنوان حوضه آبریز شماره (۴) از تقسیمات حوضه‌های آبریز ایران، بزرگ‌ترین حوضه آبریز ایران و بیش از نیمی از مساحت کشور را شامل می‌شود. این حوضه آبریز، کم‌بارش‌ترین، گرم‌ترین و تنها حوضه آبریز کاملاً محصور ایران می‌باشد. میزان همبستگی بین مقادیر شاخص‌های SPEI و SPEIbase در اغلب ایستگاه‌های هواشناسی این حوضه آبریز در دامنه همبستگی قوی دارد. علاوه بر آن، میزان همبستگی از مقیاس‌های زمانی کوتاه (۱ و ۳) به مقیاس‌های زمانی طولانی‌تر (۶، ۹ و ۱۲) نیز افزایش می‌یابد. میزان همبستگی بین مقادیر شاخص‌های SPEI و SPEIbase در ایستگاه هواشناسی بم در مرکز فلات مرکزی ایران، در دامنه همبستگی نسبتاً قوی قرار داشته و میزان آن از مقیاس‌های زمانی کوتاه (۱ و ۳ ماهه) به مقیاس‌های زمانی طولانی‌تر (۶، ۹ و ۱۲ ماهه) بر خلاف سایر ایستگاه‌ها، کاهش می‌یابد. ایستگاه بم با میانگین بارش حدود ۵۰ میلی‌متر از جمله کم‌بارش‌ترین نقاط ایران می‌باشد. شرایط مشابه، در ایستگاه هواشناسی اصفهان نیز با درجه شدت پایین‌تر، نمود دارد. توافق در بیان وضعیت خشکسالی توسط شاخص‌های SPEI و SPEIbase در تمامی ایستگاه‌های حوضه آبریز فلات مرکزی ایران نیز در تمامی مقیاس‌های زمانی توسط آزمون کاپای کوهن وزن‌دار و نمودار بلند-آلتن بررسی و خلاصه نتایج آن در جدول‌های ۵ تا ۹ آورده شده است. نتایج آماره کاپای کوهن نیز توافق‌های متفاوت را در بین نمایش وضعیت خشکسالی در حوضه آبریز فلات مرکزی ایران نشان می‌دهد. مقادیر آماره کاپای کوهن در مقیاس‌های زمانی در دامنه متفاوت از توافق نوسان دارد. مقدار آماره کاپای کوهن در ایستگاه‌های بم، طبس، ایرانشهر، کرمان، یزد، اصفهان و اراک در دامنه توافق متوسط و در سایر ایستگاه‌ها، در دامنه توافق زیاد قرار دارد.

حوضه آبریز مرزی شرق ایران به‌عنوان حوضه آبریز شماره (۵) از تقسیمات حوضه‌های آبریز ایران، یک حوضه فرامرزی در نوار شرقی ایران یکی از حوضه‌های آبریز بسته و خشک شناخته می‌شود. ایستگاه‌های هواشناسی زابل، زاهدان و سراوان در درون این حوضه آبریز قرار دارند. ایستگاه زابل در موقعیت دشتی با میانگین بارش حدود

جدول ۷- خلاصه آزمون‌های هماهنگی و توافق بین SPEI و SPEIbase شش‌ماهه در حوضه‌های آبریز ایران

Table 7- Summary of correlation and agreement tests between SPEI and SPEIbase at the 6-month scale over Iranian catchments

Station ایستگاه	Catchment No. شماره حوضه	Kappa (κ^*) ضریب کاپا	Perarson (r^{**}) ضریب پیرسون	Bland-Altman (Range) دامنه بلند-آلتمن
Khoy	1	0.69	0.84	Upper= +1.41 , Lower= -0.92
Ardabil		0.57	0.70	Upper= +1.72 , Lower= -1.18
Zanjan		0.65	0.81	Upper= +1.50 , Lower= -0.92
Anzali		0.53	0.65	Upper= +1.74 , Lower= -1.45
Rasht		0.67	0.72	Upper= +1.63 , Lower= -1.34
Ramsar		0.36	0.50	Upper= +2.18 , Lower= -1.78
Babolsar		0.59	0.66	Upper= +1.92 , Lower= -1.36
Gorgan		0.59	0.71	Upper= +1.74 , Lower= -1.27
Bojnurd	2	0.56	0.73	Upper= +1.75 , Lower= -1.17
Sanandaj		0.64	0.82	Upper= +1.79 , Lower= -0.71
Kermanshah		0.68	0.88	Upper= +1.57 , Lower= -0.44
Khoramabad		0.68	0.86	Upper= +1.56 , Lower= -0.61
Dezful		0.47	0.65	Upper= +2.20 , Lower= -1.14
Ahvaz		0.57	0.73	Upper= +2.03 , Lower= -0.97
Sahrkourd		0.69	0.78	Upper= +1.74 , Lower= -0.96
Abadan		0.53	0.68	Upper= +2.18 , Lower= -1.08
Boshehr	3	0.57	0.72	Upper= +3.01 , Lower= -2.06
Shiraz		0.66	0.80	Upper= +1.64 , Lower= -0.90
Bandar lengheh		0.50	0.73	Upper= +2.18 , Lower= -0.72
Bandar Abbas		0.44	0.69	Upper= +2.34 , Lower= -0.79
Bandar Chabahar		0.50	0.74	Upper= +2.06 , Lower= -0.93
Tabriz		0.73	0.84	Upper= +1.55 , Lower= -0.76
Urmia		0.68	0.85	Upper= +1.57 , Lower= -0.76
Sagez		0.69	0.80	Upper= +1.85 , Lower= -0.68
Semnan	4	0.62	0.83	Upper= +1.62 , Lower= -0.72
Shahrud		0.66	0.80	Upper= +1.61 , Lower= -0.97
Sabzvar		0.64	0.78	Upper= +1.61 , Lower= -1.12
Torbat Heydarieh		0.74	0.83	Upper= +1.43 , Lower= -1.06
Tabas		0.51	0.76	Upper= +2.04 , Lower= -0.76
Birjand		0.65	0.85	Upper= +1.63 , Lower= -0.80
Bam		0.43	0.63	Upper= +2.44 , Lower= -1.03
Iranshahr		0.49	0.72	Upper= +2.11 , Lower= -1.11
Kerman	5	0.59	0.80	Upper= +2.08 , Lower= -0.68
Yazd		0.52	0.72	Upper= +2.13 , Lower= -0.77
Isfahan		0.51	0.70	Upper= +2.04 , Lower= -1.01
Hamedan		0.70	0.86	Upper= +1.45 , Lower= -0.66
Qazvin		0.72	0.83	Upper= +1.43 , Lower= -0.91
Tehran		0.66	0.79	Upper= +1.62 , Lower= -0.99
Arak		0.53	0.61	Upper= +2.08 , Lower= -1.32
Zabol		0.62	0.81	Upper= +1.82 , Lower= -0.77
Zahedan	6	0.68	0.77	Upper= +1.96 , Lower= -0.98
Saravan		0.55	0.75	Upper= +1.91 , Lower= +1.28
Mashhad		0.77	0.85	Upper= +1.35 , Lower= -0.92

ایستگاهی می‌باشد، روش برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل مبتنی بر معادله تورنتویت می‌باشد؛ در حالی که در روش SPEIbase روش برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل مبتنی بر معادله پنمن-مانتیت FAO-56 می‌باشد. روش پنمن-مانتیت به‌عنوان روشی دقیق‌تر و پیشرفته‌تر شناخته می‌شود. برآورد تبخیر و تعرق بر اساس روش پنمن-مانتیت FAO-56 نیازمند داده‌های هواشناسی کامل‌تر شامل میانگین دما، حداقل دما، حداکثر دما، رطوبت نسبی، بارندگی، سرعت باد و ساعات

مشابه توافق قوی بین SPEI و SPEIbase در آزمون همبستگی خطی پیرسون، یک توافق زیاد بین وضعیت‌های خشکسالی در آماره کاپای کوهن وزن دار مشاهده می‌گردد. زیرا، مقادیر آماره کاپای کوهن وزن دار در تمامی مقیاس‌های زمانی در دامنه $+0.6$ تا $+0.8$ بوده که بیان‌گر توافق زیاد می‌باشد. با وجود اختلاف ماهیت این روش‌ها در نوع برآورد تبخیر و تعرق، یک توافق زیاد بین آن‌ها در نمایش وضعیت خشکسالی وجود دارد. در روش محاسبه SPEI که مبتنی بر داده‌های

مختلف جهت ارزیابی ارتباط تغییر مقیاس‌های زمانی و تغییرات ضرایب همبستگی و توافق ترسیم شده است. همان‌گونه که مشخص است، با افزایش مقیاس زمانی (از ۱ ماهه به ۱۲ ماهه) ضریب همبستگی و کاپا در هر ویلون به طور واضح افزایش می‌یابد. این موضوع تأیید می‌کند که هماهنگی و توافق بین دو شاخص در بازه‌های زمانی بلندمدت بیشتر است.

آفتابی می‌باشد. بنابراین SPEI و SPEIbase شباهت‌های زیاد در پایش خشکسالی و توافق زیاد در بیان وضعیت خشکسالی دارند. به‌عنوان مثال یک رویداد خشکسالی شدید در شاخص SPEI در شاخص SPEIbase نیز به احتمال زیاد به‌عنوان رویداد خشکسالی خیلی شدید شناخته می‌شود.

نمودارهای ویلونی از ضرایب همبستگی پیرسون و ضرایب کاپای کوهن وزن‌دار (شکل ۶) بین SPEI و SPEIbase در مقیاس‌های زمانی

جدول ۸- خلاصه آزمون‌های هماهنگی و توافق بین SPEI و SPEIbase ۹ ماهه در حوضه‌های آبریز ایران

Table 8- Summary of correlation and agreement tests between SPEI and SPEIbase at the 9-month scale over Iranian catchments

Station ایستگاه	Catchment No. شماره حوضه	Kappa (κ^*) ضریب کاپا	Perarson (r^{**}) ضریب پیرسون	Bland-Altman (Range) دامنه بلند-آلتمن
Khoy	1	0.69	0.85	Upper= +1.45 , Lower= -0.84
Ardabil		0.56	0.69	Upper= +1.80 , Lower= -1.13
Zanjan		0.60	0.81	Upper= +1.57 , Lower= -0.87
Anzali		0.53	0.64	Upper= +1.76 , Lower= -1.45
Rasht		0.66	0.69	Upper= +1.74 , Lower= -1.40
Ramsar		0.32	0.44	Upper= +2.33 , Lower= -1.86
Babolsar		0.60	0.69	Upper= +1.86 , Lower= -1.25
Gorgan		0.60	0.74	Upper= +1.72 , Lower= -1.16
Bojnurd	2	0.59	0.74	Upper= +1.79 , Lower= -1.10
Sanandaj		0.62	0.84	Upper= +1.77 , Lower= -0.52
Kermanshah		0.67	0.89	Upper= +1.58 , Lower= -0.25
Khoramabad		0.70	0.90	Upper= +1.46 , Lower= -0.35
Dezful		0.55	0.72	Upper= +2.03 , Lower= -0.87
Ahvaz		0.55	0.74	Upper= +2.01 , Lower= -0.87
Sahrkourd		0.70	0.77	Upper= +1.81 , Lower= -0.90
Abadan		0.56	0.68	Upper= +2.19 , Lower= -1.00
Boshehr		0.62	0.78	Upper= +3.00 , Lower= -2.06
Shiraz		0.69	0.86	Upper= +1.48 , Lower= -0.73
Bandar lengeh		0.49	0.76	Upper= +2.15 , Lower= -0.63
Bandar Abbas		0.44	0.74	Upper= +2.27 , Lower= -0.71
Bandar Chabahar	3	0.59	0.78	Upper= +1.97 , Lower= -0.76
Tabriz		0.70	0.84	Upper= +1.60 , Lower= -0.67
Urmia		0.70	0.85	Upper= +1.66 , Lower= -0.66
Saqez	4	0.70	0.85	Upper= +1.66 , Lower= -0.66
Semnan		0.62	0.85	Upper= +1.59 , Lower= -0.57
Shahrud		0.69	0.85	Upper= +1.49 , Lower= -0.75
Sabzvar		0.64	0.79	Upper= +1.64 , Lower= -1.08
Torbat Heydarieh		0.73	0.85	Upper= +1.43 , Lower= -1.00
Tabas		0.54	0.76	Upper= +2.09 , Lower= -0.67
Birjand		0.67	0.88	Upper= +1.56 , Lower= -0.67
Bam		0.39	0.61	Upper= +2.51 , Lower= -1.04
Iranshahr		0.48	0.76	Upper= +2.04 , Lower= -0.93
Kerman		0.59	0.81	Upper= +2.10 , Lower= -0.61
Yazd		0.51	0.72	Upper= +2.18 , Lower= -0.65
Isfahan		0.52	0.69	Upper= +2.12 , Lower= -0.93
Hamedan		0.65	0.86	Upper= +1.51 , Lower= -0.55
Qazvin		0.67	0.84	Upper= +1.44 , Lower= -0.82
Tehran		0.62	0.80	Upper= +1.62 , Lower= -0.89
Arak		0.51	0.63	Upper= +2.09 , Lower= -1.17
Zabol	5	0.60	0.83	Upper= +1.83 , Lower= -0.72
Zahedan		0.69	0.83	Upper= +1.84 , Lower= -0.75
Saravan		0.60	0.80	Upper= +1.81 , Lower= -1.13
Mashhad	6	0.80	0.87	Upper= +1.34 , Lower= -0.83

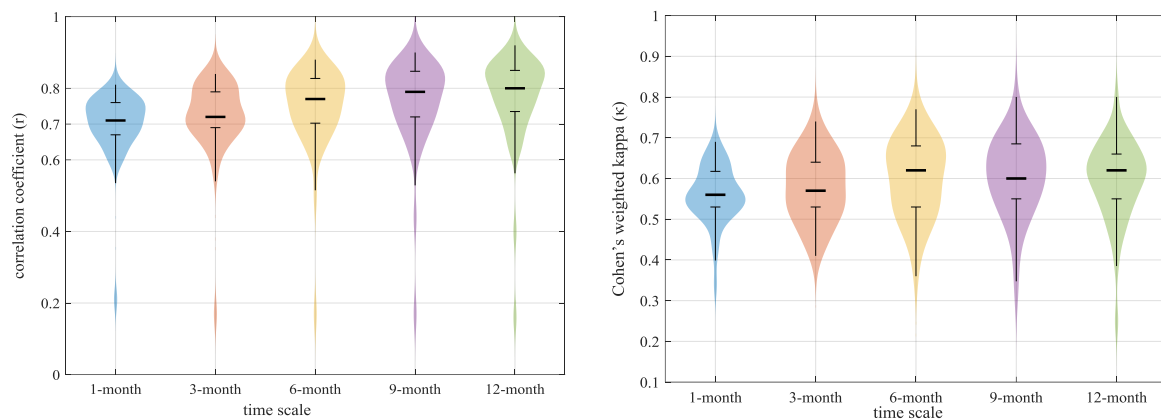
جدول ۹- خلاصه آزمون‌های هماهنگی و توافق بین SPEI و SPEIbase دوازده‌ماهه در حوضه‌های آبریز ایران

Table 9- Summary of correlation and agreement tests between SPEI and SPEIbase at the 12-month scale over Iranian catchments

Station ایستگاه	Catchment No. شماره حوضه	Kappa (κ^*) ضریب کاپا	Perarson (r^{**}) ضریب پیرسون	Bland-Altman (Range) دامنه بلند-آلتمن
Khoy	1	0.69	0.85	Upper= +1.47 , Lower= -0.77
Ardabil		0.57	0.69	Upper= +1.85 , Lower= -1.06
Zanjan		0.51	0.80	Upper= +1.66 , Lower= -0.85
Anzali		0.56	0.63	Upper= +1.78 , Lower= -1.46
Rasht		0.62	0.70	Upper= +1.74 , Lower= -1.37
Ramsar		0.25	0.40	Upper= +2.44 , Lower= -1.92
Babolsar		0.62	0.71	Upper= +1.83 , Lower= -1.17
Gorgan		0.62	0.75	Upper= +1.71 , Lower= -1.09
Bojnurd	2	0.55	0.75	Upper= +1.82 , Lower= -1.06
Sanandaj		0.60	0.85	Upper= +1.77 , Lower= -0.41
Kermanshah		0.62	0.90	Upper= +1.62 , Lower= -0.15
Khoramabad		0.70	0.92	Upper= +1.42 , Lower= -0.17
Dezful		0.61	0.78	Upper= +1.92 , Lower= -0.62
Ahvaz		0.55	0.77	Upper= +1.98 , Lower= -0.69
Sahrkourd		0.66	0.76	Upper= +1.87 , Lower= -0.84
Abadan		0.62	0.71	Upper= +2.16 , Lower= -0.82
Boshehr		0.64	0.81	Upper= +3.03 , Lower= -1.99
Shiraz		0.70	0.86	Upper= +1.53 , Lower= -0.67
Bandar lengeh		0.48	0.77	Upper= +2.15 , Lower= -0.55
Bandar Abbas		0.44	0.75	Upper= +2.28 , Lower= -0.65
Bandar Chabahar	3	0.56	0.80	Upper= +1.97 , Lower= -0.64
Tabriz		0.66	0.85	Upper= +1.63 , Lower= -0.56
Urmia		0.72	0.86	Upper= +1.68 , Lower= -0.55
Saqez	4	0.67	0.83	Upper= +1.82 , Lower= -0.55
Semnan		0.63	0.86	Upper= +1.59 , Lower= -0.47
Shahrud		0.70	0.87	Upper= +1.43 , Lower= -0.61
Sabzvar		0.63	0.79	Upper= +1.69 , Lower= -1.07
Torbat Heydarieh		0.73	0.86	Upper= +1.43 , Lower= -0.95
Tabas		0.54	0.78	Upper= +2.10 , Lower= -0.58
Birjand		0.67	0.90	Upper= +1.58 , Lower= -0.621
Bam		0.39	0.64	Upper= +2.50 , Lower= -0.93
Iranshahr		0.47	0.80	Upper= +1.96 , Lower= -0.73
Kerman		0.57	0.83	Upper= +2.08 , Lower= -0.47
Yazd		0.52	0.73	Upper= +2.21 , Lower= -0.54
Isfahan		0.52	0.67	Upper= +2.21 , Lower= -0.89
Hamedan		0.63	0.87	Upper= +1.54 , Lower= -0.45
Qazvin		0.65	0.84	Upper= +1.45 , Lower= -0.75
Tehran		0.60	0.82	Upper= +1.61 , Lower= -0.78
Arak	5	0.48	0.63	Upper= +2.14 , Lower= -1.09
Zabol		0.59	0.84	Upper= +1.85 , Lower= -0.67
Zahedan		0.67	0.85	Upper= +1.79 , Lower= -0.63
Saravan		0.60	0.83	Upper= +1.75 , Lower= -0.98
Mashhad	6	0.80	0.88	Upper= +1.36 , Lower= -0.80

ایستگاه‌ها می‌باشد. اما در مقیاس‌های زمانی بلندمدت، ویلون‌ها باریک‌تر بوده و داده‌ها حول مقادیر بالای ضرایب به‌ویژه ضریب همبستگی متمرکز می‌شوند که نشان‌دهنده قطعیت بیشتر و پراکندگی کمتر بین ایستگاه‌ها می‌باشد. علاوه بر این، شکل توزیع ویلون‌ها در مقیاس بالاتر، نشانه‌ای از کاهش بایاس و افزایش دقت در برآورد همبستگی و توافق می‌باشد.

بنابراین میزان هماهنگی بین مقادیر SPEI و SPEIbase در خشکسالی‌های کشاورزی و به‌ویژه هیدرولوژیکی بسیار بیشتر از خشکسالی‌های هواشناسی می‌باشد. پهنای ویلون بیانگر تراکم توزیع ضرایب همبستگی و کاپا در ایستگاه‌های ۴۳ گانه می‌باشد. در مقیاس‌های زمانی کوتاه‌تر (۱ و ۳ ماهه)، ویلون‌ها معمولاً پهن‌تر بوده و بیانگر پراکندگی بیشتر ضرایب به‌ویژه ضریب همبستگی بین ایستگاه‌ها است. این می‌تواند به دلیل تنوع ناهمواری، عرض جغرافیایی و اقلیم



شکل ۶- نمودارهای ویلونی از ضریب همبستگی پیرسون (سمت چپ) و ضریب کاپای کوهن وزن دار (سمت راست) بین SPEI و SPEIbase در مقیاس‌های زمانی مختلف

Figure 6- Violin plots of the Pearson correlation coefficient (left panel) and the weighted Cohen's kappa coefficient (right panel) between SPEI and SPEIbase at different time scales

نتیجه‌گیری

(۰/۷۰ تا ۰/۹۰) قرار دارد. این مقدار از همبستگی در برخی از مناطق (مانند خرم‌آباد، همدان و سقز) حتی به آستانه همبستگی بسیار قوی نیز نزدیک شده است. در مقابل، در ایستگاه‌های با ویژگی‌های اقلیمی ساحلی و جلگه‌ای (مانند بندرعباس، چابهار و بابلسر)، همبستگی در مقیاس‌های کوتاه‌تر اندکی کاهش یافته و در سطح متوسط تا نسبتاً قوی قرار داشته است. به‌طور کلی، میزان همبستگی از مقیاس‌های کوتاه‌تر (۱ و ۳ ماهه) به مقیاس‌های بلندتر (۶، ۹ و ۱۲ ماهه) افزایش داشته است. بیان تصویری مقایسه سری‌های زمانی از شاخص‌های خشکسالی نیز یک هماهنگی قوی را در نمایش دوره‌های خشکسالی و ترسالی نشان داد. با این حال، تحلیل‌های کمی‌تر نشان داد که SPEIbase نسبت به SPEI در نمایش مشخصه‌های خشکسالی، به ویژه دوام، متفاوت عمل می‌کند. این تفاوت‌ها شامل آغاز زودهنگام و پایان دیر هنگام خشکسالی در شاخص SPEIbase می‌باشد که دوام خشکسالی را طولانی‌تر برآورد می‌کند. علاوه بر این، به نظر می‌رسد شاخص SPEIbase، نوسانات مقطعی (فصلی) ترسالی را در رویدادهای طولانی‌مدت خشکسالی پسین ادغام نموده و دوام رویدادهای خشکسالی را افزایش می‌دهد. این وضعیت‌های احتمالی، منجر به عدم توافق هر چند اندک میان SPEI و SPEIbase در بیان وضعیت‌های خشکسالی (خشکسالی خیلی شدید، خشکسالی شدید و خشکسالی متوسط) می‌گردد که در آزمون‌های بلند-آلتمن و کاپای کوهن، نمود یافته است. با وجود تفاوت ماهیت این روش‌ها در برآورد تبخیر و ترق (روش برآورد مبتنی بر معادله تونتویت در SPEI و روش برآورد مبتنی بر معادله پنمن-مانتیتش FAO-56 در SPEIbase)، میزان توافق بین این شاخص‌ها در بیان وضعیت‌های خشکسالی در اکثر ایستگاه‌های هواشناسی در دامنه توافق زیاد (بر اساس آزمون کاپای کوهن وزن دار)

این پژوهش یک رویکرد عملی و قابل اعتماد برای بررسی هماهنگی و توافق میان SPEI و SPEIbase در سطح حوضه‌های آبریز ایران پیاده‌سازی نموده است. برای این منظور، داده‌های دما و بارش ماهانه تعداد ۴۳ ایستگاه هواشناسی در بازه ۱۹۸۶ تا ۲۰۲۳ میلادی از آرشیو سازمان هواشناسی کشور تهیه شده است. این دوره زمانی دارای بیشترین بازه زمانی مشترک برای داده‌های دما و به‌ویژه بارش ثبت شده در ایستگاه‌های هواشناسی ایران بوده و دارای حداقل داده گمشده در سری‌های زمانی نیز می‌باشد. شاخص SPEI بر اساس برآورد تبخیر و ترق پتانسیل مبتنی بر روش تونتویت در مقیاس‌های زمانی ۱، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه برای این مجموعه داده محاسبه شده که بیانگر خشکسالی هواشناسی، کشاورزی و هیدرولوژیکی می‌باشد. از سوی دیگر داده‌های شبکه‌بندی شده SPEIbase که بر اساس اطلاعات ماهانه بارندگی و تبخیر و ترق پتانسیل (مبتنی بر روش پنمن-مانتیتش FAO-56) می‌باشد در مقیاس و دوره زمانی مشابه SPEI از واحد تحقیقات اقلیمی دانشگاه انگلیای شرقی تهیه شده است. آزمون همبستگی خطی پیرسون برای بررسی درجه هماهنگی بین مقادیر دو شاخص و از آزمون کاپای کوهن وزن دار و نمودار بلند-آلتمن برای سنجش میزان توافق بین این دو شاخص در پایش وضعیت خشکسالی در گستره ایران استفاده شده است.

یافته‌ها نشان دادند که میزان همبستگی خطی پیرسون بین مقادیر شاخص SPEI محاسباتی برای ایستگاه‌های هواشناسی و شاخص SPEIbase که منتج از داده‌های شبکه‌ای بارش و دمای جهانی بود، در اغلب ایستگاه‌ها و حوضه‌های آبریز ایران، در دامنه همبستگی قوی

ایستگاه‌های هواشناسی گستره ایران می‌تواند همبستگی و توافق میان این روش را افزایش دهد.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ گونه تعارض منافی در ارتباط با این پژوهش وجود ندارد.

سپاسگزاری

از سازمان هواشناسی کشور که داده‌های هواشناسی را به صورت رایگان در اختیار این پژوهش قرار داد، سپاسگزاری می‌گردد.

قرار دارد. بنابراین SPEI و SPEIbase شباهت‌های زیاد در پایش خشکسالی و توافق زیاد در بیان وضعیت خشکسالی دارند. با این وجود، میزان توافق بین بیان وضعیت‌های خشکسالی در اقلیم‌های کم‌ارتفاع و جلگه‌ای به‌ویژه در مقیاس زمانی کوتاه (خشکسالی هواشناسی) نسبت به ایستگاه‌های مناطق بیابانی و مرتفع اندکی پایین‌تر بوده است. با توجه به تحلیل‌های انجام‌شده، شاخص خشکسالی SPEIbase با دقت مناسب در بسیاری از مناطق ایران، به‌ویژه در حوضه‌های کوهستانی، قابلیت جایگزینی برای داده‌های ایستگاهی را دارد. داده‌های این پایگاه جهانی با توجه به پوشش وسیع مکانی و وضوح زمانی بالا، به‌ویژه برای مناطق فاقد ایستگاه یا با داده‌های ناقص، می‌توانند ابزار مؤثری در پایش خشکسالی باشند. با وجود این، محاسبه SPEI در برپایه معادله برآورد تبخیر و تعرق پتانسیل مبتنی بر معادله پنمن - مانتیث FAO-56 در

References

- Adler, J., & Parmryd, I. (2010). Quantifying colocalization by correlation: the Pearson correlation coefficient is superior to the Mander's overlap coefficient. *Cytometry Part A*, 77(8), 733-742. <https://doi.org/10.1002/cyto.a.20896>
- Ahmadalipour, A., Moradkhani, H., & Demirel, M.C. (2017). A comparative assessment of projected meteorological and hydrological droughts: elucidating the role of temperature. *Journal of Hydrology*, 553, 785-797. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.08.047>
- Allen, R.G. (2000). Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study. *Journal of Hydrology*, 229(1-2), 27-41. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00194-8](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00194-8)
- Beguería, S., & Vicente-Serrano, SM. (2023). *SPEI: Calculation of the Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index*. <https://spei.csic.es>, <https://github.com/sbegueria/SPEI>
- Bisht, H., LOO, S., Suna, T., Vishnoi, L., Gautam, S., & Singh, D.K. (2023). Drought assessment and trend analysis using SPI and SPEI during southwest monsoon season over Bundelkhand region of Uttar Pradesh, India. *Mausam*, 74(1), 119-128. <https://doi.org/10.54302/mausam.v74i1.3519>
- Bland, J.M., & Altman, D. (2010). Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. *The Lancet*, 327(8476), 307-310. <https://doi.org/10.1016/j.ijnurstu.2009.10.001>
- Brands, S., Iturbide, M., González-Pardo, J.D., Herrera, S., Bedia, J., Manzanar, R., Rodriguez-Guisado, E., Begueria, S., Vicente-Serrano, S.M., & Gutiérrez, J.M. (2025). Seasonal drought predictions in the Mediterranean using the SPEI index: Paving the way for their operational applicability in climate services. *Climate Services*, 38, 100555. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2025.100555>
- Cohen, J. (1960). A co-efficient of agreement for nominal scales. *Education Psychology Meas*, 20, 111-116. <http://hdl.handle.net/1942/28116>
- Fleiss, J.L. (1971). Measuring nominal scale agreement among many raters. *Psychological Bulletin*, 76(5), 378. <https://doi.org/10.1037/h0031619>
- Gebrechorkos, S.H., Peng, J., Dyer, E., Miralles, D.G., Vicente-Serrano, S.M., Funk, C., Beck, H.E., Asfaw, D.T., Singer, N.B., & Dadson, S.J. (2023). Global high-resolution drought indices for 1981–2022. *Earth System Science Data Discussions*, 2023, 1-28. <https://doi.org/10.5194/essd-15-5449-2023>
- Giavarina, D. (2015). Understanding bland altman analysis. *Biochemia Medica*, 25(2), 141-151. <https://doi.org/10.11613/BM.2015.015>
- Gwet, K.L. (2008). Computing inter-rater reliability and its variance in the presence of high agreement. *British Journal of Mathematical and Statistical Psychology*, 61(1), 29-48. <https://doi.org/10.1348/000711006X126600>
- Hargreaves, G.H., & Samani, Z.A. (1985) Reference crop evapotranspiration from ambient air temperature. *Apply Engineering Agriculture*, 1(2), 96–99. <https://doi.org/10.13031/2013.26773>
- Imran, H.M., Kala, J., Uddin, S., Islam, A.S., & 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>
- 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>

16. Landis, J.R., & Koch, G.G. (1977). An application of hierarchical kappa-type statistics in the assessment of majority agreement among multiple observers. *Biometrics*, 363-374. <https://doi.org/10.2307/2529786>
17. Lweendo, M.K., Lu, B., Wang, M., Zhang, H., & Xu, W. (2017). Characterization of droughts in humid subtropical region, upper kafue river basin (Southern Africa). *Water*, 9(4), 242. <https://doi.org/10.3390/w9040242>
18. Manzano, A., Clemente, M.A., Morata, A., Luna, M.Y., Beguería, S., Vicente-Serrano, S.M., & Martín, M.L. (2019). Analysis of the atmospheric circulation pattern effects over SPEI drought index in Spain. *Atmospheric Research*, 230, 104630. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104630>
19. Mehran, A., Mazdiyasn, O., & AghaKouchak, A. (2015). A hybrid framework for assessing socioeconomic drought: Linking climate variability, local resilience, and demand. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(15), 7520-7533. <https://doi.org/10.1002/2015JD023147>
20. Nazaripour, H., Hamidianpour, M., Khosravi, M., & Vazirimehr, M. (2022). Variability of drought frequency and intensity in Iran using SPEI. *Journal of Water and Soil Science*, 26(4), 233-247. (In Persian). <https://doi.org/10.47176/jwss.26.4.45861>
21. Nikdad, P., Mohammadi Ghaleni, M., & Moghaddasi, M. (2023). Evaluation of actual and potential evapotranspiration in global products across Iran's sub basins. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54(5), 789-810. <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.357603.669481>
22. 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, 555216. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.555216>
23. Peña-Gallardo, M., Vicente-Serrano, S.M., Hannaford, J., Lorenzo-Lacruz, J., Svoboda, M., Dominguez-Castro, F., Manteta, M., Tomas-Burguera, M., & El Kenawy, A. (2019). Complex influences of meteorological drought time-scales on hydrological droughts in natural basins of the contiguous Unites States. *Journal of Hydrology*, 568, 611-625. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.11.026>
24. Raziei, T. (2017). Köppen-Geiger climate classification of Iran and investigation of its changes during 20th century. *Journal of the Earth and Space Physics*, 43(2), 419-439. (In Persian). <https://doi.org/10.22059/jesphys.2017.58916>
25. Raziei, T., Saghafian, B., Paulo, A.A., Pereira, L.S., & Bordi, I. (2009). Spatial patterns and temporal variability of drought in western Iran. *Water Resources Management*, 23(3), 439-455. <https://doi.org/10.1007/s11269-008-9282-4>
26. 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>
27. Schober, P., Boer, C., & Schwarte, L.A. (2018). Correlation coefficients: appropriate use and interpretation. *Anesthesia & Analgesia*, 126(5), 1763-1768. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(86\)90837-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(86)90837-8)
28. Stagge, J.H., Tallaksen, L.M., Gudmundsson, L., Van Loon, A.F., & Stahl, K. (2015). Candidate distributions for climatological drought indices (SPI and SPEI). *International Journal of Climatology*, 35(13), 4027-4040. <https://doi.org/10.1002/joc.4267>
29. Tefera, A.S., Ayoade, J.O., & Bello, N.J. (2019). Comparative analyses of SPI and SPEI as drought assessment tools in Tigray Region, Northern Ethiopia. *SN Applied Sciences*, 1(10), 1265. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1326-2>
30. Tukimat, N.N.A., Harun, S., & Shahid, S. (2012). Comparison of different methods in estimating potential evapotranspiration at Muda Irrigation Scheme of Malaysia. *Journal of Agriculture and Rural Development in the Tropics and Subtropics (JARTS)*, 113(1), 77-85. <https://urn.fi/urn:nbn:de:hebis:34-2012091441739>
31. 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>
32. Vicente-Serrano, S.M., Peña-Angulo, D., Beguería, S., Domínguez-Castro, F., Tomás-Burguera, M., Noguera, I., Gimeno-Sotelo, L., & El Kenawy, A. (2022). Global drought trends and future projections. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 380(2238). <https://doi.org/10.1098/rsta.2021.0285>
33. Viera, A.J., & Garrett, J.M. (2005). Understanding interobserver agreement: the kappa statistic. *Fam Med*, 37(5), 360-363. PMID: 15883903.
34. Warrens, M.J. (2013). Weighted kappas for 3×3 tables. *Journal of Probability and Statistics*, 2013(1), 325831. <https://doi.org/10.1155/2013/325831>
35. 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>