



Assessment and Monitoring of Drought Using Satellite and Meteorological Time Series Data (Case Study: Zanjan Province)

Hossein Shojaei Shiri,¹ Hossein Arzani,² Hamidreza Keshtkar,^{3*}  Setareh Bagheri,⁴ Omid Kavooosi⁵ 

1. Department of Reclamation of Arid and Mountainous Regions, Faculty of Natural Resources, University College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: shiri13751380@gmail.com

2. Department of Reclamation of Arid and Mountainous Regions, Faculty of Natural Resources, University College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: harzani@ut.ac.ir

3. Department of Reclamation of Arid and Mountainous Regions, Faculty of Natural Resources, University College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: Hkeshtkar@ut.ac.ir

4. Department of Reclamation of Arid and Mountainous Regions, Faculty of Natural Resources, University College of Agriculture & Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran. Email: s.bagheri2021@yahoo.com

5. Crisis Management Directorate, Alborz Governorate, Karaj, Iran. Email: omidkavooosi20@gmail.com

Article Info

Article type:

Research Article

Article history:

Received 12 January 2025

Received in revised form 27

January 2025

Accepted 15 March 2025

Available online 21 March
2025

Keywords:

Drought indices,

SPI,

SPEI,

NDVI,

Zanjan.

ABSTRACT

Objective: This study aims to conduct a comparative analysis of drought indices by integrating meteorological and satellite-based indices to enhance the spatial and temporal monitoring of drought in Zanjan Province.

Method: Two meteorological drought indices, Standardized Precipitation Index (SPI) and Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI), were calculated for different time scales (1, 3, 6, 9, and 12 months) from 2004 to 2022. Additionally, five satellite-based drought indices—Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Enhanced Vegetation Index (EVI), Vegetation Condition Index (VCI), Temperature Condition Index (TCI), and Vegetation Health Index (VHI)—were extracted for the same period. The results of these indices were compared to evaluate their effectiveness in drought monitoring.

Results: The SPI and SPEI indices indicated that most of the studied years were in a normal condition, with excessive rainfall in 2019. SPEI identified drought conditions in 2008, 2011, and 2022, while SPI recorded drought in 2007 and 2022. Among the satellite-based indices, NDVI showed the highest correlation with meteorological indices ($R^2 = 0.82$), whereas VHI exhibited the lowest correlation ($R^2 = 0.57$).

Conclusions: The study highlights the effectiveness of NDVI in monitoring drought compared to other satellite-based indices. The findings provide a basis for informed decision-making in utilizing remote sensing data for rapid drought assessment.

Cite this article: Shojaei 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). *ECOHYDROLOGY*, 12 (1), 613-634. <https://doi.org/10.22059/IJE.2025.380086.1841>



© Hossein Shojaei Shiri, Hossein Arzani, Hamidreza Keshtkar, Setareh Bagheri, Omid Kavooosi.

Publisher: University of Tehran Press. DOI: <https://doi.org/10.22059/IJE.2025.380086.1841>

Introduction

In recent decades, climate change has intensified the frequency and severity of natural hazards, including droughts, which significantly impact environmental and socioeconomic systems. Drought monitoring is essential for mitigating its adverse effects, yet its dynamic nature and delayed impacts make it challenging to predict. Traditional meteorological drought indices, such as the Standardized Precipitation Index (SPI) and the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI), are widely used for drought assessment. However, relying solely on meteorological data can be insufficient due to data scarcity and spatial limitations of weather stations. Remote sensing techniques have emerged as a complementary approach, providing spatially comprehensive and timely information for drought monitoring. Various satellite-based indices, such as the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Enhanced Vegetation Index (EVI), Vegetation Condition Index (VCI), Temperature Condition Index (TCI), and Vegetation Health Index (VHI), are used to assess vegetation stress and drought conditions. This study aims to compare the effectiveness of meteorological and satellite-based drought indices in monitoring drought conditions in Zanjan Province, Iran.

Methodology

The research utilizes a combination of meteorological and satellite-based indices to analyze drought conditions over a 19-year period. The meteorological drought indices used in this study include SPI and SPEI, which were calculated using precipitation and temperature data from 11 synoptic weather stations. These indices were computed for different time scales, including 1-month, 3-month, 6-month, 9-month, and 12-month periods, to capture both short-term and long-term drought variations. The meteorological data were processed using MATLAB software, and the resulting drought classifications were mapped using GIS techniques.

To complement the meteorological analysis, five satellite-based drought indices were extracted from MODIS (MOD13Q1) imagery:

- **NDVI** (Normalized Difference Vegetation Index) measures vegetation health by comparing the difference between near-infrared and red reflectance.
- **EVI** (Enhanced Vegetation Index) is similar to NDVI but incorporates additional atmospheric corrections to improve sensitivity in dense vegetation areas.
- **VCI** (Vegetation Condition Index) evaluates vegetation stress by normalizing NDVI values over a historical time series.
- **TCI** (Temperature Condition Index) assesses temperature anomalies to indicate heat stress in vegetation.
- **VHI** (Vegetation Health Index) combines both VCI and TCI to provide a comprehensive measure of vegetation health.

The correlation between meteorological and satellite-based indices was evaluated using Pearson's correlation coefficient (r). The spatial distribution of drought severity was mapped using GIS and TerrSet software, and the relationship between indices was analyzed to determine which indices best represent drought conditions in Zanjan Province.

Results and Discussion

The results of the study reveal distinct drought patterns in Zanjan Province over the 19-year study period. The SPI and SPEI indices indicate that most years were classified as normal, with only 2019 experiencing excessive rainfall. However, drought conditions were observed in multiple years, with SPEI identifying severe drought in 2008, 2011, and 2022, while SPI recorded drought events in 2007 and 2022. The difference in drought classification between SPI and SPEI highlights the influence of temperature on drought assessment, as SPEI incorporates evapotranspiration effects, making it more sensitive to temperature fluctuations.

The spatial analysis of drought severity based on meteorological indices showed that different regions of Zanjan Province experienced varying drought intensities. The northern and central parts of the province were more prone to drought, while the southern and western regions exhibited less severe

drought conditions. These spatial variations emphasize the need for localized drought monitoring strategies to address regional differences in drought vulnerability.

Among the satellite-based indices, NDVI exhibited the highest correlation with meteorological indices, with a coefficient of determination (R^2) of 0.82, indicating a strong relationship between NDVI and SPI/SPEI. This finding suggests that NDVI is a reliable indicator of drought conditions, as it effectively captures vegetation stress caused by precipitation deficits. In contrast, VHI demonstrated the lowest correlation ($R^2 = 0.57$), suggesting that it may be less effective in detecting drought conditions in this region. The moderate performance of VCI and TCI further highlights the variability in satellite-based indices, as their effectiveness depends on the specific environmental conditions of the study area.

The temporal analysis of NDVI trends showed that vegetation conditions deteriorated during drought years, with significant declines in NDVI values observed in 2008, 2011, and 2022. These findings align with the meteorological drought classifications, confirming that remote sensing data can provide valuable insights into drought impacts on vegetation. Additionally, EVI, which incorporates atmospheric corrections, exhibited a strong correlation with meteorological indices, making it a useful alternative for drought monitoring. However, EVI showed slightly lower sensitivity in areas with sparse vegetation, indicating that its applicability may be limited in arid and semi-arid regions.

Conclusion

The study demonstrates the significance of integrating remote sensing data with meteorological indices for comprehensive drought monitoring. The high correlation between NDVI and meteorological drought indices suggests its suitability for assessing vegetation stress due to drought. The findings highlight the importance of using multiple drought indices to capture different aspects of drought events, ensuring more accurate and reliable drought assessment. These results can aid decision-makers in implementing timely drought mitigation strategies and optimizing resource management in drought-prone regions.

Author Contributions

All authors have the same contributions in conceptualization; investigation; data collection; methodology; formal analysis; software; initial drafting; writing and editing.

Data Availability Statement

It is a part of MSc thesis which is undergoing at the University of Tehran

Acknowledgements

The authors sincerely appreciate the Iran Meteorological Organization for providing the meteorological data used in this study.

Ethical considerations

This study was conducted in accordance with ethical principles and guidelines. All data used in this research were obtained from publicly available sources or authorized institutions, ensuring compliance with ethical standards. The authors declare that there are no conflicts of interest regarding this study.

Funding

This research was supported by the University of Tehran, which provided the necessary facilities and financial support for conducting this study.

Conflict of interest

The authors declare that they have no conflict of interest regarding this study.

ارزیابی و پایش وضعیت خشکسالی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و هواشناسی براساس سری‌های زمانی (مطالعه موردی: استان زنجان)

حسین شجاعی شیر،^۱ حسین ارزانی،^۲ حمیدرضا کشتکار،^{۳*} ستاره باقری،^۴ امید کاوسی^۵

۱. دانش آموخته کارشناسی ارشد، گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: shiri13751380@gmail.com
۲. استاد گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: harzani@ut.ac.ir
۳. استادیار گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: Hkeshhtkar@ut.ac.ir
۴. پژوهشگر پس‌دکتری گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشکده‌گان کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران. رایانامه: s.bagheri2021@yahoo.com
۵. اداره کل مدیریت بحران، استانداری البرز، کرج، ایران. رایانامه: omidkavoosi20@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله:	موضوع: پایش مکانی و زمانی خشکسالی با استفاده از شاخص‌های هواشناسی و ماهواره‌ای در استان زنجان.
مقاله پژوهشی	هدف: این مطالعه با هدف مقایسه شاخص‌های خشکسالی، شامل دو شاخص هواشناسی و پنج شاخص مبتنی بر داده‌های ماهواره‌ای، به منظور بهبود پایش خشکسالی در استان زنجان انجام شده است.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۲۳	روش تحقیق: در این پژوهش، دو شاخص هواشناسی شامل شاخص بارندگی استاندارد (SPI) و شاخص بارش تبخیر و تعرق استاندارد (SPEI) برای سری‌های زمانی ۱، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه در بازه ۲۰۰۴ تا ۲۰۲۲ محاسبه شدند. همچنین، پنج شاخص خشکسالی مبتنی بر داده‌های ماهواره‌ای شامل NDVI، EVI، VCI، TCI و VHI در همین بازه زمانی استخراج گردید. در ادامه، نتایج این شاخص‌ها با داده‌های هواشناسی مقایسه شد.
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۰۸	یافته‌ها: نتایج نشان داد که شاخص‌های SPI و SPEI بیش‌تر سال‌های مورد بررسی را در وضعیت نرمال گزارش کرده‌اند، درحالی‌که تنها در سال ۲۰۱۹ ترسالی مشاهده شد. SPEI وقوع خشکسالی را برای سال‌های ۲۰۰۸، ۲۰۱۱ و ۲۰۲۲ تأیید کرد، درحالی‌که SPI خشکسالی را برای سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۲۲ ثبت نمود. در میان شاخص‌های ماهواره‌ای، NDVI با ضریب تشخیص ($R^2 = 0.82$) بیش‌ترین همبستگی را با شاخص‌های هواشناسی نشان داد، درحالی‌که VHI کمترین میزان ($R^2 = 0.57$) را داشت.
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۲۵	نتیجه‌گیری: نتایج این پژوهش نشان داد که شاخص NDVI در مقایسه با سایر شاخص‌های ماهواره‌ای عملکرد بهتری در پایش خشکسالی دارد. این یافته‌ها می‌توانند به عنوان مبنایی برای تصمیم‌گیری صحیح در ارزیابی سریع داده‌های سنجش از دور و پایش خشکسالی مورد استفاده قرار گیرند.
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۱/۰۱	
کلیدواژه‌ها:	
شاخص‌های خشکسالی،	
SPI	
SPEI	
NDVI	
زنجان	

استناد: شجاعی شیر، حسین؛ ارزانی، حسین؛ کشتکار، حمیدرضا؛ باقری، ستاره؛ کاوسی، امید. ارزیابی و پایش وضعیت خشکسالی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و هواشناسی براساس سری‌های زمانی (مطالعه موردی: استان زنجان). *اکوهیدرولوژی*، ۱۱(۱)، ۶۱۳-۶۳۴. <https://doi.org/10.22059/IJE.2025.380086.1841>

مقدمه

در دهه‌های اخیر، تغییرات اقلیمی منجر به افزایش وقوع و شدت خطرات طبیعی مانند بارندگی شدید، سیل، آتش‌سوزی جنگل‌ها و خشکسالی شده است که نشان‌دهنده روند افزایشی است (مسعود، غیان و فرامرزی^۱، ۲۰۲۰؛ کریبیچ^۲ و همکاران، ۲۰۱۷). این روند افزایشی به‌ویژه برای کشورهای درحال توسعه خطرناک است (زامبرانو^۳ و همکاران، ۲۰۱۷) خشکسالی‌ها علاوه بر اثرات تأخیری، با ابعاد دینامیکی متعدد از جمله شدت و مدت تغییر می‌کنند. این موضوع علاوه بر اینکه توصیف آن را دشوار کرده است، پیش‌بینی آن را به چالش مهمی برای محققان، برنامه‌ریزان و تصمیم‌گیران و سیاست‌گذاران تبدیل کرده است؛ بنابراین، پایش خشکسالی امری ضروری محسوب می‌گردد (ژئو^۴ و همکاران، ۲۰۲۰).

پایش خشکسالی اغلب با استفاده از شاخص‌ها صورت می‌گیرد (مک‌کی، دویسکن و کلیست^۵، ۱۹۹۳؛ ویسنت^۶ و همکاران، ۲۰۱۰). تفاوت در مبانی فیزیکی متغیرهای مرتبط با خشکسالی، توسعه یک ابزار پایش و پیش‌بینی خشکسالی موفق را براساس یک متغیر یا شاخص منفرد مانند بارش یا رطوبت خاک، اگر نگوئیم غیرممکن، دشوار می‌سازد. به عبارتی دیگر، استفاده از یک شاخص واحد برای نشان دادن تنوع و پیچیدگی شرایط و تأثیر خشکسالی یکی از محدودیت‌های اصلی پایش خشکسالی محسوب می‌گردد (ویلپیت، ۲۰۰۵). از این رو، اغلب بررسی و مقایسه شاخص‌های گوناگون با هدف تشخیص بهترین شاخص‌ها در مطالعات جهانی و منطقه‌ای مد نظر قرار می‌گیرد (میرموسوی و کریمی، ۱۳۹۲).

از سوی دیگر، تکیه بر داده‌های آب‌وهوایی به‌تنهایی برای نظارت بر مناطق تحت‌تأثیر خشکسالی کافی نیست؛ به‌ویژه زمانی که این داده‌ها می‌توانند نابهنگام، پراکنده و ناقص باشند. بنابراین، بهبود داده‌های آب‌وهوایی با تصاویر ماهواره‌ای برای شناسایی مکان و شدت خشکسالی برای پوشش کامل، به‌روز و جامع از شرایط خشکسالی ضروری است (جی و پیتز، ۲۰۰۳). لزوم استفاده از فناوری سنجنش از دور نیز در پایش خشکسالی هواشناسی پررنگ است؛ زیرا درست است که می‌توان خشکسالی هواشناسی را به‌طور سنتی، با استفاده مستقیم از شاخص‌های خشکسالی هواشناسی، برای مثال، شاخص بارش استاندارد شده^۹ (SPI) و شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده^{۱۰} (SPEI) تشخیص داد (جی و پیتز، ۲۰۰۳). اما به‌دلیل محدودیت‌های جغرافیایی و اقتصادی هنگام تأسیس ایستگاه‌های هواشناسی، توانایی ارائه تخمین‌های خشکسالی صریح مکانی وجود ندارند (اوزکان، چن و یوستانگ، ۲۰۱۶).

محققان از شاخص‌های متعددی در مطالعات خشکسالی استفاده نموده‌اند. برای مثال در یک مطالعه، از برخی از شاخص‌های خشکسالی نظیر^{۱۲} VHI،^{۱۳} TCI،^{۱۴} VCI،^{۱۵} SWI و SPI برای پایش پویایی خشکسالی در منطقه Aravalli استفاده شده است (بویان، سینگ و کوغان، ۲۰۰۶). نتایج مطالعه آن‌ها براساس نقشه‌های سری زمانی خشکسالی‌های مختلف هیچ‌گونه همبستگی خطی را بین خشکسالی‌های هواشناسی، هیدرولوژیکی و رویشی در منطقه نشان ندادند. در مطالعه‌ای دیگر از SPI برای ارزیابی توزیع مکانی-زمانی و شدت خشکسالی‌های هواشناسی استفاده کردند و دریافتند که توزیع مکانی-زمانی رویدادهای خشکسالی در مناطق کشاورزی-اکولوژیکی در حوضه دریاچه دره‌ریفت متغیر است (تسفماریان، ملگانی و گسیس، ۲۰۱۹). نصیر و همکاران

1. Masud, Qian & Faramarzi

2. Kreibich

3. Zambrano

4. Zhao

5. McKee, Doesken & Kleist

6. Vicente

7. Wilhite

8. Ji & Peters

9. Standardized Precipitation Index

10. Standardized Transpiration & Evapotranspiration index

11. Ozelkan, Chen & Ustundag

12. Vegetation Health Index

13. Temperature Condition Index

14. Vegetation Condition Index

15. Standardized Water-Level Index

16. Bhuiyan, Singh & Kogan

17. Tesfamariam, Melgani & Gessesse

(۲۰۲۱) از SPEI در مقیاس زمانی سه‌ماهه استفاده کردند و دریافتند که خشکسالی شدید در تمام مناطق منطقه تحقیقاتی از سال ۱۹۸۳ تا ۱۹۹۱ رخ داده است. در تحقیقی که در ترکیه انجام گرفته، محققان خشکسالی هواشناسی را با استفاده شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده و خشکسالی کشاورزی را با کمک شاخص وضعیت گیاهی (VCI) مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند و نتایج همبستگی نشان داد که بیشترین همبستگی بین دو پارامتر برای تمام مناطق با SPEI 12 در تابستان و سپس پاییز و بهار به دست آمده است (سورمان، مهر و هادی، ۲۰۱۸). صابری و همکاران (۱۳۹۷) رابطه SPI با NDVI به دست آمده از تصاویر مودیس (MODIS) در استان آذربایجان غربی را مورد بررسی قرار دادند. براساس یافته‌های آن‌ها، SPI بیشترین همبستگی را با NDVI برای تعیین تغییرات دوره خشک داشت. این محققان در مطالعه‌ای دیگر، خشکسالی در دریاچه ارومیه را با تجزیه و تحلیل همبستگی بین NDVI و SPI بررسی کردند؛ نتایج آن‌ها نشان داد که شاخص خشکسالی کوتاه مدت (SPEI 3) در آن حوضه همبستگی قابل توجهی با NDVI ماهانه دارد. در پژوهشی که به منظور برآورد و پیش‌بینی پوشش گراسلندها در قسمت‌های غربی مغولستان با استفاده از شاخص‌های گیاهی مشتق شده از تصاویر سنجنده مودیس انجام شد، نتایج نشان داد که داده‌های NDVI و EVI^۴ برای مدیران مراتع به منظور نظارت و پیش‌بینی وضعیت مراتع و همچنین اتخاذ شیوه‌های چرای مفید و مورد نیاز است (پالتسن^۵ و همکاران، ۲۰۱۷). مطالعات فوق بر لزوم استفاده از شاخص‌ها به عنوان ابزار پایش خشکسالی تأکید دارند.

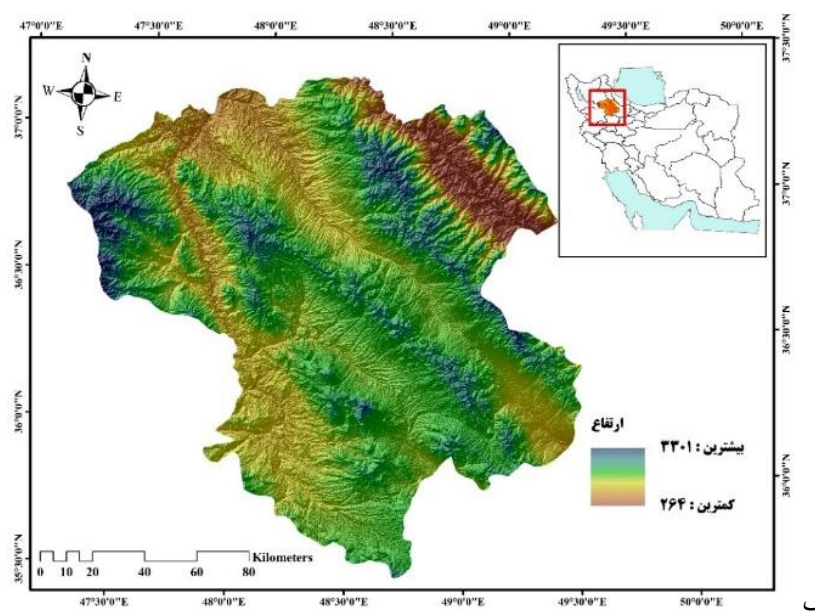
در این مطالعه، هدف اصلی مقایسه توانایی شاخص‌های ماهواره‌ای در شناسایی تغییرات پوشش گیاهی ناشی از خشکسالی و مقایسه آن با روش‌های آماری مبتنی بر داده‌های بارندگی و تبخیر و تعرق ایستگاه‌های هواشناسی در استان زنجان است. همچنین، این تحقیق به پایش مکانی و زمانی خشکسالی در این منطقه براساس داده‌های تولید شده در بازه زمانی ۲۰۰۴ تا ۲۰۲۲ برای سری‌های زمانی ۱، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه می‌پردازد. با توجه به اهمیت اقتصادی و اجتماعی استان زنجان، نتایج این تحقیق باید در شناسایی و اجرای طرح‌های مقابله با خشکسالی در اولویت قرار گیرد تا کارایی و دقت هریک از شاخص‌ها به بهترین نحو مورد استفاده قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

استان زنجان با وسعتی برابر ۲۲۱۶۴۰۰ هکتار، ۱/۵ درصد مساحت کشور را تشکیل داده و در ۳۵ درجه و ۲۵ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۱۵ دقیقه عرض شمالی و ۴۷ درجه و ۱ دقیقه تا ۴۹ درجه و ۵۲ دقیقه طول شرقی قرار گرفته است. این استان از شمال با استان‌های اردبیل و آذربایجان شرقی، از جنوب با استان همدان، جنوب غربی و شرقی به ترتیب با کردستان و قزوین و شمال غربی و شرقی نیز به ترتیب با استان‌های آذربایجان غربی و گیلان هم‌مرز است. میانگین دمای استان بین ۹/۴ درجه سانتی‌گراد تا ۱۷/۵ درجه سانتی‌گراد متغیر است. ارتفاع از سطح دریا در استان زنجان از ۳۷۰ متر تا ۲۰۰۰ متر متغیر است. متوسط دمای سالانه ۱۰/۹۴ درجه سانتی‌گراد و متوسط بارندگی ۳۲۰ میلی‌متر است. استان زنجان به لحاظ داشتن تنوع ارتفاعی و تأثیرپذیری از چند توده هوایی خزری، مدیترانه‌ای و صحرای مرکزی، دارای اقلیم‌ها و اکوسیستم‌های متنوع است. با وجود این، استان زنجان جزو یکی از استان‌های سردسیر و کوهستانی شمال غربی کشور به شمار می‌آید و اقلیم غالب این منطقه نیمه‌خشک است (آقاجانجلو و همکاران، ۲۰۱۸).

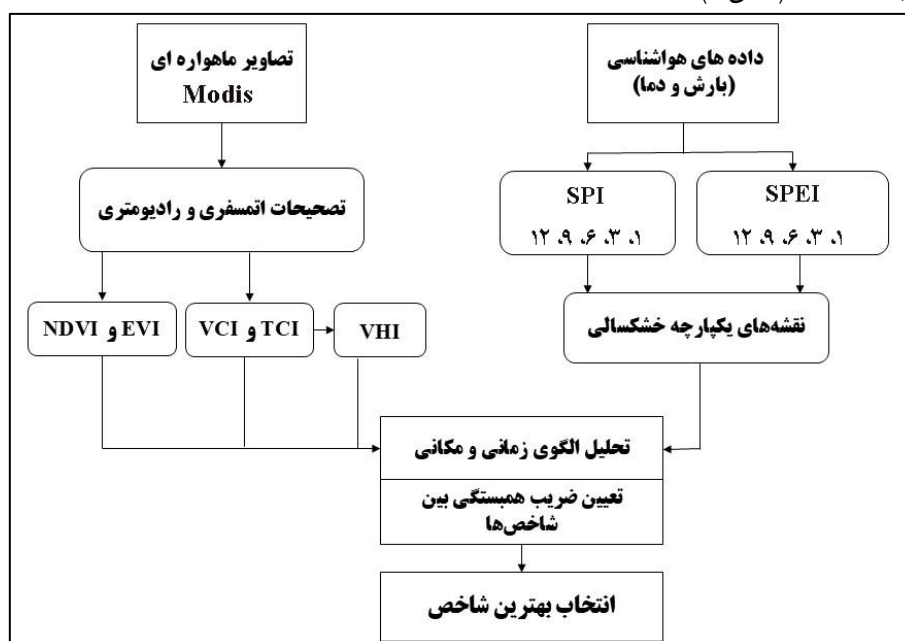
1. Şorman, Mehr & Hadi
2. Normalized Difference Vegetation Index
3. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
4. Enhanced Vegetation Index
5. Paltsyn



شکل ۱. موقعیت و مدل ارتفاعی منطقه مورد مطالعه

روش انجام پژوهش

برای انجام این پژوهش شاخص‌های هواشناسی SPI و SPEI از مجموع داده‌های ماهانه بارش و دما ۱۱ ایستگاه در بازه زمانی ۲۰۲۲-۲۰۰۴، برای سری‌های زمانی ۱، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه در نرم‌افزار MATLAB محاسبه شد. برای استخراج شاخص‌های ماهواره‌ای EVI، NDVI، VCI، TCI و VHI نیز محصول MOD13Q1 سنجنده MODIS در بازه زمانی مورد مطالعه از (سایت ناسا^۱) دانلود شد. برای ارزیابی ارتباط میان شاخص‌های هواشناسی و ماهواره‌ای مورد مطالعه از ضریب همبستگی پیرسون (r) استفاده شد. تمام محاسبات مربوط و تولید نقشه‌های شاخص خشکسالی از طریق نرم‌افزارهای Terrset و سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS) به دست آمد (شکل ۲).



شکل ۲. روند نمای انجام پژوهش

1. <https://earthexplorer.usgs.gov>

شاخص‌های هواشناسی

برای محاسبه شاخص‌های خشکسالی SPI و SPEI از اطلاعات بارندگی و دمای میانگین ماهانه ایستگاه‌های سینوپتیک استان زنجان و ایستگاه‌های هم‌جوار با مرز این استان، (درمجموع ۱۱ ایستگاه) استفاده شد. در این مطالعه برای ایجاد نقشه‌های مربوط به این دو شاخص، در محیط نرم‌افزار ArcGIS، از روش درون‌یابی IDW برای تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی شده استفاده شد.

۱. شاخص SPI

شاخص بارش استاندارد می‌تواند برای پایش و ارزیابی انواع مختلف خشکسالی در مقیاس‌های مکانی مورد استفاده قرار گیرد. این شاخص فقط عامل بارندگی را در نظر می‌گیرد و اثرات تبخیر ناشی از دما و سایر عوامل هواشناسی نادیده گرفته می‌شود. این شاخص در مقیاس‌های زمانی مختلف (SPI-1, SPI-3, SPI-6, SPI-9, SPI-12) و براساس رابطه (۱) تهیه شد.

$$SPI = \frac{P_i - \bar{P}}{S} \quad \text{رابطه (۱)}$$

که در آن، P_i مقدار بارندگی در سال مورد نظر، S انحراف معیار و $\bar{P}$ میانگین بارندگی طولانی‌مدت است. شاخص بارش استاندارد، با ارقام مثبت نسبت به میانگین بارش به نمایانگری بهتر از معدل بارش است و درمقابل، مقادیر منفی این شاخص به نمایانگری پایین‌تر از معدل بارش هستند. این شاخص به‌صورت عددی بیان می‌شود و این امکان را فراهم می‌کند تا به‌صورت یکسان و قابل مقایسه در مناطق با شرایط آب‌وهوایی مختلف مورد استفاده قرار گیرد. همچنین، از این شاخص می‌توان برای تعیین دوره‌های مرطوب و خشک در طول زمان استفاده کرد (زو^۱ و همکاران، ۲۰۲۱).

۲. شاخص SPEI

شاخص بارش تبخیر و تعرق استاندارد با استفاده از پارامتر بارش (P) و تبخیر تعرق پتانسیل (PET) محاسبه می‌گردد. بر این اساس، برای برآورد تبخیر تعرق پتانسیل از معادله تورنت وایت^۲ (۱۹۸۴) استفاده شد (رابطه ۲).

$$PET = 16N_m \left(\frac{10T_m}{I} \right)^a \quad \text{رابطه (۲)}$$

که در آن N_m ضریب تصحیحی است که بر مبنای ماه مورد نظر و عرض جغرافیایی منطقه مورد مطالعه تعیین شد. T_m میانگین دمای ماه مورد نظر برحسب درجه سانتی‌گراد، I شاخص حرارتی که برای کل سال و a که بر مبنای I محاسبه شد. پس از به دست آوردن میانگین ماهانه بارش و دمای همه ایستگاه‌ها در بازه زمانی مورد مطالعه، تمامی محاسبات SPEI مربوط به مقیاس‌های زمانی ۱، ۳، ۶، ۹ و ۱۲ ماهه در نرم‌افزار MATLAB کدنویسی شد. شاخص SPEI دارای مقادیر مثبت و منفی است که هرچه مقادیر منفی بزرگ‌تر باشد، نشان‌دهنده خشکسالی با شدت بیشتر است (جدول ۱).

جدول ۱. طبقه‌بندی شاخص SPEI و SPI (لی و همکاران، ۲۰۱۴)

SPEI/SPI	کلاس خشکی
≤ -2	خشکسالی خیلی شدید
$-1/5$ تا $-1/99$	خشکسالی شدید
$-1/0$ تا $-1/49$	خشکسالی متوسط
$-0/99$ تا $0/99$	نزدیک نرمال
$1/49$ تا $1/0$	ترسالی متوسط
$1/50$ تا $1/99$	ترسالی شدید
≥ 2	ترسالی خیلی شدید

۱-۲. شاخص‌های ماهواره‌ای

براساس اهداف این مطالعه از بین شاخص‌های ماهواره‌ای، شاخص‌های EVI، NDVI، VCI، TCI و VHI مورد استفاده قرار گرفتند که در ادامه، نحوه محاسبه هریک از این شاخص‌ها اشاره شده است.

1. Zuo

2. Thornthwaite

– شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI)

شاخص NDVI که از معروفترین و پرکاربردترین شاخصهای تصویری به شمار می آید از طریق رابطه (۳) محاسبه شد.

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)} \quad \text{رابطه (۳)}$$

که در آن RED انعکاس در باند سرخ و NIR، بازتاب در باند مادون قرمز نزدیک است.

– شاخص بهبود یافته پوشش گیاهی (EVI)

شاخص EVI حساسیت بیشتری در پایش پارامترهای تاج پوشش گیاهان مانند شاخص سطح برگ، ساختار تاج پوشش، فنولوژی و استرس گیاهان نسبت به NDVI دارد. یکی از مهم ترین مزایای این شاخص کاهش اثرات اتمسفری است. شاخص پوشش گیاهی EVI با استفاده از داده های سنجنده MODIS و با استفاده از رابطه (۴) محاسبه شده است.

$$EVI = \left[\frac{R_{NIR} - R_{RED}}{R_{NIR} + C_1 R_{RED} - C_2 R_{BLUE} + 1} \right] 1 + L \quad \text{رابطه (۴)}$$

که در آن R_{NIR} بازتاب در ناحیه مادون قرمز نزدیک، R_{RED} بازتاب در ناحیه قرمز، R_{BLUE} باند آبی و مقادیر ضرایب C_1 ، C_2 و L به ترتیب ۱-، ۶- و ۷/۵- هستند. دامنه عددی این شاخص در بازه ۱- تا ۱+ قرار دارد.

– شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI)

در این مطالعه، برای تولید شاخص VCI از شاخص EVI استفاده شد. رابطه (۵) نحوه محاسبه این شاخص را نشان می دهد:

$$VCI = \frac{EVI - EVI_{min}}{EVI_{max} - EVI_{min}} \times 100 \quad \text{رابطه (۵)}$$

در معادله فوق EVI_{min} و EVI_{max} ، حداقل و حداکثر مقادیر EVI برای همه پیکسل هاست. دامنه عددی این شاخص از صفر برای شرایط بسیار نامطلوب تا ۱۰۰ برای شرایط بهینه متغیر است و به صورت درصد بیان می شود.

– شاخص وضعیت دما (TCI)

بررسی تغییرات دقیق در سلامت پوشش گیاهی به دلیل استرس حرارتی با تجزیه و تحلیل داده های شاخص وضعیت دما (TCI) کنترل می شود (کوغان، ۲۰۰۲^۱). از این رو، شاخص VCI به تنهایی نمی تواند برای پیش بینی خشکسالی استفاده شود و شاخص TCI نیز مورد نیاز است (سینگ، روی و کوگان، ۲۰۰۳^۲). معادله این شاخص برای انعکاس پاسخ حرارتی پوشش گیاهی تعریف شده که هرچه مقدار حرارت بیشتر شود، شدت خشکسالی نیز افزایش می یابد. در واقع متغیر دمای سطح برای ارزیابی خشکسالی با استفاده از بازتاب های طیفی سطح زمین که به LST معروف است، استفاده می شود. برای تولید شاخص TCI از رابطه (۶) استفاده شد.

$$TCI = \frac{LST_{max} - LST_i}{LST_{max} - LST_{min}} \times 100 \quad \text{رابطه (۶)}$$

که در آن، LST_{max} و LST_{min} بیشینه و کمینه دمای سطح زمین در دوره مورد مطالعه است. سنجنده MODIS چندین محصول LST روزانه را از باندهای مادون قرمز حرارتی فراهم می کند. لذا در این مطالعه داده های LST از سنجنده MODIS به دست آمد.

– شاخص سلامت گیاهی (VHI)

از ترکیب شاخص وضعیت دما (TCI) و شاخص وضعیت گیاهی (VCI)، شاخص سلامت گیاهی (VHI) حاصل می شود. این شاخص نیز مطابق رابطه (۷) محاسبه شد.

$$VHI = 0.5 * (VCI) + 0.5 * (TCI) \quad \text{رابطه (۷)}$$

شاخص های VCI و TCI دارای یک رابطه معکوس هستند که در آن مقدار VCI بالاتر، گویای مقدار TCI پایین تر است. ترکیبی از مقادیر VCI و TCI با همان وزن مقادیر، VHI را تولید می کند. نتایج معادله VHI طیف وسیعی از مقادیر صفر تا ۱۰۰ را تولید می کند که به پنج کلاس خشکسالی شامل عدم خشکسالی (نرمال)، خشکسالی ملایم، متوسط، شدید و خیلی شدید طبقه بندی می شوند.

1. Kogan

2. Singh, Roy & Kogan

بررسی همبستگی بین شاخص‌های هواشناسی و ماهواره‌ای

از تحلیل همبستگی برای بررسی وابستگی متقابل بین شاخص‌های هواشناسی و ماهواره‌ای استفاده شد. براساس تحلیل همبستگی در جایی که شاخص‌های خشکسالی باهم ارتباط قوی دارند، این نتیجه نشان می‌دهد که در کجا (و تحت چه شرایطی) شاخص‌های خشکسالی خاص ممکن است بیشترین کاربرد را در تصمیم‌گیری برای مدیریت راهبردی خطر خشکسالی داشته باشند. در این مطالعه، از شاخص همبستگی پیرسون برای بررسی همبستگی بین شاخص‌های هواشناسی و ماهواره‌ای استفاده شد. رابطه همبستگی پیرسون براساس رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

ضریب همبستگی پیرسون در محدوده ۱- تا ۱+ قرار دارد. مقدار ۱+ نمایانگر همبستگی مثبت کامل است، مقدار صفر نمایانگر عدم وجود همبستگی و مقدار ۱- نمایانگر همبستگی منفی کامل است.

نتایج

نتایج حاصل از تحلیل شاخص‌های هواشناسی SPI و SPEI

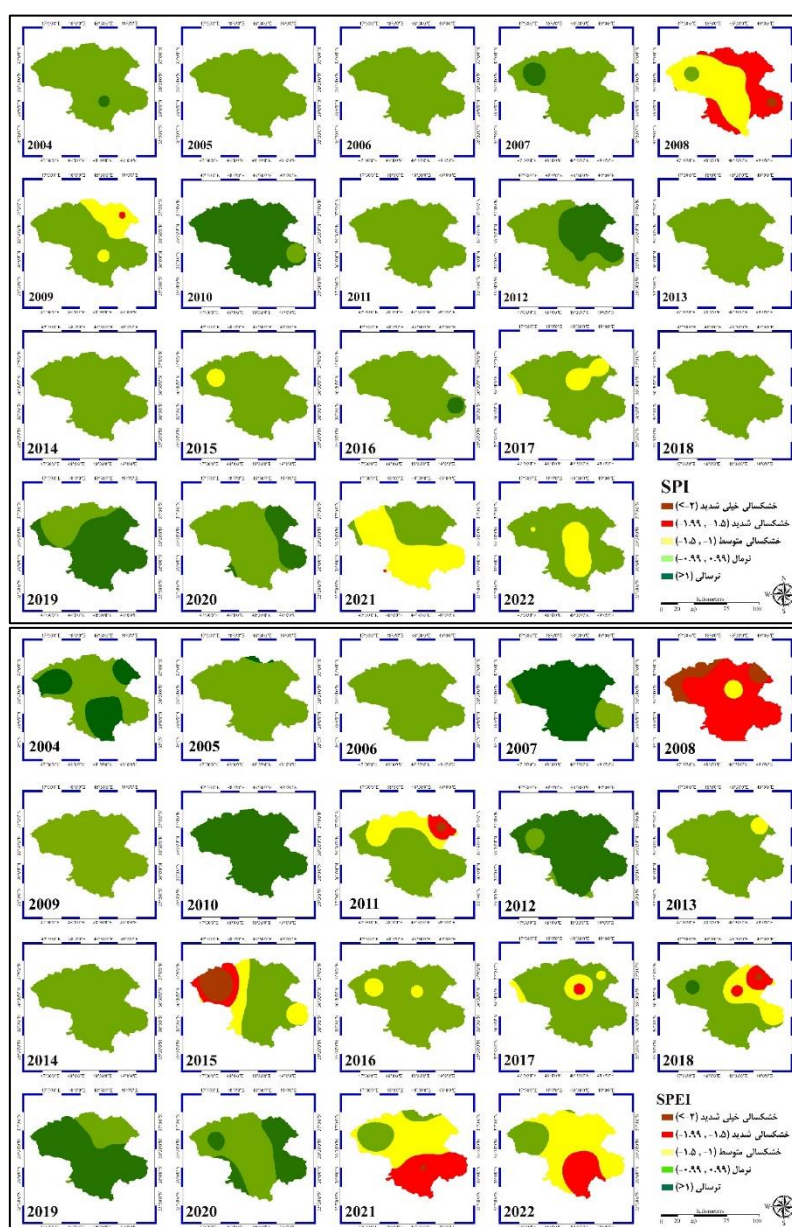
در جدول ۲، طبقه‌بندی وضعیت خشکسالی براساس SPI و SPEI سالانه (۱۲ ماهه) در سه کلاس «خشکسالی»، «نرمال» و «ترسالی» ارائه شده است. همان‌طور که در جدول مشاهده می‌شود کلاس ترسالی فقط در سال ۲۰۱۹ و کلاس خشکسالی در سال ۲۰۰۸ گزارش شده است؛ درحالی‌که تعداد سال‌هایی که کلاس نرمال را به خود اختصاص داده‌اند، بیشتر است. این نتیجه بیانگر این مطلب است که وضعیت اقلیمی استان زنجان در بازه زمانی ۲۰۲۲-۲۰۰۴ در اکثر سال‌ها نرمال بوده است.

در شکل ۲، پهنه‌بندی استان زنجان با استفاده از SPI سالانه برای بازه زمانی مورد مطالعه نشان شده است. مطابق نقشه‌های تهیه‌شده، در طول سال‌های ۲۰۰۸، ۲۰۰۹، ۲۰۱۵، ۲۰۱۷، ۲۰۲۱ و ۲۰۲۲، این استان با درجات مختلف خشکسالی (در بعضی مناطق به‌صورت موضعی) مواجه بوده است. در سال ۲۰۰۸ بخش قابل توجهی از استان، خشکسالی شدید تا خیلی شدید را تجربه کرده است؛ درحالی‌که در سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۲۱ بخش بسیار کوچکی از استان تحت شرایط خشکسالی شدید بوده است. در سال ۲۰۲۱ در قسمت‌های جنوبی و شمال غربی استان خشکسالی متوسط و در سایر قسمت‌ها شرایط نرمال مشاهده می‌شود. در سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۷ در قسمت‌های شمال شرقی استان خشکسالی متوسط رخ داده است. همچنین با توجه به نقشه‌های SPI سالانه، در طول سال‌های ۲۰۱۰، ۲۰۱۲، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ شرایط نرمال رو به ترسالی وجود داشته است که بیشترین مساحت ترسالی متعلق به سال‌های ۲۰۱۰، ۲۰۱۹ و تا حدودی ۲۰۱۲ است.

جدول ۲. طبقه‌بندی وضعیت خشکسالی براساس شاخص‌های سالانه SPI و SPEI

وضعیت	SPI-12	سال	وضعیت	SPEI-12	سال
نرمال	۰/۴۸	۲۰۰۴	نرمال	۰/۹۰	۲۰۰۴
نرمال	۰/۱۰	۲۰۰۵	نرمال	۰/۵۴	۲۰۰۵
نرمال	۰/۱۸	۲۰۰۶	نرمال	۰/۰۶	۲۰۰۶
نرمال	۰/۵۷	۲۰۰۷	نرمال	۰/۸۴	۲۰۰۷
خشکسالی	-۱/۰۶	۲۰۰۸	خشکسالی	-۱/۰۵	۲۰۰۸
نرمال	-۰/۸۱	۲۰۰۹	نرمال	-۰/۲۴	۲۰۰۹
نرمال	۰/۹۲	۲۰۱۰	نرمال	۰/۸۳	۲۰۱۰
نرمال	۰/۱۷	۲۰۱۱	نرمال	۰/۰۱	۲۰۱۱
نرمال	۰/۷۶	۲۰۱۲	ترسالی	۱/۱۷	۲۰۱۲
نرمال	-۰/۱۷	۲۰۱۳	نرمال	-۰/۲۰	۲۰۱۳
نرمال	-۰/۳۶	۲۰۱۴	نرمال	-۰/۳۷	۲۰۱۴
نرمال	-۰/۴۲	۲۰۱۵	نرمال	-۰/۸۸	۲۰۱۵
نرمال	۰/۱۱	۲۰۱۶	نرمال	-۰/۲۲	۲۰۱۶
نرمال	-۰/۷۳	۲۰۱۷	نرمال	-۰/۶۸	۲۰۱۷
نرمال	۰	۲۰۱۸	نرمال	-۰/۵۹	۲۰۱۸
ترسالی	۱/۰۸	۲۰۱۹	ترسالی	۱/۰۴	۲۰۱۹
نرمال	۰/۸۳	۲۰۲۰	ترسالی	۱/۰۴	۲۰۲۰
نرمال	-۰/۶۳	۲۰۲۱	خشکسالی	-۱	۲۰۲۱
خشکسالی	-۱/۰۸	۲۰۲۲	خشکسالی	-۱/۴۱	۲۰۲۲

نتایج پهنه‌بندی خشکسالی استان زنجان با استفاده از SPEI سالانه (۲۰۲۲-۲۰۰۴) در شکل ۳ ارائه شده است. براساس شاخص فوق در سال‌های ۲۰۰۸، ۲۰۱۱، ۲۰۱۳، ۲۰۱۵، ۲۰۱۶، ۲۰۱۷، ۲۰۱۸، ۲۰۲۱ و ۲۰۲۲، خشکسالی با درجات مختلف در این استان رخ داده است؛ به‌طوری‌که از نظر مکانی در سال ۲۰۰۸ در اکثر مناطق استان، و در سال‌های ۲۰۱۱ و ۲۰۱۸ در قسمت‌های شمال شرقی استان و در سال ۲۰۱۵ در قسمت‌های شمال غربی استان خشکسالی شدید تا خیلی شدید مشاهده می‌شود. در سال‌های ۲۰۲۱ و ۲۰۲۲ نیز بیشتر قسمت‌های استان به‌استثنای مناطق شمال غربی استان، تحت‌تأثیر خشکسالی متوسط تا شدید قرار داشته است. علاوه‌بر این، نتایج این شاخص نشان می‌دهد که در سال‌های ۲۰۰۷، ۲۰۱۰ و ۲۰۱۲ و ۲۰۱۹ قسمت‌های بیشتری از استان با ترسالی مواجه بوده است.



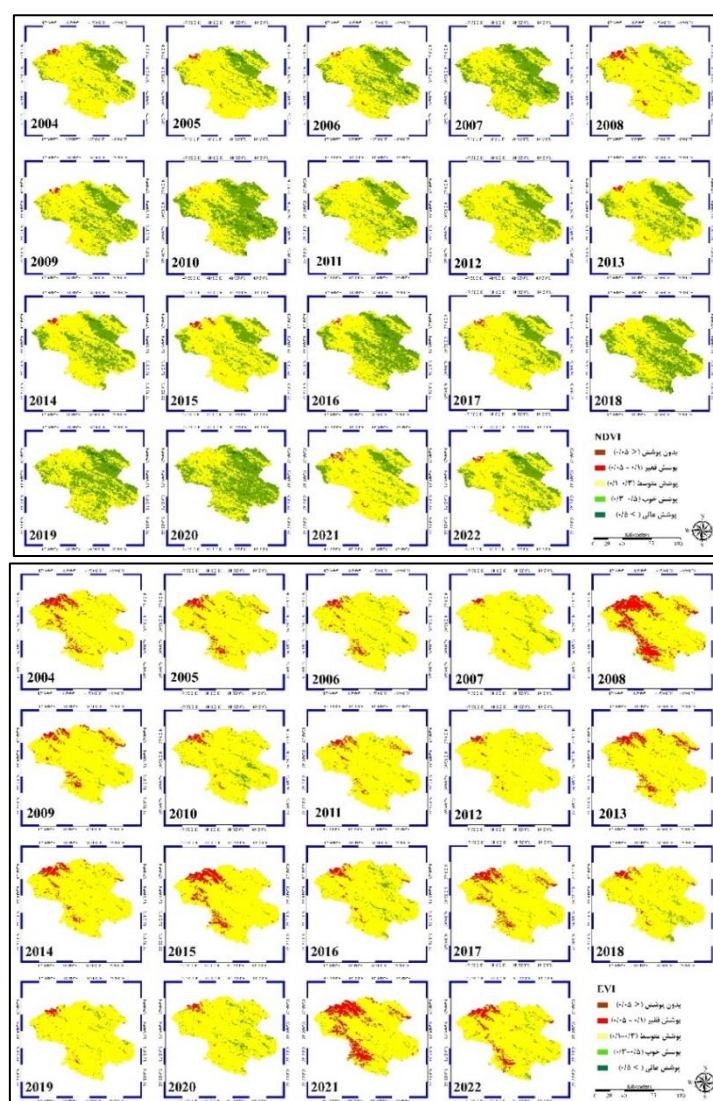
شکل ۳. پهنه‌بندی سالانه خشکسالی با استفاده از شاخص SPI (بالا) و SPEI (پایین) در بازه زمانی ۲۰۲۲-۲۰۰۴

نتایج حاصل از تحلیل شاخص‌های سنجش از دور

در شکل ۴، نقشه‌های میانگین سالانه NDVI در بازه زمانی ۲۰۰۴-۲۰۲۲ نشان داده شده است. مطابق نقشه‌های ارائه شده تقریباً تمامی سطح استان از پوشش گیاهی متوسط و خوب برخوردار است. با وجود این، در قسمت‌های غربی استان، پوشش گیاهی تا حدی به سمت متوسط (پیکسل‌های زردرنگ) تنزل پیدا کرده است.

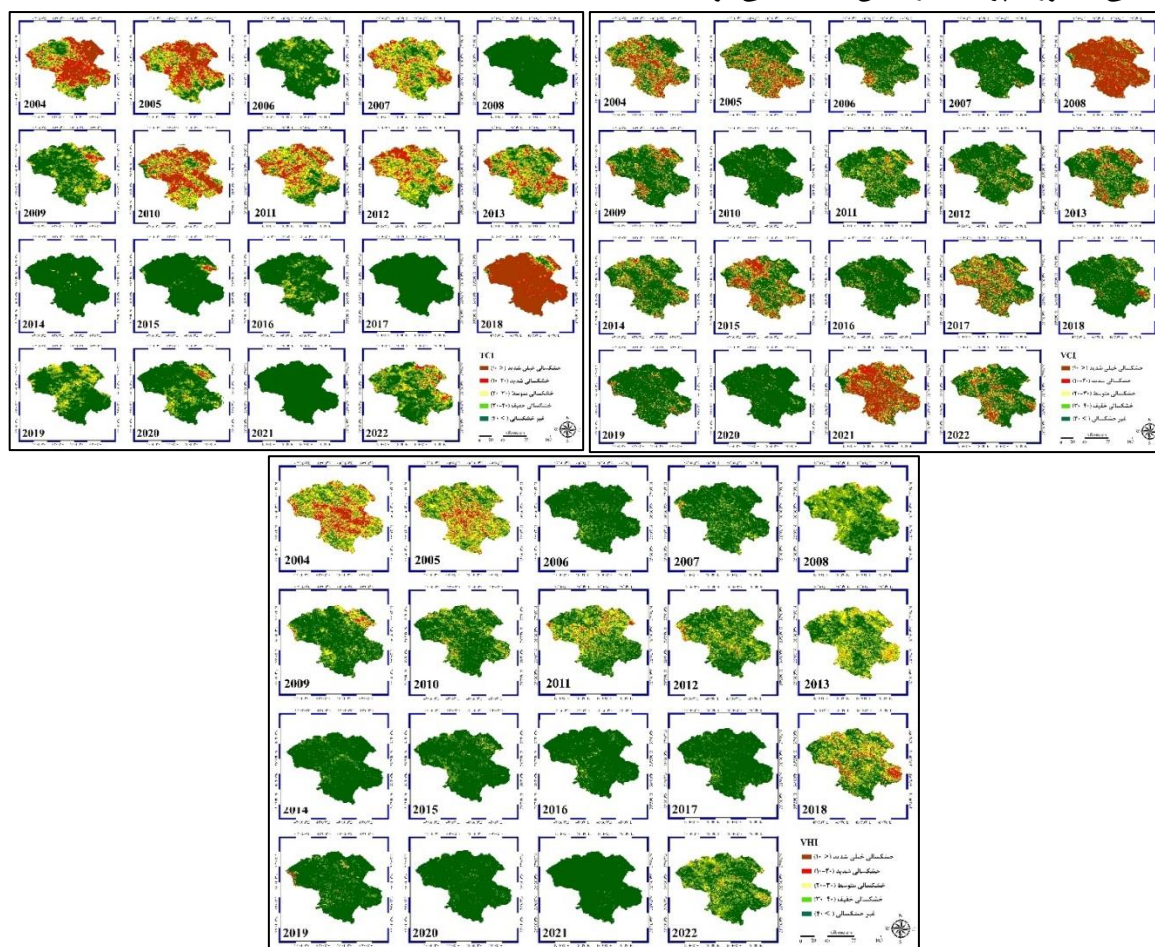
نقشه‌های میانگین سالانه EVI استان زنجان در بازه زمانی ۲۰۰۴-۲۰۲۲ در شکل ۴ ارائه شده است. در تصاویر به دست آمده از EVI نیز در قسمت‌های غربی، شمال غربی و جنوب غربی استان وضعیت پوشش گیاهی فقیر مشاهده می‌شود؛ اما نسبت به تصاویر به دست آمده از شاخص NDVI، مناطق بیشتری از استان دارای پوشش گیاهی با وضعیت متوسط است. همچنین تصاویر EVI نسبت به NDVI، افزایش چشمگیر پوشش فقیر را نشان می‌دهد.

در شکل ۵، نقشه میانگین سالانه VCI استان زنجان در بازه زمانی ۲۰۰۴-۲۰۲۲ ارائه شده است. مطابق نقشه‌های تهیه شده، خشکسالی خیلی شدید با گستردگی بیشتری در سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۲۱ مشاهده می‌شوند. همچنین در سال‌های ۲۰۰۴، ۲۰۰۵، ۲۰۰۹، ۲۰۱۳، ۲۰۱۴، ۲۰۱۵، ۲۰۱۷ و ۲۰۲۲، خشکسالی‌های شدید تا خیلی شدید به صورت پراکنده در سرتاسر استان مشاهده می‌شود؛ در حالی که این شاخص برای سال‌های ۲۰۰۷، ۲۰۱۰، ۲۰۱۲، ۲۰۱۶ و ۲۰۲۰، شرایط متمایل به ترسالی را گزارش می‌دهد.



شکل ۴. میانگین سالانه شاخص NDVI (بالا) و شاخص EVI (پایین) در بازه زمانی ۲۰۰۴-۲۰۲۲

نتایج شاخص TCI نیز در شکل ۴ قابل مشاهده است. با توجه به نقشه‌های حاصل از این شاخص، در سال‌های ۲۰۰۴، ۲۰۰۵، ۲۰۰۷، ۲۰۱۰، ۲۰۱۱، ۲۰۱۲، ۲۰۱۳، ۲۰۱۸ و ۲۰۲۲، مقادیر پایین TCI که گویای شرایط نامناسب برای پوشش گیاهی است، وجود دارد. مطابق با این شاخص، بیشترین و گسترده‌ترین تنش خشکی مربوط به سال ۲۰۱۸ است. در سال‌های ۲۰۰۹، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ نیز در قسمت‌های شمال شرقی و تا حدودی در مرکز استان، تنش‌های دمایی مشاهده می‌شود. در شکل ۴ نقشه‌های میانگین سالانه VHI استان زنجان در بازه زمانی ۲۰۰۴-۲۰۲۲ ارائه شده است. مطابق نتایج، در سال‌های ۲۰۰۴، ۲۰۰۵، ۲۰۱۱ و ۲۰۱۸ خشکسالی به صورت پراکنده در استان مشاهده می‌شود.



شکل ۵. میانگین سالانه شاخص وضعیت پوشش گیاهی VCI (بالا)، TCI (وسط) و VHI (پایین)

ضریب تشخیص (R^2) بین شاخص‌های هواشناسی و ماهواره‌ای

با استفاده از نرم‌افزار Terrset نقشه مکانی میانگین ضریب تشخیص بین شاخص‌های هواشناسی و ماهواره‌ای برای یک دوره ۱۹ ساله تهیه شد و نتایج آن در شکل ۶ قابل مشاهده است. مقایسه شاخص‌های ماهواره‌ای که نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده، بیانگر آن است که شاخص‌های ماهواره‌ای NDVI و EVI نسبت به سایر شاخص‌های ماهواره‌ای، تغییرات پوشش گیاهی را به نحو مطلوب‌تری نشان می‌دهند. همان‌طور که نتایج همبستگی SPI و SPEI با شاخص‌های ماهواره‌ای مشخص کرد، TCI برای مقیاس یک‌ماهه (کوتاه‌مدت)، NDVI برای مقیاس سه‌ماهه (کوتاه‌مدت و میان‌مدت)، EVI و VCI به‌طور مشترک برای مقیاس شش‌ماهه (میان‌مدت) و NDVI برای مقیاس نه‌ماهه (متوسط) مناسب است. در مقیاس ۱۲ ماهه، NDVI با ۱ درصد اختلاف نسبت به EVI و VCI مناسب تشخیص داده شد. به‌طور کلی بیشترین ضریب تشخیص (R^2) بین شاخص‌های ماهواره‌ای و

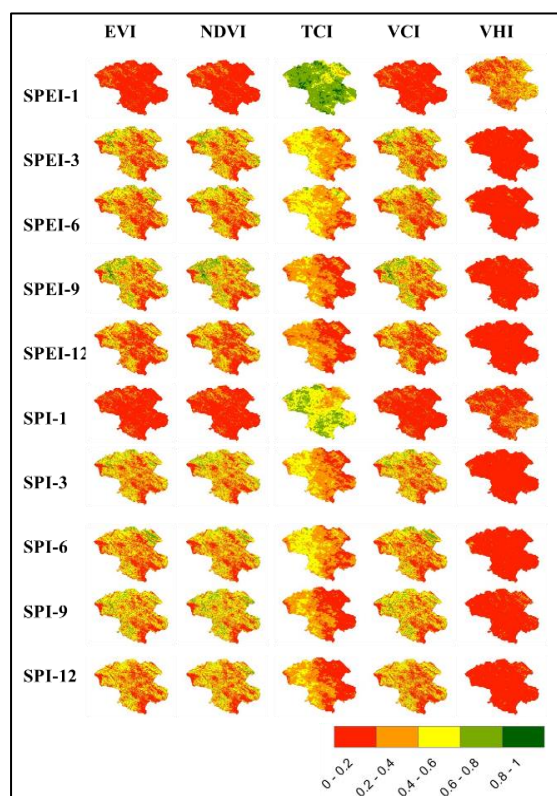
هواشناسی متعلق به NDVI است. پس از EVI، NDVI و VCI قرار دارند و کمترین میزان ضریب تشخیص متعلق به VHI است (جدول ۳).

جدول ۳. میانگین مقادیر ضریب تشخیص (R^2) بین شاخص‌های هواشناسی و ماهواره‌ای (۲۰۲۲-۲۰۰۴)

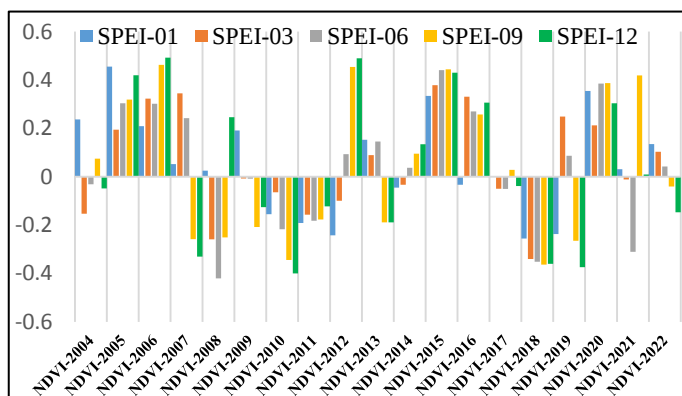
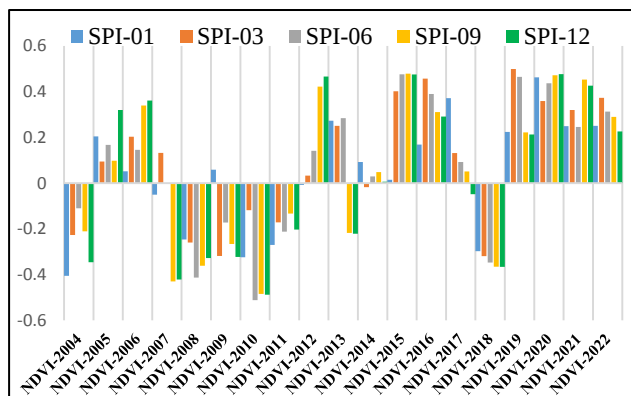
Time series	EVI	NDVI	TCI	VCI	VHI
SPEI-01	۰/۵۵	۰/۶۴	۰/۹۳	۰/۵۵	۰/۷۵
SPEI-03	۰/۸۶	۰/۹۲	۰/۷۶	۰/۸۶	۰/۶۱
SPEI-06	۰/۸۵	۰/۸۴	۰/۷۲	۰/۸۵	۰/۶۶
SPEI-09	۰/۸۸	۰/۹۰	۰/۶۵	۰/۸۸	۰/۴۶
SPEI-12	۰/۸۱	۰/۸۱	۰/۶۲	۰/۸۱	۰/۵۲
SPI-01	۰/۶۲	۰/۶۵	۰/۸۶	۰/۶۲	۰/۷۱
SPI-03	۰/۸۴	۰/۸۶	۰/۷۲	۰/۸۴	۰/۴۹
SPI-06	۰/۸۶	۰/۸۳	۰/۶۸	۰/۸۶	۰/۵۳
SPI-09	۰/۸۸	۰/۹۰	۰/۶۲	۰/۸۸	۰/۵۰
SPI-12	۰/۸۶	۰/۸۷	۰/۶۵	۰/۸۶	۰/۴۶
Average	۰/۸۰	۰/۸۲	۰/۷۲	۰/۸۰	۰/۵۷

همبستگی سالانه بین شاخص‌های هواشناسی و ماهواره‌ای

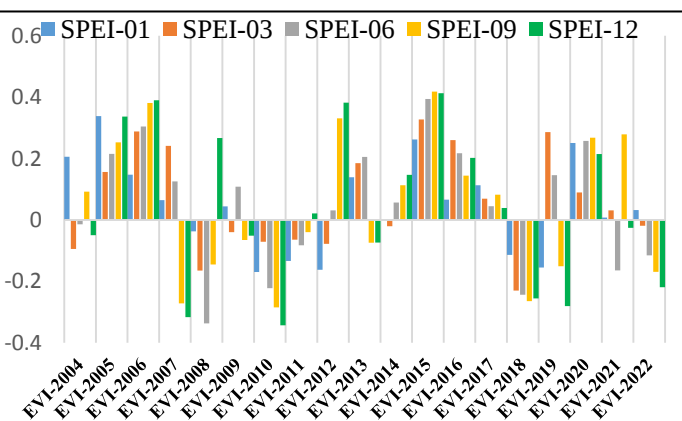
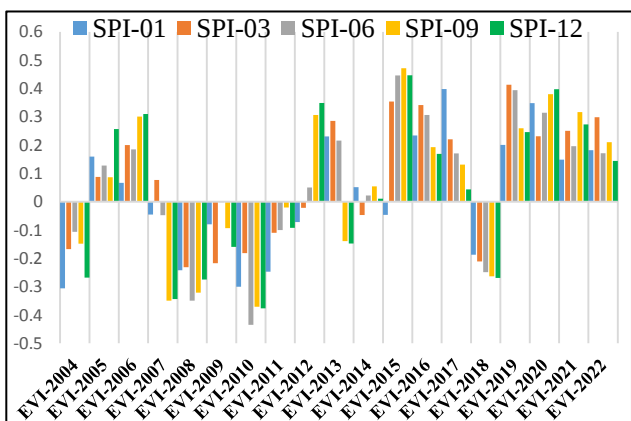
در شکل ۷، اطلاعات مربوط به ضریب همبستگی NDVI و سری‌های زمانی SPEI و SPI برای عرصه‌های طبیعی ارائه شده است. همان‌طور که در نمودارها مشاهده می‌شود، بیشترین میزان همبستگی متعلق به SPI-3 ($R = 0.50$) در سال ۲۰۱۹ است. نتایج ضریب همبستگی بین EVI و سری‌های زمانی شاخص‌های هواشناسی در شکل ۸ ارائه شده است. براساس نتایج بیشترین مقدار همبستگی متعلق به SPI-9 با $R = 0.47$ در سال ۲۰۱۵ است. در شکل ۹، نتایج ضریب همبستگی بین VCI و سری‌های زمانی شاخص‌های SPEI و SPI نمایش داده شده است. همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود، بهترین مقدار همبستگی ($R = 0.36$) بین VCI و SPEI-1 سال ۲۰۰۵ است. اطلاعات ضریب همبستگی بین TCI و سری‌های زمانی شاخص‌های هواشناسی در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. بهترین میزان همبستگی در این نمودار متعلق به شاخص SPI-12 ($R = 0.42$) در سال ۲۰۰۹ است. مقادیر ضریب همبستگی بین VHI و سری‌های زمانی شاخص‌های SPEI و SPI در شکل ۱۱ ارائه شده است. بیشترین میزان همبستگی در این نمودار متعلق به SPI-12 با ($R = 0.37$) در سال ۲۰۰۹ است.



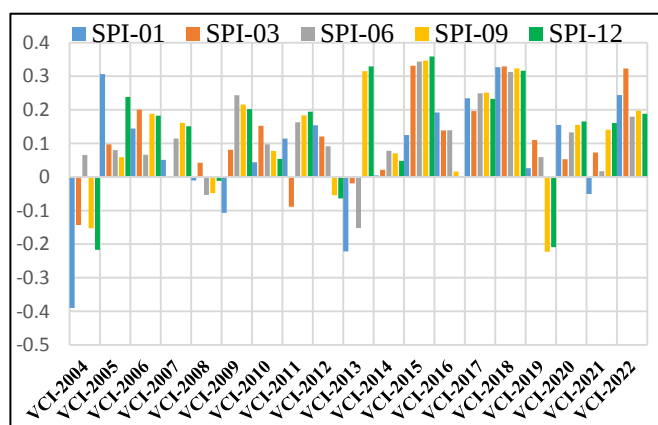
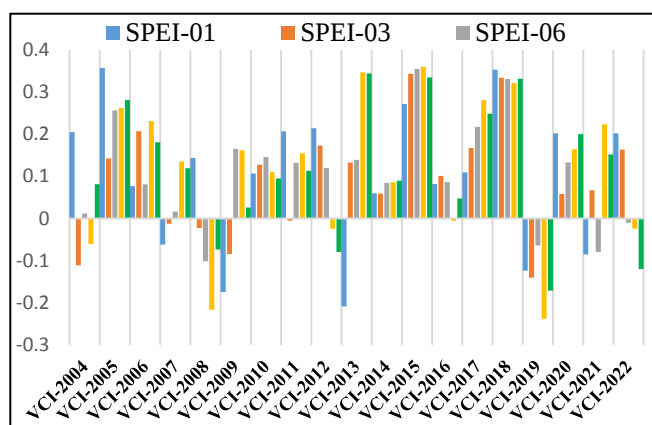
شکل ۶. ضریب تشخیص (R^2) بین شاخص‌های هواشناسی و ماهواره‌ای در بازه زمانی ۲۰۲۲-۲۰۰۴



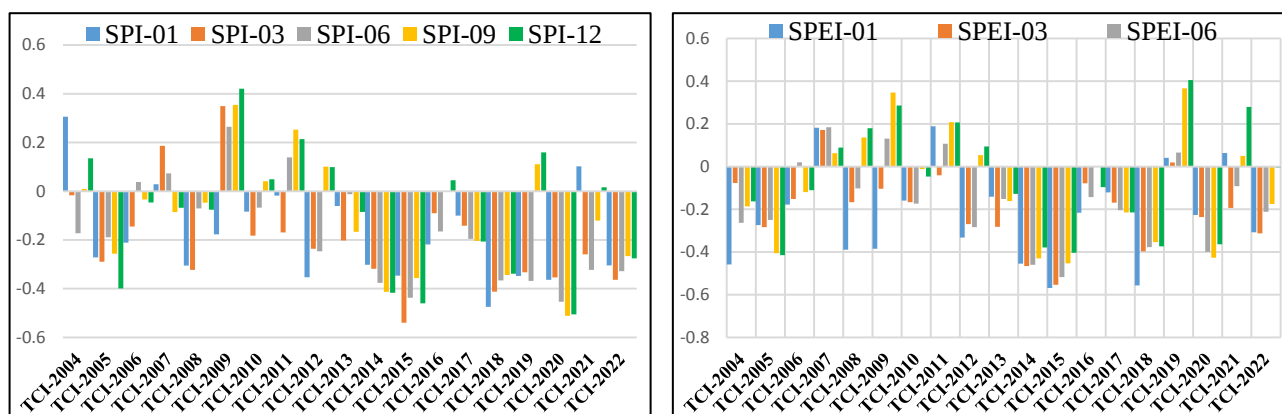
شکل ۷. ضریب همبستگی بین NDVI و سری‌های زمانی SPI و SPEI



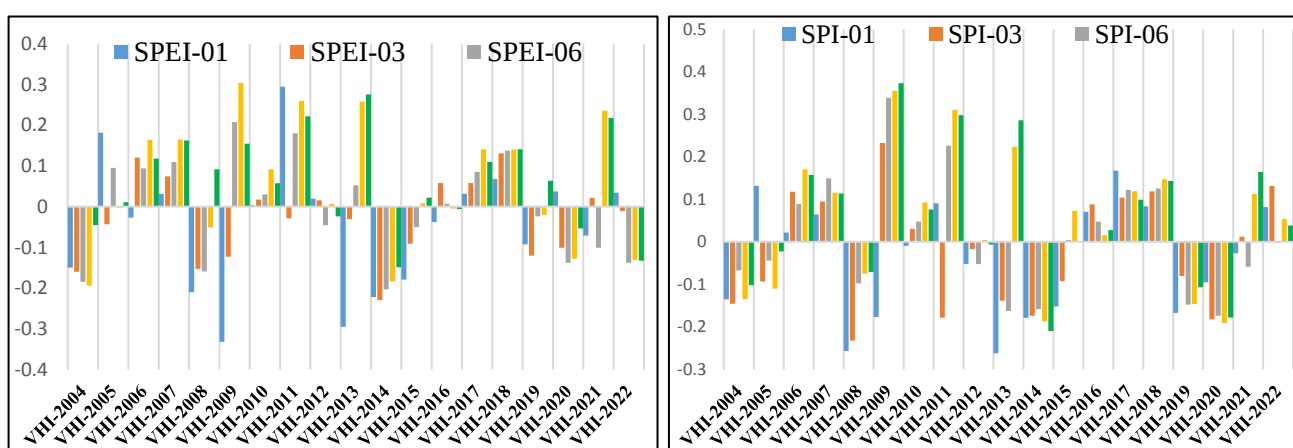
شکل ۸. ضریب همبستگی بین EVI و سری‌های زمانی SPI و SPEI



شکل ۹. ضریب همبستگی بین VCI و سری‌های زمانی SPI و SPEI



شکل ۱۰. ضریب همبستگی بین TCI و سری‌های زمانی SPI و SPEI



شکل ۱۱. ضریب همبستگی بین VHI و سری‌های زمانی SPI و SPEI

بحث و نتیجه‌گیری

این مطالعه با هدف ارائه سند معتبر و کمک به ارزیابی و پایش خشکسالی در استان زنجان انجام گرفت و مقایسه شاخص‌های تولیدشده از داده‌های ایستگاه هواشناسی و ماهواره‌ای نیز برای ارزیابی عواقب خشکسالی‌های هواشناسی بر پوشش گیاهی طبیعی استفاده شد. براساس نتایج پهنه‌بندی خشکسالی استان زنجان با استفاده از SPI و SPEI وجود خشکسالی خیلی شدید در سال ۲۰۰۸ گزارش شد (جدول ۲). اثرات خشکسالی نیز از نظر زمانی و مکانی تنوع قابل توجهی را نشان داد. ازسوی دیگر، پهنه‌بندی نشان داد که هر قسمت از منطقه متأثر از چه کلاس خشکسالی است که این نتیجه برای پیش‌بینی، تحلیل و مدیریت خشکسالی در مناطق تحت‌تأثیر (یا آسیب‌پذیر در درجه اول) مفید است. این نتیجه، همچنین بیانگر نقش و اهمیت پهنه‌بندی در مدیریت منابع طبیعی، برنامه‌ریزی کاربری اراضی، حفاظت و احیای مراتع، و همچنین کاهش یا مقابله با پدیده خشکسالی است (هی، ۲۰۰۵).

SPI و SPEI سالانه طبقات متفاوت خشکسالی را در طی بازه زمانی مورد مطالعه نشان دادند (شکل ۳). وجود درجات مختلف خشکسالی در قسمت‌های مختلف استان ضرورت پایش خشکسالی را نشان می‌دهد. قابل ذکر است مزایای پایش خشکسالی در بهبود تولیدات کشاورزی (انتخاب ارقام مقاوم و سازگار به خشکی)، حفاظت محیط‌زیست و ترویج توسعه پایدار اجتماعی-اقتصادی عنوان شده است (بویان و همکاران، ۲۰۰۶).

در این مطالعه به‌طور هم‌زمان از دو شاخص هواشناسی SPI و SPEI استفاده شد. انتخاب این دو شاخص به دلایل متعددی است؛ ازجمله: الف) برخی از منابع بر این مطلب اشاره دارند که در استفاده از SPI به‌عنوان یک شاخص مستقل خشکسالی باید

احتیاط کرد زیرا استفاده از SPI در مناطق با بارش فصلی کم برای دوره زمانی کوتاه مدت مانند یک تا سه ماه ممکن است منجر به خطای زیاد شود؛ ب) SPI قادر به شناسایی مناطق مستعد خشکسالی به دلیل استاندارد بودن آن نیست زیرا مناطق با بارندگی شدید و کم ممکن است انحرافات بارندگی مشابهی داشته باشند (یوقوان^۱ و همکاران، ۲۰۲۳). این درحالی است که SPEI علاوه بر اینکه از بارندگی در ارزیابی خشکسالی استفاده می کند، تبخیر و تعرق بالقوه (PET) را در نظر می گیرد و همین عامل این شاخص را برای تشخیص تغییرپذیری زمانی خشکسالی ها مؤثرتر نشان داده است (هومدی، پونگپوت و کانای، ۲۰۱۶؛ تیان، یانگ و کویرینگ، ۲۰۱۸). این نتیجه در استان کردستان گزارش شده است؛ به طوری که برخی از محققان کارایی SPEI را به دلیل اضافه شدن عامل تبخیر و تعرق بهتر از SPI گزارش نمودند (مصطفی زاده و همکاران، ۱۳۹۵). در هند نیز بعد از ارزیابی خشکسالی با استفاده از SPI، VCI و TCI گزارش شد که ناهنجاری های منفی SPI همیشه با خشکسالی مطابقت ندارد (بویان و همکاران، ۲۰۰۶). لذا براساس مرور منابع صورت گرفته و نتایج این بخش استنباط می شود در مطالعات اقلیمی بهتر است این دو شاخص هوایی با همدیگر انتخاب شوند.

در این مطالعه از سری های زمانی در برآورد شاخص های هواشناسی به دلیل ارائه اطلاعات کامل از ناهنجاری های بارش به تصمیم گیرندگان، جلوگیری از کاربرد غیرمنطقی SPI و تولید نتایج مبهم و ضعیف استفاده شد (دایان، دئو و آپان، ۲۰۱۸). از جمله دلایل انتخاب شاخص های خشکسالی هواشناسی و ماهواره ای می توان به این مطلب اشاره کرد که الف) شاخص های خشکسالی هواشناسی فقط امکان ارزیابی خطرات اراضی تحت پوشش گیاهی را فراهم می کنند، درحالی که اطلاعات ماهواره ای علاوه بر شناسایی پوشش گیاهی آسیب دیده در انواع مختلف اراضی امکان ارزیابی میزان خسارت را نیز فراهم می کنند (مایینی و همکاران، ۱۹۹۵)؛ ب) در بحث پایش خشکسالی نیز برخی از محققان اذعان نمودند که برای کاربردهای عملی، چندین شاخص باید به عنوان ابزار حمایتی مورد استفاده قرار گیرند، زیرا یک شاخص واحد نمی تواند معیار دقیقی را برای ارزیابی و پایش خشکسالی ارائه دهد (دایان و همکاران، ۲۰۱۸). مطابق نتایج بیشترین مقادیر همبستگی شاخص های ماهواره ای و هواشناسی برای NDVI حاصل شد (جدول ۳) که مقدار ضریب همبستگی بالا NDVI با بارندگی (۰/۷۴) توسط معظمی^۵ و همکاران (۲۰۲۲) نیز اعلام شده است. مقدار همبستگی بالا (+۰/۷۷) بین SPI و NDVI در مطالعات دیگر نیز گزارش شده است که با نتایج این مطالعه هم خوانی دارد (میرموسوی و هماران، ۱۳۹۲).

نقشه های حاصل از NDVI نیز حاکی از آن است که تمامی سطح استان از پوشش گیاهی متوسط و خوب برخوردار است (شکل ۳). باید اذعان نمود که خشکسالی عامل تهدیدکننده و شناخته شده در سطح مراتع است. در برخی از منابع خشکسالی های مکرر (تا ۸۶ درصد) دلایل اصلی از بین رفتن مراتع را به خود اختصاص داده اند (هیوهو^۶ و همکاران، ۲۰۱۴). این موضوع لزوم انتخاب مدیریت ریسک در کاهش خسارت خشکسالی را برای مدیران و برنامه ریزان مراتع برجسته می کند. خسارت قابل توجه به مراتع زمانی رخ می دهد که تعداد دام به طور مناسب مدیریت نشود. لذا از آنجاکه منابع علوفه مرتعی گسترده و در معرض تنوع بارندگی است، راهبردهای سازگاری اولیه باید تعامل گیاه و دام را بهینه کرده و برنامه ریزی بلندمدت را در بر گیرد (کاستا، لالمان و هندرسون، ۲۰۱۶). در این راستا می توان از نقشه های NDVI به عنوان ابزاری برای شناسایی مناطق آسیب پذیر و سپس اولویت بندی آن ها برای اقدامات مدیریت چرا استفاده نمود.

براساس نقشه های تولید شده از EVI، وضعیت پوشش گیاهی استان زنجان در قسمت های غربی، شمال غربی و جنوب غربی استان در بازه مورد مطالعه در وضعیت فقیر قرار دارد؛ به طوری که تصاویر حاصل از EVI نسبت به NDVI، افزایش چشمگیر پوشش فقیر را نشان دادند (شکل ۴). این نتیجه در مباحث مربوط به مدیریت چرا در مراتع حائز اهمیت است؛ زیرا وجود پوشش گیاهی فقیر

1. Ugwu
2. Homdee, Pongput & Kanae
3. Tian, Yuan & Quiring
4. Dayal, Deo & Apan
2. Moazami
6. Huho
7. Scasta, Lalman & Henderson

لزوم رعایت ظرفیت چرا و تاریخ دقیق ورود و خروج دام در مرتع برای جلوگیری از تهدید (و حتی نابودی) هرچه بیشتر پوشش گیاهی را برجسته می‌کند؛ ازسوی دیگر بر توجه به اعمال سیستم‌های چرا در وضعیت فقیر مراتع برای بهبود و ارتقای وضعیت مرتع تأکید دارد. یکی از دلایل مشاهده افزایش چشمگیر پوشش فقیر در تصاویر EVI ممکن است به این علت باشد که در طول دوره بدون بارندگی، مقادیر NDVI می‌تواند نه تنها به دلیل زوال گیاه، بلکه به دلیل افزایش گردوغبار در هوا کاهش یابد. به همین دلیل، شاخص پوشش گیاهی می‌تواند مقادیر کمتری از آنچه باید داشته باشد گزارش دهد (والی، موسوی و زمانی، ۲۰۱۹). برخی از محققان نیز اذعان نمودند که کمبود بارش تنها یکی از محرک‌های وضعیت پوشش گیاهی است و NDVI نمی‌تواند به‌طور جهانی برای شناسایی خشکسالی‌ها استفاده شود (ریمکاس^۱ و همکاران، ۲۰۱۷)؛ درحالی‌که برخی دیگر از محققان اظهار نمودند که دو شاخص EVI و NDVI با اختلافی جزئی شبیه به هم هستند (نوربخش و نظری‌نژاد، ۱۴۰۱).

تأکید بر این واقعیت ضروری است که پاسخ پوشش گیاهی (و در نتیجه مقادیر NDVI) در برابر اثرات آب‌وهوایی به منطقه جغرافیایی و عوامل محیطی مانند نوع پوشش گیاهی، نوع خاک و کاربری زمین بستگی دارد (عثمان^۲ و همکاران، ۲۰۱۳). اگرچه شاخص‌های پوشش گیاهی به‌طور گسترده‌ای برای پایش وضعیت پوشش گیاهی استفاده شده است، محدودیت استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی باید در نظر گرفته شود؛ زیرا عوامل دیگری مانند آتش‌سوزی‌ها، حشرات و جنگل‌زدایی احتمالاً منجر به کاهش رشد و کاهش ارزش EVI می‌شوند. سلامت پوشش گیاهی زمینی تحت تأثیر بسیاری از رویدادهای چرخه‌ای و ناگهانی است که ممکن است باعث تغییر روند سلامت پوشش گیاهی شود. تشخیص تغییرات در سری‌های زمانی اولین گام برای درک فرایندها و محرک‌های حاکم است (جونگ^۳ و همکاران، ۲۰۱۲). برخی از منابع نیز کارایی دو شاخص را در انواع مختلف اراضی متفاوت اعلام کرده‌اند، به‌طوری‌که گزارش شده است EVI، در مناطقی با پوشش گیاهی متراکم پاسخ بهتری دارد؛ درحالی‌که NDVI مناسب برای بررسی پایش پوشش گیاهی دشت‌هایی مانند دشت سیستان که حیات آن‌ها نه بارش بلکه به رودخانه بستگی دارد (فیروزی، طاووسی و محمودی، ۱۳۹۸).

نتایج VCI (شکل ۵)، TCI (شکل ۵) و VHI (شکل ۵) در ارزیابی خشکسالی متفاوت بود. این نتیجه لزوم استفاده از شاخص‌های متعدد هنگام پایش خشکسالی را تأیید می‌کند. این مطلب توسط محققان متعدد اعلام شده است، به‌طوری‌که برخی از محققان برای پایش خشکسالی شاخص‌های SPEI، SPI، SVI و SDSI-ETDI را برای پایش خشکسالی پیشنهاد داده‌اند (سو^۴ و همکاران، ۲۰۱۷). برخی دیگر VCI، NDVI و EVI را برای نظارت بر شروع، شدت، مدت، گستره و تأثیر خشکسالی در سراسر جهان توصیه کردند (کوپرینگ و گانش،^۵ ۲۰۱۰؛ دوتا^۶ و همکاران، ۲۰۱۵). جیانگ^۷ و همکاران (۲۰۲۰) نیز از SPEI و EVI برای پایش وضعیت خشکسالی و تأثیر آن بر تغییرات پوشش گیاهی استفاده کردند.

همان‌طور که از مباحث فوق مشخص می‌گردد، شاخص‌های ماهواره‌ای و هواشناسی در بیشتر مطالعات با همدیگر مورد استفاده قرار گرفته‌اند؛ زیرا خشکسالی ریشی ارتباط نزدیکی با اثرات آب‌وهوا دارد. در NDVI، مؤلفه اکولوژیکی قوی، مؤلفه آب‌وهوا را تحت تأثیر قرار می‌دهد؛ ازسوی دیگر یکی از دلایل انتخاب VCI بدین سبب است که VCI نوسانات کوتاه‌مدت NDVI مربوط به آب‌وهوا را از تغییرات بلندمدت اکوسیستم جدا می‌کند (کوگان،^۸ ۱۹۹۰؛ ۱۹۹۵). بنابراین، درحالی‌که NDVI پویایی پوشش گیاهی فصلی را نشان می‌دهد، تغییرات VCI در محدوده صفر و ۱۰۰ (درصد) منعکس‌کننده تغییرات نسبی در شرایط پوشش گیاهی از بسیار نامطلوب تا بهینه است (کوگان و همکاران، ۲۰۰۳). غالباً NDVI با محاسبه شاخص وضعیت گیاهی (VCI) تجزیه و تحلیل می‌شود که NDVI فعلی را با مقادیر مشاهده‌شده این شاخص در سال‌های گذشته مقایسه می‌کند و همبستگی خوبی با مقادیر SPI دارد

1. Rimkus
2. Usman
3. Jong
4. Su
5. Quiring & Ganesh
6. Dutta
7. Jiang
8. Kogan

(دوتا و همکاران، ۲۰۱۵؛ گبرهیوت، واندروین و متیوس،^۱ ۲۰۱۱؛ بویان و همکاران، ۲۰۰۶). به گفته برخی از محققان VCI شاخص بهتری برای کمبود رطوبت نسبت به NDVI است، زیرا امکان جداسازی سیگنال کوتاه‌مدت آب‌وهوا را از سیگنال اکولوژیکی بلندمدت فراهم می‌کند. علاوه بر این، VCI امکان مقایسه مقادیر NDVI اندازه‌گیری شده به‌طور هم‌زمان را نه تنها در شرایط مختلف جغرافیایی، بلکه در انواع مختلف پوشش گیاهی فراهم می‌کند (جاین^۲ و همکاران، ۲۰۱۰).

مطابق نتایج از بین شاخص‌های ماهواره‌ای مورد مطالعه NDVI نسبت به سایر شاخص‌های ماهواره‌ای، تغییرات پوشش گیاهی را به‌نحو مطلوب‌تری نشان داد (جدول ۳). کارایی شاخص فوق توسط صابری و همکاران (۱۳۹۷) نیز تأیید شده است. شاخص NDVI بیشترین همبستگی را با SPI در مقیاس سه‌ماهه (SPI-3) نشان داد. تجزیه و تحلیل همبستگی بین SPI و NDVI در دریاچه ارومیه نیز مؤید این است که شاخص خشکسالی کوتاه‌مدت در آن حوزه همبستگی قابل توجهی با NDVI ماهانه دارد (صابری و همکاران، ۱۳۹۷). به عبارتی دیگر، پوشش گیاهی استان زنجان در بازه مورد مطالعه متأثر از بارش کوتاه‌مدت است. براساس پژوهش حاضر به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که شاخص NDVI می‌تواند به‌منظور پایش اثرات خشکسالی بر پوشش گیاهی برای اکثر سری‌های زمانی مناسب باشد که نتایج برخی از مطالعات دیگر نیز بر این موضوع تأکید دارند (دستورانی و همکاران، ۱۳۹۴؛ عوض‌پور و همکاران، ۱۴۰۰؛ رفیعی‌ساردو و همکاران، ۲۰۲۱). در این مطالعه، بیشترین همبستگی بین TCI و VHI با SPI-12 گزارش شد. به بیانی دیگر، دو شاخص مذکور، پوشش گیاهی را متأثر از بارندگی‌های بلندمدت گزارش نموده‌اند. در واقع تأثیر خشکسالی بر پوشش گیاهی در مقیاس‌های زمانی طولانی‌تری رخ داده است (شکل‌های ۸ تا ۱۱). برخی از مطالعات نشان داد که تأثیر نوسانات کوتاه‌مدت بارش (SPI) بر مقادیر VCI ضعیف است (جبانگ و همکاران، ۲۰۲۰).

برای جمع‌بندی این مطالعه دو مطلب برجسته می‌گردد: الف) برای پایش خشکسالی در مناطق مختلف لازم است مقایسه شاخص‌ها صورت گیرد تا به‌طور نسبی بهترین شاخص (ها) برای مناطق دارای آب‌وهوای مشابه مشخص گردد و بتوان از سرگردانی و ضعف در انتخاب یک شاخص اجتناب شود؛ ب) نقشه‌های خشکسالی می‌توانند به‌عنوان ابزاری برای کمک به برقراری ارتباط با مسائل و ارائه یک نقطه مرجع یا خط پایه برای افرادی که علاقه‌مند به پرسیدن سؤالاتی در زمینه تاب‌آوری در برابر خشکسالی هستند، استفاده شوند. نقشه‌ها همچنین ممکن است برای برنامه‌ریزان، دولت، سرمایه‌گذاران، بانک‌ها و صنعت بیمه به‌عنوان ابزار ارزیابی ریسک (یعنی اینکه کدام قسمت‌ها بیشتر در معرض خطر خشکسالی هستند) مورد توجه قرار گیرد.

References

- Aghajanjou, F., Ghorbani, A., Zare Chahoki, M. A., Mostafazadeh, R., & Hashemi Majd, K. (2018). Ecological survey of the presence and absence of *Ferula ovina* (Boiss.) Boiss and *Ferula persica* Willd. in north-western rangelands of Iran (case study: Zanjan province). *J Rangel Sci*, 8(4), 352-62.
- Avazpour, N., Faramarzi, M., Omidipour, R., & Mehdizadeh, H. (2021). Monitoring the drought effects on vegetation changes using satellite imagery (Case study: Ilam catchment). *Geography and Environmental Sustainability*, 11(4), 125-143. [In Persian]
- Bhuiyan, C., Singh, R. P., & Kogan, F. N. (2006). Monitoring drought dynamics in the Aravalli region (India) using different indices based on ground and remote sensing data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 8(4), 289-302.
- Dastorani, M., Vali, A., Sepehr, A., & Komaki, C. B. (2022). The effect of drought on vegetation using MODIS satellite Khorasan Razavi. *Desert Ecosystem Engineering*, 4(7), 1-8. [In Persian]
- Dayal, K. S., Deo, R. C., & Apan, A. A. (2018). Investigating drought duration-severity-intensity characteristics using the Standardized Precipitation-Evapotranspiration Index: case studies in drought-prone Southeast Queensland. *Journal of Hydrologic Engineering*, 23(1), 05017029.
- De Jong, R., Verbesselt, J., Schaepman, M. E., & De Bruin, S. (2012). Trend changes in global greening and browning: contribution of short-term trends to longer-term change. *Global Change Biology*, 18(2), 642-655.
- Dutta, D., Kundu, A., Patel, N. R., Saha, S. K., & Siddiqui, A. R. (2015). Assessment of agricultural drought in Rajasthan (India) using remote sensing derived Vegetation Condition Index (VCI) and Standardized Precipitation Index (SPI). *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 18(1), 53-63.
- Firouzi, F., Tavosi, T., & Mahmoudi, P. (2019). Investigating the sensitivity of NDVI and EVI vegetation indices to dry and wet years in arid and semi-arid regions (Case study: Sistan plain, Iran). *Scientific-Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 28(110), 163-179. [In Persian]
- Gebrehewot, T., Van der Veen, A., & Maathuis, B. (2011). Spatial and temporal assessment of drought in the Northern highlands of Ethiopia. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13(3), 309-321.
- He, C., Zhang, Q., Li, Y., Li, X., & Shi, P. (2005). Zoning grassland protection area using remote sensing and cellular automata modeling—a case study in Xilingol steppe grassland in northern China. *Journal of Arid Environments*, 63(4), 814-826.
- Homdee, T., Pongput, K., & Kanae, S. (2016). A comparative performance analysis of three standardized climatic drought indices in the Chi River basin, Thailand. *Agriculture and Natural Resources*, 50(3), 211-219.
- Huho, J. M., & Kosonei, R. C. (2014). Understanding extreme climatic events for economic development in Kenya. *IOSR Journal of Environmental Science, Toxicology and Food Technology*, 8(2), 14-24.
- Jain, S. K., Keshri, R., Goswami, A., & Sarkar, A. (2010). Application of meteorological and vegetation indices for evaluation of drought impact: a case study for Rajasthan, India. *Natural hazards*, 54, 643-656.
- Ji, L., & Peters, A. J. (2003). Assessing vegetation response to drought in the northern Great Plains using vegetation and drought indices. *Remote sensing of Environment*, 87(1), 85-98.
- Jiang, W., Wang, L., Feng, L., Zhang, M., & Yao, R. (2020). Drought characteristics and its impact on changes in surface vegetation from 1981 to 2015 in the Yangtze River Basin, China. *International Journal of Climatology*, 40(7), 3380-3397.
- Kogan, F. (2002). World droughts in the new millennium from AVHRR-based vegetation health indices. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 83(48), 557-563.
- Kogan, F. N. (1990). Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas. *International Journal of remote sensing*, 11(8), 1405-1419.
- Kogan, F. N. (1995). Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in space research*, 15(11), 91-100.
- Kogan, F., Gitelson, A., Zakarin, E., Spivak, L., & Lebed, L. (2003). AVHRR-based spectral vegetation index for quantitative assessment of vegetation state and productivity. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69(8), 899-906.
- Kreibich, H., Di Baldassarre, G., Vorogushyn, S., Aerts, J. C., Apel, H., Aronica, G. T., & Merz, B. (2017). Adaptation to flood risk: Results of international paired flood event studies. *Earth's Future*, 5(10), 953-965.
- Masud, M. B., Qian, B., & Faramarzi, M. (2020). Performance of multivariate and multiscalar drought indices in identifying impacts on crop production. *International Journal of Climatology*, 40(1), 292-307.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993, January). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology* (Vol. 17, No. 22, pp. 179-183).

- Mirmosavei, S., & Kareimeh, H. (2013). Effect of drought on vegetation cover using MODIS sensing images case: Kurdistan Province. *Geography and Development*, 11(31), 57-76. [In Persian]
- Moazami, N., Keshtkar, A., Hamzeh, S., Mirzaei, S., Keshtkar, H., & Afzali, A. (2022). Remote sensing-based monitoring of the spatiotemporal characteristics of drought using hydro-meteorological indices. *Desert*, 27(2), 343-358.
- Mostafazadeh, R., & Zabihi, M. (2016). Comparison of SPI and SPEI indices to meteorological drought assessment using R programming (Case study: Kurdistan Province). *Journal of the Earth and Space Physics*, 42(3), 633-643. [In Persian]
- Myneni, R. B., Hall, F. G., Sellers, P. J., & Marshak, A. L. (1995). The interpretation of spectral vegetation indexes. *IEEE Transactions on Geoscience and remote Sensing*, 33(2), 481-486.
- Nasir, J., Assefa, E., Zeleke, T., & Gidey, E. (2021). Meteorological Drought in Northwestern Escarpment of Ethiopian Rift Valley: detection seasonal and spatial trends. *Environmental Systems Research*, 10, 1-20.
- Noorbakhsh, M., & Nazari Nejad A. (2022). Investigation of the relationship between NDVI and EVI vegetation indices and land surface temperature in Tehran. *Geography and Human Relationships*, 1(17), 225-236. [In Persian]
- Ozelkan, E., Chen, G., & Ustundag, B. B. (2016). Multiscale object-based drought monitoring and comparison in rainfed and irrigated agriculture from Landsat 8 OLI imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 44, 159-170.
- Paltsyn, M. Y., Gibbs, J. P., Iegorova, L. V., & Mountrakis, G. (2017). Estimation and prediction of grassland cover in western Mongolia using MODIS-derived vegetation indices. *Rangeland ecology & management*, 70(6), 723-729.
- Quiring, S. M., & Ganesh, S. (2010). Evaluating the utility of the Vegetation Condition Index (VCI) for monitoring meteorological drought in Texas. *Agricultural and forest meteorology*, 150(3), 330-339.
- Rafiei Sardooi, E., Azareh, A., Eskandari Damaneh, H., & Skandari Damaneh, H. (2021). Drought monitoring using MODIS land surface temperature and normalized difference vegetation index products in semi-arid areas of Iran. *Journal of Rangeland Science*, 11(4), 402-418. [In Persian]
- Rimkus, E., Stonevicius, E., Kilpys, J., Maciulyte, V., & Valiukas, D. (2017). Drought identification in the eastern Baltic region using NDVI. *Earth system dynamics*, 8(3), 627-637.
- Saberi, A., Soltani-Gerdefaramarzi, S. and Miryaghoubzadeh, M. (2018). Study of drought using meteorological and remote sensing data (Azarbaijan province). *Journal of the Earth and Space Physics*, 44(2), 439-461. [In Persian]
- Saberi, A., Gholami, L., Kavian, E.A. & Qheysoori, M. (2019) Evaluation of meteorological drought in Urmia Lake basin using meteorological indicators and remote sensing technique. *4th Conference on Watershed Science and Engineering*. [In Persian]
- Scasta, J. D., Lalman, D. L., & Henderson, L. (2016). Drought mitigation for grazing operations: matching the animal to the environment. *Rangelands*, 38(4), 204-210.
- Singh, R. P., Roy, S., & Kogan, F. (2003). Vegetation and temperature condition indices from NOAA AVHRR data for drought monitoring over India. *International journal of remote sensing*, 24(22), 4393-4402.
- Şorman, A. Ü., Mehr, A. D., & Hadi, S. J. (2018). Study on spatial-temporal variations of Meteorological-Agricultural droughts in Turkey. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 483-490.
- Su, Z., He, Y., Dong, X., & Wang, L. (2017). Drought monitoring and assessment using remote sensing. *Remote sensing of hydrological extremes*, 151-172.
- Tesfamariam, B. G., Melgani, F., & Gessesse, B. (2019). Rainfall retrieval and drought monitoring skill of satellite rainfall estimates in the Ethiopian Rift Valley Lakes Basin. *Journal of Applied Remote Sensing*, 13(1), 014522-014522.
- Tian, L., Yuan, S., & Quiring, S. M. (2018). Evaluation of six indices for monitoring agricultural drought in the south-central United States. *Agricultural and forest meteorology*, 249, 107-119.
- Ugwu, E. B. I., Ugbor, D. O., Agbo, J. U., & Alfa, A. (2023). Analyzing rainfall trend and drought occurrences in Sudan Savanna of Nigeria. *Scientific African*, 20, e01670.
- Usman, U., Yelwa, S. A., Gulumbe, S. U., Danbaba, A., & Nir, R. (2013). Modelling relationship between NDVI and climatic variables using geographically weighted regression. *Journal of Mathematical Sciences and Applications*, 1(2), 24-28.
- Vali, A. A., Mousavi, S. H., & Zamani, E. (2019). Statistical analysis of occurrence frequency of dust storms in Yazd province and its modeling based on climatic elements and vegetation cover. *Journal of Spatial Analysis Environmental hazards*, 6(3), 121-142. [In Persian]

- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of climate*, 23(7), 1696-1718.
- Wilhite, D. A. (2005). *Drought and water crises: science, technology, and management issues*. Crc Press.
- Zambrano, F., Wardlow, B., Tadesse, T., Lillo-Saavedra, M., & Lagos, O. (2017). Evaluating satellite-derived long-term historical precipitation datasets for drought monitoring in Chile. *Atmospheric Research*, 186, 26-42.
- Zhao, C., Brissette, F., Chen, J., & Martel, J. L. (2020). Frequency change of future extreme summer meteorological and hydrological droughts over North America. *Journal of Hydrology*, 584, 124316.
- Zuo, D., Hou, W., Wu, H., Yan, P., & Zhang, Q. (2021). Feasibility of calculating standardized precipitation index with short-term precipitation data in China. *Atmosphere*, 12(5), 603.