

A Integrated Approach Using SPEI and Remote Sensing Indices for Drought Monitoring and Assessment

Zareie Sajad^{1*} , Farhadmanesh Farhad¹ , and Khosravi Hassan² 

¹Department of Remote Sensing and GIS, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Khuzestan, Iran

²Department of Arid and Mountain Reclamation Engineering, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Alborz, Iran.

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 24 March 2026

Revised 30 April 2026

Accepted 08 May 2026

Published online 23 September 2026

Keywords:

Drought

Remote Sensing Indices

SPEI

Time Series

Khuzestan

ABSTRACT

Objective: In this research, remote sensing indices and SPEI climatic index over 1-year, 5-year, and 10-year intervals were used to monitor and evaluate drought in Khuzestan Province.

Methods: Landsat data and climatic data from 13 meteorological stations over a 30-year period (1993-2023) were used. NDVI, LST, MNDWI, NDSI, and SPEI index were processed. Google Earth Engine was used to extract remote sensing indices, R-STUDIO was used to calculate SPEI, and Python was used for statistical analyses and plotting.

Results: The northern and eastern regions of province experienced higher drought severity over 5-year period. NDVI indicated that vegetation increased in central areas and decreased in the mountains. MNDWI showed fluctuations in water bodies, and NDSI indicated a decrease in snow cover. LST showed an increase in land surface temperature, and SPEI identified long-term drought periods at stations such as Abadan and Baghmalek; however, improved moisture conditions were observed in Dezful/Sardasht.

Conclusions: Remote sensing indices were more effective at detecting short-term (1-year) changes and providing spatial data, whereas SPEI was more suitable for analyzing long-term patterns (5 and 10 years) and identifying prolonged drought periods. Furthermore, increased LST, decreased NDSI, and fluctuations in water bodies indicate the combined effects of drought and climate warming in Khuzestan. Results showed that drought was not uniform across different regions of province. The northern and eastern regions were more vulnerable over the 5-year period, whereas central areas were in better condition due to their proximity to water resources and development of agricultural lands.

*Corresponding author, Email: s.zareie@scu.ac.ir

Cite this article: Zareie, S., Farhadmanesh, F., & Khosravi, H. (2026). An integrated approach using SPEI and remote sensing indices for drought monitoring and assessment. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, 5(3), 161-186. <https://doi.org/10.22034/nawee.2026.579655.1210>



© The Author(s).

Publisher: Gonbad Kavous University.

DOI: <https://doi.org/10.22034/nawee.2026.579655.1210>

Introduction

Meteorological indices such as SPI, SMDI, and SPEI, as well as remote sensing indices including NDVI, VCI, TCI, and VHI, are commonly used for drought assessment and monitoring. In recent years, remote sensing technology, by providing continuous, free, and spatially extensive data, has brought about a significant revolution in drought monitoring. For instance, Sun et al. (2023) demonstrated that temperature-based indices exhibit the most sensitive response to drought in arid regions, while moisture-based indices rank second in sensitivity. Furthermore, Alito and Kerebih (2024), using multiple remote sensing indices, reported a strong correlation (0.85) between the VHI and SPI indices, indicating the high potential of satellite data in drought estimation. Khuzestan Province, due to its specific climatic conditions, warm and arid nature, and high dependence on water resources for agriculture and industry, is at risk of drought. The use of remote sensing technology, particularly in combination with indices such as SPEI, enables continuous and accurate monitoring of drought conditions at a regional scale, which can provide decision-makers in agriculture, water resource management, and environmental sectors with powerful tools for planning and forecasting drought crises.

Materials and Methods

In this study, Khuzestan Province was selected as the study area. Satellite data were obtained from the Google Earth Engine (GEE) platform. For analysis of remote sensing indices, Landsat 5, 7, and 8 imagery over a thirty-year period from March 1, 1994, to March 19, 2024, was utilized. Satellite data for these indices were prepared for different time periods (1-year, 5-year, and 10-year intervals), and subsequently, time series for each index were extracted within the GEE. For drought analysis and assessment, 30-year climatic data, including monthly precipitation and monthly temperature from Khuzestan meteorological stations, were obtained from the Meteorological Organization. LST index, derived from Landsat imagery within GEE, was also employed. In this research, simple and multiple linear regression analyses were used to examine the relationships between remote sensing indices. To compare the accuracy of climatic indices and remote sensing indices, statistical analyses were conducted for 1-year, 5-year, and 10-year time intervals. For modeling and evaluation, GEE was used for extracting remote sensing indices, R-STUDIO was utilized for SPEI calculation, and Python within the Visual Studio Code (VSCODE) environment was employed for statistical analyses and diagram plotting. To assess the effects of drought in the province over a 30-year period, remote sensing indices including NDVI, LST, MNDWI, and NDSI, as well as the meteorological-climatic SPEI index, were used. In the first step, the required data were collected and necessary corrections were applied. In the second step, the desired remote sensing indices were extracted and their time series were calculated to reveal the drought impacts corresponding to each of these indices. In subsequent steps, PET and SPEI were calculated to examine drought effects from the perspective of climatic data (temperature and precipitation), and also to evaluate the performance of remote sensing and meteorological-climatic indices in better assessing this hazard.

Results and Discussion

NDSI, MNDWI, LST, and NDVI indices were calculated for 1-year, 5-year, and 10-year time intervals using GEE, while SPEI was processed using data from 13 meteorological stations. The area of different classes of remote sensing indices was extracted for 1-year, 5-year, and 10-year time periods, and the spatiotemporal changes of environmental factors (vegetation cover, land surface temperature, water bodies, and snow cover) under the influence

of drought were investigated. The results indicate that area of vegetation cover with good and moderate NDVI values has increased significantly across the province over entire study period, which may reflect the expansion of agricultural lands within the province during period under consideration. During this period, a decrease in area of regions with poor vegetation cover, as well as an increase in area of regions with no vegetation cover, was also observed across the province. LST results for 1-year, 5-year, and 10-year intervals show that area of low and moderate temperature classes has decreased over entire study period, while areas with high and very high temperatures have increased. The area of water bodies has shown an increasing trend over 5-year and 10-year intervals, whereas over 1-year intervals, it has exhibited variable areas depending on the amount of precipitation, which could be attributed to reduction of surface water resources due to drought. Snow cover area decreased from 770 km² to 514 km² over 10-year interval. This decreasing trend in snow-covered areas is also evident over 5-year intervals.

Conclusion

Drought zoning based on SPEI over 1-year and 5-year intervals indicates that drought intensity is not uniform across different regions of the province. Over 5-year interval, the northern and eastern regions fall within normal/moderate drought class, while the central regions are classified as severely wet/very wet. This pattern is also partially observed over 1-year interval. NDVI index showed that over 5-year and 10-year intervals, the area of good and moderate vegetation cover has increased across the province, which may be related to the development of agricultural lands in the central regions. MNDWI index indicated that area of water bodies has increased over 5-year and 10-year intervals, which is associated with construction of the Karkheh and Gotvand dams in the northern regions. According to the research findings, NDVI, MNDWI, LST, and NDSI indices demonstrated higher efficiency in detecting short-term changes and providing spatial data compared to SPEI; however, SPEI proved more suitable for long-term analysis. Furthermore, the increase in land surface temperature, decrease in snow cover, and fluctuations in water bodies indicate the combined effects of drought and climatic warming in Khuzestan Province. The results of this study revealed that drought has not been uniform across different regions of Khuzestan. The northern and eastern regions were more vulnerable over 5-year interval, while the central regions, due to their proximity to water resources and the development of agricultural lands, exhibited better conditions.

Author Contributions

Conceptualization, Zareie Sajad, Farhadmanesh Farhad and Khosravi Hassan; methodology, Zareie Sajad, Farhadmanesh Farhad and Khosravi Hassan; software, Farhadmanesh Farhad; validation, Zareie Sajad and Khosravi Hassan; formal analysis, Zareie Sajad and Farhadmanesh Farhad; investigation, Zareie Sajad, Farhadmanesh Farhad and Khosravi Hassan; resources, Zareie Sajad, Farhadmanesh Farhad and Khosravi Hassan; data curation, Farhadmanesh Farhad; writing—original draft preparation, Zareie Sajad, Farhadmanesh Farhad and Khosravi Hassan; writing—review and editing, Zareie Sajad, Farhadmanesh Farhad and Khosravi Hassan; visualization, Zareie Sajad and Khosravi Hassan; supervision, Zareie Sajad; project administration, Zareie Sajad. All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

Data available on request from the authors.

Acknowledgements

The authors would like to thank the esteemed reviewers for providing valuable structural and scientific comments.

Ethical Considerations

The authors avoided data fabrication, falsification, and plagiarism, and any form of misconduct.

Funding

This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.



یک رویکرد تلفیقی با استفاده از SPEI و شاخص‌های سنجش از دور برای پایش و ارزیابی خشکسالی

سجاد زارعی^{۱*}، فرهاد فرهادمنش^۱، حسن خسروی^۲

^۱گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.
^۲گروه احیا مناطق خشک و بیابانی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۱۲/۲۴ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۱۸ تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱ کلیدواژه‌ها: خشکسالی، شاخص‌های سنجش از دور SPEI، سری زمانی، خوزستان	هدف: در این پژوهش از شاخص‌های سنجش از دور و شاخص اقلیمی SPEI در بازه‌های ۱، ۵ و ۱۰ ساله برای پایش و ارزیابی خشکسالی در استان خوزستان استفاده شد. مواد و روش‌ها: داده‌های لندست و داده‌های اقلیمی ۱۳ ایستگاه هواشناسی برای دوره ۳۰ ساله (۱۳۷۲-۱۴۰۲) استفاده شدند. شاخص‌های NDVI، LST، MNDWI، NDSI و شاخص SPEI پردازش شدند. Google Earth Engine برای استخراج شاخص‌های سنجش از دور، R-STUDIO برای محاسبه SPEI و Python برای انجام تحلیل‌های آماری و ترسیم نمودارها استفاده شدند. نتایج: مناطق شمالی و شرقی استان در بازه ۵ ساله، درجه خشکسالی بیشتری داشتند. NDVI نشان داد که پوشش گیاهی در مناطق مرکزی افزایش و در کوهستان‌ها کاهش یافته است. MNDWI نوسانات پهنه‌های آبی و NDSI کاهش پوشش برف را نشان دادند. LST افزایش دمای سطح زمین را نشان داد و SPEI دوره‌های طولانی خشکسالی را در ایستگاه‌هایی مانند آبادان و باغملک شناسایی کرد، اما در دزفول/سردشت بهبود وضعیت رطوبتی مشاهده شد. نتیجه‌گیری: شاخص‌های سنجش از دور در آشکارسازی تغییرات کوتاه‌مدت (۱ ساله) و ارائه داده‌های مکانی کارایی بیشتری داشتند، در حالی که SPEI برای تحلیل الگوهای بلندمدت (۵ و ۱۰ ساله) و شناسایی دوره‌های خشکسالی بلندمدت مناسب‌تر بود. همچنین، افزایش LST، کاهش NDSI و نوسانات پهنه‌های آبی نشان‌دهنده تأثیرات ترکیبی خشکسالی و گرمایش اقلیمی در خوزستان است. نتایج نشان داد که خشکسالی در مناطق مختلف استان یکنواخت نبوده است. مناطق شمالی و شرقی در بازه ۵ ساله آسیب‌پذیرتر بوده‌اند، در حالی که مناطق مرکزی به دلیل نزدیکی به منابع آبی و توسعه اراضی کشاورزی، وضعیت بهتری داشته‌اند.

*نویسنده مسئول، Email: s.zareie@scu.ac.ir

استناد: زارعی، سجاد؛ فرهادمنش، فرهاد، و خسروی، حسن (۱۴۰۵). یک رویکرد تلفیقی با استفاده از SPEI و شاخص‌های سنجش از دور برای پایش و ارزیابی خشکسالی. *رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط زیست*، ۵ (۳)، ۱۶۱-۱۸۶.

<https://doi.org/10.22034/nawee.2026.579655.1210>

© نویسندگان.

ناشر: دانشگاه گنبد کاووس.



مقدمه

خشکسالی به عنوان یکی از پیچیده‌ترین و خسارت‌بارترین پدیده‌های طبیعی، به دلیل تغییرات اقلیمی و بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب، به یک چالش جدی در مناطق گرم و خشک جهان تبدیل شده است. این پدیده برخلاف سیل و زلزله که ناگهانی رخ می‌دهند، به تدریج ظاهر شده و اثرات آن بر منابع آب، کشاورزی، اقتصاد جوامع انسانی، تدریجی و طولانی مدت است. مناطق دارای اقلیم گرم و خشک، صنایع بزرگ و اکوسیستم‌های حساس مانند تالاب‌ها و جنگل‌ها، که به کشاورزی آبی نیز وابسته هستند، از آسیب‌پذیرترین مناطق در برابر خشکسالی محسوب می‌شوند. خشکسالی‌های مکرر نه تنها باعث کاهش شدید منابع آب سطحی و زیرزمینی شده، بلکه پیامدهایی چون ریزگردها، تخریب اراضی کشاورزی، مهاجرت روستاییان و بحران‌های اقتصادی-اجتماعی را به همراه دارد. بنابراین، پایش دقیق و به‌موقع خشکسالی، نه یک انتخاب، بلکه یک ضرورت اجتناب‌ناپذیر برای مدیریت پایدار منابع و کاهش آسیب‌پذیری منطقه است.

برای ارزیابی و پایش خشکسالی، شاخص‌های متعددی توسعه یافته‌اند که هر یک جنبه‌های متفاوتی از این پدیده را اندازه‌گیری می‌کنند. این شاخص‌ها به طور کلی به دو دسته تقسیم می‌شوند: شاخص‌های هواشناسی که بر اساس داده‌های بارش، رطوبت و دما محاسبه می‌شوند و کمبود بارش را نسبت به دوره بلندمدت نشان می‌دهند (مانند شاخص استاندارد بارش (SPI) (ده‌مده و همکاران، ۱۴۰۵)، شاخص خشکسالی رطوبت خاک (SMDI) (حاجی آبادی و همکاران، ۱۴۰۴) و شاخص استاندارد بارش-تبخیر و تعرق (SPEI) (Sabzevari et al., 2025))، و شاخص‌های سنجش از دوری که با اندازه‌گیری بازتابش و تابش حرارتی سطح زمین، وضعیت پوشش گیاهی، دمای سطح و رطوبت خاک را منعکس می‌کنند (مانند شاخص تفاوت نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI)، شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI)، شاخص وضعیت دمایی (TCI) و شاخص سلامت گیاهی (VHI)). در میان شاخص‌های هواشناسی، SPEI به دلیل در نظر گرفتن همزمان دما و بارش و همچنین توانایی در نشان دادن تأثیر گرمایش بر تشدید خشکسالی، در سال‌های اخیر مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته است (Wan et al., 2023). از سوی دیگر، SPI به عنوان ساده‌ترین شاخص بر اساس بارش عمل می‌کند و برای پایش خشکسالی هواشناسی در کوتاه‌مدت مناسب است.

در سال‌های اخیر، فناوری سنجش از دور با فراهم آوردن داده‌های پیوسته، رایگان و با پوشش مکانی وسیع، تحولی عظیم در پایش خشکسالی ایجاد کرده است. برخلاف داده‌های ایستگاه‌های زمینی که محدود و پراکنده هستند، تصاویر ماهواره‌ای امکان پایش خشکسالی را در تمامی مناطق فراهم می‌کنند. شاخص‌های سنجش از دوری مبتنی بر پوشش گیاهی، دمای سطح و رطوبت خاک، می‌توانند واکنش پوشش گیاهی به تنش رطوبتی را با دقت بالا نشان دهند. به عنوان مثال، Sun و همکاران (۲۰۲۳) نشان دادند که شاخص‌های مبتنی بر دما، حساسترین پاسخ را به خشکسالی در مناطق خشک دارند، در حالی که شاخص‌های مبتنی بر رطوبت در رتبه دوم قرار می‌گیرند. همچنین، Alito و Kerebih (۲۰۲۴) با استفاده از شاخص‌های چندگانه سنجش از دور، همبستگی قوی (۰/۸۵) بین شاخص VHI و SPI نتیجه گرفتند که داده‌های ماهواره‌ای در برآورد خشکسالی پتانسیل بالایی دارند. علی‌رغم پیشرفت‌های قابل‌توجه، همچنان شکاف پژوهشی قابل‌توجهی در زمینه انتخاب مناسب‌ترین ترکیب از شاخص‌های سنجش از دوری و مقیاس زمانی بهینه برای پایش خشکسالی در اقلیم گرم و خشک ایران، به ویژه استان خوزستان وجود دارد. مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد که اکثر پژوهش‌ها یا صرفاً به مقایسه یک یا دو شاخص محدود شده‌اند (یزدانپناه و همکاران، ۱۳۹۳؛ عقیقی، ۱۴۰۰) و یا منطقه مورد مطالعه آنها با شرایط اقلیمی استان خوزستان متفاوت بوده است (کروژده و همکاران، ۱۴۰۴؛ شجاعی شیرازی و همکاران، ۱۴۰۴). همچنین، پژوهش‌های بین‌المللی (Zhao et al., 2023; Cheng et al., Wu et al., 2024) بر اهمیت تلفیق داده‌های سنجش از دور با مدل‌های تبخیر و تعرق برای بهبود دقت شاخص SPEI تأکید کرده‌اند، اما تاکنون مطالعه‌ای در خوزستان نشان نداده است که کدام ترکیب از شاخص‌های سنجش از دوری، بالاترین همبستگی را با خشکسالی هواشناسی در اراضی با کاربری‌های مختلف دارد. بنابراین، هدف این تحقیق، مقایسه جامع عملکرد شاخص‌های سنجش از دوری در کنار شاخص‌های هواشناسی SPEI و SPI در مقیاس‌های زمانی متعدد و در شرایط اقلیمی خاص استان خوزستان است تا بتواند ضمن پر کردن خلا پژوهشی موجود، ابزار عملیاتی برای مدیریت منابع آب، برنامه‌ریزی کشاورزی و کاهش خسارات ناشی از خشکسالی در این استان کلیدی فراهم آورد.

Sabzevari et al (2025) در مطالعه‌ای با هدف بررسی و تحلیل خشکسالی در منطقه خرم‌آباد، شاخص‌های SPI و SPEI را با استفاده از داده‌های بارش و دمای ثبت‌شده در ایستگاه سینوپتیک طی دوره ۱۹۹۹ تا ۲۰۲۲ محاسبه کردند. نتایج نشان داد که در طول دوره مورد مطالعه، نوسانات قابل توجهی در وضعیت خشکسالی و ترسالی منطقه رخ داده است. هر دو شاخص SPI و SPEI روند کاهشی را نشان دادند، با این حال این روند از نظر آماری معنی‌دار نبود. نویسندگان بر اهمیت پایش مستمر خشکسالی و اتخاذ راهبردهای سازگار مدیریت منابع آب با توجه به تغییرپذیری اقلیمی تأکید کردند. با وجود اهمیت تحلیل زمانی خشکسالی، مقادیر شاخص‌هایی نظیر SPI و SPEI معمولاً بر اساس داده‌های ثبت‌شده در ایستگاه‌های هواشناسی محاسبه می‌شوند و ماهیتی نقطه‌ای دارند. بنابراین، برای بررسی الگوی مکانی خشکسالی، تبدیل داده‌های نقطه‌ای به سطوح پیوسته مکانی و تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی ضروری است. در همین راستا، مرادی و همکاران (۱۴۰۲) تغییرات زمانی و مکانی خشکسالی هواشناسی را در حوزه آبخیز کارون با استفاده از شاخص SPI بررسی کردند. در این پژوهش از داده‌های بارندگی ۵۸ ایستگاه باران‌سنجی و ۱۱ ایستگاه سینوپتیک با طول دوره آماری ۳۰ ساله استفاده شد. سپس روش‌های مختلف درون‌یابی شامل کریجینگ، کوکریجینگ، عکس فاصله وزنی (IDW) و تابع شعاعی (RBF) برای تهیه نقشه‌های مکانی خشکسالی مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج نشان داد که روش کوکریجینگ با مقدار خطای حدود ۳۲/۰، عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌های مورد بررسی داشته است. این نتایج اهمیت انتخاب روش مناسب درون‌یابی را در تبدیل داده‌های نقطه‌ای خشکسالی به اطلاعات مکانی و تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی نشان می‌دهد. رزمخواه (۱۴۰۱) تغییرات منطقه‌ای شاخص خشکسالی SPI سه‌ماهه را با استفاده از تکنیک زمین‌آماري کریجینگ در استان فارس بررسی کرد. در این مطالعه، پس از محاسبه شاخص SPI سه‌ماهه برای ایستگاه‌های سینوپتیک، نیم‌واریوگرام تجربی داده‌ها محاسبه و ۱۷ مدل مختلف کریجینگ بر داده‌ها برازش داده شد. سپس با استفاده از روش ارزیابی متقاطع، خطای تخمین مدل‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مدل‌های خطی، توانی، ریشه دوم، لگاریتمی و گوسی در چارچوب کریجینگ معمولی از قابلیت مناسبی برای برازش داده‌های SPI سه‌ماهه برخوردارند و مدل گوسی نیز یکی از مدل‌های مناسب برای منطقه مورد مطالعه شناخته شد. عبادی‌نهری و همکاران (۱۴۰۲) با ارائه روشی نوین برای ارزیابی و پایش جامع خشکسالی حوضه آبریز دریاچه ارومیه با استفاده از شاخص تلفیقی خشکسالی SDI و آنالیز مولفه اصلی (PCA) به این نتیجه رسیدند که شاخص SDI به عنوان شاخص جامع پایش خشکسالی، بازتاب‌کننده اصلی اثرات خشکسالی بر کشاورزی می‌باشد. جهانگیری و همکاران (۱۴۰۳) به بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر روند خشکسالی در حوضه آبریز کارون سه با استفاده از شاخص‌های SPEI و SPI پرداختند. تایج نشان داد که در سناریوهای گرمایش آتی، احتمال تکرار و تداوم دوره‌های خشکسالی در حوضه کارون سه افزایش می‌یابد و نقش دما در تشدید کمبود رطوبتی، از طریق شاخص SPEI بهتر نمایان می‌شود. این پژوهش، اهمیت استفاده از SPEI را در تحلیل خشکسالی‌های مرتبط با تغییر اقلیم در جنوب غرب ایران برجسته می‌کند. شجاعی شیر و همکاران (۱۴۰۴) در پژوهشی جامع به ارزیابی و پایش خشکسالی در استان زنجان با استفاده از ترکیب داده‌های هواشناسی (SPI و SPEI) و ۵ شاخص سنجش از دوری (VCI، EVI، NDVI، TCI و VHI) پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که در میان شاخص‌های سنجش از دوری، شاخص NDVI بالاترین همبستگی را با شاخص‌های هواشناسی نشان داد و به عنوان کارآمدترین ابزار برای پایش سریع خشکسالی معرفی شد. **کروژده و همکاران (۱۴۰۴)** با بهره‌گیری همزمان از شاخص SPEI و شاخص گیاهی VCI در استان خراسان رضوی، توانستند همبستگی معناداری بین تنش رطوبتی و پاسخ پوشش گیاهی در مقیاس‌های زمانی مختلف خشکسالی شناسایی نمایند. نتایج نشان داد که تلفیق داده‌های هواشناسی و ماهواره‌ای، دقت پایش خشکسالی را به طور قابل توجهی افزایش داده و امکان تفکیک مناطق با شدت‌های مختلف خشکسالی را فراهم می‌آورد. رویکرد به کار رفته در پژوهش مذکور، مؤید آن است که به کارگیری همزمان شاخص‌های هواشناسی (نظیر SPEI) و شاخص‌های گیاهی حاصل از تصاویر ماهواره‌ای (نظیر VCI)، می‌تواند به عنوان الگویی کارآمد در مطالعات منطقه‌ای پایش خشکسالی مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین، در پژوهش حاضر نیز تلاش می‌شود تا با الهام از این روش ترکیبی، ضمن پوشش نواقص داده‌های زمینی محدود، نقشه‌های دقیق‌تری از وضعیت خشکسالی در منطقه مورد مطالعه ارائه گردد. *Wan et al (2023)* به بررسی ویژگی‌های خشکسالی و عوامل غالب آب و هوایی مؤثر بر آن بین سالهای ۱۹۷۹ تا ۲۰۱۸ با استفاده از

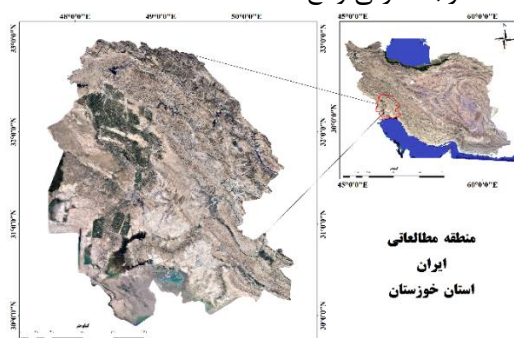
شاخص SPEI و داده‌های اقلیمی پرداختند. نتایج نشان داد که تبخیر و تعرق بالقوه (PET) عامل غالب در افزایش خشکسالی‌ها بوده و با شدت و مدت خشکسالی ارتباط مثبت دارد. Sun *et al* (2023) به بررسی تأثیر خشکسالی بر شاخص‌های سنجش از دور پرداختند. در این تحقیق، از داده‌های MODIS برای محاسبه شاخص‌های مبتنی بر دما، رطوبت و سبزی استفاده شد. نتایج نشان داد که پاسخ شاخص‌ها به تنش خشکسالی در مناطق خشک، بیشتر و در مناطق مرطوب، کمترین بوده است. از میان شاخص‌ها، شاخص مبتنی بر دما حساس‌ترین و شاخص مبتنی بر رطوبت در رتبه دوم قرار داشت (Meseguer- *et al* (2024). Ruiz، شاخص‌های SPI و SPEI طی چهار دهه را با هدف ارزیابی ارتباط این شاخص‌ها با الگوهای آب و هوایی و تحلیل روند زمانی آنها مقایسه کردند. یافته‌ها حاکی از آن است که SPEI شاخص مناسبی برای مناطق ساحلی و SPEI برای مناطق خشکی داخلی و دور از سواحل است. Wu و همکاران (۲۰۲۴) واکنش پوشش گیاهی به خشکسالی هواشناسی را با استفاده از شاخص‌های SPEI و NDVI مطالعه کردند. نتایج نشان داد که پوشش گیاهی در ارتفاعات بالاتر نسبت به خشکسالی حساسیت بیشتری دارد و از بین رفتن پوشش گیاهی به مدت خشکسالی وابسته است، نه شدت آن. Kerebih and Alito (2024) شدت خشکسالی را با استفاده از شاخص‌های چندگانه سنجش از دور مطالعه کردند. نتایج نشان داد که خشکسالی شدید در سالهای ۱۹۸۴، ۲۰۰۹ و ۲۰۱۴ رخ داده است. ضریب همبستگی قوی بین شاخص‌های NDVI و LST با ۰/۹۳، VCI و TCI با ۰/۷۱ و VHI و SPI با ۰/۸۵ بدست آمد.

استان خوزستان به دلیل وجود جنگل‌ها، زمین‌های کشاورزی، مزارع نیشکر، رودخانه‌های متعدد و صنایع گوناگون، که نیازمند بررسی آثار خشکسالی و ارائه راهکارهایی برای کاهش اثرات این پدیده بر محیط زیست آن است به عنوان منطقه مورد مطالعه انتخاب شد. این استان به دلیل شرایط اقلیمی خاص، گرم و خشک بودن، و وابستگی بالا به منابع آبی برای کشاورزی و صنایع، در معرض خطر خشکسالی قرار دارد. خشکسالی در این منطقه می‌تواند اثرات منفی گسترده‌ای بر منابع آبی، زمین‌های کشاورزی، محیط زیست و اقتصاد منطقه داشته باشد. بنابراین، ارزیابی دقیق خشکسالی و شناسایی تأثیرات آن بر فاکتورهای اقلیمی و محیطی این استان امری حیاتی است. استفاده از فناوری سنجش از دور به‌ویژه در ترکیب با شاخص‌هایی مانند SPEI، این امکان را فراهم می‌آورد که به طور مداوم و دقیق وضعیت خشکسالی در سطح منطقه‌ای پایش شود، که می‌تواند به تصمیم‌گیرندگان در زمینه کشاورزی، مدیریت منابع آب و محیط زیست، ابزارهای قدرتمندی برای برنامه‌ریزی و پیش‌بینی بحران‌های خشکسالی ارائه دهند. هدف این تحقیق بررسی میزان و آثار خشکسالی در استان خوزستان در یک بازه زمانی مشخص، مقایسه شاخص‌های سنجش از دور و شاخص‌های اقلیمی برای ارزیابی کارایی آنها در بررسی خشکسالی می‌باشد.

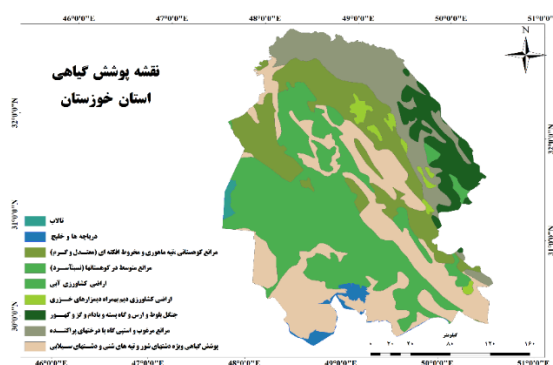
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

در این پژوهش استان خوزستان به عنوان منطقه مطالعاتی انتخاب شد (شکل ۱). این منطقه در بازه عرض جغرافیایی ۳۰ تا ۳۳ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۴۷ تا ۵۰ درجه شرقی واقع شده است.

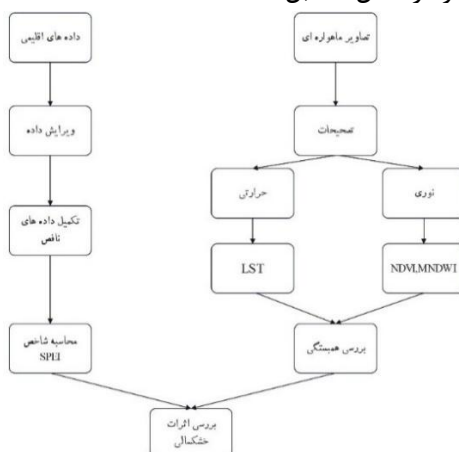


شکل ۱- موقعیت مکانی منطقه مطالعاتی، استان خوزستان (یافته‌های پژوهش).



روش تحقیق

فلوجارت کلی، مراحل انجام پژوهش حاضر در شکل ۳ قابل مشاهده است.



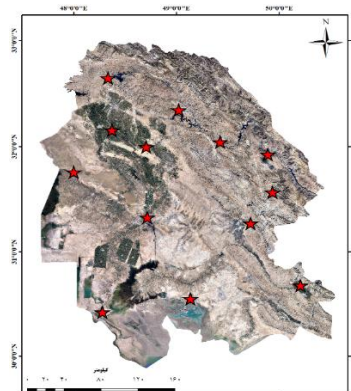
شکل ۳- مراحل کلی فلوجارت پیشنهاد شده پژوهش حاضر (یافته‌های پژوهش).

برای انجام این پژوهش، داده‌های ماهواره‌ای از سامانه GEE به دست آمدند. همچنین برای محاسبه شاخص SPEI از داده‌های دما و بارش ماهانه دریافتی از سازمان هواشناسی استان استفاده شد. برای تحلیل شاخص‌های سنجش از دور از تصاویر لندست ۵، ۷ و ۸ در یک بازه زمانی سی ساله ۱۰ اسفند ۱۳۷۲ تا ۲۹ اسفند ۱۴۰۲ استفاده شد. داده‌های ماهواره‌ای مربوط به این شاخص‌ها برای دوره‌های زمانی مختلف (یک‌ساله، پنج‌ساله و ده‌ساله) تهیه شده و سپس سری‌های زمانی هر شاخص در این

سامانه استخراج گردید. قدرت تفکیک مکانی سنجنده‌های مورد استفاده در باندهای مرئی و مادون قرمز ۳۰ متر و در باند حرارتی ۶۰، ۱۰۰ و ۱۲۰ متر می‌باشند.

برای تحلیل و ارزیابی خشکسالی، داده‌های اقلیمی دوره ۳۰ ساله شامل بارش ماهیانه و دمای ماهیانه ایستگاه‌های هواشناسی خوزستان از سازمان هواشناسی دریافت شد. داده‌های اقلیمی بارش و دما، در برخی از ایستگاه‌های هواشناسی به‌طور کامل در دسترس نیستند. برای تکمیل داده‌های مفقود از روش جایگذاری چندگانه توسط معادلات زنجیره‌ای (MICE)^۱ استفاده شد. بر اساس مدل‌های احتمالاتی و رگرسیونی، این روش با ایجاد چندین جایگزین برای داده‌های گمشده، موجب افزایش دقت و قابلیت اطمینان تحلیل‌های اقلیمی می‌شود. MICE بصورت مراحل زیر از رویکرد تکراری برای پر کردن داده‌های گمشده استفاده می‌کند: مقداردهی اولیه، مدل‌سازی داده‌های گمشده، جایگزینی مقادیر تخمینی، تکرار فرآیند و میانگین‌گیری.

دلیل نقص و پراکندگی داده‌ها در بسیاری از ایستگاه‌های هواشناسی، امکان دستیابی به مجموعه داده‌ی پیوسته و کامل به‌منظور تحلیل تغییرات اقلیمی و ارزیابی شاخص‌های مرتبط فراهم نبود. از این‌رو، ایستگاه‌هایی انتخاب شدند که ضمن دارا بودن داده‌های کامل، بتوانند بازه‌ی زمانی مناسبی را پوشش دهند. با توجه به محدودیت‌های موجود برای تحلیل داده‌ها، در نهایت یک دوره ۲۲ ساله انتخاب شد. در فرآیند گزینش ایستگاه‌ها، تلاش شد تا از نظر ارتفاعی پراکندگی آنها در مناطق مختلف استان حفظ شود تا بتوان اثرات تغییرات جغرافیایی را در تحلیل‌ها مدنظر قرار داد. انتخاب این ایستگاه‌ها بر مبنای معیارهایی همچون دسترسی به داده‌های کامل، پراکندگی جغرافیایی مناسب، و امکان تعمیم نتایج به کل منطقه انجام گرفت. این انتخاب این امکان را می‌دهد که با وجود محدودیت‌های داده‌ای، تحلیلی معتبر و جامع از تغییرات اقلیمی منطقه ارائه دهد. موقعیت ایستگاه‌های مورد استفاده در استان در شکل ۴ مشخص گردیده است.



شکل ۴- موقعیت ایستگاه‌های منتخب هواشناسی در استان خوزستان (یافته‌های پژوهش).

نمونه‌برداری سیستماتیک

برای انجام تحلیل‌های آماری و مدل‌سازی، از روش نمونه‌برداری سیستماتیک استفاده شده است. این روش به دلیل توانایی در کاهش حجم داده‌های پردازش‌شده و حفظ نمایندگی آماری کافی از داده‌ها انتخاب شده است. به عنوان مثال، برای انجام تحلیل رگرسیون بین شاخص‌های NDVI و LST، حدود یک میلیون نمونه از تصاویر ماهواره‌ای برداشت شده است. در مورد استفاده از نمونه‌برداری پیکسلی برای تحلیل رگرسیون، لازم به ذکر است که محاسبه ضریب تعیین (R^2) و بررسی همبستگی دقیق بین شاخص‌های سنجش از دور (مانند LST و NDVI) و SPEI، نیازمند استخراج مقادیر متناظر در یک فضای آماری مشترک است. از آنجا که داده‌های ماهواره‌ای به‌صورت رستر هستند، و تعداد سلول کل منطقه برای تحلیل‌های آماری زیاد هستند، نمونه‌برداری انجام شد و رگرسیون بر روی نمونه‌ها اجرا شد. بررسی بصری تصاویر شاخص‌ها، تنها می‌تواند الگوهای کلی را نشان دهد، اما برای دستیابی به مقدار عددی دقیق همبستگی و تعیین میزان تأثیرگذاری هر شاخص بر دیگری، استخراج نمونه‌های پیکسلی (شامل مقادیر متناظر پیکسل‌های مورد نظر در تصاویر مختلف) الزامی است.

^۱. Multivariate Imputation by Chained Equations

شاخص دمای سطح زمین

از شاخص دمای سطح زمین (LST) در سامانه GEE که بر اساس تصاویر لندست می‌باشد استفاده شد، که علاوه بر تسریع در بدست آوردن این شاخص، از خطاهای احتمالی در محاسبه دستی جلوگیری می‌کند. این شاخص بر اساس روش تک کاناله با استفاده از یک باند حرارتی محاسبه شده است (رابطه ۱) (Asghari, 2024).

$$T_s = \gamma \left[\frac{1}{\varepsilon} (\psi_1 L_{sen} + \psi_2) + \psi_3 \right] + (T_{sen} - \gamma L_{sen}) \quad \text{رابطه ۱}$$

اینجا، T_s نشان‌دهنده (K) LST، ε نشان‌دهنده تابش سطح، و γ نشان‌دهنده پارامتر تابع پلانک است. پارامترهای ψ_1 ، ψ_2 و ψ_3 به توابع جوی نسبت داده می‌شوند که با استفاده از رابطه ۳ به دست می‌آیند، در حالی که L_{sen} نشان‌دهنده تابش طیفی دریافتی توسط سنجنده بر حسب وات بر متر مربع بر استرادیان بر میکرومتر ($W/m^2/sr/\mu m$) است.

$$\gamma = \left\{ \frac{K_2}{T_{sen}^2} \left[\frac{\lambda^4}{K_1} + \lambda^{-1} \right] \right\}^{-1} \quad \text{رابطه ۲}$$

اینجا، K_1 و K_2 ضرایب ثابت برای باندهای حرارتی در جدول ۱ هستند، λ نشان‌دهنده طول موج موثر باند حرارتی بر حسب میکرومتر (μm) است و T_{sen} دمای تشعشعی بر حسب کلوین است که با استفاده از رابطه ۴ محاسبه می‌شود.

جدول ۱- ثابت‌های استفاده شده برای رابطه شماره ۲ (Asghari, 2024).

ثابت	باند ۱۰	باند ۱۱
K_1	۷۷۴/۸۸۵۳	۴۸۰/۸۸۸۳
K_2	۱۳۲۱/۰۷۸۹	۱۲۰۱/۱۴۴۲

$$\psi_1 = \frac{1}{\tau}, \psi_2 = -L^{\uparrow} - \frac{L^{\downarrow}}{\tau}, \psi_3 = L^{\downarrow} \quad \text{رابطه ۳}$$

$$T_{sen} = \frac{K^2}{\ln\left(\frac{K_1}{L^{\downarrow}} + 1\right)} \quad \text{رابطه ۴}$$

در رابطه شماره ۳، τ نشان‌دهنده انتقال جو به درصد است، در حالی که $L^{\uparrow}$ و $L^{\downarrow}$ نشان‌دهنده تابش رو به بالا و رو به پایین جو هستند که بر حسب وات بر متر مربع (W/m^2) اندازه‌گیری می‌شوند. توابع جوی با استفاده از وب‌سایت محاسبه پارامترهای تصحیح جو ناسا برای سنسورهای حرارتی لندست محاسبه شده‌اند (جدول ۲).

جدول ۲- پارامترهای تصحیح جو برای منطقه مورد مطالعه (Asghari, 2024).

بخار آب	L'	L'	τ
۰/۲۱	۰/۵۷	۰/۳۲	۰/۹۵

همبستگی بین شاخص‌های سنجش از دور

در این تحقیق، از رگرسیون خطی ساده و چندمتغیره برای بررسی روابط بین شاخص‌های سنجش از دور استفاده شده است. مدل رگرسیون خطی ساده برای تحلیل‌های دو متغیره و مدل چندمتغیره برای بررسی اثر ترکیبی چند شاخص بر یکدیگر استفاده شد. معادله رگرسیون خطی ساده به شکل زیر می‌باشد (رابطه ۵):

$$y = a_0 + a_1 x + \varepsilon \quad \text{رابطه ۵}$$

اینجا، y متغیر وابسته (شاخص)، x متغیر مستقل، a_0 عرض از مبدا، a_1 شیب خط رگرسیون و ε خطای مدل می‌باشد.

تحلیل روابط بین شاخص‌های سنجش از دور

در این تحقیق، روابط بین شاخص‌های سنجش از دوری و همچنین شاخص اقلیمی با استفاده از رگرسیون خطی تحلیل شده است. با این حال، ممکن است برخی از روابط بین شاخص‌ها، مانند رابطه LST و NDVI، در سطح استان به دلیل تأثیر کم دما

بر تغییرات پوشش گیاهی معنادار نباشند. برای مثال، در حالیکه پوشش گیاهی می‌تواند بر دما تأثیرگذار باشد (مانند تأثیر جنگل‌ها بر کاهش دما)، افزایش دما در بازه‌های زمانی بلند مدت (مانند دو درجه در ۱۰۰ سال گذشته) ممکن است تأثیر چشمگیری بر تغییرات پوشش گیاهی نداشته باشد. یکی از چالش‌های احتمالی در تحلیل روابط بین شاخص‌ها در این تحقیق، استفاده از مقیاس مکانی سطح کل استان است. روابط بین شاخص‌ها ممکن است در مقیاس‌های کوچک‌تر مانند شهرستان‌ها متفاوت ظاهر شوند. برای مثال، در مناطق شمالی استان که پوشش گیاهی بیشتری دارند، تأثیر دما ممکن است کم‌رنگ‌تر باشد. و در مقابل، در مناطق جنوبی با پوشش گیاهی کمتر، تغییرات دما ممکن است تأثیر بیشتری بر شاخص‌های دیگر داشته باشد. برای ارزیابی اثرات خشکسالی در استان برای یک دوره ۳۰ ساله از شاخص‌های سنجش از دوری MNDWI, LST, NDVI و همچنین شاخص هواشناسی-اقلیمی SPEI استفاده شد. SPEI (شاخص استاندارد شده تبخیر و تعرق بارندگی) مبنای آن بر اختلاف بین نزولات جوی و تبخیر و تعرق می‌باشد. در گام اول اقدام به جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز (تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های اقلیمی از ایستگاه‌های زمینی) و انجام تصحیحات لازم شد. در دومین گام شاخص‌های سنجش از دوری مورد نظر استخراج و سری زمانی آنها محاسبه گردید تا اثرات خشکسالی منطبق بر هر کدام از این شاخص‌ها آشکار گردد. در گام‌های بعدی PET و SPEI محاسبه شدند تا اثرات خشکسالی از دید داده‌های اقلیمی (دما و بارش) بررسی شوند و همچنین کارایی شاخص‌های سنجش از دور و هواشناسی-اقلیمی در ارزیابی بهتر این خطر مورد سنجش قرار گیرند.

شاخص‌های آب

برای ارزیابی پهنه‌های آبی، شاخص‌های متعددی توسعه داده شده که هر کدام به بخشی از ویژگی‌های آب در تصاویر ماهواره‌ای می‌پردازد.

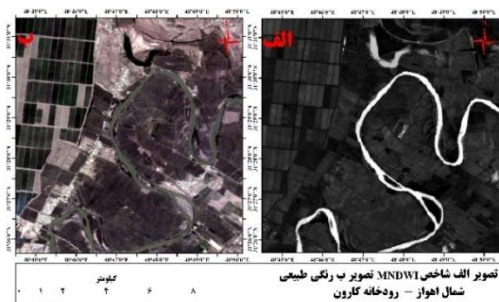
شاخص آب تفاضل نرمال شده بهینه شده (MNDWI)^۱

این شاخص که تعمیم یافته شاخص NDWI (شکل ۵) می‌باشد جهت آشکارسازی پهنه‌های آبی مانند دریاچه‌ها، رودخانه‌ها و سدها توسعه داده شده است. دلیل اصلاح این شاخص، حساسیت شاخص NDWI به محتوای آب پوشش گیاهی است. در شاخص اصلاح شده به جای باند مادون قرمز نزدیک، باند مادون قرمز میانی (جدول ۳) به دلایل ویژگی‌های جذب و بازتاب خاص خود برای آب استفاده می‌شود. محدوده این شاخص بین ۱- تا ۱ می‌باشد. شکل ۵ نمونه‌ای از شمال شهر اهواز و رودخانه کارون در باندهای مرئی و بعد از اعمال شاخص MNDWI می‌باشد.

جدول ۳- باندهای مورد استفاده دو شاخص NDWI و MNDWI (Cheng, 2023).

فرمول	شاخص
$NDWI = \frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR}$	NDWI
$MNDWI = \frac{GREEN - MIR}{GREEN + MIR}$	MNDWI
$MNDWI = \frac{GREEN - SWIR}{GREEN + SWIR}$	

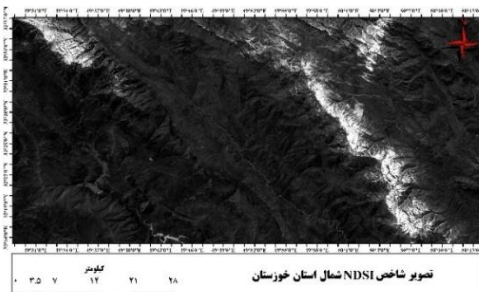
^۱. Modified Normalized Difference Water Index



شکل ۵- بارزسازی پهنه‌های آبی (رودخانه کارون) بوسیله شاخص MNDWI (یافته‌های پژوهش).

شاخص برف تفاضل نرمال شده (NDSI)^۱

بوسیله شاخص نرمال شده تفاضل برف (NDSI) می‌توان آشکارسازی برف در تصاویر ماهواره‌ای را با استفاده از باندهای سبز و مادون قرمز کوتاه انجام داد (شکل ۶). تخمین مساحت برف برای بسیاری از کاربردها مانند مسائل هیدرولوژیکی، مخاطرات طبیعی، مدیریت منابع آب و مطالعات تغییر اقلیم حیاتی و کاربردی می‌باشد. این شاخص محدوده‌ای بین ۱- تا ۱ دارد.



شکل ۶- بارزسازی برف در ارتفاعات استان خوزستان با استفاده از شاخص NDSI (یافته‌های پژوهش).

شاخص تبخیر و تعرق-بارش استاندارد شده (SPEI)^۲

شاخص SPEI از نظر کارکرد مشابه شاخص SPI^۳ است اما علاوه بر بارش، تاثیرات دما و تبخیر-تعرق را نیز در نظر می‌گیرد. SPEI با استفاده از تفاوت بین بارش و تبخیر-تعرق بالقوه (PET) محاسبه می‌شود (رابطه ۶).

$$D_i = P_i - PET_i \quad \text{رابطه (۶)}$$

که اینجا، P_i بارش در ماه i ، PET_i تبخیر-تعرق بالقوه در ماه i و D_i مازاد یا کسری رطوبت می‌باشد. این شاخص در مقیاس‌های زمانی ۱، ۳، ۶، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماه و حتی بیشتر از آن نیز محاسبه می‌شود. مقادیر مثبت این شاخص بیانگر مثبت بودن بیلان آب و مقادیر منفی آن بیانگر منفی بودن بیلان آب می‌باشد. طبقات خشکسالی در جدول ۴ ذکر گردیده است.

جدول ۴. طبقات خشکسالی شاخص SPEI (Potop et al., 2014).

میزان SPEI	دسته بندی اقلیمی	میزان SPEI	دسته بندی اقلیمی
۱/۴۹- تا ۱-	خشکسالی متوسط	بزرگتر از ۲	ترسالی خیلی شدید
۱/۹۹- تا ۱/۵-	خشکسالی شدید	۱/۵ تا ۱/۹۹	ترسالی شدید
بزرگتر از ۲-	خشکسالی خیلی شدید	۱/۴۹ تا ۱	ترسالی متوسط
		۰/۹۹ تا -۰/۹۹	عادی

^۱. Normalized Difference Snow Index

^۲. Standardized Precipitation Evapotranspiration Index

^۳. Standardized Precipitation Index

در این پژوهش، ابتدا داده‌های اقلیمی مورد نیاز جمع‌آوری شد. سپس برای محاسبه SPEI، داده‌ها بر اساس ماه، سال و ایستگاه هواشناسی دسته‌بندی شدند. برای رفع مشکل نقص داده‌های تعدادی از ایستگاه‌ها، اقدام به تکمیل آنها به روش MICE گردید. در نهایت، برای محاسبه SPEI از کدنویسی در محیط R-STUDIO استفاده شد. این شاخص برای مقایسه با شاخص‌های سنجش از دور در تحلیل نهایی مورد استفاده قرار گرفت. SPEI با استفاده از داده‌های بارش و دمای ماهیانه ایستگاه‌های هواشناسی محاسبه شد. محاسبه این شاخص در بازه زمانی ۱ ساله، ۵ ساله و ۱۰ ساله انجام شد تا روند خشکسالی بررسی شود. تحلیل این شاخص برای ارزیابی تطابق آن با شاخص‌های سنجش از دور انجام شد.

نتایج و بحث

شاخص‌های NDVI، LST، MNDWI، NDSI در بازه‌های زمانی ۱، ۵ و ۱۰ ساله با استفاده از GEE محاسبه شده و SPEI با داده‌های ۱۳ ایستگاه هواشناسی پردازش شد. و تغییرات مکانی و زمانی این فاکتورها تحت تأثیر خشکسالی بررسی شدند. نتایج نشان می‌دهد که مساحت پوشش گیاهی با NDVI (جدول ۵ و ۶) خوب و متوسط در بازه کلی مطالعاتی در سطح استان افزایش چشم‌گیری داشته است، که می‌تواند نشان‌دهنده افزایش اراضی کشاورزی در سطح استان در دوره مد نظر می‌باشد. در این دوره همچنین کاهش مساحت مناطق با پوشش گیاهی ضعیف و همچنین افزایش مساحت مناطق بدون پوشش گیاهی در سطح استان مشاهده شد. این روند و ویژگی‌های بازه ۱۰ ساله را می‌توان در بازه ۵ ساله نیز مشاهده کرد، در حالی که در بازه‌های ۱ ساله به دلایل مختلفی از جمله خشکسالی و نبود آب کافی به خصوص برای مناطق دیم و ارتفاعات استان، تغییرات مختلف و متفاوتی در سالهای گوناگون را شاهد هستیم.

جدول ۵- تغییرات پوشش گیاهی در بازه ۱۰ ساله-هکتار (منبع: یافته‌های تحقیق).

تاریخ	حداکثر - حداقل	بدون پوشش گیاهی	پوشش ضعیف	پوشش متوسط	پوشش خوب
۱۳۸۲-۱۳۷۳	-۰/۴۳ - ۰/۵۹	۱۳۷۸۶۳	۵۷۰۰۴۵۴	۵۴۴۲۴۵	۱۸۱۹۸
۱۳۹۲-۱۳۸۲	-۰/۴۳ - ۰/۵۸	۱۷۴۷۸۶	۵۵۸۱۱۹۶	۶۲۴۴۸۲	۲۰۲۹۵
۱۴۰۲-۱۳۹۳	-۰/۶۰ - ۰/۶۷	۱۷۰۵۳۴	۴۷۰۶۳۳۹	۱۳۹۱۹۴۰	۱۳۱۹۴۷

جدول ۶- تغییرات پوشش گیاهی در بازه ۵ ساله-هکتار (منبع: یافته‌های تحقیق).

تاریخ	حداکثر - حداقل	بدون پوشش گیاهی	پوشش ضعیف	پوشش متوسط	پوشش خوب
۱۳۷۷-۱۳۷۳	-۰/۴۳ - ۰/۶۱	۱۷۲۵۱۳	۵۵۸۰۲۶۱	۶۲۰۰۳۹	۲۷۹۴۷
۱۳۸۲-۱۳۷۸	-۰/۴۳ - ۰/۵۹	۱۴۴۸۳۴	۵۷۵۵۶۴۹	۴۷۹۷۵۳	۲۰۵۲۴
۱۳۸۷-۱۳۸۳	-۰/۴۳ - ۰/۶۰	۱۷۰۵۴۲	۵۵۹۰۷۶۷	۶۱۱۱۹۱	۲۸۲۵۹
۱۳۹۲-۱۳۸۸	-۰/۴۴ - ۰/۶۰	۱۹۳۴۳۲	۵۵۲۰۸۱۳	۶۶۱۷۷۷	۲۴۷۳۷
۱۳۹۷-۱۳۹۳	- ۰/۵۹ _ ۰/۶۷	۱۵۸۲۹۲	۴۸۷۵۷۹۲	۱۲۶۰۶۵۱	۱۰۶۰۲۵
۱۴۰۲-۱۳۹۸	-۰/۶۵ _ ۰/۷۲	۱۹۸۴۴۷	۴۴۶۴۳۵۸	۱۵۵۱۴۸۶	۱۸۶۴۶۸

LST محاسبه شده به طبقات کم، متوسط، بالا و خیلی بالا تقسیم شد (جدول ۷ و ۸). نتایج LST در بازه ۱، ۵ و ۱۰ ساله نشان می‌دهد که مساحت طبقات با دمای کم و متوسط در بازه کلی مطالعاتی در سطح استان کاهش داشته در صورتی که مناطق با دمای بالا و خیلی بالا افزایش یافته است، که به دلیل تغییرات اقلیمی و کاهش رطوبت و کاهش پوشش گیاهی ناشی از خشکسالی می‌باشد. نتایج بازه‌های یکساله به دلیل حجم زیاد جدول مربوطه در متن پژوهش حاضر آورده نشده است.

جدول ۷- توزیع دما سطح زمین بازه ۱۰ ساله به سانتیگراد / مساحت به هکتار (منبع: یافته‌های تحقیق).

تاریخ	حداکثر - حداقل	کم (<۲۰)	متوسط (۲۰-۳۵)	بالا (۳۵-۵۰)	خیلی بالا (>۵۰)
۱۳۸۲-۱۳۷۳	-۱ - ۷۳	۱۲۸۵۶۹	۲۳۱۶۵۴۹	۳۹۵۵۵۵۹	۸۳
۱۳۹۲-۱۳۸۳	۲ - ۸۰	۵۹۴۶۴	۱۵۳۵۵۴۵	۴۸۰۵۶۴۳	۱۰۸
۱۴۰۲-۱۳۹۲	۵ - ۷۶	۴۱۴۳۷	۱۱۸۱۵۸۰	۵۱۷۵۷۲۰	۲۰۲۲

جدول ۸- توزیع دما سطح زمین بازه ۵ ساله به سانتیگراد / مساحت به هکتار (منبع: یافته‌های تحقیق).

تاریخ	حداکثر - حداقل	کم (<۲۰)	متوسط (۲۰-۳۵)	بالا (۳۵-۵۰)	خیلی بالا (>۵۰)
۱۳۷۳-۱۳۷۷	۷۱-۱	۱۲۸۸۴۶	۲۱۷۱۷۶۳	۴۱۰۰۰۹۷	۵۴
۱۳۷۸-۱۳۸۲	۷۷-۲	۱۹۸۶۴۹	۲۵۵۷۸۳۶	۳۶۲۹۱۸۶	۱۵۰۸۹
۱۳۸۳-۱۳۸۷	۸۹-۲	۵۱۳۸۶	۱۵۴۴۸۳۵	۴۸۰۴۴۰۰	۱۳۸
۱۳۸۸-۱۳۹۲	۷۸-۳	۷۲۳۹۴	۱۵۸۹۸۷۴	۴۷۳۸۲۹۲	۲۰۰
۱۳۹۳-۱۳۹۷	۸۱-۴	۵۶۰۴۶	۱۲۷۱۹۴۱	۵۰۷۲۴۸۷	۲۸۵
۱۳۹۸-۱۴۰۲	۷۸-۵	۳۰۰۷۰	۱۱۴۱۱۷۹	۵۱۸۲۷۷۷	۴۶۷۳۴

شاخص MNDWI برای شناسایی و محاسبه مساحت پهنه‌های آبی از جمله دریاچه سدها، تالاب‌ها و رودخانه‌ها استفاده شد (جدول ۹ و ۱۰). مساحت پهنه‌های آبی در بازه‌های ۵ و ۱۰ ساله روندی افزایشی داشته، در حالیکه در بازه‌های ۱ ساله بسته به میزان نزولات جوی مساحت‌های متغیری به خود اختصاص داده است، که می‌تواند به کاهش منابع آب سطحی در اثر خشکسالی مربوط باشد. علاوه بر اثرات خشکسالی دلایلی مانند احداث سد کرخه و گتوند یا تغییرات تالاب هورالعظیم نیز از موارد اثرگذار در کاهش و یا افزایش میزان مساحت پهنه‌های آبی در طول بازه‌های مد نظر می‌باشد.

جدول ۹- مساحت پهنه‌های آب بازه ۱۰ ساله (کیلومتر مربع) (منبع: یافته‌های تحقیق).

تاریخ	مساحت (کیلومتر مربع)	تاریخ	مساحت (کیلومتر مربع)	تاریخ	مساحت (کیلومتر مربع)
۱۳۷۳-۱۳۸۲	۱۷۶	۱۳۸۳-۱۳۹۲	۴۰۳	۱۳۹۳-۱۴۰۲	۷۴۹

جدول ۱۰- مساحت پهنه‌های آب بازه ۵ ساله (کیلومتر مربع) (منبع: یافته‌های تحقیق).

تاریخ	مساحت (کیلومتر مربع)	تاریخ	مساحت (کیلومتر مربع)	تاریخ	مساحت (کیلومتر مربع)
۱۳۷۳-۱۳۷۷	۴۶۶	۱۳۸۳-۱۳۸۷	۳۹۷	۱۳۹۳-۱۳۹۷	۶۸۷
۱۳۷۸-۱۳۸۲	۱۳۰	۱۳۸۸-۱۳۹۲	۴۳۲	۱۳۹۸-۱۴۰۲	۹۵۳

شاخص NDSI برای شناسایی مناطق برفی در ارتفاعات استان محاسبه شد (جدول ۱۱ و ۱۲). مناطق پوشیده از برف در استان محدود به مناطق کوهستانی شمال و شمال شرق استان می‌باشد. مساحت پوشش برف در بازه ۱۰ ساله از ۷۷۰ کیلومتر مربع در ۱۳۷۳-۱۳۸۲ به ۵۱۴ کیلومتر مربع در ۱۳۹۳-۱۴۰۲ کاهش یافته است این روند کاهش مساحت مناطق برفی در بازه‌های ۵ ساله نیز مشهود است. همچنین در بازه‌های ۱ ساله میزان مساحت برف از روند خاصی پیروی نکرده و تحت تاثیر اثرات اقلیمی میزان مساحت آن در سالهای مختلف متغیر می‌باشد.

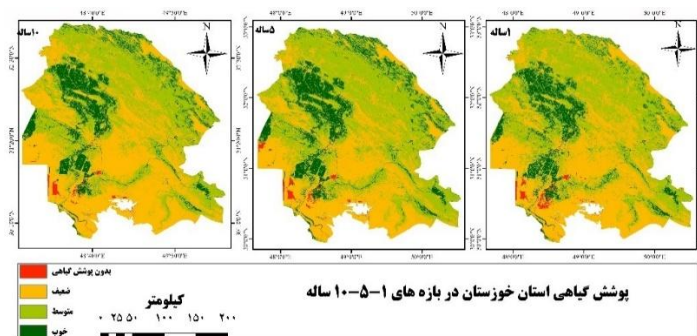
جدول ۱۱- مساحت برف در دوره‌های ۱۰ ساله / کیلومتر مربع (منبع: یافته‌های تحقیق).

تاریخ	مساحت (کیلومتر مربع)	تاریخ	مساحت (کیلومتر مربع)	تاریخ	مساحت (کیلومتر مربع)
۱۳۷۳-۱۳۸۲	۷۷۰	۱۳۸۳-۱۳۹۲	۶۶۳	۱۳۹۳-۱۴۰۲	۵۱۴

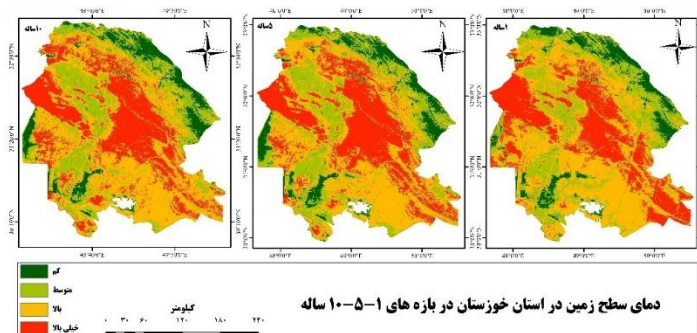
جدول ۱۲- مساحت برف در دوره‌های ۵ ساله / کیلومتر مربع (منبع: یافته‌های تحقیق).

تاریخ	مساحت (کیلومتر مربع)	تاریخ	مساحت (کیلومتر مربع)	تاریخ	مساحت (کیلومتر مربع)
۱۳۷۳-۱۳۷۷	۸۲۱	۱۳۸۳-۱۳۸۷	۵۰۲	۱۳۹۳-۱۳۹۷	۵۲۱
۱۳۷۸-۱۳۸۲	۶۹۵	۱۳۸۸-۱۳۹۲	۷۳۶	۱۳۹۸-۱۴۰۲	۵۰۳

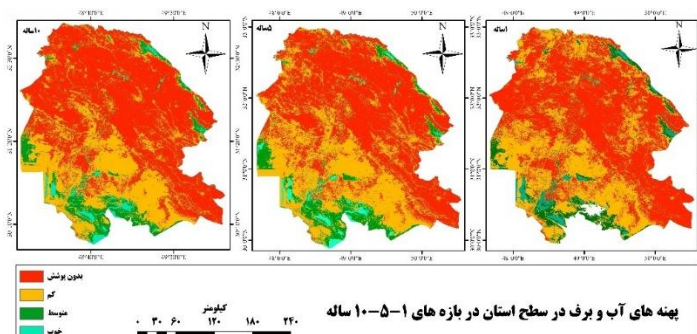
نقشه‌های مکانی تغییرات شاخص‌ها در شکل‌های ۷، ۸ و ۹ قابل مشاهده است. این نقشه‌ها توزیع مکانی پوشش گیاهی، دما، پهنه‌های آبی و برفی را در بازه‌های زمانی مختلف نشان می‌دهند.



شکل ۷. پوشش گیاهی استان خوزستان در بازه ۱، ۵ و ۱۰ ساله (یافته‌های پژوهش).



شکل ۸- دمای سطح زمین استان خوزستان در بازه ۱، ۵ و ۱۰ ساله (یافته‌های پژوهش).



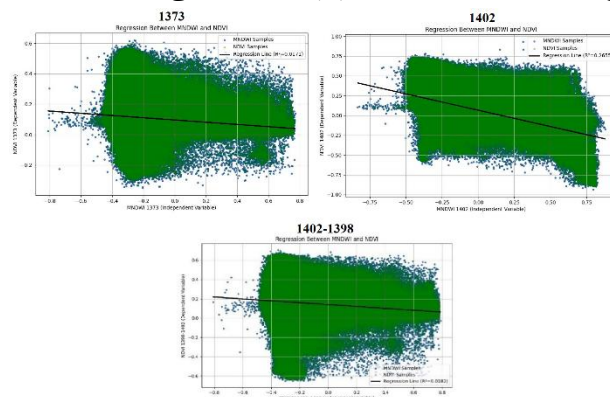
شکل ۹- پهنه‌های آب و برف استان خوزستان در بازه ۱، ۵ و ۱۰ ساله (یافته‌های پژوهش).

تحلیل و بررسی رابطه بین شاخص‌های سنجش از دور

برای بررسی روابط بین شاخص‌های سنجش از دور، تحلیل رگرسیون خطی بین جفت شاخص‌ها انجام شد. هدف از این تحلیل، شناسایی همبستگی بین فاکتورهای محیطی پوشش گیاهی، دمای سطح زمین و پهنه‌های آبی و برف در بازه زمانی ۳۰ ساله (۱۴۰۲-۱۳۷۲) بود. شاخص‌ها با نمونه‌برداری تصادفی (۲,۵۰۰,۰۰۰ نمونه) پردازش شدند و نتایج با ضریب همبستگی (R^2) و نمودارهای پراکنش ارائه شده‌اند. خط رگرسیون به همراه نقاط داده‌ها، روند کلی همبستگی را نشان می‌دهند.

رگرسیون MNDWI و NDVI در سال ۱۳۷۲، نشان‌دهنده رابطه ضعیف و منفی (R^2 برابر با ۰/۱۷۱) می‌باشد. شیب خط رگرسیون منفی و ملایم است، که نشان می‌دهد با افزایش MNDWI (رطوبت بیشتر)، NDVI (پوشش گیاهی) برخلاف انتظار اولیه اندکی کاهش می‌یابد. پراکندگی بالای داده‌ها (نقاط پخش شده در محدوده ۰/۸- تا ۰/۸ برای MNDWI و ۰/۲- تا ۰/۶ برای NDVI) نشان‌دهنده ناهمگونی در رابطه این دو شاخص است، که می‌تواند به عواملی مثل دما یا نوع خاک مرتبط باشد. این یافته فرضیه همبستگی قوی بین رطوبت و پوشش گیاهی را رد می‌کند، اما برای تحلیل دقیق‌تر باید با SPEI و داده‌های دمایی مقایسه شود. اما رگرسیون دو شاخص در سال ۱۴۰۲ (R^2 برابر با ۰/۲۶۵)، با رابطه منفی و قوی‌تر از سال ۱۳۷۲، بیانگر

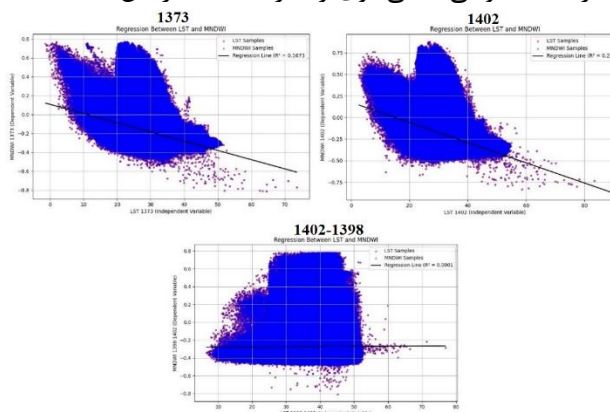
توزیع ۲۶/۵۵ درصد تغییرات NDVI توسط MNDWI است. شیب خط رگرسیون منفی و نسبتاً تند است، به این معنی که با افزایش MNDWI، NDVI کاهش می‌یابد، که ممکن است به اشباع رطوبتی و کاهش رشد گیاهان در مناطق مرطوب مرتبط باشد. پراکندگی داده‌ها همچنان بالاست، اما تمرکز نقاط حول خط رگرسیون بیشتر است. این یافته فرضیه همبستگی مثبت بین رطوبت و پوشش گیاهی را رد می‌کند و نشان‌دهنده تأثیرات پیچیده خشکسالی است (شکل ۱۰).



شکل ۱۰- رگرسیون بین پهنه آبی و پوشش گیاهی در سال‌های ۱۳۷۲، ۱۴۰۲ و در بازه ۵ ساله (یافته‌های پژوهش).

در بازه ۵ ساله، رگرسیون MNDWI و NDVI رابطه‌ای منفی و ضعیف (R^2 برابر با ۰/۱۸۲) را نشان می‌دهد. شیب خط رگرسیون منفی و ملایم است، که نشان‌دهنده کاهش اندک NDVI با افزایش MNDWI می‌باشد، که ممکن است به شرایط اشباع رطوبتی یا تأثیرات دیگر محیطی مرتبط باشد. پراکندگی داده‌های NDVI بسیار بالاست و نقاط به صورت پراکنده حول خط رگرسیون قرار دارند، که نشان‌دهنده ناهمگونی در رابطه این دو شاخص است. این یافته فرضیه همبستگی قوی بین رطوبت و پوشش گیاهی را رد می‌کند و با هدف ما برای تحلیل اثرات محیطی خشکسالی همخوانی دارد.

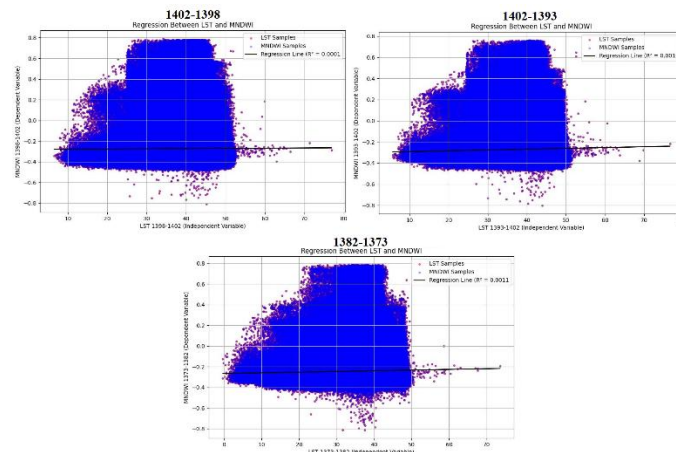
نتایج بازه ۱ ساله در سال ۱۳۷۲ (شکل ۱۱) نشان می‌دهد که دو شاخص رابطه معکوس دارند. پراکنش داده‌ها در نمودار نشان‌دهنده ضعیف بودن رابطه دو متغیر است. مقدار R^2 پایین (۰/۱۶۷۳) نشان می‌دهد عوامل دیگری نیز بر MNDWI تأثیرگذار هستند. کاهش MNDWI می‌تواند نشان‌دهنده کاهش رطوبت خاک و پوشش گیاهی باشد. افزایش LST نیز می‌تواند منجر به افزایش تبخیر و کاهش رطوبت شود. شکل نشان می‌دهد که بین دو شاخص مذکور رابطه معکوس ضعیف وجود دارد که نشان‌دهنده تأثیر خشکسالی بر رطوبت خاک و پوشش گیاهی می‌باشد. بازه ۱ ساله در سال ۱۴۰۲ (شکل ۱۱) نشان می‌دهد که دو شاخص همانند سال ۱۳۷۲ رابطه معکوسی (کمی قوی‌تر) دارند، که با افزایش LST، MNDWI کاهش می‌یابد.



شکل ۱۱- رگرسیون بین پهنه آبی و دمای سطح زمین در سال‌های ۱۳۷۲، ۱۴۰۲ و در بازه ۵ ساله (یافته‌های پژوهش).

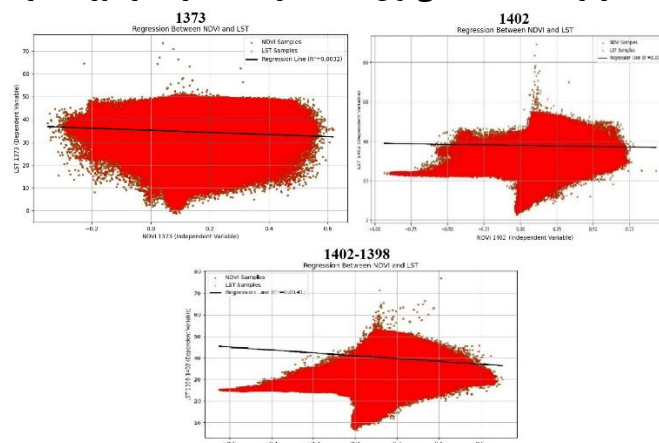
بازه ۵ ساله در شکل ۱۱ نشان می‌دهد که بین LST و MNDWI رابطه بسیار ضعیفی وجود دارد. نقاط داده‌ها به طور بسیار گسترده‌ای در نمودار پراکنده شده‌اند که نشان می‌دهد هیچ روند مشخصی بین این دو متغیر وجود ندارد. مقدار R^2 برابر با

۰/۰۰۲ (نزدیک به صفر) نشان می‌دهد که LST تقریباً هیچ تغییری در MNDWI، رطوبت خاک و پوشش گیاهی ایجاد نمی‌کند. خط رگرسیون تقریباً افقی است و نشان‌دهنده عدم وجود رابطه معنادار بین دو شاخص است. این نمودار به وضوح نشان می‌دهد که عوامل دیگری غیر از LST بر MNDWI تأثیرگذار هستند. این نمودار تفاوت قابل توجهی با نمودارهای قبلی دارد. در نمودارهای قبلی، R^2 بالاتر بود و نشان‌دهنده وجود یک رابطه معکوس ضعیف بین دو شاخص بود. اما در این نمودار، R^2 بسیار نزدیک به صفر است و نشان‌دهنده عدم وجود رابطه معنادار بین این دو متغیر است که می‌تواند به دلیل بازه زمانی متفاوت باشد. شکل ۱۲ نشان می‌دهد که بین دو شاخص مذکور (بازه ۵ ساله و ۱۰ ساله) رابطه بسیار ضعیف و تقریباً غیرقابل تشخیصی وجود دارد. مقدار R^2 برابر با ۰/۰۰۱ نشان می‌دهد که LST تقریباً هیچ تغییری در MNDWI ایجاد نمی‌کند.



شکل ۱۲- رگرسیون بین MNDWI و LST در بازه‌های ۵ و ۱۰ ساله (یافته‌های پژوهش).

نتایج بازه زمانی ۱ ساله در سال ۱۳۷۲ (شکل ۱۳) نشان می‌دهد که بین NDVI و LST رابطه بسیار ضعیف و غیرقابل تشخیصی وجود دارد. با توجه به R^2 برابر با ۰/۰۰۳۲، نمی‌توان نتیجه‌گیری معناداری در مورد تأثیر NDVI بر LST داشت.



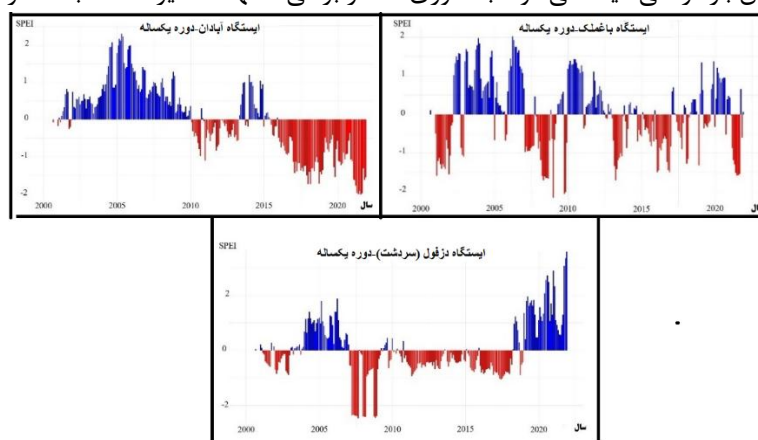
شکل ۱۳- رگرسیون بین NDVI و LST در بازه ۱ ساله (۱۳۷۲)، ۱ ساله (۱۴۰۲) و ۵ ساله (۱۳۹۸-۱۴۰۲) (یافته‌های پژوهش).

بازه زمانی ۱ ساله در سال ۱۴۰۲ (شکل ۱۳) نشان می‌دهد که بین NDVI و LST رابطه بسیار ضعیفی وجود دارد. مقدار R^2 برابر با ۰/۰۰۰۵ نشان می‌دهد که NDVI هیچ تغییری در LST ایجاد نمی‌کند. با توجه به R^2 پایین، نتیجه‌گیری معناداری در مورد تأثیر NDVI بر LST وجود ندارد. و بازه ۵ ساله در شکل ۱۳ (۱۳۹۸-۱۴۰۲) نشان می‌دهد که بین دو شاخص رابطه معکوسی وجود دارد. مقدار R^2 برابر با ۰/۰۱۷۸ نشان می‌دهد که NDVI در بازه ۵ ساله تغییر کمی در LST ایجاد کرده است.

تحلیل شاخص SPEI

شاخص SPEI برای پایش شدت و مدت خشکسالی در خوزستان با استفاده از داده‌های دما و بارش ۱۳ ایستگاه هواشناسی در دوره ۲۲ ساله (۱۳۷۹-۱۴۰۲) محاسبه شد. این شاخص در بازه‌های زمانی ۱، ۵ و ۱۰ ساله در محیط MATLAB پردازش گردید. برای شناسایی دوره‌های خشکسالی و روند تغییرات آن در سطح استان، تحلیل سری زمانی و ترسیم نمودارهای SPEI انجام شد. مقادیر SPEI در طبقات استاندارد خشکسالی از جمله ترسالی خیلی شدید، شدید، متوسط، عادی، خشکالی متوسط، شدید و خیلی شدید قرار داده شدند. بررسی نمودارها در تمامی بازه‌ها نشان داد که الگوهای کلی تغییرات خشکسالی و ترسالی در اکثر ایستگاه‌ها روند نسبتاً مشابهی را دنبال می‌کنند. به منظور اجتناب از تکرار، در هر بازه زمانی تنها نمونه‌هایی از تفاسیر مربوط به چند ایستگاه منتخب که نمایانگر وضعیت کلی حاکم بر سایر ایستگاه‌ها در همان بازه زمانی می‌باشند ارائه شده است. نمودار یک ساله SPEI برای ایستگاه آبادان (بازه زمانی از سال ۱۳۷۹ تا ۱۴۰۲) نوسانات وضعیت خشکسالی و ترسالی را در این منطقه نشان می‌دهد (شکل ۱۴). در ابتدای دوره تا سال ۱۳۹۰، SPEI اغلب در محدوده مثبت قرار داشته و در برخی مقاطع به بالای ۱ نیز رسیده است، که نشان‌دهنده غالب بودن شرایط ترسالی و رطوبت نسبی مطلوب در این سال‌ها برای آبادان است. با گذر زمان و از حدود سال ۱۳۹۳-۱۳۹۴ به بعد، یک چرخش تدریجی به سمت کاهش مقادیر SPEI مشاهده می‌شود. این روند نزولی در اواخر دهه دوره به اوج خود می‌رسد، به طوری که شاخص به طور مداوم در محدوده منفی قرار گرفته و حتی به کمتر از -۱ نیز می‌رسد. این وضعیت بیانگر شروع و استقرار دوره‌های خشکسالی در آبادان است. پس از سال ۱۳۹۹، غلبه خشکسالی شدید و پایدار به وضوح دیده می‌شود.

در ایستگاه باغملک (شکل ۱۴) در ابتدای این دوره و تا اواسط آن، SPEI تمایل به مقادیر مثبت داشته و در بسیاری از مواقع بالای ۰/۵ قرار گرفته است، که نشان‌دهنده فراوانی نسبی دوره‌های ترسالی و شرایط مرطوب در این سال‌ها برای باغملک است. اما از اواسط دوره به بعد، SPEI نوسانات بیشتری داشته و به طور فزاینده‌ای به محدوده منفی وارد شده است. دوره‌های خشکسالی با شدت‌های متفاوت در این بازه زمانی دیده می‌شود، به طوری که در برخی سال‌ها، مقادیر SPEI به کمتر از -۱ نیز رسیده است.



شکل ۱۴- شاخص SPEI ۱ ساله (الف) ایستگاه آبادان، (ب) ایستگاه باغملک، (پ) ایستگاه دزفول/سردشت (یافته‌های پژوهش).

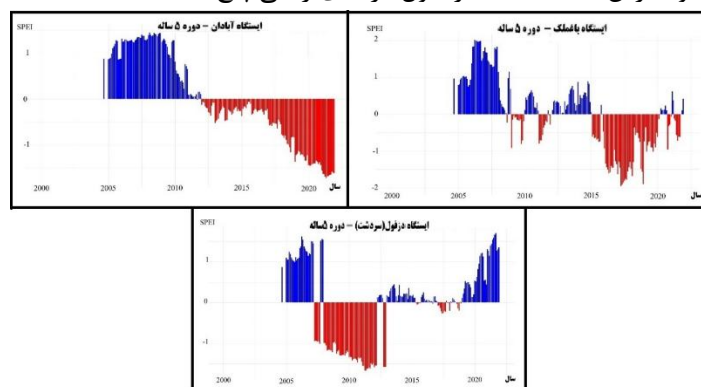
نمودار ۱ ساله SPEI برای ایستگاه دزفول/سردشت (شکل ۱۴) نشان می‌دهد که این منطقه در طول دوره مورد مطالعه، الگوهای متنوعی از شرایط رطوبتی را تجربه کرده است. در ابتدای این بازه زمانی، به ویژه در حوالی سالهای ۱۳۸۲ تا ۱۳۸۵، می‌توان دوره‌های نسبتاً مرطوب با شاخص‌های مثبت SPEI را مشاهده کرد. این وضعیت نشان می‌دهد که در این سال‌ها، دزفول/سردشت از نظر بارندگی در وضعیت بهتری قرار داشته است. با گذر زمان، از حدود سال ۱۳۸۷ به بعد، SPEI به سمت مقادیر منفی گرایش پیدا کرده و دوره‌های خشکسالی متعددی با شدت‌های متفاوت رخ داده است. به طور خاص، بین سال‌های ۱۳۸۶ تا ۱۳۸۹، خشکسالی‌های قابل توجهی در این ایستگاه به ثبت رسیده است. پس از آن، نوسانات بین دوره‌های ترسالی و خشکسالی ادامه داشته است، اما در سالهای اخیر، به ویژه حوالی سالهای ۱۴۰۰ تا ۱۴۰۱، SPEI بار دیگر به طور چشمگیری

افزایش یافته و نشان‌دهنده دوره‌های بارندگی فراتر از حد نرمال و شرایط به اصطلاح "تر" در این منطقه است. این تغییرات حاکی از پویایی اقلیمی این منطقه و لزوم توجه به نوسانات شدید در برنامه‌ریزی‌های مرتبط با منابع آب است.

شاخص SPEI ۵ ساله

نمودار SPEI ۵ ساله برای ایستگاه آبادان (شکل ۱۵)، دیدگاهی بلندمدت‌تر از وضعیت خشکسالی و ترسالی به دست می‌دهد. از ابتدای دوره مورد مطالعه تا سال ۱۳۹۱، SPEI عمدتاً در نیمه مثبت قرار دارد و حتی در مقاطعی به اوج می‌رسد، که نشان می‌دهد در بازه زمانی چند ساله، آبادان شرایط نسبتاً مرطوب و بدون تنش آبی قابل توجه را تجربه کرده است. با این حال، از حدود سال ۱۳۹۱ به بعد، یک تغییر تدریجی و پیوسته به سمت شرایط خشک‌تر مشاهده می‌شود، و SPEI به طور مداوم در محدوده منفی قرار گرفته و در سالهای اخیر، به ویژه پس از سال ۱۳۹۷، به طور قابل توجهی کاهش یافته و به مقادیر بسیار پایین‌تر از -۱ رسیده است. این وضعیت نمایانگر یک دوره طولانی و شدید از خشکسالی انباشته شده در طول پنج سال گذشته است که می‌تواند اثراتی بر منابع آب زیرزمینی، کشاورزی و اکوسیستم منطقه داشته باشد.

با بررسی دقیق SPEI ۵ ساله برای ایستگاه باغملک (شکل ۱۵)، می‌توان دریافت که در ابتدای دوره آماری تا حدود سال ۱۳۸۹، وضعیت کلی رطوبتی در این منطقه نسبتاً مطلوب بوده است. SPEI در این بازه زمانی اغلب مقادیر مثبت را نشان می‌دهد، که حاکی از آن است که در یک دوره پنج ساله متوالی، میزان بارندگی‌ها معمولاً بالاتر از میانگین بلندمدت بوده و شرایط ترسالی حاکم بوده است. با گذر زمان، از حدود سال ۱۳۸۹ به بعد، تغییری محسوس در الگوی رطوبتی باغملک رخ داده است، و SPEI به طور فزاینده‌ای به سمت مقادیر منفی متمایل شده و دوره‌های خشکسالی با درجات مختلف شدت و طول مدت در این منطقه تجربه شده است. به ویژه در سالهای پس از ۱۳۹۴، کاهش چشمگیر SPEI و استمرار آن در محدوده منفی نشان‌دهنده یک دوره طولانی مدت از کمبود بارش انباشته شده در طول بازه‌های زمانی پنج ساله است.



شکل ۱۵- شاخص SPEI ۵ ساله برای الف) ایستگاه آبادان، ب) ایستگاه باغملک و پ) ایستگاه دزفول/سردشت (یافته‌های پژوهش).

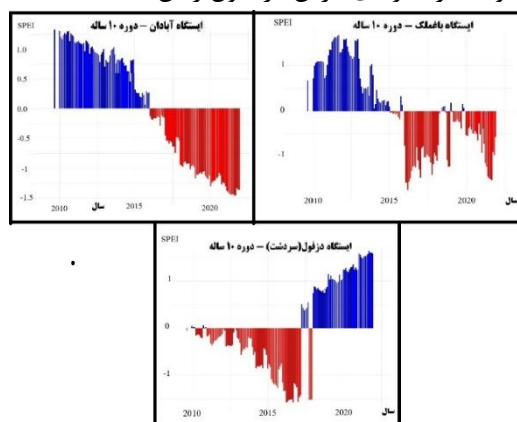
اما، با بررسی نمودار SPEI ۵ ساله برای ایستگاه دزفول/سردشت (شکل ۱۵)، تصویری از تغییرات بلندمدت وضعیت رطوبتی این منطقه آشکار می‌شود. در ابتدای دوره مورد مطالعه، به ویژه تا حدود سال ۱۳۸۷، SPEI در محدوده مثبت قرار دارد و نوسانات قابل توجهی به سمت شرایط مرطوب را نشان می‌دهد، که حاکی از آن است در بازه‌های زمانی پنج ساله، میزان بارش‌ها در این سالها اغلب بالاتر از حد متوسط بوده و شرایط برای منابع آبی مساعد ارزیابی می‌شود. با این حال، از حدود سال ۱۳۸۷ تا اواسط دهه بعدی، یک دوره طولانی از کاهش SPEI و غلبه شرایط خشکسالی بر منطقه مشهود است. در این بازه زمانی، شاخص به طور مداوم در ناحیه منفی قرار داشته و حتی به مقادیر قابل توجهی پایین‌تر از صفر نیز رسیده است، که نشان‌دهنده یک کمبود انباشته در بارندگی در طول چند سال متوالی است. پس از این دوره طولانی خشکسالی، از حدود سال ۱۳۹۵ به بعد، نوسانات بیشتری در SPEI دیده می‌شود و در سالهای اخیر، به ویژه حوالی سالهای ۱۳۹۹ تا ۱۴۰۲، شاخص بار دیگر به طور چشمگیری افزایش یافته و وارد محدوده مثبت شده است. این تغییرات نشان می‌دهد که دزفول/سردشت پس از یک دوره طولانی

خشکی، در سالهای اخیر شاهد بهبود وضعیت رطوبتی و حتی تجربه شرایط ترسالی در مقیاس بلندمدت بوده است. این نوسانات شدید، اهمیت پایش مستمر وضعیت اقلیمی و برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر برای مدیریت منابع آب را برجسته می‌سازد.

شاخص SPEI ۱۰ ساله

بررسی نمودار SPEI ۱۰ ساله برای ایستگاه آبادان (شکل ۱۶) نشان می‌دهد که در ابتدای دوره مطالعاتی، از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۴، SPEI به طور مداوم در محدوده مثبت قرار دارد، که نشان دهنده این است در بازه زمانی ده ساله، آبادان از شرایط رطوبتی خوبی برخوردار بوده و میزان بارش‌ها در مجموع بالاتر از میانگین بلندمدت بوده است. از سال ۱۳۹۴ به بعد، تغییری تدریجی اما پیوسته به سمت خشکسالی در مقیاس ۱۰ ساله در آبادان آغاز شده است. SPEI به طور مداوم در محدوده منفی قرار گرفته و در سالهای اخیر، به ویژه پس از سال ۱۳۹۷، به طور قابل توجهی کاهش یافته و به سطوح پایین‌تری رسیده است. با بررسی نمودار SPEI ۱۰ ساله برای ایستگاه باغملک (شکل ۱۶)، می‌توان دریافت که در ابتدای دوره مورد مطالعه، از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۹۴، وضعیت رطوبتی در این منطقه در مقیاس ۱۰ ساله نسبتاً مطلوب بوده است. SPEI در این بازه زمانی اغلب در محدوده مثبت قرار داشته که نشان می‌دهد در طول این دوره، میزان بارش‌ها در مجموع بالاتر از میانگین بلندمدت بوده است. با این حال، از حدود سال ۱۳۹۴ به بعد، یک تغییر قابل توجه در الگوی رطوبتی باغملک در بازه ۱۰ ساله رخ داده است. SPEI به سرعت به محدوده منفی سقوط کرده و یک دوره طولانی از خشکسالی در مقیاس ۱۰ ساله آغاز شده است. این وضعیت که در سالهای اخیر نیز ادامه داشته، نشان می‌دهد که در ۱۰ سال اخیر، میزان بارش‌ها به طور قابل توجهی کمتر از میانگین بلندمدت بوده و منطقه با یک کمبود انباشته آب در طولانی‌مدت مواجه شده است.

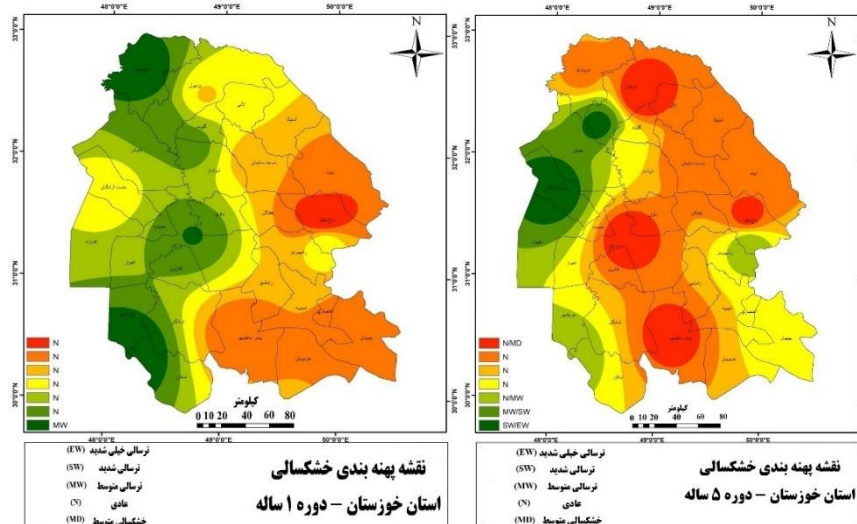
نمودار ایستگاه دزفول/سردشت (شکل ۱۶)، تحولات اقلیمی این منطقه در طول یک دهه اخیر را به تصویر می‌کشد. در ابتدای دوره مورد مطالعه، تقریباً تا حدود سال ۱۳۸۹، SPEI در نوسان بوده اما به طور کلی نزدیک به صفر قرار دارد. این وضعیت نشان می‌دهد که در بازه زمانی ۱۰ ساله، شرایط رطوبتی در دزفول/سردشت نسبتاً متعادل بوده و نه ترسالی پایدار و نه خشکسالی طولانی‌مدت حاکم نبوده است. با این حال، از سال ۱۳۸۹ تا اواسط دهه، یک دوره قابل توجه از کاهش SPEI و استقرار خشکسالی در مقیاس ۱۰ ساله در این منطقه مشاهده می‌شود. در این بازه زمانی، شاخص به طور مداوم در محدوده منفی قرار گرفته و حتی به مقادیر پایین‌تر از -۱ نیز رسیده است، که بیانگر یک کمبود انباشته در بارندگی در طول چندین سال متوالی است. پس از این دوره خشکسالی، از حدود سال ۱۳۹۶ به بعد، یک تغییر چشمگیر در وضعیت رطوبتی رخ داده و SPEI به سرعت به محدوده مثبت صعود کرده است. در سالهای اخیر، مقادیر بالای شاخص نشان می‌دهد که دزفول/سردشت در مقیاس ۱۰ ساله، وارد یک دوره ترسالی شده و میزان بارش‌ها در مجموع به طور قابل توجهی از میانگین بلندمدت فراتر رفته است. این تغییرات نشان‌دهنده پویایی اقلیمی منطقه و تغییرات قابل توجه در الگوهای بارش در طول زمان است.



شکل ۱۶- شاخص SPEI ۱۰ ساله برای الف) ایستگاه آبادان، ب) ایستگاه باغملک و پ) ایستگاه دزفول/سردشت (یافته‌های پژوهش).

نقشه پهنه بندی خشکسالی شاخص SPEI

به منظور تجسم فضایی وضعیت خشکسالی در خوزستان بر اساس SPEI، فرآیند پهنه‌بندی خشکسالی انجام شد. نقشه‌های پهنه‌بندی خشکسالی حاصل از این فرآیند، در بازه‌های زمانی ۱ ساله و ۵ ساله در شکل ۱۷ ارائه شده‌اند. این نقشه‌ها به خوبی توزیع فضایی شدت و گستردگی خشکسالی و ترسالی را در سطح منطقه طی این بازه‌های زمانی نشان می‌دهند و امکان شناسایی مناطق با آسیب‌پذیری بیشتر یا رطوبت نسبی بالاتر را فراهم می‌آورند. در این مطالعه، تمرکز اصلی بر پهنه‌بندی خشکسالی در مقیاس‌های زمانی کوتاه‌مدت و میان‌مدت (۱ و ۵ ساله) بوده است که از داده‌های کامل‌تری برخوردار بوده‌اند.



شکل ۱۷- نقشه پهنه بندی خشکسالی بازه ۱ ساله و بازه ۵ ساله منطقه مطالعاتی (یافته‌های پژوهش).

در این پژوهش، رویکرد ترکیبی SPEI و شاخص‌های NDVI، LST، MNDWI، NDSI برای پایش خشکسالی در استان خوزستان مورد استفاده قرار گرفت. این روش از ترکیب داده‌های زمینی و ماهواره‌ای برای ارزیابی دقیق خشکسالی بهره برده است. مقایسه این مطالعه با مقالات اخیر نشان‌دهنده تفاوت‌ها و شباهت‌های قابل توجهی است که در ادامه به بررسی آنها پرداخته می‌شود. مطالعه Peng و همکاران (۲۰۲۴) رویکرد جدیدی برای بهبود SPEI از طریق افزودن ویژگی‌های سطح زمین ارائه داده است، که تمرکز بر اصلاح فرمول SPEI داشت. اما مطالعه حاضر بر ترکیب مستقیم شاخص‌های سنجش از دور (NDVI، LST، MNDWI) با SPEI تأکید کرده است. تفاوت اصلی این تحقیق با مطالعه حاضر این است که به جای اصلاح فرمول‌ها، کاربرد عملی و فضا‌محور برای ارزیابی خشکسالی در مقیاس منطقه‌ای ارائه شده است. همچنین، در مقایسه با مطالعه Talebi و Samadianfard (۲۰۲۴) که از یادگیری ماشین برای پیش‌بینی خشکسالی استفاده کرده است، پژوهش حاضر با استفاده از مدل‌های سنتی‌تر مانند رگرسیون خطی و پردازش داده‌های ماهواره‌ای توانسته به‌طور دقیق‌تر و با دقت زمانی بیشتر روند خشکسالی را ارزیابی کند. مزیت اصلی تحقیق حاضر در این است که از ابزارهای مبتنی بر سامانه GEE استفاده کرده است که داده‌های با حجم بالا و زمان پردازش سریع‌تری را فراهم می‌کند. در مقایسه با مطالعه Hissan و Parveen (۲۰۲۵) که بر پیش‌بینی خشکسالی با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین و شاخص‌های متعدد تمرکز داشته‌اند، این مطالعه برای شبیه‌سازی شرایط واقعی، از داده‌های ماهواره‌ای سنجش از دور و شاخص‌های اقلیمی در بازه زمانی بلندمدت استفاده کرده است. به علاوه، تفاوت در این است که مطالعه حاضر به جای پیش‌بینی، بر پایش و ارزیابی خشکسالی با استفاده از داده‌های واقعی در دوره‌های زمانی مختلف تأکید کرده است. مطالعه Liu و همکاران (۲۰۲۴) نیز استفاده از SPEI در مقیاس جهانی را بررسی کرده است که به استفاده از شاخص‌های اقلیمی و ماهواره‌ای برای بررسی خشکسالی در مقیاس وسیع پرداخته است، در حالی که پژوهش حاضر بیشتر بر ویژگی‌های محیطی-منطقه‌ای استان خوزستان متمرکز است و از شاخص‌های مختلف سنجش از دور برای تحلیل دقیق‌تر اثرات خشکسالی بر پوشش گیاهی و منابع آبی استفاده کرده است. به‌طور کلی، این مطالعه در مقایسه با سایر مطالعات موجود، نوآوری‌های خاص خود را در استفاده از داده‌های ماهواره‌ای سنجش از دور برای تحلیل خشکسالی در

مقیاس منطقه‌ای و در بستر سامانه پردازش ابری GEE نشان داده است. این رویکرد می‌تواند به‌طور مؤثری در مدیریت منابع طبیعی و تصمیم‌گیری‌های اقلیمی در مناطق مختلف استفاده شود.

نتیجه‌گیری

پهنه‌بندی خشکسالی بر اساس SPEI در بازه‌های ۱ و ۵ ساله نشان می‌دهد که شدت خشکسالی در مناطق مختلف استان یکنواخت نیست. در بازه ۵ ساله، مناطق شمالی و شرقی در طبقه عادی/خشکسالی متوسط قرار دارند، در حالی که مناطق مرکزی در طبقه شدیداً مرطوب/بسیار مرطوب هستند. این الگو در بازه ۱ ساله نیز تا حدی مشاهده می‌شود، اما شدت خشکسالی کاهش یافته و مناطق شرقی همچنان در دسته عادی/خشکسالی متوسط قرار دارند. تحلیل شاخص‌های سنجش از دور نیز این تفاوت‌ها را تأیید می‌کند. برای مثال، شاخص NDVI نشان داد که در بازه‌های ۵ و ۱۰ ساله، مساحت پوشش گیاهی خوب و متوسط در سطح استان افزایش یافته است، که می‌تواند به توسعه اراضی کشاورزی در مناطق مرکزی مرتبط باشد. این مناطق به دلیل نزدیکی به منابع آبی (رودخانه‌ها و سدها) کمتر تحت تأثیر خشکسالی قرار گرفته‌اند. در مقابل، مناطق شمالی و شرقی که دیم‌زار و کوهستانی هستند، در بازه‌های ۱ ساله به دلیل کمبود آب و خشکسالی، کاهش پوشش گیاهی را تجربه کرده‌اند.

MNDWI نشان داد که مساحت پهنه‌های آبی در بازه‌های ۵ و ۱۰ ساله افزایش یافته است، که به احداث سدهای کرخه و گتوند در مناطق شمالی مرتبط می‌باشد. این افزایش پهنه‌های آبی به حفظ رطوبت و کاهش اثرات خشکسالی در این مناطق کمک کرده است. در مقابل، مناطق شرقی و شمالی به دلیل دوری از منابع آبی و وابستگی به بارندگی، آسیب‌پذیرتر بوده‌اند. SPEI نیز تأیید می‌کند که در ایستگاه‌های آبادان، باغملک و دزفول/سردشت، الگوهای متفاوتی از خشکسالی و ترسالی مشاهده شده است. برای مثال، ایستگاه آبادان در بازه ۵ و ۱۰ ساله دوره‌های طولانی خشکسالی را تجربه کرده است، در حالی که دزفول/سردشت در سالهای اخیر (۱۳۹۶ به بعد) وارد دوره ترسالی شده است. این تفاوت‌ها می‌تواند به عوامل جغرافیایی ارتفاع و نزدیکی به منابع آبی و الگوهای بارش منطقه مرتبط باشد. شاخص‌های NDVI، LST، MNDWI، NDSI توانستند تغییرات محیطی ناشی از خشکسالی را در بازه‌های زمانی مختلف با جزئیات بیشتری نشان دهند. برای مثال، NDVI در بازه‌های ۱ ساله، تغییرات متفاوتی در پوشش گیاهی را نشان داد که به خشکسالی و کمبود آب در مناطق دیم‌زار و کوهستانی مرتبط بود. این شاخص توانست تغییرات سریع پوشش گیاهی را به خوبی نشان دهد. NDWI نوسانات زیاد مساحت پهنه‌های آبی در بازه‌های ۱ ساله را نشان داد که به تغییرات بارندگی و خشکسالی وابسته بود. این شاخص توانست اثرات کوتاه‌مدت خشکسالی بر منابع آبی را به سرعت شناسایی کند. LST افزایش مساحت مناطق با دمای بالا و خیلی بالا در بازه‌های ۱، ۵ و ۱۰ ساله را نشان داد که نشان‌دهنده تأثیر گرمایش و خشکسالی بر دمای سطح زمین بود. این شاخص توانست روندهای بلندمدت و کوتاه‌مدت را به خوبی نشان دهد. NDSI کاهش مساحت پوشش برف در بازه‌های ۵ و ۱۰ ساله (از ۷۷۰ به ۵۱۴ کیلومتر مربع) را نشان داد که ناشی از تأثیرات بلندمدت خشکسالی و گرمایش اقلیمی بود.

در مقابل، SPEI بیشتر برای تحلیل بلندمدت مناسب بود. نقشه پهنه‌بندی ۵ ساله بر اساس SPEI توانست الگوهای خشکسالی را در مقیاس میان‌مدت به خوبی نشان دهد، اما در بازه ۱ ساله به دلیل وابستگی به داده‌های هواشناسی (بارش و دما)، تغییرات سریع را با تأخیر نشان داد. همچنین، به دلیل محدودیت داده‌ها، امکان تهیه نقشه پهنه‌بندی ۱۰ ساله با SPEI فراهم نشد، که نشان‌دهنده محدودیت این شاخص در تحلیل‌های بلندمدت با داده‌های ناقص است.

تحلیل رگرسیون نیز نشان داد که روابط بین شاخص‌های NDVI و MNDWI یا LST و MNDWI ضعیف است (R^2 کمتر از ۰/۲) که در اکثر موارد نشان می‌دهد این شاخص‌ها تحت تأثیر عوامل نوع خاک، توپوگرافی و بارندگی قرار دارند و نمی‌توانند به تنهایی خشکسالی را توضیح دهند. با این حال، توانایی آنها در ارائه داده‌های مکانی و زمانی با وضوح بالا باعث می‌شود که برای پایش سریع و کوتاه‌مدت خشکسالی کارآمدتر از SPEI باشند. بنابراین، شاخص‌های سنجش از دور در آشکارسازی تغییرات کوتاه‌مدت (۱ ساله) و ارائه داده‌های مکانی (نقشه‌ها) کارایی بیشتری دارند، در حالی که SPEI برای تحلیل الگوهای بلندمدت (۵ و ۱۰ ساله) و شناسایی دوره‌های خشکسالی انباشته مناسب‌تر است.

با توجه به نتایج تحقیق، شاخص‌های NDVI، MNDWI، LST، NDSI در آشکارسازی تغییرات کوتاه‌مدت و ارائه داده‌های مکانی کارایی بیشتری نسبت به SPEI داشتند، اما SPEI برای تحلیل بلندمدت مناسب‌تر بود. همچنین، افزایش دمای سطح زمین، کاهش پوشش برف و نوسانات پهنه‌های آبی نشان‌دهنده تأثیرات ترکیبی خشکسالی و گرمایش اقلیمی در استان خوزستان است. نتایج این پژوهش نشان داد که خشکسالی در مناطق مختلف استان خوزستان یکنواخت نبوده است. مناطق شمالی و شرقی در بازه ۵ ساله آسیب‌پذیرتر بوده‌اند، در حالی که مناطق مرکزی به دلیل نزدیکی به منابع آبی و توسعه اراضی کشاورزی، وضعیت بهتری داشته‌اند.

ملاحظات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

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

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: استاد راهنمای پایان‌نامه، طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، تحلیل و تفسیر نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله

نویسنده دوم: تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها، انجام آزمایش و گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیشنویس مقاله

نویسنده سوم: استاد مشاور پایان‌نامه، مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

حمایت مالی از این پژوهش از طرف دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشکده علوم زمین در قالب پژوهانه برای نویسنده اول و همچنین پژوهانه پایان‌نامه دانشجویی نویسنده دوم انجام شده است.

سپاسگزاری

نگارندگان بر خود لازم می‌دانند از داوران محترم به خاطر ارائه نظرهای ارزشمند ساختاری و علمی سپاسگزاری نمایند.

منابع

- جهانگیری، آ.، معتمدوزیری، ب.، کیادلیری، ه (۱۴۰۳). بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر خشکسالی با شاخص‌های SPEI و SPI (مطالعه موردی حوضه آبریز کارون سه). نشریه علوم و مهندسی آب‌خیزداری ایران. ۱۸ (۶۵)، ۸۵-۹۷.
<https://doi.org/10.22092/ijwse.2025.366120.1846>
- حاجی آبادی، ف.، حسن پور، ف.، یعقوب زاده، م.، حمای، ح (۱۴۰۴). ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر خشکسالی کشاورزی به کمک شاخص SMDI در رژیم‌های مختلف آبیاری. رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط زیست. ۴ (۱)، ۷۲-۸۴.
<https://doi.org/10.22034/nawee.2025.486306.1116>
- ده‌مرده، ا.، حشمت پور، ع.، فتح آبادی، ا.، جندقی، ن (۱۴۰۵). بررسی تأثیر خشکسالی و ترسالی بر کیفیت و کمیت آب زیر زمینی شهرستان کلاله. رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط زیست. ۵ (۱)، ۳۹-۵۷.
<https://doi.org/10.22034/nawee.2024.460310.1084>

- رزمخواه، ه (۱۴۰۱). بررسی تغییرات منطقه ای شاخص خشکسالی SPI سه ماهه با استفاده از تکنیک زمین آماری کریجینگ، مطالعه موردی : استان فارس، رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط‌زیست، ۱۲(۱)، pp. 25-36
<http://doi.org/10.22034/nawee.2023.357687.1020>
- شجاعی‌شیری، ح، آرزانی، ح، کشتکار، ح، باقری، س، کاوسی، ا (۱۴۰۴). ارزیابی و پایش وضعیت خشکسالی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و هواشناسی بر اساس سری‌های زمانی (مطالعه موردی: استان زنجان). مجله اکوهیدرولوژی، ۱۲ (۱)، ۶۱۳-۶۳۴
<https://doi.org/10.22059/jje.2025.380086.1841>
- عبادی نهاری، ز، عرفانیان، م، کاظمپور چورسی، س (۱۴۰۲). ارائه یک روش نوین برای ارزیابی و پایش جامع خشکسالی حوضه آبریز دریاچه ارومیه با استفاده از شاخص تلفیقی خشکسالی SDI. تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۲۳(۶۸)، ۲۴۳-۲۵۷.
 Doi:10.52547/jgs.23.68.243
- عفیفی، م. ا (۱۴۰۰). بررسی اثر خشکسالی بر روی پوشش گیاهی با استفاده از تکنیک های سنجش از دور، مطالعه موردی: حوضه آبریز سد درودزن. جغرافیا (فصلنامه علمی انجمن جغرافیایی ایران)، ۱۹(۷۰)، ۱۵۳-۱۷۲.
<http://dor.net/dor/20.1001.1.27172996.1400.19.70.9.9>
- کروژده، م، امینی‌نیا، ک، ثاقبیان، س.م (۱۴۰۴). بررسی وضعیت خشکسالی در استان خراسان رضوی با استفاده از شاخص‌های SPEI و VCI. فصلنامه علمی فضای جغرافیایی، ۲۵ (۹۱)، ۱۴۷-۱۶۸.
<https://doi.org/10.83252/geospa.2025.3.4112>
- مرادی، م، مرادی، ح، وفاخواه، م (۱۴۰۲). بررسی تغییرات زمانی و مکانی خشکسالی هواشناسی (SPI) درحوزه آبخیز کارون، رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط‌زیست، ۱۲(۱)، pp. 113-128
<https://doi.org/10.22034/nawee.2023.401019.1044>
- یزدانپناه، ح، مومنی، م، حسینیقلی نژاددزفولی، ح، موحدی، س، سلیمانی تبار، م (۱۳۹۳). مقایسه شاخص‌های پوشش گیاهی سنجش از دور در پایش خشکسالی (مطالعه موردی مراتع نیمه شمال استان خوزستان). جغرافیا و برنامه ریزی محیطی، ۲۵(۲)، ۸۵-۹۸.
<https://sid.ir/paper/511454/fa>
- Afifi, M. E., 2021. Investigating the effect of drought on vegetation using remote sensing techniques, case study: Dorudzan Dam catchment area. Geography (Quarterly Journal of the Geographical Society of Iran), 19(70), pp.153-172. (In Persian) <http://dor.net/dor/20.1001.1.27172996.1400.19.70.9.9>
- Alito, K. T., Kerebih, M. S. 2024. Spatio-temporal assessment of agricultural drought using remote sensing and ground-based data indices in the Northern Ethiopian Highland. Journal of Hydrology: Regional Studies, 52, p.101700. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101700>
- Asghari Saraskanroud, S., Faramarzi Ouri, B., Zeinali, B., Mostafazadeh, R., 2024. Estimation of land surface temperature (LST) using single-channel and multi-band methods in Sablan mountainous region. Advances in Space Research, 74(7), pp.2915-2929. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.06.027>
- Cheng, Y., Zhang, K., Chao, L., Shi, W., Feng, J., Li, Y., 2023. A comprehensive drought index based on remote sensing data and nested copulas for monitoring meteorological and agroecological droughts: A case study on the Qinghai-Tibet Plateau. Environmental Modelling & Software, 161,p. 105629. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2023.105629>
- Dehmardeh, A., Heshmatpour, A., Fathabadi, A., Jandaghi, N. 2026. Investigate the Effect of Wet and Drought on Groundwater Quantity and Quality of Kalaleh city. Journal of new approaches in water engineering and environment. 5 (1), pp.39-57. <https://doi.org/10.22034/nawee.2024.460310.1084>
- Ebadi Nahari, Z., Erfanian, M., Kazempour Chorsi, S., 2023. Presenting a new method for comprehensive drought assessment and monitoring of Lake Urmia basin using the Integrated Drought Index (SDI). Applied Research in Geographic Sciences, 23(68), pp.243-257. (In Persian) Doi:10.52547/jgs.23.68.243
- Hajjabadi, F., Hassanpour, F., Yaghoobzadeh, M., Hammami, H. 2025. Assessing the effect of climate change on agricultural drought by using of SMDI index in different Irrigation levels. Journal of new approaches in water engineering and environment. 4 (1), pp.72-84. <https://doi.org/10.22034/nawee.2025.486306.1116>
- Hissan, R. U., Parveen, N., 2025. Predicting long-term meteorological drought using random forest and multi-scale drought indices. Theoretical and Applied Climatology.
- Jahangiri, E., Motamedvaziri, B., Kiadaliri, H. 2024. Investigating the Impact of Climate Change on Drought with SPI and SPEI Indices (Case Study of Karun 3 Watershed). Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering. 18 (65), pp.85-97. <https://doi.org/10.22092/ijwse.2025.366120.1846>

- Koroozhdeh, M., Amininia, K., Saghebain, M. 2025. Investigating the drought situation in Razavi Khorasan province using SPEI and VCI indices. *Journal of geograph space*. 91 (25),pp. 147-168. <https://doi.org/10.83252/geospa.2025.3.4112>
- Liu, Q., Yang, S., Li, S., Zhang, H., Zhang, J., Fan, H., 2024. The optimal applications of scPDSI and SPEI in characterizing meteorological drought, agricultural drought and terrestrial water availability on a global scale. *Science of The Total Environment*, 906, 167621.
- Meseguer-Ruiz, O., Serrano-Notivoli, R., Aránguiz-Acuña, A., Fuentealba, M., Nuñez-Hidalgo, I., Sarricolea, P., Garreaud, R., 2024. Comparing SPI and SPEI to detect different precipitation and temperature regimes in Chile throughout the last four decades. *Atmospheric Research*, 297, 107085. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.107085>
- Moradi M., Moradi H.R., Vafakhah M. 2023. Investigating temporal and spatial changes of meteorological drought (SPI) in Karun watershed. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, 2(1), pp.113-128. <https://doi.org/10.22034/nawee.2023.401019.1044>
- Peng, L., Sheffield, J., Wei, Z., Ek, M., Wood, E. F., 2024. An enhanced standardized precipitation–evapotranspiration index (SPEI) drought-monitoring method integrating land surface characteristics. *Earth System Dynamics*, 15, pp.1277–1295.
- Potop, V. C., Boroneant, M., Mozny, P., Stepanek, P., 2014. Observed spatiotemporal characteristics of drought on various time scales over the Czech Republic. *Theoretical and Applied Climatology*, 115, pp. 563-581.
- Razmkhah H. 2022. Assessing SPI-3 months spatial variation using Kriging, Case study, Fars province. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, 1(2), pp. 25-36. <https://doi.org/10.22034/nawee.2023.357687.1020>
- Sabzevari, Y., Eslamian, S., Okhravi, S. (2025). Application and Evaluation of SPI and SPEI Indices in Drought Analysis. *Journal of New Approaches in Water Engineering and Environment*, 4(2), pp. 79-90. <https://doi.org/10.22034/nawee.2025.505572.1139>
- Sabzevari, Y., Eslamian, S., Okhravi, S. 2025. Application and Evaluation of SPI and SPEI Indices in Drought Analysis. *Journal of new approaches in water engineering and environment*. 4 (2), pp.79-90. <https://doi.org/10.22034/nawee.2025.505572.1139>
- Shojaee Shiri, H., Arzani, H., Keshtkar, H., Bagheri, S., Kavooosi, O. 2025. Assessment and Monitoring of Drought Using Satellite and Meteorological Time Series Data (Case Study: Zanjan Province). *Journal of ECO Hydrology*. 12 (1), pp.613-634. <https://doi.org/10.22059/ije.2025.380086.1841>
- Sun, H., Xu, Z., Liu, H., 2023. An evaluation of the response of vegetation greenness, moisture, fluorescence, and temperature-based remote sensing indicators to drought stress. *Journal of Hydrology*, 625, 130125. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.130125>
- Talebi, H., Samadianfard, S., 2024. Integration of machine learning and remote sensing for drought index prediction: A framework for water resource crisis management. *Earth Science Informatics*.
- Wan, L. V. A. B., Yanping, Q., Jianxiu, Q., Hongquan, S., Rong, Z., Xiaoping, W., Feng, X., Jinkuo, L., Qianfeng, W., 2023. Drought characteristics and dominant factors across China: Insights from high-resolution daily SPEI dataset between 1979 and 2018. *Science of The Total Environment*, 901,p. 166362. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166362>
- Wu, C., Zhong, L., Yeh, P. J. F., Gong, Z., Lv, W., Chen, B., Zhou, J., Li, J., Wang, S., 2024. An evaluation framework for quantifying vegetation loss and recovery in response to meteorological drought based on SPEI and NDVI. *Science of The Total Environment*, 906,p. 167632. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167632>
- Yazdanpanah, H., Momeni, M., Hosseingholi Nejad-Dezfuli, H., Movahedi, S., Soleimani Tabar, M., 2014. Comparison of remotely sensed vegetation indices in drought monitoring (case study of the rangelands of the northern half of Khuzestan province). *Geography and Environmental Planning*, 25(2), pp.85-98. (In Persian) <https://sid.ir/paper/511454/fa>
- Zhao, H. Y. H., Xiaowei, W., Xiaoyu, L., Tianjie, L., 2023. The performance of SPEI integrated remote sensing data for monitoring agricultural drought in the North China Plain. *Field Crops Research*, 302, p. 109041. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.109041>