

Comparative Evaluation of Agricultural and Meteorological Droughts Based on Soil Moisture in the Karkheh River Basin Using SSMI, SMCI, SPI, and SPEI Indices

Vahid Kakapor¹, Maryam Bayati Khatibi², Amir Zarei³, Saeid Samadianfard³

1-Department of Remote Sensing and Geographical Information System, Faculty of Planning and Environment Science, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: v.kakapour@gmail.com

2-Corresponding Author, Department of Remote Sensing and Geographical Information System, Faculty of Planning and Environment Science, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: m_bayati@tabrizu.ac.ir

3- Department of Remote Sensing, University of Shahid Beheshti, Tehran, Iran. E-mail: amir69zarey@yahoo.com

4-Department of Water Science, Faculty of Agriculture, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

E-mail: s.samadian@tabrizu.ac.ir

Received: May 28, 2026

Revised: September 19, 2026

Accepted: September 20, 2026

Published: September 20, 2026

Extended Abstract

Background and Objectives

One of the issues considered in studying the impact of droughts on plants is the amount of changes in soil moisture. Field investigation of soil moisture over a large area is very difficult and in most cases impossible. For this reason, resorting to indices that can be used using remote sensing and whose results are also very reliable is very important. Soil moisture-based indices such as (SSMI) and (SMCI), which are produced using long-term satellite data such as ESA CCI and C3S Soil Moisture, directly monitor the status of water available to plants. Recent studies have shown that SSMI and SMCI are much more accurate in detecting earlier, longer duration, and more severe agricultural droughts in semi-arid and mountainous regions than purely climatic. On the other hand, the SPI and SPEI indices-calculated based on precipitation and potential evapotranspiration-have been accepted as global indices for meteorological drought monitoring. However, there is evidence that in areas with complex topography, heavy soil texture, and dense vegetation, these indices may underestimate the true severity of moisture stress and not accurately reflect the transition of drought from the meteorological to the agricultural stage. Studies conducted in parts of the world show that soil moisture behaves differently in different topographies.

Materials and Methods

In this study, soil moisture was extracted from soil moisture data in the Karkheh basin using the monthly combined product (COMBINED) of the C3S Soil Moisture dataset, version v202312 (C3S, 2023). This dataset is a continuation and updated version of the famous ESA CCI Soil Moisture product and was produced by merging data from active and passive microwave sensors over more than 45 years; a process that is documented in the European Space Agency technical report (ESA, 2018). The aforementioned combined data are obtained from the integration of active sensors such as ASCAT on Met Op-A/B/C) and passive sensors SSM/I, SSMIS, TMI, AMSR-E, AMSR2, SMOS, SMAP, etc.; An approach that is scientifically supported by research related to the fusion of active-passive microwave data (Liu et al., 2012). In this study, the C3S-SOILMOISTURE-L3S-SSMV-COMBINED-MONTHLY product was used with a spatial resolution of 0.25 (about 25 km) and a time period from January 2001 to December 2022 (264 consecutive months). This long time period is in a high overlap period between active and passive sensors and has very high stability and accuracy, an issue that has also been confirmed in studies evaluating the performance of satellite soil moisture data. In this study, only 6- and 12-month scales were used for the calculation. The probability distribution function selected for SSMI was the log-logistic distribution, which, according to the findings of Oertel et al. (2018), provides the best fit for soil moisture time series. The SSMI index was extracted by standardizing soil moisture data to calculate the Standardized Precipitation Index (SPI), and time series such as monthly precipitation or soil moisture data were compiled over a specific time period, and the appropriate probability distribution function was fitted to the first-stage data to determine aggregation periods such as 3, 6, or 12 months.

Results

The difference between the SSMI-12 and SMCI results in the duration and severity indices is likely due to the relatively small spatial resolution of the Karkheh basin, as finer spatial resolution can smooth out local variations and increase the possibility of detecting spatial patterns. In most counties, the SSMI-6 index (short duration) shows higher values than the SSMI-12, indicating the dominance of short-term and sporadic events. Although in some cases (4 counties out of 36 counties) the SSMI-12 shows a longer duration. Some counties, such as Harsin and Ahvaz, show long-term and severe droughts, while most counties, such as Sahneh, Khorramabad, Kamyaran, and Delfan etc., are affected by short-term and severe droughts. This pattern shows that short-term, severe events dominate the region, but in some places, long-term droughts are also very critical. While the maximum SMCI intensity in Brazil was reported to be around 4000, in the south of the Karkheh basin this value has reached more than 6300- about 60 percent more intense and over a much larger area. The SSMI-12 intensity has also exceeded 240 units in several counties of the Karkheh basin, which is almost twice the maximum value reported in Brazil.

Conclusion

The SSMI and SMCI indices revealed more complex spatial and temporal patterns, and in many places, the severity and duration of droughts recorded by them were much greater than those recorded by meteorological indices. The north-south gradient of the Karkheh basin, which extends from the high and semi-humid regions of the Zagros to the warm plains of Khuzestan, was the most important spatial pattern observed, highlighting the determining role of topography, soil texture, and vegetation. The analysis of duration, intensity, and severity showed that short-term and severe events dominate in large parts of the basin, while the south of the basin experiences long-term and extremely severe droughts. Comparison with similar regions such as northeastern Brazil also showed that the drought intensity in Karkheh was significantly more severe and widespread. Correlation analysis indicated that SPI and SPEI produce a nearly similar signal, but the association of SSMI with these indices is highly variable and dependent on local conditions. High correlations in the southern plains indicate a direct control of precipitation and evapotranspiration on soil moisture, while very weak correlations in the Zagros highlands indicate that soil moisture in these regions behaves more independently and is influenced by physiographic features. While very weak correlations in the Zagros highlands indicate that soil moisture in these areas behaves more independently and is influenced by physiographic features.

Keywords: Drought stress, Evapotranspiration, Remote sensing, Soil water, Zonation.

Author Contributions

Conceptualization, V.K., M.B.K., A.Z. and S.S.; methodology, V.K., M.B.K., A.Z. and S.S.; software, V.K., M.B.K., A.Z. and S.S.; validation, V.K., M.B.K. and S.S.; formal analysis, V.K., M.B.K., A.Z. and S.S.; investigation, V.K., M.B.K. and S.S.; resources, V.K. and M.B.K.; data curation, V.K., M.B.K. and S.S.; writing-original draft preparation, V.K. and M.B.K.; writing-review and editing, V.K., M.B.K., A.Z. and S.S. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript. The authors have collectively contributed to the research, preparation, and submission of this article.

Acknowledgements

We are very grateful to those who provided data for this research.

Data Availability Statement

Data is available on reasonable request from the authors.

Ethical considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, plagiarism, and misconduct.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Cite this article: Kakapor, V., Bayati Khatibi, M., Zarei, A. & Samadianfard, S. (2026). Comparative evaluation of agricultural and meteorological droughts based on soil moisture in the Karkheh river basin using SSMI, SMCI, SPI, and SPEI indices. *Journal of Soil and Plant Science*, 36(3): 97-118.

<https://doi.org/10.22034/sps.2026.72670.1042>

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.



Copyright © 2026 The Authors.
Publisher: The University of Tabriz





مقاله پژوهشی

ارزیابی تطبیقی خشکسالی کشاورزی و هواشناسی مبتنی بر رطوبت خاک در حوضه آبریز رودخانه کرخه با استفاده از شاخص‌های SPI، SMI، SSCI و SPEI

وحید کاکاپور^۱، مریم بیاتی خطیبی^۲✉، امیر زارعی^۳، سعید صمدیان فرد^۴

۱- گروه سنجش از دور، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: v.kakapour@gmail.com

۲- نویسنده مسئول، گروه سنجش از دور، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

رایانامه: m_bayati@tabrizu.ac.ir

۳- گروه سنجش از دور، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: amir69zarey@yahoo.com

۴- گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: s.samadian@tabrizu.ac.ir

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۶/۲۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۰۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۶/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۲۹

چکیده

خشکسالی کشاورزی به دلیل وابستگی شدید به رطوبت خاک، رفتاری متفاوت از خشکسالی هواشناسی دارد و پایش دقیق آن برای مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی کشاورزی ضروری است. در این پژوهش، با استفاده از داده‌های رطوبت خاک ماهانه مجموعه داده رطوبت خاک نسخه ۷202312 و شاخص‌های استاندارد شده رطوبت خاک و وضعیت خاک، الگوهای زمانی-مکانی خشکسالی کشاورزی در حوضه آبریز کرخه طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۲ تحلیل شد. همچنین شاخص‌های استاندارد بارش تبخیر و تعرق ۱۲ ماهه و شاخص استاندارد بارش ۱۲ ماهه، بر اساس داده‌های ۲۰ ایستگاه هواشناسی محاسبه و روابط میان خشکسالی هواشناسی و خشکسالی کشاورزی با استفاده از همبستگی پیرسون و اسپیرمن ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که شدت و مدت خشکسالی‌های مبتنی بر رطوبت خاک به طور قابل توجهی بزرگتر از شاخص‌های هواشناسی است و گرایان مکانی شمال-جنوب بسیار مشخصی در حوضه وجود دارد؛ به‌طوری که مناطق مرتفع زاگرس خشکسالی‌های زود هنگام و شدیدتر و دشت‌های جنوبی واکنش همگام‌تری با شاخص‌های استاندارد بارش تبخیر و تعرق ۱۲ ماهه و شاخص استاندارد بارش نشان می‌دهند. دامنه همبستگی شاخص‌های استاندارد شده رطوبت خاک با شاخص‌های خشکسالی بسیار گسترده بوده (از منفی تا بیش از ۰.۷)، که این امر نشان‌دهنده نقش قوی ویژگی‌های محلی مانند بافت خاک، شیب و نفوذپذیری بر در دسترس بودن رطوبت است. رابطه بین شاخص‌های استاندارد شده رطوبت خاک ۱۲ ماهه و شاخص‌های هواشناسی در سطح حوضه متغیر بوده و در برخی مناطق کم ارتفاع مانند شوش و اهواز، ضرایب همبستگی بالاتری را نشان می‌دهد و تغییرات رطوبت خاک ارتباط بیشتری با تغییرات بارش و تبخیر-تعرق دارد. تحلیل سری‌های زمانی نیز نشان داد که شاخص‌های استاندارد شده رطوبت خاک ۱۲ ماهه در بسیاری از ایستگاه‌های کوهستانی مقادیر شدید و طولانی‌مدت‌تری نسبت به شاخص استاندارد بارش / شاخص استاندارد بارش تبخیر و تعرق کرده‌اند.

واژه‌های کلیدی: آب خاک، پهنه‌بندی، تبخیر-تعرق، تنش خشکی، سنجش از دور.

استناد به این مقاله: کاکاپور، و.، بیاتی خطیبی، م.، زارعی، ا. و صمدیان، س. (۱۴۰۵). ارزیابی تطبیقی خشکسالی کشاورزی و هواشناسی مبتنی بر رطوبت خاک در حوضه آبریز رودخانه کرخه با استفاده از شاخص‌های SPI، SMI، SSCI و SPEI. نشریه دانش خاک و گیاه، ۳۶(۳)، ۹۷-۱۱۸.

<https://doi.org/10.22034/sps.2026.72670.1042>

مقدمه

خشکسالی هواشناسی و خشکسالی کشاورزی دو پدیده مجزا اما مرتبطند که به دلیل تفاوت در مکانیسم‌های شکل‌گیری، مدت و پیامدها، رفتارهای متفاوتی دارند. خشکسالی هواشناسی عمدتاً ناشی از کاهش بارش و افزایش تقاضای تبخیری جو است، در حالی که خشکسالی کشاورزی به طور مستقیم با کاهش رطوبت قابل دسترس خاک برای ریشه گیاهان ارتباط دارد. از این رو، خشکسالی کشاورزی می‌تواند حتی در سال‌هایی با بارش نرمال یا بالاتر از نرمال نیز رخ دهد؛ به ویژه در مناطقی با ویژگی‌های خاص خاک، شیب زیاد، شرایط توپوگرافی پیچیده و محدودیت‌های نگهداشت آب در خاک (Furtak & Wolińska, 2025; Kulkarni et al., 2025; Mishra & Singh, 2025). شاخص‌های مبتنی بر رطوبت خاک، مانند شاخص استاندارد شده رطوبت خاک (SSMI) و شاخص وضعیت رطوبت خاک^۲ (SMCI)، با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای بلندمدت نظیر رطوبت خاک^۳، C3S، ESA^۴ توسعه یافته‌اند و به طور مستقیم تغییرات آب قابل دسترس برای گیاه را پیش می‌کنند. برخلاف شاخص‌های اقلیمی که عمدتاً بر تغییرات بارش و دما متکی هستند، این شاخص‌ها پاسخ واقعی‌تر سیستم خاک-گیاه به کمبود آب را نشان می‌دهند. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که شاخص استاندارد شده رطوبت خاک (SSMI) و شاخص وضعیت خاک (SMCI) توانایی بالایی در شناسایی زودهنگام، تداوم طولانی‌تر و شدت بیشتر رخداد های خشکسالی کشاورزی، به ویژه در مناطق نیمه خشک و نواحی دارای شرایط توپوگرافی پیچیده، دارند و در بسیاری از موارد عملکرد بهتری نسبت به شاخص‌های صرفاً اقلیمی ارائه می‌دهند (Das et al., 2024; Alito et al., 2025; Zhang et al., 2025). از سوی دیگر، شاخص‌های شاخص استاندارد بارش^۵ (SPI) و شاخص استاندارد بارش-تبخیرتغرق (SPEI) که بر پایه تغییرات بارش و تبخیر-تغرق بالقوه محاسبه می‌شوند، از مهم‌ترین و پرکاربردترین شاخص‌های مورد استفاده برای پیش خشکسالی هواشناسی در مقیاس‌های مختلف زمانی و مکانی به شمار می‌روند. SPI با استاندارد سازی بارش در مقیاس‌های زمانی مختلف، امکان شناسایی شدت و تداوم خشکسالی هواشناسی را فراهم می‌کند (McKee et al., 1993; Vicente-Serrano et al., 2010; Gümüş, 2023). در حالی که SPEI با در نظر گرفتن هم‌زمان اثرات بارش و تقاضای تبخیری جو، حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات دما و گرمایش اقلیمی دارد (Vicente-Serrano et al., 2014; McKee et al., 2014).

با وجود کاربرد گسترده شاخص‌های استاندارد شده بارش و شاخص‌های استاندارد بارش و تبخیر و تغرق (SPEI و SPI)، مطالعات اخیر نشان داده‌اند که این شاخص‌ها به دلیل ماهیت اقلیمی خود، در برخی مناطق با شرایط پیچیده محیطی، مانند نواحی دارای توپوگرافی ناهموار، خاک‌های با ظرفیت نگهداری آب بالا و پوشش گیاهی متراکم، ممکن است نتوانند تغییرات واقعی رطوبت قابل دسترس خاک و شدت تنش آبی وارد شده به پوشش گیاهی را به طور کامل باز نمایند کنند. همچنین، در چنین شرایطی، انتقال خشکسالی از مرحله هواشناسی به مرحله کشاورزی ممکن است با تأخیر زمانی یا عدم قطعیت همراه باشد؛ زیرا پاسخ رطوبت خاک و گیاه به کمبود بارش تنها تابع شرایط اقلیمی نبوده و تحت تأثیر ویژگی‌های خاک، توپوگرافی و خصوصیات سطح زمین نیز قرار دارد (Hakam et al., 2023; Senapati et al., 2025). حوضه آبریز کرخه با مساحتی در حدود ۵۰ هزار کیلومتر مربع یکی از مهم‌ترین

¹ Standardized Soil Moisture Index

² Soil Moisture Condition Index

³ ESA CCI Soil Moisture

⁴ C3S Soil Moisture

⁵ Standardized Precipitation Index

⁶ Standardized Precipitation Evapotranspiration Index

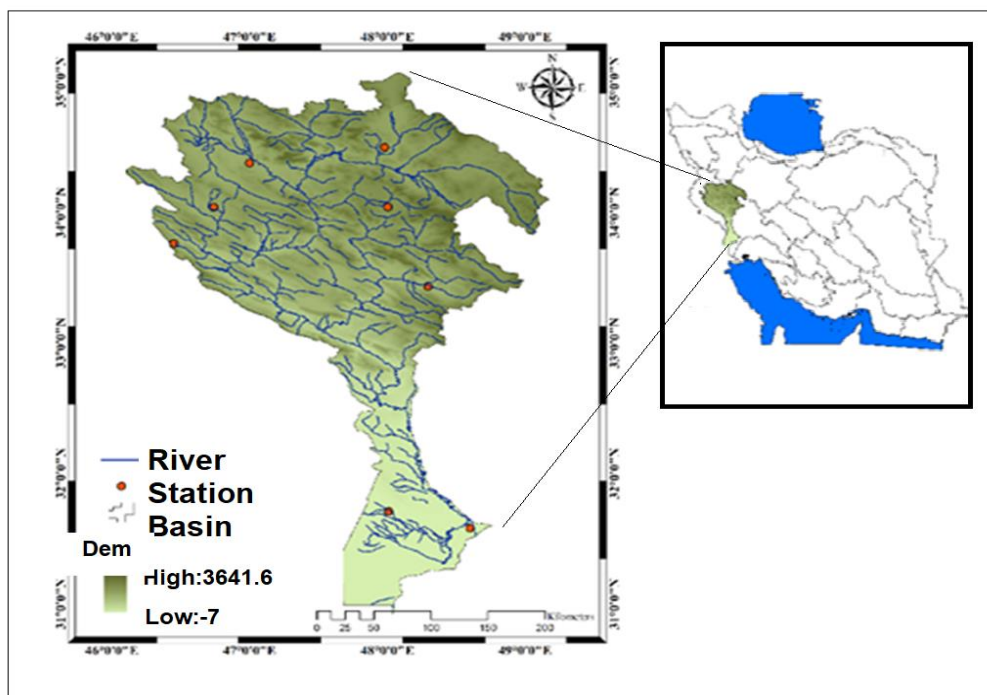
حوضه‌های نیمه‌خشک ایران است که از ارتفاعات زاگرس تا دشت‌های جنوبی امتداد دارد. پژوهش‌های پیشین (Kamali et al., 2017) درباره خشکسالی با روش‌های مبتنی بر ترکیب شاخص‌های اقلیمی، هیدرولوژیکی در این حوضه نشان می‌دهد که در اثر کمبود رطوبت در بخش جنوبی حوضه، این بخش نسبت به وقوع خشکسالی کشاورزی حساس‌تر است و مدت خشکسالی کشاورزی نسبت به خشکسالی هیدرولوژیکی طولانی‌تر است. Parvizi et al. (2022) با بررسی خشکسالی‌های اقلیمی، هیدرولوژیکی و کشاورزی با استفاده از شاخص‌های SPI، SEI، SRI و SSI نشان دادند که خشکسالی هیدرولوژیکی معمولاً با یک تأخیر زمانی کوتاه پس از وقوع خشکسالی اقلیمی ظاهر می‌شود، در حالی که خشکسالی کشاورزی مبتنی بر رطوبت خاک (SSI) در بسیاری از موارد رفتار متفاوت‌تری داشته و ارتباط آن با خشکسالی اقلیمی کمتر مستقیم است. همچنین، Kamali et al. (2017) با بررسی اثرات تغییر اقلیم بر خشکسالی نشان دادند که تحت سناریوهای اقلیمی خشک‌تر، احتمال وقوع خشکسالی‌های شدید کشاورزی و هیدرولوژیکی افزایش می‌یابد، در حالی که شاخص‌های صرفاً مبتنی بر بارش مانند SPI ممکن است روند متفاوتی از تغییرات خشکسالی را نشان دهند. علاوه بر این، Zandifar et al. (2021) با تحلیل روند تغییرات منابع آب زیرزمینی در حوضه کرخه نشان دادند که کاهش سطح آب زیرزمینی علاوه بر ارتباط با خشکسالی‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی، تحت تأثیر برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی نیز قرار دارد؛ بنابراین، عوامل انسانی می‌توانند نقش مهمی در تشدید و تداوم خشکسالی هیدرولوژیکی ایفا کنند. با وجود مطالعات انجام‌شده در زمینه ارزیابی خشکسالی با استفاده از شاخص‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی، تاکنون مطالعه‌ای در منطقه مورد بررسی، شاخص‌های مبتنی بر رطوبت خاک شامل شاخص استاندارد شده رطوبت خاک (SSMI) و شاخص وضعیت رطوبت خاک (SMCI) با استفاده از مجموعه داده‌های ماهانه C3S Soil Moisture v202312 در یک دوره بلندمدت (۲۰۲۲-۲۰۰۱) محاسبه نشده است و ارتباط آن‌ها به‌صورت جامع با شاخص‌های خشکسالی هواشناسی SPI و SPEI مورد ارزیابی قرار نگرفته است. در همین راستا و در مطالعات بین‌المللی انجام‌شده در حوضه‌هایی از هند، اسیوپ، شمال آفریقا، ترکیه و برزیل نیز مشخص شده است که رطوبت خاک، به‌ویژه در مناطق کوهستانی و نیمه‌مرطوب، همواره پاسخ مستقیم و هم‌زمانی به تغییرات بارش و تبخیر-تعرق نشان نمی‌دهد و می‌تواند رفتار مستقلی نسبت به شاخص‌های اقلیمی داشته باشد. همچنین، نتایج این پژوهش‌ها نشان داده‌اند که شاخص‌های مبتنی بر رطوبت خاک در بسیاری از موارد توانایی شناسایی زودهنگام‌تر خشکسالی کشاورزی را داشته و می‌توانند تفاوت‌های موجود در شدت و تداوم خشکسالی را بهتر از شاخص‌های صرفاً اقلیمی آشکار کنند (Das et al., 2024; Hakam, et al., 2024; Senapati et al., 2025; Zhang et al., 2025).

با توجه به خلأ پژوهشی موجود و اهمیت راهبردی حوضه کرخه در تأمین امنیت غذایی جنوب‌غرب ایران، هدف اصلی این مطالعه، ارزیابی مقایسه‌ای الگوهای مکانی-زمانی، مدت‌زمان، شدت، شدت خشکسالی و بزرگی رخداد‌های خشکسالی کشاورزی بر اساس شاخص‌های مبتنی بر رطوبت خاک شامل SSMI-6، SSMI-12 و SSMCI و مقایسه آن‌ها با خشکسالی هواشناسی بر پایه شاخص‌های SPI-12 و SPEI-12 طی یک دوره ۲۲ ساله (ژانویه ۲۰۰۱ تا دسامبر ۲۰۲۲) است. همچنین، در این پژوهش نقش عوامل محیطی مؤثر شامل توپوگرافی، شیب، ویژگی‌های بافت خاک، پوشش گیاهی و خصوصیات نفوذپذیری سطح زمین در ایجاد تفاوت‌های مکانی و زمانی رفتار خشکسالی بررسی می‌شود. نتایج این مطالعه می‌تواند درک دقیق‌تری از ارتباط بین خشکسالی هواشناسی و پاسخ رطوبت خاک فراهم کرده و شواهد علمی لازم را برای توسعه سامانه‌های پایش و هشدار زودهنگام خشکسالی کشاورزی مبتنی بر ترکیب شاخص‌های اقلیمی و خاکی در حوضه‌های ناهمگن مانند کرخه ارائه دهد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

حوضه کرخه، یکی از بزرگ‌ترین و مهم‌ترین حوضه‌های رودخانه‌ای در غرب ایران، با مساحتی حدود ۵۱ هزار کیلومتر مربع، بخش‌هایی از استان‌های کرمانشاه، لرستان، ایلام، همدان و خوزستان را دربر می‌گیرد. تنوع زیاد شرایط طبیعی در این حوضه، آن را به منطقه‌ای مناسب برای بررسی رفتار مکانی-زمانی خشکسالی تبدیل کرده است. از نظر توپوگرافی، حوضه کرخه دارای تغییرات ارتفاعی قابل توجهی است؛ به گونه‌ای که مناطق مرتفع و کوهستانی زاگرس در بخش‌های شمالی و شمال غربی با ارتفاع بیش از ۱۵۰۰ متر، به تدریج به دشت‌های کم‌ارتفاع خوزستان در بخش جنوبی با ارتفاع کمتر از ۱۰۰ متر منتهی می‌شوند (شکل ۱). حوضه کرخه، یکی از بزرگ‌ترین و مهم‌ترین حوضه‌های رودخانه‌ای در غرب ایران، با مساحتی حدود ۵۱ هزار کیلومتر مربع، بخش‌هایی از استان‌های کرمانشاه، لرستان، ایلام، همدان و خوزستان را دربر می‌گیرد. تنوع زیاد شرایط طبیعی در این حوضه، آن را به منطقه‌ای مناسب برای بررسی رفتار مکانی-زمانی خشکسالی تبدیل کرده است. از نظر توپوگرافی، حوضه کرخه دارای تغییرات ارتفاعی قابل توجهی است؛ به گونه‌ای که مناطق مرتفع و کوهستانی زاگرس در بخش‌های شمالی و شمال غربی با ارتفاع بیش از ۱۵۰۰ متر، به تدریج به دشت‌های کم‌ارتفاع خوزستان در بخش جنوبی با ارتفاع کمتر از ۱۰۰ متر منتهی می‌شوند (شکل ۱).



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی حوضه کرخه.

Figure 1- Geographical location of the Karkheh Basin.

این اختلاف شدید ارتفاعی سبب ایجاد گرادیان‌های مشخص اقلیمی، هیدرولوژیکی و محیطی در سطح حوضه شده و موجب تفاوت در الگوی بارش، دما، تبخیر-تعرق، ویژگی‌های خاک و شرایط رطوبتی سطح زمین می‌شود. چنین ناهمگنی‌هایی می‌تواند

بر نحوه شکل‌گیری، تداوم و شدت خشکسالی کشاورزی در بخش‌های مختلف حوزه اثرگذار باشد. از نظر اقلیمی نیز حوزه کرخه دارای تنوع قابل توجهی است؛ به‌طوری که مناطق کوهستانی شمالی دارای اقلیم سرد نیمه‌مرطوب با بارش بیشتر و دمای پایین‌تر هستند، در حالی که نواحی جنوبی و دشت‌های خوزستان دارای شرایط گرم نیمه‌خشک تا خشک، بارش کمتر و دمای تابستانی بالا هستند. بخش عمده بارش سالانه حوزه در فصل سرد (نوامبر تا آوریل) رخ می‌دهد، در حالی که فصل تابستان معمولاً با کمبود بارش، افزایش دما و شدت بالای تبخیر-تعرق همراه است. ترکیب این تغییرات توپوگرافی و اقلیمی، حوزه کرخه را نسبت به تغییرات اقلیمی و نوسانات منابع آب حساس کرده و ضرورت استفاده از روش‌های دقیق پایش و ارزیابی خشکسالی را در این منطقه افزایش می‌دهد. در این پژوهش، ایستگاه‌های هواشناسی منتخب به‌گونه‌ای انتخاب شدند که دامنه کامل تغییرات ارتفاعی و اقلیمی حوزه را پوشش دهند. روند کلی مراحل انجام پژوهش شامل آماده‌سازی داده‌ها، محاسبه شاخص‌های خشکسالی کشاورزی SSMI و SMCI، محاسبه شاخص‌های خشکسالی هواشناسی SPI و SPEI استخراج ویژگی‌های رخدادهای خشکسالی و تحلیل روابط بین شاخص‌ها در شکل ۲ به‌صورت فلوچارت ارائه شده است. این چارچوب روش‌شناختی امکان بررسی جامع تفاوت‌های مکانی-زمانی خشکسالی کشاورزی و هواشناسی و ارزیابی نقش عوامل محیطی مؤثر بر رفتار خشکسالی در حوزه کرخه را فراهم می‌کند.

داده‌ها و روش بررسی

در این پژوهش، داده‌های مورد نیاز شامل داده‌های رطوبت خاک، بارش ماهانه و داده‌های دمایی برای محاسبه تبخیر-تعرق پتانسیل (PET) برای دوره زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۲ جمع‌آوری و آماده‌سازی شدند. داده‌های رطوبت خاک به‌عنوان یکی از مهم‌ترین متغیرهای مؤثر بر خشکسالی کشاورزی، از مجموعه داده‌های ماهانه ترکیبی COMBINED مجموعه‌داده C3S Soil Moisture نسخه 202312 استخراج شد (C3S, 2023). این مجموعه داده‌های، نسخه به‌روزشده مجموعه‌داده ESA CCI Soil Moisture بوده و با بهره‌گیری از ادغام مشاهدات حسگرهای میکروویو فعال و غیرفعال، یک سری زمانی بلندمدت و پیوسته از رطوبت خاک را فراهم می‌کند. این مجموعه داده حاصل ترکیب اطلاعات حسگرهای فعال شامل ASCAT نصب شده بر ماهواره‌های MetOp-A/B/C و حسگرهای غیرفعال شامل SSM/I، TMI، AMSR-E، AMSR2، SMOS و SMAP است که با هدف افزایش پوشش زمانی و بهبود پایداری برآوردهای رطوبت خاک تولید شده است (Liu et al., 2012; ESA, 2018) در این مطالعه، مجموعه داده‌های C3S-SOILMOISTURE-L3S-SSMV-COMBINED-MONTHLY با تفکیک مکانی ۰.۲۵ درجه (حدود ۲۵ کیلومتر) مورد استفاده قرار گرفت (جدول ۱).

دوره زمانی داده‌های رطوبت خاک از ژانویه ۲۰۰۱ تا دسامبر ۲۰۲۲ انتخاب شد که شامل ۲۶۴ ماه متوالی است. این دوره زمانی به دلیل همپوشانی مناسب داده‌های حاصل از حسگرهای فعال و غیرفعال، از پایداری زمانی و قابلیت اطمینان بالایی برخوردار بوده و در مطالعات ارزیابی مجموعه داده‌های ماهواره‌ای رطوبت خاک نیز عملکرد مناسب آن تأیید شده است (Paredes-Trejo & Barbosa, 2017; Inocencio et al., 2020). پس از دریافت داده‌های رطوبت خاک، عملیات پیش‌پردازش شامل استخراج محدوده مورد مطالعه، کنترل کیفیت داده‌ها، بررسی مقادیر مفقود و ناسازگاری‌های زمانی انجام شد. سپس سری زمانی ماهانه رطوبت خاک برای هر پیکسل در محدوده مطالعه استخراج و به‌عنوان ورودی محاسبه شاخص‌های خشکسالی کشاورزی شامل SSMI-6، SSMI-12 و SMCI مورد استفاده قرار گرفت. همچنین، داده‌های بارش ماهانه حاصل از ۲۰ ایستگاه هواشناسی منطقه برای محاسبه شاخص‌های خشکسالی هواشناسی SPI-12 و SPEI-12 آماده‌سازی شد. داده‌های دمایی نیز برای محاسبه تبخیر-تعرق پتانسیل (PET) و ایجاد شاخص SPEI مورد استفاده قرار گرفتند. تمامی متغیرها پس از کنترل کیفیت و هماهنگ‌سازی زمانی، در مقیاس ماهانه و برای دوره مشترک ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۲ سازمان‌دهی شدند تا مبنای تحلیل‌های بعدی قرار گیرند.

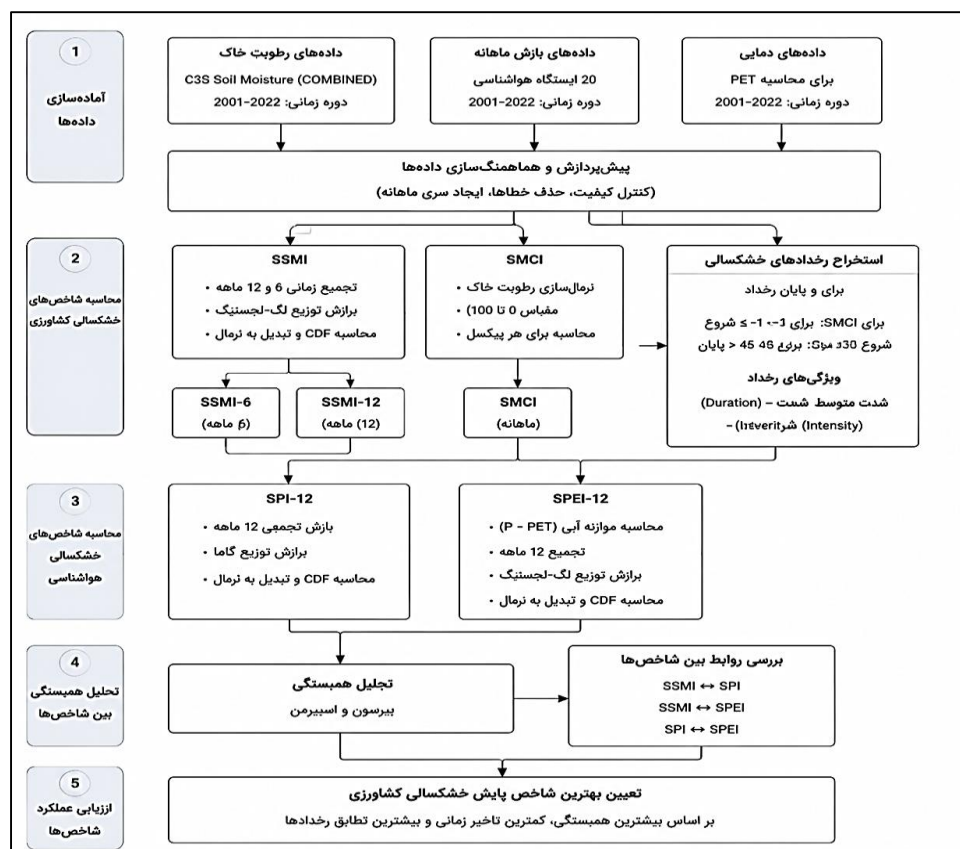
شاخص استاندارد شده رطوبت خاک (SSMI) برای ارزیابی ناهنجاری‌های رطوبتی خاک و تعیین وضعیت خشکی یا رطوبت نسبت به شرایط نرمال بلندمدت محاسبه شد. این شاخص بر پایه روش استاندارد سازی ارائه شده توسط McKee

et al., 1993 برای شاخص بارش استاندارد شده (SPI) توسعه یافته است. در این روش، مقادیر خام رطوبت خاک با برازش یک تابع توزیع احتمالی و تبدیل احتمال تجمعی به مقادیر نرمال استاندارد، به یک مقیاس بدون بُعد تبدیل می‌شوند. این استانداردسازی امکان مقایسه شدت و تداوم شرایط خشک و مرطوب را در دوره‌های زمانی مختلف فراهم می‌کند. برای محاسبه SSMI، ابتدا سری زمانی ماهانه رطوبت خاک حاصل از مجموعه داده‌های C3S Soil Moisture برای هر پیکسل به صورت مستقل استخراج شد. سپس به منظور بررسی اثر مقیاس زمانی بر پاسخ رطوبت خاک به خشکسالی، سری‌های زمانی رطوبت خاک در مقیاس‌های زمانی مختلف تجمیع شدند. در این پژوهش، دو مقیاس زمانی 6 ماهه (SSMI-6) و 12 ماهه (SSMI-12) مورد استفاده قرار گرفتند. این مقیاس‌های زمانی به ترتیب بیانگر شرایط میان مدت و بلندمدت رطوبتی خاک بوده و امکان بررسی پاسخ تأخیری رطوبت خاک نسبت به تغییرات اقلیمی را فراهم می‌کنند.

جدول ۱- مشخصات داده‌های ورودی مورد استفاده برای محاسبه شاخص‌های خشکسالی کشاورزی و هواشناسی.

Table 1 – Specifications of input data used for calculating agricultural and meteorological drought indices.

کاربرد	تفکیک مکانی	تفکیک زمانی	منبع	داده
SSMI/SMCI	۰.۲۵ درجه	ماهانه	C3S v202312	رطوبت خاک
SPI	نقطه ای	ماهانه	ایستگاه‌ها	بارش
SPEI	نقطه ای	ماهانه	ایستگاه‌ها	دما



شکل ۲-فلوچارت مراحل انجام پژوهش شامل آماده‌سازی داده‌ها، محاسبه شاخص‌های خشکسالی کشاورزی و

هواشناسی و تحلیل روابط بین شاخص‌ها.

Figure 2 – Flowchart of the research process, including data preparation, calculation of agricultural and meteorological drought indices, and analysis of the relationships between the indices.

پس از تشکیل سری‌های زمانی تجمیع‌شده رطوبت خاک در مقیاس‌های زمانی ۶ و ۱۲ ماهه، تابع توزیع احتمالی مناسب بر داده‌ها برازش داده شد. با توجه به ماهیت غیرنرمال سری‌های زمانی رطوبت خاک و نتایج مطالعات پیشین، به‌ویژه Oertel et al. (2018) توزیع لگ-جستیک^۱ به‌عنوان تابع توزیع مناسب برای توصیف رفتار آماری داده‌های رطوبت خاک انتخاب شد. این توزیع به دلیل توانایی مناسب در مدل‌سازی داده‌های دارای چولگی و انعطاف‌پذیری بالا در نمایش متغیرهای هیدروکلیماتیک، در محاسبه شاخص‌های خشکسالی مورد استفاده قرار می‌گیرد. پس از برازش توزیع لگ-جستیک، احتمال تجمعی هر مقدار رطوبت خاک محاسبه شده و سپس این مقادیر با استفاده از تابع معکوس توزیع نرمال استاندارد به مقادیر SSMI تبدیل شدند.

$$SSMI = \Phi^{-1}(F(x)) \quad (۱)$$

که در آن $F(x)$: تابع توزیع تجمعی لگ-جستیک برای مقدار رطوبت خاک x است؛ Φ^{-1} : تابع معکوس توزیع نرمال استاندارد است. بر اساس این استانداردسازی، مقدار میانگین شاخص برابر صفر و انحراف معیار آن برابر یک خواهد بود. مقادیر منفی SSMI نشان‌دهنده کاهش رطوبت خاک نسبت به شرایط معمول بلندمدت و بیانگر وقوع شرایط خشکسالی کشاورزی هستند. هرچه مقدار شاخص منفی‌تر باشد، شدت کمبود رطوبت خاک بیشتر است. در مقابل، مقادیر مثبت SSMI بیانگر شرایط مرطوب‌تر از میانگین بلندمدت بوده و مقادیر بزرگ‌تر نشان‌دهنده افزایش غیرمعمول رطوبت خاک هستند. در این مطالعه، محاسبه SSMI به‌صورت ماهانه و برای تمام پیکسل‌های محدوده مورد مطالعه طی دوره ژانویه ۲۰۰۱ تا دسامبر ۲۰۲۲ انجام شد و نتایج حاصل به‌عنوان یکی از شاخص‌های اصلی ارزیابی خشکسالی کشاورزی در مراحل بعدی تحلیل مورد استفاده قرار گرفت. لازم به ذکر است که مقادیر حاصل از استانداردسازی SSMI، مشابه سایر شاخص‌های استانداردشده خشکسالی مانند SPI و SPEI، دارای میانگین صفر و انحراف معیار یک بوده و معمولاً در محدوده حدود ۴- تا ۴+ قرار می‌گیرند. بنابراین، مقادیر مستقیم SSMI نباید با مقادیر بزرگ‌تر مشاهده‌شده در تحلیل‌های بعدی مانند Severity و Intensity مقایسه شوند. در این پژوهش، مقادیر بزرگ‌تر ارائه‌شده در نقشه‌ها مربوط به ویژگی‌های تجمعی رخدادهای خشکسالی استخراج‌شده از سری زمانی SSMI و SMCI طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۲ هستند، نه مقدار خود شاخص استانداردشده. به عبارت دیگر، پس از شناسایی رخدادهای خشکسالی بر اساس آستانه $SSMI \leq -1$ و $SMCI \leq 30$ ، ویژگی‌هایی مانند مدت‌زمان، شدت تجمعی و شدت متوسط برای کل دوره مطالعه محاسبه شدند. از آنجا که Severity برابر با مجموع کمبود رطوبت در تمام ماه‌های یک رخداد و سپس مجموع رخدادهای ثبت‌شده طی دوره مطالعه است، مقدار آن می‌تواند مقادیر بزرگ‌تری نسبت به دامنه شاخص استانداردشده داشته باشد. این مقادیر بیانگر شدت انباشته و تداوم خشکسالی در طول دوره ۲۲ ساله هستند و نشان‌دهنده مقدار مستقیم SSMI نیستند. برای ارزیابی وضعیت نسبی رطوبت خاک و شناسایی شرایط خشک و مرطوب در مقیاس محلی، شاخص وضعیت رطوبت خاک (SMCI) محاسبه شد. این شاخص بر اساس رویکرد ارائه‌شده توسط گوگان (Gogan, 2002) برای شاخص وضعیت پوشش گیاهی^۲ (VCI) توسعه یافته و بعدها توسط زانگ و جیا (Zhang and Jia, 2013) برای پایش تغییرات وضعیت رطوبتی خاک مورد استفاده قرار گرفت. در این شاخص، مقادیر رطوبت خاک هر پیکسل به‌صورت مستقل و با استفاده از حداقل و حداکثر مقادیر ثبت‌شده در طول دوره مطالعه، به‌صورت خطی در محدوده صفر تا ۱۰۰ مقیاس‌بندی می‌شوند. برخلاف شاخص SSMI که وضعیت رطوبت خاک را نسبت به توزیع آماری بلندمدت استاندارد می‌کند، شاخص SMCI وضعیت فعلی رطوبت خاک را نسبت به دامنه تغییرات تاریخی همان پیکسل ارزیابی کرده و توانایی مناسبی برای نمایش تغییرات نسبی رطوبت خاک در مقیاس مکانی دارد. همچنین، این

¹ Log-Logistic

² Vegetation Condition Index

شاخص به دلیل حساسیت بیشتر نسبت به شرایط سطح زمین و کاربری اراضی، برای پایش خشکسالی‌های کوتاه‌مدت مناسب گزارش شده است (Zhang & Jia, 2013). مقدار SMCI برای هر ماه و هر پیکسل با استفاده از رابطه زیر محاسبه شد:

$$SMCI_i = 100 \times \frac{SSM_i - SSM_{min}}{SSM_{max} - SSM_{min}} \quad (2)$$

که در آن $SMCI_i$ مقدار شاخص وضعیت رطوبت خاک در ماه i ، SSM_i مقدار رطوبت خاک در ماه مورد نظر، SSM_{min} حداقل مقدار رطوبت خاک ثبت‌شده در کل دوره مطالعه و SSM_{max} حداکثر مقدار رطوبت خاک ثبت‌شده در کل دوره مطالعه برای پیکسل مورد نظر است. بر اساس این مقیاس‌بندی، مقادیر نزدیک به صفر نشان‌دهنده خشک‌ترین شرایط مشاهده‌شده و کمبود شدید رطوبت خاک، در حالی‌که مقادیر نزدیک به ۱۰۰ بیانگر شرایط رطوبتی مطلوب و نزدیک به بیشینه تاریخی رطوبت خاک هستند (Zhang & Jia, 2013). در این پژوهش، شاخص SMCI به‌صورت ماهانه و برای تمامی پیکسل‌های محدوده مطالعه طی دوره ژانویه ۲۰۰۱ تا دسامبر ۲۰۲۲ محاسبه شد. برای بررسی ویژگی‌های رخدادهای خشکسالی کشاورزی، سه ویژگی اصلی شامل مدت‌زمان رخداد^۱ (D)، شدت خشکسالی^۲ (S) و شدت متوسط رخداد (I) برای شاخص‌های SSMI و SMCI استخراج شد. این ویژگی‌ها در مقیاس ماهانه و طی دوره زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۲ محاسبه شدند. تعیین دقیق زمان آغاز و پایان هر رخداد، مرحله اصلی در استخراج ویژگی‌های خشکسالی محسوب می‌شود. بر اساس تعریف ارائه‌شده توسط بیرتو مدت‌زمان خشکسالی به تعداد ماه‌هایی اطلاق می‌شود که یک رخداد از ماه شروع خشکسالی (شامل ماه آغاز) تا زمان خاتمه آن (بدون احتساب ماه پایان) ادامه دارد (Brito et al., 2017).

$$D = t_{end} - t_{start} \quad (3)$$

همچنین، شدت خشکسالی (S) به‌صورت تجمع میزان کمبود رطوبت در طول دوره رخداد تعریف می‌شود که از نظر هندسی برابر با مساحت محصور بین منحنی تغییرات شاخص خشکسالی و محور زمان در بازه وقوع رخداد است.

$$S = \sum_{t=t_s}^{t_e} |Index_t| \quad (4)$$

برای شاخص استاندارد شده رطوبت خاک (SSMI)، تعریف رخدادهای خشکسالی بر اساس رویکرد متداول در شاخص SPI انجام شد. به تعریفی دیگر زمانی که مقدار SSMI به کمتر یا مساوی ۱- برسد، شرایط خشکسالی آغاز شده در نظر گرفته شد (McKee et al., 1993; Spinoni et al., 2014). به بیان دیگر، مقادیر $SSMI \leq -1$ نشان‌دهنده کاهش معنی‌دار رطوبت خاک نسبت به شرایط نرمال بلندمدت بوده و به‌عنوان شروع یک رخداد خشکسالی شناسایی شدند. پایان رخداد نیز زمانی در نظر گرفته شد که مقدار شاخص دوباره مثبت $SSMI > 0$ شود. بنابراین، دوره‌ای که مقدار SSMI در محدوده خشکسالی قرار داشته و تا زمان بازگشت شاخص به مقادیر مثبت ادامه یافته باشد، به‌عنوان یک رخداد خشکسالی مستقل شناسایی شد. به تعریف دیگر و بر اساس شاخص SMCI، زمانی که مقدار شاخص کمتر یا مساوی ۳۰ باشد، آغاز رخداد خشکسالی $SMCI \leq 30$ و پایان رخداد زمانی تعریف می‌شود که $SMCI > 45$ مقدار شاخص از ۴۵ بیشتر شود (Gogan, 2002 and Biro et al., 2017). گرچه SSMI و SMCI هر دو برای پایش خشکسالی کشاورزی مبتنی بر رطوبت خاک استفاده می‌شوند، ماهیت آماری و مقیاس‌بندی آن‌ها متفاوت است. SSMI یک شاخص استاندارد شده بوده و وضعیت رطوبت خاک را نسبت به توزیع بلندمدت هر پیکسل بیان می‌کند؛ بنابراین آستانه $SSMI \leq -1$ معادل وقوع شرایط خشک غیرعادی نسبت به

¹ Duration

² Severity

³ Intensity

شرایط نرمال بلندمدت بوده و مشابه رویکرد مورد استفاده در شاخص‌های استاندارد شده خشکسالی مانند SPI انتخاب شده است. در مقابل، SMCI یک شاخص نسبی مبتنی بر دامنه تاریخی تغییرات رطوبت خاک بوده و مقدار آن در محدوده صفر تا ۱۰۰ قرار می‌گیرد. از این رو، آستانه‌های $SMCI \leq 30$ و $SMCI > 45$ به ترتیب نشان‌دهنده ورود به شرایط خشک و بازگشت پایدار به شرایط غیرخشک در نظر گرفته شدند. با توجه به تفاوت مفهومی این دو شاخص، مقایسه ویژگی‌های رخداد‌های خشکسالی استخراج شده از SMCI و SSMI در این پژوهش به عنوان مقایسه مطلق شدت یا مدت رخدادها بین دو شاخص متفاوت تلقی نمی‌شود، بلکه با هدف بررسی الگوهای نسبی، تداوم زمانی و رفتار خشکسالی کشاورزی انجام شده است. بنابراین، تفاوت در تعریف رخداد و آستانه‌های مورد استفاده باید هنگام تفسیر مقادیر S، D و I مدنظر قرار گیرد. به طور مکمل، شاخص سومی نیز برای بیان بزرگی رخداد محاسبه شد که از تقسیم شدت بر مدت زمان به دست می‌آید و شدت میانگین (I) نام گرفت، این شاخص، میانگین مقدار شدت در طول دوره ی رخداد را نشان می‌دهد.

$$I = \frac{S}{D}. \quad (5)$$

برای ارزیابی خشکسالی هواشناسی، شاخص استاندارد بارش^۱ (SPI) در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه (SPI-12) محاسبه شد. این شاخص نخستین بار توسط مکی و همکاران معرفی شد و یکی از پرکاربردترین شاخص‌ها برای پایش و تحلیل خشکسالی هواشناسی به شمار می‌رود (McKee et al., 1993). SPI تنها بر اساس تغییرات بارش محاسبه می‌شود و به همین دلیل، مستقل از دما و سایر متغیرهای مؤثر بر تقاضای تبخیری جو است. در این پژوهش، ابتدا داده‌های بارش ماهانه حاصل از ۲۰ ایستگاه هواشناسی منطقه برای دوره زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۲ آماده‌سازی شد. سپس برای بررسی خشکسالی در مقیاس بلندمدت، بارش ماهانه در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه تجمیع شد. بارش تجمعی ۱۲ ماهه برای هر ماه از رابطه زیر محاسبه شد:

$$P_{12} = \sum_{i=1}^{12} P_i \quad (6)$$

که در آن P_i مقدار بارش ماهانه و P_{12} بارش تجمعی در مقیاس ۱۲ ماهه است. پس از تشکیل سری زمانی بارش تجمعی، تابع توزیع احتمالی مناسب بر داده‌ها برازش داده شد. با توجه به روش استاندارد SPI، توزیع گام‌آبرای مدل‌سازی احتمال وقوع مقادیر مختلف بارش انتخاب شد. سپس احتمال تجمعی هر مقدار بارش محاسبه و مقادیر احتمال به وسیله تابع معکوس توزیع نرمال استاندارد به مقادیر SPI تبدیل شدند:

$$SPI = \Phi^{-1}(G(x)) \quad (7)$$

که در آن، $G(x)$: احتمال تجمعی توزیع گاما؛ و Φ^{-1} : تابع معکوس توزیع نرمال استاندارد است. مقادیر منفی SPI نشان‌دهنده کاهش بارش نسبت به شرایط نرمال و وقوع خشکسالی هواشناسی هستند، در حالی که مقادیر مثبت بیانگر شرایط مرطوب‌تر از میانگین بلندمدت هستند. در این مطالعه، SPI-12 به عنوان نماینده شرایط خشکسالی هواشناسی بلندمدت در تحلیل ارتباط با خشکسالی کشاورزی مورد استفاده قرار گرفت. برای لحاظ کردن اثر هم‌زمان کمبود بارش و افزایش تقاضای تبخیری جو، شاخص استاندارد بارش-تبخیر تعرق (SPEI) در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه (SPEI-12) محاسبه شد. این شاخص توسط Vicente-Serrano et al, 2010 معرفی شده و نسبت به SPI توانایی بیشتری در نمایش اثرات تغییرات دما و افزایش تبخیر-

¹ Standardized Precipitation Index;

² Gamma Distribution

تعرق بر شدت خشکسالی دارد. در مرحله نخست، موازنه آبی ماهانه به صورت اختلاف بین بارش و تبخیر-تعرق پتانسیل محاسبه شد:

$$D = P - PET \quad (8)$$

که در آن، D : موازنه آبی؛ P : بارش ماهانه؛ PET : تبخیر-تعرق پتانسیل ماهانه است. تبخیر-تعرق پتانسیل با استفاده از مدل دمایی منتخب که عملکرد آن در مقایسه با روش استاندارد پنمن-مونتیث ارزیابی شده بود، محاسبه شد. سپس سری زمانی موازنه آبی در مقیاس ۱۲ ماهه تجمع یافت:

$$D_{12} = \sum_{i=1}^{12} D_i \quad (9)$$

پس از ایجاد سری زمانی ۱۲ ماهه موازنه آبی، تابع توزیع احتمالی مناسب بر داده‌ها برازش داده شد. در این مطالعه، مطابق روش ارائه شده توسط Vicente-Serrano et al, 2010، توزیع لگ-لجستیک برای مدل‌سازی سری زمانی موازنه آبی انتخاب شد. در ادامه، تابع توزیع تجمعی مقادیر موازنه آبی محاسبه و سپس احتمال‌های تجمعی به مقادیر استاندارد نرمال تبدیل شدند:

$$SPEI = \Phi^{-1}(F(D_{12})) \quad (10)$$

که در آن $F(D_{12})$ تابع توزیع تجمعی لگ-لجستیک است. مقادیر منفی SPEI بیانگر شرایط کمبود آب و خشکسالی بوده و مقادیر مثبت نشان‌دهنده شرایط مرطوب‌تر هستند. با توجه به اینکه SPEI علاوه بر بارش، اثر افزایش دما و تغییرات تبخیر-تعرق را نیز در نظر می‌گیرد، انتظار می‌رود ارتباط آن با شاخص‌های رطوبت خاک نسبت به SPI قوی‌تر باشد. برای بررسی ارتباط بین خشکسالی هواشناسی و خشکسالی کشاورزی، روابط آماری بین شاخص‌های محاسبه شده مورد ارزیابی قرار گرفت. در این پژوهش، از دو روش همبستگی شامل ضریب همبستگی پیرسون و ضریب همبستگی اسپیرمن استفاده شد. ضریب همبستگی پیرسون برای بررسی روابط خطی بین متغیرها به کار رفت و میزان هم‌تغییری مستقیم شاخص‌ها را اندازه‌گیری کرد:

$$r = \frac{Cov(X,Y)}{\sigma_X \sigma_Y} \quad (11)$$

در مقابل، ضریب همبستگی اسپیرمن به عنوان یک روش ناپارامتریک، برای بررسی روابط غیرخطی و مبتنی بر رتبه بین شاخص‌ها استفاده شد. استفاده هم زمان از این دو روش امکان ارزیابی جامع‌تر روابط میان متغیرهای اقلیمی و محیطی را فراهم می‌کند، زیرا رفتار رطوبت خاک و پاسخ آن به تغییرات اقلیمی همواره کاملاً خطی نیست. در این پژوهش، همبستگی بین جفت شاخص‌های زیر محاسبه شد:

$$SPI \leftrightarrow SPEI \quad SSMI \leftrightarrow SPEI \quad SSMI \leftrightarrow SPI$$

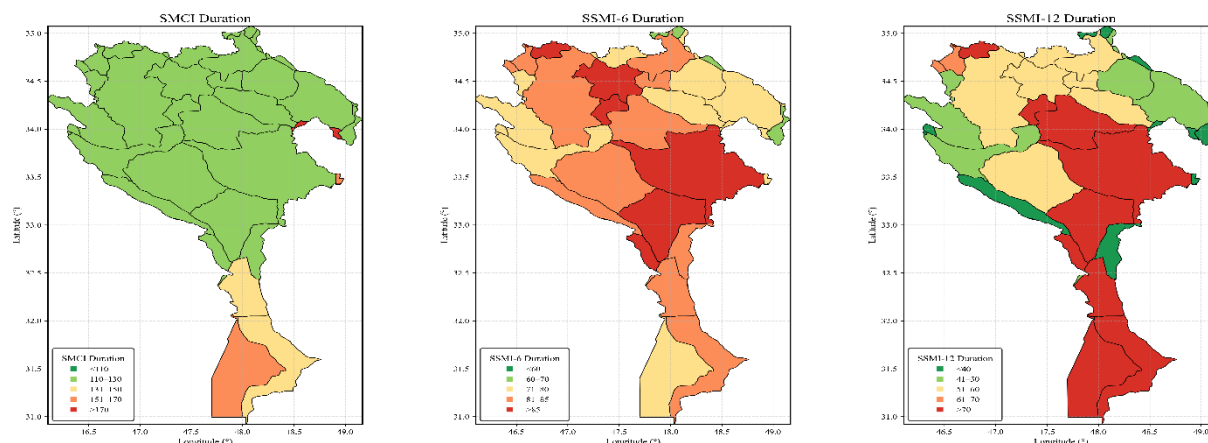
این تحلیل مشخص می‌کند که تغییرات بارش و شرایط تبخیری جو تا چه اندازه قادر به توضیح تغییرات رطوبت خاک هستند و کدام شاخص هواشناسی ارتباط قوی‌تری با خشکسالی کشاورزی دارد.

نتایج و بحث

مدت زمان (D)، شدت خشکسالی (S) و شدت متوسط رخداد (I) برای تمامی رخدادهای خشکسالی شناسایی شده طی دوره زمانی ژانویه ۲۰۰۱ تا دسامبر ۲۰۲۲ محاسبه شدند. شکل‌های ۲، ۳ و ۴ به ترتیب الگوهای مکانی مدت زمان، شدت و شدت متوسط رخدادهای خشکسالی را بر اساس شاخص‌های SSMI-6، SSMI-12 و SMI نشان می‌دهند. شایان ذکر است که مقادیر نمایش داده شده در نقشه‌های مربوط به S و I، مقادیر تجمعی ویژگی‌های رخدادهای خشکسالی طی کل دوره مطالعه هستند و بیانگر مقدار مستقیم شاخص‌های استاندارد شده SSMI یا SPI نیستند؛ بنابراین، این مقادیر از نظر دامنه عددی قابل مقایسه مستقیم با شاخص‌های استاندارد شده خشکسالی نیستند. نتایج نشان داد که الگوهای مکانی ویژگی‌های رخداد خشکسالی در بین شاخص‌های مختلف کاملاً یکسان نیستند و هر شاخص بر اساس روش محاسبه و مقیاس زمانی مورد استفاده، جنبه متفاوتی از پاسخ رطوبت خاک به خشکسالی را نشان می‌دهد. به عنوان مثال، در شاخص مدت زمان، تفاوت‌هایی میان الگوهای حاصل از SSMI-6، SSMI-12 و SMI مشاهده شد که نشان‌دهنده اثر مقیاس زمانی و روش استاندارد سازی بر شناسایی تداوم رخدادهای خشکسالی است SSMI-12. به دلیل استفاده از سری زمانی تجمیع شده ۱۲ ماهه، بیشتر قادر به نمایش خشکسالی‌های پایدار و بلندمدت است، در حالی که SSMI-6 حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات میان مدت رطوبت خاک دارد. همچنین، SMI به دلیل ماهیت نسبی خود و مقایسه شرایط هر پیکسل با دامنه تاریخی حداقل و حداکثر رطوبت خاک، می‌تواند پاسخ متفاوتی نسبت به SSMI نشان دهد. بنابراین، اختلاف مشاهده شده بین SSMI-12 و SMI در شاخص‌های مدت و شدت، بیشتر ناشی از تفاوت در ساختار محاسباتی این شاخص‌ها، مقیاس زمانی و تأثیر عوامل محلی مانند توپوگرافی، ویژگی‌های خاک و پوشش گیاهی است، نه صرفاً تفکیک مکانی داده‌ها. شکل ۳ مدت زمان (D) رخدادهای خشکسالی از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۲ در حوضه‌های آبریز کرخه، بر حسب تعداد ماه‌ها، بر اساس شاخص استاندارد شده رطوبت خاک (SSMI) و شاخص وضعیت رطوبت خاک (SMI) را نشان می‌دهد در اکثر شهرستان‌ها، شاخص SSMI-6 (مدت زمان کوتاه مدت) مقادیر بالاتری نسبت به SSMI-12 نشان می‌دهد که بیانگر غالب بودن رخدادهای کوتاه مدت و پراکنده است. اگرچه در برخی موارد (۴ شهرستان از ۲۰ شهرستان) SSMI-12 مدت طولانی‌تری را نشان می‌دهد.

نتایج حاصل از تحلیل شاخص SMI نشان داد که ویژگی‌های رخداد خشکسالی کشاورزی در حوضه آبریز کرخه دارای تغییرات مکانی قابل توجهی هستند شکل‌های ۳ تا ۵ در این مطالعه، نقشه‌های طول (D)، شدت (S) و شدت متوسط (I) بر اساس تمامی رخدادهای خشکسالی شناسایی شده در طی دوره آماری ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۲ تهیه شدند (شکل ۳ و ۴)؛ بنابراین، مقادیر نمایش داده شده در هر واحد مکانی بیانگر ویژگی تجمعی رخدادهای خشکسالی در کل دوره مطالعه بوده و مربوط به یک ماه یا سال خاص نیستند. نتایج نشان می‌دهد که در حوضه کرخه، برخی مناطق مانند هرسین و اهواز رخدادهای خشکسالی طولانی مدت و شدیدتری را تجربه کرده‌اند، در حالی که مناطق کوهستانی مانند صحنه، خرم‌آباد، کامیاران و نورآباد لرستان بیشتر تحت تأثیر رخدادهای کوتاه مدت با شدت بالا قرار گرفته‌اند. این تفاوت‌ها می‌تواند ناشی از تغییرات مکانی شرایط اقلیمی، ارتفاع، شیب، ویژگی‌های خاک و ظرفیت نگهداری آب در سطح حوضه باشد. در حالی که حداکثر شدت SMI در برزیل حدود ۴۰۰۰ گزارش شده بود، در جنوب حوضه کرخه این مقدار به بیش از ۶۳۰۰ رسیده است — یعنی حدود ۶۰ درصد شدیدتر و در مساحتی به مراتب وسیع‌تر. همچنین شدت SSMI-12 در چندین شهرستان از حوضه کرخه از ۲۴۰ واحد فراتر رفته که تقریباً دو برابر حداکثر مقدار گزارش شده در برزیل است (Inocencio et al., 2020). این مقادیر بزرگ گزارش شده برای شدت ناشی از تجمع مقادیر کمبود شاخص در طول تمامی رخدادهای خشکسالی طی دوره مطالعه است (شکل ۴)؛ بنابراین این مقادیر بیانگر شدت انباشته رخدادهای بوده و نباید با دامنه استاندارد شاخص SSMI مقایسه شوند.

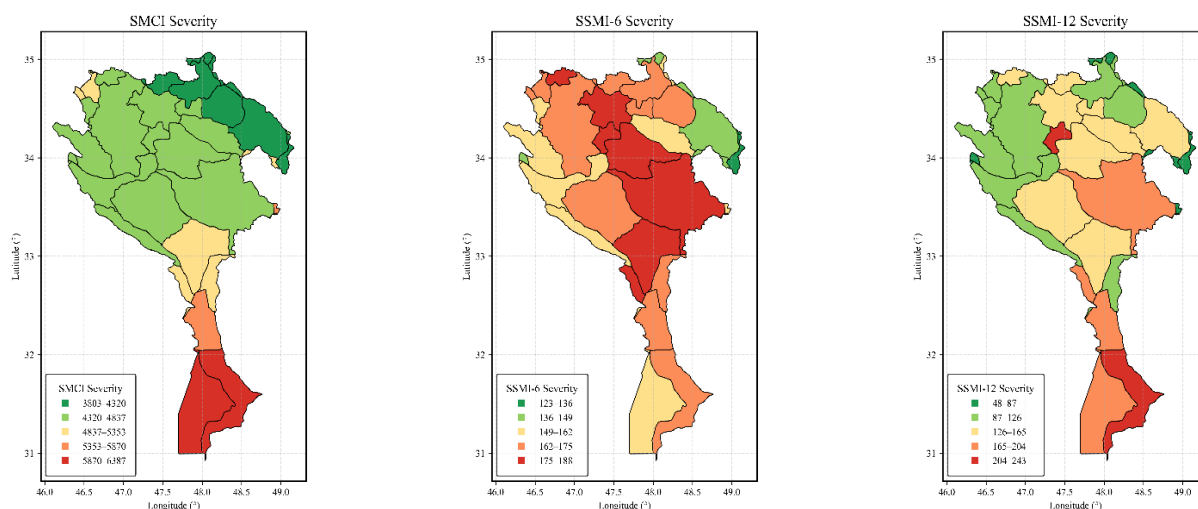
^۱-Severity



شکل ۳- توزیع مکانی مدت زمان (D) رخدادهای خشکسالی کشاورزی در حوضه آبریز کرخه طی دوره ۲۰۰۱-۲۰۲۲ (بر حسب تعداد ماه‌ها) بر اساس شاخص استاندارد شده رطوبت خاک (SSMI) و شاخص وضعیت رطوبت خاک (SMCI).

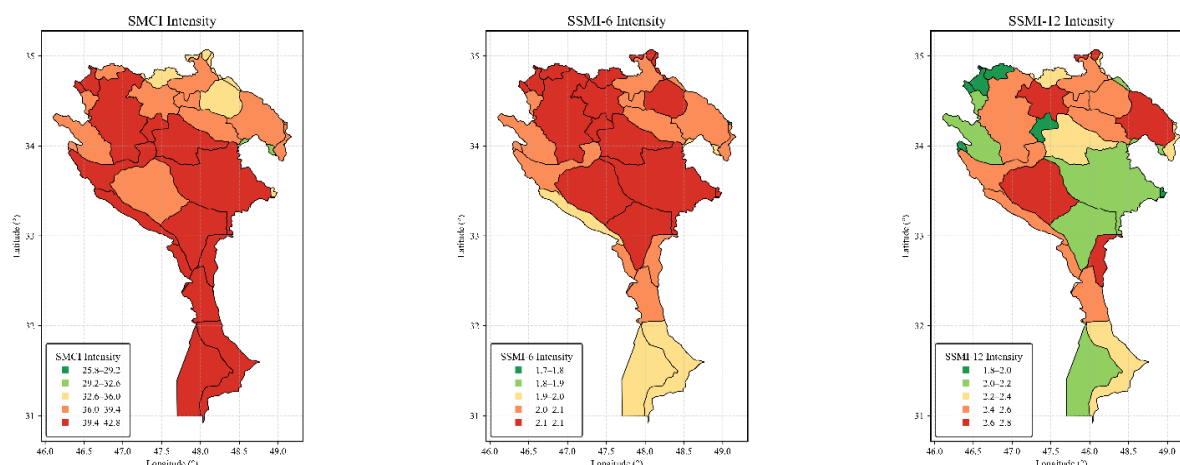
Figure 3 – Spatial distribution of the duration (D) of agricultural drought events in the Karkheh River Basin during the 2001–2022 period (in months), based on the Standardized Soil Moisture Index (SSMI) and the Soil Moisture Condition Index (SMCI).

برخلاف الگوهای پراکنده گزارش شده در شمال شرق برزیل، در حوضه کرخه یک گرادیان مکانی مشخص شمال-جنوب در رفتار شاخص‌های خشکسالی مشاهده شد؛ به طوری که مناطق مرتفع زاگرس و دشت‌های جنوبی الگوهای متفاوتی از شدت و تداوم خشکسالی نشان دادند (شکل ۵). این الگو می‌تواند حاصل ترکیبی از عوامل طبیعی و انسانی شامل تغییرات ارتفاع، تفاوت‌های اقلیمی، ویژگی‌های خاک، شرایط پوشش زمین و نحوه مدیریت منابع آب باشد. اگرچه برداشت از منابع آب زیرزمینی و تغییرات جریان‌های سطحی از عوامل مهم مؤثر بر وضعیت منابع آب حوضه کرخه هستند، اما داده‌های رطوبت خاک ماهواره‌ای عمدتاً شرایط رطوبتی سطح خاک را نشان داده و اثر مستقیم این عوامل را به‌تنهایی آشکار نمی‌کنند.



شکل ۴- توزیع مکانی شدت رخدادهای خشکسالی کشاورزی در حوضه آبریز کرخه طی دوره ۲۰۰۱-۲۰۲۲ بر اساس شاخص استاندارد شده رطوبت خاک (SSMI) و شاخص وضعیت رطوبت خاک (SMCI).

Figure 4- Spatial distribution of the severity of agricultural drought events in the Karkheh river basin during the 2001–2022 period, based on the standardized soil moisture index (SSMI) and the soil moisture condition index (SMCI).



شکل ۵- توزیع مکانی شدت متوسط (Intensity) رخدادهای خشکسالی کشاورزی در حوضه آبریز کرخه طی دوره ۲۰۲۲-۲۰۰۱ بر اساس شاخص استاندارد شده رطوبت خاک (SSMI) و شاخص وضعیت رطوبت خاک (SMC).

Figure 5 – Spatial distribution of the mean intensity of agricultural drought events in the Karkheh river basin during the 2001–2022 period, based on the standardized soil moisture index (SSMI) and the soil moisture condition (SMC) index.

تحلیل همبستگی میان شاخص‌های خشکسالی SSMI، SPEI و SPI در ۲۰ ایستگاه حوضه کرخه نشان داد که شاخص‌های هواشناسی SPI و SPEI همبستگی بسیار بالایی با یکدیگر دارند و تقریباً یک سیگنال مشترک از خشکسالی هواشناسی ارائه می‌کنند. مقادیر ضریب همبستگی اسپیرمن بین SPEI و SPI در دامنه ۰/۶۵ تا ۰/۹۹ با میانگین ۰/۸۴ قرار داشت که نشان‌دهنده نقش غالب تغییرات بارش و تبخیر-تعرق بالقوه در شکل‌گیری خشکسالی هواشناسی است. در مقابل، همبستگی SSMI با SPEI و SPI دامنه گسترده‌تری داشت (از مقادیر نزدیک صفر یا منفی تا بیش از ۰/۷۰)، که نشان می‌دهد پاسخ رطوبت خاک به شرایط اقلیمی در سطح حوضه یکنواخت نیست و تحت تأثیر عوامل محلی قرار دارد. عواملی مانند بافت و عمق خاک، شیب، توپوگرافی، پوشش گیاهی و ظرفیت نگهداری آب خاک می‌توانند باعث ایجاد تأخیر یا تعدیل در واکنش رطوبت خاک نسبت به تغییرات بارش و تبخیر-تعرق شوند. به عنوان مثال، خاک‌های دارای ظرفیت نگهداری آب بالا می‌توانند اثر کمبود بارش را برای مدت طولانی‌تری ذخیره کنند، در حالی که خاک‌های کم‌عمق یا با نفوذپذیری بالا سریع‌تر نسبت به تغییرات اقلیمی واکنش نشان می‌دهند. در ایستگاه‌های گرم و کم‌ارتفاع مانند شوش، اهواز و آبدانان، همبستگی بالاتر بین SSMI و شاخص‌های هواشناسی مشاهده شد که می‌تواند ناشی از تأثیر مستقیم‌تر کمبود بارش و افزایش تقاضای تبخیری جو بر کاهش رطوبت خاک در این مناطق باشد. در مقابل، ایستگاه‌های مرتفع و نیمه‌مرطوب مانند کنگاور، نورآباد، کامیاران و اسدآباد، همبستگی‌های ضعیف‌تری نشان دادند. این رفتار احتمالاً به دلیل اثر هم‌زمان ویژگی‌های خاک، تغییرات ارتفاعی، شیب، پوشش گیاهی و تفاوت در ذخیره رطوبتی خاک است که موجب می‌شود تغییرات رطوبت خاک با تأخیر زمانی یا شدت متفاوت نسبت به شاخص‌های هواشناسی رخ دهد. همچنین، مقایسه ضرایب همبستگی اسپیرمن و پیرسون نشان داد که در برخی ایستگاه‌ها مانند کنگاور، رابطه بین SSMI و شاخص‌های هواشناسی بسیار ضعیف است؛ به طوری که ضریب اسپیرمن نزدیک صفر یا منفی و ضریب پیرسون نیز مقدار پایینی را نشان داد. این موضوع بیانگر آن است که تغییرات رطوبت خاک در این مناطق هم‌زمانی و ارتباط قابل توجهی با تغییرات شاخص‌های هواشناسی SPI و SPEI ندارد و احتمالاً تحت تأثیر عوامل محلی مانند ویژگی‌های خاک، توپوگرافی، شیب و پوشش گیاهی قرار می‌گیرد. همچنین، در برخی ایستگاه‌ها همبستگی SSMI با SPI اندکی بیشتر از همبستگی آن با SPEI بود که نشان می‌دهد در این مناطق، تغییرات رطوبت خاک ارتباط بیشتری با نوسانات بارش دارد و تغییرات تبخیر-تعرق بالقوه به‌تنهایی قادر به توضیح کامل تغییرات رطوبت خاک نیست. به‌طور کلی، الگوی مکانی همبستگی‌ها نشان داد که ارتباط بین خشکسالی هواشناسی و خشکسالی کشاورزی در سراسر

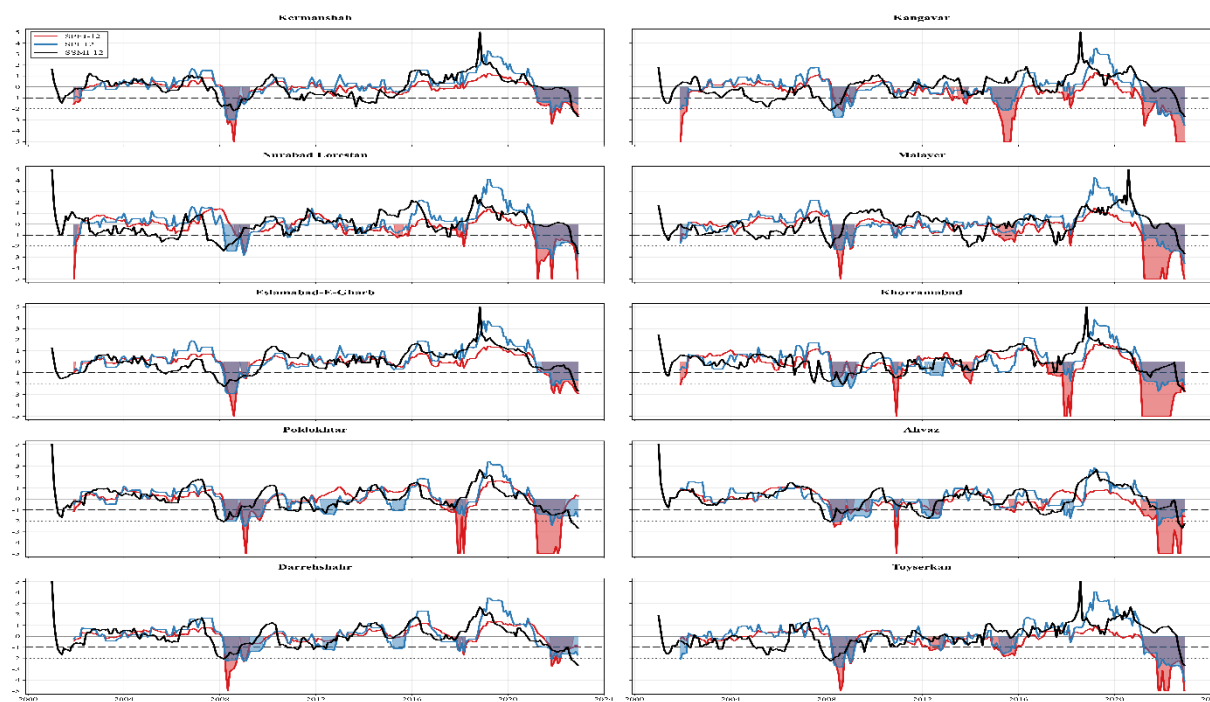
حوضه کرخه یکنواخت نیست و پاسخ رطوبت خاک به تغییرات اقلیمی در مناطق مختلف تحت تأثیر شرایط محلی متفاوت است.

این یافته‌ها اهمیت استفاده هم‌زمان از شاخص‌های مبتنی بر رطوبت خاک مانند SSMI و SMCi و شاخص‌های اقلیمی مانند SPI و SPEI را برای پیش‌دقیق‌تر خشکسالی کشاورزی، به‌ویژه در حوضه‌های دارای ناهمگنی فیزیوگرافی، نشان می‌دهد. شکل‌های ۷ و ۶ سری زمانی شاخص‌های خشکسالی با مقیاس زمانی ۱۲ ماهه شامل SSMI-12، SPI-12 و SPEI-12 را در ۲۰ ایستگاه حوضه آبریز کرخه طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۲ نشان می‌دهند. در این شکل‌ها، خط قرمز بیانگر SPEI-12، خط آبی نشان‌دهنده SPI-12 و خط سیاه نشان‌دهنده SSMI-12 است. نواحی سایه‌دار قرمز دوره‌هایی را مشخص می‌کنند که مقدار SSMI-12 کمتر یا مساوی ۱- بوده و نشان‌دهنده رخداد خشکسالی شدید تا بسیار شدید کشاورزی بر اساس شاخص استاندارد شده رطوبت خاک هستند. مشاهدات این دو مجموعه ایستگاه الگوی همیشگی خشکسالی هواشناسی و کشاورزی را به وضوح نشان می‌دهد و گرادیان شمال-جنوب حوضه کرخه را روشن می‌کند: ایستگاه‌های جنوبی و دشت‌های گرم حوضه (اهواز، شوش، آبادان، بستان، پلدختر، دزفول، دره‌شهر و تویسرکان در سال‌های آخر) در این ایستگاه‌ها، سه شاخص تقریباً هم‌زمان و با شدت مشابه خشکسالی را نشان می‌دهند و همبستگی بالایی $r > 0.8$ دارند. این همگامی بیانگر آن است که رطوبت خاک در مناطق کم‌ارتفاع و دشت‌های خوزستان تقریباً یک‌به‌یک تحت کنترل بارش و تراز آبی قرار دارد. ایستگاه‌های میانی و نیمه‌کوهستانی (مانند هرسین و کبودشت) وضعیت حدواسط مشاهده می‌شود: SSMI-12 معمولاً زودتر وارد خشکسالی می‌شود و دیرتر به شرایط مطلوب بازمی‌گردد، اما شدت و طول مدت خشکسالی کمتر از ایستگاه‌های مرتفع زاگرس است. ایستگاه‌های شمالی و مرتفع زاگرس (کرمانشاه، کنگاور، نورآباد لرستان، اسلام‌آباد غرب، خرم‌آباد، اسدآباد، کامیاران، سنقر، ایوان، سرابله) در این ایستگاه‌ها اختلاف بسیار قابل‌توجهی بین SSMI-12 و شاخص‌های هواشناسی مشاهده می‌شود. در بسیاری از سال‌ها (به‌ویژه ۲۰۰۷-۲۰۱۰، ۲۰۱۳-۲۰۱۷ و ۲۰۲۰-۲۰۲۲)، SSMI-12 مقادیر منفی شدید و طولانی‌مدت (تا ۲/۵-) را نشان می‌دهد، در حالی که SPI-12 و SPEI-12 در محدوده نرمال یا حتی مثبت قرار دارند. دوره بازگشت رطوبت خاک به شرایط مطلوب در این مناطق ۶ تا ۲۴ ماه طول می‌کشد و شدت و مساحت زیر منحنی منفی SSMI-12 به‌طور متوسط ۱/۵ تا ۳ برابر بزرگ‌تر از SPI/SPEI است. این اختلاف‌ها نشان‌دهنده تأثیر عوامل محلی فیزیوگرافی شامل بافت سنگین خاک، عمق کم، شیب تند، پوشش گیاهی متراکم و نفوذپذیری پایین است که باعث می‌شود حتی در سال‌های با بارش نزدیک به نرمال، رطوبت قابل دسترس برای گیاهان به سرعت کاهش یابد و خشکسالی کشاورزی زودتر و شدیدتر از خشکسالی هواشناسی ظاهر شود. به‌طور کلی، بررسی سری زمانی شاخص‌ها در ۲۰ ایستگاه حوضه کرخه نشان می‌دهد که، در دشت‌ها و مناطق کم‌ارتفاع، خشکسالی خاک تقریباً همگام با خشکسالی هواشناسی است.

جدول ۲- ضرایب همبستگی پیرسون و اسپیرمن بین شاخص‌های خشکسالی کشاورزی (SSMI-12) و شاخص‌های خشکسالی هواشناسی (SPEI-12 و SPI-12) در ایستگاه‌های منتخب حوضه آبریز کرخه طی دوره ۲۰۰۱-۲۰۲۲.

Table 2 – Pearson and Spearman correlation coefficients between agricultural drought indices (SSMI-12) and meteorological drought indices (SPI-12 and SPEI-12) at selected stations in the Karkheh River Basin during the 2001–2022 period.

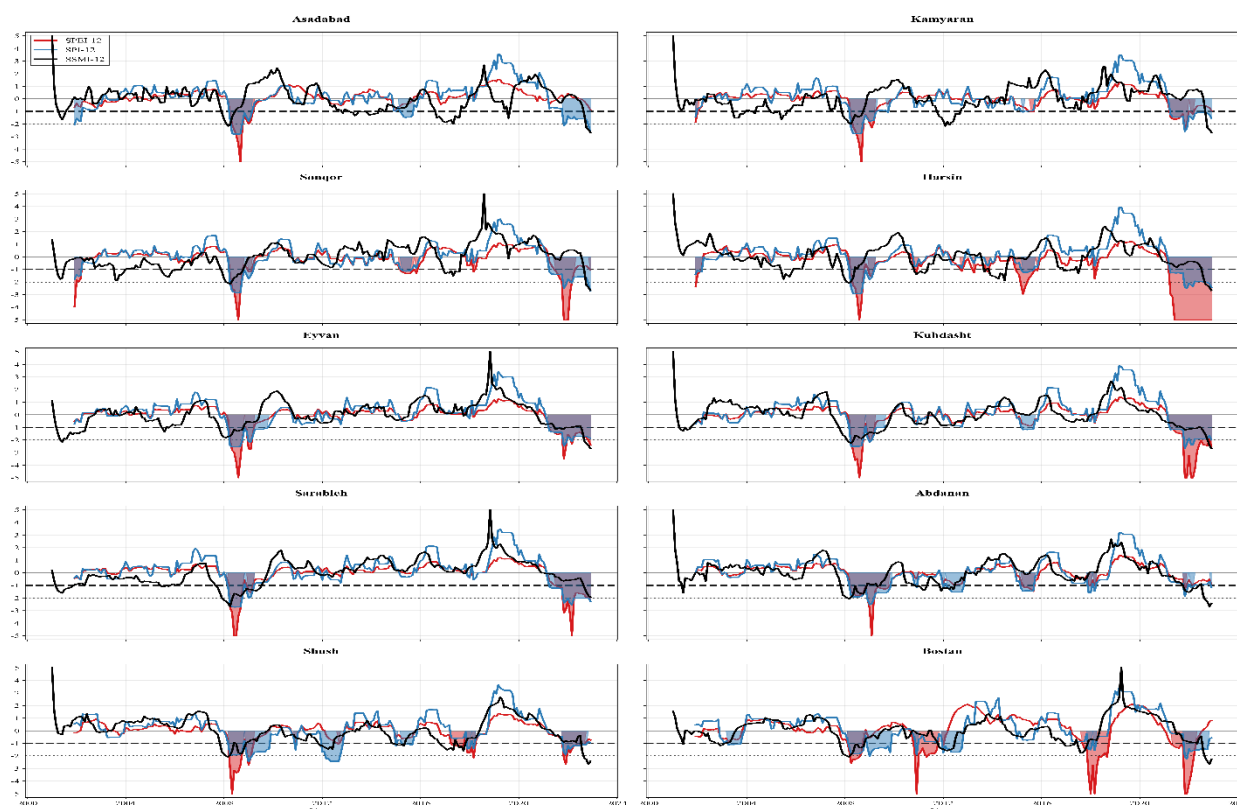
ایستگاه	SSMI-12 ↔ SPEI-12 (اسپیرمن)	SSMI-12 ↔ SPI-12 (اسپیرمن)	SPEI-12 ↔ SPI-12 (اسپیرمن)	SSMI-12 ↔ SPEI-12 (پیرسون)	SSMI-12 ↔ SPI-12 (پیرسون)	SPEI-12 ↔ SPI-12 (پیرسون)
کرمانشاه	0.612	0.629	0.909	0.558	0.659	0.89
کنگاور	-0.035	0.141	0.842	0.106	0.280	0.792
نورآباد لرستان	0.053	0.317	0.731	0.78	0.408	0.718
ملایر	0.192	0.255	0.847	0.170	0.375	0.731
اسلام‌آباد غرب	0.0505	0.580	0.904	0.575	0.67	0.870
خرم‌آباد	0.422	0.449	0.711	0.355	0.521	0.666
پلدختر	0.48	0.642	0.767	0.408	0.643	0.659
اهواز	0.585	0.689	0.723	0.464	0.697	0.648
دره‌شهر	0.561	0.604	0.918	0.571	0.932	0.834
تویسرکان	0.175	0.360	0.802	0.150	0.392	0.773
اسدآباد	0.169	0.204	0.669	0.175	0.207	0.711
کامیاران	0.026	0.173	0.894	0.116	0.255	0.847
سنقر	0.112	0.255	0.904	0.124	0.357	0.792
هرسین	0.432	0.345	0.856	0.348	0.383	0.765
ایوان	0.568	0.608	0.961	0.568	0.643	0.873
کوه‌دشت	0.6	0.626	0.986	0.594	0.678	0.825
سرابله	0.524	0.586	0.939	0.514	0.633	0.834
آبدانان	0.624	0.651	0.98	0.564	0.644	0.895
شوش	0.646	0.692	0.87	0.616	0.702	0.782
بستان	0.507	0.725	0.65	0.419	0.730	0.617



شکل ۶- سری زمانی و مقایسه شاخص‌های خشکسالی ۱۲ ماهه کشاورزی و هواشناسی SSMI-12، SPI-12 و SPEI-12 در ایستگاه‌های منتخب حوزه آبریز کرخه طی دوره ۲۰۰۱–۲۰۲۲.

Figure 6 – Time series and comparison of 12-month agricultural and meteorological drought indices (SSMI-12, SPI-12, and SPEI-12) at selected stations in the Karkheh river basin during the 2001–2022 period.

در ارتفاعات و مناطق نیمه مرطوب، خشکسالی خاک به‌طور قابل توجهی مستقل از شاخص‌های هواشناسی عمل می‌کند و شاخص SSMI-12 اطلاعات دقیق‌تر و عملیاتی‌تری برای مدیریت خشکسالی کشاورزی ارائه می‌دهد، این نتایج بر ضرورت استفاده از شاخص‌های مبتنی بر رطوبت خاک برای پایش خشکسالی کشاورزی، به‌ویژه در مناطق کوهستانی و دارای ناهمگونی فیزیوگرافی، تأکید می‌کند. بررسی ضرایب همبستگی پیرسون و اسپیرمن بین شاخص‌های SSMI-12، SPI-12 و SPEI-12 در ۲۰ ایستگاه حوزه کرخه (جدول ۲) نشان داد که میزان ارتباط بین خشکسالی خاکی و خشکسالی هواشناسی در سطح حوزه یکنواخت نیست. در دشت‌ها و مناطق کم‌ارتفاع، به‌ویژه ایستگاه‌هایی مانند شوش و اهواز، مقادیر همبستگی SSMI-12 با SPI-12 و SPEI-12 بالاتر بود که نشان‌دهنده پاسخ هماهنگ‌تر رطوبت خاک به تغییرات اقلیمی است. در مقابل، در برخی مناطق مرتفع و نیمه مرطوب مانند کنگاور، نورآباد، کامیاران و اسدآباد، ضرایب همبستگی پایین‌تری مشاهده شد که می‌تواند ناشی از تأثیر عوامل محلی مانند ویژگی‌های خاک، توپوگرافی، شیب، پوشش گیاهی و فرآیندهای ذخیره و انتقال آب در خاک باشد. این نتایج نشان می‌دهد که شاخص‌های هواشناسی به تنهایی قادر به بیان کامل شرایط رطوبتی خاک در تمام مناطق حوزه نیستند و استفاده از شاخص‌های مبتنی بر رطوبت خاک مانند SSMI-12 و SMI برای پایش خشکسالی کشاورزی، به‌ویژه در مناطق دارای ناهمگونی فیزیوگرافی، ضروری است.



شکل ۷- سری زمانی و مقایسه شاخص‌های خشکسالی ۱۲ ماهه کشاورزی و هواشناسی SSMI-12، SPI-12 و SPEI-12 در ایستگاه‌های منتخب حوزه آبریز کرخه طی دوره ۲۰۰۱–۲۰۲۲.

Figure 7 – Time series and comparison of 12-month agricultural and meteorological drought indices (SSMI-12, SPI-12, and SPEI-12) at selected stations in the Karkheh river basin during the 2001–2022 period.

نتیجه‌گیری کلی

نتایج این پژوهش نشان داد که رفتار خشکسالی کشاورزی مبتنی بر رطوبت خاک در حوزه کرخه در بسیاری از مناطق با خشکسالی هواشناسی تفاوت قابل توجهی دارد. شاخص‌های SSMI و SMCI توانستند الگوهای مکانی و زمانی متفاوتی از وضعیت رطوبت خاک را آشکار کنند و در برخی مناطق، مدت و شدت خشکسالی‌های شناسایی شده توسط این شاخص‌ها بیشتر از شاخص‌های مبتنی بر بارش و تبخیر-ترقرق SPI و SPEI بود. یکی از الگوهای مکانی برجسته و قابل ملاحظه در حوزه، تفاوت رفتار خشکسالی بین مناطق مرتفع شمالی و شمال غربی زاگرس و دشت‌های کم‌ارتفاع جنوبی بود؛ به‌طوری‌که مناطق کوهستانی و نیمه‌مرطوب، به دلیل تأثیر عوامل محلی مانند ارتفاع، شیب، ویژگی‌های خاک، پوشش گیاهی و شرایط ذخیره‌سازی آب در خاک، پاسخ متفاوتی نسبت به تغییرات اقلیمی نشان دادند، در حالی‌که در دشت‌های جنوبی، تغییرات رطوبت خاک هماهنگی بیشتری با شرایط اقلیمی و شاخص‌های هواشناسی داشت. تحلیل ویژگی‌های رخدادهای خشکسالی شامل مدت‌زمان، شدت و شدت متوسط نشان داد که الگوی رخدادها در سطح حوزه یکنواخت نیست. در بخش‌هایی از مناطق مرتفع، رخدادهای خشکسالی کوتاه‌تر اما با شدت بیشتر مشاهده شد، در حالی‌که در مناطق جنوبی و کم‌ارتفاع، برخی رخدادها دارای تداوم زمانی طولانی‌تر و شدت تجمعی بالاتری بودند. این تفاوت‌ها بیانگر نقش مهم شرایط فیزیوگرافی و ویژگی‌های سطح زمین در تعدیل پاسخ رطوبت خاک به کمبودهای اقلیمی است. مقایسه نتایج این پژوهش با مطالعات انجام شده در مناطق مشابه مانند شمال شرق برزیل نشان داد که اگرچه هر دو منطقه تحت تأثیر اقلیم نیمه‌خشک و تغییرات شدید رطوبتی قرار دارند، اما تفاوت در شرایط توپوگرافی، ویژگی‌های خاک، پوشش گیاهی و مدیریت منابع آب موجب تفاوت در الگوی رخدادهای

خشکسالی شده است. بنابراین، مقایسه مستقیم شدت خشکسالی بین مناطق مختلف باید با در نظر گرفتن تفاوت‌های محیطی انجام شود. تحلیل همبستگی بین شاخص‌ها نشان داد که SPI و SPEI در اکثر ایستگاه‌ها همبستگی بالایی دارند و تقریباً یک سیگنال مشابه از خشکسالی هواشناسی ارائه می‌کنند. در مقابل، رابطه بین SSMI-12 و شاخص‌های هواشناسی در سطح حوضه متغیر بود. در برخی مناطق کم‌ارتفاع مانند شوش و اهواز، ضرایب همبستگی بالاتر نشان داد که تغییرات رطوبت خاک ارتباط بیشتری با تغییرات بارش و تبخیر-تعرق دارد. در مقابل، در برخی مناطق مرتفع مانند کنگاور، نورآباد، کامیاران و اسدآباد، همبستگی پایین‌تر مشاهده شد که می‌تواند ناشی از اثر عوامل محلی مانند عمق و بافت خاک، شیب، پوشش گیاهی و فرآیندهای نگهداری و انتقال آب در خاک باشد. بررسی سری زمانی شاخص‌های SSMI-12، SPI-12 و SPEI-12 نیز نشان داد که در برخی مناطق، خشکسالی کشاورزی هم‌زمان با خشکسالی هواشناسی رخ نمی‌دهد و ممکن است با تأخیر یا تداوم بیشتری نسبت به شرایط اقلیمی مشاهده شود. این موضوع اهمیت استفاده از شاخص‌های مبتنی بر رطوبت خاک را برای شناسایی دقیق‌تر وضعیت خشکسالی کشاورزی نشان می‌دهد. به طور کلی، نتایج این پژوهش تأکید می‌کند که در حوضه‌های ناهمگون مانند کرخه، استفاده صرف از شاخص‌های هواشناسی نمی‌تواند تمامی جنبه‌های خشکسالی کشاورزی را نشان دهد. ترکیب شاخص‌های رطوبت خاک مانند SSMI و SMCI با شاخص‌های هواشناسی SPI و SPEI می‌تواند ارزیابی جامع‌تری از شدت، تداوم و پراکنش مکانی خشکسالی فراهم کرده و اطلاعات کاربردی‌تری برای سامانه‌های پایش، هشدار زودهنگام خشکسالی و مدیریت منابع آب و کشاورزی ارائه دهد. یکی از محدودیت‌های اصلی این پژوهش، تفکیک مکانی ۰.۲۵ درجه مجموعه داده C3S Soil Moisture است. اگرچه این تفکیک مکانی برای تحلیل‌های منطقه‌ای و مطالعات مقیاس حوضه‌ای مناسب است، اما ممکن است برخی تغییرات محلی ناشی از توپوگرافی، شیب، عمق خاک، پوشش گیاهی و ویژگی‌های هیدرولوژیکی سطح زمین، به ویژه در مناطق کوهستانی زاگرس، در فرآیند میانگین‌گیری مکانی هموار شوند. بنابراین، الگوهای مکانی استخراج‌شده در این مطالعه باید در مقیاس حوضه‌ای تفسیر شده و برای تحلیل‌های محلی‌تر نیاز به استفاده از داده‌های با تفکیک بالاتر یا روش‌های downscaling وجود دارد. نتایج این مطالعه باید با توجه به چند محدودیت تفسیر شود. نخست، داده C3S Soil Moisture اگرچه یکی از مجموعه داده‌های معتبر جهانی رطوبت خاک است، اما مانند سایر محصولات سنجش از دور دارای عدم قطعیت ناشی از الگوریتم بازیابی، اثر پوشش گیاهی، ناهمگنی سطح زمین و تفاوت بین رطوبت سطحی و رطوبت قابل استفاده گیاه است. دوم، شاخص SMCI به دلیل وابستگی به حداقل و حداکثر تاریخی هر پیکسل، نسبت به طول دوره آماری حساس است. سوم، مقایسه شاخص‌های رطوبت خاک با شاخص‌های هواشناسی باید با توجه به تفاوت فرآیندهای فیزیکی حاکم بر آن‌ها انجام شود، زیرا پاسخ رطوبت خاک به تغییرات اقلیمی می‌تواند تحت تأثیر تأخیر زمانی، ویژگی‌های خاک، پوشش گیاهی و مدیریت انسانی قرارگیرد.

شفافسازی استفاده از هوش مصنوعی

در مراحل مختلف این پژوهش اعم از ایده‌پردازی، طراحی، جمع‌آوری و تحلیل داده‌ها، نگارش متن یا ویرایش از ابزارهای هوش مصنوعی استفاده نشده است. در بخش چکیده مبسوط، ترجمه متن فارسی به انگلیسی با استفاده از هوش مصنوعی انجام و پس از آن ایرادهای نگارشی به وسیله نویسندگان مقاله برطرف گردید.

منابع مورد استفاده

References

- Alito, K. T., Kerebih, M. S., & Hailu, D. A. (2025). Characterization of drought detection with remote sensing based multiple indices and SPEI in Northeastern Ethiopian Highland. *Air, Soil and Water Research*, 18, 58-79.
<https://doi.org/10.1177/11786221251328833>

- Das, S. (2024). Parametric and non-parametric indices for agricultural drought assessment using ESA CCI soil moisture data over the Southern Plateau and Hills, India. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 135, 103531. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.104175>
- Furtak, K., & Wolińska, A. (2025). Assessing drought dynamics in a semi-arid basin: A multi-index approach using hydrological and remote-sensing indicators. *Environmental Sciences Europe*, 37(1), 1–20. <https://link.springer.com/article/10.1186/s12302-025-01240-4>
- Gümüş, V. (2023). Evaluation of meteorological drought using SPI and SPEI: Global perspectives. *Journal of Hydrology*, 620, 129389. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130386>
- Hakam, S. (2023). Probabilistic linkages of propagation from meteorological to agricultural drought in North African semi-arid regions. *Frontiers in Water*, 5, 1559046. <https://doi.org/10.3389/frwa.2025.1559046>
- Kulkarni, R. (2025). Global assessment of socio-economic drought events at the subnational scale: A comparative analysis of combined versus single drought indicators. *Hydrology and Earth System Sciences*, 29, 4341–4360. <https://doi.org/10.5194/hess-29-4341-2025>
- Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2023). Agricultural and meteorological drought dynamics in complex terrains. *Climate and Water*, 12(3), 221–238. <https://link.springer.com/article/10.1007/s13201-025-02582-3>
- Senapati, D. (2025). Trend analysis of drought in semi-arid regions using SPI, SPEI, and VCI. *GIScience & Remote Sensing*, 62(1), 2257469. <https://doi.org/10.1007/s40333-021-0062-0>
- Zhang, L. (2025). Meteorological and agricultural drought assessments using satellite imagery and machine learning models. *Advances in Space Research*, 76(5), 1234–1248. <https://doi.org/10.22059/ije.2025.380086.1841>
- Kamali, B., Abbaspour, K. C., Lehmann, A., Wehrli, B., & Yang, H. (2015). Identification of spatiotemporal patterns of biophysical droughts in semi-arid region – a case study of the Karkheh river basin in Iran. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 12(5), 5187–5217. <https://scispace.com/pdf/identification-of-spatiotemporal-patterns-of-biophysical-1rpze1w54e.pdf> (In persian with English abstract).
- Parvizi, S., Eslamian, S., Gheysari, M., Gohari, A., Kopai, S.S. (2022). Regional frequency analysis of drought severity and duration in Karkheh River Basin, Iran using univariate L-moments method. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(5), 336. (In persian with English abstract). <https://doi.org/10.1007/s10661-022-09977-8>
- Kamali, B., Houshmand Kouchi, D., Yang, H., & Abbaspour, K. C. (2017). Multilevel Drought Hazard Assessment under Climate Change Scenarios in Semi-Arid Regions—A Case Study of the Karkheh River Basin in Iran. *Water*, 9(4), 241. <https://doi.org/10.3390/w9040241>
- Zandifar, S., Dargahian, F., Fijani, E. & Naeimi, M. (2021). The Trend of Groundwater Variations and Drought in the Karkheh Watershed. *Watershed Management Research*, 34(3), 53-73. (In persian with English abstract) <https://doi.org/10.22092/wmej.2021.343333.1352>
- European Space Agency. (2018). Climate change initiative phase 2 soil moisture. *Product Specification Document (PSD) D1.2.1 Version 4.2*. Earth Observation Data Centre for Water Resources Monitoring (EODC) GmbH. Hamburg: University of Hamburg, Germany. https://www.esa-soilmoisture-cci.org/sites/default/files/documents/ESA_CCI_SM_PSD_D1.2.1_v04.5.pdf

- Paredes-Trejo, F. & Barbosa, H. (2017). Evaluation of the SMOS-Derived soil water deficit index as agricultural drought index in Northeast of Brazil. *Water*, 9, 1-21.
<https://doi.org/10.3390/agriculture11050411>
- Liu, Y. Y., Dorigo, W. A., Parinussa, R. M., Jeu, R. A. M. de, Wagner, W., McCabe, M. F., Evans, J. P., & Dijk, A. (2012). Trend-preserving blending of passive and active microwave soil moisture retrievals. *Remote Sensing Environment*, 123, 280-297.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425712001332>
- Inocêncio, T. de M., Ribeiro Neto, A., & Souza, A. G. S. S. (2020). Soil moisture obtained through remote sensing to assess drought events. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 24(9), 575–580. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v24n9p575-580>
- McKee, T.; Doesken, N.; & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. Pp.179-184. In: *Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology*. American Meteorological Society, Boston, USA.
https://www.droughtmanagement.info/literature/AMS_Relationship_Drought_Frequency_Duration_Time_Scales_1993.pdf
- Oertel, M.; Meza, F. J.; Gironás, J.; Scott, C. A.; Rojas, F.; & Pineda Pablos, N. (2018). Drought propagation in semi-arid river basins in Latin America: Lessons from Mexico to the Southern Cone. *Water*, 10, 1-21.
<https://geography.arizona.edu/sites/geography.arizona.edu/files/CScott%20CV%20Oct%202020%20web.pdf>
- Kogan F. N. (2002). World droughts in the new millennium from AVHRR-based vegetation health indices. *EOS Transactions American Geophysical Union*, 83, 562-563.
https://www.star.nesdis.noaa.gov/data/smcd1/vhp/VH_doc/Felix/2002_WorldDrought_EO000382_rga.pdf
- Zhang, L.; Jiao, W.; Zhang, H.; Huang, C. & Tong, Q. (2012). Studying drought phenomena in the continental United States in 2011 and 2012 using various drought indices. *Remote Sensing of Environment*, 190, 96-106.
<https://doi.org/10.1016/J.RSE.2016.12.010>
- Spinoni, J.; Naumann, G.; Carrão, H.; Barbosa, P. & Vogt, J. (2010). World drought frequency, duration, and severity for 1951-2010. *International Journal of Climatology*, 34, 792-2804. <https://doi.org/10.1002/joc.3875>
- Mishra, A. K. & Singh, V. P. A. (2010). review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391, 202-216. <https://doi.org/10.1029/2025WR041987>
- Brito, S. S. B.; Cunha, A. P. M. A.; Cunningham, C. C.; Alvalá, R. C. S.; Marengo, J. A. & Carvalho, M. A. (2017). Frequency, duration and severity of drought in the Semiarid Northeast Brazil region. *International Journal of Climatology*, 38, 517-529.
<https://doi.org/10.1002/joc.5225>
- Mohammadi, H., Bazrafshan, J., & Liaghat, A. M. (2023). Correlation analysis of drought–dust and its relationship with vegetation changes in Khuzestan province. *Iranian Journal of Soil and Water Research*, 54(10), 1447–1465. (In persian with English abstract). <https://doi.org/10.22059/ijswr.2023.364328.669560>