

## **Investigating the Effectiveness of Univariate and Integrated Multivariate Indices in Monitoring Agricultural Drought (Case Study: Karkheh Basin)**

M. Karimi<sup>1\*</sup>, N. Dehghani<sup>2</sup>, N. Jalilian<sup>3</sup>, K. Shahedi<sup>4</sup>

1. Researcher, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Kermanshah Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, (AREEO), Kermanshah, Iran.
2. Assistant Prof., Watershed Management Department, Soil Conservation and Watershed Research Institute, Tehran, Iran.
3. Associate Prof., Forests and Rangelands Research Division, Kermanshah Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, (AREEO), Kermanshah, Iran.
4. Prof., Watershed Management Department, Sari Agricultural Science and Natural Resources University, Iran.

\* Corresponding Author: mahshid.karimi@areeo.ac.ir

Received date: 20/07/2024

Accepted date: 14/09/2024

 [10.22034/JDMAL.2024.2036111.1473](https://doi.org/10.22034/JDMAL.2024.2036111.1473)

### **Abstract**

Drought is one of the major climate hazards that has significantly impacted the environmental and socio-economic conditions of Iran in recent years. As such, investigating and monitoring drought is essential for understanding its occurrence and reducing vulnerability. This study evaluates the efficiency of integrated multivariate indices compared to univariate indices for monitoring agricultural drought based on satellite imagery in the Karkheh basin. Multivariate remote sensing indices, including the Vegetation Health Index (VHI) and the Normalized Vegetation Soil Water Index (NVSWI), alongside the univariate Normalized Land Surface Water Index (NLSWI), were calculated to monitor drought conditions across the entire Karkheh watershed during May from 2001 to 2022. The results revealed frequent drought occurrences with varying intensities (low to severe) during the statistical periods of 2001–2004, 2006–2010, 2012, and 2013–2015. The performance of multivariate and univariate indices was validated against the Standardized Precipitation Index (SPI) at one-, three-, and six-month scales, as well as the Streamflow Drought Index (SDI). The highest correlation was observed between the NVSWI and SPI-1 ( $r = 0.71$ ) and SDI ( $r = 0.64$ ). Similarly, the VHI demonstrated a relatively strong correlation with SPI-1 ( $r = 0.66$ ) and SDI ( $r = 0.56$ ). In contrast, the univariate NLSWI showed the weakest correlations with SPI-1 ( $r = 0.42$ ), SPI-3 ( $r = 0.21$ ), and SDI ( $r = 0.40$ ). The findings indicate that integrated multivariate indices, such as NVSWI and VHI, outperform the univariate NLSWI index in agricultural drought monitoring. This superiority is attributed to the inclusion of multiple factors, such as vegetation health and land surface temperature, in multivariate indices. As a result, NVSWI and VHI provide more comprehensive and accurate monitoring of drought conditions compared to univariate indices.

**Keywords:** Agricultural drought, Remote sensing, Univariate indices; Multivariate indices

### **How to cite this article**

Karimi, M., Dehghani, N., Jalilian, N. and Shahedi, K. (2024). Investigating the Effectiveness of Univariate and Integrated Multivariate Indices in Monitoring Agricultural Drought (Case Study: Karkheh Basin). *Desert Management*, 12(3), 99-122. DOI: [10.22034/JDMAL.2024.2036111.1473](https://doi.org/10.22034/JDMAL.2024.2036111.1473)



## Extended Abstract

### Introduction

Drought is an environmental hazard that occurs in nearly all regions, particularly in arid and semi-arid climates, and it can be effective at both regional and global levels (15). Given the negative and catastrophic effects of this phenomenon on human life and all living beings, it is crucial to offer constructive solutions to handle, control, and manage the drought crisis (39,36, 46). Various multi-spectral indices based on satellite images have been created by many researchers for drought monitoring purposes due to this reason (31, 32, 51). The results of past research showed that univariate indices are highly useful for specific locations and purposes. However, they are incapable of providing a comprehensive evaluation of drought characteristics as a climate phenomenon that is multivariable. Therefore, combining these indices can provide a superior outcome and cover all aspects of drought (4) Hence Multivariable integrated indices like the Vegetation Health Index (VHI) (27), Vegetation Supply Water Index (VSWI) (5), Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI) (44), Aggregate Drought Index (ADI) (24), Multivariate Drought Index (MDI) (40), Multivariate Integrated Drought Index (MIDI) (6), Comprehensive Meteorological Drought Index (CI) (45), Microwave Integrated Drought Index (MIDI) (47), Composite Vegetation Drought Indices (CVDI) and Meteorological Drought (CMDI) (49), Modified Composite Drought Index (MCDI) (7), Factual Drought Index (FDI) (13), Composite Drought Index (CDI) (22), Standard Integrated Drought Index (SIDI) (8) and so on, were presented by researchers. A comprehensive index can be obtained for drought analysis and more acceptable results can be obtained by adding more parameters that affect drought occurrence. Satellite indices can be used to monitor drought, but their results are dependent on the environmental and climatic conditions in the region, according to research findings. To monitor this phenomenon, it is necessary to evaluate the relationship between each satellite index and the occurrence of drought in the studied region, and the appropriate index must be selected in each region according to its vegetation and climatic conditions (2, 25). Most drought studies in Iran have not paid much attention to how plants respond to drought, which is linked to crop water stress, and so far, there have been fewer studies that have examined and compared drought trends with multivariate indices. Therefore, the purpose of this study is to monitor drought using satellite indices and evaluate the efficiency of multivariate indices for investigating droughts that have occurred during the 2001–2022-period in the Karkheh basin. Three drought indices, including the Vegetation Health Index (VHI), the Normalized Land Surface Water Index (NLSWI), and the Normalized Vegetation Supply Water Index (NVSWI), were chosen for this study.

### Material and Methods

The Karkheh basin is located in the middle and southwestern parts of the Zagros Mountains in the west of Iran. The basin covers a total area of 50,768 km<sup>2</sup>, with 55% of it located in mountainous areas, and the rest in plains and foothills. The average annual temperature in the basin is between less than 5 °C in the higher parts of the basin and 25 °C in the southern regions (fig. 1). According to satellite images and research, the growth period of green vegetation in the studied region is from March to July, and depending on the climatic conditions in some parts of the basin, it will last until the end of August (11, 3, 12). The peak of vegetation occurs at the end of May (23). To monitor condition of vegetation and thermal stresses, MOD13A3 and MOD11A1 products were received for calculating the VCI, TCI, VHI, NLSWI, and NVSWI remote sensing indices from the USGS for May during the 2001–2022 period (Tables 2, 3 and 4). The performance of remote sensing indices was investigated using ground observation data from 11 rain gauge and hydrometric stations (Table 1) and SPI and SDI drought indices in this research. The accuracy and precision of remote sensing indices were evaluated by examining their correlation with SPI and SDI indices. The calculation of SPI and SDI indices was done after sorting the data and reconstructing the missing data. Pearson's correlation coefficient was employed to examine the correlation relationship between remote sensing indices with SPI1, SPI3, and SPI6 and SDI in May of 2001–2022 (fig. 2).

### Results and Discussion

According to the VHI, NLSWI, and NVSWI indices, the most severe droughts took place between 2001 and 2004, 2006 to 2010, and 2012 to 2015. According to the results of the VHI and NVSWI indices, the drought was more severe and widespread in 2008 and covered almost the entire basin (fig. 3 and fig. 4, and Tables 5 and 6). The NLSWI index data revealed that the most severe drought took place in 2012 (fig. 5 and Table 7). Comparing of the average indices of VHI, NVSWI and NLSWI with SPI and SDI showed that there is a significant relationship between precipitation patterns, surface flows and dry and wet conditions. The SPI and

SDI indices have a good agreement on the results of all three indices (fig. 6 and Table 8). Thus, it can be concluded that remote sensing indices are powerful enough to monitor droughts. This research's validation results revealed that NVSWI and VHI multivariate indices are more effective than NLSWI univariate index. NVSWI and VHI multivariate indices can be a useful tool for investigating drought conditions because they take into account factors such as land surface temperature and vegetation condition simultaneously.

### Conclusion

Considering the special weather conditions in Iran, particularly the climatic conditions of arid and semi-arid regions, the use of the same indicators to monitor drought in different regions cannot lead to the same results. Therefore, the relationship between each remote sensing index and drought in each region should be studied separately depending on the specific climatic conditions and vegetation of that region, and selecting the appropriate index is necessary for drought monitoring.

**Keywords:** Agricultural drought; Remote sensing; Univariate indices; Multivariate indices

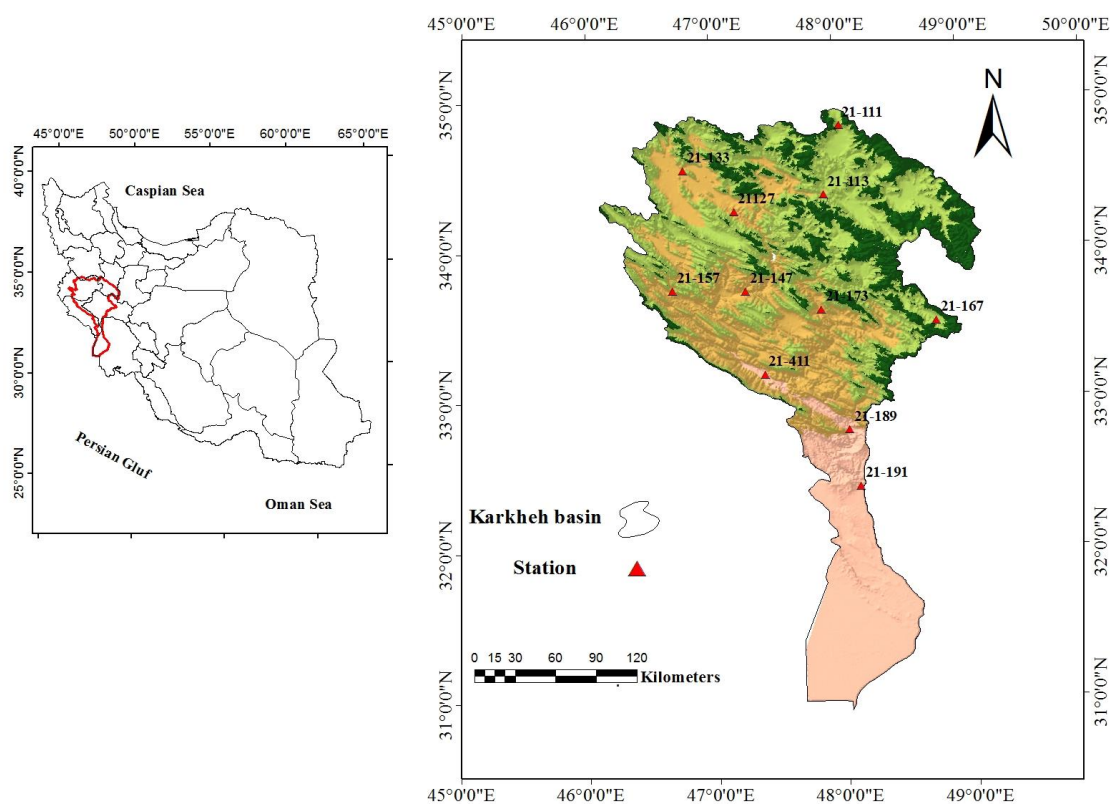


Fig 1. The location of the study area and the rain gauge and hydrometry stations in the Karkheh river basin

Table 1. The characteristics of the rain gauge and hydrometry stations located in the Karkheh River Basin (18)

No.	Code	Station	Latitude	Longitude	Station Type
1	21-111	Aghajanblaghi	34° 50'	48° 04'	Rain gauge
2	21-113	Aran	34° 24'	47° 33'	Rain gauge and hydrometry
3	21-127	Pole Chehr	34° 21'	47° 26'	Rain gauge and hydrometry
4	21-133	Doab Merek	34° 33'	46° 47'	Rain gauge and hydrometry
5	21-147	Halilan- Seimareh	33° 44'	46° 39'	Rain gauge and hydrometry
6	21-157	Dartoot	33° 44'	46° 39'	Rain gauge and hydrometry
7	21-167	Dehno	33° 31'	48° 47'	Rain gauge and hydrometry
8	21-173	Doab Veisian	32° 48'	48° 47'	Rain gauge
9	21-189	Pole Zal	32° 48'	48° 05'	Rain gauge and hydrometry
10	21-191	Pay Pol	32° 25'	48° 09'	Rain gauge and hydrometry
11	21-411	Nazar Abad	33° 10'	47° 25'	Rain gauge and hydrometry

**Table 2. Table 2. MODIS satellite products used in this study**

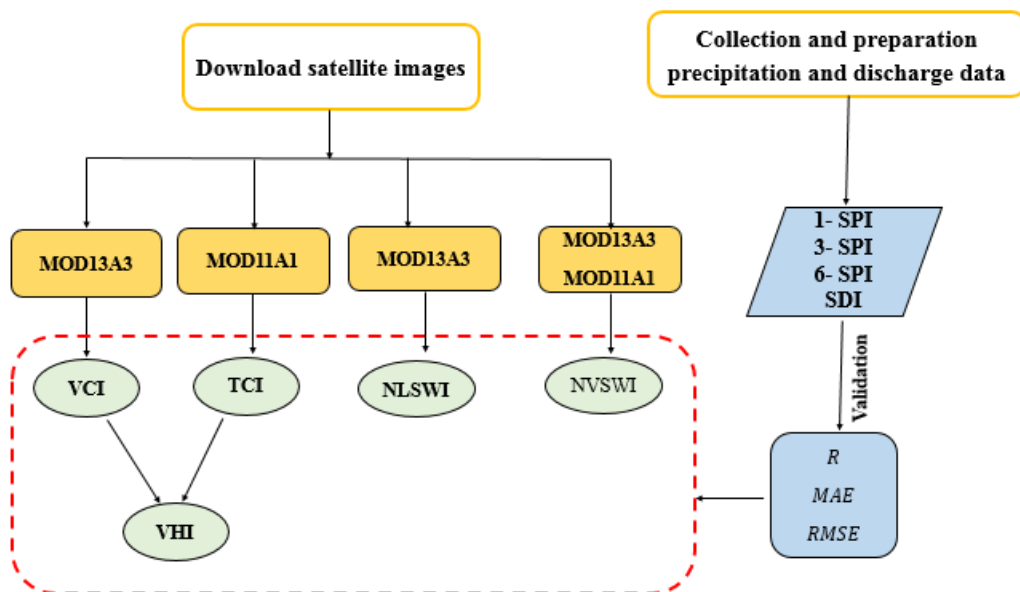
Satellite	Sensor	Product	Spatial Resolution	Index
Terra	MODIS	MOD 13A <sub>3</sub>	1 km	VCI & NLSWI
Terra	MODIS	MOD 11A <sub>1</sub>	1 km	TCI
Terra	MODIS	MOD 13A <sub>3</sub> MOD 11A <sub>1</sub>	1 km	VHI & NVSWI

**Table 3. Computational relationships of each remote sensing indices**

No.	Index	Equation	Reference
1	VCI	$VCI = \frac{NDVI_{ijk} - NDVI_{i,min}}{NDVI_{i,max} - NDVI_{i,min}}$	(26)
2	NLSWI	$NLSWI = \frac{LSWI_{ijk} - LSWI_{i,min}}{LSWI_{i,max} - LSWI_{i,min}}$ $LSWI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$	(17)
3	TCI	$TCI = \frac{LST_{i,max} - LST_{ijk}}{LST_{i,max} - LST_{i,min}}$	(26)
4	VHI	$VHI = \alpha * VCI + (1 - \alpha) * TCI$ $0 \leq \alpha \leq 1$ $\alpha = 0.5$	(53)
5	NVSWI	$NVSWI = \frac{VSWI_{ijk} - VSWI_{i,min}}{VSWI_{i,max} - VSWI_{i,min}}$ $VSWI = \frac{NDVI}{LST}$	(17)

**Table 4. Classification of drought conditions based on the SPI, SDI, and remote sensing indices**

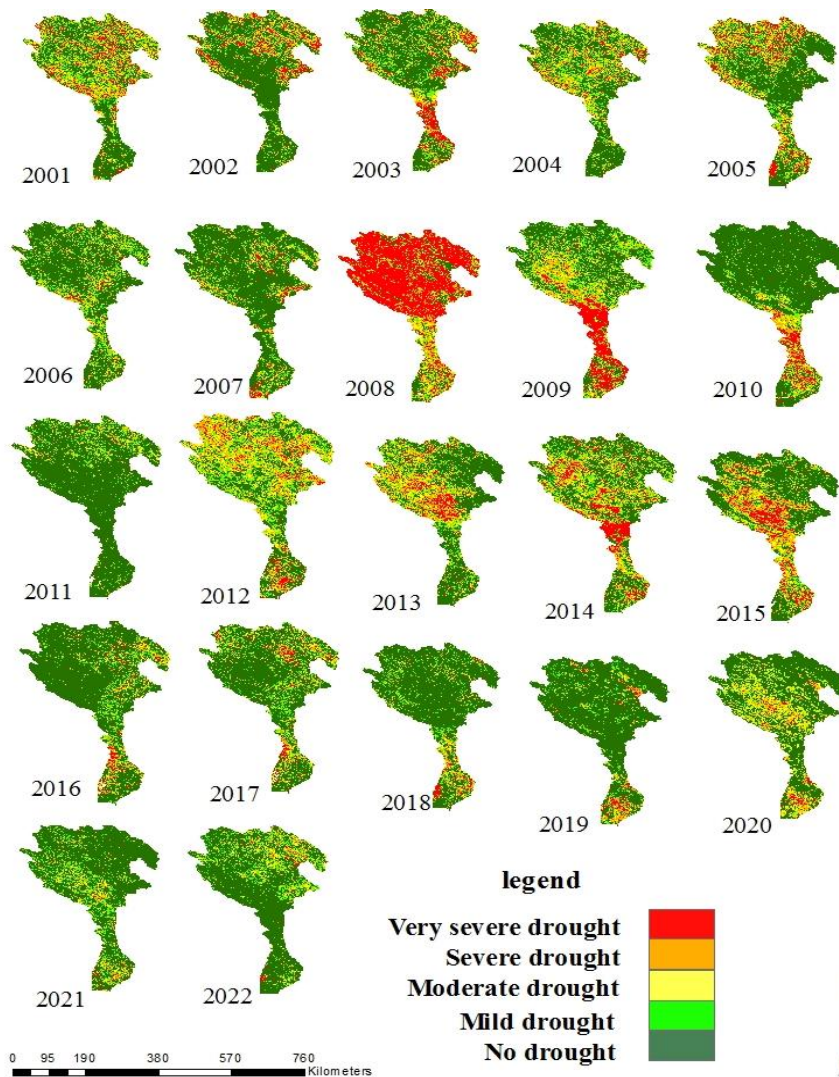
VHI, NVSWI & NLSWI	SDI & SPI	Drought situation
VHI, NVSWI & NLSWI ≥ 80	SPI & SDI ≥ 0	No drought
60 < VHI, NVSWI & NLSWI < 80	-1 < SPI & SDI < 0	Mild
40 < VHI, NVSWI & NLSWI < 60	-1.5 < SPI & SDI < -1	Medium
20 < VHI, NVSWI & NLSWI < 40	-2 < SPI & SDI < -1.5	Severe
VHI, NVSWI & NLSWI < 20	SPI & SDI < -2	Very intense



**Fig 2. The research steps flowchart**

**Table 5. Percentage of area of drought classes based on the VHI index for May in the Karkheh river basin**

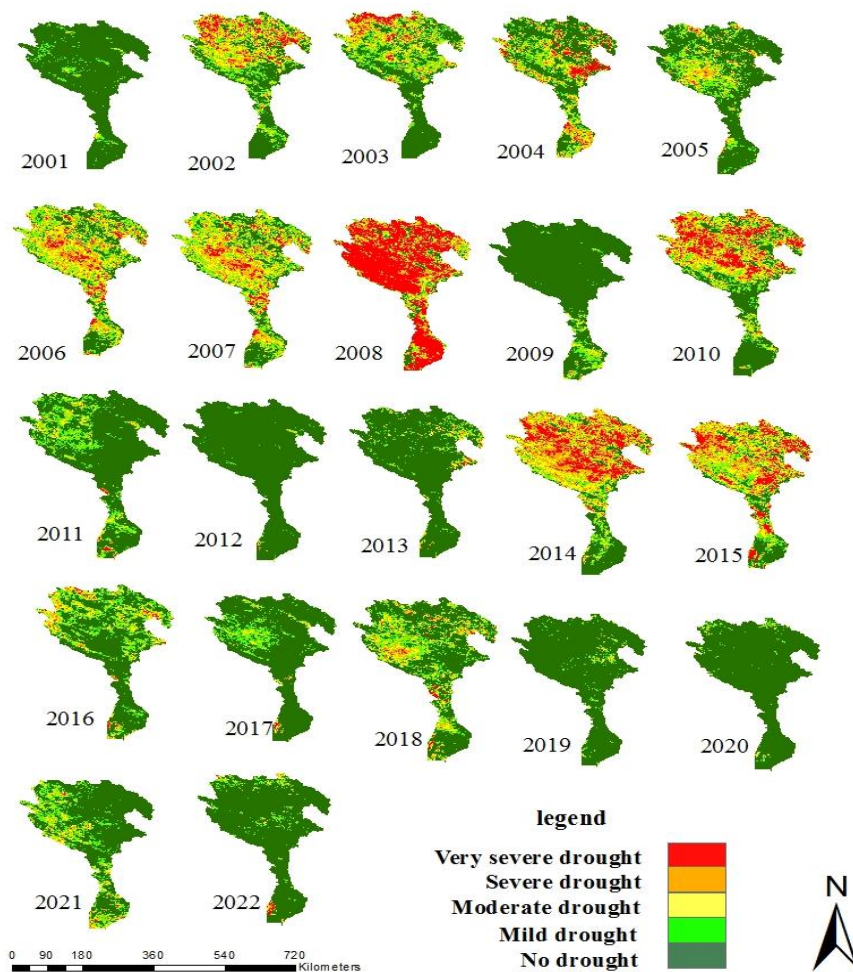
Year	No drought	Mild	Medium	Severe	Very intense
2001	45.3	16.6	16	11.7	10.4
2002	64.1	10.2	9.1	7	9.6
2003	56.2	13	11.1	8.4	11.3
2004	51.5	17.4	15	9.8	6.3
2005	52.6	14.1	12.6	9.9	10.8
2006	67	15.1	10.2	5	2.7
2007	74	9.9	7.2	4.6	4.3
2008	9.3	5.8	9.7	33.1	42.1
2009	43.7	16.5	14	9.6	16.2
2010	76.8	6.5	6	5.5	5.2
2011	82.7	8.8	5.1	2.2	2.2
2012	43.4	15.7	14.9	12.1	13.9
2013	48.6	14.9	15.1	11.7	9.7
2014	33	20	22.6	15.7	8.7
2015	49.6	11.3	13.1	13	13
2016	75.8	9.5	6.9	4.3	3.5
2017	67	12.7	9.2	5.7	5.3
2018	77.1	9.9	6.1	3.6	3.3
2019	77.4	9.1	5.2	4.1	4.2
2020	62.8	11.2	9.6	10.8	5.6
2021	73.8	10.5	8.6	3.9	3.2
2022	73.6	11.4	8.2	3.1	3.7



**Fig 3. Drought situation in May based on VHI index in the Karkheh river basin**

**Table 6. Percentage of area of drought classes based on the NVSWI index for May in the Karkheh river basin**

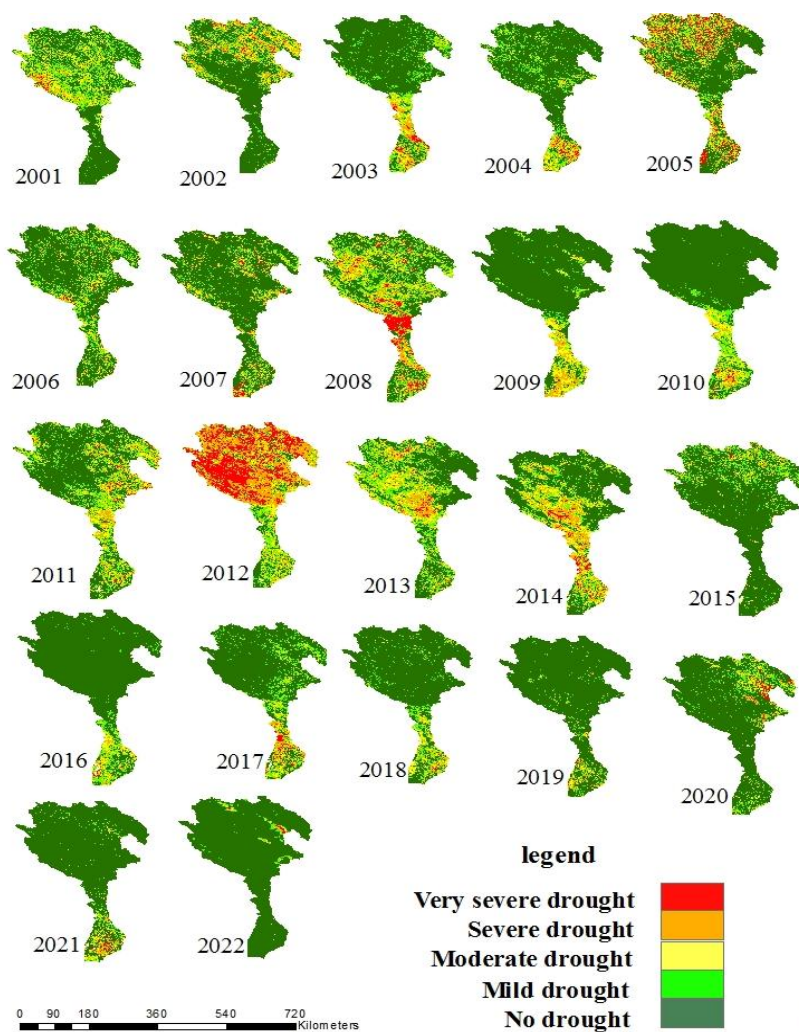
Year	No drought	Mild	Medium	Severe	Very intense
2001	94.1	4.8	1	0.1	0
2002	37.6	20	19.3	13.1	10
2003	53.7	19.5	16.1	4	6.7
2004	47.7	18.3	14.7	10	9.3
2005	66.4	15.8	11.7	4.9	1.2
2006	25.2	22.4	25.8	18.5	8.1
2007	24.6	23	27.8	17.6	7
2008	5.6	5.9	9.9	14.5	64.1
2009	92.6	4.4	2.4	0.5	0.1
2010	31.3	15.1	18.2	16.8	18.6
2011	77.7	14.9	5.6	1.2	0.6
2012	98.7	0.8	0.3	0.1	0.1
2013	88.7	6	3.3	1.3	0.7
2014	19.5	12.4	21.3	24.9	21.9
2015	19	17.5	23.1	21.3	19.1
2016	61.8	20.1	11.7	4.8	1.6
2017	84.5	11.3	3.1	0.8	0.3
2018	59.2	19.8	12.8	5.7	2.5
2019	95.5	2.3	1.1	0.5	0.6
2020	95.9	2.1	0.9	0.6	0.5
2021	76.5	14.8	3.9	2.2	2.6
2022	91.8	3.5	1	2.4	1.3



**Fig 4. Drought condition in May based on NVSWI index in the Karkheh river basin**

**Table 7. Percentage of area of drought classes based on NLSWI index for May in the Karkheh river basin**

Year	No drought	Mild	Medium	Severe	Very intense
2001	55.6	23.2	15.8	4.7	0.7
2002	63.3	13.7	11.4	9.3	2.3
2003	74.2	12	7.1	5.1	1.6
2004	74.1	14.3	6.6	3.6	1.4
2005	71	15.5	9	3.4	1.1
2006	77	10.1	6.8	3.9	2.2
2007	80.4	11.5	5.7	1.9	0.5
2008	52.6	14.5	12.8	10.1	10
2009	58.2	17.8	14.7	7.6	1.7
2010	82.5	8	6.5	2.4	0.6
2011	81.5	5.9	7.6	5.2	0.1
2012	11	11	14.5	32.3	31.2
2013	46.3	21.9	19.6	10	2.2
2014	41.6	20.2	17.8	12.7	7.7
2015	88.7	5.6	3.9	1.6	0.2
2016	70.5	10.4	7.9	8.4	2.8
2017	64.9	13.4	8.3	9.8	3.6
2018	83.6	8.6	5.4	2.1	0.3
2019	88	6.4	3.5	1.9	0.2
2020	85.6	6.3	2.8	2.2	3.1
2021	87.7	4.2	2.9	2.4	2.8
2022	91.8	3.2	1.1	1.8	2.1



**Fig 5. Drought situation in May based on the NLSWI index in the Karkheh river basin**

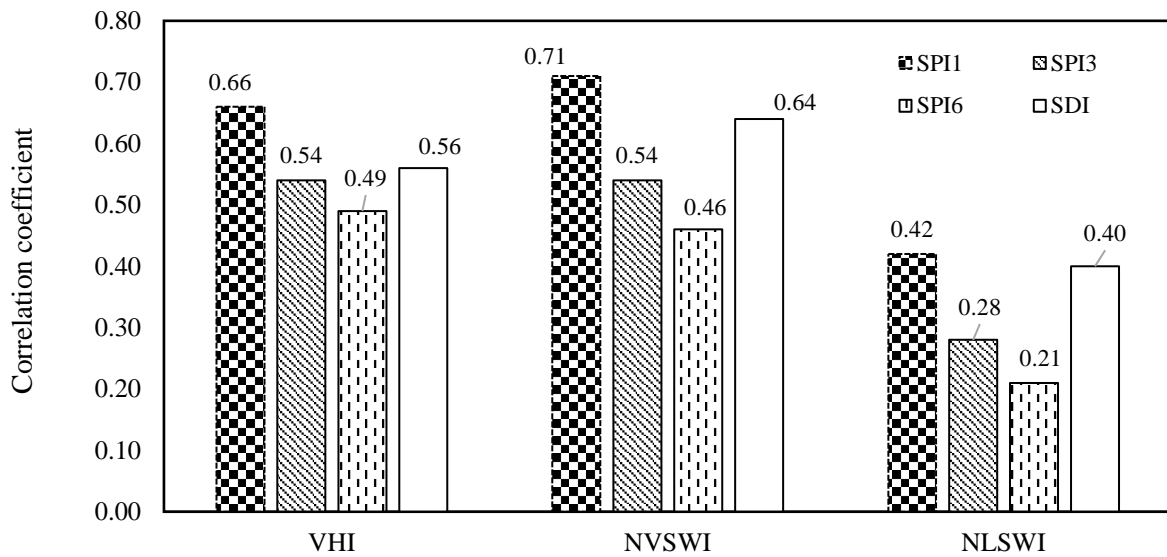


Fig 6. The correlation coefficient between remote sensing and ground-based measurements in the Karkheh river basin

Table 8. RMSE and MAE values for measuring the relationship between remote sensing indices and SPI/SDI

Remote sensing indices	SPI-1		SPI-3		SPI-6		SDI	
	RMSE	MAE	RMSE	MAE	RMSE	MAE	RMSE	MAE
VHI	0.18	0.16	0.24	0.2	0.29	0.27	0.32	0.29
NVSWI	0.15	0.13	0.21	0.17	0.22	0.19	0.21	0.20
NLSWI	0.31	0.29	0.37	0.34	0.42	0.40	0.39	0.41



## بررسی عملکرد شاخص‌های تک متغیره و یکپارچه چند متغیره در پایش خشکسالی کشاورزی (بررسی موردی: حوزه آبخیز کرخه)

مهشید کریمی<sup>۱\*</sup>، نوید دهقانی<sup>۲</sup>، نسترن جلیلیان<sup>۳</sup>، کاکا شاهدی<sup>۴</sup>

۱. پژوهشگر بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمانشاه، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرمانشاه، ایران.
  ۲. استادیار گروه مدیریت حوزه‌های آبخیز، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، تهران، ایران.
  ۳. دانشیار پژوهش، بخش تحقیقات جنگل‌ها و مراتع، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمانشاه، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرمانشاه، ایران.
  ۴. استاد گروه آبخیزداری، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران.
- \* نویسنده مسئول: [mahshid.karimi@areeo.ac.ir](mailto:mahshid.karimi@areeo.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۳۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۲۴

 10.22034/JDMAL.2024.2036111.1473

### چکیده

خشکسالی یکی از مخاطرات اقلیمی است که در سال‌های اخیر، به‌طور قابل توجهی بر شرایط محیطی و اجتماعی - اقتصادی ایران تأثیر گذاشته است. از این‌رو بررسی و پایش آن، به‌منظور اطلاع از وقوع خشکسالی و کاهش آسیب‌پذیری، بسیار ضروری و مهم است. در پژوهش حاضر کارایی شاخص‌های یکپارچه چندمتغیره نسبت به شاخص‌های تک متغیره در پایش خشکسالی کشاورزی بر اساس تصاویر ماهواره‌ای در حوزه آبخیز کرخه مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور در آغاز شاخص‌های سنجش از دوری چند متغیره NVSWI و VHI و شاخص تک متغیره NLSWI محاسبه شد و وضعیت خشکسالی در کل حوزه آبخیز کرخه توسط این سه شاخص برای دوره زمانی ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۱ در اردیبهشت ماه پایش شد. به‌طور کلی نتایج نشان داد طی دوره آماری ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۳، ۱۳۸۵ تا ۱۳۸۹، ۱۳۹۱ و ۱۳۹۲ تا ۱۳۹۴ در منطقه مورد بررسی خشکسالی‌های مکرر با شدت کم تا شدید رخ داده است. سپس عملکرد شاخص‌های چند متغیره و تک متغیره با استفاده از شاخص SPI در مقیاس‌های یک، سه و شش ماهه و شاخص SDI مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. طبق نتایج صحت‌سنجی پژوهش حاضر، بیشترین ضریب همبستگی بین شاخص NVSWI با SPI-1 و SDI به ترتیب برابر با ۰/۷۱ و ۰/۶۴ مشاهده شد و همچنین شاخص VHI نیز بعد از شاخص NVSWI، همبستگی نسبتاً خوبی با SPI-1 (۰/۶۶) و SDI (۰/۵۶) دارد و شاخص تک متغیره NLSWI کمترین همبستگی را با SPI-1 (۰/۴۲)، SPI-2 (۰/۲۸)، SPI-3 (۰/۲۱) و SDI (۰/۴۰) دارد. بنابراین طبق نتایج شاخص‌های یکپارچه چندمتغیره NVSWI و VHI نسبت به شاخص تک‌متغیره NLSWI نتایج بهتری را ارائه می‌دهد. زیرا شاخص‌های چندمتغیره NVSWI و VHI، عواملی مثل وضعیت پوشش گیاهی و دمای سطح زمین را همزمان در پایش خشکسالی منظور می‌نماید، بنابراین شاخص‌های چند متغیره نسبت به شاخص‌های تک متغیره وضعیت خشکسالی را بخوبی پایش می‌کند.

**واژگان کلیدی:** خشکسالی کشاورزی؛ سنجش از دور؛ شاخص‌های تک متغیره؛ شاخص‌های چند متغیره

استناد به این مقاله

کریمی، مهشید، دهقانی، نوید، جلیلیان، نسترن و شاهدی، کاکا. (۱۴۰۳). بررسی عملکرد شاخص‌های تک متغیره و یکپارچه چند متغیره در پایش خشکسالی کشاورزی (بررسی موردی: حوزه آبخیز کرخه). مدیریت بیابان، ۱۲(۳)، ۹۹-۱۲۲.

DOI: [10.22034/JDMAL.2024.2036111.1473](https://doi.org/10.22034/JDMAL.2024.2036111.1473)



## ■ مقدمه

خشکسالی مخاطره اقلیمی است که تقریباً در تمام مناطق به خصوص در اقلیم‌های خشک و نیمه خشک رخ می‌دهد و در مقیاس‌های منطقه‌ای و جهانی تأثیرگذار است (۱۵). در سه دهه اخیر بیشتر قاره‌ها با مشکل خشکسالی روبه رو شده‌اند و این موضوع با افزایش تقاضای آب در برابر محدودیت جدی منابع آب اهمیت پیدا می‌کند (۳۵). بنابراین با توجه به آثار منفی و فاجعه‌باری که این پدیده بر زندگی انسان و تمام موجودات زنده دارد از این‌رو ارائه راهکارهای سازنده برای مدیریت ریسک و مدیریت بحران این پدیده لازم و ضروری است (۳۹، ۳۶، ۴۶). جهت پیش خشکسالی، شاخص‌های بسیار زیادی توسط محققان ارائه شده است که هر یک نقاط قوت و ضعف‌های مختص به خود را دارند (۵۱، ۳۲، ۳۱). بیشتر شاخص‌هایی که در این زمینه به کار گرفته شده‌اند، بر پایه داده‌های هواشناسی بوده و متغیرهایی مانند رطوبت خاک، دما و بارش را بررسی می‌کنند. بنابراین به دلیل استفاده از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی نه تنها پرهزینه و زمان‌بر است، در سطوح وسیع نیز غیرممکن است. این در حالی است که خشکسالی پدیده‌ای منطقه‌ای بوده و برای پیش آن نیاز به آمار و اطلاعات وسیع و منطقه‌ای است (۱۶). از این‌رو از چهار دهه اخیر، برای پیش خشکسالی فناوری سنجش از دور به‌عنوان ابزاری کاربردی به‌صورت گسترده مورد استفاده قرار گرفته است. زمانی که به دلیل کمبود رطوبت خاک محتوای آب گیاهی کاهش می‌یابد این امر موجب پژمردگی پوشش گیاهی و در نتیجه کاهش سبزی پوشش گیاهی می‌شود. در این میان، روزه‌های گیاهی تا حدی برای حفظ آب بسته می‌شود. این پدیده‌ها در تصاویر سری زمانی سنجش از دوری منعکس می‌شوند (۱۷). به همین دلیل بسیاری از محققان برای پیش خشکسالی، شاخص‌های چند طیفی مختلفی را بر مبنای تصاویر ماهواره‌ای ایجاد نمودند (۱۱، ۲۰، ۲۳، ۹، ۳۳، ۱، ۴۸، ۲۶، ۲۸، ۱۹، ۵۰،

<sup>8</sup> Microwave Integrated Drought Index (MIDI)

<sup>9</sup> Composite Vegetation Drought Index (CVDI)

<sup>10</sup> Composite Meteorological Drought Index (CMDI)

<sup>11</sup> Modified Composite Drought Index (MCDI)

<sup>12</sup> Factual Drought Index (FDI)

<sup>13</sup> Composite Drought Index (CDI)

<sup>14</sup> Standard Integrated Drought Index (SIDI)

<sup>1</sup> Vegetation Supply Water Index (VSWI)

<sup>2</sup> Vegetation Health Index (VHI)

<sup>3</sup> Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI)

<sup>4</sup> Aggregate Drought Index (ADI)

<sup>5</sup> Multivariate Drought Index (MDI)

<sup>6</sup> Multivariate Integrated Drought Index (MIDI)

<sup>7</sup> Comprehensive Meteorological Drought Index (CI)

۳۰، ۲۹، ۱۰، ۳۷). نتایج پژوهش‌ها نشان داد شاخص‌های تک‌متغیره برای مکان‌های مشخص و اهداف خاص مفیدند، اما نمی‌توانند ارزیابی کلی از شرایط و خصوصیات خشکسالی ارائه کنند و به همین دلیل ممکن است نتایج حاصل از آن‌ها به اندازه کافی مورد اعتماد نباشد (۴). از این‌رو، محققان شاخص‌های یکپارچه چندمتغیره مانند شاخص ذخیره آب پوشش گیاهی<sup>۱</sup> (۵)، شاخص سلامت گیاهی<sup>۲</sup> (۲۷)، شاخص خشکی گیاهی دمایی<sup>۳</sup> (۴۴)، شاخص خشکسالی تجمعی<sup>۴</sup> (۲۴)، شاخص خشکسالی چند متغیره<sup>۵</sup> (۴۰)، شاخص خشکسالی یکپارچه چند متغیره<sup>۶</sup> (۶)، شاخص جامع خشکسالی هواشناسی<sup>۷</sup> (۴۵)، شاخص خشکسالی یکپارچه میکروویو<sup>۸</sup> (۴۷)، شاخص ترکیبی خشکسالی پوشش گیاهی<sup>۹</sup>، شاخص ترکیبی خشکسالی هواشناسی<sup>۱۰</sup> (۴۹)، شاخص ترکیبی اصلاح شده خشکسالی<sup>۱۱</sup> (۷)، شاخص خشکسالی واقعی<sup>۱۲</sup> (۱۳)، شاخص خشکسالی ترکیبی<sup>۱۳</sup> (۲۲)، شاخص یکپارچه استاندارد خشکسالی<sup>۱۴</sup> (۸) و دیگر شاخص‌های چندمتغیره را ارائه دادند. بنابراین با افزودن تعداد بیشتری از پارامترهای مؤثر در وقوع خشکسالی می‌توان به یک شاخص جامع در تحلیل خشکسالی رسید و نتایج قابل قبول‌تری را به‌دست آورد. بنابراین با توجه به نتایج پژوهش‌ها، شاخص‌های ماهواره‌ای روش‌های مناسبی برای پیش خشکسالی هستند اما این شاخص‌ها با توجه به شرایط محیطی و اقلیمی منطقه نتایج متفاوتی را ارائه می‌دهند. بنابراین به‌منظور پیش این پدیده، باید رابطه هر یک از شاخص‌های ماهواره‌ای با وقوع خشکسالی در منطقه مورد مطالعه ارزیابی شود و در هر منطقه با توجه به شرایط پوشش گیاهی و اقلیمی آن، شاخص مناسب انتخاب شود (۲، ۲۵). از سوی دیگر در بیشتر مطالعات انجام شده در ایران در زمینه خشکسالی کمتر به بررسی‌های پاسخ پوشش گیاهی به خشکسالی که مربوط به تنش آبی محصول می‌باشد پرداخته شده است و تاکنون بررسی

شاخص‌های VHI و NVSWI اطلاعات مربوط به سبزی و دما را برای ارزیابی خشکسالی ادغام می‌کند.

### ■ مواد و روش

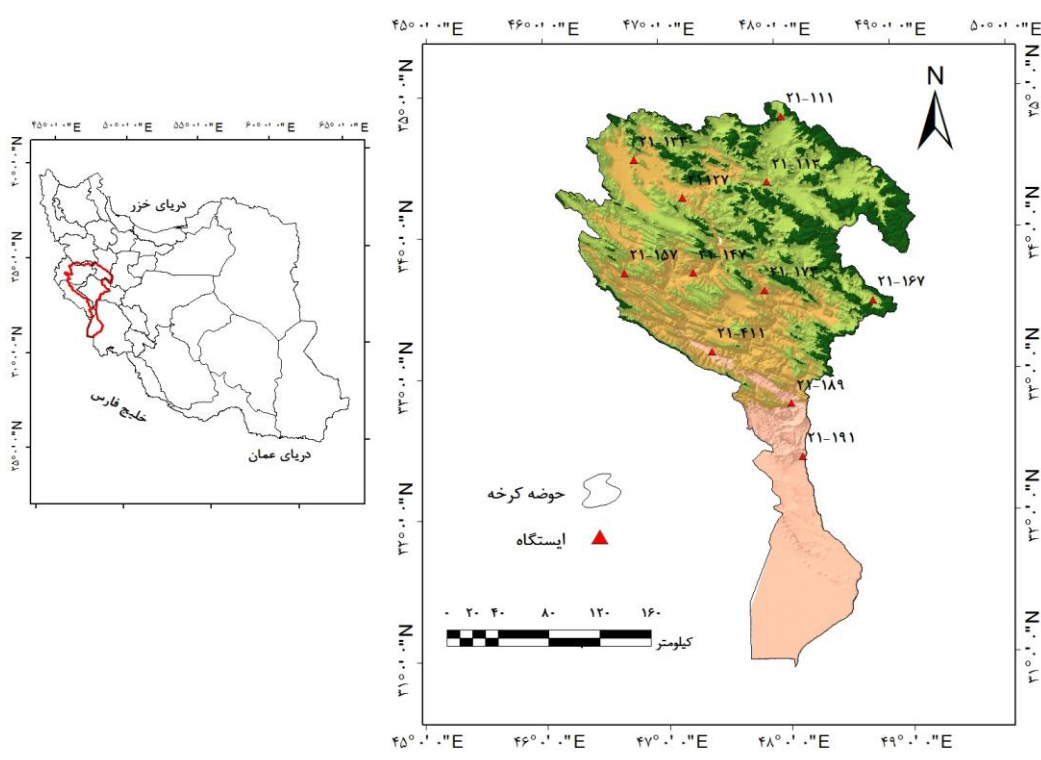
#### محدوده مورد بررسی

حوزه آبخیز کرخه در مناطق میانی و جنوب‌غربی رشته کوه‌های زاگرس قرار دارد. آبراهه اصلی این حوضه، رود کرخه است که از تلاقی رودهای سیمره و زال تشکیل شده است. از نظر مختصات جغرافیایی این حوضه بین  $30^{\circ}58'$  تا  $35^{\circ}04'$  عرض شمالی و  $46^{\circ}06'$  تا  $49^{\circ}10'$  طول شرقی قرار گرفته است. مساحت این حوضه حدود  $51643 \text{ km}^2$  است که از این سطح، حدود  $44/5\%$  آن را دشت‌ها و کوهپایه‌ها و تقریباً  $55/5\%$  آن را مناطق کوهستانی در بر می‌گیرد. دشت‌های این حوضه غالباً در بخش‌های شمالی-جنوبی و مناطق کوهستانی این حوضه عموماً در بخش‌های میانی و شرقی قرار دارند. بیش از نیمی از استان‌های لرستان و کرمانشاه و بخش‌هایی از استان‌های کردستان، همدان، ایلام و خوزستان در این حوضه قرار گرفته است (شکل ۱).

مقایسه‌ای بین روند خشکسالی با شاخص‌های یکپارچه چند متغیره و تک متغیره (سنجش از دوری) در حوزه آبخیز کرخه صورت نگرفته است. بنابراین هدف از این بررسی پایش مکانی و زمانی خشکسالی با شاخص‌های ماهواره‌ای و ارزیابی عملکرد شاخص‌های یکپارچه چند متغیره در مقایسه با شاخص‌های تک متغیره در بررسی خشکسالی-های رخ داده در مقیاس زمانی ۲۰ ساله (۱۳۸۰-۱۴۰۱) در حوزه آبخیز کرخه است. در واقع در پژوهش حاضر به دنبال یافتن پاسخ به سوال زیر است:

آیا شاخص‌های چند متغیره نسبت به شاخص‌های تک متغیره با دقت بیشتری وضعیت خشکسالی را نشان می‌دهد؟ و نوسان‌ها و ناهنجاری‌های بارش و جریان را به خوبی دنبال می‌کند؟

بنابراین برای این منظور شاخص خشکسالی چندمتغیره سلامت پوشش گیاهی، شاخص آب سطح زمین نرمال شده<sup>۱</sup> و شاخص ذخیره آب گیاهی نرمال شده<sup>۲</sup> انتخاب شدند. این سه شاخص خشکسالی کشاورزی را از طریق رشد پوشش گیاهی تخمین می‌زنند. NLSWI اطلاعاتی در مورد محتوای آب گیاهی ارائه می‌دهد و



شکل ۱. موقعیت منطقه و ایستگاه‌های باران‌سنجی و هیدرومتری مورد مطالعه در حوزه آبخیز کرخه

<sup>2</sup> Normalized Vegetation Supply Water Index (NVSWI)

<sup>1</sup> Normalized Land Surface Water Index (NLSWI)

منبع داده‌ها

داده‌های زمینی

در پژوهش حاضر با استفاده از شاخص‌های بارش استاندارد شده<sup>۱</sup> و خشکسالی جریان رودخانه‌ای<sup>۲</sup> کارایی شاخص‌های سنجش از دوری ارزیابی شد. ابتدا داده‌های بارش و دبی ماهیانه به ترتیب از ایستگاه‌های باران‌سنجی و هیدرومتری واقع در حوزه آبخیز کرخه اخذ شد (۱۸). با بررسی‌های انجام شده تعداد ۱۱ ایستگاه باران‌سنجی و هیدرومتری انتخاب شدند. پس از شناسایی داده‌های پرت و حذف آن‌ها، با استفاده از آزمون‌های آماری داده‌ها بازسازی و اصلاح شد و سال‌های آماری ۱۳۸۰-۱۴۰۱ به عنوان دوره آماری در این تحقیق در نظر گرفته شد (جدول ۱).

داده‌های ماهواره‌ای

در این بررسی از محصولات سنجنده مادیس<sup>۳</sup> ماهواره ترا شامل MOD13A3 (محصولات شاخص گیاهی تفاضلی نرمال شده<sup>۴</sup>) و MOD11A1 (محصولات دمای سطح زمین<sup>۵</sup>) با قدرت مکانی 1km طی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۱ استفاده

شد (جدول ۲).

روش پژوهش

تحلیل شاخص‌های ماهواره‌ای

بررسی تصاویر ماهواره‌ای و مرور منابع نشان داد دوره رشد پوشش سبز گیاهی در منطقه مورد مطالعه، از ابتدای اسفندماه تا پایان تیرماه و بسته به شرایط اقلیمی در برخی نقاط حوضه تا پایان مرداد ماه است (۱۲، ۳، ۱۱) و در اواخر اردیبهشت ماه نیز اوج پوشش گیاهی است (۲۳). در پژوهش حاضر محصولات MOD13A3 و MOD11A1 به منظور بررسی شرایط پوشش گیاهی و تنش‌های حرارتی برای محاسبه شاخص‌های ماهواره‌ای VHI، NLSWI و NVSWI از پایگاه USGS<sup>۶</sup> برای اردیبهشت ماه طی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۱ دریافت شد. سپس هر یک از شاخص‌های سنجش از دوری مطابق با روابط ریاضی ارائه شده در جدول ۳ محاسبه شد. بعد از محاسبه شاخص‌های مورد نظر وضعیت خشکسالی در پنج طبقه خیلی شدید، شدید، متوسط، ملایم و بدون خشکسالی دسته‌بندی شد.

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های باران‌سنجی و هیدرومتری در حوزه آبخیز کرخه (۱۸)

ردیف.	کد	ایستگاه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	نوع ایستگاه
۱	۱۱۱-۲۱	آغاجان‌بلاغی	۳۴°۵۰'	۴۸°۰۴'	باران‌سنج
۲	۱۱۳-۲۱	آران	۳۴°۲۴'	۴۷°۳۳'	باران‌سنجی و هیدرومتری
۳	۱۲۷-۲۱	پل‌چهر	۳۴°۲۱'	۴۷°۲۶'	باران‌سنجی و هیدرومتری
۴	۱۳۳-۲۱	دوآب مرک	۳۴°۳۳'	۴۶°۴۷'	باران‌سنجی و هیدرومتری
۵	۱۴۷-۲۱	هلیلان- سیمره	۳۳°۴۴'	۴۶°۳۹'	باران‌سنجی و هیدرومتری
۶	۱۵۷-۲۱	دارتوت	۳۳°۴۴'	۴۶°۳۹'	باران‌سنجی و هیدرومتری
۷	۱۶۷-۲۱	دهنو	۳۳°۳۱'	۴۸°۴۷'	باران‌سنجی و هیدرومتری
۸	۱۷۳-۲۱	دوآب ویسیان	۳۳°۴۸'	۴۸°۴۷'	باران‌سنجی
۹	۱۸۹-۲۱	پل زال	۳۳°۴۸'	۴۸°۰۵'	باران‌سنجی و هیدرومتری
۱۰	۱۹۱-۲۱	پای پل	۳۳°۲۵'	۴۸°۰۹'	باران‌سنجی و هیدرومتری
۱۱	۴۱۱-۲۱	نظرآباد	۳۳°۱۰'	۴۷°۲۵'	باران‌سنجی و هیدرومتری

جدول ۲. محصول‌های ماهواره مادیس در این مطالعه

شاخص	قدرت تفکیک مکانی (km)	محصول	سنجنده	ماهواره
VCI & NLSWI	۱	MOD 13A3	مودیس	ترا
TCI	۱	MOD 11A1	مودیس	ترا
VHI & NVSWI	۱	MOD 13A3 MOD 11A1	مودیس	ترا

<sup>۴</sup> Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

<sup>۵</sup> Land Surface Temperature (LST)

<sup>۶</sup> <http://lpdaac.usgs.gov/>

<sup>۱</sup> Standardized precipitation index (SPI)

<sup>۲</sup> Streamflow Drought Index (SDI)

<sup>۳</sup> Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)

برای  $x > 0$  در اینجا  $\beta > 0$  پارامتر مقیاس،  $x > 0$  مقدار بارندگی،  $\alpha > 0$  پارامتر شکل و  $\Gamma > 0$  تابع گاما است (۳۲).

### شاخص SDI

شاخص SDI با استفاده از داده‌های دبی ایستگاه‌های هیدرومتری براساس روابط زیر محاسبه می‌شود که در اینجا پارامتر  $K$ ، دوره آماری،  $i$  سال هیدرولوژیک،  $j$ ، ماه مورد نظر،  $V_{j,k}$  مقادیر حجمی دبی تجمعی،  $Q$ ، حجم دبی ماهانه، و پارامترهای  $S_k$  و  $\bar{V}_k$  به ترتیب انحراف معیار و میانگین سری داده‌های تجمعی جریان است (کریمی و همکاران، ۱۳۹۵). طبقه‌بندی وضعیت خشکسالی بر اساس شاخص SPI و شاخص‌های ماهواره ای در جدول ۴ نشان داده شده است (۴۳).

$$SDI_{j,k} = \frac{V_{j,k} - \bar{V}_k}{S_k} \quad (7)$$

$$V_{j,k} = \sum_{i=1}^{3k} Q_{i,j} \quad (8)$$

$i=1, 2, \dots; j=1, 2, \dots, 12; k=1, 2, 3$

### صحت‌سنجی شاخص‌های ماهواره ای

شاخص‌های SPI و SDI با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های باران‌سنجی و هیدرومتری برای صحت‌سنجی نتایج شاخص‌های ماهواره‌ای، محاسبه شدند و از ضریب همبستگی پیرسون برای برآورد همبستگی بین داده‌ها استفاده شد.

### شاخص SPI

این شاخص وضعیت خشکسالی یا کاهش بارندگی را در بازه‌های زمانی ۱، ۳، ۶، ۱۲، ۲۴، ۴۸ ماهه نشان می‌دهد. براساس این شاخص، برای پایش خشکسالی‌های کشاورزی سری‌های زمانی کوتاه‌مدت یک، سه و شش ماهه و برای بررسی منطقه از نظر خشکسالی‌های هیدرولوژیک سری‌های بلندمدت ۱۲، ۲۴، ۴۸ ماهه به کار گرفته می‌شود (۳۲). برای محاسبه این شاخص ابتدا باید بهترین توزیع آماری از طریق برازش داده‌های ایستگاه‌های باران‌سنجی با توزیع‌های آماری مختلف انتخاب شود. طبق تحقیقات صورت گرفته (۳۲) توزیع گاما مناسب‌ترین برازش را با داده‌های بارش دارد. این تابع به صورت رابطه (۶) محاسبه می‌شود.

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} \quad (6)$$

جدول ۳. روابط محاسباتی هریک از شاخص‌های سنجش از دوری

منبع	رابطه	شاخص	ردیف
(۲۶)	$VCI = \frac{NDVI_{ijk} - NDVI_{i,min}}{NDVI_{i,max} - NDVI_{i,min}}$	VCI	۱
(۱۷)	$NLSWI = \frac{LSWI_{ijk} - LSWI_{i,min}}{LSWI_{i,max} - LSWI_{i,min}}$ $LSWI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$	NLSWI	۲
(۲۶)	$TCI = \frac{LST_{i,max} - LST_{ijk}}{LST_{i,max} - LST_{i,min}}$	TCI	۳
(۵۳)	* $TCI \ 0 \leq \alpha \leq 1$ $VHI = \alpha * VCI + (1 - \alpha)$ $\alpha = 0.5$	VHI	۴
(۱۷)	$NVSWI = \frac{VSWI_{ijk} - VSWI_{i,min}}{VSWI_{i,max} - VSWI_{i,min}}$ $VSWI = \frac{NDVI}{LST}$	NVSWI	۵

$NDVI_{ijk}$ ،  $LSWI_{ijk}$ ،  $LST_{ijk}$  و  $VSWI_{ijk}$  به ترتیب عبارتند از  $NDVI$ ،  $LSWI$ ،  $LST$  و  $VSWI$  برای پیکسل  $i$  در ماه  $j$  برای سال  $k$ ،  $NDVI_{i,max}$ ،  $LSWI_{i,max}$ ،  $LST_{i,max}$  و  $VSWI_{i,max}$  و  $NDVI_{i,min}$ ،  $LSWI_{i,min}$ ،  $LST_{i,min}$  و  $VSWI_{i,min}$  به ترتیب مقادیر کمینه و بیشینه  $NDVI$ ،  $LSWI$ ،  $LST$  و  $VSWI$  مربوط به ماه  $j$  در طول دوره آماری ۱۴۰۱-۱۳۸۰ در این مطالعه هستند.

معیارهای ارزیابی صحت

برای ارزیابی دقت و صحت شاخص‌های ماهواره‌ای، رابطه همبستگی این شاخص‌ها با SPI در مقیاس‌های زمانی یک، سه و ۶ ماهه و SDI با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون، درصد میانگین خطای مطلق<sup>۱</sup> و ریشه دوم میانگین مربعات خطا<sup>۲</sup> در اردیبهشت ماه طی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۱ بررسی شد.

ضریب همبستگی پیرسون (R)

یکی از روش‌های آماری معمول و سودمند، ضریب همبستگی پارامتری پیرسون است. رنج تغییرات این ضریب بین -۱ و +۱ است و میزان همبستگی بین دو پارامتر را نشان می‌دهد (رابطه ۹).

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \quad (9)$$

که در این روابط،  $O_i$  مقدار شاخص خشکسالی مبتنی بر ایستگاه‌های باران‌سنجی و هیدرومتری،  $P_i$  مقدار شاخص خشکسالی ماهواره‌ای،  $\bar{O}$  و  $\bar{P}$  به ترتیب میانگین مقدار شاخص زمینی و ماهواره‌ای و  $n$  تعداد کل متغیرها هستند. شکل (۲) روندنمای مراحل پژوهش را نشان می‌دهد.

درصد میانگین خطای مطلق

بیانگر خطای برآورد است. نشان دهنده دقت روش و مقدار متوسط خطا است. دامنه آن بین  $0, +\infty$  هر چه قدر کوچکتر باشد بهتر است (رابطه ۱۰).

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - P_i|}{n} \quad (10)$$

ریشه دوم میانگین مربعات خطا

بیانگر توانایی مدل در برآورد متغیر وابسته است و دامنه آن بین  $0, +\infty$  و هر چه قدر کوچکتر باشد بهتر است (رابطه ۱۱).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}} \quad (11)$$

نتایج و بحث

استخراج سال‌های رخداد خشکسالی بر مبنای شاخص‌های سنجش از دوری

با توجه به اینکه بیشترین میزان پوشش گیاهی در حوزه آبخیز کرخه مربوط به اردیبهشت ماه می‌باشد به همین دلیل تصاویر ماه می (اردیبهشت) از سال ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۱ برای محاسبه شاخص‌های VHI، NVSWI و NLSWI انتخاب شدند. بعد از محاسبه شاخص‌های VHI، NVSWI و NLSWI وضعیت خشکسالی در پنج طبقه خیلی شدید، شدید، متوسط، ملایم و بدون خشکسالی دسته‌بندی و مورد بررسی قرار گرفت.

استخراج سال‌های رخداد خشکسالی با استفاده از شاخص VHI

بررسی نقشه‌های حاصل از شاخص VHI نشان داد، بیشترین درصد مساحت طبقات خشکسالی خفیف، متوسط، شدید و خیلی شدید مربوط به سال‌های ۱۳۸۰ (۵۴/۷٪)، ۱۳۸۲ (۴۳/۸٪)، ۱۳۸۷ (۹۰/۷٪)، ۱۳۸۸ (۵۶/۳٪)، ۱۳۹۱ (۵۶/۶٪)، ۱۳۹۲ (۵۱/۴٪)، ۱۳۹۳ (۶۷٪) و ۱۳۹۴ (۵۰/۴٪) در حوضه است و در بقیه سال‌های مورد مطالعه تا حدودی از شدت خشکسالی کاسته شده است (جدول ۵ و شکل ۳).

جدول ۴. طبقه‌بندی وضعیت خشکسالی بر اساس شاخص‌های SPI و SDI (۳۲، ۳۸) و شاخص‌های سنجش از دوری (۱۷)

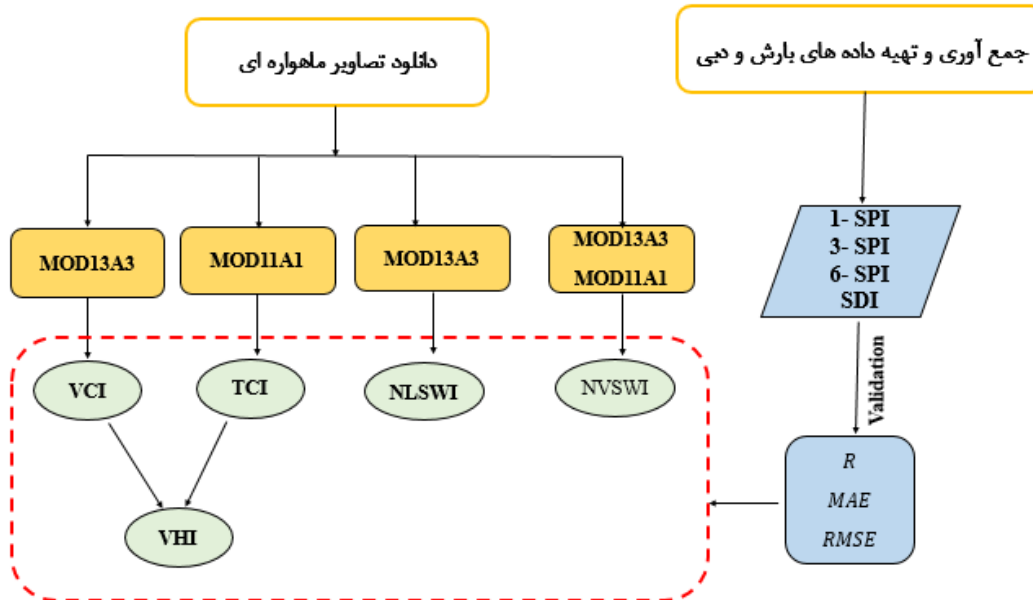
VHI, NVSWI & NLSWI	SDI و SPI	وضعیت خشکسالی
VHI, NVSWI & NLSWI $\geq 8$	SPI & SDI $\geq 0$	بدون خشکسالی
$6 < \text{VHI, NVSWI \& NLSWI} < 8$	$-1 < \text{SPI \& SDI} < 0$	خفیف
$4 < \text{VHI, NVSWI \& NLSWI} < 6$	$-1/5 < \text{SPI \& SDI} < -1$	متوسط
$2 < \text{VHI, NVSWI \& NLSWI} < 4$	$-2 < \text{SPI \& SDI} < -1/5$	شدید
VHI, NVSWI & NLSWI $< 2$	SPI & SDI $< -2$	بسیار شدید

<sup>1</sup> Mean Absolute Error (MAE)

<sup>2</sup> root-mean-square error (RMSE)

و به جزء سطح اندکی تقریباً تمام سطح حوضه متأثر از خشکسالی شدید و بسیار شدید است که این یافته با نتایج پژوهش‌های پیشین (۴۲، ۳۴، ۴۱، ۲۲، ۳۸) مطابقت دارد.

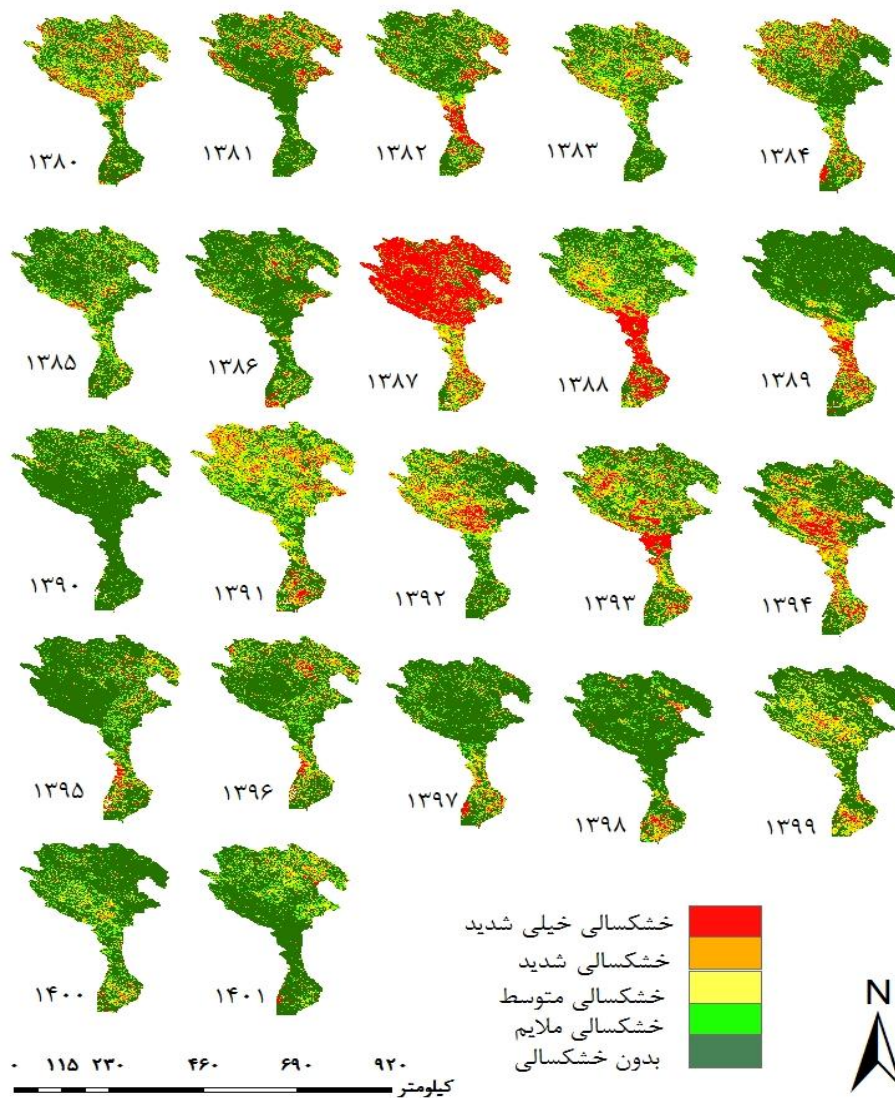
طبق نتایج، سال ۱۳۸۷، بیانگر وقوع شدیدترین خشکسالی با بیشترین گستره خشکسالی خیلی شدید و شدید به ترتیب حدود ۴۲/۱٪ و ۳۳/۱٪ از کل منطقه است



شکل ۲. روندنمای مراحل انجام پژوهش

جدول ۵. درصد مساحت طبقات خشکسالی بر اساس شاخص VHI برای اردیبهشت ماه در حوزه آبخیز کرخه

سال	بدون خشکسالی	خفیف	متوسط	شدید	خیلی شدید
۱۳۸۰	۴۵/۳	۱۶/۶	۱۶	۱۱/۷	۱۰/۴
۱۳۸۱	۶۴/۱	۱۰/۲	۹/۱	۷	۹/۶
۱۳۸۲	۵۶/۲	۱۳	۱۱/۱	۸/۴	۱۱/۳
۱۳۸۳	۵۱/۵	۱۷/۴	۱۵	۹/۸	۶/۳
۱۳۸۴	۵۲/۶	۱۴/۱	۱۲/۶	۹/۹	۱۰/۸
۱۳۸۵	۶۷	۱۵/۱	۱۰/۲	۵	۲/۷
۱۳۸۶	۷۴	۹/۹	۷/۲	۴/۶	۴/۳
۱۳۸۷	۹/۳	۵/۸	۹/۷	۳۳/۱	۴۲/۱
۱۳۸۸	۴۳/۷	۱۶/۵	۱۴	۹/۶	۱۶/۲
۱۳۸۹	۷۶/۸	۶/۵	۶	۵/۵	۵/۲
۱۳۹۰	۸۲/۷	۸/۸	۵/۱	۲/۲	۲/۲
۱۳۹۱	۴۳/۴	۱۵/۷	۱۴/۹	۱۲/۱	۱۳/۹
۱۳۹۲	۴۸/۶	۱۴/۹	۱۵/۱	۱۱/۷	۹/۷
۱۳۹۳	۳۳	۲۰	۲۲/۶	۱۵/۷	۸/۷
۱۳۹۴	۴۹/۶	۱۱/۳	۱۳/۱	۱۳	۱۳
۱۳۹۵	۷۵/۸	۹/۵	۶/۹	۳/۴	۳/۵
۱۳۹۶	۶۷	۱۲/۷	۹/۲	۵/۷	۵/۳
۱۳۹۷	۷۷/۱	۹/۹	۶/۱	۳/۶	۳/۳
۱۳۹۸	۷۷/۴	۹/۱	۵/۲	۴/۱	۴/۲
۱۳۹۹	۶۲/۸	۱۱/۲	۹/۶	۱۰/۸	۵/۶
۱۴۰۰	۷۳/۸	۱۰/۵	۸/۶	۳/۹	۳/۲
۱۴۰۱	۷۳/۶	۱۱/۴	۸/۲	۳/۱	۳/۷



شکل ۳. وضعیت خشکسالی اردیبهشت ماه بر اساس شاخص VHI در حوزه آبخیز کرخه

### استخراج سال‌های رخداد خشکسالی با استفاده از شاخص NVSWI

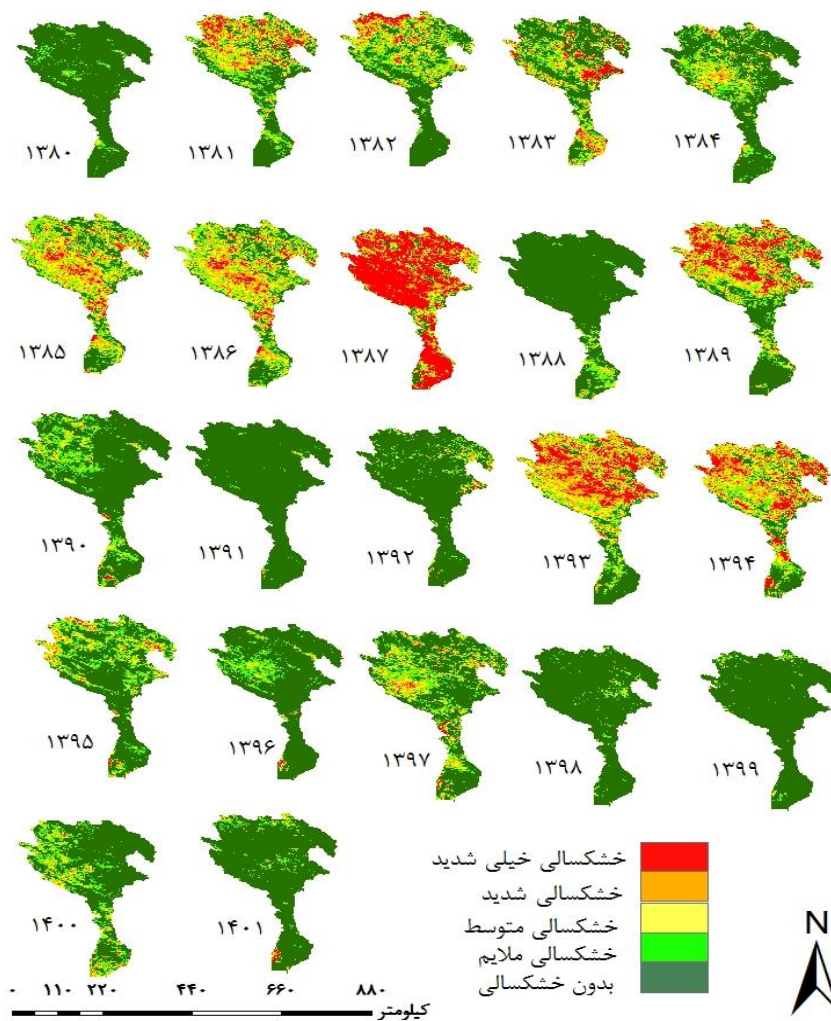
طبق نتایج به دست آمده از شاخص NVSWI در دوره آماری ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۱ مشخص شد، در سال ۱۳۸۷ فقط ۵/۶ درصد از مساحت حوضه در شرایط بدون خشکسالی و دیگر مناطق (۹۴/۴) در شرایط خشکسالی خیلی شدید تا خفیف قرار گرفته است. همچنین نتایج این شاخص حاکی از وقوع خشکسالی در سال‌های ۱۳۸۱ (۶۲/۴)، ۱۳۸۳ (۵۲/۳)، ۱۳۸۵ (۷۴/۸)، ۱۳۸۶ (۷۵/۴)، ۱۳۸۹ (۶۸/۷)، ۱۳۹۳ (۸۰/۵) و ۱۳۹۴ (۸۱) با مساحتی کمتر نسبت به سال ۱۳۸۷ در منطقه مورد بررسی است (جدول ۶ و شکل ۴)، که این یافته با نتایج پژوهش‌های پیشین (۳۸، ۲۲، ۴۱، ۳۴، ۴۲) مطابقت دارد.

### استخراج سال‌های رخداد خشکسالی با استفاده از شاخص NLSWI

بررسی نقشه‌های حاصل از شاخص NVSWI نشان داد، بیشترین درصد مساحت طبقات خشکسالی خفیف، متوسط، شدید و خیلی شدید مربوط به سال‌های ۱۳۹۱ (۸۹/۱)، ۱۳۹۲ (۵۳/۷) و ۱۳۹۳ (۵۸/۴) در حوضه است و در بقیه سال‌های مورد مطالعه تا حدودی از شدت خشکسالی کاسته شده است (جدول ۷ و شکل ۵). طبق نتایج، سال ۱۳۹۱، بیانگر وقوع شدیدترین خشکسالی با بیشترین گستره خشکسالی خیلی شدید و شدید به ترتیب حدود ۳۱/۲٪ و ۳۲/۳٪ از کل منطقه است و به جزء سطح اندکی تقریباً تمام سطح حوضه متأثر از خشکسالی شدید و بسیار شدید است.

جدول ۶. درصد مساحت طبقات خشکسالی بر اساس شاخص NVSWI برای اردیبهشت ماه در حوزه آبخیز کرخه

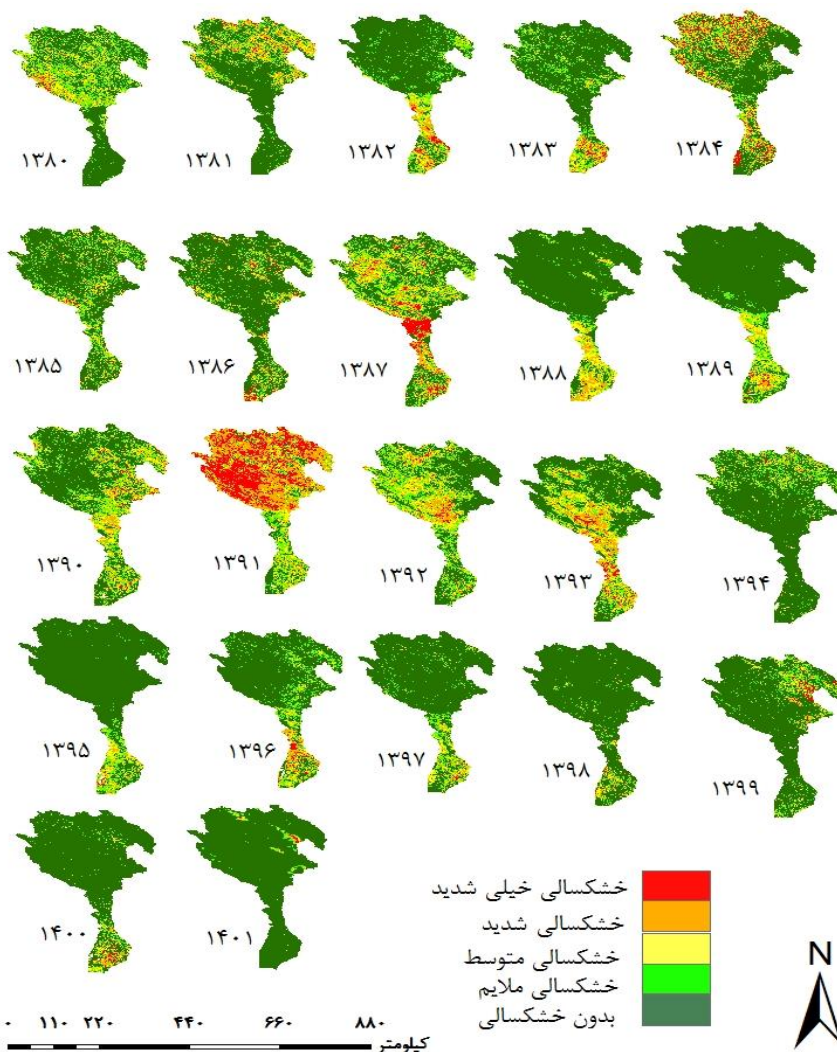
سال	بدون خشکسالی	خفیف	متوسط	شدید	خیلی شدید
۱۳۸۰	۹۴/۱	۴/۸	۱	۰/۱	صفر
۱۳۸۱	۳۷/۶	۲۰	۱۹/۳	۱۳/۱	۱۰
۱۳۸۲	۵۳/۷	۱۹/۵	۱۶/۱	۴	۶/۷
۱۳۸۳	۴۷/۷	۱۸/۳	۱۴/۷	۱۰	۹/۳
۱۳۸۴	۶۶/۴	۱۵/۸	۱۱/۷	۴/۹	۱/۲
۱۳۸۵	۲۵/۲	۲۲/۴	۲۵/۸	۱۸/۵	۸/۱
۱۳۸۶	۲۴/۶	۲۳	۲۷/۸	۱۷/۶	۷
۱۳۸۷	۵/۶	۵/۹	۹/۹	۱۴/۵	۶۴/۱
۱۳۸۸	۹۲/۶	۴/۴	۲/۴	۰/۵	۰/۱
۱۳۸۹	۳۱/۳	۱۵/۱	۱۸/۲	۱۶/۸	۱۸/۶
۱۳۹۰	۷۷/۷	۱۴/۹	۵/۶	۱/۲	۰/۶
۱۳۹۱	۹۸/۷	۰/۸	۰/۳	۰/۱	۰/۱
۱۳۹۲	۸۸/۷	۶	۳/۳	۱/۳	۰/۷
۱۳۹۳	۱۹/۵	۱۲/۴	۲۱/۳	۲۴/۹	۲۱/۹
۱۳۹۴	۱۹	۱۷/۵	۲۳/۲	۲۱/۳	۱۹/۱
۱۳۹۵	۶۱/۶	۲۰/۱	۱۱/۷	۴/۸	۱/۶
۱۳۹۶	۸۴/۵	۱۱/۳	۳/۱	۰/۸	۰/۳
۱۳۹۷	۵۹/۲	۱۹/۸	۱۲/۸	۵/۷	۲/۵
۱۳۹۸	۹۵/۵	۲/۳	۱/۱	۰/۵	۰/۶
۱۳۹۹	۹۵/۹	۲/۱	۰/۹	۰/۶	۰/۵
۱۴۰۰	۷۶/۵	۱۴/۸	۳/۹	۲/۲	۲/۶
۱۴۰۱	۹۱/۸	۳/۵	۱	۲/۴	۱/۳



شکل ۴. وضعیت خشکسالی اردیبهشت ماه بر اساس شاخص NVSWI در حوزه آبخیز کرخه

جدول ۷. درصد مساحت طبقات خشکسالی بر اساس شاخص NLSWI برای اردیبهشت ماه در حوزه آبخیز کرخه

سال	بدون خشکسالی	خشکسالی خفیف	متوسط	شدید	خیلی شدید
۱۳۸۰	۵۵/۶	۲۳/۲	۱۵/۸	۴/۷	۰/۷
۱۳۸۱	۶۳/۳	۱۳/۷	۱۱/۴	۹/۳	۲/۳
۱۳۸۲	۷۴/۲	۱۲	۷/۱	۵/۱	۱/۶
۱۳۸۳	۷۴/۱	۱۴/۳	۶/۶	۳/۶	۱/۴
۱۳۸۴	۷۱	۱۵/۵	۹	۳/۴	۱/۱
۱۳۸۵	۷۷	۱۰/۱	۶/۸	۳/۹	۲/۲
۱۳۸۶	۸۰/۴	۱۱/۵	۵/۷	۱/۹	۰/۵
۱۳۸۷	۵۲/۶	۱۴/۵	۱۲/۸	۱۰/۱	۱۰
۱۳۸۸	۵۸/۲	۱۷/۸	۱۴/۷	۷/۶	۱/۷
۱۳۸۹	۸۲/۵	۸	۶/۵	۲/۴	۰/۶
۱۳۹۰	۸۱/۵	۵/۹	۷/۶	۵/۲	۰/۱
۱۳۹۱	۱۱	۱۱	۱۴/۵	۳۲/۳	۳۱/۲
۱۳۹۲	۴۶/۳	۲۱/۹	۱۹/۶	۱۰	۲/۲
۱۳۹۳	۴۱/۶	۲۰/۲	۱۷/۸	۱۲/۷	۷/۷
۱۳۹۴	۸۸/۷	۵/۶	۳/۹	۱/۶	۰/۲
۱۳۹۵	۷۰/۵	۱۰/۴	۷/۹	۸/۴	۲/۸
۱۳۹۶	۶۴/۹	۱۳/۴	۸/۳	۹/۸	۳/۶
۱۳۹۷	۸۳/۶	۸/۶	۵/۴	1/2	۰/۳
۱۳۹۸	۸۸	۶/۴	۳/۵	۱/۹	۰/۲
۱۳۹۹	۸۵/۶	۶/۳	۲/۸	۲/۲	۳/۱
۱۴۰۰	۸۷/۷	۴/۲	۲/۹	۲/۴	۲/۸
۱۴۰۱	۹۱/۸	۳/۲	۱/۱	۱/۸	۲/۱

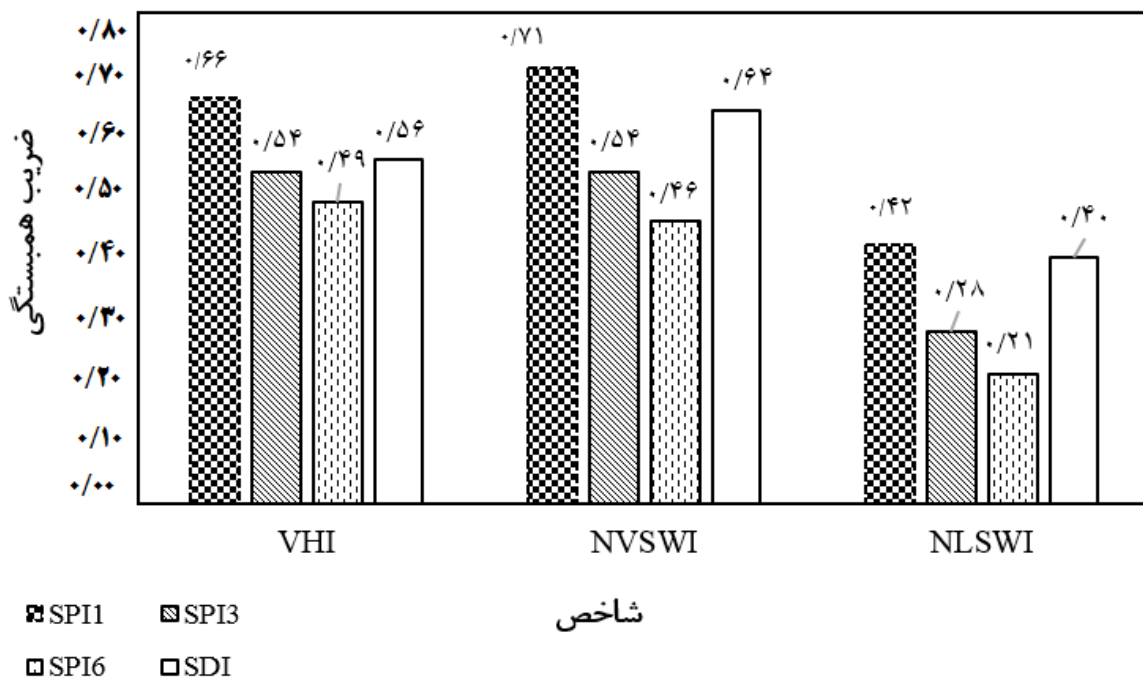


شکل ۵. وضعیت خشکسالی اردیبهشت ماه بر اساس شاخص NLSWI در حوزه آبخیز کرخه

و VHI نسبت به شاخص تک متغیره NLSWI تطابق بیشتری با شاخص‌های خشکسالی دارند که می‌تواند دلیل آن این باشد که شاخص‌های ماهواره‌ای چندمتغیره NVSWI و VHI به‌طور همزمان دو متغیر مهم در وقوع خشکسالی شامل شرایط پوشش گیاهی منطقه و دمای سطح زمین را در پایش خشکسالی در نظر می‌گیرند که این یافته با نتایج پژوهش‌های پیشین (۳۸، ۲) مطابقت دارد. مقایسه میانگین شاخص‌های VHI، NVSWI و NLSWI با شاخص‌های SPI-1، SPI-2، SPI-3 و SDI نشان داد، که رابطه معنی‌داری بین الگوهای بارش، جریان-های سطحی و شرایط خشک و مرطوب وجود دارد و نتایج هر سه شاخص با شاخص‌های SPI و SDI تا حدودی مطابقت خوبی دارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که شاخص‌های ماهواره‌ای از توانایی زیادی برای پایش خشکسالی برخوردار است که این نتیجه با نتایج تحقیقاتی که پیش‌تر انجام شده (۲۲، ۱۴، ۲) همخوانی دارد. همچنین نتایج معیارهای صحت‌سنجی RMSE و MAE در جدول ۸، نشان‌دهنده عملکرد قابل قبول شاخص‌های چندمتغیره VHI و NVSWI با داده‌های زمینی است و کمترین مقدار RMSE و MAE مربوط به شاخص NVSWI با SPI-1 است (جدول ۸).

## نتایج بررسی همبستگی بین شاخص‌های زمینی و شاخص‌های سنجش از دوری

بررسی همبستگی شاخص‌های SPI و SDI با شاخص‌های خشکسالی سنجش از دور طی دوره آماری مورد بررسی در حوزه آبخیز کرخه بیانگر بیشترین ضریب همبستگی به ترتیب برابر با ۰/۷۱ و ۰/۶۴ بین شاخص NVSWI با SPI-1 و SDI است. همچنین طبق نتایج، شاخص VHI نیز بعد از شاخص NVSWI همبستگی نسبتاً خوبی با SPI-1 (۰/۶۶) و SDI (۰/۵۶) نشان داد اما این همبستگی نسبت به شاخص NVSWI کمتر است زیرا از آنجاییکه شاخص VHI ترکیبی از دو شاخص VCI و TCI است و طبق یافته‌های پژوهشگران (۱۶)، چون رطوبت سطحی خاک به طور کلی سریع‌تر به تغییرات دما واکنش نشان می‌دهد و عملکرد TCI در اعماق مختلف خاک متفاوت است که این می‌تواند یکی از دلایل کارایی کمتر این شاخص نسبت به شاخص NVSWI باشد بنابراین شاخص‌های NVSWI و VHI با SPI-1 و SDI در سطح یک درصد معنی‌دار هستند. همچنین مشخص شد شاخص تک متغیره NLSWI کمترین همبستگی را با SPI-1 (۰/۴۲)، SPI-2 (۰/۲۸)، SPI-3 (۰/۲۱) و SDI (۰/۴۰) دارد (شکل ۶). بنابراین شاخص‌های چند متغیره NVSWI



شکل ۶. ضریب همبستگی بین شاخص‌های زمینی و سنجش از دوری در حوزه آبخیز کرخه

جدول ۸. مقادیر RMSE و MAE برای اندازه‌گیری ارتباط بین شاخص‌های سنجش از دوری و SPI/SDI

SDI		SPI-6		SPI-3		SPI-1		شاخص‌های سنجش از دوری
MAE	RMSE	MAE	RMSE	MAE	RMSE	MAE	RMSE	
۰/۲۹	۰/۳۲	۰/۲۷	۰/۲۹	۰/۲	۰/۲۴	۰/۱۶	۰/۱۸	VHI
۰/۲۰	۰/۲۱	۰/۱۹	۰/۲۲	۰/۱۷	۰/۲۱	۰/۱۳	۰/۱۵	NVSWI
۰/۴۱	۰/۳۹	۰/۴۰	۰/۴۲	۰/۳۴	۰/۳۷	۰/۲۹	۰/۳۱	NLSWI

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق کارایی شاخص‌های ماهواره‌ای چندمتغیره در پایش تنش‌های حرارتی و وضعیت پوشش گیاهی در حوزه آبخیز کرخه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. بدین منظور در آغاز وضعیت خشکسالی در کل حوزه آبخیز کرخه با استفاده از شاخص‌های ماهواره‌ای VHI، NVSWI و NLSWI برای دوره زمانی ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۱ در اردیبهشت ماه پایش شد. سپس عملکرد شاخص‌های چند متغیره و تک متغیره با استفاده از شاخص SPI در مقیاس‌های یک، سه و شش ماهه و شاخص SDI مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. به‌طور کلی، نتایج شاخص‌های VHI، NVSWI و NLSWI نشان داد شدیدترین خشکسالی‌ها طی سال‌های ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۳، ۱۳۸۵ تا ۱۳۸۹ و ۱۳۹۱ تا ۱۳۹۴ رخ داده است. طبق نتایج شاخص‌های VHI و NVSWI، در سال ۱۳۸۷ خشکسالی شدت و گسترش بیشتری داشته است و تقریباً کل حوضه را در بر گرفته است (شکل‌های ۳ و ۴). همچنین نتایج شاخص NLSWI نشان داد در سال ۱۳۹۱ شدیدترین خشکسالی رخ داده است (شکل ۵). براساس نتایج صحت‌سنجی در این پژوهش، شاخص‌های چند متغیره NVSWI و VHI نسبت به شاخص تک متغیره NLSWI از ضریب همبستگی بالاتری با شاخص‌های SPI و SDI برخوردار بودند و همچنین معیارهای ارزیابی RMSE و MAE نیز مقادیر کمتری را نشان دادند (شکل ۶ و جدول ۸). بنابراین طبق نتایج به‌دست آمده می‌توان به این سؤال‌ها که آیا شاخص‌های چند متغیره نسبت به شاخص‌های تک متغیره با دقت بیشتری وضعیت خشکسالی را نشان می‌دهد؟ و نوسانات و ناهنجاری‌های بارش و جریان را به‌خوبی دنبال می‌کند؟ پاسخ داد که شاخص‌های چند متغیره می‌تواند به‌عنوان ابزار مناسبی

برای بررسی وضعیت خشکسالی کشاورزی باشد. اما در پایان دستیابی به یک شاخص خشکسالی که به‌طور کامل برای اقلیم‌های مختلف و انواع پوشش گیاهی قابل استفاده باشد، دشوار است از این‌رو باید رابطه هر یک از شاخص‌های سنجش از دوری با خشکسالی در هر منطقه بسته به شرایط خاص اقلیمی و پوشش گیاهی آن منطقه به‌طور جداگانه مورد بررسی قرارگیرد و شاخص مناسب برای پایش خشکسالی انتخاب شود. همچنین در این پژوهش شاخص‌های سنجش از دوری در مقیاس زمانی ماهانه و اوج رشد پوشش گیاهی محاسبه شد، این شاخص‌ها ممکن است در مقیاس زمانی کمتر از یک ماه نتایج متفاوتی ارائه دهند، توصیه می‌شود در صورت دسترسی به داده‌های روزانه و ساعتی بارش، شاخص‌های سنجش از دوری در مقیاس‌های کوتاه‌تر نیز مورد بررسی قرارگیرد. از طرفی شاخص‌های پوشش گیاهی که اغلب به‌عنوان شاخص‌های خشکسالی استفاده می‌شوند قادر به پاسخ فوری به تغییر رطوبت خاک نیستند. در واقع نتایج این شاخص‌ها پاسخی به رطوبت گذشته و فعلی خاک است. بنابراین نیاز به پژوهش‌های بیشتری برای یافتن رابطه یکپارچه بهینه با تغییرات رطوبت، دما یا دیگر عوامل مؤثر در پایش خشکسالی است. از طرفی شاخص‌های پوشش گیاهی تنها برای پایش شرایط بالای خاک مفید هستند و برای پایش شرایط در زیر خاک، به دلیل اینکه بافت خاک و دیگر ویژگی‌ها در مناطق مختلف متفاوت است، مسلماً نیاز به شاخص‌های مؤثرتری است.

### سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر و قدردانی خود را از مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمانشاه اعلام کنند.

## ■ References

1. Abbasi, E., & Etemadi, H. (2023). Bushehr drought monitoring based on SPI and VCI indicators using MODIS sensor images. *Geographic Space*, 23(82), 179-200. [In Persian]
2. Arekhi, S., Barzegar Savasarib, M., & Emadaddiana, S. (2022). Investigating the indicators resulting from remote sensing technology in drought assessment using MODIS images (Case Study: Qom, Isfahan, Chaharmahal and Bakhtiari, and Markazi Provinces). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 3(11), 189-224. DOI:10.22067/geoh.2021.72253.1102 [In Persian]
3. Amini Bazyani, S., Zare Abianeh, H., & Akbari, M. (2016). Estimation of temperature and vegetation index of land surface using remote sensing data (case study: Hamadan province), *Iranian Water Research Journal*, 46(3), 333-348. [In Persian]
4. Asadi Aghbalaghi, F., Mirabbasi Najafabadi, R., Nasr Esfahani, M.A., & Ghasemi Dastgerdi, A.R. (2017). Development of a new composite drought index (CDI) based on shannon's entropy theory for multivariate assessment of drought in shahrekord plain. *Arid regions Geographic Studies*, 8(29), 87-102. [In Persian]
5. Carlson, T.N., Gillies, R.R., & Perry, E.M. (1994). A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface soil water content and fractional vegetation cover. *Remote Sensing Reviews*, 9, 161-173. DOI: 10.1080/02757259409532220
6. Chang, J., Li, Y., Wang, Y., & Yuan, M. (2016). Copula-based drought risk assessment combined with an integrated index in the Wei River Basin, China. *Journal of Hydrology*, 540, 824-834. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.06.064
7. Chen, S., Zhong, W., Pan, S., Xie, Q., & Kim, T.W. (2020). Comprehensive drought assessment using a modified composite drought index: A case study in Hubei Province, China. *Water*, 12(2), 462-474. DOI: 10.3390/w12020462
8. Cheng, M., Zhong, L., Ma, Y., Wang, X., Li, P., Wang, Z. & Qi, Y. (2023). A new drought monitoring index on the Tibetan Plateau based on multisource data and machine learning methods. *Remote Sensing*, 15(2), 512-529. DOI: 10.3390/rs15020512
9. Darvand, S., Khosravi, H., Eskandari Damaneh, H., & Eskandari Damaneh, H. (2021). Investigating the trend of NDVI changes derived from MODIS sensor imagery (Case Study: Isfahan Province). *Degradation and Rehabilitation of Natural Land*, 1(2), 69-79. [In Persian]
10. Ding, Y., He, X., Zhou, Z., Hu, J., Cai, H., Wang, X., Li, L., Xu, J. & Shi, H. (2022). response of vegetation to drought and yield monitoring based on NDVI and SIF. *Catena*, 219, 106328-106340. DOI: 10.1016/j.catena.2022.106328
11. Fazel Dehkordi, L., Azarnivand H., Zare Chahouki M.A., Mahmoudi kohan F., & Khalighi Sigaroodi, Sh. (2016). Drought monitoring using vegetation index (NDVI) (case study: rangeland of Ilam province), *Journal of range and watershd managment (Iranian Journal of Natural Resources)*, 69(1), 141-154. DOI: 10.22059/jrwm.2016.61739 [In Persian]
12. Ebrahimzadeh, S., Bazrafshan, J., & Ghorbani, Kh. (2013). Comparative study between satellite and ground-based drought indices using change vector analysis technique (Case Study of Kermanshah Province). *Journal of Water and Soil*, 27(5), 1034-1045. DOI: 10.22067/jsw.v0i0.20985 [In Persian]

13. Fassouli, V.P., Karavitis, C.A., Tsesmelis, D.E. & Alexandris, S.G. (2021). Factual Drought Index (FDI): a composite index based on precipitation and evapotranspiration. *Hydrological Sciences Journal*, 66(11), 1638-1652. DOI: 10.1080/02626667.2021.1957477
14. Hamzeh, S., Farahani, Z., Mahdavi, S., Chatrobgoun, O., & Gholamnia, M. (2017). Spatio-temporal monitoring of agricultural drought using remotely sensed data (Case study of Markazi province of Iran). *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 4(3), 53-70. [In Persian]
15. Hao, Z., Singh, V.P., & Xia, Y. (2018). Seasonal drought prediction: Advances, challenges, and future prospects. *Reviews of Geophysics*, 56(1), 108-141. DOI: 10.1002/2016RG000549
16. Hosseinzadeh, J., Tongo, A., Najafifar, A., & Hosseini, A. (2018). Relationship between soil moisture changes and climatic indices in the Mele-Siah forest site of Ilam Province. *Journal of Water and Soil*, 32(4), 821-830. DOI: 10.22067/jsw.v32i4.71927 [In Persian]
17. Huang, X., Feng, S., Zhao, S., Fan, J., Qin, Z. & Zhao, S., (2023). Assessment of different satellite image-derived drought indices over the contiguous united states: a comparison in different climates, vegetation cover types, and soil layers. *Water*, 15(20), 3634-3660. DOI: 10.3390/w15203634
18. Iran water resources management. (2024). Retrieved June 12, 2024, from <http://www.wrm.ir> [In Persian]
19. Jiao, W.Z., Zhang, L.F., Chang, Q., Fu, D.J., Cen, Y., & Tong, Q.X. (2016). Evaluating an Enhanced Vegetation Condition Index (EVCI) based on VIUPD for drought monitoring in the continental united states. *Remote Sensing*, 8, 224. DOI: 10.3390/rs8030224
20. Karimi, M., & Shahedi, K. (2018). Investigation of meteorological, hydrological and agricultural drought using drought indices (Case study: Gharehsou watershed). *RS & GIS for Natural Resources*, 9(2), 1-16. [In Persian]
21. Karimi, M., Shahdi, K., & Khosravi, K. (2016). Investigation of meteorological and hydrological drought using drought indicators in Qarasu basin. *Earth and Space Physics*, 42(1), 159-170. DOI: 10.22059/jesphys.2016.54241 [In Persian]
22. Karimi, M., Shahedi, K., Raziei, T., & Miryaghoubzadeh, M. (2022). Meteorological and agricultural drought monitoring in Southwest of Iran using a remote sensing-based combined drought index. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 36(11), 3707-3724. DOI: 10.1007/s00477-022-02220-3
23. Karimi, M., Shahedi, K., Raziei, T., & Miryaghoobzadeh, M. (2020). Analysis of performance of vegetation indices on agricultural drought using remote sensing technique in Karkheh basin. *Iranian Journal of Remote Sensing & GIS*, 11(44), 29-46. DOI: 10.52547/gisj.11.4.29 [In Persian]
24. Keyantash, J. A., & Dracup, J.A. (2004). An aggregate drought index: assessing drought severity based on fluctuations in the hydrologic cycle and surface water storage. *Water Resources Research*, 40(9), 333-341. DOI: 10.1029/2003WR002610, 2004
25. Khosravi Yeganeh, S., Karampour, M., & Nasiri, B. (2023). Evaluation of vegetation drought in Kermanshah province using infrared images. *Journal of Geographical Studies of Mountainous Areas*, 3(12), 19-39. DOI: 10.52547/gsma.3.4.19 [In Persian]
26. Kogan, F.N. (1995). Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in Space Research*, 15, 91-100. DOI: 10.1016/0273-1177(95)00079-T
27. Kogan, F.N. (1997). Global drought watches from space. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78, 621-636. DOI: 10.1175/1520-0477(1997)078<0621:GDWFS>2.0.CO;2

28. Kogan, F.N. (2000). *Early Warning Systems for Drought Preparedness and Drought Management*. Lisbon, Portugal: World Meteorological Organization.
29. Liang, L., Qiu, S., Yan, J., Shi, Y. & Geng, D. (2021). VCI-based analysis on spatiotemporal variations of spring drought in China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(15), 7967-7981. DOI: 10.3390/ijerph18157967
30. Liu, Q., Zhang, S., Zhang, H., Bai, Y. & Zhang, J. (2020). Monitoring drought using composite drought indices based on remote sensing. *Science of the total environment*, 711, 134585-134605. DOI:10.1016/j.scitotenv.2019.134585
31. McKee, T.B. (1995). Drought monitoring with multiple time scales. Paper presented at the 9th Conference of Applied Climatology, Boston.
32. McKee, T.B., Doesken, N.J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. Paper presented at the 8th conference of Applied climatology, Anaheim, California.
33. Miralizadeh, A., Hejabi, S., & Kouchakzadeh, M. (2022). Evaluation of remote sensing indicators in drought conditions (case study: Urmia plain). *Journal of Meteorology and Atmospheric Sciences*, 5(2), 132-141. DOI: 10.22034/jmas.2023.404574.1202 [In Persian]
34. Mirmousavi, S.H., & Kareimeh, H. (2013). Effect of drought on vegetation cover using MODIS sensing images case: Kurdistan province. *Geography and Development*, 11(31), 57-76. DOI: 10.22111/gdij.2013.794 [In Persian]
35. Mishra, A.K., & Singh, V.P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1), 202-216. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2010.07.012
36. Mohammadi, Sh., Habashi, Kh., & Pourmanafi, S. (2018). Monitoring and prediction land use/ land cover changes and its relation to drought (Case study: sub-basin Parsel B2, Zayandeh Rood watershed). *RS & GIS for Natural Resource*, 9(1), 24-39 [In Persian]
37. Mullapudi, A., Vibhute, A.D., Mali, S. & Patil, C.H. (2023). A review of agricultural drought assessment with remote sensing data: methods, issues, challenges and opportunities. *Applied Geomatics*, 15(1), 1-13. DOI: 10.1007/s12518-022-00484-6
38. Nalbantis I, Tsakiris G. (2009). Assessment of hydrological drought revisited. *Water Resources Management*. 23(5), 881-897. DOI: 10.1007/s11269-008-9305-1
39. Navabi, N., Moghaddasi, M., & Gangi, N. (2021). Assessment of agricultural drought monitoring using various indices based on ground-based and remote sensing data (Case Study: Lake Urima Basin). *Watershed Engineering and Management*, 13(1), 1-12. DOI: 10.22092/ijwmse.2020.126860.1684 [In Persian]
40. Niazi, Y., Talebi, A., Mokhtari, M.H., & Vazifedoust, M. (2017). Assessing the efficiency of Vegetation Drought Index (VDI) and Temperature Drought Index (TDI) based on satellite images in central Iran. *Journal of Arid Biome*, 7(1), 79-94. DOI: 10.29252/aridbiom.7.1.79 [In Persian]
41. Rajsekhar, D., Singh, V.P., & Mishra, A.K. (2015). Multivariate drought index: An information theory-based approach for integrated drought assessment. *Journal of Hydrology*, 526, 164-182. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.11.031

42. Rezaei Banafsheh, M., Rezaei, A., & Faridpor, M. (2015) Analyzing agricultural drought in east Azarbaijan province emphasizing remote sensing technique and vegetation condition index. *Water and Soil Science*, 25(1), 113–123. [In Persian]
43. Rezaei Moghadam, M.H., Valizadeh Kamran, K.H., Rostamzadeh, H., & Rezaei, A. (2012) Evaluating the adequacy of MODIS in the assessment of drought (case study: Urmia lake basin). *Geography and Environmental Sustainability*, 2(5), 37–52. [In Persian]
44. Sandeep, P., Reddy, G.O., Jegankumar, R. & Kumar, K.A. (2021). Monitoring of agricultural drought in semi-arid ecosystem of Peninsular India through indices derived from time-series CHIRPS and MODIS datasets. *Ecological indicators*, 121, p.107033. DOI: 10.1016/j.ecolind.2020.107033
45. Sandholt, I., Rasmussen, K., & Andersen, J. (2002). A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sensing of Environment*. 79, 213–224. DOI: 10.1016/S0034-4257(01)00274-7
46. Shen, R., Huang, A., Li, B. & Guo, J. (2019). Construction of a drought monitoring model using deep learning based on multi-source remote sensing data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 79, 48-57. DOI: 10.1016/j.jag.2019.03.006
47. Solaimani, K. Darvishi, Sh., & Shokrian, F. (2019). Analysis of agricultural drought using remote sensing indices (Case study: Marivan city). *RS & GIS for Natural Resources*, 10(2), 15-35. [In Persian]
48. Sur, C., Park, S.Y., Kim, T.W. & Lee, J.H. (2019). Remote sensing-based agricultural drought monitoring using hydrometeorological variables. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23(12), 5244-5256. DOI: 10.1007/s12205-019-2242-0
49. Tucker, C.J. (1989). Comparing SMMR and AVHRR data for drought monitoring. *International Journal of Remote Sensing*, 10, 1663- 1672. DOI: 10.1080/01431168908903997
50. 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
51. Winkler, K., Gessner, U., & Hochschild, V. (2017). Identifying droughts affecting agriculture in Africa based on remote sensing time series between 2000–2016: Rainfall anomalies and vegetation condition in the Context of ENSO. *Remote Sensing*, 9, 831-858. DOI: 10.3390/rs9080831
52. Wu, H., Hayes, M.J., Weiss, A., & Hu, Q. (2001). An evaluation of the standardized precipitation index, the China-z index and the statistical z-score. *International Journal of Climatology*, 21, 745–758. DOI: 10.1002/joc.658
53. Zhang, Y., Xie, D., Tian, W., Zhao, H., Geng, S., Lu, H., Ma, G., Huang, J. & Choy Lim Kam Sian, K.T. (2023). Construction of an integrated drought monitoring model based on deep learning algorithms. *Remote Sensing*, 15(3), 667-687. DOI: 10.3390/rs15030667