

## Research Paper

## A New Approach to Propagation Time from Agricultural Drought to Hydrological Drought Across Different Climates of Iran

Saviz Sadeghi<sup>1\*</sup>,Saeed Sharafi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Assistant professor, Department of Environmental Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Environment, University of Arak, Arak, Iran.

<sup>2</sup> Department of Environmental Science and Engineering, University of Arak, Arak, Iran



10.22125/IWE.2023.393218.1715

Received:

May 20, 2022

Accepted:

October 27, 2022

Available online:

August 23, 2023

**Keywords:**

**Climate classification, Drought characteristics, Early warning system, Reference evapotranspiration (ETref), Precipitation**

**Abstract**

Droughts are natural events that cause irreparable impacts on agriculture and the environment, but also threaten human health. This event has always been associated with long periods of time in Iran. Therefore, the country is prone to drought and often suffers from dry conditions. To quantify and describe drought conditions, two drought indices, the Standardized Precipitation Index (SPI) and Standardized Potential Evapotranspiration Index (SPEI) were used in this study in 2, 6, 24, and 48 month time scales. The time scales of 2, 6, 24, and 48 months are related to agricultural and hydrological drought, respectively. Using quantification and the difference between SPI and SPEI, drought events were identified. The results demonstrated that different types of drought occurred in humid climates during the periods of 1988-2008 and dry climates during the periods of 1998-2008. Both indices show that 1999, 2000, and 2009 were very dry years. Drought events identified by the SPEI index are further classified into moderate and severe categories, which are characterized by longer duration and greater magnitude. In contrast, the drought events identified by SPI were mostly classified in the very intensity category, which were associated with limited duration and lower intensity, but with higher intensities. This study showed that SPEI differs from SPI in quantifying and characterizing drought, and the use of SPEI and SPI can be generalized to the different climates across the country when assessing drought. This study will be able to predict and reduce possible drought impacts, especially for agricultural purposes. While it is limited by the current understanding of drought definition techniques, availability and quality of remote sensing products, and selection of characteristics for observation, the use of the temporal shift over the correlation analysis provides the estimation of drought propagation time that may prove useful for detailed analyses, particularly in rapidly developing flash drought events.

\* **Corresponding Author:** Saviz Sadeghi

**Address:** Department of Environmental Science and Engineering, Faculty of Agriculture and Environment, University of Arak, Arak, Iran.

**Email:** s-sadeghi@araku.ac.ir

**Tel:** +9886 32623702

## 1. Introduction

Drought directly or unintentionally harms human societies by causing food insecurity and economic losses, creating conflict between individuals or communities and spreading of disease-causing agents (Yusa et al., 2015; Marengo et al., 2021). Because drought can develop gradually, it can be difficult to determine the exact beginning and end (Tijdeman and Menzel 2021; Kalisa et al., 2021). Many researchers have discussed the inability of each drought indicator alone to correctly describe drought events (Hao and AghaKouchak, 2013; Hao and Singh, 2015; Li et al., 2017). Therefore, the aim of this research is (1) comparing the standardized evapotranspiration index and standardized precipitation index in time scales of 2, 6, 24 and 48 months. (2) examining the performance of drought indicators in quantifying and describing the drought phenomenon based on the spatial extent, onset and peak of drought events (implementation theory) and (3) Examining the performance of drought indicators in each year in order to evaluate, quantify and describe drought events, i.e. the propagation time.

## 2. Methodology

In this research, 30 main basins throughout Iran were selected as the study area. Due to the wide spatial extent, these basins were located in four climatic classifications, from humid to very dry. The variables used in this study included daily weather data (1979-2021) and geographic information from the European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). In order to quantify and describe drought conditions, two drought indices have been utilized in this research, including the Standardized Precipitation Index (SPI) and Standardized Potential Evapotranspiration Index (SPEI) in time scales of 2, 6, 24 and 48 months and then drought characteristics were determined for them.

## 3. Results

The results demonstrated that different types of drought occurred in humid climates during the periods of 1988-2008 and dry climates during the periods of 1998-2008. Both indices show that 1999, 2000, and 2009 were very dry years. Drought events identified by the SPEI index are further classified into moderate and severe categories, which are characterized by longer duration and greater magnitude. In contrast, the drought events identified by SPI were mostly classified in the very intensity category, which were associated with limited duration and lower intensity, but with higher intensities.

## 4. Discussion and Conclusion

This study compared the SPI and SPEI indices; it is obvious that the SPEI index has detected the occurrence of droughts characterized by long duration, although they have appeared with less intensity. This is due to the fact that global warming will increase potential evapotranspiration levels and change the precipitation patterns. And finally, it leads to recording frequent events related to severe climate changes such as droughts and floods. Therefore, the SPEI index is a more important criterion due to its ability to investigate the potential effects of climate change. Considering only the precipitation variable, the SPI index was able to identify the severe drought event compared to the SPEI index, and the significant difference was evident mainly in higher time scales. Therefore, it is undeniable that rainfall plays an important role in identifying and determining droughts. The SPEI index is a powerful tool for determining the historical pattern of drought conditions in different climates of the country. Both SPI and SPEI can quantify droughts and identify the beginning and end of the drought event. The SPEI index identified more drought events with a longer duration and greater magnitude, but with lower intensity; while the SPI index identified drought events with a limited duration and fewer drought events but with a higher intensity. Thus, SPEI is more precise than SPI for quantifying drought, while SPI is more accurate for indicating drought severity.

## 5. Six important references

- 1) Han, X., Li, Y., Yu, W. and Feng, L. 2022. Attribution of the Extreme Drought in the Horn of Africa during Short-Rains of 2016 and Long-Rains of 2017. *Water*, 14(3): 409.

- 2) Ho, S., Tian, L., Disse, M. and Tuo, Y. 2021. A new approach to quantify propagation time from meteorological to hydrological drought. *Journal of Hydrology*, 603: 127056.
- 3) Liu, C., Yang, C., Yang, Q. and Wang, J. 2021. Spatiotemporal drought analysis by the standardized precipitation index (SPI) and standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) in Sichuan Province, China. *Scientific Reports*, 11(1): 1-14.
- 4) Sharafi, S., Ghaleni, M. M. and Sadeghi, S. 2022. Spatial and temporal analysis of drought in various climates across Iran using the Standardized Precipitation Index (SPI). *Arabian Journal of Geosciences*, 15(14): 1-14.
- 5) Sharafi, S. and Mohammadi Ghaleni, M. 2022. Spatial assessment of drought features over different climates and seasons across Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 147(3–4): 941–957.
- 6) Vélez-Nicolás, M., García-López, S., Ruiz-Ortiz, V., Zazo, S. and Molina, J. L. 2022. Precipitation Variability and Drought Assessment Using the SPI: Application to Long-Term Series in the Strait of Gibraltar Area. *Water*, 14(6): 884.

### **Conflict of Interest**

Authors declared no conflict of interest.

### **Acknowledgments**

We are grateful to thank the officials of Arak University for their cooperation in carrying out this project.

## رویکرد جدید برای تعیین زمان انتشار از خشکسالی کشاورزی تا خشکسالی هیدرولوژیکی در اقلیم های ایران

ساویز صادقی<sup>۱</sup>، سعید شرفی<sup>۲</sup>

تاریخ ارسال: ۱۴۰۱/۰۲/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۰۴

مقاله پژوهشی

### چکیده

خشکسالی یک رویداد تکرارشونده در جنوب غرب آسیا، به ویژه در ایران است که پیامدهای منفی بر تولیدات کشاورزی، فعالیت های اجتماعی-اقتصادی و محیط زیست دارد. خشکسالی ها رخداد های طبیعی هستند که همیشه با دوره های زمانی طولانی در ایران همراه بوده است. کشور ایران مستعد خشکسالی است و اغلب از شرایط خشکسالی رنج می برد. از آنجایی که خشکسالی می تواند به تدریج توسعه یابد، تشخیص شروع و پایان دقیق آن می تواند دشوار باشد. برای تعیین کمیت و توصیف شرایط خشکسالی، در این تحقیق از دو شاخص خشکسالی، شامل شاخص تبخیر و تعرق پتانسیل استاندارد شده (SPEI) و شاخص بارش استاندارد شده (SPI) در مقیاس های زمانی ۲، ۶، ۲۴ و ۴۸ ماهه استفاده شد. مقیاس های زمانی ۲ و ۶، ۲۴ و ۴۸ ماهه به ترتیب مربوط به خشکسالی کشاورزی و هیدرولوژیکی است. یافته های تحقیق نشان داد که انواع مختلف خشکسالی در اقلیم مرطوب تر در طی دوره های ۱۹۸۸-۲۰۰۸ و اقلیم های خشک تر در طی دوره های ۱۹۹۸-۲۰۰۸ رخ داده است. هر دو شاخص نشان می دهند که سال های ۱۹۹۹، ۲۰۰۰ و ۲۰۰۹ سال های بسیار خشک بودند. رخداد های خشکسالی شناسایی شده توسط شاخص SPEI بیشتر در دسته های متوسط و شدید طبقه بندی می شوند که با مدت طولانی و بزرگی بیشتری رخ داده است. در مقابل، رویدادهای خشکسالی شناسایی شده توسط SPI بیشتر در رده بسیار خشک طبقه بندی شدند که با مدت زمان محدود و قدرت کمتر، اما با شدت های بالاتر همراه بوده اند. این تحقیق نشان داد که نتایج SPEI در تعیین کمیت و مشخص کردن خشکسالی با SPI متفاوت است. استفاده از SPEI و SPI هنگام ارزیابی خشکسالی در اقلیم های مختلف قابل تعمیم به کل کشور هستند. در صورت عدم دسترسی به داده های سنجش از دور، و یا داده های مشاهداتی، استفاده از روش تغییرات زمانی (با کمک روش تحلیل همبستگی)، تخمین مناسب تری از زمان انتشار خشکسالی را ارائه می کند.

واژه های کلیدی: اقلیم بندی، بارش، پیش آگاهی کشاورزی، تبخیر و تعرق پتانسیل، مشخصات خشکسالی.

<sup>۱</sup> استادیار گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشگاه اراک، اراک، ایران. پست الکترونیکی: s-sadeghi@araku.ac.ir (نویسنده مسئول)

<sup>۲</sup> استادیار گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشگاه اراک، اراک، ایران. پست الکترونیکی: s-sharafi@araku.ac.ir

## مقدمه

خشکسالی یک رویداد مکرر و تکرارشونده در جنوب غرب آسیا، به‌ویژه در ایران است که پیامدهای منفی بر تولیدات کشاورزی، فعالیت‌های اجتماعی-اقتصادی و محیط‌زیست دارد (شرفی و همکاران، ۱۴۰۱). با وجود اینکه کلیه اقلیم‌های ایران مستعد خشکسالی هستند و همچنان از پیامدهای آن رنج می‌برند، این کشور فاقد ابزارهای ضروری برای نظارت و پیش‌بینی پدیده‌های خشکسالی است. تعداد قابل توجهی از ساکنان منطقه برای امرار معاش به طور کامل به کشاورزی دیم متکی هستند. علاوه بر تقاضای آب آبیاری کشاورزی، منابع آبی کشور به دلیل رشد سریع جمعیت، طرح‌های توسعه‌ای و گسترش شهرنشینی تحت فشار فزاینده‌ای قرار دارند (شرفی و همکاران، ۱۴۰۱). بنابراین، وجود پایش مستمر خشکسالی و ابزار تحلیلی در دسترس که بتواند به‌طور دقیق اطلاعات قابل اعتمادی را برای کمک تصمیم‌گیران در همه سطوح و در تمام بخش‌های کشور برای مدیریت بهتر منابع آب تهیه نماید، بسیار مهم است. بسیاری از مردم که در مناطق روستایی زندگی می‌کنند (۲۶ درصد از کل جمعیت کشور)، به منابع طبیعی، به ویژه منابع آب متکی هستند (شرفی، ۱۳۹۸).

بسیاری از محققان شاخص بارش استاندارد شده را در جهان (Potopová et al., 2015; Chen et al., 2016; Spinoni et al., 2018; Nkuzimana et al., 2022) و به‌ویژه در ایران (Tabari et al., 2013; Sharafi and al., 2022) به‌کار گرفته‌اند. در این بین، مطالعات دیگر تأثیر تبخیر و تعرق پتانسیل بر خشکسالی (Han et al., 2022) و دقت شاخص استاندارد شده تبخیر و تعرق را نشان دادند (Nguvava et al., 2022; Sharafi et al., 2019). با توجه به گرم شدن کره زمین با هم‌زمانی افزایش درجه حرارت (Kim et al., 2021)، تبخیر و تعرق پتانسیل به‌طور قابل توجهی بر شرایط خشکسالی تأثیر می‌گذارد. برای تعیین کمیت و توصیف خشکسالی، متغیر تبخیر و تعرق پتانسیل ممکن است تأثیر متغیرهای دیگر مانند درجه حرارت، رطوبت نسبی، سرعت باد و تابش خورشیدی را در نظر بگیرد. هم‌چنین، استفاده از هر دو متغیر بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل برای تعیین

خشکسالی یکی از بزرگترین رخدادهای طبیعی است و اثرات آن بر کشاورزی و محیط‌زیست بیش از سایر رخدادهای طبیعی است (Jia et al., 2016). خشکسالی به طور مستقیم یا ناخواسته از طریق ایجاد ناامنی غذایی، درگیری بین افراد یا جوامع، خسارات اقتصادی و گسترش عوامل بیماری‌زا به جوامع انسانی آسیب می‌رساند (Yusa et al., 2015; Marengo et al., 2021). از آنجایی که خشکسالی می‌تواند به تدریج توسعه یابد، تشخیص شروع و پایان دقیق آن می‌تواند دشوار باشد (Tijdeman and Menzel, 2021; Kalisa et al., 2021). بر خلاف بسیاری از بلایای طبیعی که فقط یک منطقه را تحت تأثیر قرار می‌دهند و دارای توالی‌های زمانی گسترده و قابل توجهی هستند (مانند سیل، رانش زمین و زلزله)، ثبت شروع خشکسالی در عرض یک هفته برای پیش‌بینی‌های با گسترش بهتر که تغییرات شرایط خشکسالی را در یک مقیاس زمانی زیر فصلی توصیف می‌کند، ضروری است (Otkin et al., 2018). زیرا مدت و شدت ویژگی‌های خشکسالی هستند که به‌طور قابل توجهی بر سازگاری و پیش‌آگاهی برای خشکسالی تأثیر می‌گذارد (Sharafi et al., 2017; Tosunoğlu and Onof, 2016). هر چند در سال‌های گذشته شاخص‌های خشکسالی مختلفی در سطح جهان معرفی شده‌اند (Fluixá-Sanmartín et al., 2018; Rehana and Naidu, 2021) با این حال، شاخص بارش استاندارد شده و شاخص تبخیر و تعرق پتانسیل استاندارد شده بیشترین استفاده را در سراسر جهان داشته‌اند (Ndayiragije and Li, 2022). SPI یک شاخص ساده شده است که به یک پارامتر واحد نیاز دارد (McKee et al., 1993). در دهه‌های اخیر شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده که نیاز به دو متغیر ورودی، بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل دارد (Vicente-Serrano et al., 2010)، در پایش و ارزیابی خشکسالی مورد توجه بیشتری قرار گرفته است (Shiru et al., 2018; Nguvava et al., 2019; Hao et al., 2022; Ndayiragije and Li, 2022).



به طور ایده آل روزانه، برای توصیف کافی این فرآیندها دارد (Otkin et al., 2018; Pendergrass et al., 2020). هرچند، پیشرفت‌های اخیر در فناوری سنسجش از دور، تجزیه و تحلیل فرآیندهای هیدرولوژیکی را در تفکیک زمانی و مکانی به طور فزاینده‌ای ظریف تر و به ویژه در حوضه‌های کم داده در سراسر جهان، امکان پذیر کرده است، اما این داده‌ها با وضوح بالا هنوز برای زمان انتشار خشکسالی استفاده نشده‌اند. محاسبه زمان انتشار از خشکسالی کشاورزی به خشکسالی هیدرولوژیکی نیز به دلیل ماهیت چندبعدی خشکسالی پیچیده است. بسیاری از محققان در مورد ناتوانی هر یک از شاخص‌های خشکسالی به تنهایی، در توصیف صحیح رخداد‌های خشکسالی بحث کرده‌اند (Hao and AghaKouchak, 2013; Hao and Singh, 2015; Li et al., 2017). بنابراین هدف این تحقیق (۱) مقایسه شاخص تبخیر و تعرق استاندارد شده و شاخص بارش استاندارد شده در مقیاس‌های زمانی ۲، ۶، ۲۴ و ۴۸ ماهه (۲) بررسی عملکرد شاخص‌های خشکسالی در کمی‌سازی و توصیف پدیده خشکسالی بر اساس وسعت مکانی، شروع و اوج رخداد‌های خشکسالی (تئوری اجرا) و (۳) بررسی عملکرد شاخص‌های خشکسالی در هر سال جهت ارزیابی، کمی‌سازی و توصیف رخداد‌های خشکسالی یعنی زمان انتشار از خشکسالی کشاورزی به خشکسالی هیدرولوژیکی در مقیاس اقلیم‌های چهارگانه کشور (خیلی خشک، خشک، نیمه خشک و مرطوب). بنابراین، این اطلاعات به تصمیم‌گیران برای مدیریت بهتر منابع آب در سراسر کشور و اجرای سیاست‌ها و استراتژی‌های مدیریت خطر وقوع خشکسالی و کاهش اثرات خشکسالی کمک خواهد نمود.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه و داده‌های اقلیمی

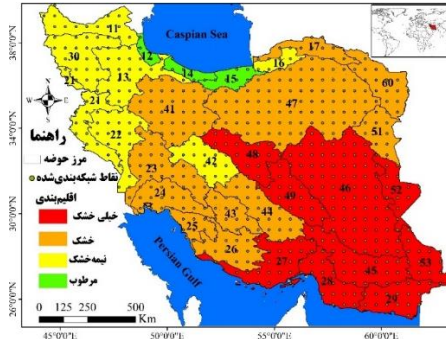
در این پژوهش ۳۰ حوضه اصلی (واقع بین ۲۵ تا ۴۰ درجه شمالی و ۴۴ تا ۶۴ درجه شرقی) در سراسر ایران به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شدند. به دلیل گستره وسیع فضایی، این حوضه‌ها در چهار طبقه‌بندی اقلیمی، یعنی مرطوب (حوضه‌های ۱۲، ۱۴ و ۱۵)، نیمه خشک (حوضه‌های ۱۱، ۱۳، ۱۶، ۲۱، ۲۲، ۳۰ و ۴۲)، خشک

کمیت و تشخیص رخداد‌های خشکسالی ممکن است ویژگی‌های قابل اعتماد خشکسالی را در مقایسه با بارش به تنهایی ایجاد کند (Vicente-Serrano et al., 2016)، زیرا فرمول‌بندی شاخص‌های تبخیر و تعرق پتانسیل استاندارد شده و بارش استاندارد شده متفاوت است (Liu et al., 2018; Tirivarombo et al., 2021). از طرف دیگر ارزیابی این شاخص‌ها با استفاده از آزمون همبستگی به تنهایی اطلاعات دقیقی از وسعت خشکسالی، شروع و نقطه اوج وقوع خشکسالی بیان نمی‌دارد، زیرا تحلیل‌های همبستگی فاقد توانایی توصیف ویژگی‌های خشکسالی مانند وسعت مکانی، شروع و اوج رخداد‌های خشکسالی هستند. علاوه بر این، کاربرد آنها در سطح کلان (مانند مطالعات کشوری یا منطقه‌ای) دقت چندانی ندارد. به عنوان مثال آزمون همبستگی بین مقادیر بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل ممکن است ایده‌ای مبتنی بر وجود رابطه بین آن متغیرها ارائه دهد، اما تنوع مکانی را در آن منطقه توصیف نمی‌کند. بر همین اساس مقایسه سه روش زمان انتشار (روش همبستگی، روش تئوری اجرا، و روش پاسخ غیرخطی) توسط وو و همکاران نشان داد که همخوانی کمی بین نتایج حاصل از روش‌های ذکر شده وجود دارد که نشان می‌دهد توسعه و نوآوری بیشتر در این زمینه ضروری است (Wu et al., 2021).

تا کنون بررسی‌های کمی برای محاسبه زمان انتشار با دقت بالاتر صورت گرفته است که دانش ما را در رابطه با مقادیر توسعه و بازیابی خشکسالی را بهبود می‌بخشد. هرچند تجزیه و تحلیل سری‌های زمانی اطلاعات خوبی در رابطه با مشخصات خشکسالی ارائه می‌دهد (Mishra and Singh, 2010)، اما موفقیت چنین مطالعاتی، مانند بسیاری از زمینه‌های هیدرولوژی، با داده‌های مشاهده شده پایین است، زیرا در دسترس بودن گسترده داده‌های بیشتر از سری زمانی ماهانه منجر به تجزیه و تحلیل‌هایی می‌شود که دقت کافی ندارند. در حالی که مقیاس‌های کوتاه‌تر مقیاسی هستند که برای رویدادهای خشکسالی چند ساله که به کندی در حال توسعه هستند، بسیار دقیق‌تر می‌باشد. شناسایی رویدادهای خشکسالی آنی که به سرعت در حال توسعه هستند، نیاز به تجزیه و تحلیل ماهانه، زیرماهانه، و

در سال متغیر می‌باشد. این در حالی است که مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل در دو اقلیم خشک و فراخشک به ترتیب ۱۲۵۷ تا ۲۰۱۶ و ۱۳۸۷ تا ۲۰۸۰ میلی‌متر در سال گزارش شده است. محدوده مطالعاتی تحقیق حاضر به دلیل موقعیت جغرافیایی ویژه ایران در نوار بیابانی از آب و هوای خشک بهره می‌برد. منطقه همگرایی بین آب‌وهوای مدیترانه‌ای در غرب و بحری جنوب کشور عامل اصلی در تعیین فصلی بارش‌ها است. بر همین اساس در مقیاس کل کشور با سه فصل بارش مجزا که به فصل‌های A، B، و C طبقه‌بندی می‌شوند، مشخص می‌گردند. فصل A به مدت سه ماه مهر، آبان و آذر، به‌عنوان فصل کوتاه بارش شناخته می‌شود. فصل B به مدت چهار ماه دی، بهمن، اسفند و فروردین، که معمولاً به‌عنوان طولانی‌ترین فصل بارش در نظر گرفته می‌شود. فصل C، که از اواسط اردیبهشت تا شهریور ادامه دارد، به‌عنوان فصل خشک طولانی شناخته می‌شوند (Sharafi and Mir Karim, 2020; Sharafi and Mohammadi Ghaleni, 2021).

(حوضه‌های ۱۷، ۲۳، ۲۴، ۲۵، ۲۶، ۴۱، ۴۳، ۴۴، ۵۱ و ۶۰)، خیلی خشک (حوضه‌های ۲۷، ۲۸، ۲۹، ۴۵، ۴۶، ۴۸، ۴۹، ۵۲ و ۵۳) به ترتیب از شمال و شمال غرب به جنوب و جنوب شرقی قرار داشتند (شکل ۱). متغیرهای مورد استفاده در این مطالعه شامل داده‌های روزانه آب‌وهوایی (۱۹۷۹-۲۰۲۱) و اطلاعات جغرافیایی از مرکز پیش‌بینی میان مدت اروپا<sup>۱</sup> (ECMWF) بود. بخش شمالی کشور با اقلیم مرطوب، از بارندگی منطقه کوهستانی البرز در بخش جنوبی و ساحلی دریای کاسپین در بخش شمالی بهره می‌برد که در آن میزان بارش از ۹۴۴ تا ۱۵۲۹ میلی‌متر و میزان تبخیر و تعرق پتانسیل از ۶۶۳ تا ۹۴۰ میلی‌متر در سال متغیر است. میزان بارش در اقلیم نیمه خشک از ۱۶۴ تا ۷۰۹ میلی‌متر و میزان تبخیر و تعرق پتانسیل آن از ۱۰۹۲ تا ۱۷۲۳ میلی‌متر در سال متغیر می‌باشد. هم‌چنین اقلیم‌های خشک و فراخشک که بخش وسیعی از کشور را در بر می‌گیرند به ترتیب مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل و بارش آنها از ۱۸۱ تا ۶۶۰ میلی‌متر و ۸۰ تا ۱۸۰ میلی‌متر



شکل (۱): موقعیت مکانی ۶۲۱ نقطه شبکه بندی شده در قالب ۳۰ حوضه نوع دوم بر اساس اقلیم‌های مختلف ایران

برای رشد کامل و خشکسالی هیدرولوژیکی نیاز دارند (Taji and Keskar, 2022). بر همین اساس پایش خشکسالی در مقیاس زمانی مختلف، شناسایی دوره‌های مرطوب کوتاه‌مدت در خشکسالی‌های بلندمدت و دوره‌های خشک در دوره‌های مرطوب بلندمدت را امکان‌پذیر می‌سازد (Vélez-Nicolás et al., 2022; Samantaray et al., 2022). SPEI و SPI با استفاده از

### شاخص‌های خشکسالی SPI و SPEI

در تحقیق حاضر شاخص‌های SPI و SPEI برای شناسایی، توصیف و تعیین کمیت رخداد خشکسالی مقایسه و استفاده شدند. تجزیه و تحلیل‌ها در مقیاس‌های زمانی مختلف (۲، ۶، ۲۴ و ۴۸ ماهه) از سال ۱۹۷۹ تا ۲۰۲۱ انجام شد. مقیاس‌های زمانی ۲ و ۶ و ۲۴ و ۴۸ ماه مربوط به خشکسالی کشاورزی و هیدرولوژیکی است بر این اساس که بیشتر گیاهان کشت شده به ترتیب به ۲ تا ۶ ماه

1. European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)

که در آن  $P$  و  $ET_{ref}$  به ترتیب نشان دهنده بارندگی و تبخیر و تعرق پتانسیل است،  $D$  نشان دهنده تفاوت بین  $P$  و  $ET_{ref}$  و  $i$  نشان دهنده تعداد ماه‌های شمارش شده می‌باشد. روش‌های متعددی برای محاسبه  $ET_{ref}$  معرفی شده‌اند و برخی از محققان اثربخشی این روش‌ها را مقایسه کرده‌اند (Sheffield et al., 2012; Yahya et al., 2020). تعیین اختلاف تجمعی بین بارندگی و  $ET_{ref}$  در بازه‌های زمانی مختلف (۲-، ۶-، ۲۴-، ۴۸- ماهه) به شرح رابطه ۳، است:

$$X_{s,j}^n = \sum_{t=13-n+j}^{12} D_{s-1,t} + \sum_{t=1}^j D_{s,j} \text{ if } j \geq n \quad (3)$$

$$X_{s,j}^n = \sum_{s=j-n+1}^{12} D_{s-1} \text{ if } j \geq n \quad (4)$$

که در آن  $X_{s,j}^n$  انباشت تفاوت بین  $P$  و  $ET_{ref}$  در مقیاس زمانی ماه  $n$ م در ماه  $m$ م سال  $s$ ام است،  $D_{s,t}$  تفاوت بین  $P$  و  $ET_{ref}$  ماهانه در ماه  $t$ م و سال  $s$ ام است. با توجه به این واقعیت که نسخه اصلی ممکن است حاوی مقادیر منفی باشد، SPEI از سه پارامتر توزیع احتمال لجستیک پیشنهاد شده توسط ویسنته-سرانو و همکاران استفاده می‌کند (Vicente-Serrano et al., 2010). برای توالی داده‌های همه مقیاس‌های زمانی، تابع تجمعی توزیع احتمال لجستیک  $F(G)$  به صورت رابطه ۴، ارائه می‌گردد:

$$F(G) = \left[ 1 + \left( \frac{\alpha}{g - \gamma} \right)^\beta \right]^{-1} \quad (4)$$

که در آن  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $\gamma$  به ترتیب مقادیر پارامترهای مقیاس، شکل و مبدأ هستند. محاسبات را می‌توان با استفاده از معادلات معرفی شده توسط ویسنته-سرانو و همکاران انجام داد (Vicente-Serrano et al., 2010). احتمال یک مقدار معین  $X_{s,j}^n$  برابر با مقدار  $p$  است (رابطه ۵-۹).

$$p = 1 - F(G) \quad (5)$$

$$\text{if } p \leq 0.5, \\ w = \sqrt{-2 \ln p} \quad (6)$$

پکیج SPEI در نرم‌افزار R نسخه 4.1.0 محاسبه شدند (Beguería et al., 2014).

SPI یک شاخص اصلی محاسبه خشکسالی هواشناسی است، که به دلیل سادگی محاسبات کمی‌سازی مقادیر خشکسالی، تشخیص و ارزیابی خشکسالی هواشناسی، یک شاخص شناخته شده و پرکاربرد است. شاخص SPI اولین بار توسط مک‌کی و همکاران معرفی شد (McKee et al., 1993). محاسبه مشخصات مختلف خشکسالی مانند فراوانی، شدت و مدت زمان در مقیاس‌های زمانی مختلف شناسایی و پایش خشکسالی را در یک منطقه خاص امکان‌پذیر می‌سازد. استفاده از SPI برای اندازه‌گیری تغییر خشکسالی مرتبط با تغییرات آب‌وهوایی توجه زیادی را به خود جلب کرده است. این شاخص توسط سازمان جهانی هواشناسی<sup>۱</sup> به عنوان یکی از بهترین ابزارها در پایش رخداد‌های خشکسالی توصیه شده است. لازم به یادآوری است که یک رویداد خشکسالی زمانی شروع می‌شود که مقدار SPI به کمتر از صفر برسد و زمانی پایان می‌یابد که مقدار SPI دوباره به حالت مثبت برگردد. در این مطالعه مقادیر SPI با استفاده از رابطه ۱، محاسبه شد:

$$SPI = \left( \frac{X_i - \bar{X}}{\sigma} \right) \quad (1)$$

که در آن  $X_i$  مقادیر بارش در ماه  $m$ ام،  $\bar{X}$  مقادیر میانگین بارش در طولانی‌مدت و  $\sigma$  انحراف معیار بارش‌ها برای دوره تعیین شده می‌باشد. SPEI، تکامل یافته SPI به خوبی تثبیت شده و به رسمیت شناخته شده توسط سازمان جهانی هواشناسی، اولین بار توسط ویسنته-سرانو و همکاران توسعه یافت (Vicente-Serrano et al., 2010). این شاخص بر اساس داده‌های ورودی بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل<sup>۲</sup> برای محاسبه تعادل آب‌وهوایی است که آن را از SPI متفاوت می‌کند. معادله تعادل آب اقلیمی بر اساس رابطه ۲، است:

$$D_i = P_i - ET_{ref} \quad (2)$$





جدول (۱): طبقه‌بندی وضعیت‌های خشکسالی و ترسالی بر اساس مقادیر شاخص‌های خشکسالی

SPI-SPEI	دسته‌بندی
$\geq 2$	بسیار مرطوب
۱/۵ تا ۱/۹۹	مرطوب
۱ تا ۱/۴۹	نیمه‌مرطوب
-۰/۹۹ تا -۰/۹۹	نرمال
-۱ تا ۱/۱۹	نیمه خشک
۱/۵ تا -۰/۹۹	خشک
$\leq -2$	بسیار خشک

تعریف رویدادهای خشکسالی با استفاده از تئوری اجرا<sup>۱</sup>

تئوری اجرا اولین بار برای استفاده در تجزیه و تحلیل خشکسالی جهت توصیف خشکسالی‌های هیدرولوژیکی بزرگ قاره‌ای به کار گرفته شد (Yevjevich, 1967). این تئوری یک رویداد خشکسالی را به عنوان یک دوره یا دوره‌ها تعریف می‌کند که طی آن مشاهده یک متغیر به حداقل آستانه در یک منطقه می‌رسد. بسته به اینکه چه پارامترها یا رویکردهایی انتخاب می‌شوند، سایر عوامل نیز باید در نظر گرفته شوند. این روش امکان شناسایی زمان شروع، مدت زمان و زمان اوج خشکسالی را فراهم می‌کند و محاسبه تغییرات زمانی مختلف را ممکن می‌سازد. علیرغم استفاده مکرر از تئوری اجرا برای تجزیه و تحلیل ترکیبی پدیده خشکسالی (Van Loon et al., 2012; Zhu et al., 2016)، به ندرت، برای محاسبه زمان انتشار خشکسالی در مقیاس ماهانه استفاده شده است. هرچند الگوریتم‌ها و تئوری‌های پیچیده‌تری برای تعریف و شناسایی رویدادهای خشکسالی وجود دارند و می‌توانند با این محاسبه زمان انتشار پیشنهادی استفاده شوند، تا زمانی که امکان یافتن همه پیکسل‌هایی که خشکسالی را در هر مرحله زمانی تجربه می‌کنند، وجود داشته باشد. به همین منظور تنها روشی که با داده‌های کمتر می‌تواند بهترین عملکرد را از نظر زمان شروع و طول دوره خشکسالی در مقیاس کلان

$$SPEI = W - \left[ \frac{C_0 + C_1W + C_2W^2}{1 + d_1W + d_2W^2 + d_3W^3} \right] \quad (7)$$

if  $p > 0.5$

$$w = \sqrt{-2 \ln(1-p)} \quad (8)$$

$$SPEI = W - \left[ \frac{C_0 + C_1W + C_2W^2}{1 + d_1W + d_2W^2 + d_3W^3} \right] \quad (9)$$

$$C_0 = 2.515517, d_1 = 1.432788$$

$$C_1 = 0.802853, d_2 = 0.189269$$

$$C_2 = 0.010328, d_3 = 0.001308$$

مقادیر محاسبه شده SPI و SPEI در جدول ۱، دسته‌بندی شده است که برای ارزیابی وضعیت خشکسالی در اقلیم‌های مورد مطالعه از نظر ویژگی‌های خشکسالی مانند فراوانی، دوام، مجموع مقادیر شدت خشکسالی (S) و میانگین مقادیر شدت خشکسالی (I) استفاده می‌شود. تعداد ماه‌های متوالی که در طی آن مقادیر SPI و SPEI برابر یا کمتر از یک سطح آستانه هستند. در این تحقیق، سطح آستانه برای نشان دادن رخداد خشکسالی، هم مقادیر SPI و SPEI کوچکتر یا مساوی منفی یک لحاظ شده است (جدول ۱). مجموع مقادیر شدت خشکسالی (S) مجموع انباشته مقادیر شاخص خشکسالی در طول زمان رویداد است. میانگین مقادیر شدت خشکسالی (I) یک رویداد از تقسیم شدت آن بر زمان بدست می‌آید. رخداد‌های با دوره‌های کوتاه و شدت قابل توجهی بیشتر همیشه شدت بیشتری خواهند داشت. محاسبه روابط مجموع مقادیر شدت و میانگین شدت خشکسالی به شرح زیر است:

$$S = \sum_{i=1}^{time} Index \quad (10)$$

$$I = \frac{severity}{time} \quad (11)$$

از ۱۰ واحدی (آستانه فضایی) تشکیل شده باشد. در مطالعه حاضر از روش آندریادیس استفاده شده است.

بر اساس نتایج اولیه این مطالعه، بیشتر رویدادهای خشکسالی شناسایی شده بین ۱۸۰ تا ۳۵۳ روز بود. سپس رویدادهای خشکسالی بر اساس مدت زمان به عنوان رویدادهای بسیار کوتاه، کوتاه، متوسط یا طولانی طبقه‌بندی شدند (جدول ۲). بر همین اساس بزرگ‌ترین رویداد خشکسالی از هر دسته طولی به عنوان نماینده یا معرف برای تجزیه و تحلیل انتشار مکانی و زمانی خشکسالی انتخاب شد. بنابراین بزرگ‌ترین رویدادها با استفاده از این روش ساده‌ترین ویژگی‌های قابل شناسایی را خواهند داشت، زیرا بر اساس منطقه آسیب‌دیده بوده و هم‌چنین رویدادهای بزرگ‌تر ویژگی‌های اغراق‌آمیزتری دارند. با این حال، این روش را می‌توان برای رویدادهای کوچک‌تر نیز اعمال کرد (Ho et al., 2021). حداکثر گستره هر رویداد را می‌توان در شکل ۹ مشاهده نمود.

جدول (۲): محدوده زمانی برای طبقه‌بندی طول مدت

#### خشکسالی

دسته‌بندی	دوره (روز)	تعداد رویدادها
طولانی	+۳۶۶	۵
متوسط	۱۸۱-۳۶۵	۶
کوتاه	۱۶۱-۱۸۰	۷
بسیار کوتاه	۳۰-۶۰	۳

چارچوب پیشنهادی در این مقاله رویکردی برای یافتن زمان انتشار با مقیاس‌های زمانی ماهانه از خشکسالی کشاورزی تا خشکسالی هیدرولوژیکی بود (شکل ۲). این رویکرد از نظریه اجرا برای توصیف انتشار از طریق انواع مختلف خشکسالی در مقیاس فضایی و زمانی استفاده می‌کند. سودمندی آن در این مطالعه با استفاده از دو متغیر هواشناسی و هیدرولوژیکی مختلف نشان‌دهنده بخش‌های مختلف معادله تعادل آب بر اساس مقادیر تبخیر و تعرق پتانسیل و بارش است. این روش با یافتن زمان انتشار مکانی، یا به عبارت دیگر ارزیابی تفاوت در زمان بین حداکثر وسعت فضایی در متغیرهای مختلف خشکسالی مرتبط

تعیین کند، استفاده از تئوری اجرا می‌باشد (Ho et al., 2021).

الگوریتم تئوری اجرا، متفاوت از چارچوب پیشنهادی آن بوده و از الگوریتم خوشه‌بندی<sup>۱</sup> مشابه آنچه که توسط آندریادیس و همکاران تعریف شده است، استفاده می‌کند (Andreadis et al., 2005). بر همین اساس، تئوری اجرا، زمانی شروع می‌شود که ابتدا خوشه‌ای از رخداد خشکسالی ظاهر شده و آستانه شدت خشکسالی را نقض می‌کند. با این حال، سلول‌های خوشه‌ای باید اضلاع مشترک (همپوشانی) داشته باشند. به عنوان مثال، ممکن است هر روز خوشه‌های متعددی در سراسر منطقه مورد مطالعه وجود داشته باشند، حال اگر ۳۰ روز متوالی دارای خوشه‌های خشکسالی باشد، آن گروه از روزها معرف وقوع خشکسالی در نظر گرفته می‌شود. سپس، از هر معرف خشکسالی، یک رویداد با انتخاب بزرگ‌ترین خوشه و اتصال آن به خوشه‌های دیگر که حداقل یک واحد از بزرگ‌ترین خوشه دارند، بازسازی می‌شود.

دیدگاه‌های محققین خشکسالی در رابطه با آستانه‌های فضایی، به‌ویژه در پاسخ به اندازه منطقه مورد مطالعه و اهداف مطالعه، متفاوت است. به عنوان مثال آندریادیس و همکاران (۲۰۰۵) در مطالعه خود، روی ایالات متحده، از حداقل اندازه خوشه ۱۰ پیکسل (با وضوح ۰/۵ درجه، تقریباً ۳۰۰۰۰ کیلومتر مربع) استفاده کردند. در همین حال، مطالعه‌ای روی چین توسط وانگ و همکاران از مساحت ۱۵۰۰۰۰ کیلومتر مربع برای شناسایی رویدادهای قبلی استفاده کردند (Wang et al., 2011). در حالی که، شفیلد و همکاران (در مقیاس قاره‌ای) دریافتند که حداقل مساحت ۵۰۰۰۰۰ کیلومتر مربع تداوم رویداد خشکسالی نامناسب را در سراسر قاره‌ها به حداقل می‌رساند (Sheffield et al., 2009). بنابراین لویدهیوز نیز از همین آستانه در مطالعه خود در اروپا استفاده نمودند (Lloyd-Hughes, 2012). با این حال، مطالعات مذکور به دنبال رویدادهای بزرگ خشکسالی بودند، در حالی که در این مطالعه، یک رویداد خشکسالی از ابتدا تا انتها، صرف نظر از اندازه آن، بررسی و ارزیابی گردید. بنابراین هر خوشه باید از ناحیه‌ای بزرگ‌تر

$$t_{shift} = t_{hydro,max} - t_{agri,max} \quad (12)$$

این تغییر زمانی نشان دهنده زمان پاسخ (زمان انتشار) حداکثر منطقه خشکسالی هیدرولوژیکی به حداکثر منطقه خشکسالی کشاورزی است. اگر نقطه اوج در شاخص هیدرولوژیکی قبل از SPI اتفاق بیفتد (یعنی تغییر یا انتقال منفی باشد)، زمان تحویل در نظر گرفته می‌شود، در حالی که اگر در شاخص هیدرولوژیکی ابتدا اتفاق بیفتد، (یعنی تغییر مثبت باشد)، زمان تاخیر در نظر گرفته می‌شود. تعریف ویژگی‌ها برای تعیین تغییر زمانی می‌تواند بر نتیجه تأثیر بگذارد: انتخاب تنها حداکثر مطلق زمان اوج SPI ممکن است به اندازه انتخاب اوج‌های نقطه‌ای یا کوتاه، توصیفی نباشد. با این حال، انتخاب اوج‌های کوتاه نیز مشکل‌ساز است، زیرا پس از آن، نسبت دادن اوج‌های هیدرولوژیکی به یک اوج SPI خاص دشوار است، زیرا تعداد اوج‌ها اغلب نابرابر است. بنابراین برای رفع این مشکل، تغییر زمانی را بر اساس حداکثرهای مطلق در پنجره مشاهده محاسبه شد، زیرا آنها به راحتی قابل شناسایی هستند.

## نتایج و بحث

### تنوع زمانی وقوع خشکسالی در مقیاس‌های زمانی مختلف

برای نشان دادن تغییرات تاریخی رخداد‌های خشکسالی در مقیاس‌های زمانی مختلف (۲، ۶، ۲۴ و ۴۸ ماهه) در اقلیم‌های چهارگانه، دو شاخص خشکسالی SPI و SPEI بر اساس مقادیر ثبت شده در ۶۲۱ نقطه کشور محاسبه شدند. بر اساس یافته‌های این تحقیق، این دو شاخص شباهت‌هایی را در الگوهای تغییر در بازه‌های زمانی نشان می‌دهند، اگرچه از نظر تداوم و بزرگی خشکسالی با هم تفاوت دارند. با توجه به اینکه اکثر محصولات زراعی برای توسعه کامل به ۲ تا ۶ ماه زمان نیاز دارند، تجمع حداقل ۲ ماهه کمبود آب در مرحله رشد محصول تأثیر منفی بر تولید محصول خواهد داشت و در نتیجه خشکسالی کشاورزی را به دنبال خواهد داشت. با توجه به اینکه خشکسالی در طول زمان گسترش می‌یابد، منطقی است که

است. بنابراین از پایگاه ERA-5 در مورد سه متغیر بارش<sup>۱</sup>، درجه حرارت میانگین<sup>۲</sup> و تبخیر و تعرق پتانسیل<sup>۳</sup> بر اساس اقلیم‌های مختلف در کل ایران استفاده شد. سه دلیل جهت انتخاب این پایگاه اطلاعاتی از بین سایر پایگاه‌های اطلاعاتی جهانی مدنظر قرار گرفت. اولین دلیل انتخاب پایگاهی با مبنای متفاوت برای استخراج داده‌ها است. به این ترتیب که از مجموعه پایگاه بازتحلیل شده<sup>۴</sup>، پایگاه ERA-5 انتخاب شد. دومین دلیل جهانی بودن داده‌های این پایگاه و امکان دسترسی به داده‌های آن برای تمامی مناطق در سرتاسر جهان بود، و سومین دلیل انتخاب این پایگاه، پرکاربرد بودن آن در مطالعات مرتبط با موضوعات منابع آب بود (محمدی قلعه‌نی و شرفی، ۱۴۰۱). در این مطالعه از وضوح فضایی ۰/۵° در ۰/۵° استفاده شد، اگرچه وضوح فضایی دقیق‌تری را نیز می‌توان اعمال نمود. سپس یک شاخص استاندارد تک متغیره و هر متغیر در طول دوره ثبت شده، محاسبه شد و از مشخصه شدت خشکسالی برای هر واحد یا پیکسل استفاده شد. بنابراین مشاهده سریع‌ترین تغییرات، مستلزم استفاده از مقیاس‌های زمانی یک ماهه برای هر دو شاخص بود.

این سری زمانی برای تعریف رویدادهای خشکسالی هواشناسی استفاده می‌شود. با این حال، هیچ تعریف جهانی از رویدادهای خشکسالی وجود ندارد (Lloyd-Hughes, 2013; Van Loon, 2015). برای این مطالعه، از صافی تئوری اجرا استفاده شد، هرچند سایر روش‌های مختلف تعریف خشکسالی را می‌توان جایگزین کرد، اگر امکان شناسایی هر پیکسل تحت شرایط خشکسالی در هر مرحله زمانی وجود داشته باشد. برای هر رویداد انتخاب شده جهت تجزیه و تحلیل، تئوری اجرا با شدت ( $SPI < -1$ )، مساحت (تعداد پیکسل‌های مجاور)، و آستانه مدت زمان برای بازسازی گسترش فضایی رویداد استفاده شد. سپس تغییرات زمانی بین زمان‌های اوج، یا زمانی که بیشترین پیکسل‌ها خشکسالی را تجربه می‌کنند، بین شاخص SPEI و SPI محاسبه شد:

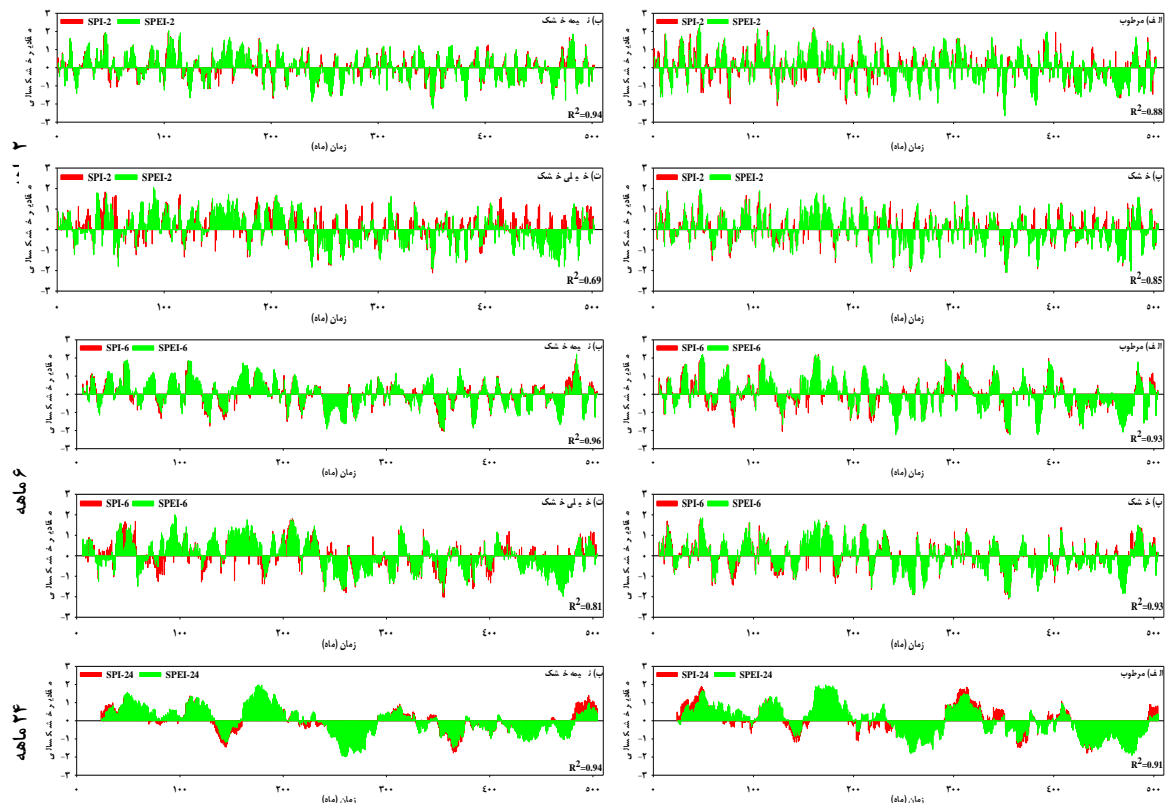
3. Potential evapotranspiration ( $ET_{ref}$ )  
4. Reanalysis products

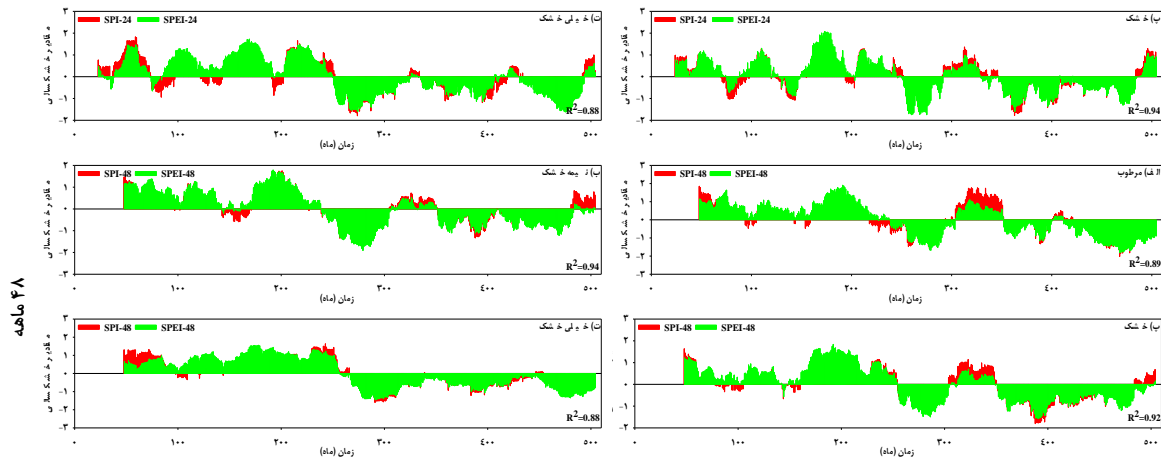
1. Precipitation (P)  
2. Mean temperature ( $T_{mean}$ )

داده است و تبخیر و تعرق نیاز به دسترسی به آب دارد و بنابراین اثرات آن بیشتر در شرایط کم آب تجربه می‌شود (Tadese et al., 2020; Scott et al., 2021; Sharafi et al., 2022).

در ایران، اقلیم‌های مرطوب‌تر تغییرات آب و هوایی نرمال‌تری را تجربه می‌کنند که می‌تواند منشأ تغییرپذیری خشکسالی باشد. خشکسالی بیشتر در یک مقیاس زمانی کوتاه‌تر اتفاق می‌افتد (معمولاً یک ماه کمبود آب و در قالب خشکسالی هواشناسی رخ می‌دهد). بر خلاف خشکسالی هواشناسی، خشکسالی هیدرولوژیکی نیاز به یک دوره طولانی کمبود آب یا کاهش قابل توجه ذخیره آب دارد. بنابراین، خشکسالی‌های هواشناسی در مقیاس زمانی ۲ ماهه بیشترین فراوانی را دارند، پس از آن خشکسالی کشاورزی در مقیاس زمانی ۶ ماهه، و خشکسالی هیدرولوژیکی در مقیاس زمانی ۲۴ و ۴۸ ماهه قرار دارند. این حال، در مقیاس زمانی بالاتر از ۲۴ ماهه، خشکسالی بیشتر ادامه دارد و بزرگی آن افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، در مقیاس زمانی ۴۸ ماهه، خشکسالی ۲۴ ماهه شدیدتر و به شدت خشک، اما با شدت کمتر گزارش گردید (شکل ۳).

فرض کنیم دوره‌های طولانی خشکسالی در بازه‌های زمانی طولانی‌تر ناشی از اثرات تجمعی کمبود آب پیشینیان در طول زمان بوده، که ممکن است با عدم تداوم در بارش تشدید شود. علاوه بر این، خشکسالی زمانی رخ می‌دهد که الگوهای بارش فصلی تغییر کند. به عنوان مثال، بارش‌ها با مشکل مواجه می‌شوند و در نتیجه فعالیت‌های تهدیدکننده‌ای به وجود می‌آیند که به شدت به شروع حوادث بارندگی وابسته است. هنگام مقایسه SPI و SPEI، اختلاف‌هایی در برخی سال‌ها و در بازه‌های زمانی مشاهده شد. طولانی‌ترین رخداد‌های خشکسالی SPEI در تمام مقیاس‌های زمانی شناسایی شده است و بر اساس نتایج این شاخص، خشکسالی بیشتر طول کشیده، زیرا تعداد ماه‌های خشکسالی سالانه در طول سری‌های زمانی افزایش یافته است. برای اثبات این ادعا مشخص گردید که به مدت چندین سال، که قبلاً شرایط خشکسالی را با استفاده از شاخص SPI تشخیص داده شده بود، در حالی که بزرگی شدت خشکسالی با استفاده از شناسایی توسط SPEI تشدید شد (شکل ۲). افزایش بزرگی خشکسالی‌هایی که توسط SPEI ایجاد می‌شود، گاهی اوقات می‌تواند با این واقعیت روشن شود که SPEI تبخیر و تعرق را در خود جای



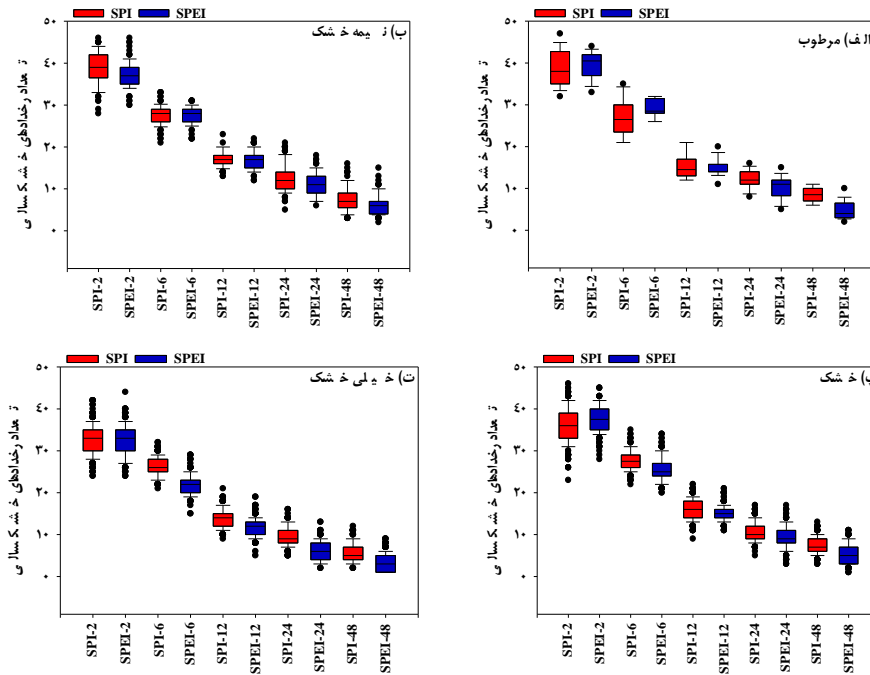


شکل (۲): تغییرات زمانی ماهانه خشکسالی در مقیاس‌های ۲، ۶، ۲۴ و ۴۸ ماهه در اقلیم‌های الف) مرطوب، ب) نیمه خشک، پ) خشک و ت) خیلی خشک ایران

### ویژگی‌ها و الگوهای تاریخ وقوع خشکسالی

مشخصات خشکسالی در شکل‌های ۴ تا ۷ بر اساس مقیاس‌های زمانی ۲، ۶، ۲۴ و ۴۸ ماهه وجود دارد. سری‌های SPI و SPEI مجاز به شناسایی در چه ماه‌ها یا سال‌هایی هستند که حوزه مطالعه رخدادهایی با شدت‌های متوسط، شدید یا بسیار شدید را تجربه کرده‌اند. تجزیه و تحلیل کلی نشان داد که هر دو دسته شاخص خشکسالی کلیه اقلیم‌ها را تحت تاثیر قرار داده‌اند. با این حال، بر اساس نتایج شاخص‌های SPI و SPEI در مقیاس زمانی دو ماهه، SPEI ماه‌های خشکسالی زیادی نشان داد. هم‌چنین در طول دوره مطالعه، در اقلیم مرطوب، SPEI معادل ۱۸۹ ماه خشک را شناسایی کرد، که همگی آنها به‌عنوان خشکسالی متوسط تا شدید طبقه‌بندی می‌شوند. سال‌های ۱۹۸۸ آغاز وقوع خشکسالی در اقلیم‌های مرطوب شناسایی شد و طی سال‌های ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۰ به‌عنوان دوره‌های خشک ثبت شده است. از طرف دیگر SPEI دو دوره خشک با مدت طولانی، اما با شدت

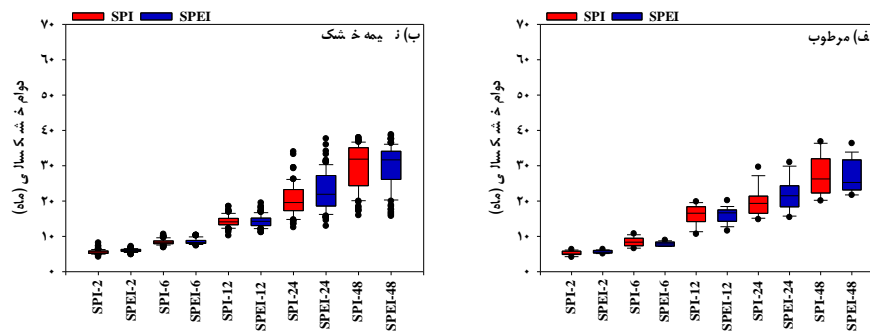
کم‌تر را ثبت کرد، در حالی که SPI یک دوره خشک با مدت زمان محدود، اما با شدت بالا را ثبت کرد. بر همین اساس SPI معادل ۱۳۹ ماه خشک، ۸۶ ماه با خشکی متوسط، ۴۱ ماه خشک شدید و ۱۲ ماه بسیار خشک را شناسایی نمود، که سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹ به‌عنوان سال‌های بسیار خشک شناسایی شدند. با توجه به رویدادهای خشکسالی ایجاد شده توسط دو شاخص خشکسالی، شاخص SPEI می‌تواند خشکسالی هواشناسی را در مقایسه با شاخص SPI به‌دقت ارزیابی کند. با توجه به نتایج تولید شده توسط SPEI-2، سال‌های ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۹ خشک بود. از سوی دیگر SPI-2 نشان داد که سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹ بسیار خشک بودند. SPI-2 دو رخداد بسیار خشک را ارائه کرد، یکی از سه ماه متوالی از سپتامبر ۱۹۹۹ تا نوامبر ۲۰۰۰ با شدت ۲/۳- رخ داد و دومی از اکتبر ۲۰۰۸ تا آوریل ۲۰۰۹، هفت ماه خشک متوالی با شدت ۲/۲- که به‌شدت بخش کشاورزی را تحت تاثیر قرار داد (شکل ۴).

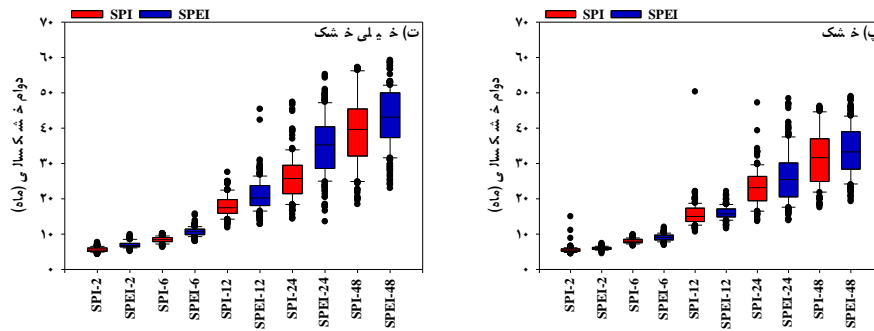


شکل (۴): تعداد رخداد های خشکسالی بر اساس شاخص های SPI و SPEI در اقلیم های مختلف ایران

تجزیه و تحلیل SPI و SPEI در مقیاس زمانی بالاتر برای شناسایی وقوع خشکسالی هیدرولوژیکی بسیار مهم است. در مقیاس زمانی ۲۴ ماهه، آنها تقریباً همان تعداد ماه های خشکسالی را برای شرایط خشکی متوسط و شرایط بسیار خشک به ترتیب ایجاد کردند. در مقیاس زمانی ۲۴ و ۴۸ ماهه، دو شاخص SPI و SPEI نشان دادند که دوره های ۱۹۹۹، ۲۰۰۳، ۲۰۰۴، ۲۰۰۵، ۲۰۰۶، ۲۰۰۷، ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹ بسیار خشک بودند. شاخص SPEI در ۲۸۷ ماه خشک تر و شدیدتر را شناسایی نمود، در حالی که SPI ماه های بسیار خشک تر را با شدت بالاتری نسبت به SPEI شناسایی کرد (شکل ۵).

با تشخیص SPEI-6 سال های نسبتاً و شدیداً خشک، سال های ۲۰۰۰، ۲۰۰۲ و ۲۰۰۹ بودند. سال های ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹ به عنوان سال های بسیار خشک ثبت شدند و حادثه خشکی از ژوئن ۲۰۰۸ تا دسامبر ۲۰۰۹ به مدت ۱۹ ماه با شدت ۲/۱- به طول انجامید. تجزیه و تحلیل SPI-6 در اقلیم های نیمه خشک و خشک دوره های خشکی متوسط را در طول سال های ۱۹۹۹ تا ۲۰۱۹ با خشکی متوسط نشان داد، سال ۲۰۰۰ به عنوان خشکی شدید شناخته شد، در حالی که سال های ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹ بسیار خشک بودند، با یک حادثه خشکسالی از سپتامبر ۲۰۰۸ تا ژوئن ۲۰۰۹، ده ماه متوالی با خشکسالی با شدت ۲/۵- رخ داد.

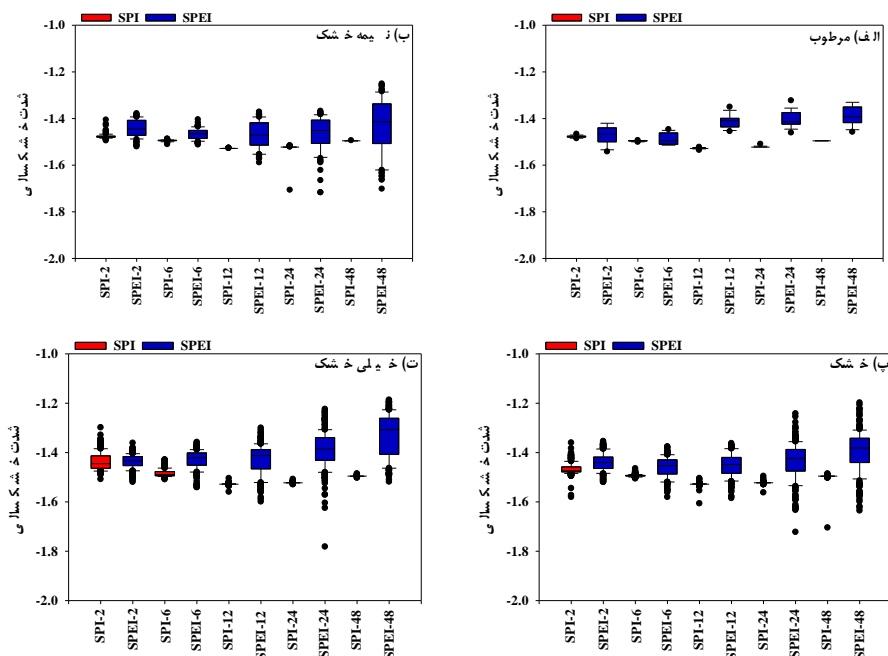




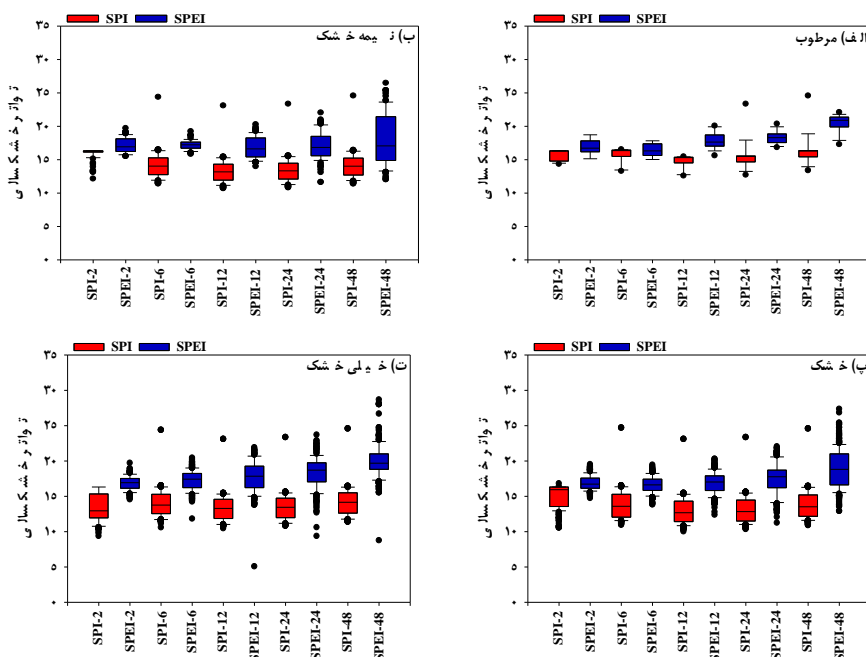
شکل (۵): دوام خشکسالی بر اساس شاخص‌های SPI و SPEI در اقلیم‌های مختلف ایران

اگر کمبود بارندگی دلیل اصلی خشکسالی‌ها است، پیامدهای افزایش درجه حرارت سرتاسری، در تعادل اقلیمی نقش مهمی در تعیین خشکسالی دارد. بنابراین هنگامی که فقط بارش در نظر گرفته شد، ماه‌های خشکسالی بیشتر به‌عنوان "بسیار خشک" طبقه‌بندی می‌شوند تا زمانی که تبخیر و تعرق پتانسیل در ارزیابی خشکسالی گنجانده شده است (شکل ۷).

شاخص SPEI ماه‌های خشکسالی بیشتری را در دامنه مورد مطالعه نسبت به شاخص SPI در هر دو کلاس متوسط و شدید برای همه مقیاس‌های زمانی مختلف مورد استفاده در سراسر ایران شناسایی کرد، به جز حوضه ۱۴ که در آن حادثه خشکسالی پر تکرار و با شدت بسیار بالا مشاهده نشد که در این طبقه‌بندی قابلیت گزارش داشته باشد. همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، برای تمام مقیاس‌های زمانی بسیار خشک است. یافته‌ها نشان می‌دهد که حتی



شکل (۶): شدت خشکسالی بر اساس شاخص‌های SPI و SPEI در اقلیم‌های مختلف ایران



شکل (۷): تواتر خشکسالی بر اساس شاخص‌های SPI و SPEI در اقلیم‌های مختلف ایران

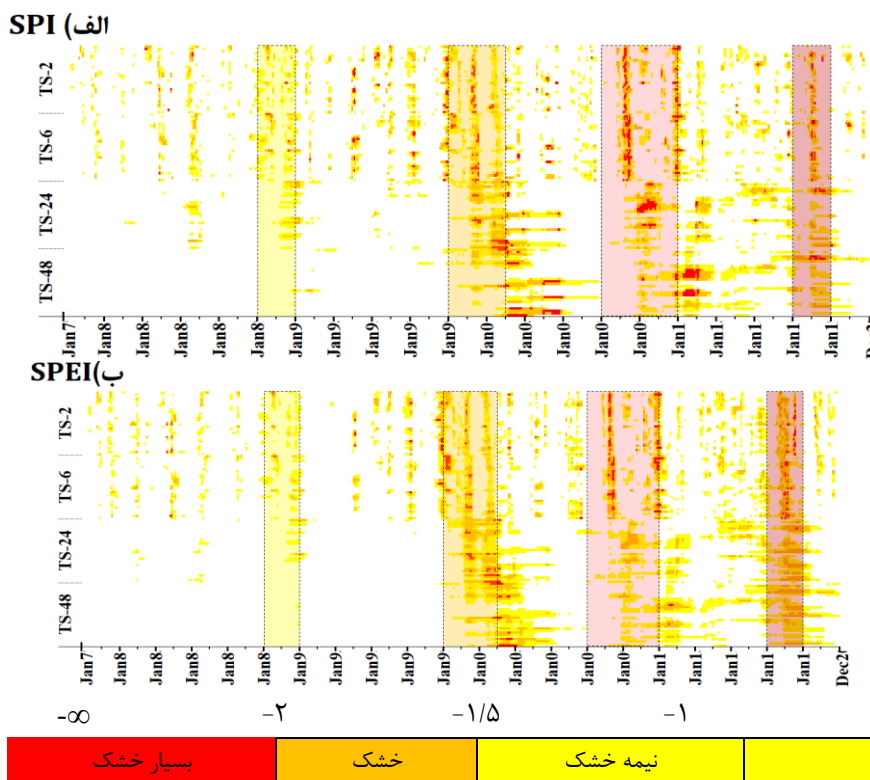
### تئوری انتشار خشکسالی

نقشه حرارتی از همبستگی‌های آماری معنی‌دار بین تمام مقیاس‌های زمانی مربوطه برای رویدادهای معرف را می‌توان در شکل ۸ مشاهده کرد. اگر مقیاس زمانی SPI که قوی‌ترین همبستگی را با سری زمانی ماهانه (TS-2) دارد زمان انتشار در نظر بگیریم (همان‌طور که بسیاری از مطالعات فرض کرده‌اند)، پس زمان انتشار برای SPEI برای رویداد بسیار کوتاه ۲ ماه، برای رویداد کوتاه ۶ ماه خواهد بود. این موضوع نشان می‌دهد که این تحلیل می‌تواند ناکافی باشد، اگرچه روند همبستگی‌های بالاتر در بازه‌های زمانی طولانی‌تر با مطالعات سایر محققین مطابقت دارد (Kim et al., 2019; Ho et al., 2021). بنابراین دشوار است که قاطعانه بگوییم که یک جفت مقیاس زمانی بسیار همبسته همان زمان انتشار است. بلکه طیفی از مقیاس‌های زمانی را می‌توان در نظر گرفت. علاوه بر این، به‌عنوان میانه، این مقادیر تغییرپذیری فضایی هر یک از حوضه‌ها را نادیده می‌گیرند. سلول‌های منفرد ممکن است همبستگی مثبت یا همبستگی منفی بسیار بالایی داشته باشند که هنگام محاسبه مقدار میانه از بین رفته است.

تحقیقات آینده می‌تواند تشخیص دهد که چرا برخی از پیکسل‌ها همبستگی بالایی دارند در حالی که برخی دیگر چنین همبستگی ندارند. SPI-2 و SPEI-2 برای رویداد کوتاه، SPI-2 و SPEI-6 برای رویداد متوسط، SPI-6 و SPEI-24 برای رویداد طولانی، SPI-24 و SPEI-48 علی‌رغم گنجاندن نقاط داده بیشتر، هنوز بیشترین همبستگی واضحی در برخی از رویدادهای خشکسالی وجود ندارد، بلکه چندین ضریب همبستگی میانی بالا وجود دارد که می‌تواند به‌طور مشابه موثر باشد. با این حال، تجزیه و تحلیل این جفت‌ها باید در نظر داشته باشد که مقیاس‌های زمانی طولانی‌تر به‌طور کلی منجر به همبستگی بالاتری می‌شود (Shukla and Wood, 2008; Ho et al., 2021). بررسی مهم دیگر، ارزیابی ارتباط مقیاس زمانی با شاخص خشکی است. شاخص‌های SPI و SPEI به‌دلیل متغیر بودن نتایج، شاخص‌هایی در مقیاس زمانی کوتاه‌تر هستند. در حالی که کسری‌های تبخیر و تعرق پتانسیل محاسبه شده در مقیاس‌های زمانی طولانی‌تر می‌تواند نشان دهنده بهره‌وری کشاورزی باشد (Kim et al., 2019)، نوسان شدید شرایط تبخیر و تعرق پتانسیل می‌تواند آن را در مقیاس‌های زمانی کوتاه بسیار مفید کند (Vicente-)



(Serrano et al., 2018)، به‌ویژه در موارد خشکسالی ناگهانی که به‌سرعت در حال توسعه می‌باشد (Li et al., 2020).



شکل (۸): نقشه حرارتی همبستگی شاخص‌های الف (SPI) و ب (SPEI) در مقیاس‌های ۲، ۶، ۲۴ و ۴۸ ماهه

از قبل نیز مشخص بود قابل انتظار می‌باشد، زیرا طول رویداد طولانی‌تر به معنای زیرپیک‌های بالقوه بیشتر خشکسالی بوده و در نتیجه شانس بیشتری برای وقوع آن در یک حوضه بزرگ‌تر می‌باشد. بنابراین بررسی دقیق‌تر نتایج توسط تغییرات ایجاد شده می‌تواند به شناسایی عوامل مؤثر بر انتشار خشکسالی در مکان و زمان کمک کند.

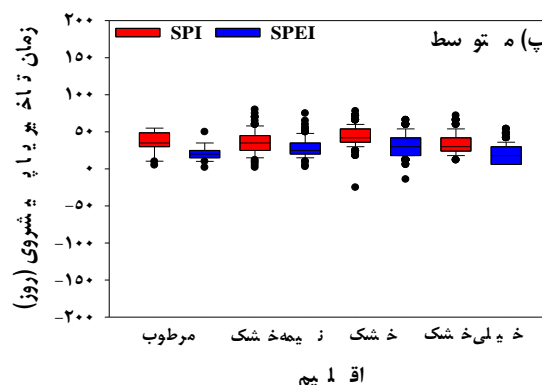
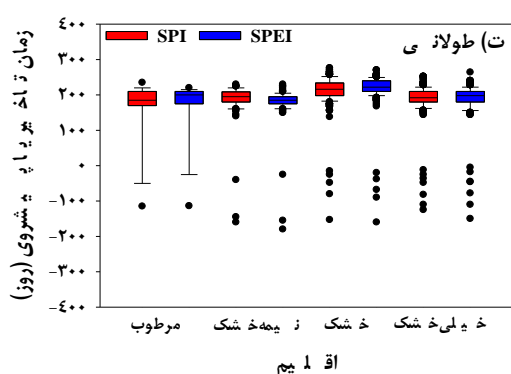
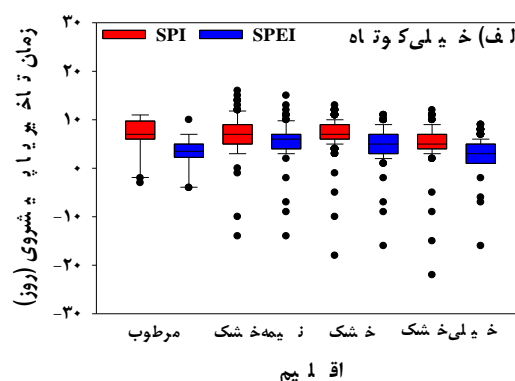
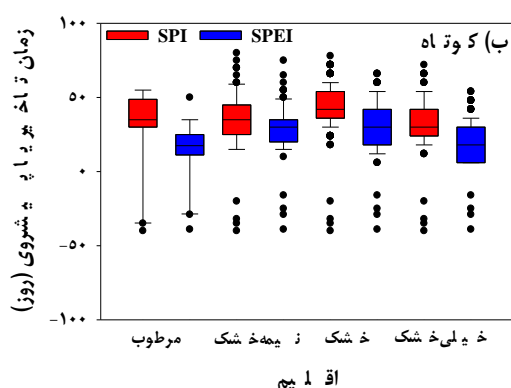
همان‌طور که پیش‌تر نیز اشاره شد، تحلیل تغییر زمانی تفسیر ساده‌تری از انتشار ارائه می‌دهد که شامل دقت بالاتر و در نظر گرفتن تنوع مکانی است. چنین دقتی هنگام تلاش برای یافتن روندها در زمان انتشار، مکانیک و رویدادهای خشکسالی آنی که به‌سرعت در حال توسعه هستند که در آن تفکیک ماهانه منجر به کمبود قابل توجه جزئیات می‌شود، ارزشمند است (Otkin et al., 2018; )

برخلاف تحلیل دامنه، روند زمان انتشار دقیق با افزایش مدت زمان چندان ساده نیست. نمودار پراکندگی تغییر زمانی (محور  $y$ ) و مدت زمان رویداد (محور  $x$ ) در شکل ۹ ارائه شده است. از آنجا که شاخص‌های استاندارد شده نیاز به یک دوره مشاهده قبل از تاریخ محاسبه دارند، این به‌عنوان یک دوره آزمایشی<sup>۱</sup> برای محاسبه عمل می‌کند (شکل ۲). برای این دوره آزمایشی، شرایط خشکسالی ناشناخته است. بنابراین، مشخص نیست که اولین رویداد خشکسالی مشاهده شده، که در ابتدای ثبت "آغاز می‌شود"، در واقع چه زمانی شروع شده است و بنابراین به دلیل انحراف احتمالی داده‌ها از این تجزیه و تحلیل حذف شدند. به‌طور کلی، دامنه جابجایی‌های زمانی متناسب با دسته طول افزایش می‌یابد. این افزایش کلی، همان‌طور که

1. Warm up period

ارتباطی ندارند. توجه به این نکته مهم است که حجم نمونه کم است، بنابراین، آزمایش بیشتر با این روش برای رسیدن به یک نتیجه قاطع در مورد روند بین طول خشکسالی و زمان انتشار مورد نیاز است. علاوه بر این، خشکسالی مبتنی بر تبخیر و تعرق پتانسیل اغلب مقدم بر خشکسالی هواشناسی مبتنی بر بارش بوده است (شکل ۸)، که نشان می‌دهد فرض خشکسالی هواشناسی که به خشکسالی هیدرولوژیکی گسترش می‌یابد، همیشه معتبر نیست. بنابراین، روش تئوری اجرا مبتنی جابجایی زمانی یک تخمین واضح‌تر و با وضوح دقیق‌تر از زمان انتشار ارائه می‌کند که از مفروضات مشکل‌ساز روش همبستگی اجتناب می‌کند.

(Pendergrass et al., 2020). علاوه بر این، شاخص SPEI اغلب مقدم بر خشکسالی SPI بوده است (شکل ۹)، که نشان می‌دهد فرض خشکسالی کشاورزی که به خشکسالی هیدرولوژیکی گسترش می‌یابد، همیشه معتبر نیست. بنابراین، روش تغییرات زمانی یک تخمین واضح‌تر و با وضوح دقیق‌تر از زمان انتشار ارائه می‌کند که از مفروضات مشکل‌ساز روش همبستگی اجتناب می‌کند. در مطالعه حاضر، دو رویدادی که بیش از ۴۶۲ روز (۸۵۷ و ۱۱۰۲ روز طول) به طول انجامید، به‌طور منطقی می‌توان آنها را پرت در نظر گرفت. تجزیه و تحلیل رگرسیون خطی از ۳۰ حوضه نشان داد که روند کمی در زمان انتشار با افزایش مدت خشکسالی وجود دارد. با این حال، همبستگی کم نشان می‌دهد که طول و جابجایی زمانی تا حد زیادی با هم



شکل (۹): تجزیه و تحلیل تغییر زمانی، زمان تأخیر (+) یا پیشروی (-) خشکسالی (بر حسب روز)، برای همه رویدادهای شناسایی شده، مرتب‌سازی شده بر اساس دسته‌بندی طول: خیلی کوتاه (n=۳)، کوتاه (n=۷)، متوسط (n=۶) و طولانی (n=۴) (محورها برای هر دسته متفاوت است)

## نتیجه گیری

خشکسالی بود. هر دوی آنها می‌توانند انواع مختلف خشکسالی را اما با ویژگی‌های متفاوت تشخیص دهند. شاخص SPEI رخداد خشکسالی بیشتر را با مدت زمان طولانی و بزرگی بیشتر، اما با شدت کمتر شناسایی کرد، در حالی که شاخص SPI رخداد های خشکسالی را با مدت زمان محدود و رویداد خشکسالی کمتر اما با شدت بالاتر را شناسایی کرد. بنابراین، SPEI برای تعیین کمیت خشکسالی از SPI دقیق‌تر است، در حالی که SPI برای نشان دادن شدت خشکسالی دقیق‌تر است. بنابراین، این مطالعه پیشنهاد می‌کند که: هنگام اعمال یک شاخص مانند SPI باید توجه بیشتری شود. با احتیاط، SPEI می‌تواند در شرایط اقلیمی که تأثیر تبخیر و تعرق قابل توجه است، مؤثرتر باشد، هم‌چنین هنگام ارزیابی خشکسالی، استفاده از هر دو شاخص SPEI و SPI به شدت پیشنهاد می‌شود.

در حالی که چارچوب در این مطالعه رویکرد جدیدی را در پدیده انتشار خشکسالی از طریق متغیرهای هیدرولوژیکی مختلف ارائه می‌کند، اما نیاز به حل چندین چالش دارد. برای مثال، عدم قطعیت در محاسبه شاخص استاندارد شده، باید با دوره‌های طولانی‌تر متغیرهای مشاهداتی، کاهش یابد. در آینده باید تحقیقات بیشتری بر چگونگی تأثیر ویژگی‌هایی تئوری اجرا در تعیین انتشار خشکسالی صورت گیرد. مدل‌های پیشرفته شناسایی خشکسالی می‌تواند تداخل رویدادهای غیر مرتبط را در طول تجزیه و تحلیل کاهش دهد. از طرفی نیز، استانداردسازی و بومی‌سازی چنین الگوریتم‌هایی برای کاربرد این روش در مطالعات مختلف بسیار مفید خواهد بود. با این حال، کاربرد جدید یک تحلیل تئوری اجرا روی شاخص‌های استاندارد خشکسالی تک متغیره محاسبه شده در مقیاس ماهانه فرصت‌های جدیدی را برای بررسی خشکسالی به‌ویژه رویدادهای خشکسالی آبی در حال توسعه سریع، ارائه می‌دهد.

این مطالعه شاخص‌های SPI و SPEI را در کمی‌سازی خشکسالی‌ها و ویژگی‌های رخداد های بسیار شدید در اقلیم‌های مختلف ایران و بر اساس مقیاس‌های زمانی ۲، ۶، ۲۴ و ۴۸ ماهه برای دوره ۲۰۲۱-۱۹۷۹ مقایسه کرد. بر همین اساس هر دو شاخص خشکسالی تغییرات تاریخی خشکسالی را ثبت کردند و قادر به تشخیص انواع مختلف خشکسالی بودند. بدیهی است که شاخص SPEI وقوع خشکسالی‌هایی را شناسایی کرده است که با مدت زمان طولانی مشخص می‌شوند، هر چند که با شدت کمتری نمایان شده‌اند. این امر از این واقعیت ناشی می‌شود که گرمایش جهانی سطح تبخیر و تعرق پتانسیل را افزایش می‌دهد و الگوهای بارش را تغییر می‌دهد و در نتیجه تقاضای تبخیر آب را افزایش خواهد داد که منجر به کمبود آب می‌شود و در نهایت منجر به ثبت رویداد مکرر مرتبط با تغییرات شدید آب و هوایی مانند خشکسالی و سیل می‌گردد. بر همین اساس شاخص SPEI به دلیل توانایی آن در بررسی اثرات بالقوه تغییرات آب و هوایی معیار مهم‌تری است. از سوی دیگر، تنها با در نظر گرفتن متغیر بارش، شاخص SPI توانست رویداد خشکسالی شدید را در مقایسه با شاخص SPEI شناسایی کند و تفاوت قابل توجه اساساً در مقیاس‌های زمانی بالاتر مشهود بود. بنابراین این موضوع انکارناپذیر خواهد بود که بارندگی نقش مهمی در شناسایی و تعیین خشکسالی‌ها دارد. هر چند که افزایش درجه حرارت تأثیرات اساسی بر شدت خشکسالی و میزان رطوبت خاک در دسترس دارد که به نوبه خود بر خشکسالی کشاورزی تأثیر می‌گذارد. بنابراین شاخص SPEI ابزار قدرتمندی برای تعیین الگوی تاریخی شرایط خشکی در اقلیم‌های مختلف کشور می‌باشد. هر دو شاخص SPI و SPEI می‌توانند خشکسالی‌ها را کمی‌سازی نمایند و شروع و پایان رخداد خشکی را نیز شناسایی کنند. با وجود این، هدف این مطالعه تعیین تفاوت SPI با SPEI در کمی کردن و توصیف حوادث

## قدردانی

بدین وسیله از همکاری مسئولین محترم دانشگاه اراک در انجام این پروژه، نهایت تقدیر و تشکر بعمل می آید

## منابع

- شرفی، س. و محمدی قلعه‌نی، م. ۱۴۰۱. تأثیر خشکسالی بر عملکرد گندم و جو در اقلیم‌های مختلف ایران. مجله آبیاری و زهکشی ایران، ۵(۱۶): ۱۰۲۵-۱۰۱۰.
- شرفی، س.، صادقی، س.، نحوی‌نیا، م.ج.، عبدالهی‌پور، م. ۱۴۰۱. ارزیابی معادلات رگرسیونی چند متغیره در تخمین عملکرد گندم و جو در اقلیم‌های مختلف ایران. مدیریت آب و آبیاری، ۱۲(۱): ۲۱۱-۲۰۱.
- محمدی قلعه‌نی، م. و شرفی، س. ۱۴۰۱. ارزیابی دقت پایگاه داده‌های ERA5 و CRU TS4.05 برای متغیرهای بارش، دما و تبخیر-تعرق پتانسیل در اقلیم‌های مختلف ایران. مجله آبیاری و زهکشی ایران، ۵(۱۶): ۸۹۰-۸۷۹.
- Andreadis, K.M., Clark, E.A., Wood, A.W., Hamlet, A.F. and Lettenmaier, D.P. 2005. Twentieth-century drought in the conterminous United States. *Journal of Hydrometeorology*, 6(6):985-1001.
- Beguería, S., Vicente-Serrano, S. M., Reig, F. and Latorre, B. 2014. Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *International journal of climatology*, 34(10): 3001-3023.
- Chen, T., Xia, G., Liu, T., Chen, W. and Chi, D. 2016. Assessment of drought impact on main cereal crops using a standardized precipitation evapotranspiration index in Liaoning Province, China. *Sustainability*, 8(10): 1069.
- Fluixá-Sanmartín, J., Pan, D., Fischer, L., Orlowsky, B., García-Hernández, J., Jordan, F. et al. 2018. Searching for the optimal drought index and timescale combination to detect drought: a case study from the lower Jinsha River basin, China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(1): 889-910.
- Han, X., Li, Y., Yu, W. and Feng, L. 2022. Attribution of the Extreme Drought in the Horn of Africa during Short-Rains of 2016 and Long-Rains of 2017. *Water*, 14(3): 409.
- Hao, Z. and AghaKouchak, A. 2013. Multivariate standardized drought index: a parametric multi-index model. *Advances in Water Resources*, 57: 12-18.
- Hao, Y., Baik, J., Fred, S. and Choi, M. 2022. Comparative analysis of two drought indices in the calculation of drought recovery time and implications on drought assessment: East Africa's Lake Victoria Basin. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 36(7): 1943-1958.
- Hao, Z. and Singh, V.P. 2015. Drought characterization from a multivariate perspective: A review. *Journal of Hydrology*, 527: 668-678.
- Ho, S., Tian, L., Disse, M. and Tuo, Y. 2021. A new approach to quantify propagation time from meteorological to hydrological drought. *Journal of Hydrology*, 603: 127056.
- Jia, J. Y., Han, L. Y., Liu, Y. F., He, N., Zhang, Q., Wan, X. and Hu, J. M. 2016. Drought risk analysis of maize under climate change based on natural disaster system theory in Southwest China. *Acta Ecologica Sinica*, 36(5): 340-349.
- Kim, J. B., Habimana, J. D. D., Kim, S. H. and Bae, D. H. 2021. Assessment of Climate Change Impacts on the Hydroclimatic Response in Burundi Based on CMIP6 ESMs. *Sustainability*, 13(21): 12037.
- Kim, D., Lee, W.S., Kim, S.T. and Chun, J.A. 2019. Historical drought assessment over the contiguous United States using the generalized complementary principle of evapotranspiration. *Water Resources Research*, 55(7): 6244-6267.
- Kalisa, W., Zhang, J., Igbawua, T., Kayiranga, A., Ujoh, F., Aondoakaa, I. S. et al. 2021. Spatial Multi-Criterion Decision Making (SMDM) Drought Assessment and Sustainability over East Africa from 1982 to 2015. *Remote Sensing*, 13(24): 5067.
- Li, Z., Chen, Y., Fang, G. and Li, Y. 2017. Multivariate assessment and attribution of droughts in Central Asia. *Scientific Reports*, 7(1): 1-12.



- Li, J., Wang, Z., Wu, X., Chen, J., Guo, S. and Zhang, Z. 2020. A new framework for tracking flash drought events in space and time. *Catena*, 194:104763.
- Liu, C., Yang, C., Yang, Q. and Wang, J. 2021. Spatiotemporal drought analysis by the standardized precipitation index (SPI) and standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) in Sichuan Province, China. *Scientific Reports*, 11(1): 1-14.
- Lloyd-Hughes, B. 2012. A spatio-temporal structure-based approach to drought characterisation. *International Journal of Climatology*, 32(3):406-418.
- Lloyd-Hughes, B. 2014. The impracticality of a universal drought definition. *Theoretical and Applied Climatology*, 117(3): 607-611.
- Marengo, J. A., Cunha, A. P., Cuartas, L. A., Deusdará Leal, K. R., Broedel, E., Seluchi, M. E. et al. 2021. Extreme drought in the Brazilian Pantanal in 2019–2020: characterization, causes, and impacts. *Frontiers in Water*, 3: 639204.
- McKee, T. B., Doesken, N. J. and Kleist, J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, 17(22): 179-183.
- Mishra, A.K. and Singh, V.P. 2010. A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1–2): 202–216.
- Ndayiragije, J. M. and Li, F. 2022. Monitoring and analysis of drought characteristics based on climate change in Burundi using standardized precipitation evapotranspiration index. *Water*, 14(16): 2511.
- Nguvava, M., Abiodun, B. J. and Otieno, F. 2019. Projecting drought characteristics over East African basins at specific global warming levels. *Atmospheric Research*, 228: 41-54.
- Nkuzimana, A., Shuoben, B., Guojie, W., Alriah, M. A. A., Sarfo, I., Zhihui, X. et al. 2021. Assessment of drought events, their trend and teleconnection factors over Burundi, East Africa. *Theoretical and Applied Climatology*, 145(3): 1293-1316.
- Otkin, J. A., Svoboda, M., Hunt, E. D., Ford, T. W., Anderson, M. C., Hain, C. and Basara, J. B. 2018. Flash droughts: A review and assessment of the challenges imposed by rapid-onset droughts in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 99(5): 911-919.
- Pendergrass, A.G., Meehl, G.A., Pulwarty, R., Hobbins, M., Hoell, A., AghaKouchak, A., Bonfils, C.J., Gallant, A.J., Hoerling, M., Hoffmann, D. and Kaatz, L., 2020. Flash droughts present a new challenge for subseasonal-to-seasonal prediction. *Nature Climate Change*, 10(3): 191-199.
- Potopová, V., Štěpánek, P., Možný, M., Türkott, L. and Soukup, J. 2015. Performance of the standardised precipitation evapotranspiration index at various lags for agricultural drought risk assessment in the Czech Republic. *Agricultural and Forest Meteorology*, 202: 26-38.
- Rehana, S. and Naidu, G. S. 2021. Development of hydro-meteorological drought index under climate change–Semi-arid river basin of Peninsular India. *Journal of Hydrology*, 594: 125973.
- Samantaray, A. K., Ramadas, M. and Panda, R. K. 2022. Changes in drought characteristics based on rainfall pattern drought index and the CMIP6 multi-model ensemble. *Agricultural Water Management*, 266: 107568.
- Scott, R. L., Knowles, J. F., Nelson, J. A., Gentine, P., Li, X., Barron-Gafford, G. 2021. Water availability impacts on evapotranspiration partitioning. *Agricultural and Forest Meteorology*, 297: 108251.
- Sharafi, S., Ghaleni, M. M. and Sadeghi, S. 2022. Spatial and temporal analysis of drought in various climates across Iran using the Standardized Precipitation Index (SPI). *Arabian Journal of Geosciences*, 15(14): 1-14.
- Sharafi, S. and Mir Karim, N. 2020. Investigating trend changes of annual mean temperature and precipitation in Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 13(16): 1-11.
- Sharafi, S. and Mohammadi Ghaleni, M. 2021. Calibration of empirical equations for estimating reference evapotranspiration in different climates of Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 145(3): 925-939.
- Sharafi, S. and Mohammadi Ghaleni, M. 2022. Spatial assessment of drought features over different climates and seasons across Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 147(3–4): 941–957.



- Sharafi, S., Ramroudi, M., Nassiri, M., Galavi, M. and Kamali, G. 2016. Role of early warning systems for sustainable agriculture in Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(734): 1-17.
- Sheffield, J., Andreadis, K.M., Wood, E.F. and Lettenmaier, D.P. 2009. Global and continental drought in the second half of the twentieth century: Severity–area–duration analysis and temporal variability of large-scale events. *Journal of Climate*, 22(8):1962-1981.
- Sheffield, J., Wood, E. F. and Roderick, M. 2012. Little change in global drought over the past 60 years *Nature*.
- Shiru, M. S., Shahid, S., Alias, N. and Chung, E. S. 2018. Trend analysis of droughts during crop growing seasons of Nigeria. *Sustainability*, 10(3): 871.
- Shukla, S. and Wood, A.W. 2008. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. *Geophysical research letters*, 35(2): 1-7.
- Spinoni, J., Vogt, J. V., Naumann, G., Barbosa, P. and Dosio, A. 2018. Will drought events become more frequent and severe in Europe? *International Journal of Climatology*, 38(4): 1718–1736.
- Tabari, H., Nikbakht, J. and Talaei, P. H. 2013. Hydrological drought assessment in Northwestern Iran based on streamflow drought index (SDI). *Water resources management*, 27(1): 137-151.
- Tadese, M., Kumar, L. and Koech, R. 2020. Long-term variability in potential evapotranspiration, water availability and drought under climate change scenarios in the Awash River Basin, Ethiopia. *Atmosphere*, 11(9): 883.
- Taji, S. G. and Keskar, A. P. 2022. Drought identification and analysis of precipitation trends in Beed District, Maharashtra. *Materials Today: Proceedings*, 61: 332-341.
- Tijdeman, E. and Menzel, L. 2021. The development and persistence of soil moisture stress during drought across southwestern Germany. *Hydrology and Earth System Sciences*, 25(4): 2009-2025.
- Tirivarombo, S., Osupile, D. and Eliasson, P. 2018. Drought monitoring and analysis: standardised precipitation evapotranspiration index (SPEI) and standardised precipitation index (SPI). *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 106: 1-10.
- Tosunoğlu, F. and Onof, C. 2017. Joint modelling of drought characteristics derived from historical and synthetic rainfalls: Application of Generalized Linear Models and Copulas. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 14: 167-181.
- Van Loon, A. F. 2015. Hydrological drought explained. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2(4): 359-392.
- Van Loon, A. F., Van Huijgevoort, M. H. J. and Van Lanen, H. A. J. 2012. Evaluation of drought propagation in an ensemble mean of large-scale hydrological models. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(11): 4057-4078.
- Vélez-Nicolás, M., García-López, S., Ruiz-Ortiz, V., Zazo, S. and Molina, J. L. 2022. Precipitation Variability and Drought Assessment Using the SPI: Application to Long-Term Series in the Strait of Gibraltar Area. *Water*, 14(6): 884.
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S. and 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.
- Vicente-Serrano, S. M., Camarero, J. J., Olano, J. M., Martín-Hernández, N., Peña-Gallardo, M., Tomás-Burguera, M., Gazol, A., Azorin-Molina, C., Bhuyan, U. and El Kenawy, A. 2016. Diverse relationships between forest growth and the Normalized Difference Vegetation Index at a global scale. *Remote Sensing of Environment*, 187: 14–29.
- Vicente-Serrano, S.M., Miralles, D.G., Domínguez-Castro, F., Azorin-Molina, C., El Kenawy, A., McVicar, T.R., Tomás-Burguera, M., Beguería, S., Maneta, M. and Peña-Gallardo, M. 2018. Global assessment of the standardized evapotranspiration deficit index (SEDI) for drought analysis and monitoring. *Journal of Climate*, 31(14): 5371-5393.
- Wang, W., Ertsen, M.W., Svoboda, M.D. and Hafeez, M. 2016. Propagation of drought: from meteorological drought to agricultural and hydrological drought. *Advances in Meteorology*, 2016.
- Yahya, M. D., Yohanna, I., Auta, M. and Obayomi, K. S. 2020. Remediation of Pb (II) ions from Kagara gold mining effluent using cotton hull adsorbent. *Scientific African*, 8: e00399.
- Yevjevich, V.M. 1967. Objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic



- droughts, An (Doctoral dissertation, Colorado State University. Libraries).
- Yusa, A., Berry, P., Cheng, J. J., Ogden, N., Bonsal, B., Stewart, R. and Waldick, R. 2015. Climate change, drought and human health in Canada. *International journal of environmental research and public health*, 12(7): 8359-8412.
- Zhu, Y., Wang, W., Singh, V. P. and Liu, Y. 2016. Combined use of meteorological drought indices at multi-time scales for improving hydrological drought detection. *Science of the Total Environment*, 571: 1058-1068.