



University of Tehran Press

Environmental

Hazards

Management



Iranian Hazardology Association
Online ISSN: 2383-0530

Home Page: <https://jhsci.ut.ac.ir>

Agricultural Drought Monitoring in the Aras River Catchment using Satellite and Meteorological Indicators

Bromand Salahi^{1*} | Fatemeh Vatanparast Galeh Juq²

1. Corresponding Author, Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohagheh Ardabili, Ardabil, Iran. E-mail: Salahi@uma.ac.ir

2. Department of Physical Geography, Faculty of Social Sciences, University of Mohagheh Ardabili, Ardabil, Iran. E-mail: f.vatanparast.g72@gmail.com

ARTICLE INFO

Article type:
Research Article

Article History:

Received 29 October 2024

Revised 19 November 2024

Accepted 22 November 2024

Published 25 Desember 2024

Keywords:

Agricultural Drought,
Aras River Basin,
SPI Index,
TCI Index,
VCI Index,
VHI Index.

ABSTRACT

Drought is the most damaging natural phenomenon that occurs in all climates of the world, even in humid regions. Agricultural drought not only damages crops and causes changes in vegetation cover, but also causes social and economic damage. The aim of this study is to monitor agricultural drought and analyze the spatial-temporal distribution of drought severity in the Aras River Basin for the vegetation growth months (April to July) in the statistical period 2012 to 2021. To assess drought conditions, the Standard Precipitation Index (SPI) obtained from precipitation data from 7 synoptic stations was used as the dependent variable, and the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Vegetation Condition Index (VCI), Temperature Conditions Index (TCI), and Vegetation Health Index (VHI) were used as independent variables. The results of the correlation between meteorological indices and satellite indices showed that the SPI index has the highest correlation with the VCI index. This index also had high accuracy compared to other indices based on validation criteria, indicating its ability to monitor agricultural drought. Examination of classified drought severity maps based on SPI, VCI, VHI, and NDVI indices showed that April and May were the wettest months and July was the driest month. According to the TCI index, April was the driest month and July was the wettest month during the statistical period, and in all indices, 2021 was accompanied by severe drought. In terms of location, stations located in the western half of the Aras River Basin had more severe drought and rainfall deficiency than stations in its eastern half.

Cite this article: Salahi, B. & Vatanparast Galeh Juq, F. (2024). Agricultural Drought Monitoring in the Aras River Catchment using Satellite and Meteorological Indicators. *Environmental Hazards Management*, 11 (3), 193-212. DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2024.384523.847>



© The Author(s). **Publisher:** University of Tehran Press.
DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2024.384523.847>

1. Introduction

Drought is one of the most damaging natural disasters that can occur in any climate and affects agriculture, the environment, and the economic aspects of society [1, 3 and 4]. If the drought occurs at the same time as the period of vegetation growth, it causes the environmental balance to be disturbed, after which biological variables such as soil moisture, surface temperature, and even evaporation and transpiration are affected [2]. In order to understand the temporal and spatial changes of drought and deal with its destructive effects, it is necessary to conduct related research. In fact, drought monitoring is very important as a water management method, which is monitored by various indicators. Satellite images can be used as a suitable choice for drought monitoring in an area [5].

2. Materials and methods

In this research, in order to monitor the drought areas of the stations located in the Aras river basin, the Precipitation data during the statistical period (2012-2021) for the months of Apr to Jul were used at the same time as the vegetation growth period, and using the DIP software, the values Standardized Precipitation Index (SPI) was calculated to separate dry and wet years. In the following, the indices used were classified into four groups: Normalized Differential Vegetation Index (NDVI), Vegetation Condition Index (VCI), Temperature Condition Index (TCI) and Vegetation Health Index (VHI) and were compared with the SPI index to find out the differences. The indicators should be determined during these four months. To validate and compare the results obtained from satellite indices with meteorological index, three evaluation criteria of correlation coefficient (R), Mean Square Error (MSE) and Root Mean Square Error (RMSE) were used.

3. Discussion and Results

The results of examining the correlation coefficients between satellite indices and the climate drought index showed that SPI had the highest correlation with VCI for all stations. The changes in the NDVI index showed the highest density of vegetation in April and the density of vegetation decreased in June and July. On the other hand, during these two months, severe droughts increased according to the SPI, VCI and VHI indices, and April was the wettest month. The results provided by the TCI index show that April has a higher temperature than other months, indicating the occurrence of mild to severe droughts at the stations.

Drought zoning related to the months of the growing season using SPI, VCI, TCI and VHI indices separately for the studied years (2012-2021) indicates the occurrence of drought in most of the studied areas in 2021, while the occurrence of mild to very severe droughts was the same as in 2012 year. and in the VHI index, 2018 was the wettest year.

4. Conclusion

The results of this research show that the western region is more exposed to the lack of Precipitation and severe drought than the eastern region, and the amount of Precipitation in these areas is less than normal, which can have a negative impact on the provision of water resources and economic and social management. The stress of dryness, high temperature and low humidity will follow. Also, the results of this research show the importance of using satellite images with optimal temporal and spatial power in locating and even timing drought monitoring.

References

1. Asgari Dastnaei, A., Gandomkar, A., & Khodaqholi, M. (2021). Self-analysis of temperature trend in drought hazards management (Case study: Chaharmahal and Bakhtiari province). *Environmental Management Hazards*. 8(3), 283-299. doi: 10.22059/jhsci.2021.330273.675. (In Persian).
2. Darvand, S., Eskandari Damaneh, H., Eskandari Damaneh, H., & Khosravi, H. (2021). Prediction of the change trend of temperature and rainfall in the future period and its impact on desertification. *Water and Soil Management and Modelling*. 1(1), 53-66. Doi: 10.22098/mmws.2021.1181. (In Persian).
3. Key Khosravi, G. (2015). A comparative study of satellite and meteorological drought indices of the desertification process in the spring vegetation of Semnan province. *The Journal of Geographical Research on Desert Areas*. 3(2), 189-213. (In Persian).
4. Nejadrekabi, M., Eslamian, S., & Zareian, M. J. (2022). Spatial statistics techniques for SPEI and NDVI drought indices: A case study of Khuzestan Province. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 19(7), 6573-6594. doi:10.1007/s13762-021-03852-8.
5. Peng, J., Loew, A., Merlin, O., & Verhoest, N.E. (2017). A review of spatial downscaling of satellite remotely sensed soil moisture. *Reviews of Geophysics*. 55(2), 341-366. <http://dx.doi.org/10.1002/2016RG000543>.



پایش خشکسالی کشاورزی در حوضه آبریز رودخانه ارس با استفاده از شاخص‌های ماهواره‌ای و هواشناسی

برومند صلاحی^{۱*} | فاطمه وطن پرست قلعه جوق^۲

۱. نویسنده مسئول، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: Salahi@uma.ac.ir
۲. گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم اجتماعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران. رایانامه: f.vatanparast.g72@gmail.com

چکیده

اطلاعات مقاله

خشکسالی زیانبارترین پدیده طبیعی است که در همه اقلیم‌های جهان حتی در مناطق مرطوب رخ می‌دهد. خشکسالی کشاورزی گذشته از آسیب رساندن به محصولات زراعی و تغییر پوشش گیاهی، آسیب‌های اجتماعی و اقتصادی را هم در پی دارد. هدف این پژوهش، پایش خشکسالی کشاورزی و تجزیه و تحلیل توزیع زمانی- مکانی شدت خشکسالی حوضه رودخانه ارس برای ماه‌های رشد پوشش گیاهی (فروردین تا تیر) در دوره آماری ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۱ بود. برای ارزیابی شرایط خشکسالی، از شاخص استاندارد بارندگی (SPI) حاصل از داده‌های بارش هفت ایستگاه سینوپتیک به عنوان متغیر وابسته و شاخص‌های تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI)، وضعیت پوشش گیاهی (VCI)، شرایط دمایی (TCI) و سلامت پوشش گیاهی (VHI) به عنوان متغیر مستقل استفاده شد. نتایج حاصل از همبستگی بین شاخص هواشناسی و شاخص‌های ماهواره‌ای نشان داد که شاخص SPI بیشترین همبستگی را با شاخص VCI دارد. این شاخص بر مبنای معیارهای صحت‌سنجی هم دقت زیادی نسبت به شاخص‌های دیگر داشت که نشان‌دهنده توانایی آن در پایش خشکسالی کشاورزی است. بررسی نقشه‌های کلاس بندی شده شدت خشکسالی بر اساس شاخص‌های SPI، VCI، VHI و NDVI، فروردین و اردیبهشت را مرطوب‌ترین ماه‌ها و تیر را خشک‌ترین ماه نشان داد. مطابق شاخص TCI، فروردین خشک‌ترین ماه و تیر مرطوب‌ترین ماه در طول دوره آماری بود و در همه شاخص‌ها، سال ۲۰۲۱ با خشکسالی شدیدی مواجه بود. از لحاظ مکانی نیز ایستگاه‌های واقع در نیمه غربی حوضه رودخانه ارس نسبت به ایستگاه‌های نیمه شرقی آن خشکسالی شدیدتر و کمبود بارش بیشتری داشتند.

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ‌های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۰۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۰۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۹/۲۵

کلیدواژه:

حوضه رود ارس، خشکسالی کشاورزی، شاخص SPI، شاخص TCI، شاخص VCI، شاخص VHI

استناد: صلاحی، برومند و وطن پرست قلعه جوق، فاطمه (۱۴۰۳). پایش خشکسالی کشاورزی در حوضه آبریز رودخانه ارس با استفاده از شاخص‌های ماهواره‌ای و هواشناسی. مدیریت مخاطرات محیطی، ۱۱ (۳)، ۱۹۳-۲۱۲.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2024.384523.847>

© نویسندگان ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2024.384523.847>



مقدمه

خشکسالی از مزمن‌ترین و زیانبارترین مخاطرات طبیعی است که در همه شرایط اقلیمی، احتمال وقوع آن وجود دارد، اما ویژگی آن از ناحیه‌ای به ناحیه دیگر تفاوت دارد و بر کشاورزی، محیط زیست و جنبه‌های اجتماعی و اقتصادی جامعه اثر می‌گذارد [۲۳، ۲۷، ۴۹]. اگر خشکسالی، مصادف با دوره رویش پوشش گیاهی باشد، سبب به هم خوردن توازن محیط زیست می‌شود که در پی آن متغیرهای زیستی مانند نم خاک، درجه حرارت سطح زمین و حتی روند تبخیر و تعرق هم تحت تأثیر قرار می‌گیرند [۹]. این پدیده آرام و تدریجی است، به گونه‌ای که آغاز و پایان آن مشخص نیست، اما امکان دارد از چند ماه تا چند سال به طول بینجامد و گستره تحت سیطره آن نیز در طول زمان دگرگون شود [۳۰، ۳۴]. بررسی وضعیت خشکسالی به عنوان نوعی مخاطره طبیعی در نواحی گوناگون با هدف گردآوری طرح‌های مقابله با خشکسالی و مدیریت خطر آن بسیار ارزشمند است [۵]؛ بنابراین برای شناخت نوسان‌های زمانی و مکانی خشکسالی و اخذ تدابیر مدیریتی مطلوب برای مقابله و مدیریت آن، تحقیقات مرتبط ضروری است [۲۶]. پایش خشکسالی همواره به عنوان یکی از روش‌های مدیریت آب، درخور اهمیت فراوانی است که به وسیله شاخص‌های گوناگون پایش می‌شود. شاخص‌های حاصل از داده‌های ماهواره‌ای از آن جمله است که روشی سودمند برای پایش مکانی و زمانی خشکسالی است و کانون توجه پژوهشگران قرار گرفته است [۶]. به همین دلیل استفاده از تصاویر ماهواره‌ای می‌تواند انتخاب مناسبی برای پایش خشکسالی یک گستره باشد [۵۱].

پژوهش‌های بسیاری بر توانمندی بیشتر شاخص‌های ماهواره‌ای در پایش خشکسالی تأکید دارند. در پژوهش گوویا و همکاران (۲۰۱۶) ارزیابی اثرهای خشکسالی بر عملکرد پوشش گیاهی منطقه مدیترانه با استفاده از داده‌های سنجش از دور و شاخص‌های خشکسالی، همبستگی زیادی بین شاخص‌های سنجش از دور با شاخص‌های هواشناسی نشان داد [۴۰]. بررسی وضعیت خشکسالی استان سیچوان چین در پژوهش جی و همکاران (۲۰۱۸) با استفاده از داده‌های سنجش از دور و چند شاخص خشکسالی، بیانگر خشکسالی شدید در دوره‌های زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۱ بود [۴۳]. لی و همکاران (۲۰۲۰) در پژوهش خود به منظور ارزیابی اثر تغییر اقلیم بر پوشش گیاهی شمال شرق چین از شاخص‌های SPEI^۱ و NDVI^۲ استفاده کردند. نتایج نشان داد که در حدود ۴۵/۴ درصد از پوشش گیاهی منطقه در معرض خشکسالی متوسط تا شدید قرار دارد [۴۵]. شاخص NDVI در پژوهش سان و همکاران (۲۰۲۰) برای کشور قزاقستان طی دوره آماری ۲۰۱۸-۲۰۰۴ قابلیت لازم را در پایش نشان داد [۵۴]. ژائو و همکاران (۲۰۲۰) خشکسالی در دشت گوانژونگ چین را با استفاده از NDVI و شاخص وضعیت دمای پوشش گیاهی (VTCI)^۳ بررسی و پایش کردند. نتایج نشان‌دهنده قابلیت زیاد این شاخص‌ها برای ارزیابی خشکسالی بود [۶۰]. جاوید و همکاران (۲۰۲۱) اثر تغییر اقلیم بر پوشش گیاهی کشور چین را با استفاده از شاخص‌های NDVI و EVI^۴ بررسی کردند. نتایج ارتباط قوی بین این دو شاخص و حساسیت پوشش گیاهی منطقه به تغییرات اقلیمی را نشان داد [۴۲].

استفاده از شاخص‌های VCI^۵، TCI^۶، VHI^۷ و NDVI برای پایش خشکسالی در پژوهش‌های ژانگ و همکاران (۲۰۱۷) در ایالت متحده آمریکا طی سال‌های ۲۰۱۱ و ۲۰۱۲ بیشترین مشابهت این شاخص‌ها را با (SPI)^۸ سه‌ماهه نشان داد [۵۹]. پایش خشکسالی در پژوهش دو و همکاران (۲۰۱۸) برای حوضه مرکزی ویتنام طی دوره ۲۰۱۶-۲۰۰۱ نشان داد شاخص VHI از توانایی لازم برای پایش برخوردار است [۳۷]. نتایج این پژوهش با یافته‌های اجاز و همکاران (۲۰۲۳) در عربستان همسویی دارد [۳۸]. همچنین این شاخص در پژوهش الزورقانی و همکاران (۲۰۲۴) شدیدترین خشکسالی‌ها را در آرکانزاس^۹ ایالت متحده آمریکا طی ماه‌های اوت و مارس نشان داد [۳۲]. پژوهش وانگ و همکاران (۲۰۱۹) در چین از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۱ بیانگر

1. Standardized Precipitation Evapotranspiration Index
2. Normalized Difference Vegetation Index
3. Vegetation Temperature Condition Index
4. Enhanced Vegetation Index
5. Vegetation Condition Index
6. Temperature Condition Index
7. Vegetation Health Index
8. Standardized Precipitation Index
9. Arkansas

کارایی بهتر TCI در برآورد خشکسالی بود [۵۷]. این شاخص در بررسی‌های واسی و همکاران (۲۰۲۲) برای شمال اتیوپی طی دوره زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹ نسبت به شاخص‌های دیگر تنش خشکی به نسبت بیشتری را برآورد کرده است [۵۸]. در پژوهش‌های نیلاگراج و همکاران (۲۰۲۱) پایش خشکسالی حوضه کوداونار^۱ با شاخص‌های TCI، VCI و VHI برای سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ خشکسالی شدید را نشان داد [۵۶]. مطابق با شاخص‌های مذکور، پژوهش‌های پالچاودهوری و بیسواس (۲۰۲۰) خشکسالی شدیدی را طی سال‌های ۲۰۱۱-۲۰۱۰ و ۲۰۱۶-۲۰۱۵ و در پژوهش پرادان و همکاران (۲۰۲۴) تنوع شدید بین ماه‌های بسیار خشک و بسیار مرطوب را طی دوره ۲۰۲۲-۲۰۰۲ برای ناحیه بنگال غربی کشور هند نشان داد [۵۲، ۵۰]. این شاخص‌ها رابطه مستقیمی را با هم در پژوهش تبسم و احمدخان (۲۰۲۴) برای پایش خشکسالی پاکستان نشان دادند [۵۵]. نتایج پژوهش بورکا و همکاران (۲۰۲۴) در پایش خشکسالی حوضه رودخانه بیلایت^۲ با این شاخص‌ها در طول دوره ۲۰۲۲-۲۰۰۰ برای سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۵ خشکسالی شدید و VCI را به‌عنوان شاخص مؤثر نشان داد [۳۵].

در داخل ایران پایش خشکسالی با استفاده از شاخص‌های VCI، TCI، VHI و NDVI در پژوهش سلطانی و همکاران (۱۳۹۸) برای شهرستان کرمانشاه طی سال‌های ۱۳۹۴ و ۱۳۹۵ قابلیت لازم این شاخص‌ها را برای پایش خشکسالی نشان داد [۱۶]. در پژوهش سلیمانی ساردو و زارعی (۱۳۹۸) برای حوضه آبخیز جازموریان طی دوره آماری ۲۰۱۸-۲۰۰۰ مشخص شد که VHI بیشترین تطابق را با SPI در کوتاه‌مدت دارد [۱۷]. پژوهش اسکندری دامنه و همکاران (۱۳۹۸) در حوضه غرب تالاب جازموریان طی دوره آماری ۲۰۱۵-۲۰۰۰ نشان داد که بیشترین همبستگی بین شاخص‌های NDVI و SPI در ایستگاه‌های میانه و دشت کوچ وجود دارد [۱]. پژوهش‌های مجردی و همکاران (۱۳۹۹) در ۳۵ ایستگاه استان قزوین با استفاده از VCI و MSPI^۳ براساس میزان همبستگی، نتایج VCI را تأیید می‌کند [۲۸]. شاخص VCI در بررسی‌های شاهدی و کوشاهی (۱۴۰۱) برای استان مازندران بیشترین همبستگی را با SPI سه‌ماهه نشان داد [۲۰]. در بررسی‌های عفیفی (۱۴۰۰) طی دوره آماری ۲۰۱۵-۱۹۹۰، NDVI بیشترین همبستگی را با تغییرات خشکسالی در حوضه آبریز سد درودزن نشان داد [۲۴]. این شاخص در پژوهش فیروزی و همکاران (۱۳۹۶) برای دشت سیستان هم به‌عنوان شاخص مناسب برای پوشش گیاهی برآورد شد [۲۶]. نتایج پژوهش سپهوند و همکاران (۱۴۰۰) در بررسی تأثیرات خشکسالی بر تغییرات پوشش گیاهی حوضه کشکان لرستان در دوره آماری ۱۹۹۹ و ۲۰۱۹ کاهش معنی‌دار تراکم پوشش گیاهی را با NDVI نشان داد [۱۵]. پژوهش سیاسر و همکاران (۱۴۰۳) در استان گلستان نشان داد که SPI بیشترین همبستگی را با TCI نسبت به شاخص‌های دیگر دارد و مطابق با این شاخص در سال ۲۰۰۰ بیش از ۸۰ درصد منطقه خشکسالی بسیار شدید را تجربه کرده است [۱۸].

پایش خشکسالی با استفاده از شاخص‌ها و روش‌های دیگر نیز توجه محققان زیادی را جلب کرده است: رزمخواه و همکاران (۱۴۰۱) تغییرات زمانی و مکانی خشکسالی در استان کهگیلویه و بویراحمد را با استفاده از SPI در دوره‌های زمانی مختلف بررسی کردند. نقشه پهنه‌بندی نشان داد که با افزایش مقیاس زمانی SPI وسعت خشکسالی شدید نیز بیشتر می‌شود [۱۳]. سیدی قلدره و همکاران (۱۴۰۱) به پایش خشکسالی با استفاده از شاخص‌های سنجش از دور در شهرستان مریوان طی دوره ۲۰۱۷-۲۰۰۱ پرداختند. نتایج نشان داد که EVI بیشترین همبستگی را با SPI دارد [۱۹]. اصلان پنجه و همکاران (۱۴۰۲) تأثیر خشکسالی را بر پوشش گیاهی شهرستان اشتهارد استان البرز طی دوره آماری ۲۰۲۲-۱۹۹۸ با استفاده از SPEI و EVI بررسی کردند. نتایج نشان داد که SPEI سه‌ماهه، قوی‌ترین رابطه را با پوشش گیاهی نسبت به دوره‌های زمانی دیگر دارد [۲]. در تحقیقات رشیدی قانع و همکاران (۱۴۰۳) بررسی فراوانی و ویژگی‌های خشکسالی‌های فرین در دشت مشهد تحت سناریو SSP1-2.6 مدل MRI نشان داد که خشکسالی‌ها در دوره آینده ۲۰۵۰-۲۰۲۶ از شدت و مدت بیشتری نسبت به دوره پایه ۲۰۱۴-۱۹۸۹ برخوردار خواهند بود [۱۴].

با توجه به مطالب گفته‌شده در این زمینه، از آنجا که شاخص‌های VCI، TCI و VHI نتیجه قابل پذیرش را در نواحی مختلف از خود نشان دادند، می‌توان با استفاده از تکنیک سنجش از دور خشکسالی را با پیگیری اثرهای آن بر پوشش گیاهی بررسی کرد

1. Kodavanar

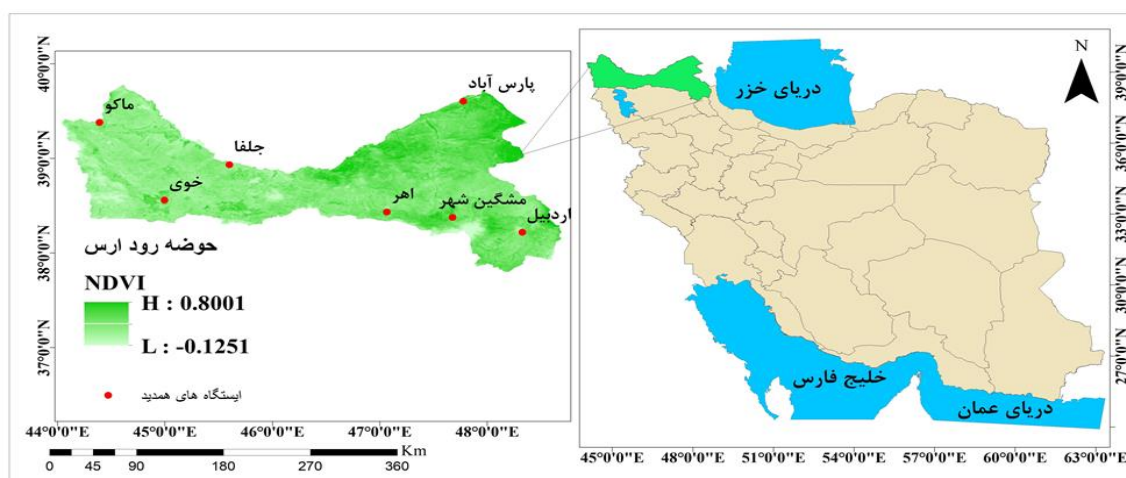
2. Bilate

3. Multivariate Standardized Precipitation Index

و در نتیجه به یافته‌های درستی درباره خشکسالی دست یافت. با توجه به ارزشمندی حوضه رود ارس و پژوهش‌های کمتری که درباره خشکسالی‌های آن انجام گرفته، هدف این پژوهش استفاده از توان شاخص‌های ماهواره‌ای در شناسایی تغییرات رخ داده در پوشش گیاهی طی دوره زمانی ۲۰۲۱-۲۰۱۲ و همچنین بررسی خشکسالی و ارتباط آن با پوشش گیاهی در حوضه رود ارس است که می‌تواند تأثیر مهمی در حفاظت از محیط زیست طبیعی، احیای مراتع و توازن منابع زمین و آب در برابر شرایط خشکسالی داشته باشد.

روش تحقیق

حوضه رود ارس بین مختصات جغرافیایی ۴۴ درجه و ۰۳ دقیقه تا ۴۸ و ۴۱ دقیقه طول شرقی و ۳۷ درجه و ۴۷ دقیقه تا ۳۹ درجه و ۴۶ دقیقه عرض شمالی قرار دارد. شکل ۱ جایگاه جغرافیایی حوضه رود ارس و پراکنش ایستگاه‌های بررسی شده را نشان می‌دهد.



شکل ۱. جایگاه جغرافیایی و پراکنش محدوده پژوهش

داده‌ها

در این پژوهش برای به دست آوردن پهنه‌های خشکسالی هفت ایستگاه هواشناسی (اهر، اردبیل، پارس‌آباد، خوی، جلفا، ماکو و مشکین‌شهر) واقع در حوضه رود ارس، از داده‌های بارش طی ۱۰ سال آماری مشترک (۲۰۲۱-۲۰۱۲) برای ماه‌های فروردین، اردیبهشت، خرداد و تیر مصادف با دوره رشد پوشش گیاهی استفاده شد. پس از دریافت و آماده‌سازی داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار DIP ۱ مقادیر شاخص بارش استاندارد شده (SPI) برای تفکیک سال‌های خشک و تر محاسبه شد. این شاخص اولین بار توسط مک کی و همکاران (۱۹۹۳) ارائه شد [۴۷]. این شاخص برای تخمین و ارزیابی خشکسالی به کار می‌رود و به وسیله آن می‌توان زمان شروع، شدت و همچنین مدت رخداد خشکسالی را در دوره‌های زمانی گوناگون حساب کرد. این امر بیانگر توانایی زیاد این شاخص برای برآورد و تعیین خشکسالی و تأثیرات آن بر منابع آبی در دوره کوتاه مدت نظیر تغییرات و نوسانات موجود در بخش کشاورزی و دوره‌های زمانی بلندمدت مانند تغییرات سفره‌های آب زیرزمینی است. برای ارزیابی این شاخص می‌توان مقدار بارش ماهانه یا مجموع بارندگی در دوره‌های زمانی مورد نظر را محاسبه کرد [۷]. این شاخص از طریق رابطه ۱ محاسبه می‌شود.

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

P مقدار بارش هر ماه، μ میانگین بارش بلندمدت و S انحراف معیار مقدار بارش است [۴].

اطلاعات ماهواره‌ای استفاده شده در این پژوهش شامل محصولات MOD11A2 و MOD13Q1 است که مربوط به سری‌های زمانی شاخص‌های LST^۲ و NDVI هستند. در ادامه شاخص‌های استفاده شده در چهار گروه شاخص گیاهی تفاضلی نرمال شده

1. Drought Index Package
2. Land Surface Temperature

(NDVI)، وضعیت پوشش گیاهی (VCI)، وضعیت درجه حرارت (TCI) و سلامت پوشش گیاهی (VHI) دسته‌بندی شده و با SPI مقایسه شد تا تفاوت‌های شاخص‌ها طی این چهار ماه مشخص شود.

شاخص NDVI شاخصی مفید برای سنجش سلامت پوشش گیاهی است [۴۱] که در بهترین حالت ۱ و در کمترین مقدار آن پوشش گیاهی برابر با صفر است [۱۰]. این شاخص برای پایش میزان تنش گیاهان از نظر آب و مقدار محصول آنها استفاده می‌شود؛ بنابراین به دلیل رابطه نزدیک میان وضعیت پوشش گیاهی و مقدار رطوبت خاک در دسترس، به‌عنوان یکی از شاخص‌های ارزیابی خشکسالی به‌کار می‌رود. در این پژوهش مقادیر بزرگ‌تر از ۰/۲ مطابق با پژوهش شکربران و همکاران (۱۴۰۰) به‌عنوان مناطق دارای پوشش گیاهی در نظر گرفته شدند [۲۱]. رابطه ۲ نحوه محاسبه شاخص NDVI را نشان می‌دهد.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad \text{رابطه ۲}$$

که در آن NIR و RED به ترتیب بازتاب طیفی سنجش شده در بخش مادون قرمز نزدیک و قرمز طیف الکترومغناطیس است. مقدار این شاخص بین -۱ تا +۱ است که در آن مقادیر مثبت بیانگر پوشش گیاهی متراکم هست [۳۱].

شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI) با فرض اینکه رخداد خشکسالی موجب افت نم خاک و ایجاد تنش‌های گرمایی در سطح زمین می‌شود ارائه شده است [۳۶]. این شاخص برحسب درصد بیان می‌شود و دامنه آن بین ۰ تا ۱۰۰ قرار دارد، مقادیر زیاد آن بیانگر وضعیت مساعد خواهد بود و مقادیر اندک آن نشان‌دهنده وجود خشکسالی در محدوده تحت بررسی است [۳۹]. این شاخص براساس رابطه ۳ به‌دست می‌آید.

$$VCI = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \times 100 \quad \text{رابطه ۳}$$

NDVI شاخص نرمال شده پوشش گیاهی و $NDVI_{min}$ و $NDVI_{max}$ میانگین کمینه و بیشینه NDVI است. برای محاسبه شاخص وضعیت درجه حرارت (TCI) از دمای درخشندگی یا درجه حرارت سطح زمین استفاده می‌شود و هنگامی که دمای سطح زمین در فصل رشد به بیشترین حد خود برسد، شدت خشکسالی افزایش می‌یابد و در پی آن وضعیت نامطلوب به وجود می‌آید. دامنه این شاخص بین ۰ تا ۱۰۰ قرار دارد و مقدار کمتر آن نشان‌دهنده هوای بسیار گرم در سال مورد نظر است. رابطه ۴ نحوه محاسبه این شاخص را بیان می‌کند [۴۸،۵۳].

$$TCI = \frac{T_{Max} - T}{T_{Max} - T_{Min}} \times 100 \quad \text{رابطه ۴}$$

T درجه حرارت سطح زمین (LST) و T_{Max} و T_{Min} بیشینه و کمینه درجه حرارت سطح زمین در محدوده تحت بررسی است. برای محاسبه شاخص سلامت پوشش گیاهی (VHI) از رابطه ۵ استفاده می‌شود. این شاخص حاصل ترکیب VCI و TCI است و به‌عنوان یک شاخص قابل‌اعتماد برای نظارت بر خشکسالی در زمین‌های زراعی استفاده می‌شود [۱۵]. هدف این شاخص لحاظ شرایط نم پوشش گیاهی و دمای سطح زمین در یک شاخص مجموع است [۱۲].

$$VHI = a \times VCI + b \times TCI \quad \text{رابطه ۵}$$

a ضریب VCI و b ضریب TCI است [۴۶]. رتبه‌بندی میزان خشکسالی به‌وسیله شاخص‌های ماهواره‌ای و هواشناسی طبق جدول ۱ تعریف می‌شود [۴].

جدول ۱. رتبه‌بندی شدت خشکسالی بر اساس شاخص هواشناسی و ماهواره‌ای

شاخص خشکسالی	نمایه VHI-VCI	نمایه TCI	نمایه SPI
خشکسالی بسیار شدید	۱۰ <	۱۰ <	۲ <
خشکسالی شدید	۱۹/۵ تا ۱۰	۱۹/۵ تا ۱۰	۲ تا ۱/۵ -
خشکسالی متوسط	۲۹/۵ تا ۲۰	۲۹/۵ تا ۲۰	۱/۵ تا -۱
نرمال	۳۹/۹ تا ۳۰	۳۹/۹ تا ۳۰	۱ تا -۱
ترسالی متوسط	۴۹/۵ تا ۴۰	۴۹/۵ تا ۴۰	۱/۵ تا ۱
ترسالی شدید	۵۰ تا ۵۰/۵۹	۵۰ تا ۵۹/۵	۱/۵ تا ۲
ترسالی بسیار شدید	۶۰ >	۶۰ >	۲ >

برای اعتبارسنجی شاخص‌ها و مقایسه نتایج حاصل از شاخص‌های ماهواره‌ای با شاخص هواشناسی، از سه معیار ارزیابی ضریب همبستگی (R)، میانگین مجذور خطا (MSE)^۱ و جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)^۲ استفاده شد. این معیارها به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (F_i - \bar{O})^2 - \sum_{i=1}^n (F_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (F_i - \bar{O})^2} \quad \text{رابطه ۶}$$

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (F_i - O_i)^2 \quad \text{رابطه ۷}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (F_i - O_i)^2}{n}} \quad \text{رابطه ۸}$$

در این رابطه‌ها، F_i مقدار حاصل از شاخص‌های ماهواره‌ای، O_i مقدار شاخص هواشناسی، O میانگین مقادیر شاخص هواشناسی و n تعداد مشاهدات است [۳۳، ۲۲، ۳].

تحلیل داده‌ها

هدف این پژوهش، مقایسه رابطه بین شاخص‌های ماهواره‌ای و شاخص خشکسالی اقلیمی و تعیین کارایی شاخص‌های ماهواره‌ای برای نشان دادن وضعیت خشکسالی است؛ از این رو پس از محاسبه SPI برای هر یک از ایستگاه‌های زمینی، نقاط این ایستگاه‌ها روی نقشه‌های تولیدشده حاصل از شاخص‌های ماهواره‌ای قرار داده شد. سپس مقادیر عددی نقاط متناظر به دست آمد و مقدار ضرایب همبستگی بین مقادیر SPI با شاخص‌های VCI و TCI محاسبه شد (جدول ۲). نتایج نشان داد که SPI طی ماه‌های فصل رشد بیشترین همبستگی را با VCI در همه ایستگاه‌ها داشته و بر مبنای TCI قوی‌ترین رابطه تنها در ایستگاه پارس آباد بوده است. شاخص VHI قوی‌ترین همبستگی‌ها را در فروردین ماه برای ایستگاه خوی و در خردادماه برای ایستگاه جلفا نشان می‌دهد. این همبستگی به صورت رابطه مستقیم و معنادار در ایستگاه خوی و به شکل معکوس و معنادار در ایستگاه جلفا بوده است. رابطه معکوس و بدون معنای دیگری برای ایستگاه جلفا طی اردیبهشت‌ماه مشاهده می‌شود. جدول‌های ۳ و ۴ به ترتیب مقادیر معیارهای ارزیابی مربوط به آزمایش شاخص‌های مختلف را نشان می‌دهد. براساس نتایج معیارهای صحت‌سنجی در همه ایستگاه‌ها، شاخص VCI بیشترین دقت را نشان می‌دهد. خطای شاخص VCI در بهترین حالت برابر با ۰/۱۱۱ مطابق با شاخص خطاسنجی MSE بوده و نسبت به شاخص‌های دیگر خطای کمتری را برآورد کرده است؛ بنابراین می‌توان گفت VCI وضعیت خشکسالی حوضه رود ارس را بهتر نشان می‌دهد و می‌توان آن را شاخص ماهواره‌ای بهینه و مطلوب معرفی کرد که با یافته‌های بورکا و همکاران (۲۰۲۴) همسو [۳۵] و با نتایج پژوهش جیائو و همکاران (۲۰۱۶) و مردانی و همکاران (۱۴۰۲) ناهمسو است [۴۴، ۲۹].

جدول ۲. ضریب همبستگی بین مقادیر SPI هواشناسی و شاخص‌های ماهواره‌ای

ایستگاه	VCI- فروردین	TCI- فروردین	VHI- فروردین	VCI- اردیبهشت	TCI- اردیبهشت	VHI- اردیبهشت	VCI- خرداد	TCI- خرداد	VHI- خرداد	VCI- تیر	TCI- تیر	VHI- تیر
اهر	۰/۳۲۷	-۰/۳۱۸	-۰/۲۷۸	-۰/۶۷۴	۰/۶۰۵	-۰/۵۹۳	-۰/۶۶۲	۰/۶۳۲*	-۰/۶۲۷	۰/۵۵۶	-۰/۱۳۷	-۰/۱۳۷
اردبیل	۰/۴۰۴	۰/۳۵۱	-۰/۳۳۲	۰/۳۶۵	۰/۳۶۵	۰/۱۷۷	۰/۵۹۸	-۰/۵۰۵	-۰/۱۴۴	-۰/۶۱۲	۰/۲۱۳	۰/۲۱۳
جلفا	۰/۳۴۴	-۰/۲۳۹	۰/۲۳۷	۰/۶۸۹*	-۰/۰۲۶	-۰/۵۴۱	۰/۳۶۷	۰/۳۰۴	-۰/۵۶۵*	-۰/۰۲۴	-۰/۰۵۶	-۰/۰۵۶
خوی	۰/۶۸۸*	-۰/۶۸۷*	۰/۶۷۶*	۰/۴۶۵	-۰/۲۳۴	-۰/۳۸۴	۰/۴۸۳	۰/۰۴۳	-۰/۳۹۶	-۰/۳۷۰	-۰/۳۶۵	-۰/۳۶۵
ماکو	۰/۵۳۶	-۰/۵۰۹	-۰/۴۹۹	۰/۰۳۱	۰/۲۸	-۰/۰۳۰	۰/۳۵۴	۰/۱۵۶	-۰/۳۴۱	۰/۴۷۹	-۰/۳۲۹	-۰/۳۲۹
پارس‌آباد	۰/۱۵۳	۰/۱۸۷	-۰/۱۴۹	۰/۵۳۳	-۰/۴۲۰	-۰/۲۳۵	۰/۵۶۰	-۰/۱۲۴	-۰/۳۰۳	-۰/۴۹	۰/۳۵۲	۰/۳۵۲
مشکین‌شهر	۰/۴۸۰	۰/۱۳۹	-۰/۲۹۰	-۰/۶۸۳*	۰/۵۹۳	۰/۰۳۳	-۰/۱۹۵	-۰/۱۸۱	-۰/۱۸۹	-۰/۴۴۲	-۰/۳۶۵	-۰/۳۶۵

* همبستگی معنادار در سطح اطمینان ۰/۰۵

1. Mean Squared Error
2. Root Mean Square Error

جدول ۳. معیار ارزیابی شاخص MSE محاسبه شده برای شاخص‌های ماهواره‌ای

ایستگاه	VCI- فروردین	TCI- فروردین	VHI- فروردین	VCI- اردیبهشت	TCI- اردیبهشت	VHI- اردیبهشت	VCI- خرداد	TCI- خرداد	VHI- خرداد	VCI- تیر	TCI- تیر	VHI- تیر
اهر	۰/۵۱۱	۰/۷۰۳	۰/۵۱۳	۰/۴۱۱	۰/۴۱۵	۰/۴۲۴	۰/۲۲۹	۰/۲۶۱	۰/۲۶۴	۰/۶۴۷	۰/۶۴۸	۰/۵۹۷
اردبیل	۰/۳۱۴	۰/۴۲۹	۰/۳۲۶	۰/۵۲۱	۰/۵۵۱	۰/۵۷۸	۰/۵۱۱	۰/۵۸۳	۰/۶۰۵	۰/۳۴۴	۰/۳۵۶	۰/۴۴۰
جلفا	۰/۶۵۰	۰/۶۷۹	۰/۶۵۹	۰/۳۵۸	۰/۳۵۲	۰/۳۸۰	۰/۴۴۵	۰/۵۴۵	۰/۴۹۸	۰/۵۱۸	۰/۵۱۱	۰/۵۴۱
خوی	۰/۱۶۱	۰/۱۶۴	۰/۱۹۳	۰/۵۲۴	۰/۴۸۶	۰/۵۵۹	۰/۳۷۵	۰/۴۷۷	۰/۴۸۷	۱/۳۴۲	۱/۶۰۳	۱/۵۳۴
ماکو	۰/۱۱۱	۰/۱۱۷	۰/۱۱۴	۰/۴۴۴	۰/۵۵۶	۰/۵۵۵	۰/۱۹۲	۰/۲۲۷	۰/۲۰۳	۰/۹۴۲	۱/۳۱۸	۰/۹۴۳
پارس‌آباد	۰/۱۲۰	۰/۳۶۴	۰/۱۳۴	۰/۱۴۲	۰/۱۸۸	۰/۱۱۲	۰/۲۳۳	۰/۳۷۱	۰/۲۳۴	۰/۶۵۰	۰/۹۳۹	۰/۶۵۱
مشکین‌شهر	۰/۳۷۸	۰/۶۵۳	۰/۳۸۹	۰/۴۵۱	۰/۳۰۱	۰/۷۴۴	۰/۳۱۰	۰/۳۲۰	۰/۳۱۱	۰/۷۶۶	۱/۰۱۸	۰/۷۶۷

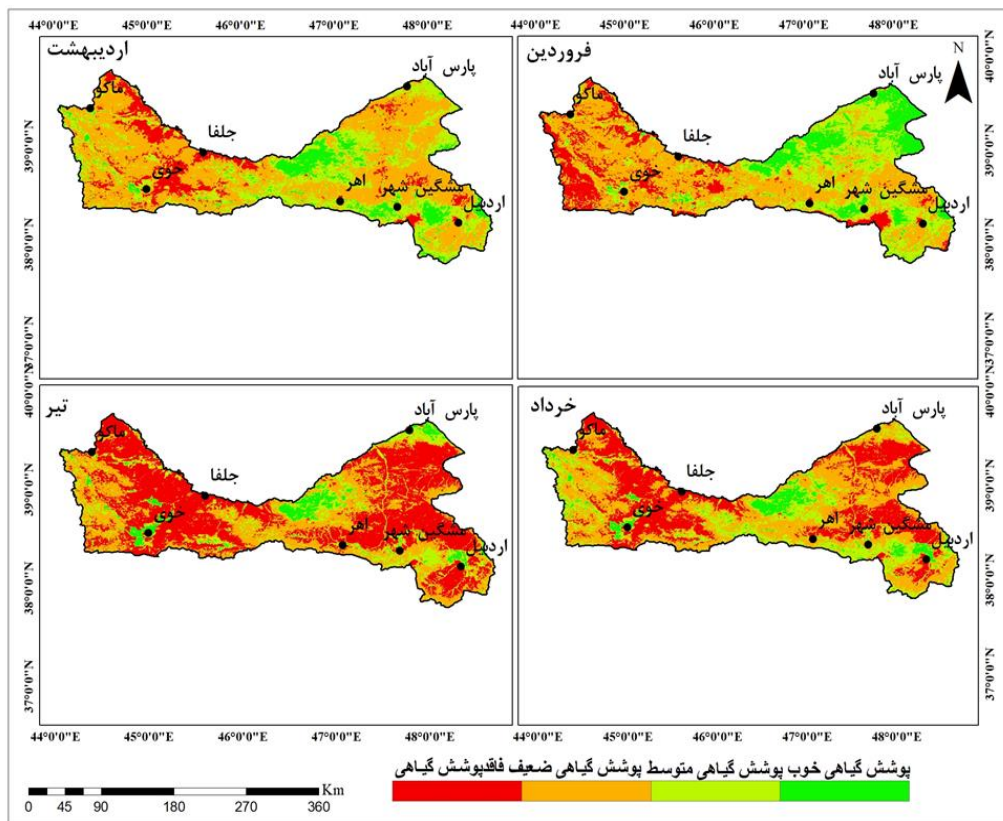
جدول ۴. معیار ارزیابی شاخص RMSE محاسبه شده برای شاخص‌های ماهواره‌ای

ایستگاه	VCI- فروردین	TCI- فروردین	VHI- فروردین	VCI- اردیبهشت	TCI- اردیبهشت	VHI- اردیبهشت	VCI- خرداد	TCI- خرداد	VHI- خرداد	VCI- تیر	TCI- تیر	VHI- تیر
اهر	۰/۸۰۳	۰/۸۳۹	۰/۸۱۶	۰/۶۲۱	۰/۶۶۴	۰/۶۵۱	۰/۴۱۴	۰/۵۱۱	۰/۵۱۴	۰/۷۷۲	۰/۸۰۵	۰/۷۷۳
اردبیل	۰/۵۱۷	۰/۶۵۵	۰/۵۷۱	۰/۷۵۸	۰/۷۶۲	۰/۷۶۰	۰/۷۷۲	۰/۷۸۳	۰/۷۷۸	۰/۶۱۹	۰/۶۹۶	۰/۶۶۳
جلفا	۰/۸۱۰	۰/۹۲۸	۰/۸۱۲	۰/۵۹۰	۰/۵۹۳	۰/۶۱۷	۰/۷۰۴	۰/۷۳۸	۰/۷۰۶	۰/۷۱۰	۰/۷۱۵	۰/۷۳۶
خوی	۰/۴۰۱	۰/۴۰۵	۰/۴۳۹	۰/۷۲۴	۰/۷۹۷	۰/۷۴۷	۰/۶۱۷	۰/۶۹۰	۰/۶۲۲	۱/۱۱۵	۱/۲۶۶	۱/۲۳۹
ماکو	۰/۳۳۹	۰/۴۳۱	۰/۳۳۷	۰/۶۶۶	۰/۶۷۲	۰/۷۴۵	۰/۴۳۸	۰/۴۷۶	۰/۴۵۰	۰/۹۷۷	۱/۱۴۸	۰/۹۷۱
پارس‌آباد	۰/۳۷۰	۰/۶۰۳	۰/۳۵۳	۰/۳۳۰	۰/۴۳۳	۰/۳۳۴	۰/۴۸۵	۰/۶۰۹	۰/۴۸۸	۰/۸۰۵	۰/۹۶۹	۰/۸۰۷
مشکین‌شهر	۰/۷۲۰	۰/۸۰۸	۰/۷۲۳	۰/۶۷۲	۰/۸۲۴	۰/۸۶۲	۰/۵۵۳	۰/۵۶۵	۰/۵۵۸	۰/۸۷۴	۱/۰۰۹	۰/۸۷۶

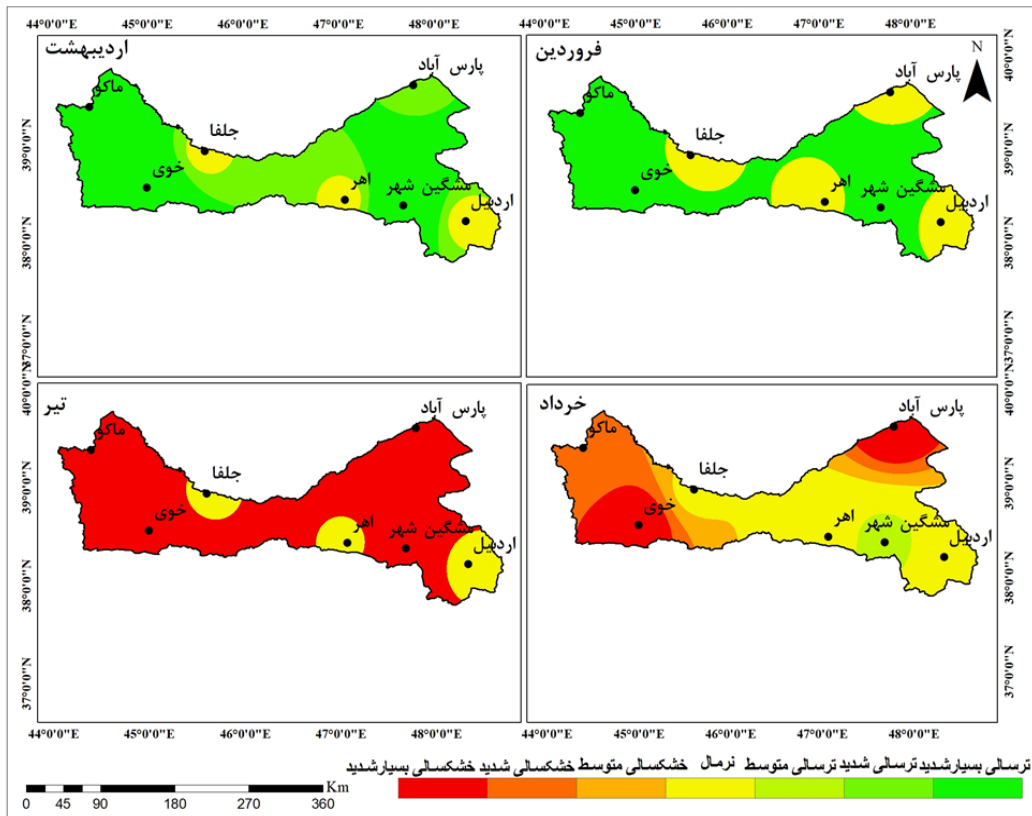
تغییرات NDVI در ماه‌های فروردین تا تیر طی دوره آماری ۲۰۲۱ - ۲۰۱۲ در چهار کلاس طبقه‌بندی شد که نتایج آن در شکل ۲ آورده شده است. مطابق با شکل بیشترین تراکم پوشش گیاهی در فروردین‌ماه مشاهده می‌شود و بیشترین مساحت محدوده پژوهش به جز ایستگاه‌های جلفا، خوی و ماکو تحت تأثیر پوشش گیاهی خوب قرار گرفته است. تراکم و وسعت پوشش گیاهی در ماه‌های خرداد و تیر نسبت به ماه‌های دیگر کاهش چشمگیری داشته است که تنش بیشتر خشکی، دمای زیاد و رطوبت کم را در این ماه‌ها در پی دارد.

نتایج حاصل از مقدار شاخص SPI در شکل ۳ هم بیانگر رخداد خشکسالی شدید در بیشتر ایستگاه‌های یادشده طی ماه‌های خرداد و تیر است؛ بنابراین می‌توان گفت که خشکسالی در تنک شدن و کاهش پوشش گیاهی این ماه‌ها تأثیرگذار بوده است که با نتایج پژوهش آرخی و همکاران (۱۴۰۱) در مناطق مرکزی ایران تقریباً همسویی و مشابهت دارد [۴]. بر این اساس در تیرماه بخش‌های وسیعی از حوضه رود ارس تحت تأثیر شدت‌های بیشتری از خشکسالی قرار گرفته‌اند. تنها ایستگاه‌های اردبیل، اهر و جلفا نسبت به بقیه نواحی از نظر شرایط خشکسالی در وضعیت نرمال واقع شده‌اند. همچنین برپایه این شاخص اردیبهشت مرطوب‌ترین ماه منطقه به حساب می‌آید، به گونه‌ای که بیشتر ایستگاه‌ها در این ماه ترسالی بیشتری داشته‌اند.

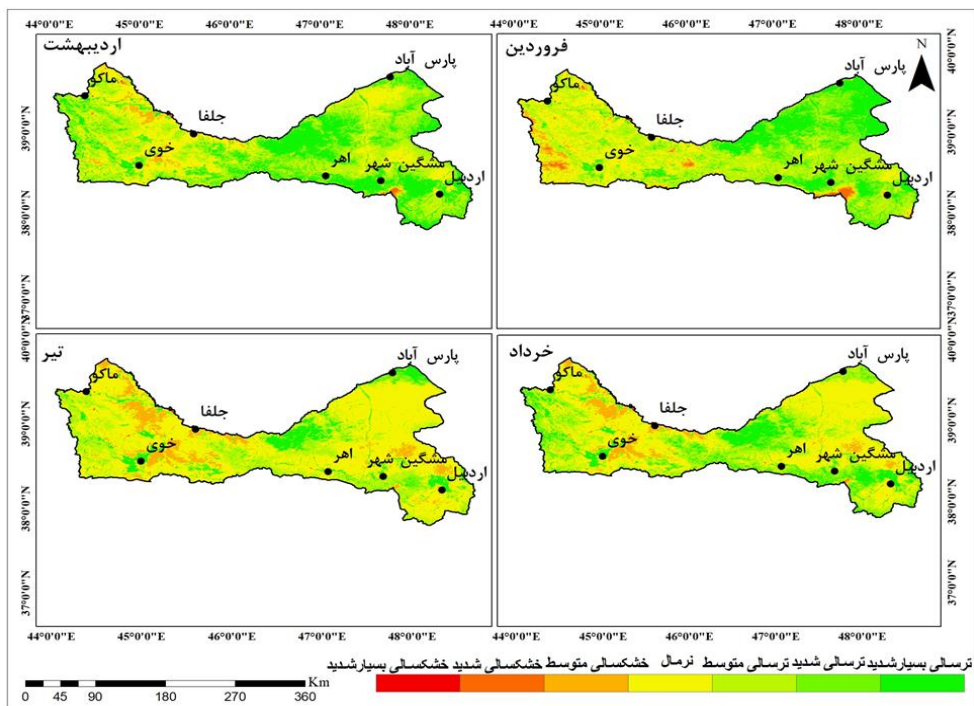
از آنجا که VCI تغییرات بارش را نسبت به NDVI بهتر نشان می‌دهد، از این شاخص برای نشان دادن شرایط و وضعیت پوشش گیاهی استفاده شد. با توجه به شکل ۴ تنوع مقادیر VCI در سلامت پوشش گیاهی منطقه به‌وضوح مشاهده می‌شود. این تنوع تغییرات مکانی اغلب به دلیل پراکنش نامنظم بارش است که در نیمه غربی نسبت به نیمه شرقی به‌طور چشمگیری کمتر است که با نتایج پژوهش شاهدهی و کوشاهی (۱۴۰۱) در استان مازندران همخوانی دارد [۲۰]. در حالت کلی نتایج به‌دست‌آمده از تصاویر کلاس‌بندی‌شده توسط این شاخص بیانگر افزایش رخداد خشکسالی‌های منطقه در تیرماه است. بر این اساس بخش‌های وسیعی از حوضه رود ارس در وضعیت نزدیک به نرمال قرار گرفته‌اند و ایستگاه‌های جلفا، خوی و ماکو در وضعیت خشکسالی خفیف واقع شده‌اند. مطابق با این شاخص، فروردین به‌عنوان مرطوب‌ترین ماه در محدوده تحت بررسی به حساب می‌آید. به‌طوری که بخش‌های وسیعی از پهنه‌های واقع در استان اردبیل و آذربایجان شرقی از شدت ترسالی بیشتری برخوردار بوده و باقی ایستگاه‌ها هم در وضعیت نزدیک به نرمال قرار گرفته‌اند.



شکل ۲. مقدار شاخص NDVI طی ماههای فصل رشد (فروردین تا تیر) دوره آماری ۲۰۲۱-۲۰۱۲

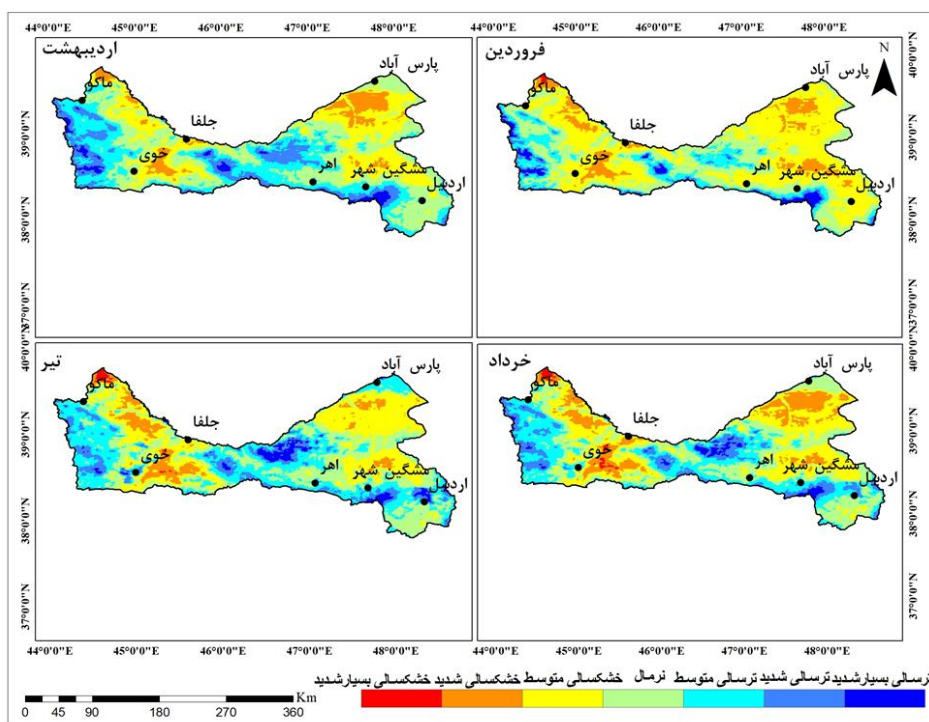


شکل ۳. نقشه پهنه‌بندی خشکسالی محدوده تحت بررسی براساس شاخص SPI



شکل ۴. نقشه پهنه بندی خشکسالی محدوده تحت بررسی براساس شاخص VCI

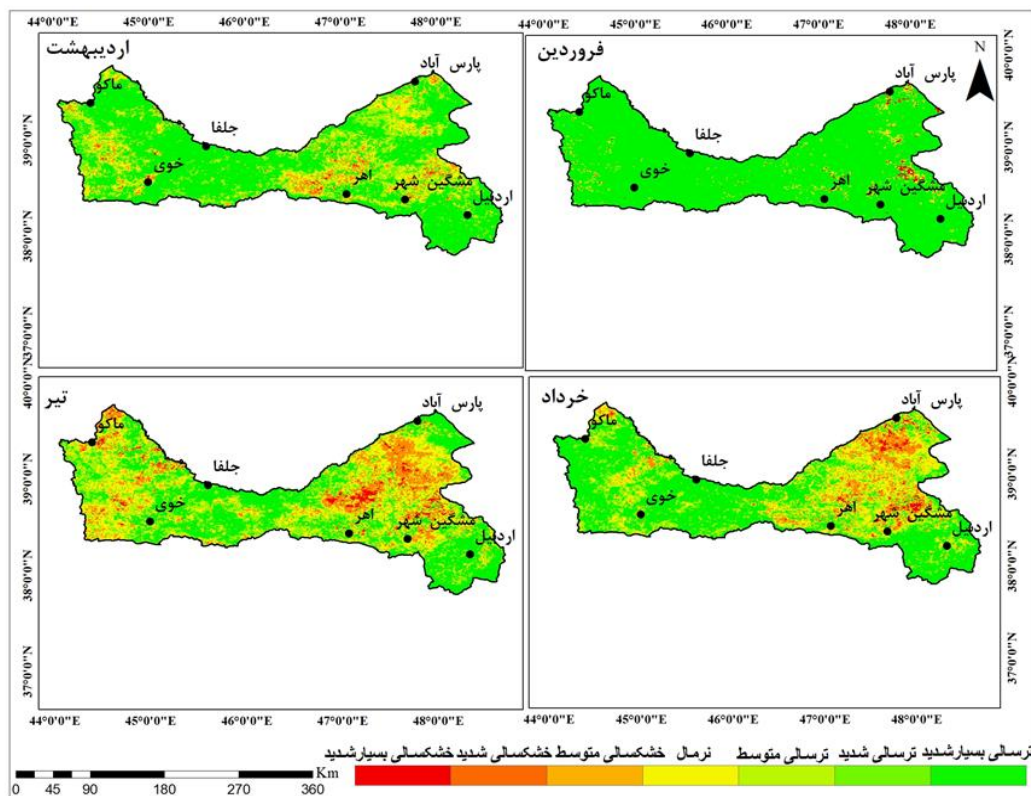
شاخص TCI وضعیت پوشش گیاهی را از نظر دمایی بررسی می کند. نتایج ارائه شده توسط این شاخص مطابق با شکل ۵، نشان می دهد فروردین ماه در محدوده پژوهش نسبت به بقیه ماهها از دمای بیشتری برخوردار است که بیانگر رخداد خشکسالی های خفیف تا شدید طی این ماه در همه ایستگاههاست. طی ماههای بعد، از شدت خشکسالی در ایستگاهها کاسته شده است، به طوری که همه ایستگاهها در وضعیت نرمال تا ترسالی خفیف قرار گرفته اند تا جایی که در تیرماه بیشتر ایستگاههای مورد بررسی ترسالی های خفیف تا بسیار شدیدی را نیز تجربه کرده اند.



شکل ۵. نقشه پهنه بندی خشکسالی محدوده تحت بررسی براساس شاخص TCI

شکل ۶ نقشه‌های میانگین چهار ماه سال را از سال ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۱ برای تشخیص شدت خشکسالی بر مبنای VHI نشان می‌دهد. این شاخص به شکل گسترده در پایش و ارزیابی خشکسالی استفاده می‌شود. چراکه قابلیت نشان دادن اثرهای خشکسالی بر پوشش گیاهی و درجه حرارت سطح زمین را دارد و با استفاده از آن می‌توان شدت خشکسالی زمین‌های کشاورزی را تشخیص داد. نتایج حاصل از این شاخص در محدوده تحت بررسی بیانگر رخداد خشکسالی شدید منطقه در تیرماه است. بر این اساس بخش‌های وسیعی در این ماه طی دوره پژوهش با شدت‌های بیشتری از خشکسالی روبه‌رو بوده‌اند. در ایستگاه‌های اردبیل و جلفا از شدت خشکسالی نسبت به سایر بخش‌ها کاسته شده است. همچنین بر پایه شاخص مذکور، همانند شاخص VCI، فروردین مرطوب‌ترین ماه منطقه محسوب می‌شود.

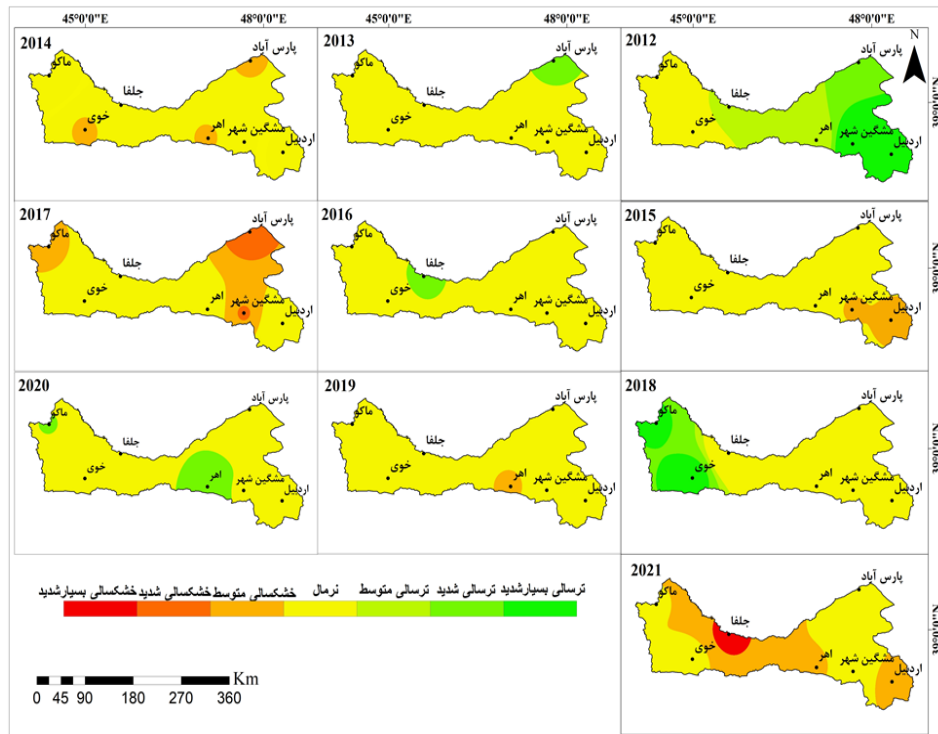
پهنه‌بندی خشکسالی مربوط به ماه‌های فصل رشد (فروردین تا تیر) با استفاده از شاخص زمینی SPI به تفکیک سال‌های بررسی شده (۲۰۱۲-۲۰۲۱) بیانگر رخداد خشکسالی در بیشتر پهنه مدنظر در سال ۲۰۲۱ است، به گونه‌ای که ایستگاه جلفا در شرایط خشکسالی بسیار شدیدی واقع شده است و ایستگاه‌های اهر و مشکین‌شهر نیز خشکسالی شدیدی را تجربه کرده‌اند. در حالی که رخداد ترسالی‌های خفیف تا بسیار شدید همزمان با سال ۲۰۱۲ بوده است. در این سال پهنه‌های شرقی حوضه رود ارس در معرض ترسالی‌های بسیار شدید قرار گرفته‌اند، اما پهنه‌های غربی در وضعیت نرمال قرار دارند. در دیگر سال‌های مورد بررسی شرایط غالب در بیشتر پهنه‌ها وضعیت نرمال است (شکل ۷).



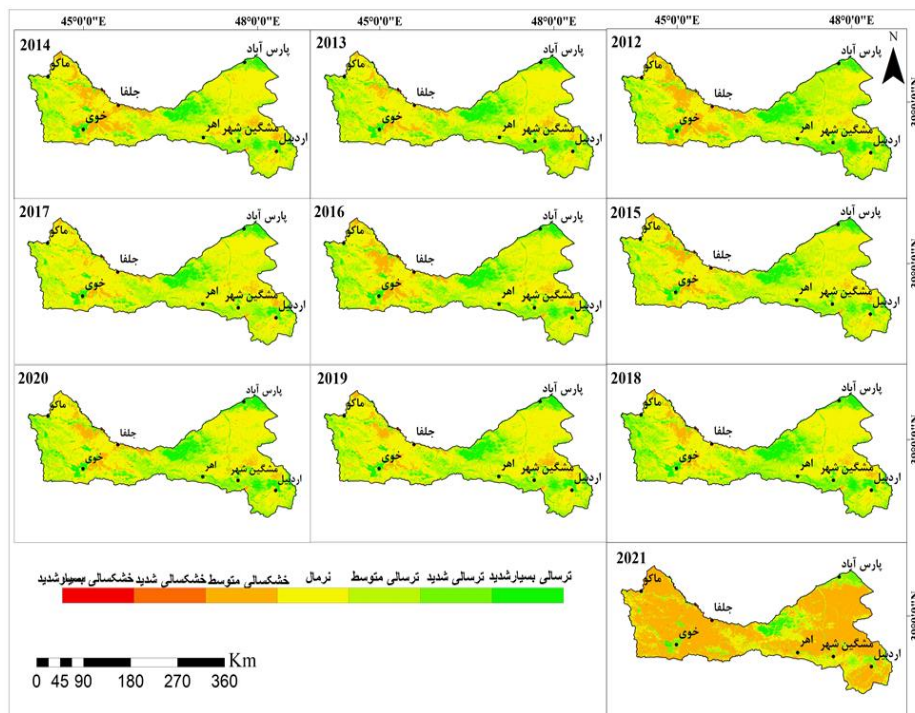
شکل ۶. نقشه پهنه‌بندی خشکسالی محدوده تحت بررسی بر اساس شاخص VHI

نتایج تصاویر منتج از شاخص VCI (شکل ۸) نشان داد که بیشترین تمرکز وقوع خشکسالی‌ها همانند نتایج حاصل از مقادیر SPI متعلق به سال ۲۰۲۱ است. مطابق با شاخص مذکور در این سال به جز ایستگاه پارس‌آباد، بقیه پهنه‌ها درگیر شرایط خشکسالی خفیف بوده‌اند. بر اساس یافته‌های به دست آمده محدوده تحت بررسی در هیچ‌یک از سال‌ها چندان با خشکسالی خیلی شدید مواجه نبوده، اما الگوی پراکنش در تمامی مناطق یکسان نبوده است. از آنجا که مقادیر محاسبه شده توسط VCI، وابسته به عناصر آب‌وهوایی، ساختار خاک، پستی و بلندی، وضعیت نگهداشت نم خاک، ارتفاع و شرایط پوشش گیاهی است، یکی از دلایل

افزایش کلاس های خشکسالی را می توان به کاهش بارش و توزیع نامناسب آن ربط داد. نتایج به دست آمده شرایط مطلوب و مناسبی را برای رسیدن به وضعیت ترسالی در بیشتر سال ها نشان می دهد. از این رو در مناطقی که احتمال وقوع خشکسالی وجود دارد به علت نابودی و تنک شدن پوشش گیاهی، مقادیر عددی شاخص VCI کمتر شده است.

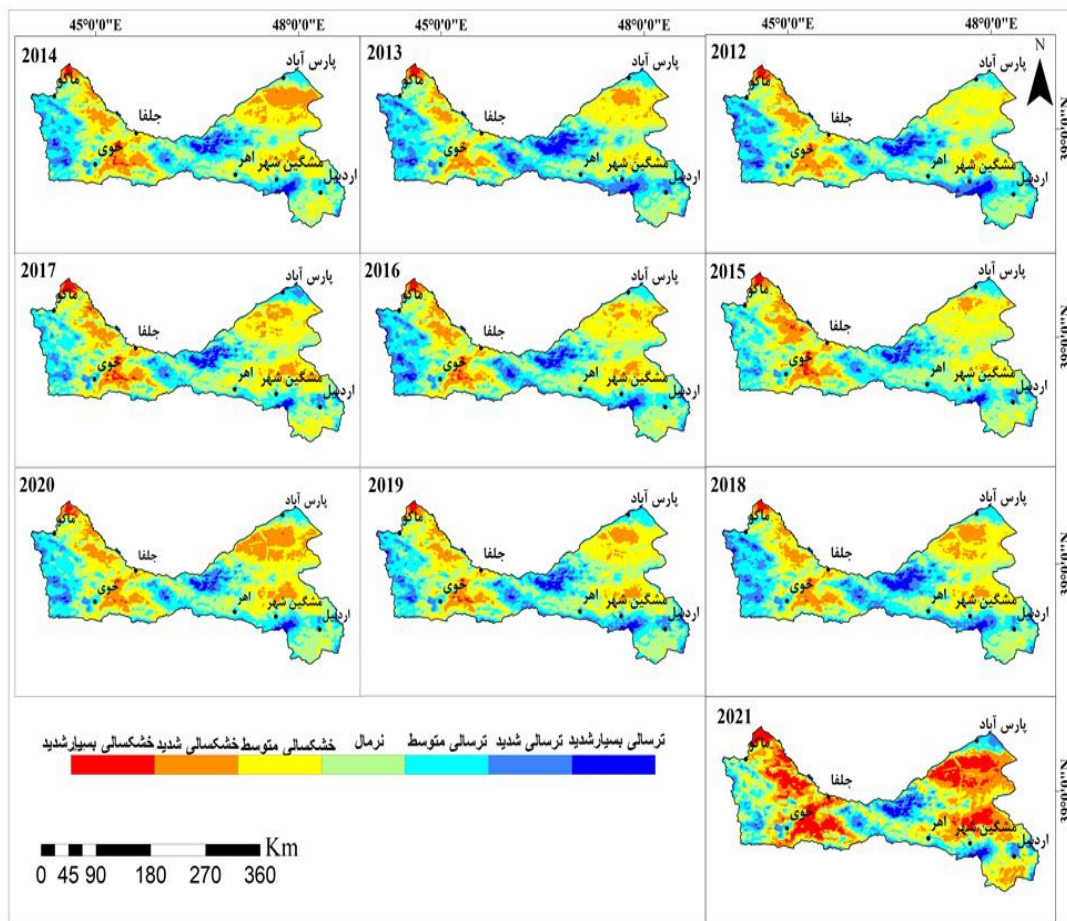


شکل ۷. نقشه پهنه بندی خشکسالی حوضه رود ارس براساس شاخص SPI از سال ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۱



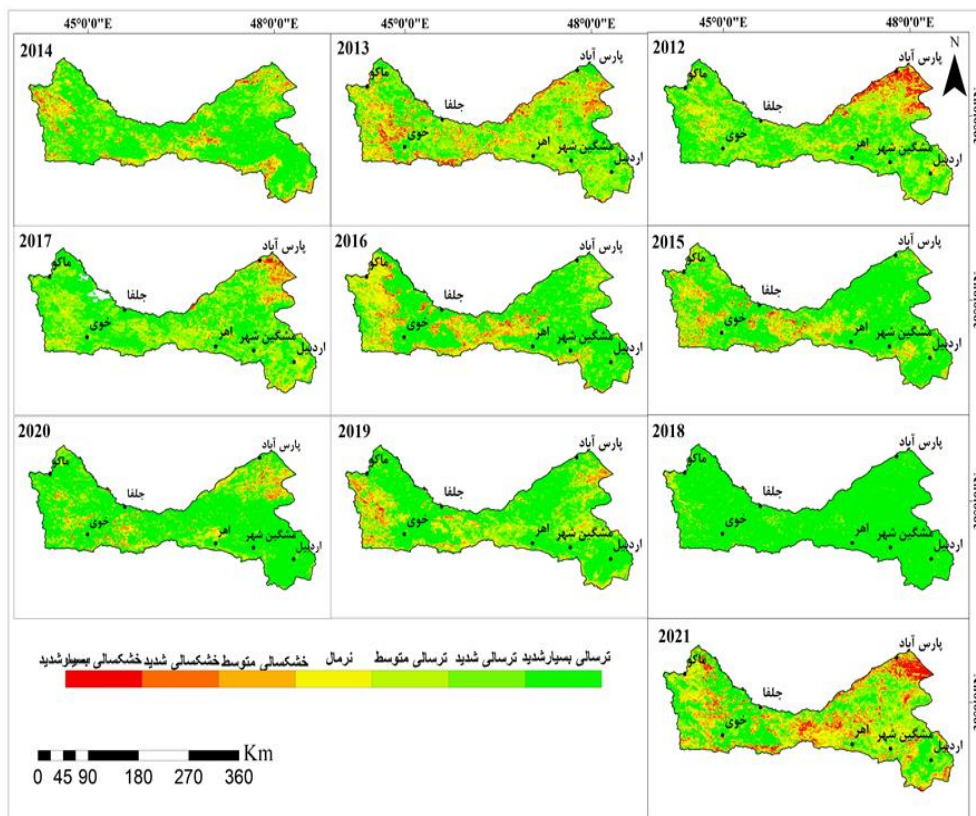
شکل ۸. نقشه پهنه بندی خشکسالی حوضه رود ارس براساس شاخص VCI از سال ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۱

بهره‌گیری از مقادیر TCI می‌تواند پیش‌بینی خشکسالی را بهبود بخشد. مطابق شکل ۹ وضعیت و شرایط حوضه رود ارس براساس شاخص TCI که بیانگر تغییرات دمایی است نشان می‌دهد که طی سال ۲۰۲۱ بیشتر پهنه‌ها با خشکسالی شدید روبه‌رو بوده‌اند و تنها ایستگاه‌های پارس‌آباد و اردبیل شرایط ترسالی داشته‌اند و سال دارای شرایط مطلوب و بهینه سال ۲۰۱۲ است که در آن از شدت خشکسالی در محدوده کاسته شده و شرایط نرمال و ترسالی با طبقات مختلف برای نیمه شرقی غالب شده است. در حالی که نیمه غربی تحت تأثیر خشکسالی شدید قرار گرفته که در ایستگاه ماکو خشکسالی از نوع بسیار شدید است.



شکل ۹. نقشه پهنه‌بندی خشکسالی حوضه رود ارس براساس شاخص TCI از سال ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۱

بررسی پراکندگی مکانی شاخص VHI در حوضه رود ارس طی دوره آماری ۲۰۱۲-۲۰۲۱ بیانگر وقوع شدیدترین و بحرانی‌ترین خشکسالی‌ها در سال ۲۰۲۱ با بیشترین گستره خشکسالی شدید و بسیار شدید در قسمت غربی حوضه و سپس سال‌های ۲۰۱۲ و ۲۰۱۳ با گستره خشکسالی شدید (شکل ۱۰) بوده است. همچنین در سال ۲۰۱۶ بیش از ۵۰ درصد از مساحت محدوده شرایط بین نزدیک به نرمال تا خشکسالی متوسط را تجربه کرده است. برپایه این شاخص، سال ۲۰۱۸ مرطوب‌ترین سال منطقه محسوب می‌شود و شرایط کلی پوشش گیاهی در این دوره زمانی سالم بوده است.



شکل ۱۰. نقشه پهنه‌بندی خشکسالی حوضه رود ارس براساس شاخص VHI از سال ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۱

نتیجه‌گیری

اطلاعات مکانی و زمانی درباره خشکسالی کشاورزی برای سیاست‌گذاران و همچنین استفاده‌های زیست‌محیطی و کشاورزی ضروری است. استفاده از تصاویر ماهواره‌ای ابزار بسیار مناسبی در پایش خشکسالی مناطق مختلف ایران است و پایش خشکسالی به منظور ممانعت از توسعه رخدادهای احتمالی خشکسالی شدید در آینده بسیار ضروری است. این پژوهش یک رویکرد کوچک برای ردیابی شدت خشکسالی طی ۱۰ سال گذشته است و تغییرات مکانی و زمانی پوشش گیاهی و دمای سطح زمین ناشی از خشکسالی را با استفاده از شاخص‌های VCI، TCI و VHI در سال‌های ۲۰۱۲ تا ۲۰۲۱ بررسی و وضعیت آنها را با شاخص SPI مقایسه کرده است. نتایج تحلیل‌ها در پهنه تحت بررسی نشان می‌دهد که محدوده غربی نسبت به محدوده شرقی بیشتر در معرض کمبود بارش و خشکسالی شدید قرار گرفته است و بارندگی در این نواحی کمتر از حد نرمال است که می‌تواند بر تأمین منابع آبی و مدیریت اقتصادی و اجتماعی تأثیرات نامطلوب بگذارد. تغییرات اثرهای خشکسالی بر پوشش گیاهی و دمای سطح زمین متفاوت بوده است، اما در هر چهار شاخص بررسی‌شده در سال ۲۰۲۱ خشکسالی در محدوده پژوهش در حال افزایش بوده و مساحت مناطقی که در کلاس خشکسالی قرار دارند نیز افزایش داشته است که با نتایج پژوهش خسروی یگانه و همکاران (۱۴۰۲) در ایران همساز است [۸]. در حالت کلی فروردین مرطوب‌ترین و تیر خشک‌ترین ماه در بین ماه‌های فصل رشد است. بررسی تفاوت بین شاخص‌های VCI و TCI با توجه به وجود همبستگی قوی بین شاخص زمینی SPI و شاخص ماهواره‌ای VCI نشان می‌دهد که VCI در بررسی شروع، تداوم و گسترش زمانی و مکانی خشکسالی کشاورزی قابلیت لازم را دارد که با نتایج پژوهش جهانگیر و مشیدی (۱۳۹۹) و فخار و نظری (۱۴۰۳) در ایران مشابهت و همسویی دارد [۶، ۲۵]. محاسبه NDVI نیز نشان داد که فروردین‌ماه بیشترین و تیرماه هم کمترین تراکم پوشش گیاهی را دارند که این وضعیت تقریباً با مقدار SPI و VHI به دست آمده هم‌پوشانی دارد و با یافته‌های پژوهش دستورانی و همکاران (۱۳۹۴) و کیخسروی و همکاران (۱۳۹۴) هم‌راستا است [۱۱، ۲۷]. در حالت کلی نتایج نشان داد که شرایط پوشش گیاهی و سلامت پوشش گیاهی تمایل به همسویی نزدیک با هم دارند.

به‌طور خلاصه نتایج این پژوهش بینش‌های ارزشمندی را در تعامل بین محیط و پوشش گیاهی ارائه می‌دهد و ارزشمندی استفاده از تصاویر ماهواره‌ای با قدرت زمانی و مکانی مطلوب در مکان‌یابی و حتی زمان‌یابی را نشان می‌دهد و به محققان و سیاستگذاران کمک می‌کند تا درک کنند که تغییرات در یک شاخص ممکن است چگونه باشد و در نهایت به آنها کمک می‌کند که در مورد محیط زیست و کشاورزی با بررسی میانگین چندساله شاخص‌های پوشش گیاهی در طول دوره تحت بررسی تصمیم‌گیری کنند. چراکه شروع خشکسالی در بخش کشاورزی سبب کاهش محصول و از بین رفتن مراتع و کمبود آب‌های سطحی و زیرزمینی می‌شود. دولت باید از تغییرات جغرافیایی و زمانی در کشاورزی آگاه باشد تا برنامه‌هایی برای کاهش آثار خشکسالی ایجاد کند؛ بنابراین باید سامانه‌های زمان‌بندی و اخطاردهی خشکسالی گسترش داده شود تا بتوان به‌طور واضح و بهنگام، اقدامات لازم را صورت داد. برای تحقیقات آتی در این زمینه پیشنهاد می‌شود از تصاویر ماهواره‌ای دقیق‌تر و مدل‌های توسعه‌یافته‌تر پایش خشکسالی استفاده شود تا بتوان به تحلیل جامع‌تر و پایدارتری در پایش خشکسالی دست یافت.

تقدیر و تشکر

این مقاله با حمایت پژوهشی دانشگاه محقق اردبیلی از طرح پژوهشی با شماره قرارداد ۱۴۰۳/د/۹/۱۵۶۳۴ استخراج گردیده است. بدین وسیله از آنها تشکر می‌شود

منابع

- [۱] اسکندری دامنه، هادی؛ اسکندری دامنه، حامد؛ خسروی، حسن؛ و غلامی، حمید (۱۳۹۸). تحلیل و پایش خشکسالی با استفاده از شاخص پوشش گیاهی NDVI (مطالعه موردی: حوضه غرب تالاب جازموریان). مرتع، ۱۳ (۳)، ۴۶۱-۴۷۵.
http://rangelandsrm.ir/article-785-1-fa.html
- [۲] اصلان پنجه، بهزاد؛ ارزانی، حسین؛ طویلی، علی؛ کشت کار، حمیدرضا؛ و خلیقی سیگارودی، شهرام (۱۴۰۲). بررسی تأثیر تغییرات خشکسالی اقلیمی بر شاخص‌های پوشش گیاهی (مطالعه موردی: شهرستان اشتهارد، استان البرز)، مدیریت جامع حوضه‌های آبریز، ۳ (۴)، ۱۸-۳۲.
doi: 10.22034/IWM.2023.2010428.1103
- [۳] انصاری قوجقار، محمد؛ پورغلام آمیجی، مسعود؛ بذرافشان، جواد؛ لیاقت، عبدالمجید؛ و عراقی نژاد، شهاب (۱۳۹۹). مقایسه کارایی شبکه‌های عصبی آماری، فازی و پرسپترون در پیش‌بینی طوفان‌های گردوغبار در نواحی بحرانی کشور. تحقیقات آب و خاک ایران، ۸(۸)، ۲۰۵۱-۲۰۶۳.
doi: 10.22059/ijswr.2020.302529.668607
- [۴] آرخی، صالح؛ برزگر سواسری، مرضیه؛ و عمادالدین، سمیه (۱۴۰۱). بررسی کارایی شاخص‌های منتج از فناوری سنجش از دور VCI، TCI و VHI در ارزیابی خشکسالی با تصاویر مودیس (مطالعه موردی: مناطق مرکزی ایران). جغرافیا و مخاطرات محیطی، ۱۱(۳)، ۱۸۹-۲۲۴.
doi:10.22067/geoh.2021.72253.1102
- [۵] جهانگیر، محمدحسین؛ و محمدی، علی (۱۳۹۵). مقایسه شاخص استاندارد بارش و نظام رتبه‌بندی تاپسیس به منظور ارزیابی وضعیت مخاطره خشکسالی در استان خوزستان. مدیریت مخاطرات محیطی، ۳(۲)، ۱۲۵-۱۳۹.
doi: 10.22059/jhsci.2016.60343
- [۶] جهانگیر، محمدحسین؛ و مشیدی، ضحی (۱۳۹۹). ارزیابی پایش خشکسالی کشاورزی مبتنی بر سنجش از دور با استفاده از شاخص استاندارد شده بارش در ماه‌های رشد (مطالعه موردی: حوضه آبریز کارون بزرگ)، آبیاری و زهکشی ایران، ۴(۱۴)، ۱۲۵۲-۱۲۶۴.
- [۷] جهانگیر، محمدحسین؛ اصغری کلشانی، فاطمه؛ و ستاریان اصیل، کتایون (۱۴۰۱). مطالعه تطبیقی شاخص‌های خشکسالی هواشناسی (SPI) و هیدرولوژیک (SSI) براساس بهترین تابع توزیع تجمعی برای حوضه آبریز ارومیه. مدل‌سازی و مدیریت آب‌و خاک، ۲(۴)، ۵۳-۶۳.
doi: 10.22098/mmws.2022.10810.1089
- [۸] خسروی یگانه، صمد؛ کرم‌پور، مصطفی؛ و نصیری، بهروز (۱۴۰۳). ارزیابی تأثیر خشکسالی در پوشش گیاهی ایران با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های هواشناسی. سنجش از دور و GIS ایران، ۱۶(۱)، ۸۱-۱۰۲.
doi: 10.48308/gisj.2023.103394
- [۹] داروند، سروه؛ اسکندری دامنه، هادی؛ اسکندری دامنه، حامد؛ و خسروی، حسن (۱۴۰۰). پیش‌بینی روند تغییرات دما و بارش در دوره آبی و تأثیر آن بر بیابان‌زایی. مدل‌سازی و مدیریت آب‌و خاک، ۱(۱)، ۵۳-۶۶.
Doi: 10.22098/mmws.2021.118
- [۱۰] داودآبادی فراهانی، محمدحسین؛ شریفی علیرضا؛ و عربی، مهدی (۱۴۰۰). پایش خشکسالی کشاورزی استان مرکزی با استفاده از شاخص‌های VHI و PDSI، علوم و فنون نقشه‌برداری، ۱۱(۳)، ۸۳-۱۰۰.
DOI:10.1109/ACCESS.2018.2821717
- [۱۱] دستورانی، مصطفی؛ ولی، عباسعلی؛ سپهر، عادل؛ و کمکی چوقی، بایرام (۱۴۰۱). بررسی اثر خشکسالی بر روی پوشش گیاهی با استفاده از سنجنده MODIS در خراسان رضوی. مهندسی اکوسیستم بیابان، ۴(۷)، ۱-۸.
- [۱۲] دماوندی، علی‌اکبر؛ رحیمی، محمد؛ یزدانی، محمدرضا؛ و نوروزی، علی‌اکبر (۱۳۹۵). پایش مکانی خشکسالی کشاورزی از طریق سری‌های زمانی شاخص‌های NDVI و LST داده‌های MODIS (مطالعه موردی: استان مرکزی)، اطلاعات جغرافیایی «سپهر»، ۲۵(۹۹)، ۱۱۶-۱۲۵.
http://www.sepehr.org/article_23200_7c730a14d43b977341add322922c5035
- [۱۳] رزمخواه، هما؛ رستمی، اسحاق؛ رستمی راوری، امین؛ و فرارویی، علیرضا (۱۴۰۱). بررسی تغییرات زمانی و مکانی خشکسالی هواشناسی، مطالعه موردی: استان کهگیلویه و بویراحمد. مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، ۲(۴)، ۱۷-۳۵.
doi: 10.22034/iwm.2023.1972373.1049
- [۱۴] رشیدی قانع، محبوبه؛ متولی، صدرالدین؛ جانباز قبادی، غلامرضا؛ و کوهی، منصوره (۱۴۰۳). فراوانی و ویژگی‌های خشکسالی‌های فرین دشت مشهد تحت سناریوهای SSP. مدیریت مخاطرات محیطی، ۱۱(۲)، ۸۵-۱۰۲.
doi: http://doi.org/10.22059/jhsci.2024.380699.837
- [۱۵] سپه‌وند، علیرضا؛ قبادی مرتضی؛ کرم‌پور؛ مصطفی؛ و میردیکوند، بهرام (۱۴۰۱). ارزیابی تأثیر وقوع خشکسالی بر تغییرات پوشش گیاهی حوضه کشکان لرستان با استفاده از داده‌های چند زمانه ETM+ و OLI لندست. مرتع، ۱۶(۱)، ۱۲۴-۱۳۹.
http://rangelandsrm.ir/article-761-1-fa.html

- [۱۶] سلطانی، میلاد؛ سلطانی، عادل؛ کله‌هوئی، مهین؛ و سلیمانی، کریم (۱۳۹۸). پایش خشکسالی منطقه‌ای با استفاده از تصاویر لندست - منطقه مورد مطالعه: شهرستان کرمانشاه. *اطلاعات جغرافیایی «سپهر»*، ۲۸(۱۰۹)، ۱۳۷-۱۴۶. doi: 10.22131/sepehr.2019.35643
- [۱۷] سلیمانی ساردو، مجتبی؛ و زارعی، مهدی (۱۳۹۸). پایش خشکسالی با استفاده از داده‌های سنجنده MODIS و مقایسه با شاخص هواشناسی SPI در دوره‌های کوتاه‌مدت (مطالعه موردی: حوزه آبخیز جازموریان). *پژوهشنامه مدیریت حوزه آبخیز*، ۱۰(۲۰)، ۲۵۰-۲۶۱. <http://jwmr.sanru.ac.ir/article-982-1-fa.html>
- [۱۸] سیاسر، هادی؛ محمدرضاپور، ام‌البنی؛ و خدامرادپور، مهرانه (۱۴۰۳). پایش خشکسالی با استفاده از داده‌های سنجنده MODIS و مقایسه با شاخص هواشناسی SPI در دوره‌های کوتاه‌مدت مطالعه موردی: استان گلستان. *جغرافیا و توسعه*، ۲۲(۷۴)، ۱۶۶-۱۸۶. doi: 10.22111/gdij.2024.8175
- [۱۹] سیدی قلدره، جمال؛ احمدی، سلمان؛ و غلام‌نیا، مهدی (۱۴۰۱). ارزیابی شاخص‌های سنجش از دوری پایش خشکسالی با استفاده از رگرسیون بردار پشتیبان و مدل‌های جنگل تصادفی (مطالعه موردی: شهرستان مریوان). *مهندسی فناوری اطلاعات مکانی*، ۱۰(۳)، ۱۴۱-۱۴۱. <http://jgit.kntu.ac.ir/article-891-1-fa.html>
- [۲۰] شاهدی، کاکا؛ و روزبه کوشاهی، سجاد (۱۴۰۱). تحلیل خشکسالی کشاورزی استان مازندران با استفاده از شاخص‌های مناسب سنجش از دور و هواشناسی. *مهندسی آبیاری و آب ایران*، ۱۳(۱)، ۳۲۶-۳۴۶. doi: 10.22125/iwe.2022.158531
- [۲۱] شکران، فاطمه؛ سلیمانی، کریم؛ و درویشی، شادمان (۱۴۰۱). بررسی تغییرات خشکسالی کشاورزی با استفاده از شاخص‌های سنجش از دور و هواشناسی (مطالعه موردی: استان خراسان شمالی). *مهندسی اکوسیستم بیابان*، ۱۰(۳۳)، ۹۳-۱۰۶. doi: 10.22052/deej.2021.10.33.51
- [۲۲] صالحی، حمید؛ معتمدی، محمد؛ و مافی، عزت‌الله (۱۴۰۰). اعتبارسنجی روش‌های درون‌یابی دمای فصل تابستان در شمال شرق ایران. *تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، ۲۱(۶۱)، ۳۵۱-۳۶۹. <http://jgs.khu.ac.ir/article-3870-1-fa.html>
- [۲۳] عسگری دستنائی، آسیه؛ گندمکار، امیر؛ و خدافلای، مرتضی (۱۴۰۰). بررسی تأثیر خودواکاوای روند دمایی در مدیریت مخاطره خشکسالی (مطالعه موردی: استان چهارمحال و بختیاری). *مدیریت مخاطرات محیطی*، ۸(۳)، ۲۸۳-۲۹۹. doi: 10.22059/jhsci.2021.330273.675
- [۲۴] عیفی، محمدابراهیم (۱۴۰۰). بررسی اثر خشکسالی بر روی پوشش گیاهی با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور، مطالعه موردی: حوضه آبریز سد درودزن. *جغرافیا (فصلنامه علمی انجمن جغرافیایی ایران)*، ۱۹(۷۰)، ۱۵۳-۱۷۲.
- [۲۵] فخار، محدثه‌السادات؛ و نظری، بیژن (۱۴۰۳). پایش و ارزیابی ویژگی‌های مکانی و زمانی خشکسالی در ایران با استفاده از سنجش از دور، پژوهش‌های خشکسالی و تغییر اقلیم، ۲(۱)، ۳۹-۵۸. doi: 10.22077/JDCR.2024.7011.1050
- [۲۶] فیروزی، فاطمه؛ طاووسی، تقی؛ و محمودی، پیمان (۱۳۹۸). بررسی حساسیت دو شاخص پوشش گیاهی NDVI و EVI به خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها در مناطق خشک و نیمه‌خشک؛ مطالعه موردی: دشت سیستان ایران. *اطلاعات جغرافیایی «سپهر»*، ۲۸(۱۰)، ۱۶۳-۱۷۹. doi: 10.22131/sepehr.2019.36621
- [۲۷] کیخسروی، قاسم (۱۳۹۴). بررسی تطبیقی شاخص‌های خشکسالی هواشناسی و ماهواره‌ای در روند بیابان‌زایی طبقات پوشش گیاهی فصل بهار استان سمنان. *کاوش‌های جغرافیایی مناطق بیابانی*، ۳(۲)، ۱۸۹-۲۱۳.
- [۲۸] مجردی، برات؛ میرمیری، جواد؛ و علیزاده، حسین (۱۳۹۹). ارزیابی شاخص وضعیت پوشش گیاهی VCI با استفاده از شاخص بارش استاندارد اصلاح‌شده MSPI به‌منظور پایش و پهنه‌بندی خشکسالی. *مهندسی و مدیریت آبخیز*، ۱۲(۳)، ۷۲۵-۷۳۶. doi: 10.22092/ijwmse.2019.116643.1402
- [۲۹] مردانی، رامین؛ منتصری، حسین؛ فاضلی، مهدی؛ و خلیلی، رضا (۱۴۰۲). تغییرات زمانی و مکانی خشکسالی هواشناسی و ارتباط آن با شاخص‌های دمایی و وضعیت پوشش گیاهی با استفاده از سنجش از دور و تصاویر ماهواره‌ای در شهرستان مرودشت. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۳)، ۷۲-۸۹. doi: 10.22098/mmws.2022.11541.1140
- [۳۰] نگهبان، سعید؛ مکرم، مرضیه؛ و مرادی‌زاده کرمانی، ریحانه (۱۴۰۳). تحلیل اثرهای مخاطره خشکسالی بر جوامع روستاهای پیرامون دریاچه مهارلو. *مدیریت مخاطرات محیطی*، ۱۱(۱)، ۱-۱۳. doi: 10.22059/jhsci.2024.374378.823

- [32] Alzurqani, S. A., Zurqani, H. A., Don White Jr, D., Bridges, K., & Shawn Jackson, S. (2024). Google Earth Engine application for mapping and monitoring drought patterns and trends: A case study in Arkansas, USA. *Ecological Indicators*. 168, 112759. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112759>.
- [33] Araghinejad, S. (2013). Data-driven modeling: using MATLAB® in water resources and environmental engineering. *Springer Science & Business Media*. 67.
- [34] 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, 289–302. doi:10.1016/j.jag.2006.03.002.
- [35] Burka, A., Biazin, B., & Bewket, W. (2024). Spatial drought occurrences and distribution using VCI, TCI, VHI, and Google Earth Engine in Bilate River Watershed, Rift Valley of Ethiopia, Geomatics. *Natural Hazards and Risk*. 15(1). <https://doi.org/10.1080/19475705.2024.2377672>.
- [36] Du, L., Qingjiu, T., Tao, Y., Meng, Q., Jancso, T., Udvardy, P., & Huang, Y. (2013). A comprehensive drought monitoring method integrating MODIS and TRMM data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 23(1), 245–25. doi:10.1016/j.jag.2012.09.010.
- [37] Du, T.L.T., Du Bui, D., Nguyen, M.D., & Lee, H. (2018). Satellite-based ‘multi-indices for evaluation of agricultural droughts in a highly dynamic tropical catchment ‘Central Vietnam. *Water (Switzerland)*. 10(5), 1–24. doi:10.3390/w10050659.
- [38] Ejaz, N., Bahrawi, J., Alghamdi, K. M., Rahman, K. U., & Shang, S. (2023). Drought Monitoring Using Landsat Derived Indices and Google Earth Engine Platform: A Case Study from Al-Lith Watershed. *Kingdom of Saudi Arabia ‘Remote Sensing*. 15(4), 984. doi:10.3390/rs15040984.
- [39] Gidey, E., Dikinya, O., Sebego, R., Segosebe, E., & Zenebe, A. (2018). Analysis of the long-term agricultural drought onset ‘cessation ‘duration ‘frequency ‘severity and spatial extent using vegetation health index (VHI) in raya and its environs ‘Northern Ethiopia. *Environmental Systems Research*. 7(1), 1–18. doi:10.1186/s40068-018-0115-z.
- [40] Gouveia, C.M., Trigo, R.M., Beguería, S., & Vicente-Serrano, S.M. (2016). Drought impacts on vegetation activity in the Mediterranean region: an assessment using remote sensing data and multi-scale drought indicators. *Global and Planetary Change*. doi: 10.1016/j.gloplacha.2016.06.011.
- [41] Jahangir, k., Wang, P., Xie, Y., Wang, L., & Li, L. (2018). Mapping MODIS LST NDVI Imagery for Drought Monitoring in Punjab Pakistan. *IEEE*. 6, 19898-19991. doi:10.1109/ACCESS.2018.2821717
- [42] Javed, T., Li, Y., Feng, K., Ayantobo, O. O., Ahmad, S., Chen, X., Rashid, S., & Suon, S. (2021). Monitoring responses of vegetation phenology and productivity to extreme climatic conditions using remote sensing across different sub-regions of China. *Environmental Science and Pollution Research*. 28, 3644–3659. doi:10.1007/s11356-020-10769-1.
- [43] Ji, T., Li, G., Yang, H., Liu, R. & He, T. (2018). Comprehensive drought index as an indicator for use in drought monitoring integrating multi-source remote sensing data: a case study covering the Sichuan-Chongqing region. *International Journal of Remote Sensing*. 39(3), 786–809. doi: 10.1080/01431161.2017.1392635.
- [44] Jiao, W., Zhang, L., Chang, Q., Fu, D., Cen, Y., & Tong, Q. (2016). Evaluating an enhanced vegetation condition index (VCI) based on VIUPD for drought monitoring in the continental United States. *Remote Sensing*. 8(3), 224. doi:10.3390/rs8030224.
- [45] Li, K., Tong, Z., Liu, X., Zhang, J., & Tong, S. (2020). Quantitative assessment and driving force analysis of vegetation drought risk to climate change: Methodology and application in Northeast China. *Agricultural and Forest Meteorology*. 282, 107865. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107865>.
- [46] Liu, Q., Zhang, J., Zhang, H., Yao, F., Bai, Y., Zhang, S., Meng, X. & Liu, Q. (2021). Evaluating the performance of eight drought indices for capturing soil moisture dynamics in various vegetation regions over China. *Science of the Total Environment*. 789, 147803. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.147803.
- [47] McKee, T., & Doesken Kleist, N. (1993). The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. Preprints 8th Conference on Applied Climatology. 17-22 January. Anaheim, CA. 170-184.
- [48] Moisa, M. B., Merga, B. B., & Gameda, D.O. (2022). Multiple indices-based assessment of agricultural drought: A case study in Gilgel Gibe Sub-basin, Southern Ethiopia. *Theoretical and Applied Climatology*. 148(1), 455–464. doi:10.1007/s00704-022-03962-4.
- [49] Nejadrekabi, M., Eslamian, S., & Zareian, M. J. (2022). Spatial statistics techniques for SPEI and NDVI drought indices: A case study of Khuzestan Province. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 19(7), 6573–6594. doi:10.1007/s13762-021-03852-8.
- [50] Palchadhuri, M., & Biswas, S. (2020). Application of LISS III and MODIS-derived vegetation indices for assessment of micro-level agricultural drought. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*. 23(2), 221–229. doi:10.1016/j.ejrs.2019.12.004.

- [51] Peng, J., Loew, A., Merlin, O., & Verhoest, N.E. (2017). A review of spatial downscaling of satellite remotely sensed soil moisture. *Reviews of Geophysics*. 55(2), 341-366. <http://dx.doi.org/10.1002/2016RG000543>.
- [52] Pradhan, P., & Patra, S. (2024). Chapter 11 - Agricultural drought monitoring using Google Earth Engine: a study of Paschim Medinipur district, West Bengal. *Modern Cartography Series*. 12, 261-297. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-23890-1.00011-6>.
- [53] 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. <https://doi.org/10.1080/0143116031000084323>.
- [54] Sun, B., Qian, J., Chen, X., & Zhou, Q. (2020). Comparison and Evaluation of Remote Sensing Indices for Agricultural Drought Monitoring over Kazakhstan. *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. 3, 899–903. doi:10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2020-899-2020.
- [55] Tabassum, B., & Ahmed Khan, I. (2024). Comparative Analysis of Drought Indices on Google Earth Engine. *Gu Journal of phytosciences*, 4(1), 318-330, <https://doi.org/10.5281/zenodo.10755127>.
- [56] Thilagaraj, P., Masilamani, P., Venkatesh, R., & Killivalavan, J. (2021). Google Earth Engine based agricultural drought monitoring in Kodavanar Watershed, part of amaravathi basin, tamil nadu, india. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. XLIII-B5-2021 XXIV ISPRS Congress. 43-49.
- [57] Wang, K., Li, T., & Wei, J. (2019). Exploring drought conditions in the Three River Headwaters Region from 2002 to 2011 using multiple drought indices. *Water*. 11(2), 190-210. doi:10.3390/w11020190.
- [58] Wassie, S. B., Mengistu, D. A., & Birlie, A. B. (2022). Agricultural drought assessment and monitoring using MODIS-based multiple indices: the case of North Wollo. *Ethiopia, Environmental Monitoring and Assessment*. 194(11), 787. doi:10.1007/s10661-022-10455-4.
- [59] Zhang, L., Jiao, W., Zhang, H., Huang, Ch., & Tong, Q. (2017). Studying drought phenomena in the Continental United States in 2011 and 2012 using various drought indices. *Remote Sensing of Environment*. 190, 96-106. doi: 10.1016/j.rse.2016.12.010.
- [60] Zhou, X., Wang, P., Tansey, K., Zhang, S., Li, H., & Wang, L. (2020). Developing a fused vegetation temperature condition index for drought monitoring at field scales using Sentinel-2 and MODIS imagery. *Computers and electronics in agriculture*. 168, 105144. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2019.105144>.