

Assessment of the Application of the SSPI and SSPEI Drought Indices in Arid and Semi-Arid Regions: A Case Study of Iraq

Hadi Razzaq Abed¹, Jafar Masoompour Samakosh^{2✉}, Morteza Miri³, Tayeb Raziei⁴

1. Department of Geography, Faculty of Literature and Human Sciences, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: hadirzaq1@gmail.com
2. Corresponding author, Department of Geography, Faculty of Literature and Human Sciences, Razi University, Kermanshah, Iran. E-mail: j.mclimate27@gmail.com
3. Department of Drought and Climate Change, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran. E-mail: morteza.miri64@gmail.com
4. Department of Drought and Climate Change, Soil Conservation and Watershed Management Research Institute, Agricultural Research Education and Extension Organization (AREEO), Tehran, Iran. E-mail: tayebrazi@yahoo.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received: 2 May 2026
Received in revised form:
2 September 2026
Accepted: 6 September
2026
Available online: 17
September 2026

Keywords:

Box-Cox transformation,
drought,
GPCC and CRU
databases,
standard normal
distribution,
statistical distribution
fitting.

ABSTRACT

Objective: Climate change, anthropogenic pressures on water resources, and the sparse distribution of meteorological stations in Iraq present significant challenges for drought assessment. Furthermore, the country's location within a global arid belt, leading to extreme temperature increases and erratic precipitation, introduces methodological complexities to drought studies. This research aims to enhance drought monitoring tools for water- and climate-related crisis management in Iraq by evaluating the performance of the Simplified Standardized Precipitation Index (SSPI) and Simplified Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SSPEI) against SPI and SPEI in arid and semi-arid climates of Iraq. **Method:** The study utilized a 71-year (1950–2020) gridded dataset comprising precipitation, maximum and minimum air temperatures, derived from GPCC and CRU centers at a 0.25° resolution, to calculate SPI, SSPI, SPEI, and SSPEI drought indices at 3, 6, 9, 12, and 24-month time scales.

Results: Comparison of SSPI and SPI showed that the spatial and temporal patterns of the two indices were similar across most parts of Iraq, with their agreement increasing at longer time scales. At the 3-month timescale, greater differences between the two indices were observed in some areas of western, eastern, and central Iraq, whereas the degree of agreement increased at longer time scales. Correlation coefficients (R) ranged from 0.88 to 0.99, and coefficients of determination (R²) ranged from 0.79 to 1.00. The RMSE, Bias, and Slope values also indicated that the differences between the two indices were limited in most areas and generally decreased with increasing timescale. The comparison of SSPEI and SPEI likewise showed a very high degree of agreement across all timescales, with R and R² values mostly ranging from 0.97 to 0.99. The EF, RMSE, Bias, and Slope values further confirmed the close agreement between the two indices. Despite the observed high similarity, fitting a probability distribution to precipitation series with many zero values, or to water-balance series with extreme values, is not always feasible and may sometimes fail. In such cases, simplified alternatives like SSPI and SSPEI, derived using the Box–Cox transformation, are effective as they do not depend on a specific probability distribution.

Conclusions: Overall, the findings indicate that the modified SSPI and SSPEI indices exhibit patterns similar to those of SPI and SPEI across most parts of Iraq, with the degree of agreement increasing at longer time scales. The primary advantage of the SSPI and SSPEI indices is not that they produce significantly different results from conventional indices, but rather that they provide a more stable method for standardizing climatic series when the statistical characteristics of the data complicate the fitting of probability distributions used in traditional methods. Therefore, SSPI and SSPEI can be considered alternative and complementary approaches for drought monitoring in arid and semi-arid regions, particularly under conditions characterized by a high frequency of zero values, highly skewed series, or limitations in fitting probability distributions.

Cite this article: Razzaq Abed, H., Masoompour Samakosh, J., Miri, M., & Raziei, T. (2026). Assessment of the Application of the SSPI and SSPEI Drought Indices in Arid and Semi-Arid Regions: A Case Study of Iraq. *Journal of Environmental Studies*, 52(2), 273-294. <https://doi.org/10.22059/jes.2026.413392.1008689>

© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.



<https://doi.org/10.22059/jes.2026.413392.1008689>

Introduction

Drought is one of the most complex and pervasive climatic hazards, affecting more people worldwide than any other natural disaster. Its creeping nature, unclear onset and termination, and strong dependence on climatic variability make it particularly difficult to monitor, especially in arid and semi-arid regions. Climate change has intensified drought severity by increasing temperatures, accelerating soil moisture depletion, altering precipitation regimes, and amplifying evapotranspiration demand. These changes have disproportionately affected countries such as Iraq, where water scarcity, declining river inflows, and extreme hydro-climatic variability pose severe threats to agriculture, ecosystems, and socio-economic stability. Traditional drought indices such as the Standardized Precipitation Index (SPI), despite their widespread use and endorsement by the World Meteorological Organization, face substantial limitations in arid climates. SPI relies solely on precipitation and assumes that precipitation follows a parametric probability distribution, an assumption often violated in regions with long dry spells and zero-precipitation months. The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) was introduced to address some of these limitations by incorporating temperature-driven evapotranspiration. However, SPEI also depends on fitting parametric distributions to water-balance series, and recent studies in Iran have shown that these distributions often fail to fit arid-region data, producing null values and computational errors. To overcome these methodological constraints, Raziei (2022) and Raziei and Miri (2023) proposed two non-parametric indices SSPI and SSPEI, based on the Box-Cox transformation, eliminating the need for distribution fitting. Given Iraq's extreme aridity, sparse meteorological network, and high climatic variability, evaluating these modified indices is essential for improving drought monitoring reliability.

Method

The study area covers the entire territory of Iraq, located within the arid and semi-arid belt of West Asia. Due to the sparse and uneven distribution of meteorological stations, further degraded by decades of conflict, this study relies on high-quality gridded datasets. Precipitation data were obtained from the GPCC dataset at 0.25° spatial resolution, while minimum and maximum air temperature data were obtained from the CRU TS v4.08 datasets at 0.5° resolution and subsequently downscaled to 0.25° using bilinear interpolation to match the GPCC grid. A 71-year period (1950–2020) was analyzed. SPI, SSPI, SPEI, and SSPEI were computed at 3-, 6-, 9-, 12-, and 24-month timescales. SSPI and SSPEI were derived using the Box–Cox transformation, which normalizes precipitation or water-balance series without requiring parametric distribution fitting. Model performance was evaluated using correlation coefficient (R), coefficient of determination (R^2), root mean square error (RMSE), Nash–Sutcliffe efficiency (EF), bias, and regression slope. Spatial patterns of errors and performance metrics were mapped to assess the geographic consistency of the agreement between the compared indices across Iraq.

Results

A comparison of SSPI and SPI across various grids in Iraq showed a high level of agreement in most areas, which generally increased over longer timescales. At the 3-month timescale, R values ranged from 0.88 to 0.998, with greater discrepancies noted in some western, eastern, and central regions. At longer timescales, R values typically exceeded 0.96, while R^2 ranged from 0.79 to 1.00, indicating close correspondence between the two indices. The RMSE, Bias, and Slope values also demonstrated that the differences between SSPI and SPI were minimal in most regions and generally decreased with longer timescales. Similarly, the comparison between SSPEI and SPEI revealed a high degree of agreement across all timescales, with R and R^2 metrics

predominantly falling between 0.97 and 0.99. EF, RMSE, Bias, and Slope values further supported the close alignment between the two indices. Despite the strong similarity between modified and conventional indices, limitations were observed in fitting the probability distributions used in SPI and SPEI under certain climatic and statistical conditions. These limitations were particularly noticeable during warm and dry periods marked by a high frequency of zero precipitation values and extreme or highly skewed water-balance series, where conventional indices struggled to provide valid values due to difficulties in probability-distribution fitting. In contrast, SSPI and SSPEI, which use the Box–Cox transformation without relying on fitting a specific probability distribution, successfully generated valid index values under these conditions. Therefore, the main advantage of the modified indices lies in their ability to calculate drought indices when conventional distribution-fitting approaches encounter limitations.

Conclusions

The findings indicate that the modified SSPI and SSPEI indices exhibit patterns highly similar to those of SPI and SPEI across most parts of Iraq, with the degree of agreement generally increasing at longer timescales. The results suggest that the principal advantage of SSPI and SSPEI is not necessarily the production of substantially different drought estimates from the conventional indices under all conditions, but their ability to provide a more stable approach for standardizing climatic series when the statistical characteristics of the data make fitting the probability distributions used in conventional methods difficult. Therefore, SSPI and SSPEI can be considered alternative and complementary approaches for drought monitoring in arid and semi-arid regions, particularly under conditions characterized by a high frequency of zero precipitation values, highly skewed data, extreme water-balance values, or limitations in probability-distribution fitting. The results obtained for Iraq also provide a basis for further evaluation of the applicability of these modified indices in other arid and semi-arid regions with similar climatic and data characteristics.

Author Contributions

Hadi Razzaq Abed: Data collection and data processing.

Jafar Masoompour Samakosh: Supervision of the research process and manuscript editing.

Morteza Miri: Conceptualization, methodology, calculation of drought indices, and preparation and writing of the original manuscript.

Tayeb Raziei: Calculation of the modified indices, verification of the results, and review and editing of the manuscript.

Data Availability Statement

The data used in this study are available from the corresponding author upon reasonable request.

Acknowledgements

This article is derived from the Ph.D. dissertation of Hadi Razzaq Abed at Razi University, Kermanshah, Iran. The authors gratefully acknowledge the intellectual and academic support provided by Razi University during the conduct of this dissertation and the preparation of this article.

The authors hereby declare that they have used ChatGPT by OpenAI for editing the English abstract of this manuscript. All AI-generated or AI-edited content has been carefully reviewed, verified, and approved by the authors, and the authors take full responsibility for the final content of the manuscript.

Ethical Considerations

The authors confirm that the research was conducted in accordance with established ethical principles and that no data fabrication, falsification, plagiarism, or other forms of research misconduct were involved.

Funding

No external funding was received for this study.

Conflict of Interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.



ارزیابی کاربرد شاخص‌های خشکسالی SSPI و SSPEI در مناطق خشک و نیمه خشک، مورد مطالعه: عراق

هادی رزاق عبد^۱، جعفر معصوم پور سماکوش^۲، مرتضی میری^۳، طیب رضیعی^۴

۱. گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: hadirzaq1@gmail.com
۲. نویسنده مسئول، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران. رایانامه: j.mclimate27@gmail.com
۳. گروه خشکسالی و تغییر اقلیم، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران. رایانامه: morteza.miri64@gmail.com
۴. گروه خشکسالی و تغییر اقلیم، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران. رایانامه: tayebrazi@yahoo.com

چکیده

اطلاعات مقاله

هدف: تغییرات اقلیمی، فعالیت‌های انسانی تأثیرگذار بر کاهش منابع آب و نیز نبود ایستگاه‌های هواشناسی با پراکنش مناسب در عراق مطالعه خشکسالی در این کشور را پیچیده می‌کند. از سوی دیگر قرار گرفتن این کشور در کمربند بیابانی جهان که سبب افزایش بسیار زیاد دمای هوا و بی‌نظمی شدید در بارش می‌شود، مطالعه خشکسالی در این کشور را از دیدگاه روش‌شناسی نیز با چالش‌های جدی روبه‌رو می‌کند. از این‌رو، پژوهش حاضر با هدف تأمین ابزاری دقیق‌تر برای مدیریت بحران‌های آب و اقلیم در عراق کوشش می‌کند تا کارایی و دقت شاخص‌های SSPI و SSPEI را در مقایسه با شاخص‌های SPI و SPEI در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک کشور عراق مورد ارزیابی قرار دهد.

روش پژوهش: داده‌های مورد استفاده شامل: بارش، بیشینه و کمینه دما، تبخیر و تعرق طی دوره طولانی مدت ۷۱ ساله (۱۹۵۰-۲۰۲۰) با استفاده از داده‌های شبکه‌ای تولید شده توسط مراکز اقلیمی GPCC و CRU با دقت ۰/۲۵ درجه جغرافیایی است. به‌منظور مطالعه خشکسالی، از شاخص‌های SPI، SSPI، SPEI و SSPEI در مقیاس‌های زمانی ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۲۴ ماهه استفاده شد.

یافته‌ها: مقایسه SPI و SSPI بر اساس داده‌های شبکه‌ای نشان داد که الگوی تغییرات هر دو شاخص در بخش عمده‌ای از کشور عراق مشابه است و این شباهت با افزایش مقیاس زمانی بیشتر می‌شود. در مقیاس ۳ ماهه، تفاوت میان دو شاخص در برخی نواحی غرب، شرق و مرکز عراق بیشتر بود، در حالی که در مقیاس‌های زمانی بلندتر، میزان انطباق آنها افزایش یافت. مقادیر ضریب همبستگی میان آنها بین ۰/۸۸ تا ۰/۹۹ و ضریب تعیین بین ۰/۷۹ تا ۱ قرار داشت. مقادیر ریشه میانگین مربعات خطا، اریبی و شیب خط نیز نشان دادند که اختلاف میان دو شاخص در بیشتر مناطق محدود است و با افزایش مقیاس زمانی کاهش می‌یابد. مقایسه SSPEI و SPEI نیز انطباق بسیار بالای دو شاخص را در تمامی مقیاس‌های زمانی نشان داد؛ به‌طوری‌که مقادیر همبستگی و ضریب تعیین عمدتاً در محدوده ۰/۹۷ تا ۰/۹۹ قرار داشتند و مقادیر شاخص‌های کارایی، ریشه میانگین مربعات خطا، اریبی و شیب خط نیز تطابق نزدیک دو شاخص را تأیید کردند. با وجود این شباهت، در شرایطی که برازش توزیع‌های آماری مورد استفاده در SPI و SPEI با محدودیت مواجه می‌شود، شاخص‌های اصلاح شده SSPI و SSPEI با استفاده از تابع تبدیل باکس-کاکس امکان محاسبه شاخص را بدون نیاز به یک توزیع احتمال مشخص فراهم کردند.

نتیجه‌گیری: یافته‌های این پژوهش نشان داد که شاخص‌های اصلاح شده SSPI و SSPEI در بخش عمده‌ای از کشور عراق الگوی مشابهی با شاخص‌های SPI و SPEI دارند و میزان این انطباق در مقیاس‌های زمانی بلندتر بیشتر است. مزیت اصلی شاخص‌های اصلاح شده نه در ایجاد تفاوت محسوس با شاخص‌های متداول در همه شرایط، بلکه در فراهم کردن روشی پایدارتر برای استانداردسازی سری‌های اقلیمی در شرایطی است که ساختار آماری داده‌ها، برازش توزیع‌های احتمال مورد استفاده در روش‌های متداول را با مشکل مواجه می‌کند. از این‌رو، SSPI و SSPEI می‌توانند به‌عنوان روش‌های جایگزین و مکمل برای پایش خشکسالی در مناطق خشک و نیمه‌خشک که در آن چولگی شدید داده‌ها به دلیل وجود مقادیر فراوان صفر برازش توزیع‌های آماری به داده‌ها را با مشکل روبه‌رو می‌کند، مورد استفاده قرار گیرند.

استناد: رزاق عبد، هادی؛ معصوم پور سماکوش، جعفر؛ میری، مرتضی؛ و رضیعی، طیب (۱۴۰۵). ارزیابی کاربرد شاخص‌های خشکسالی SSPI و SSPEI در مناطق خشک و نیمه‌خشک، مورد مطالعه: عراق. *نشریه محیط‌شناسی*، ۵۲(۲)، ۲۷۳-۲۹۴. <https://doi.org/10.22059/jes.2026.413392.1008689>



مقدمه

خشکسالی از جمله مخاطرات اقلیمی بسیار پیچیده‌ای است که بیش از هر مخاطره دیگری انسان را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Subash et al., 2011) و هرساله بدون توجه به تفاوت‌های سیاسی و اقتصادی، همچنین بدون توجه به هشدار و مرزهای شناخته‌شده به وقوع می‌پیوندد (عزیزی و صفر راد، ۱۳۸۹). به‌طوری‌که سالانه بیش از نیمی از کره زمین (Kogan, 1997) در معرض این پدیده آرام و خزنده قرار دارد. پیچیدگی مخاطره خشکسالی ناشی از عدم آگاهی و شناخت از زمان شروع، پایان، شدت و وسعت این پدیده می‌باشد (Aadhar & Mishra, 2017). این در حالی است که تغییر در شرایط اقلیمی، بسیاری از رخدادهای حدی اقلیمی از جمله خشکسالی را با پیچیدگی مواجه کرده است. افزایش دمای هوای کره زمین سبب خروج بیشتر رطوبت از خاک (Keyantash et al., 2004) و در نتیجه افزایش فراوانی و شدت خشکسالی و کاهش پوشش گیاهی شده است. همچنین کاهش ذخیره برف و ذوب آن، تغییر در الگوهای بارشی، افزایش دما و تبخیر (Dai, 2011; Lee et al., 2016; kim et al., 2020) که از نتایج تغییر در شرایط آب‌وهوایی است، تنش آبی ناشی از خشکسالی در بسیاری از مناطق جهان به‌ویژه مناطق خشک و نیمه‌خشک را افزایش داده است. این شرایط سبب شده است که از دهه‌ها قبل تا به امروز محاسبه خشکسالی و بررسی اثرات آن با استفاده از شاخص‌های مختلف مورد توجه پژوهشگران قرار گیرد. نخستین دسته از مطالعات، مانند کار کلاسیک (McKee et al., 1993)، بر توسعه شاخص‌های هواشناسی تمرکز داشتند. آنها با استفاده از داده‌های بارش ماهانه از ایستگاه‌های هواشناسی در ایالت کلرادو، شاخص SPI را معرفی کردند. روش کار آنها مبتنی بر برازش توزیع گاما به سری بارش و سپس نرمال‌سازی آن بود. شاخص SPI یکی از مهمترین و پرکاربردترین شاخص‌های خشکسالی است که توسط سازمان جهانی هواشناسی برای پایش خشکسالی در سراسر جهان پیشنهاد شده است و مبنای پایش خشکسالی در همه کشورهای جهان قرار گرفته است. با این حال، استفاده از شاخص SPI در مناطق خشک و نیمه‌خشک با یک فصل طولانی بدون بارش خالی از اشکال نیست؛ چرا که به دلیل وجود بسیار زیاد صفر و مقادیر بارش نزدیک به صفر میلی‌متر در سری زمانی بارش این مناطق، به‌ویژه در ماه‌های خشک سال، توزیع آماری داده‌های بارش آنها از چولگی بسیار شدیدی برخوردار است (رضی، ۲۰۲۱؛ الف، ۲۰۲۱). در بسیاری از موارد وجود بسیار زیاد صفر و مقادیر بارش نزدیک به صفر میلی‌متر در این مناطق امکان برازش توزیع‌های آماری را به داده‌های بارش، به‌ویژه در ماه‌های خشک، ناممکن می‌سازد. در مواردی هم که توزیع داده‌های بارش امکان برازش به توزیع‌های آماری را فراهم می‌کند این برازش ممکن است به علت چولگی شدید داده‌ها مناسب نباشد و در نتیجه مقدار SPI محاسبه شده با عدم قطعیت بسیار بالایی روبه‌رو باشد. از این‌رو بررسی‌های انجام شده در ایران (Raziei, 2021a; Raziei, 2021b) و آمریکا (Guttman, 1998) نشان می‌دهد که استفاده از نمایه SPI در مناطق خشک باید با احتیاط و آگاهی کامل صورت پذیرد، به‌ویژه وقتی که طول دوره آماری در دسترس کوتاه‌تر از ۳۰ سال باشد.

یکی از مهمترین دلایل استقبال گسترده از شاخص بارش استاندارد شده (SPI) در سراسر جهان، نیاز این شاخص به تنها یک متغیر اقلیمی، یعنی بارش، است. بارش از جمله در دسترس‌ترین متغیرهای اقلیمی است که داده‌های آن با دوره‌های آماری طولانی در بسیاری از نقاط جهان وجود دارد. با این حال، از آنجا که دمای هوا و تقاضای تبخیری جو از عوامل مهم در تشدید و تداوم خشکسالی به‌شمار می‌روند، شاخص SPI به‌تنهایی نمی‌تواند تصویر کاملی از شدت خشکسالی ارائه دهد؛ این محدودیت به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک که تبخیر و تعرق و کمبود رطوبت نقش تعیین‌کننده‌ای دارند، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. برای رفع محدودیت‌های ذکر شده در ارتباط با شاخص SPI، Vicente-Serrano et al (2010) شاخص SPEI را پیشنهاد کردند که در آن با کسر بارش از تبخیر-تعرق بالقوه مقدار تراز آبی اقلیمی را برای محاسبه شدت خشکسالی معرفی کردند که حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات دما و گرمایش جهانی دارد. آنها برای محاسبه شاخص SPEI از داده‌های جهانی بارش و دما (مجموعه CRU TS) در یک دوره بلندمدت استفاده کردند. در ابتدا، با استفاده از متغیر دمای هوا و عرض جغرافیایی نقاط شبکه ابتدا تبخیر-تعرق بالقوه (PET) نقاط را به کمک روش تورنت‌وایت محاسبه و سپس با کسر بارش از PET سری زمانی مقدار تراز آبی نقاط را به‌صورت ماهانه محاسبه کردند. سپس همانند روش محاسبه SPI، مقدار تجمعی تراز آبی ماهانه در مقیاس‌های زمانی مختلف (۱ تا ۴۸ ماهه) را محاسبه و آنها را به توزیع لاگ-لوگستیک برازش و سپس نتیجه را به توزیع نرمال استاندارد تبدیل کردند تا مقدار SPEI به‌دست آید (Vicente-Serrano et al., 2010). از آنجایی که این شاخص بجای بارش، متغیر تراز آبی اقلیمی یا بیلان رطوبتی ($D=P-PET$) را به توزیع‌های آماری برازش می‌دهد، این نمایه مشکل صفرهای زیاد در سری داده‌ها را

ندارد، چرا که احتمال این که مقدار D صفر شود بسیار اندک است (رضیئی و میری، ۲۰۲۳). بنابراین محاسبه SPEI در مناطق خشک و نیمه‌خشک با محدودیت‌های موجود در نمایه SPI روبه‌رو نیست و محاسبه آن اغلب قابل اطمینان است، به‌ویژه اگر طول دوره آماری مورد استفاده بیش از ۳۰ سال باشد. افزون بر این، از آنجایی که نقش تبخیر و تعرق در مناطق خشک بسیار پررنگتر از مناطق معتدل تا سرد است، SPEI وضعیت خشکسالی را در مناطق خشک و نیمه‌خشک بسیار بهتر از SPI نشان می‌دهد و نتیجه آن با واقعیت این مناطق هماهنگی بهتری دارد چرا که برداشت اتمسفر از مقدار بارش باریده شده (PET) را در نظر می‌گیرد. با این حال، بررسی‌های انجام شده در ایران (رضیئی و میری، ۲۰۲۳) نشان می‌دهد که در مواردی توزیع‌های آماری Log-logistic و General Extreme Value (GEV) که برای محاسبه SPEI پیشنهاد شده‌اند، نمی‌توانند به سری زمانی D برخی از ایستگاه‌های مناطق خشک ایران برازش یابند و در نتیجه امکان محاسبه SPEI برای این ایستگاه‌ها فراهم نمی‌شود. در راستای رفع این مشکلات، Raziei (2022) و Raziei & Miri (2023) به‌ترتیب با معرفی نمایه‌های SSPI و SSPEI بجای SPI و SPEI توانستند با استفاده از روش ناپارامتری تابع انتقال باکس-کاکس (Box-Cox (1964) مشکل برازش توزیع‌های آماری به سری‌های بارش با چولگی شدید و سری‌های زمانی D را در مناطق خشک برطرف کنند. آنها علاوه بر ساده‌سازی محاسبه SPI و SPEI توانستند محدودیت‌های کاربردی این دو شاخص در مناطق خشک و نیمه‌خشک را نیز برطرف کنند.

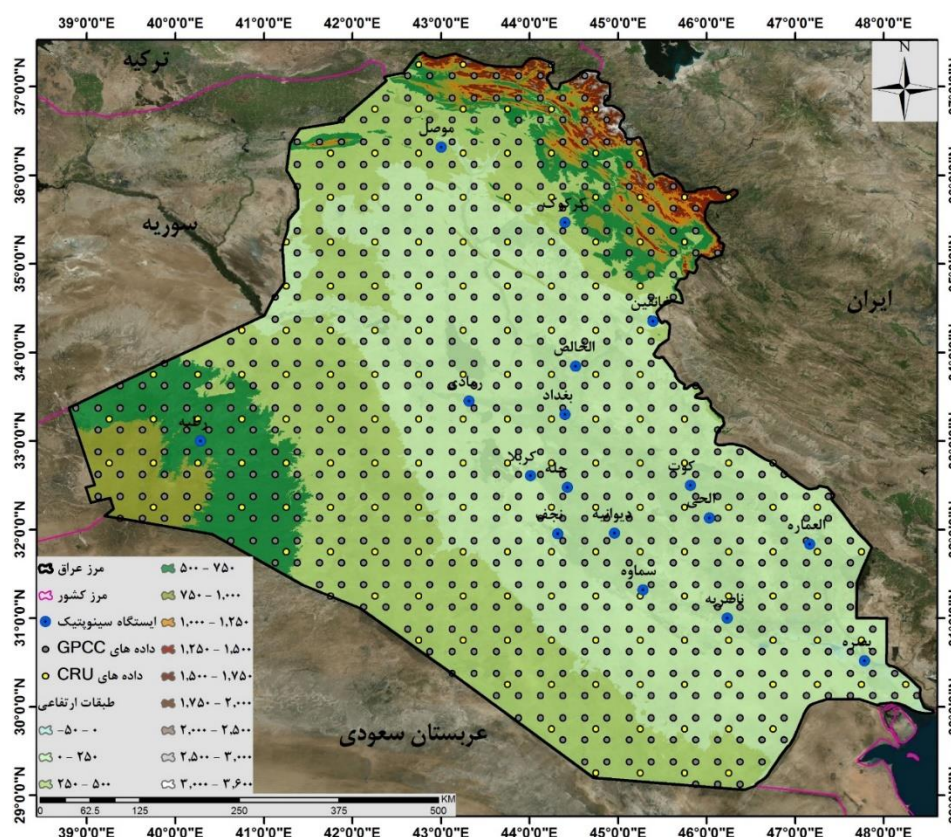
کشور عراق به‌عنوان یکی از کشورهای واقع در کمربند خشک و نیمه‌خشک خاورمیانه و قرارگیری در پایین‌دست رود فرات، به‌شدت از تغییرات اقلیمی منطقه و همچنین برداشت‌های گسترده کشورهای بالادست از آب رودخانه‌ها، به‌ویژه ترکیه، تأثیر می‌پذیرد. بر اساس مطالعات انجام شده، میزان کاهش آب ورودی فرات به عراق در نتیجه اجرای پروژه GAP در ترکیه بیش از ۵۰ درصد گزارش شده است (Mail, 2017). علاوه بر این، پژوهش‌های هیدرو-اقلیمی انجام شده بر روی عراق بیانگر کاهش قابل‌توجه بارش (Eklund & Seaquist, 2015)، افزایش دما (Robaa & Al-Barazanji, 2013) و کاهش پوشش گیاهی در بخش‌های مختلف این کشور هستند. قرار گرفتن عراق بر روی کمربند خشک دنیا، نوسانات شدید بارش، پراکنش نامناسب آن و وقوع دوره‌های طولانی بدون بارش، از ویژگی‌های ذاتی اقلیم این کشور محسوب می‌شود. فعالیت‌های انسانی تأثیرگذار بر کاهش منابع آب سطحی و زیرزمینی، همراه با تغییرات اقلیمی و رخداد خشکسالی‌های مکرر، وضعیت منابع آبی، امنیت غذایی و توسعه اجتماعی-اقتصادی عراق را به‌شدت تحت تأثیر قرار داده است (Bigas, 2012). افزون بر این، پراکنش نامناسب ایستگاه‌های هواشناسی، نقص داده‌های مشاهداتی ناشی از جنگ‌های طولانی‌مدت و نبود داده‌های قابل اعتماد در بسیاری از مناطق، مطالعه خشکسالی در این کشور را پیچیده می‌کند. از سوی دیگر، قرار گرفتن عراق در کمربند بیابانی جهان که سبب افزایش بسیار زیاد دمای هوا و بی‌نظمی شدید در بارش می‌شود، مطالعه خشکسالی را با چالش‌های روش‌شناسی نیز روبه‌رو می‌کند؛ چرا که همان‌گونه که در مطالعات ایران نیز گزارش شده است، این شرایط محاسبه شاخص‌های SPI و SPEI را در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک با دشواری‌های جدی مواجه می‌سازد. در چنین شرایطی، ارزیابی شاخص‌های اصلاح‌شده SSPI (Raziei, 2022) و SSPEI (Raziei & Miri, 2023) در عراق اهمیت ویژه‌ای دارد. این شاخص‌ها پیش‌تر تنها در ایران که بخش‌هایی از آن از نظر اقلیمی مشابه عراق است، مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. از آنجا که اصلاح یک شاخص اقلیمی نیازمند اعتبارسنجی در اقلیم‌ها و مناطق مختلف جهان است، ارزیابی SSPI و SSPEI در عراق گامی ضروری در مسیر توسعه و تقویت این شاخص‌ها در کمربند خشک و نیمه‌خشک جهان محسوب می‌شود. بنابراین، این پژوهش با هدف ارزیابی و اعتبارسنجی نمایه‌های SSPI و SSPEI در گستره متنوع اقلیمی عراق و شناسایی نقاط ضعف احتمالی آنها به‌منظور فراهم‌سازی ابزاری دقیق‌تر برای پایش خشکسالی در این کشور، به ارزیابی کارایی و دقت این شاخص‌ها در این کشور می‌پردازد.

روشناسی پژوهش

— داده‌ها

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش کل کشور عراق در غرب آسیا (شکل ۱) است. بررسی داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی این کشور نشان داد که عدم توزیع مناسب ایستگاه‌های هواشناسی در سطح منطقه مورد مطالعه (شکل ۱) و احتمال بروز خطاهای دیده‌بانی مختلف در اندازه‌گیری متغیرها به‌ویژه در سال‌های بیابانی جنگ در این کشور (جنگ تحمیلی به ایران (۱۳۵۹-۱۳۶۷) و سپس با آمریکا (۱۳۹۰-۱۳۹۱))

(۱۳۸۱) و درگیری‌های داخلی)، باعث ایجاد نقایص آماری و عدم دسترسی به داده‌های دقیق می‌شود. از این‌رو در این پژوهش از داده‌های شبکه‌ای مراکز GPCC و CRU استفاده شده است که ویژگی‌های کلی و نیز دقت آنها در گستره کشور ایران به تفصیل توسط میری و همکاران (۱۳۹۵) مورد بررسی قرار گرفته است. دقت داده‌های این مراکز برای سطح کشور عراق نیز توسط رزاق عبد و همکاران (۱۴۰۴) مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج آنها نشان‌دهنده دقت مناسب داده‌های بارش مرکز GPCC و کارایی مناسب داده‌های کمینه و بیشینه دمای مرکز CRU در مقابل داده‌های مشاهداتی در ایستگاه‌های پراکنده در سطح کشور عراق می‌باشد (شکل ۱). از این‌رو داده‌های مورد استفاده در این پژوهش دربرگیرنده داده‌های بارش مرکز GPCC با قدرت تفکیک مکانی ۰/۲۵ و داده‌های متوسط ماهانه کمینه و بیشینه دمای مرکز CRU با قدرت تفکیک مکانی ۰/۵ درجه جغرافیایی است. در این پژوهش از آخرین نسخه داده‌های GPCC و همچنین نسخه CRU TS v4.08 استفاده شده است.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های سینوپتیک عراق و پراکنش فضایی شبکه داده‌های GPCC و CRU در سطح منطقه مورد مطالعه

– روش پژوهش

چارچوب این پژوهش بر این فرض استوار است که عملکرد شاخص‌های استاندارد خشکسالی تحت شرایط مختلف اقلیمی و آماری یکسان نیست و در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به‌ویژه در ماه‌های گرم سال که فراوانی مقادیر بارش صفر میلی‌متر زیاد و چولگی سری‌های بارش و بیلان رطوبتی افزایش می‌یابد، برازش توزیع‌های احتمال مورد استفاده در شاخص‌های متداول ممکن است با محدودیت مواجه شود. بر این اساس، هدف این پژوهش ارزیابی عملکرد شاخص‌های اصلاح‌شده SSPI و SSPEI در مقایسه با SPI و SPEI در شرایط اقلیمی و داده‌ای عراق در مقیاس‌های زمانی ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۲۴ ماهه است. برای این منظور، با توجه به پراکنش نامناسب ایستگاه‌های سینوپتیک در پهنه کشور عراق، از داده‌های شبکه‌ای GPCC و CRU استفاده شد. داده‌های بارش GPCC با تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه

جغرافیایی برای ۶۷۵ نقطه و داده‌های میانگین کمینه و بیشینه دمای ماهانه CRU با تفکیک مکانی ۰/۵ درجه جغرافیایی برای ۱۷۲ نقطه در پهنه عراق از تارنماهای مرتبط دریافت شدند. به‌منظور یکسان‌سازی شبکه‌های نقاط این دو پایگاه داده، داده‌های دمای هوای CRU با استفاده از روش درون‌یابی دوخطی^۱ به شبکه نقاط پایگاه داده GPCC با دقت مکانی ۰/۲۵ درجه جغرافیایی درون‌یابی شدند تا با یکدیگر هم‌مقیاس شوند. سپس شاخص بارش استاندارد شده (SPI) و نسخه اصلاح‌شده آن (SSPI)، و شاخص بارش و تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) و نسخه اصلاح‌شده آن (SSPEI) در مقیاس‌های زمانی ۳، ۶، ۹، ۱۲ و ۲۴ ماهه برای تمامی نقاط شبکه GPCC محاسبه شدند. روابط و روش محاسبه SPI و SPEI به‌ترتیب توسط McKee et al (1993) و Vicente-Serrano et al (2010) به تفصیل ارائه شده است؛ بنابراین، با توجه به تشریح این روابط در مطالعات پیشین، در این پژوهش از تکرار آن‌ها خودداری و تنها روش محاسبه شاخص‌های اصلاح‌شده SSPI و SSPEI ارائه می‌شود.

بر اساس مطالعات Raziei (2022) و Raziei & Miri (2023) محاسبه نمایه‌های SSPI و SSPEI با استفاده از رابطه ساده ۱ به شکل زیر انجام می‌شود؛

$$X_i = \begin{cases} 1 + \frac{X_i^{\lambda-1}}{\lambda G^{\lambda-1}} & \text{When } \lambda \neq 0 \\ G \times \ln(X_i) & \text{When } \lambda = 0 \end{cases} \quad (\text{رابطه ۱})$$

در این رابطه X_i و X_i^* به ترتیب مقدار بارش (تراز آبی اقلیمی) در سری زمانی بارش (تراز آبی اقلیمی) پیش و پس از نرمال‌سازی به کمک تابع انتقال باکس-کاکس (Box-Cox, 1964) را معرفی می‌کنند، پارامتر λ مقداری است که X_i به توان آن می‌رسد و G نیز میانگین هندسی داده‌های مشاهده‌ای است که از رابطه ۲ به‌دست می‌آید. مقدار G که به‌عنوان فاکتور مقیاس عمل می‌کند از ضرب ریشه N ام مقادیر مشاهده‌ای در سری X_i به‌دست می‌آید. یادآوری می‌شود که مقدار پارامتر λ در این رابطه عددی میان -۵ تا +۵ است که با فاصله مقداری ۰/۰۱ از -۵ تا +۵ (مقدار ۱۰۰۱) در تغییر است. از این‌رو متغیر X_i^* با هر مقدار از ۱۰۰۱ پارامتر λ محاسبه و از میان آن‌ها آن سری که کوچکترین چولگی را دارد برای استفاده در رابطه ۳ انتخاب می‌شود.

$$G = (\prod X_i^N)^{1/N} \quad (\text{رابطه ۲})$$

در رابطه ۲، N برابر است با تعداد کل مشاهده‌ها در سری X . از آنجایی که تابع انتقال باکس-کاکس توزیع آماری داده‌های تبدیل شده را به‌سوی توزیع نرمال استاندارد با میانگین صفر و انحراف از معیار ۱ سوق می‌دهد می‌توان سری تبدیل شده X^* را با استفاده از فرمول z -score که به شکل رابطه ۳ نمایش داده می‌شود به توزیع نرمال استاندارد تبدیل کرد.

$$Z = \frac{(\hat{X} - \hat{\mu})}{\hat{\sigma}} \quad (\text{رابطه ۳})$$

در رابطه ۳، $\hat{\mu}$ و $\hat{\sigma}$ به ترتیب میانگین و انحراف از معیار سری زمانی تبدیل شده X^* هستند. پس از استاندارد کردن مقدار بارش (تراز آبی اقلیمی) تبدیل شده (X^*) به کمک رابطه ۳، مقدار SSPI به کمک رابطه ۴ محاسبه می‌شود. در این رابطه مقدار SSPI برابر با مقدار Z خواهد بود اگر چولگی سری زمانی Z برابر یا کوچکتر از قدرمطلق ۰/۵ باشد و مقادیر سری زمانی تبدیل شده (X^*) نابرابر با ۱ باشند. اما اگر چولگی سری زمانی Z بزرگتر از قدرمطلق ۰/۵ و مقادیر سری زمانی تبدیل شده (X^*) برابر با ۱ باشند مقدار SSPI با استفاده از رابطه $-3 \frac{X - \bar{X}}{-(\max(X) + \epsilon) - 0}$ به‌دست می‌آید.

$$SSPI = \begin{cases} Z & \text{if skewness of } Z \leq |0.5| \text{ and } \hat{X} \neq \bar{1} \\ -3 \frac{X - \bar{X}}{-(\max(X) + \epsilon) - 0} & \text{if skewness of } Z > |0.5| \text{ and } \hat{X} = \bar{1} \end{cases} \quad (\text{رابطه ۴})$$

در رابطه ۴، X و $\bar{X}$ به ترتیب سری زمانی داده‌های اولیه بارش و میانه آنها هستند، $\bar{X}$ سری زمانی تبدیل شده بارش و ε یک مقدار ثابت کوچک و مثبت است که تنها برای جلوگیری از تقسیم صفر بر صفر مورد استفاده قرار گرفته است. این رابطه زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد که بیشتر از ۳۰ درصد از مقادیر سری زمانی بارش صفر باشد، که بیشتر در ماه‌های فصل خشک مناطق خشک و نیمه‌خشک دیده می‌شود. با توجه به این که میانه و حتی چارک سوم سری‌های زمانی بارش فصل خشک این مناطق برابر با صفر است، این رابطه مقدار بارش صفر میلی‌متر را به‌عنوان هنجار (نرمال) اقلیمی سری زمانی در نظر گرفته و هر مقدار بارش را از آن کم می‌کند. به این ترتیب، هر مقدار بارش بزرگتر از صفر به‌عنوان درجه‌ای از مازاد آب در نظر گرفته می‌شود، در حالی که برای مقادیر صفر میلی‌متر بارش، مقدار SSPI صفر در نظر گرفته می‌شود.

به دلیل نبود مشکل فراوانی داده‌های صفر در سری‌های زمانی تراز آبی اقلیمی ایستگاه‌ها، محاسبه SSPEI فرایند ساده‌تری از SSPI دارد. از این‌رو برای محاسبه SSPEI کافی است که سری زمانی تراز آبی را با قدر مطلق کوچکترین مقدار سری جمع کنیم تا همه مقادیر سری مثبت شوند و سپس آن را با استفاده از رابطه ۱ به سری بدون چولگی تبدیل کرده و نتیجه آن را با استفاده از رابطه ۵ به توزیع نرمال استاندارد تبدیل کنیم.

$$SSPEI = \frac{(\bar{X} - \bar{\mu})}{\sigma} \quad \text{رابطه ۵}$$

به‌منظور ارزیابی میزان انطباق شاخص‌های اصلاح‌شده با شاخص‌های متداول، از شش معیار آماری شامل ضریب همبستگی (R)، ضریب تعیین (R^2)، ضریب کارایی نش-ساتکلیف (EF)، جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، اریبی (Bias) و شیب رگرسیون (Slope) استفاده شد. R و R^2 میزان همبستگی و تغییرات مشترک دو شاخص را نشان می‌دهند؛ EF میزان انطباق عملکرد شاخص‌ها، RMSE اندازه اختلاف مطلق، Bias جهت و میزان سوگیری و Slope میزان انطباق دامنه تغییرات دو شاخص را ارزیابی می‌کند. استفاده هم‌زمان از این معیارها امکان ارزیابی عملکرد شاخص‌ها از جنبه‌های مختلف را فراهم می‌کند و مقایسه آنها را به ضریب همبستگی محدود نمی‌سازد. جزئیات محاسبه معیارهای آماری مورد استفاده در مطالعات (Moriasi et al., 2007) و میری و همکاران، (۱۳۹۵) ارائه شده است.

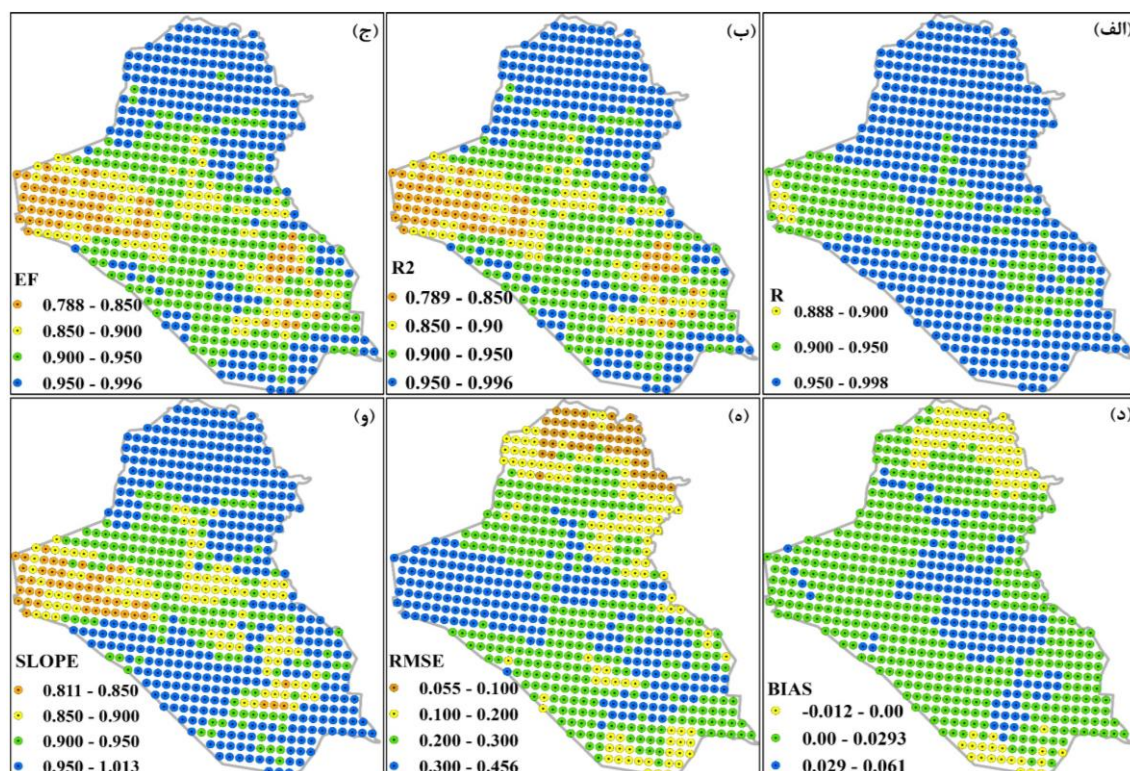
یافته‌های پژوهش

– ارزیابی عملکرد شاخص SSPI

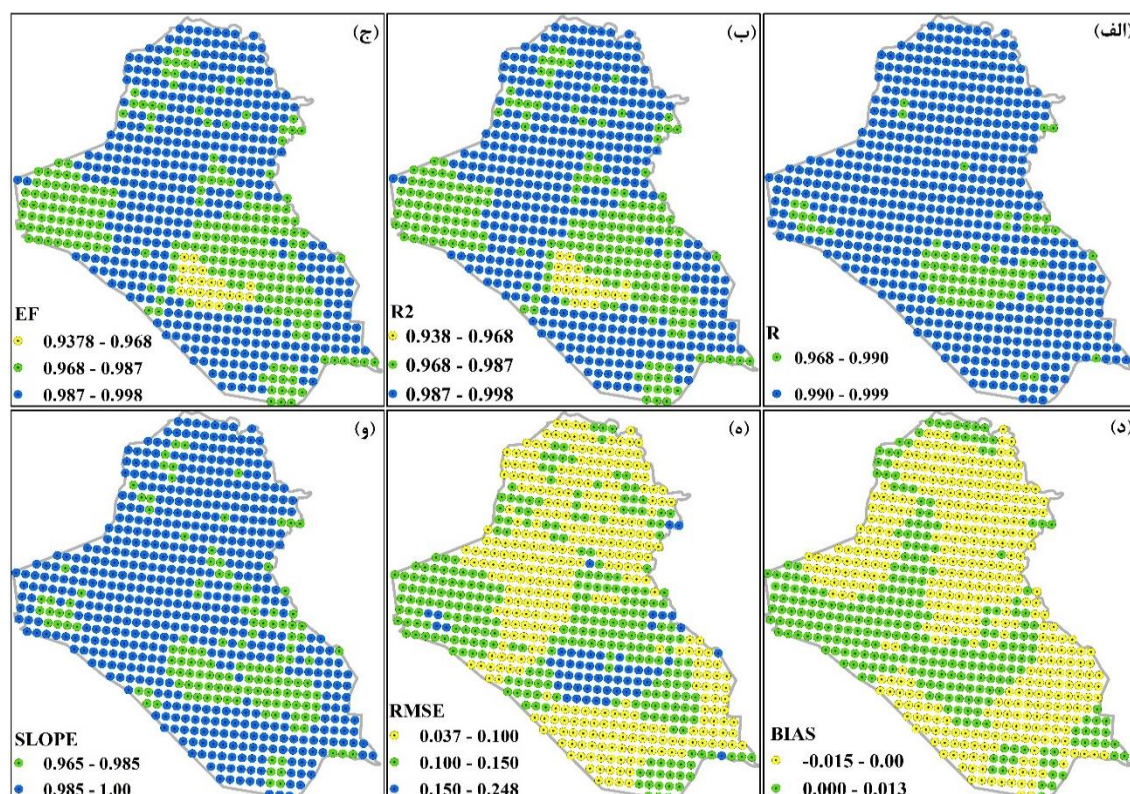
نتایج مقایسه عملکرد شاخص SSPI در مقابل SPI در کشور عراق، بر اساس داده‌های شبکه‌ای GPCP و CRU طی دوره ۷۱ ساله ۱۹۵۰–۲۰۲۰، در شکل‌های ۲ تا ۵ ارائه شده است. برای ارزیابی جامع میزان انطباق دو شاخص، آماره‌های ضریب همبستگی (R)، ضریب تعیین (R^2)، ضریب کارایی (EF)، مجذور میانگین مربع خطا (RMSE)، اریبی (Bias) و شیب خط رگرسیون (Slope) مورد بررسی قرار گرفتند. مقادیر R نشان‌دهنده ارتباط خطی بسیار قوی بین SSPI و SPI در تمامی مقیاس‌های زمانی است. در مقیاس ۳ ماهه، مقدار R از ۰/۸۸ تا ۰/۹۹۸ متغیر است. کمترین مقادیر عمدتاً در منتهی‌الیه غرب و بخش‌هایی از غرب و شرق عراق مشاهده می‌شود، در حالی که در بخش عمده کشور مقادیر R بیشتر از ۰/۹۵ و در برخی مناطق نزدیک به ۰/۹۹۸ است. با افزایش مقیاس زمانی، دامنه تغییرات R محدودتر شده و در مقیاس ۶ ماهه بین ۰/۹۶۸ تا ۰/۹۹۹ قرار می‌گیرد. در مقیاس‌های ۱۲ و ۲۴ ماهه نیز مقادیر R در محدوده ۰/۹۴ تا ۰/۹۹۸ قرار دارند (شکل‌های الف-۲ تا الف-۵). این الگو نشان می‌دهد که هم‌تغییری SSPI و SPI در مقیاس‌های زمانی بلندتر بیشتر شده و اختلاف رفتار دو شاخص عمدتاً در مقیاس کوتاه‌مدت ۳ ماهه آشکارتر است. الگوی فضایی ضریب تعیین (R^2) نیز نتایج حاصل از R را تأیید می‌کند. مقدار R^2 در مقیاس ۳ ماهه از حدود ۰/۷۹ تا ۰/۹۹۸ و در مقیاس‌های زمانی بلندتر تا نزدیک ۱/۰۰ تغییر می‌کند. کمترین مقادیر عمدتاً در بخش‌هایی از غرب و همچنین قسمت‌هایی از شرق و مرکز عراق مشاهده می‌شود، در حالی که در بیشتر مناطق کشور مقادیر R^2 در سطوح بالا قرار دارند (شکل‌های ب-۲ تا ب-۵). بنابراین، بخش عمده تغییرپذیری SSPI در مقیاس مکانی مورد مطالعه با تغییرات SPI همراه است. با این حال، تمرکز مقادیر پایین‌تر در برخی نواحی، به‌ویژه در مقیاس ۳ ماهه، نشان می‌دهد که میزان انطباق دو شاخص از نظر مکانی کاملاً یکنواخت نیست. آماره کارایی (EF) نیز برای بررسی میزان انطباق مقادیر SSPI با SPI مورد استفاده قرار گرفت. در مقیاس ۳ ماهه،

مقدار EF در محدوده ۰/۷۸۸ تا ۰/۹۹۶ قرار دارد و مقادیر پایین‌تر عمدتاً در بخش‌هایی از غرب و شرق عراق مشاهده می‌شود. با افزایش مقیاس زمانی، مقادیر EF افزایش یافته و مقدار آن در مقیاس‌های ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه در بخش عمده کشور به عدد ۱ نزدیک می‌شود (شکل‌های ج-۲ تا ج-۵). این افزایش EF در مقیاس‌های زمانی بلندتر بیانگر کاهش اختلاف عملکرد دو شاخص و نزدیک‌تر شدن مقادیر SSPI به SPI است. در نتیجه، اگرچه در مقیاس ۳ ماهه تفاوت‌های مکانی بیشتری میان دو شاخص وجود دارد، این اختلاف در مقیاس‌های زمانی بلندتر کاهش می‌یابد. در مقابل، RMSE تصویری متفاوت از میزان اختلاف دو شاخص ارائه می‌کند، زیرا مقادیر کمتر این آماره نشان‌دهنده خطای مطلق کمتر و در نتیجه انطباق بهتر است. همان‌طور که در شکل‌های (ه-۲) تا (ه-۵) مشاهده می‌شود، در مقیاس ۳ ماهه RMSE در محدوده ۰/۰۵۵ تا ۰/۴۵ قرار دارد و مقادیر بالاتر عمدتاً در بخش‌هایی از شمال و جنوب و همچنین برخی نواحی دارای ناهمگنی بیشتر مشاهده می‌شود. در مقیاس ۶ ماهه، دامنه RMSE به ۰/۰۳۷ تا ۰/۲۴۸ می‌رسد. در مقیاس‌های ۱۲ و ۲۴ ماهه نیز به ترتیب دامنه‌های ۰/۰۱۹ تا ۰/۳۵۱ و ۰/۰۱۶ تا ۰/۳۳۷ مشاهده می‌شود. بنابراین، اگر چه با افزایش مقیاس زمانی دامنه کلی خطا کاهش می‌یابد، این کاهش در سراسر کشور یکنواخت نیست و در برخی نواحی مرکزی همچنان مقادیر RMSE بالاتری مشاهده می‌شود. این موضوع نشان می‌دهد که همبستگی بالا میان دو شاخص لزوماً به معنای یکسان بودن مقدار برآورد شده آنها در تمام نقاط نیست و ارزیابی خطای مطلق نیز ضروری است.

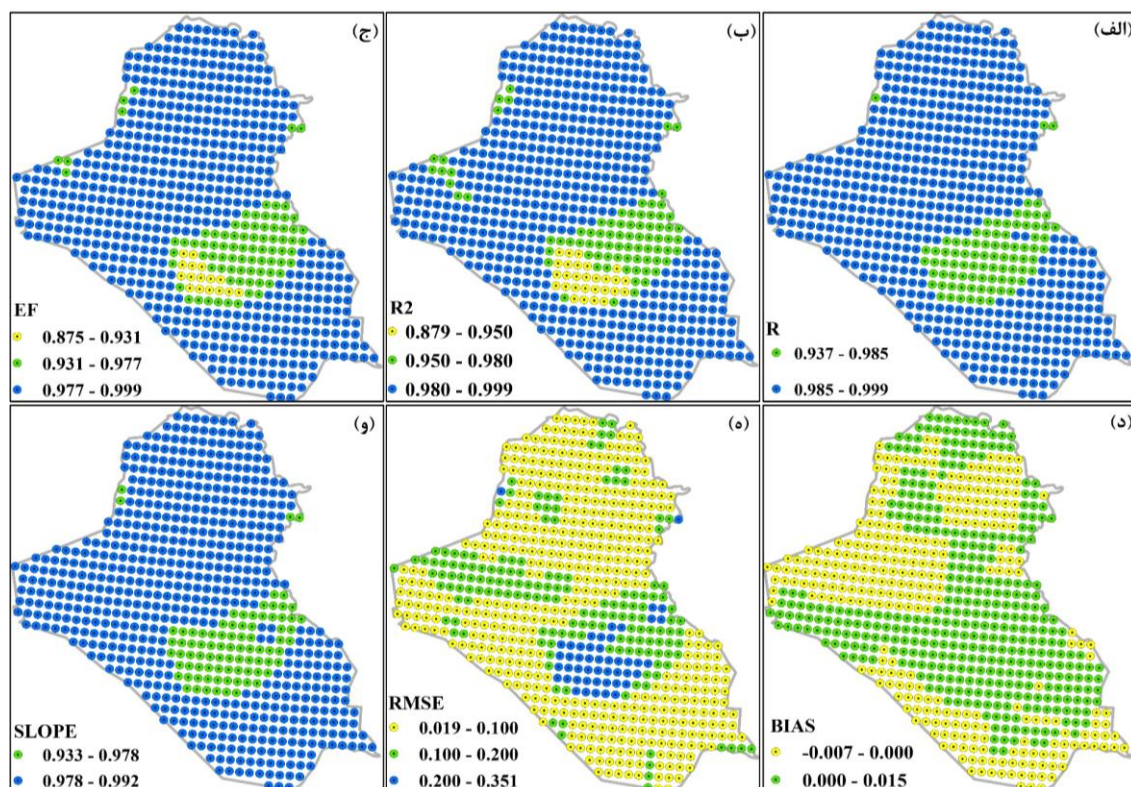
شاخص اریبی (Bias) نیز به عنوان یکی دیگر از آماره‌های مورد بررسی، برای ارزیابی میزان و جهت اختلاف سیستماتیک میان SSPI و SPI مورد استفاده قرار گرفت (شکل‌های د-۲ تا د-۵). در مقیاس ۳ ماهه، Bias در محدوده ۰/۰۱۲- تا ۰/۰۶۱ قرار دارد و در بیشتر مناطق به صفر نزدیک است؛ با این حال، مقادیر مثبت‌تر در بخش‌هایی از جنوب و شرق عراق مشاهده می‌شود که بیانگر تمایل محدود SSPI به برآورد مقادیر بالاتر نسبت به SPI در این نواحی است. در مقیاس ۶ ماهه، دامنه Bias به ۰/۰۱۵- تا ۰/۰۱۳ کاهش می‌یابد و در مقیاس ۱۲ ماهه نیز در محدوده ۰/۰۰۷- تا ۰/۰۱۵ قرار دارد. در مقیاس ۲۴ ماهه، بیشتر مناطق همچنان Bias نزدیک به صفر دارند، هر چند در بخش‌هایی از جنوب و مرکز مقادیر مثبت تا حدود ۰/۰۷۴ مشاهده می‌شود. در مجموع، نزدیک بودن Bias به صفر در بیشتر پهنه عراق نشان‌دهنده نبود سوگیری سیستماتیک قابل توجه میان SSPI و SPI است. با این حال، ناهمگنی فضایی این آماره نشان می‌دهد که انطباق دو شاخص از نظر مقدار مطلق در تمام مناطق یکسان نیست. در نهایت، Slope برای بررسی میزان انطباق دامنه تغییرات SSPI و SPI با حالت ایده‌آل خط ۱:۱ مورد بررسی قرار گرفت. در مقیاس ۳ ماهه، مقدار Slope در محدوده ۰/۸۱ تا ۱/۰۰ قرار دارد و بیشترین انحراف از مقدار ایده‌آل خط ۱:۱ عمدتاً در بخش‌هایی از غرب و مرکز عراق مشاهده می‌شود (شکل‌های و-۲ تا و-۵). این وضعیت نشان می‌دهد که در برخی نواحی، تفاوت میان دو شاخص تنها به میزان همبستگی محدود نمی‌شود، بلکه دامنه نوسانات آنها نیز متفاوت است. در مقیاس ۶ ماهه، مقادیر Slope عمدتاً به ۰/۹۶۵ تا ۱/۰۰ محدود می‌شود که بیانگر افزایش انطباق دامنه تغییرات دو شاخص است. در مقیاس‌های ۱۲ و ۲۴ ماهه نیز مقادیر Slope به ترتیب در محدوده ۰/۹۳۳ تا ۰/۹۹۲ و ۰/۹۳۷ تا ۰/۹۹۳ قرار دارند. مقادیر نزدیک به یک نشان‌دهنده آن است که دامنه تغییرات SSPI و SPI در بیشتر مناطق به یکدیگر نزدیک است، هر چند مقادیر کمتر از یک در برخی نواحی بیانگر کم‌برآوردی جزیی دامنه تغییرات SSPI نسبت به SPI است. در مجموع، نتایج حاصل از مجموعه آماره‌های مورد بررسی نشان می‌دهد که SSPI و SPI در بخش عمده‌ای از کشور عراق رفتار بسیار مشابهی دارند، اما میزان این انطباق به مقیاس زمانی و موقعیت مکانی وابسته است. بیشترین اختلاف میان دو شاخص عمدتاً در مقیاس ۳ ماهه و در بخش‌هایی از غرب، شرق و مرکز عراق مشاهده می‌شود، در حالی که با افزایش مقیاس زمانی، همبستگی و کارایی افزایش یافته، Bias عموماً به صفر نزدیک‌تر شده و Slope نیز به مقدار ایده‌آل خط ۱:۱ نزدیک می‌شود.



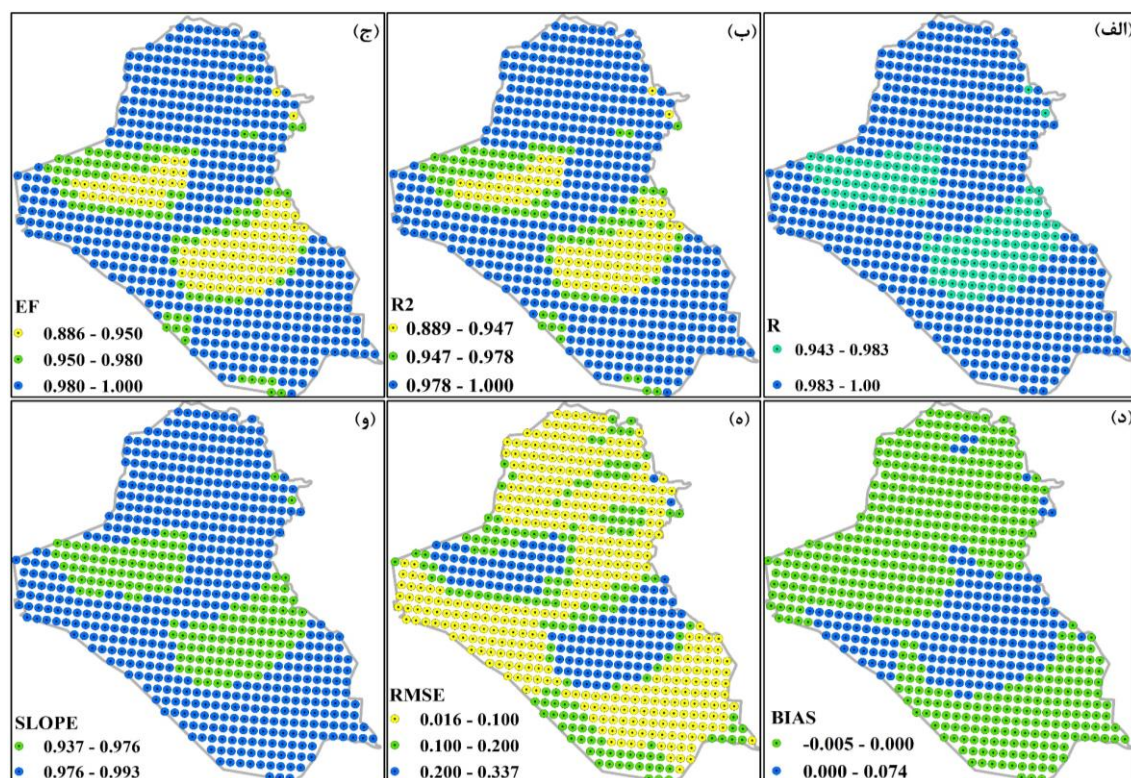
شکل ۲. مقایسه شاخص خشکسالی SSPI و SPI در سطح کشور عراق در مقیاس زمانی سه ماهه



شکل ۳. مقایسه شاخص خشکسالی SSPI و SPI در سطح کشور عراق در مقیاس زمانی شش ماهه



شکل ۴. مقایسه شاخص خشکسالی SSPI و SPI در سطح کشور عراق در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه



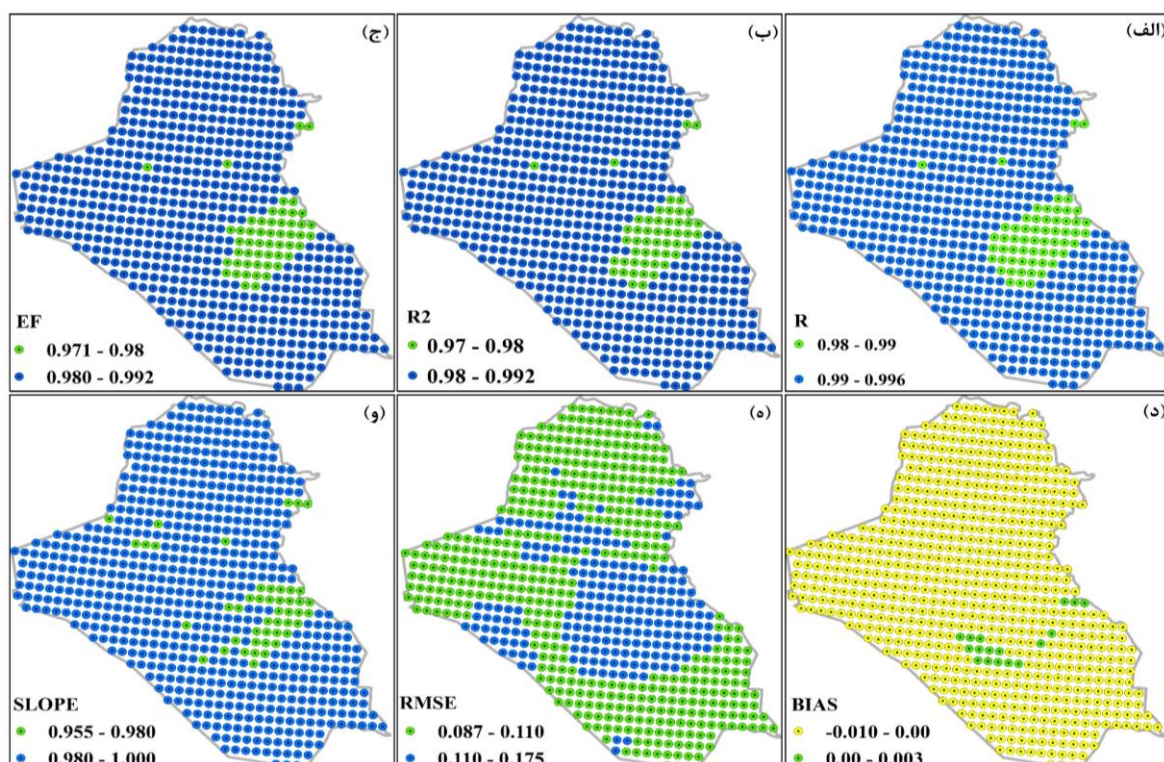
شکل ۵. مقایسه شاخص خشکسالی SSPI و SPI در سطح کشور عراق در مقیاس زمانی ۲۴ ماهه

– ارزیابی عملکرد شاخص SSPEI

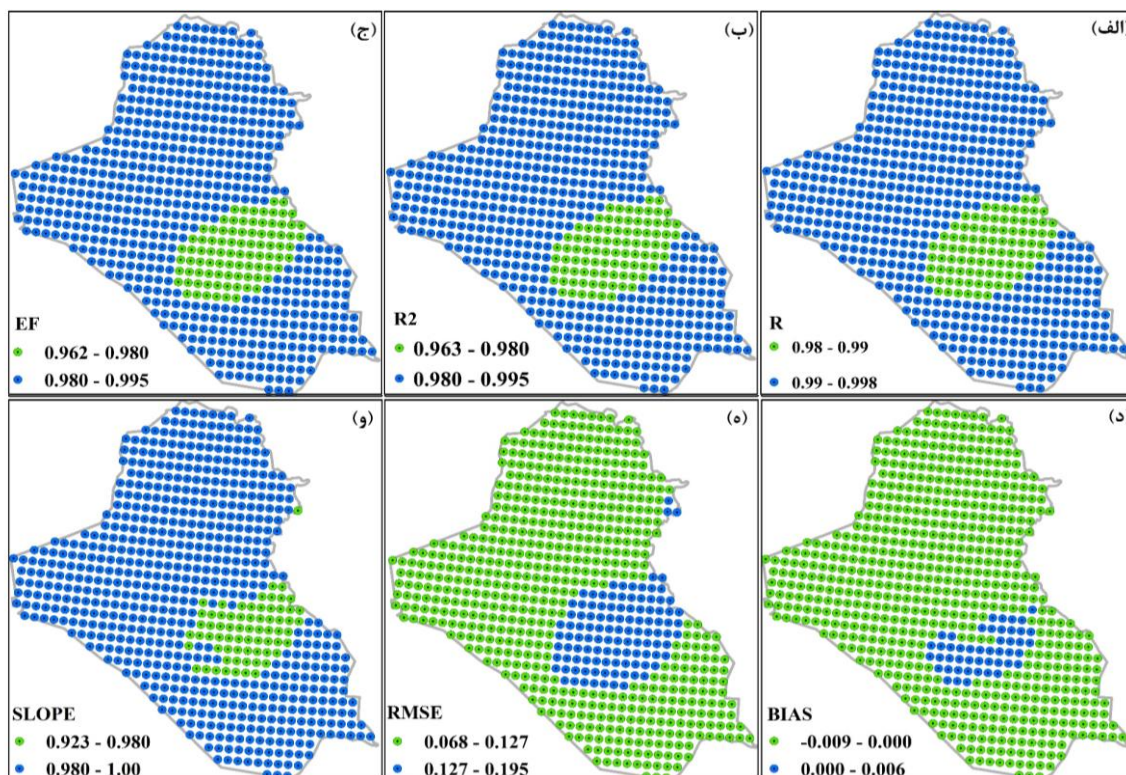
نتایج مقایسه عملکرد شاخص اصلاح‌شده SSPEI در برابر SPEI با استفاده از آماره‌های مختلف در مقیاس‌های زمانی ۳، ۶، ۱۲ و ۲۴ ماهه در شکل‌های ۶ تا ۹ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل‌های (الف-۶) تا (الف-۹) مشاهده می‌شود، مقادیر R و R^2 در تمامی مقیاس‌های زمانی بسیار بالا بوده و به‌ترتیب در محدوده ۰/۹۷ تا ۰/۹۹ قرار دارند. این مقادیر نشان‌دهنده هم‌تغییری خطی بسیار قوی میان SSPEI و SPEI است. از نظر مکانی نیز کمترین مقادیر این دو آماره عمدتاً در بخش‌هایی از شرق عراق، به‌ویژه محدوده شهرهای الحی و کوت، مشاهده می‌شود، در حالی که در بیشتر مناطق کشور R^2 در سطوح بالاتر از ۰/۹۸ قرار دارد. در مقیاس‌های ۱۲ و ۲۴ ماهه، مقادیر R^2 به حدود ۰/۹۸۵ و بالاتر می‌رسد که بیانگر افزایش انطباق دو شاخص با افزایش مقیاس زمانی است. بنابراین، برخلاف SSPI و SPI که در مقیاس کوتاه‌مدت اختلاف مکانی بیشتری نشان دادند، SSPEI و SPEI در تمامی مقیاس‌های مورد بررسی از الگوی فضایی بسیار مشابهی برخوردارند و اختلاف میان آنها محدود است. آماره کارایی (EF) نیز به‌عنوان معیار دیگری برای ارزیابی میزان انطباق SSPEI و SPEI مورد بررسی قرار گرفت (شکل‌های ج-۶ تا ج-۹).

مقادیر EF در تمامی مقیاس‌های زمانی در محدوده ۰/۹۴ تا ۰/۹۹ قرار دارند و بیانگر تطابق بسیار مناسب دو شاخص است. بیشترین مقادیر EF در مقیاس‌های ۱۲ و ۲۴ ماهه، به‌ترتیب حدود ۰/۹۹۷ و ۰/۹۹۸، مشاهده شده است. از نظر مکانی، کمترین مقادیر EF عمدتاً در بخش‌هایی از شرق عراق، به‌ویژه محدوده الحی و کوت، دیده می‌شود؛ با این حال، اختلاف این نواحی با سایر بخش‌های کشور محدود و در حدود ۰/۰۲ تا ۰/۰۴ است. افزایش EF در مقیاس‌های زمانی بلندتر نشان می‌دهد که با افزایش طول دوره تجمع، اختلاف عملکرد SSPEI و SPEI کاهش یافته و مقادیر دو شاخص به یکدیگر نزدیکتر می‌شوند. شاخص اریبی (Bias) نیز به‌عنوان یکی دیگر از آماره‌های مورد بررسی، برای ارزیابی میزان و جهت اختلاف سیستماتیک میان SSPEI و SPEI مورد استفاده قرار گرفت (شکل‌های د-۶ تا د-۹). مقادیر Bias در تمامی مقیاس‌های زمانی عمدتاً به صفر نزدیک بوده و در دامنه ۰/۰۰۹- تا ۰/۱۳ قرار دارند. این مقادیر نشان می‌دهد که بین دو شاخص سوگیری سیستماتیک قابل‌توجهی وجود ندارد و اختلاف آنها از نظر مقدار متوسط محدود است. از نظر مکانی نیز بیشترین اختلاف Bias در بخش‌هایی از شرق عراق مشاهده می‌شود، در حالی که در بخش عمده کشور مقادیر آن نزدیک به صفر باقی می‌ماند.

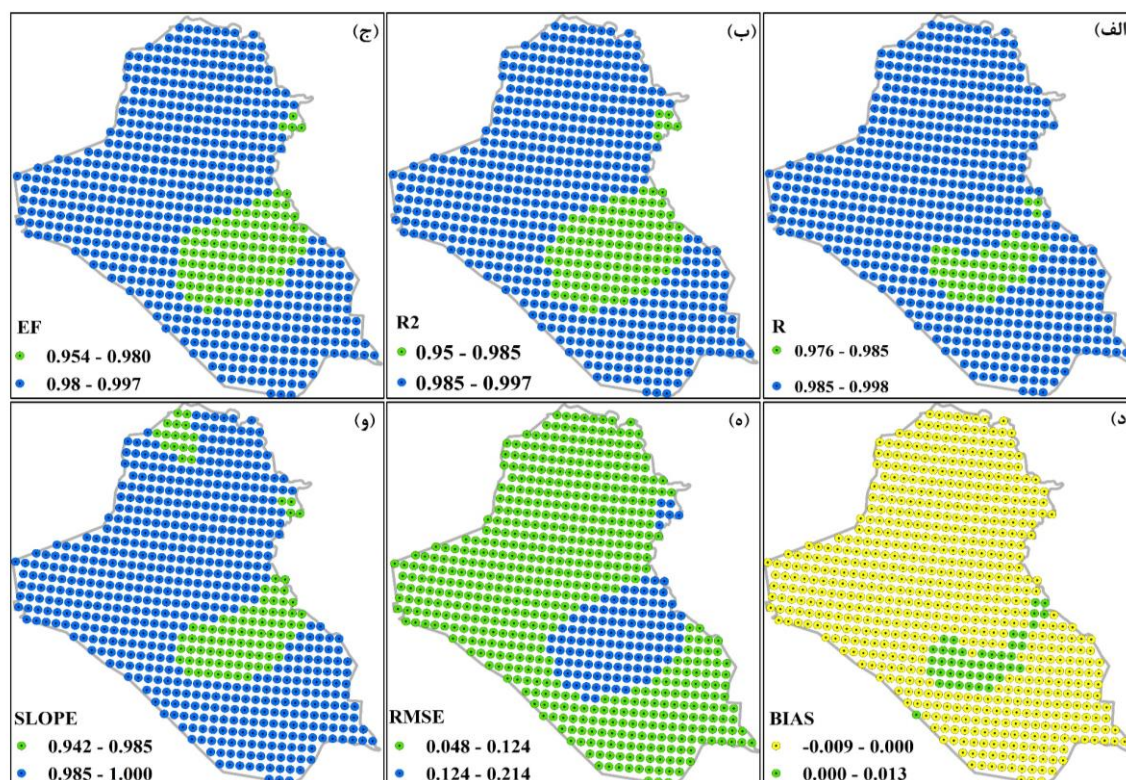
مقادیر RMSE نیز میزان اختلاف مطلق میان دو شاخص را نشان می‌دهد (شکل‌های ه-۶ تا ه-۹). مقادیر این آماره در تمامی مقیاس‌ها نسبتاً پایین است؛ به‌طوری‌که کمترین مقدار حدود ۰/۰۴۱ در مقیاس ۲۴ ماهه و حدود ۰/۰۸ در مقیاس ۳ ماهه گزارش شده است، در حالی که بیشترین مقادیر به حدود ۰/۲۱۴ در مقیاس ۱۲ ماهه و ۰/۱۷۵ در مقیاس ۳ ماهه می‌رسد. در مجموع، مقادیر پایین RMSE در بیشتر مناطق نشان می‌دهد که اختلاف مطلق میان SSPEI و SPEI محدود است؛ هر چند همانند سایر آماره‌ها، برخی نواحی شرق عراق اختلاف بیشتری را نشان می‌دهند. بنابراین، نتایج RMSE در کنار مقادیر بالای R و EF تأیید می‌کند که شباهت SSPEI و SPEI تنها به روند تغییرات محدود نبوده و از نظر مقدار نیز در بیشتر مناطق قابل‌توجه است. در نهایت، Slope برای بررسی میزان انطباق دامنه تغییرات SSPEI و SPEI با خط ایده‌آل ۱:۱ مورد بررسی قرار گرفت (شکل‌های و-۶ تا و-۹). مقادیر Slope در تمامی مقیاس‌های زمانی در محدوده ۰/۹۲ تا ۱/۰۰ قرار دارند و در بیشتر مناطق به مقدار ایده‌آل خط ۱:۱ نزدیکند. این وضعیت نشان می‌دهد که دامنه نوسانات SSPEI و SPEI نیز، علاوه بر روند کلی تغییرات، تطابق بالایی با یکدیگر دارد. مقادیر اندکی کمتر از یک در برخی نواحی نشان‌دهنده کم‌برآوردی جزئی دامنه تغییرات SSPEI نسبت به SPEI است. از نظر مکانی، بخش‌هایی از شرق عراق، به‌ویژه محدوده الحی و کوت، اندکی انحراف بیشتری از وضعیت ایده‌آل نشان می‌دهند. در مجموع، نتایج شش آماره مورد بررسی نشان می‌دهد که SSPEI و SPEI در تمامی مقیاس‌های زمانی مورد مطالعه از انطباق بسیار بالایی برخوردارند و اختلاف میان دو شاخص از نظر هم‌تغییری، خطای مطلق، سوگیری و دامنه نوسانات محدود است. این انطباق در مقیاس‌های زمانی ۱۲ و ۲۴ ماهه بیشتر بوده و اختلاف مکانی دو شاخص نیز عمدتاً به بخش‌هایی از شرق عراق، به‌ویژه محدوده الحی و کوت، محدود می‌شود.



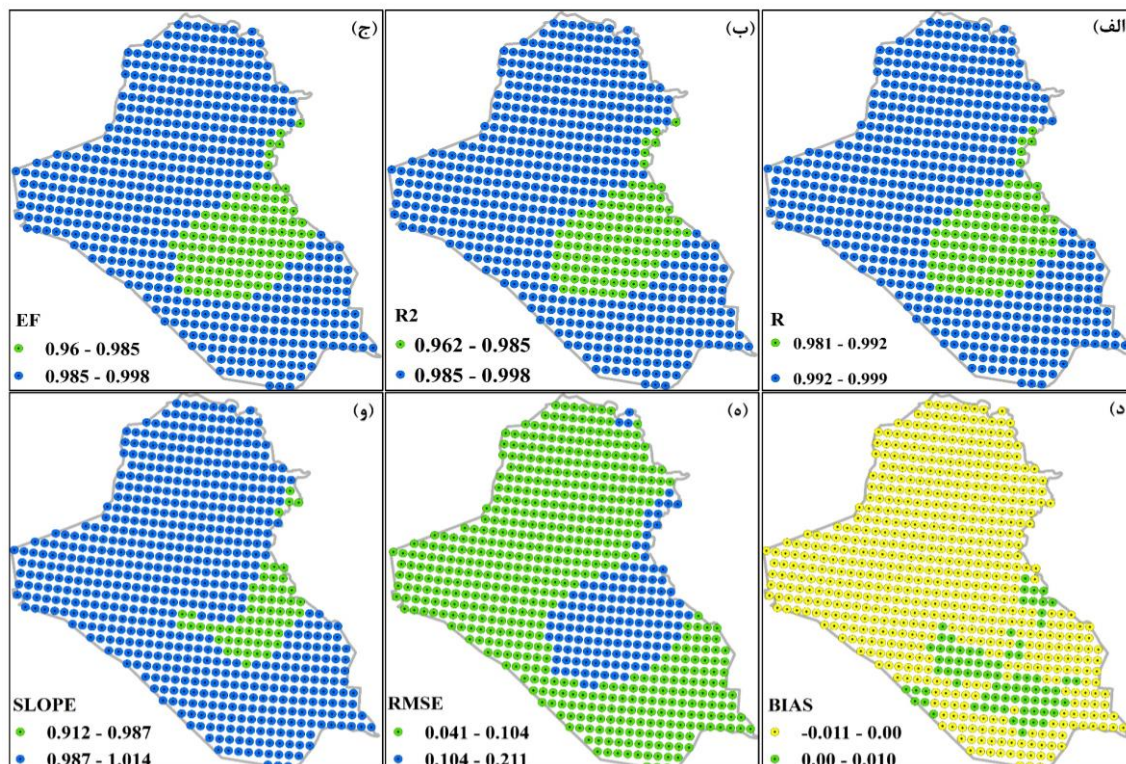
شکل ۶. مقایسه شاخص خشکسالی SSPEI و SPEI در سطح کشور عراق در مقیاس زمانی ۳ ماهه



شکل ۷. مقایسه شاخص خشکسالی SSPEI و SPEI در سطح کشور عراق در مقیاس زمانی ۶ ماهه



شکل ۸. مقایسه شاخص SSPEI و SPEI بر اساس داده‌های شبکه‌ای در سطح کشور عراق در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه



شکل ۹. مقایسه شاخص SSPEI و SPEI در سطح کشور عراق در مقیاس زمانی ۲۴ ماهه

بحث

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که شاخص‌های متداول خشکسالی، به‌ویژه SPI و SPEI، با وجود کاربرد گسترده و توصیه سازمان جهانی هواشناسی، در اقلیم‌های خشک و نیمه‌خشک با محدودیت‌هایی مواجهند. شاخص SPI به دلیل اتکا صرف به بارش، قادر نیست نقش مؤثر دما و تبخیر-تعرق بالقوه را در تشدید کمبود رطوبتی بازتاب دهد؛ موضوعی که در شرایط گرمایش جهانی اهمیت بیشتری می‌یابد. علاوه بر این، ساختار آماری بارش در مناطق خشک که با فراوانی زیاد مقادیر صفر و دوره‌های طولانی بدون بارش همراه است، برازش توابع توزیع احتمال به داده‌ها را دشوار می‌سازد. در شرایطی که بخش بزرگی از داده‌ها را صفر تشکیل داده باشد، مقدار SPI یا قابل محاسبه نیست و یا با عدم قطعیت بسیار بالایی همراه خواهد بود. این مسئله در مطالعات پیشین نیز گزارش شده و نشان داده شده است که SPI در چنین شرایطی شدت واقعی خشکسالی را کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌کند. یکی دیگر از چالش‌های اساسی استفاده از این شاخص در مناطق خشک، توزیع آماری بارش است که معمولاً با فراوانی زیاد مقادیر صفر همراه است. این ویژگی، برازش توابع توزیع احتمال استاندارد را دشوار می‌سازد و می‌تواند به تخمین‌های نادرست، به‌ویژه در مقادیر حدی SPI منجر شود (Raziei, 2021a, 2021b). برای غلبه بر این محدودیت‌ها، روش‌های مختلفی از جمله برازش چندین تابع توزیع احتمال بر داده‌های بارش (AghaKouchak & Farahmand, 2015) پیشنهاد شده است. با این حال، حساسیت مقادیر حدی SPI به انتخاب توزیع و تفاوت در برازش توابع مختلف (WMO, 2012)، همچنان می‌تواند منجر به برآوردهای نادرست شود. روش‌های ناپارامتری برآورد احتمال بارش (AghaKouchak & Farahmand, 2015) یا استفاده از تابع انتقال باکس-کاکس (Raziei, 2021a, 2021b) به‌عنوان راهکارهایی برای بهبود دقت SPI در این مناطق مطرح شده‌اند. مطالعات Raziei (2021a, 2021b) در ایران نشان داد که استفاده از روش پیشنهادی SSPI توانسته است محدودیت‌های کاربردی SPI را در مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌طور مؤثری برطرف سازد.

در پژوهش حاضر نیز مقایسه SSPI و SPI در سطح کشور عراق نشان داد که دو شاخص در بخش عمده‌ای از کشور از هم‌تغییری و انطباق بسیار بالایی برخوردارند، هر چند میزان این انطباق از نظر مکانی و زمانی یکسان نیست. این انطباق در مقیاس‌های زمانی بلندتر افزایش می‌یابد و اختلاف میان دو شاخص کاهش پیدا می‌کند. در مقیاس ۳ ماهه، مقدار R در محدوده ۰/۸۸ تا ۰/۹۹۸ و مقدار R^2 در محدوده حدود ۰/۷۹ تا نزدیک به یک قرار داشت. کمترین مقادیر این دو آماره عمدتاً در بخش‌هایی از غرب و همچنین برخی نواحی شرق و مرکز عراق مشاهده شد. با افزایش مقیاس زمانی، مقادیر R و R^2 افزایش می‌یابد و در مقیاس‌های ۱۲ و ۲۴ ماهه در بیشتر پهنه کشور به مقادیر بسیار نزدیک به یک می‌رسد. این الگو نشان می‌دهد که تفاوت رفتاری SSPI و SPI عمدتاً در مقیاس کوتاه‌مدت ۳ ماهه آشکار می‌شود و با افزایش طول دوره تجمع بارش، رفتار دو شاخص به یکدیگر نزدیکتر می‌شود. این وضعیت را می‌توان تا حدی به اثر تجمع زمانی بارش نسبت داد؛ زیرا با افزایش مقیاس زمانی، نوسانات کوتاه‌مدت بارش تعدیل می‌شود و تأثیر مقادیر صفر و نزدیک به صفر بر ساختار سری تجمعی کاهش می‌یابد. نتایج حاصل از RMSE نیز این الگوی کلی را از منظر اختلاف مطلق میان دو شاخص نشان داد. در مقیاس ۳ ماهه، مقادیر بالاتر RMSE عمدتاً در بخش‌هایی از شمال، جنوب و مرکز عراق مشاهده شد که بیانگر افزایش اختلاف مقدار برآورده‌شده توسط SSPI و SPI در این مناطق بود. با افزایش مقیاس زمانی، دامنه کلی RMSE کاهش یافت، اگر چه این کاهش در سراسر کشور یکنواخت نبود و بخش‌هایی از مرکز عراق همچنان مقادیر نسبتاً بالاتری را نشان دادند. این الگوی مکانی می‌تواند با تفاوت‌های منطقه‌ای در رژیم بارش و ویژگی‌های آماری سری‌های بارندگی مرتبط باشد. از سوی دیگر، مقادیر Bias در بیشتر مناطق به صفر نزدیک بود و نشان داد که SSPI در مقایسه با SPI سوگیری سیستماتیک قابل توجهی نداشت. مقادیر مثبت‌تر Bias در بخش‌هایی از جنوب و شرق عراق نیز بیانگر وجود اختلاف محدود در مقدار برآورد شده توسط دو شاخص در این مناطق بود. نتایج Slope نیز نشان داد که در مقیاس ۳ ماهه، دامنه تغییرات این آماره بین ۰/۸۱ تا ۱/۰۰ قرار داشت و بیشترین فاصله از مقدار ایده‌آل یک در برخی بخش‌های غرب و مرکز عراق مشاهده شد. با افزایش مقیاس زمانی، Slope به مقدار یک نزدیکتر شد و در نتیجه، دامنه نوسانات SSPI و SPI تطابق بیشتری پیدا کرد. مجموع این نتایج نشان داد که تفاوت میان SSPI و SPI تنها به میزان هم‌تغییری آنها محدود نیست، بلکه در دامنه نوسانات و مقدار برآوردی شاخص‌ها نیز بازتاب دارد. این تفاوت‌ها عمدتاً در مقیاس‌های زمانی کوتاه‌تر و در برخی نواحی با ویژگی‌های بارشی متفاوت برجسته‌تر بود. شباهت بالای دو شاخص در بخش عمده‌ای از عراق، به‌ویژه در مقیاس‌های زمانی بلندتر، از نظر روش‌شناختی اهمیت دارد؛

زیرا نشان می‌دهد اصلاح روش محاسبه شاخص لزوماً به تغییر محسوس مقادیر خشکسالی در همه شرایط منجر نمی‌شود. در شرایطی که سری زمانی بارش قابلیت برآزش مناسبی با توزیع احتمال مورد استفاده در SPI داشته باشد، SSPI نیز می‌تواند الگوی مشابهی با SPI ارائه دهد. مزیت اصلی SSPI در شرایطی آشکار می‌شود که ویژگی‌های آماری بارش، به‌ویژه فراوانی زیاد مقادیر صفر و چولگی شدید، برآزش توزیع احتمال مورد استفاده در SPI را با محدودیت مواجه می‌کند؛ موضوعی که پیش‌تر نیز توسط Raziei (2021a, 2021b) گزارش شده است.

در مورد شاخص SPEI نیز اگرچه مطالعات جهانی نشان داده‌اند که این شاخص در بسیاری از مناطق خشک عملکرد واقع‌بینانه‌تری نسبت به SPI دارد، یکی از مشکلات اصلی این شاخص، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، ناتوانی در برآزش توزیع آماری به سری داده‌های تراز آبی و در نتیجه تولید مقادیر پوچ (null) به‌دلیل خطا در محاسبات است (Vicente-Serrano & Begueria, 2016; Raziei & Miri, 2023). مطالعات (Raziei & Miri, 2023) نشان داد که توزیع‌های آماری پیشنهادی برای محاسبه SPEI، مانند Log-logistic و General Extreme Value، همیشه برآزش مناسبی به سری زمانی بیلان رطوبتی در ایستگاه‌های مناطق خشک ایران ندارند، و این امر محاسبه SPEI را برای برخی ایستگاه‌ها دشوار می‌کند. برای رفع این مشکل، آنها با پیشنهاد استفاده از روش ناپارامتری تابع انتقال باکس-کاکس (Box-Cox, 1964) برای محاسبه SPEI، شاخص جدیدی را با عنوان SSPEI معرفی نمودند. نتایج آنها در ایران، کارایی SSPEI را در رفع مشکلات مربوط به محاسبه خشکسالی در مناطق خشک و نیمه‌خشک تأیید کرد. نتایج پژوهش حاضر در عراق نیز نشان داد که SSPEI و SPEI در تمامی مقیاس‌های زمانی از هم‌تغییری بسیار بالایی برخوردارند و مقادیر R^2 و R در محدوده ۰/۹۷ تا ۰/۹۹ قرار دارند. با این حال، همانند مقایسه SSPI و SPI، بالا بودن همبستگی به‌تنهایی برای ارزیابی کامل انطباق دو شاخص کافی نیست. بررسی هم‌زمان EF، RMSE، Bias و Slope نشان داد که اختلاف میان SSPEI و SPEI از نظر خطای مطلق، سوگیری و دامنه نوسانات نیز در بیشتر مناطق محدود است. مقادیر EF عمدتاً در محدوده ۰/۹۴ تا ۰/۹۹ قرار داشتند، Bias در بیشتر مناطق به صفر نزدیک بود و Slope نیز عمدتاً در محدوده ۰/۹۲ تا ۱/۰۰ قرار گرفت. بنابراین، شباهت SSPEI و SPEI نه‌تنها از نظر روند تغییرات، بلکه از نظر مقدار و دامنه نوسانات نیز در بیشتر پهنه عراق بالا است. از نظر مکانی، بخش‌هایی از شرق عراق، به‌ویژه محدوده شهرهای الحی و کوت، در بسیاری از آمارها اندکی انطباق پایین‌تری نسبت به سایر مناطق نشان دادند. با این حال، این اختلاف محدود بوده و در مقیاس سرزمینی عراق تغییر محسوسی در الگوی کلی عملکرد دو شاخص ایجاد نمی‌کند. همچنین، افزایش مقادیر R^2 ، R و EF و نزدیک‌تر شدن Slope به یک در مقیاس‌های ۱۲ و ۲۴ ماهه نشان می‌دهد که انطباق دو شاخص در مقیاس‌های زمانی بلندتر بیشتر است. نکته مهم‌تر آن است که شباهت بالای SSPEI و SPEI در مقیاس کلی کشور نباید به معنای بی‌فایده بودن SPEI تلقی شود. مزیت اصلی SSPEI در این مطالعه در شرایطی است که شاخص SPEI به دلیل ناتوانی در برآزش توزیع آماری به سری تراز آبی نتواند مقدار ناهنجاری تراز آبی را نمایش دهد و مقدار محاسبه شده پوچ (null) باشد. در چنین شرایطی، استفاده از تبدیل باکس-کاکس در SSPEI می‌تواند امکان استانداردسازی سری داده‌ها را بدون وابستگی به انتخاب یک توزیع احتمال خاص فراهم کند و از ایجاد مقادیر نامعتبر یا پوچ جلوگیری نماید. بنابراین، یافته‌های پژوهش حاضر بیشتر مؤید نقش SSPEI به‌عنوان یک روش مقاوم و مکمل برای محاسبه شاخص خشکسالی در شرایطی است که روش متداول SPEI با محدودیت آماری مواجه می‌شود، نه اینکه SSPEI در تمام شرایط الزاماً مقادیر متفاوتی نسبت به SPEI تولید کند.

در مجموع، مقایسه این دو شاخص با یکدیگر نشان می‌دهد که اصلاحات انجام شده در SSPI و SSPEI در بسیاری از شرایط به تولید نتایجی بسیار نزدیک به شاخص‌های اصلی منجر می‌شود، در حالی که در شرایطی که فرض‌های آماری روش‌های متداول با ساختار داده‌های اقلیمی منطقه سازگار نباشد، روش‌های اصلاح‌شده می‌توانند محدودیت‌های محاسباتی را کاهش داده و نتایج قابل اعتمادتری ارائه دهند. این ویژگی از دیدگاه پایش خشکسالی اهمیت دارد. زیرا، یک شاخص مناسب تنها نباید در شرایط عادی همبستگی بالایی با شاخص مرجع داشته باشد، بلکه باید در شرایط حدی و در مواجهه با ساختارهای آماری نامتعارف نیز قادر به تولید مقادیر پایدار و قابل تفسیر باشد.

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که شاخص‌های اصلاح‌شده SSPI و SSPEI در پهنه متنوع اقلیمی عراق، در اغلب مقیاس‌های زمانی،

سازگاری بسیار بالایی با شاخص‌های متداول SPI و SPEI دارند. با این حال، میزان این سازگاری در تمام نقاط و مقیاس‌های زمانی یکسان نیست و تفاوت‌های مکانی و زمانی، به‌ویژه در مقیاس‌های کوتاه‌تر، مشاهده شد. در مورد SSPI، بیشترین اختلاف نسبت به SPI عمدتاً در مقیاس زمانی ۳ ماهه و در بخش‌هایی از غرب، مرکز و شرق عراق مشاهده شد، درحالی‌که در مقیاس‌های زمانی بلندتر تطابق دو شاخص افزایش یافت. در مورد SSPEI نیز تطابق بسیار بالایی با SPEI در تمامی مقیاس‌ها مشاهده شد و تنها اختلاف‌های محدودی در بخش‌هایی از شرق عراق، به‌ویژه محدوده الحی و کوت، آشکار گردید. یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که مزیت اصلی شاخص‌های اصلاح‌شده لزوماً در ایجاد مقادیر کاملاً متفاوت از شاخص‌های متداول نیست، بلکه در کاهش وابستگی محاسبات به برازش توزیع‌های احتمال و فراهم کردن امکان محاسبه شاخص در شرایطی است که ویژگی‌های آماری سری‌های بارش یا تراز آبی با فرض‌های توزیع‌های متداول سازگار نیست. از این منظر، استفاده از تبدیل Box-Cox در SSPI و SSPEI می‌تواند محدودیت‌های آماری موجود در محاسبه SPI و SPEI را در محیط‌های خشک و نیمه‌خشک کاهش دهد و این شاخص‌ها را به‌عنوان گزینه‌ای مکمل برای پایش خشکسالی در چنین مناطقی مطرح کند. با توجه به ناهمگنی اقلیمی عراق، نتایج همچنین نشان می‌دهد که کاربرد این شاخص‌ها باید با توجه به ویژگی‌های مکانی و مقیاس زمانی مورد نظر انجام شود. اهمیت استفاده از شاخص‌های SSPI و SSPEI در بخش‌های از عراق مشاهده می‌شود که نمایه‌های SPI و SPEI منجر به تولید مقادیر پوچ (null) می‌شوند. بنابراین، برای ارزیابی جامع‌تر قابلیت کاربردی SSPI و SSPEI، پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده عملکرد این شاخص‌ها در ارتباط با شواهد مستقل خشکسالی، از جمله رطوبت خاک، جریان رودخانه، تغییرات پوشش گیاهی، گردوغبار و عملکرد محصولات کشاورزی بررسی شود. چنین مطالعاتی می‌تواند مشخص کند که مزیت‌های آماری مشاهده شده در شاخص‌های اصلاح‌شده تا چه اندازه به بهبود بازنمایی آثار واقعی خشکسالی منجر شود.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این پژوهش علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

مشارکت نویسندگان

هادی رزاق‌عبد: دریافت و پردازش داده‌ها، جعفر معصوم پورسماکوش: نظارت بر مراحل انجام، ویرایش مقاله، مرتضی میری: مفهوم‌سازی، روش‌شناسی، محاسبات شاخص‌های خشکسالی، نگارش مقاله اصلی. طیب رضیئی: انجام محاسبات شاخص‌های اصلاح شده، کنترل نتایج، بررسی و ویرایش. همه نویسندگان مقاله را مطالعه و با انتشار آن موافقت نموده‌اند.

تعارض منافع

بنابر اظهار نویسندگان، این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

نویسندگان هیچ‌گونه حمایت مالی برای نگارش یا انتشار این مقاله دریافت نکرده‌اند.

سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از رساله دکتری آقای هادی عبدالرزاق در دانشگاه رازی کرمانشاه است که نویسندگان از حمایت‌های معنوی دانشگاه در اجرای این رساله و مقاله تشکر می‌کنند.

نویسندگان مقاله بدین‌وسیله اعلام می‌دارند که از ابزار هوش مصنوعی ChatGPT برای ویرایش چکیده انگلیسی در این مقاله استفاده کرده‌اند. تمام محتوای تولید یا ویرایش شده توسط هوش مصنوعی توسط نویسندگان به دقت بررسی، راستی‌آزمایی و تأیید شده و مسئولیت نهایی تمام مطالب مقاله صرفاً بر عهده نویسندگان است.

منابع

- رزاق‌عبد، هادی؛ معصوم‌پور سماکوش، جعفر؛ میری، مرتضی، و رضیئی، طیب (۱۴۰۴). ارزیابی دقت مکانی و زمانی مجموعه داده‌های CRU و GPCP در مقابل داده‌های مشاهده‌ای در کشور عراق. *مطالعات جغرافیایی مناطق خشک*. ۱۶(۵۹)، ۱۳-۱۰. <https://doi:10.22034/jargs.2024.475185.1134>
- عزیزی، قاسم، و صفرراد، طاهر (۱۳۸۹). ارزیابی روش‌های کریجینگ معمولی و فاصله معکوس وزین در برآورد مقادیر خشکسالی و ترسالی ایران. *اولین همایش ملی ژئوماتیک در منابع طبیعی و محیط زیست*. دانشگاه تهران، تهران.
- میری، مرتضی؛ عزیزی، قاسم؛ خوش اخلاق، فرامرز، و رحیمی، مجتبی (۱۳۹۵). ارزیابی آماری داده‌های شبکه‌ای بارش و دما با داده‌های مشاهده‌ای در ایران. *علوم و مهندسی آب‌خیزداری ایران*. ۱۰ (۳۵)، ۳۹-۵۰. <http://jwmsei.ir/article-1-587-fa.html>

References

- Aadhar, S., & Mishra, V. (2017). High-resolution near real-time drought monitoring in South Asia. *Scientific Data*, 4, 170145. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.145>
- AghaKouchak, A., Farahmand, A., Melton, F.S., Teixeira, J., Anderson, M.C., Wardlaw, B.D. & Hain, C.R. (2015). Remote sensing of drought: Progress, challenges and opportunities. *Reviews of Geophysics*, (53)2, 452-480. <https://doi.org/10.1002/2014RG000456>
- Azizi, G., & Safarrad, T. (2010). Evaluation of Ordinary Kriging and Inverse Distance Weighting Methods for Estimating Drought and Wetness Values in Iran. *The First National Conference on Geomatics in Natural Resources and Environmental Sciences*, University of Tehran, Tehran. [in Persian]
- Bigas, H. (2012). The global water crisis: Addressing an urgent security issue. United Nations University-Institute for Water, Environment and Health. <https://bdd.pseau.org/outils/biblio/resume.php?d=5075>
- Box, G. E. P., & Cox, D. R. (1964). An Analysis of Transformations. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 26: 211-43. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1964.tb00553.x>
- Dai, A. (2011). Drought under global warming: A review. *Wiley interdisciplinary reviews: Climate Change*, 2, 45-65. <https://doi.org/10.1002/wcc.81>
- Eklund, L., & Seaquist, J. (2015). Meteorological, agricultural and socioeconomic drought in the Duhok Governorate, Iraqi Kurdistan. *Natural Hazards*, 76, 421-441. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1504-x>
- Guttman, N. B. (1998). Comparing the Palmer drought index and the standardized precipitation index. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 113-121. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05964.x>
- Keyantash, J.A., & Dracup, J.A. (2004). An aggregate drought index: Assessing drought severity based on fluctuations in the hydrologic cycle and surface water storage. *Water Resources Research*, 40, 1-14. <https://doi.org/10.1029/2003WR002610>
- Kim, J.-B., So, J.M., & Bae, D.H. (2020). Global Warming Impacts on Severe Drought Characteristics in Asia Monsoon Region. *Water*, 12, 1360. <https://doi.org/10.3390/w12051360>
- Kogan, F.N. (1997). Global Drought Watch from Space. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 4, 621-636. <https://doi.org/10.1175/1520-0477>
- Lee, J.H., Kwon, H.H., Jang, H.W., & Kim, T.W. (2016). Future Changes in Drought Characteristics under Extreme Climate Change Over South Korea. *Advances in Meteorology*, 1-19. <https://doi.org/10.1155/2016/9164265>
- Mail, A.S.M. (2017). Assessment of Drought Conditions and their Impacts on the Environment of the Udhaimeh River Basin, Iraq, University of Warsaw, Faculty of Geography and Regional Studies.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. *In Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, American Meteorological Society. 179-184.
- Miri, M., Azizi, G., Khoshakhlagh, F., & Rahimi, M. (2017). Evaluation Statistically of Temperature and Precipitation Datasets with Observed Data in Iran. *Iran-Watershed Management Science & Engineering*, 10(35), 39-51. <http://jwmsei.ir/article-1-587-fa.html> [in Persian]
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Raziei, T. (2021a). Performance evaluation of different probability distribution functions for computing Standardized Precipitation Index over diverse climates of Iran. *International Journal of Climatology*, 41, 3352-3373. <https://doi.org/10.1002/joc.7023>
- Raziei, T. (2021b). Revisiting the rainfall anomaly index to serve as a simplified standardized precipitation index. *Journal of Hydrology*, 602, 126761. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126761>
- Raziei, T. (2022). Improving the normalization procedure of the simplified standardized precipitation index (SSPI) using Box-Cox transformation. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*. 37, 925-951. <https://doi.org/10.1007/s00477-022-02317-9>

- Raziei, T., & Miri, M. (2023). An alternative approach for computing the standardized precipitation-evapotranspiration index (SPEI). *Water Resources Management*, 37:4123–4141. <https://doi.org/10.1007/s11269-023-03542-9>
- Razzaq Abed, H., Masoompour Samakosh, J., Miri, M., & Raziei, T. (2025). Evaluation of spatial and temporal accuracy of GPCP and CRU datasets against observational data. *Journal of Arid Regions Geographic Studies*, 16(59): 1-13. <https://doi:10.22034/jargs.2024.475185.1134> [in Persian]
- Robaa, S.M., & Al-Barazanji, Z.J. (2013). Trends of annual mean surface air temperature over Iraq. *Natural Sciences*, 11, 138–145. <https://doi.org/10.7537/marsnsj111213.21>
- Subash, N., Ram Mohanb, H.S., & Banukumar, K. (2011). Comparing water-vegetative indices for rice (*Oryza sativa* L.) wheat (*Triticum aestivum* L.) drought assessment. *Computers and Electronics in Agriculture*, 77(2), 175-187. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.05.001>
- Vicente-Serrano, S. M., & Beguería, S. (2016). Comment on “Candidate distributions for climatological drought indices (SPI and SPEI)” by James H. Stagge et al. *International Journal of Climatology*, 36(4), 2120–2131. <https://doi.org/10.1002/joc.4474>
- 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>
- WMO. (2012). Standardized Precipitation Index User Guide. *World Meteorological Organization*. CH-1211 Geneva 2, Switzerland. <https://library.wmo.int/viewer/39629#page=2&viewer>