

## Comparison of the Efficiency of Climatic Drought Indices (SPI, RDI, and SPEI) in Arid and Semi-Arid Regions Using the Remote Sensing-Based TVDI Index

J. Fotovat<sup>1</sup>, M.A. Asadi Zarch<sup>2\*</sup>

1. Master of Watershed Science and Engineering, Yazd University, Yazd, Iran.

2. Assistant Professor, Faculty of Natural Resources and Desert Studies, Yazd University, Yazd, Iran.

\* Corresponding Author: amin.asadi@yazd.ac.ir

Received date: 14/09/2024

Accepted date: 18/01/2025



[10.22034/JDMAL.2025.2041089.1481](https://doi.org/10.22034/JDMAL.2025.2041089.1481)

### Abstract

Monitoring and analyzing drought conditions are essential for optimal water resource management. Over the past decades, various indices have been developed to quantify drought characteristics. Given the increasing impact of climate change on drought events, selecting an index that performs effectively under changing climatic conditions is crucial. This study investigates drought conditions in the Central Plateau region of Iran from 2000 to 2021 by comparing the performance of three drought indices: The Standardized Precipitation Index (SPI), the Reconnaissance Drought Index (RDI), and the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI). While SPI relies solely on precipitation data, RDI and SPEI incorporate potential evapotranspiration. The effectiveness of these indices was assessed based on their correlation with soil moisture fluctuations, using the Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI) as a remote sensing-based soil moisture indicator. The study area comprises provinces in Iran's Central Plateau region. SPI was calculated using precipitation data from 16 selected synoptic stations, while potential evapotranspiration for RDI and SPEI was estimated using the FAO-Penman-Monteith model. Additionally, MODIS-derived NDVI and land surface temperature data were used to compute the TVDI index. A comparative analysis of the three drought indices, based on their coefficient of determination with TVDI, was conducted for each year of the study period. The results showed that SPI and RDI exhibited lower correlation with soil moisture (average coefficients of determination of 0.51 and 0.54, respectively) compared to SPEI, which demonstrated a stronger correlation (average coefficient of 0.66). Therefore, given its higher agreement with soil moisture data, SPEI is recommended as a more reliable index for drought assessment in arid and semi-arid regions.

**Keywords:** Precipitation; Evaporation and transpiration; Soil moisture; Dry and wet periods; Central Plateau of Iran

### How to cite this article

Fotovat, J. and Asadi Zarch, M.A. (2025). Performance Comparison of SPI, SPEI, and RDI Drought Indices Using TVDI Remote Sensing Index in Arid and Semi-Arid Regions. *Desert Management*, 13(1), 23-42. DOI: [10.22034/JDMAL.2025.2041089.1481](https://doi.org/10.22034/JDMAL.2025.2041089.1481)



## Extended Abstract

### Introduction

The increase in greenhouse gas concentrations, particularly carbon dioxide, due to intensified fossil fuel consumption since the Industrial Revolution has led to global warming and climate change (20). Continuous monitoring is essential for effective drought management, with precipitation being a key factor in drought occurrence (19). Given the global impact of climate change on temperature and evapotranspiration trends, incorporating potential evapotranspiration alongside precipitation in drought estimation is crucial (5). Among the notable meteorological drought indices that integrate both variables are the Palmer Drought Severity Index, the Reconnaissance Drought Index (RDI), and the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI). Drought arises from an imbalance between precipitation and evapotranspiration, resulting in soil moisture depletion (33). As a key indicator for evaluating meteorological drought indices, soil moisture plays a critical role in drought assessment. However, while some meteorological stations provide soil moisture measurements, the current sampling network remains insufficient. Consequently, research has increasingly focused on estimating soil moisture using remote sensing data. The Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI) is a widely used land surface dryness indicator, derived from the relationship between land surface temperature and NDVI (32). Validation studies comparing TVDI with in-situ soil moisture measurements and simulated data confirm its effectiveness in monitoring soil moisture levels (10). This study aims to evaluate the performance of SPI, SPEI, and RDI in drought estimation across central Iran, using soil moisture changes as the primary assessment criterion. TVDI is employed as a reliable indicator of soil moisture status. Notably, no comprehensive study or review on this topic has been identified in the existing literature.

### Material and Methods

In this study, the provinces of the Central Plateau of Iran, characterized by a predominantly arid and semi-arid climate, were selected as the study area (Fig 1). Monthly and annual temperature data, along with vegetation cover data from MODIS, were utilized to estimate soil surface moisture in the region (Table 1). The research period spanned from 2000 to 2021, incorporating meteorological data from 16 synoptic stations. The FAO-Penman-Monteith method (3, 37), recognized as the most accurate approach for estimating evapotranspiration across various climatic conditions, was employed to calculate potential evapotranspiration on a monthly basis. To assess drought conditions, the Standardized Precipitation Index (SPI) was applied, relying on long-term precipitation data across multiple time scales (1, 23). Additionally, the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) was calculated (31), utilizing a climatic water balance approach based on the difference between precipitation and potential evapotranspiration. The categorization of drought severity using SPEI follows the same classification as SPI. Similarly, the Reconnaissance Drought Index (RDI) was computed, requiring both precipitation and potential evapotranspiration data (6). RDI is derived by dividing total precipitation by total potential evapotranspiration over a given time step, with gamma distribution identified as the best fit for data modeling (42). The Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI), derived from NDVI and land surface temperature data (35), was used as an indicator of soil moisture. After computing the indices, SPI, SPEI, and RDI were compared with each other. Subsequently, their agreement with TVDI was assessed by calculating the coefficient of determination, providing insight into the most suitable index for drought monitoring in the region.

### Results and Discussion

Interpolated maps of annual SPI, SPEI, and RDI were analyzed at 16 selected stations in the Central Plateau of Iran (Figs. 2, 3, 4). These maps were generated using the inverse distance weighting method. The primary objective of this study is not to monitor drought trends over the statistical period but to evaluate the effectiveness of the applied indices in order to identify the most suitable index for drought assessment in the study area. Additionally, TVDI maps are presented in Fig. 5. The comparison of drought indices (Table 3) indicates that the average determination coefficients between SPI and RDI, as well as between SPI and SPEI, are lower than those between RDI and SPEI. This finding is expected, as SPI relies exclusively on precipitation data, leading to weaker agreement with RDI and SPEI, which incorporate both precipitation and potential evapotranspiration. Moreover, the agreement between SPI and SPEI is slightly stronger than that between SPI and RDI, while the highest correlation is observed between SPEI and RDI due to their shared drought estimation parameters. The primary aim of this study is to determine the most effective drought

index (SPI, SPEI, or RDI) for assessing drought in central Iran by evaluating their agreement with the TVDI index, a reliable indicator of soil moisture. The results indicate that SPI and RDI exhibit lower agreement with TVDI, with average determination coefficients of 0.51 and 0.54, respectively, whereas SPEI demonstrates a significantly higher agreement of 0.66 (Table 3).

**Conclusion**

The weaker performance of SPI in capturing soil moisture variations is attributed to its exclusion of potential evapotranspiration. In contrast, RDI and SPEI, both of which integrate precipitation and potential evapotranspiration, show stronger correlations with soil moisture dynamics. Among these, SPEI exhibits superior performance in estimating drought conditions in the Central Plateau of Iran, outperforming RDI in this region. Based on the findings, the SPI, which relies solely on precipitation data, exhibited the lowest performance among the indices examined. In contrast, the SPEI, which incorporates both precipitation and potential evapotranspiration to assess drought severity, demonstrated the highest level of accuracy and agreement with soil moisture variations.

**Keywords:** Precipitation; Evaporation and transpiration; Soil moisture; Dry and wet periods; Central Plateau of Iran

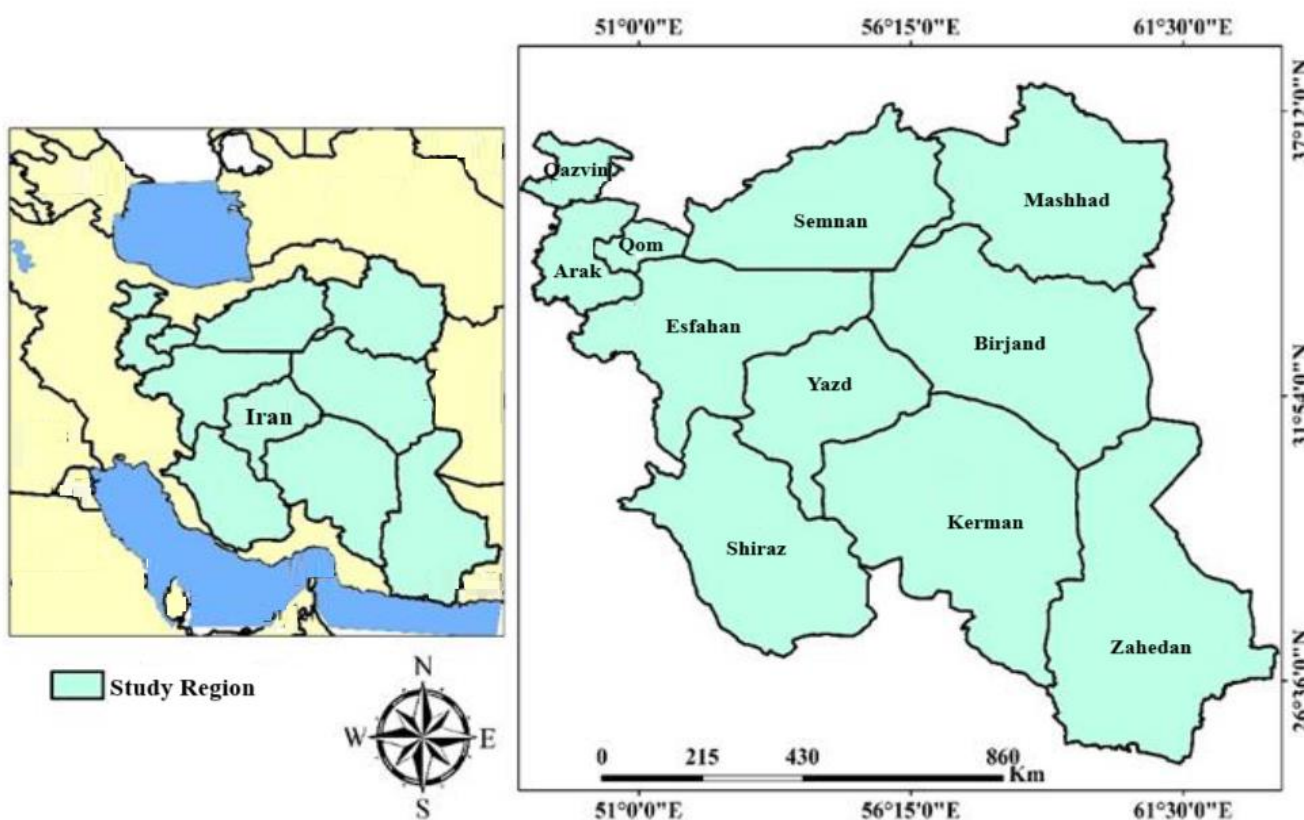


Fig 1. Study area map of the Central Plateau of Iran

Table 1. MODIS products used in the study

Spatial Resolution	Image Period	Temperature products	Study Period
1 kilometer	8-day	MOD11A2	2000 to 2021
Spatial Resolution	Image Period	Vegetation products	Study Period
1 kilometer	16-day	MOD13A2	2000 to 2021

Table 2. Drought classification based on the SPI index (28)

SPI Classification	
$SPI > 2$	Extremely wet
$1.5 < SPI \leq 2$	Severely wet
$1 < SPI \leq 1.5$	Moderately wet
$-1 < SPI \leq 1$	Normal
$-1.5 < SPI \leq -1$	Moderately drought
$2 < SPI \leq -1.5$	Severely drought
$SPI \leq -2$	Extremely drought

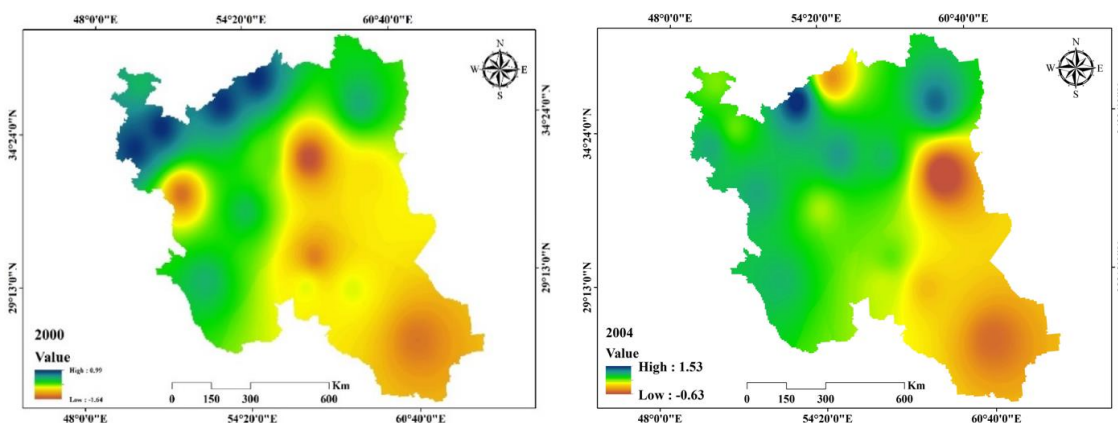


Fig 2. Annual SPI in the Central Plateau of Iran for the Years 2000 and 2004.

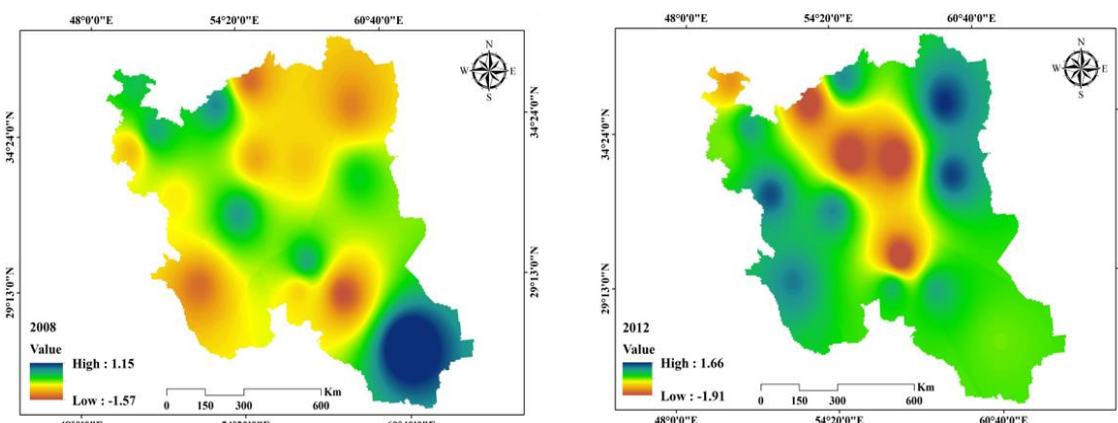


Fig 3. Annual SPEI in the Central Plateau of Iran for 2008 and 2012.

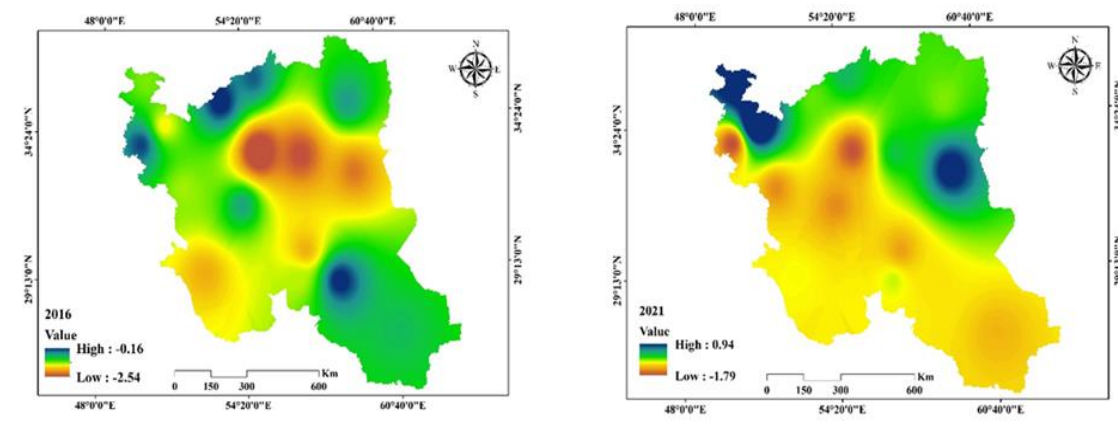


Fig 4. Annual RDI in the Central Plateau of Iran for 2016 and 2021.

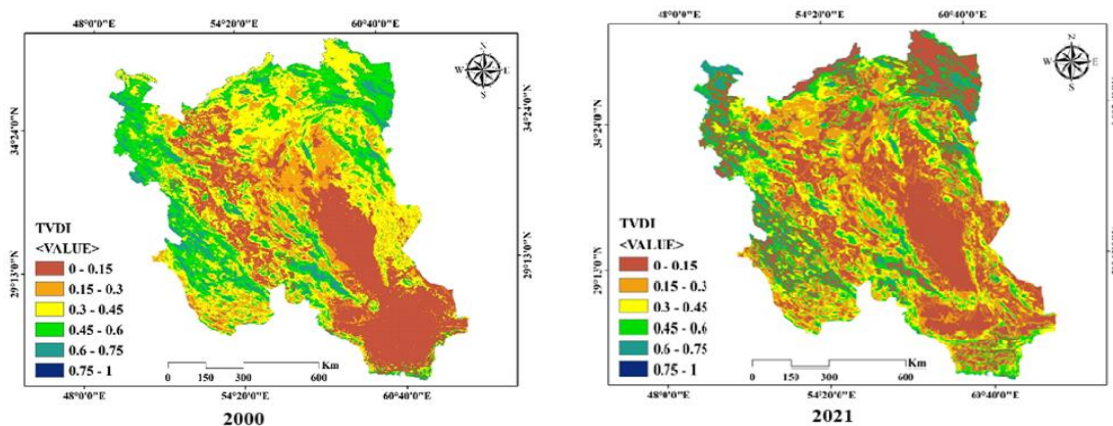


Fig 5. Annual TVDI in the Central Plateau of Iran for 2000 and 2021.

Table 3. Coefficients of determination between SPI, SPEI, RDI, and TVDI

Year	SPI & SPEI	SPI & RDI	RDI & SPEI	TVDI & SPI	TVDI & RDI	TVDI & SPEI
2000	0.38	0.25	0.42	0.33	0.4	0.55
2001	0.41	0.33	0.55	0.4	0.5	0.68
2002	0.52	0.42	0.63	0.3	0.32	0.47
2003	0.3	0.35	0.44	0.45	0.5	0.65
2004	0.38	0.41	0.72	0.55	0.47	0.66
2005	0.28	0.2	0.66	0.5	0.6	0.68
2006	0.44	0.36	0.55	0.47	0.5	0.69
2007	0.58	0.41	0.47	0.52	0.63	0.7
2008	0.62	0.42	0.65	0.6	0.55	0.77
2009	0.41	0.33	0.5	0.55	0.63	0.69
2010	0.33	0.25	0.4	0.5	0.58	0.59
2011	0.18	0.41	0.47	0.44	0.5	0.63
2012	0.29	0.44	0.55	0.52	0.48	0.6
2013	0.34	0.52	0.66	0.63	0.6	0.78
2014	0.39	0.52	0.7	0.55	0.5	0.57
2015	0.35	0.31	0.5	0.48	0.63	0.69
2016	0.42	0.19	0.33	0.44	0.55	0.74
2017	0.37	0.33	0.45	0.5	0.47	0.55
2018	0.42	0.38	0.55	0.63	0.6	0.68
2019	0.33	0.3	0.4	0.57	0.59	0.75
2020	0.51	0.5	0.66	0.55	0.62	0.66
2021	0.6	0.48	0.74	0.66	0.72	0.82
Mean	0.4	0.37	0.55	0.51	0.54	0.66





## مقایسه کارایی شاخص‌های خشکسالی اقلیمی (SPI، RDI و SPEI) در مناطق خشک و نیمه‌خشک با شاخص سنجش از دوری TVDI

جلال فتوت<sup>۱</sup>، محمد امین اسدی زارچ<sup>۲\*</sup>

۱. دانش آموخته کارشناسی ارشد علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

۲. استادیار، دانشکده منابع طبیعی و کویرشناسی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

\* نویسنده مسئول: [amin.asadi@yazd.ac.ir](mailto:amin.asadi@yazd.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۰/۲۹

doi [10.22034/JDMAL.2025.2041089.1481](https://doi.org/10.22034/JDMAL.2025.2041089.1481)

### چکیده

پایش و تحلیل شرایط خشکسالی یکی از مولفه‌های اصلی در مدیریت بهینه منابع آب است. در دهه‌های اخیر شاخص‌های متعددی برای کمی کردن ویژگی‌های خشکسالی توسعه یافته‌اند. همچنین با توجه به وقوع تغییر اقلیم و تأثیر آن بر روی رویدادهای خشکسالی، استفاده از شاخصی که عملکرد مناسبی در شرایط تغییر اقلیم ارائه دهد، از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. در پژوهش حاضر برای بررسی خشکسالی در ناحیه فلات مرکزی ایران در دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۱ (۱۳۷۸ تا ۱۳۹۹)، عملکرد شاخص‌های بارش استاندارد شده (SPI)، شناسایی خشکسالی (RDI) و بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل استاندارد شده (SPEI) مقایسه شدند. درحالی‌که شاخص SPI فقط بر اساس بارش می‌باشد، شاخص‌های RDI و SPEI از تبخیر و تعرق پتانسیل نیز استفاده می‌کنند. میزان تطابق تغییرات این شاخص‌ها با نوسانات رطوبت خاک به‌عنوان معیار انتخاب شاخص کارآمدتر در نظر گرفته شد. برای بررسی رطوبت خاک از شاخص سنجش از دوری TVDI استفاده شد. TVDI به‌عنوان شاخص مناسبی برای ارزیابی تغییرات رطوبت خاک شناخته شده است. پژوهش حاضر در استان‌های فلات مرکزی ایران انجام شد. در پژوهش حاضر در آغاز در ۱۶ ایستگاه منتخب با استفاده از داده‌های بارش، شاخص SPI محاسبه شد. برای آورد شاخص‌های SPEI و RDI، مدل فائو-پنمن-مانیتث برای تخمین تبخیر و تعرق پتانسیل استفاده شد. سپس از شاخص‌های مرتبط با مقدار پوشش گیاهی و دمای سطح زمین سنجنده مودیس برای محاسبه شاخص TVDI استفاده شد. نتایج مقایسه تطابق سه شاخص با TVDI از طریق محاسبه ضریب تبیین برای هر یک از سال‌های دوره آماری و میانگین کل دوره آماری نشان داد عملکرد شاخص‌های SPEI و RDI با مقدار میانگین ضریب تبیین به ترتیب ۰/۵۱ و ۰/۵۴ از SPEI با میانگین ۰/۶۶ کمتر است. با توجه به اینکه SPEI تطابق بیشتری را با داده‌های رطوبت خاک نشان داد، می‌تواند به‌عنوان شاخصی مناسب در بررسی‌های خشکسالی در مناطق خشک و نیمه‌خشک مورد استفاده قرار گیرد.

**واژگان کلیدی:** بارش؛ تبخیر و تعرق؛ رطوبت خاک؛ دوره‌های خشک و مرطوب؛ فلات مرکزی ایران

### استناد به این مقاله

فتوت، جلال و اسدی زارچ، محمد امین. (۱۴۰۴). مقایسه کارایی شاخص‌های خشکسالی SPI، RDI و SPEI در مناطق خشک و نیمه‌خشک با استفاده از شاخص سنجش از دوری TVDI. مدیریت بیابان، ۱۳(۱)، ۲۳-۴۲. DOI: [10.22034/JDMAL.2025.2041089.1481](https://doi.org/10.22034/JDMAL.2025.2041089.1481)



## ■ مقدمه

بررسی مخاطره‌های طبیعی در مناطق مختلف جهان نشان می‌دهد که خشکسالی یکی از زیان‌بارترین بلای طبیعی در جهان است (۱۷). بررسی و تخمین آثار زیان‌های خشکسالی بسیار سخت است. زیرا برخلاف بیشتر مخاطره‌های طبیعی، تخمین دقیق زمان شروع و پایان خشکسالی نسبتاً سخت است. تأثیر و نتایج خشکسالی به صورت تدریجی نمایان می‌شود و ممکن است به‌طور فراگیر در نواحی مختلف و وسیع جغرافیایی گسترش یابد. علاوه بر این، خشکسالی می‌تواند علت به وجود آمدن و یا شدت یافتن پدیده‌های مخاطره‌انگیز دیگر طبیعی مثل بادهای شدید و توفان گرد و خاک شود (۲۲). خشکسالی با کاهش مقدار منابع آبی قابل‌دسترس، موجب خسارت‌های زیادی می‌شود. خشکسالی بر بسیاری از منابع حوزه‌های آبخیز از جمله آبدهی و رسوب‌دهی رودخانه‌ها، آبدهی چاه‌ها و قنات‌ها، سطح سفره‌های آب زیرزمینی، تراکم پوشش گیاهی و رسوب‌دهی دامنه‌ها تأثیر می‌گذارد (۴). در مجموع می‌توان نتیجه گرفت خشکسالی موجب تخریب خاک، بیابان‌زایی، کمبود آب، مرگ گیاهان، طوفان‌های گرد و غبار، آتش‌سوزی و سایر بلایای طبیعی می‌شود که تأثیرات جدی بر کشاورزی، اکولوژی، اقتصاد و جامعه دارد.

پس از شروع انقلاب صنعتی و گسترش صنایع مختلف، افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی منجر به ازدیاد غلظت گازهای گلخانه‌ای خصوصاً دی‌اکسیدکربن شد. در نتیجه این فعالیت‌ها منجر به گرم شدن کره زمین شد. گرمایش جهانی بر روی دیگر متغیرهای سامانه اقلیمی تأثیر گذاشته و موجب تغییرات اقلیمی شده است (۲۰). در سال‌های اخیر نرخ افزایش دما زیاد بوده است. میانگین دما طی سال‌های ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۰ نسبت به سال‌های ۱۸۵۰ تا ۱۹۰۰ که دوره ماقبل صنعتی می‌باشد،  $1/09^{\circ}\text{C}$  افزایش یافته است و دما طی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰ نسبت به دوره پیش از صنعتی شدن  $0/99^{\circ}\text{C}$  افزایش یافته است (۳۰). بنابراین در چند دهه گذشته، گرم شدن کره زمین موجب به هم خوردن تعادل سامانه اقلیمی در مقیاس جهانی شده است (۱۴). نتایج بررسی‌های مختلف نشان داده‌است این افزایش دما، به‌طور قابل توجهی بر شدت خشکسالی تأثیر دارد (۱۹). با تشدید تغییرات اقلیمی، انتظار می‌رود فراوانی وقوع و پیامدهای

خشکسالی در حال حاضر و آینده تشدید شود (۵).

ارزیابی مداوم خشکسالی یکی از اصلی‌ترین راهبردهای مدیریت خشکسالی است (۱۹). اگرچه ارزیابی خشکسالی به کمک آمار و داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی از دقت زیادی برخوردار است، اما مسئله عدم تراکم کافی ایستگاه‌های هواشناسی در بسیاری از مناطق از جمله کشور ایران باعث می‌شود تعمیم نتایج به‌دست آمده به کل منطقه با خطا همراه باشد. ویژگی‌های خشکسالی ایران نشان می‌دهد که به‌طور کلی تمام مناطق کشور این پدیده را تجربه کرده‌اند (۷). امروزه برای حل مسئله پایش مکانی پدیده خشکسالی، از روش‌های مبتنی بر اطلاعات سنجش از دوری نیز استفاده می‌شود. شاخص‌های خشکسالی هواشناسی دارای مزایای جمع‌آوری آسان داده‌ها و معنای فیزیکی واضح هستند و اغلب برای تجزیه و تحلیل تغییرات مکانی و زمانی در خشکسالی استفاده می‌شوند (۳۰). خشکسالی در مرحله اول از کمبود بارندگی ناشی می‌شود. بنابراین، بیشتر شاخص‌های خشکسالی هواشناسی از بارش استفاده می‌کنند. این شاخص‌ها معمولاً برای استفاده در مطالعات خشکسالی استاندارد می‌شوند، به‌عنوان مثال، شاخص استاندارد بارش ( $\text{SPI}^1$ ) شاخص کلیدی برای ارائه نوسان‌های نرمال شده بارش است که توسط سازمان جهانی هواشناسی توصیه شده است (۱۶، ۲۵). اگر بارش به‌عنوان ورودی اصلی و تبخیر و تعرق پتانسیل به‌عنوان خروجی اصلی سامانه آبی در نظر گرفته شود، برای تخمین آب در دسترس هر دو پارامتر باید در نظر گرفته شوند. همچنین با توجه به وقوع تغییر اقلیم و افزایش دما، تبخیر و تعرق پتانسیل در بخش قابل توجهی از مناطق جهان افزایش یافته است. بنابراین در نظر گرفتن تبخیر و تعرق پتانسیل در تخمین خشکسالی ضروری است (۶). فاکتورهای تأثیرگذار در ارزیابی خشکسالی‌های اقلیمی، هر دو عامل بارندگی و تبخیر و تعرق می‌باشند (۷). شاخص‌های شناسایی خشکسالی ( $\text{RDI}^2$ )، شدت خشکسالی پالمیر ( $\text{PDSI}^3$ ) و شاخص بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل استاندارد شده ( $\text{SPEI}^4$ ) بر اساس بارندگی و نیز تبخیر و

<sup>1</sup> Standardized Precipitation Index

<sup>2</sup> Reclamation Drought Index

<sup>3</sup> Palmer Drought Severity Index

<sup>4</sup> Standardized Precipitation Evapotranspiration Index

شاخص TVDI در منطقه تبت مقایسه شده است (۲۶). کارایی شاخص‌های SPI و SPEI از طریق محاسبه همبستگی این شاخص‌ها با شاخص TDVI در منطقه یونان چین محاسبه شده است (۱۳). همچنین، در مطالعه‌ای برای تعیین مناسب بودن شاخص بارش استاندارد (SPI) و شاخص تبخیر و تعرق استاندارد شده بارندگی (SPEI)، از شاخص TVDI استفاده شده است (۸). مطالعه جامعی که بر اساس معیار کارآمدی مانند رطوبت خاک، عملکرد شاخص‌های اقلیمی خشکسالی در مناطق خشک و نیمه خشک فلات مرکزی ایران را مورد ارزیابی قرار دهد، یافت نشد. هدف از پژوهش حاضر بررسی عملکرد شاخص‌های SPI، SPEI و RDI در برآورد خشکسالی در مناطق مرکزی ایران می‌باشد. معیار ارزیابی عملکرد این شاخص‌ها، میزان تطابق آنها با تغییرات رطوبت خاک در نظر گرفته شد.

#### ■ مواد و روش

##### منطقه مورد بررسی

در این پژوهش استان‌های فلات مرکزی ایران برای بررسی در نظر گرفته شده‌اند (شکل ۱). کوه‌های البرز از شمال، زاگرس از غرب و جنوب و کوه‌های پراکنده خراسان از شرق، فلات مرکزی ایران را احاطه کرده است. بخش زیادی از منطقه دارای اقلیم گرم و خشک است؛ و در مناطق مرتفع‌تر، ملایم‌تر و مرطوب‌تر است.

##### داده‌های مورد استفاده

##### تصاویر ماهواره‌ای

در پژوهش حاضر تصاویر آماده دما و شاخص پوشش گیاهی در مقیاس‌های ماهانه و سالانه که از سنجنده مودیس استخراج شده است، برای برآورد رطوبت خاک در محدوده مورد مطالعه استفاده شد. تصاویر مورد استفاده پژوهش در جدول ۱ نشان داده شده است. تصاویر مربوط به LST که به صورت ۸ روز یکبار و NDVI که به صورت ۱۶ روز یکبار در دسترس می‌باشند، در سامانه گوگل ارث انجین اخذ و پردازش شدند و میانگین LST و NDVI برای هر ماه در دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۱ محاسبه شد.

تعرق پتانسیل می‌باشد. SPEI بر اساس مفهوم تعادل اقلیمی آب است که از اختلاف بین بارندگی و تبخیر و تعرق پتانسیل محاسبه می‌گردد. این مفهوم، در دسترس بودن آب را با تقاضای تبخیر جوی مقایسه می‌کند (۳۹). خشکسالی نتیجه عدم توازن بین بارش و تبخیر و تعرق است و موجب کاهش رطوبت خاک می‌شود (۳۳). رطوبت خاک متغیر بسیار مهمی در سامانه آب و هوایی است، و برای چرخه‌های جهانی آب، انرژی و کربن اهمیت زیادی دارد (۳۴). پایش سنتی خشکسالی نیز بیشتر بر پایه داده‌های رطوبت خاک در برای توصیف میزان و شدت خشکسالی است (۴۱). بنابراین رطوبت خاک را می‌توان به عنوان یک معیار کارآمد جهت بررسی کارایی شاخص‌های متنوع خشکسالی هواشناسی در نظر گرفت. اگرچه در برخی از ایستگاه‌های هواشناسی رطوبت خاک برداشت می‌شود، اما در مجموع شبکه برداشت، تراکم نامناسبی دارد. به همین دلیل در طول دهه‌های گذشته، تحقیقات قابل توجهی برای تخمین رطوبت خاک با استفاده از داده‌های سنجنش از راه دور انجام شده است. به‌طور کلی در سال‌های اخیر، فناوری سنجنش از دور مکانی پیشرفت زیادی در پایش خشکسالی داشته است و مزایای آن در دستیابی سریع به اطلاعات طیفی در مقیاس بزرگ از پوشش زمین در زمان و مکان، تکمیل‌کننده کاستی‌های روش‌های پایش سنتی است (۲۱).

شاخص خشکی سطح زمین به نام شاخص خشکی گیاهی دمایی (TVDI) بر اساس پارامترسازی تجربی رابطه بین TS و NDVI مورد بررسی قرار گرفته است (۳۲). بر اساس مقایسه نتایج شاخص TVDI با اندازه‌گیری‌های محلی رطوبت خاک و نیز نتایج شبیه‌سازی رطوبت خاک با استفاده از مدل‌ها، کارایی شاخص TVDI برای ارزیابی رطوبت خاک زیاد می‌باشد (۱۰). بنابراین TVDI به عنوان یک شاخص کارآمد برای ارزیابی وضعیت رطوبت خاک پذیرفته شده است. در بررسی استفاده از شاخص TVDI به بررسی شاخص SPEI برای ارزیابی تغییرات زمانی-مکانی خشکسالی در حوضه رودخانه یانگ تسه چین پرداخته شده است (۱۱). در پژوهشی دیگر، شاخص SPEI محاسبه شده با داده‌های ۳۸ ایستگاه طی دوره ۱۹۷۱-۲۰۱۴ با



لوجستیک سری‌های  $D$  نیز با توجه به رابطه ۶ محاسبه می‌شود:

$$F(x) = \left[ 1 + \left( \frac{\alpha}{X - \gamma} \right)^\beta \right]^{-1} \quad (۶)$$

در مرحله بعد جهت تبدیل مقادیر  $f(x)$  به مقادیر نرمال استاندارد  $Z$  از مدل تقریبی کلاسیک آمبراموتز-استگان استفاده می‌شود و در نهایت مقادیر SPEI طبق رابطه ۷ به دست می‌آید.

$$SPEI = W - \frac{C_0 + C_1W + C_2W^2}{1 + d_1W + d_2W^2 + d_3W^3} \quad (۷)$$

که در آن  $W = \sqrt{-2\ln(P)}$  برای  $P \leq 0.5$  بوده و  $P$  احتمال بیشتر شدن مقادیر تعیین شده  $D$  است. مقادیر  $d_3=0.001308$ ،  $d_2=0.189269$ ،  $d_1=1.432788$ ،  $c_2=0.010328$  و  $c_1=0.802853$ ،  $c_0=2.515517$  مشخص هستند (۳۱). طبقات خشکسالی بر اساس شاخص SPEI مانند شاخص SPI می‌باشد (جدول ۲).

#### محاسبه RDI

جهت محاسبه RDI مانند SPEI، علاوه بر مقدارهای بارش به داده‌های تبخیر و تعرق پتانسیل نیز نیاز است. در پژوهش حاضر شاخص خشکسالی RDI در مقیاس زمانی یک ساله یا ۱۲ ماهه در ایستگاه‌های منتخب مورد بررسی محاسبه شده است. برای محاسبه شاخص RDI در آغاز طبق رابطه ۸ مقدار مجموع بارش در گام زمانی مورد نظر به مجموع تبخیر و تعرق پتانسیل در گام زمانی مورد نظر تقسیم می‌شود.

$$x_k^{(i)} = \frac{\sum_{j=1}^k P_{ij}}{\sum_{j=1}^k PET_{ij}}, \quad i = 1 \text{ to } N \quad (۸)$$

در رابطه ۸،  $P_{ij}$  و  $PET_{ij}$  به ترتیب بیانگر بارندگی و تبخیر و تعرق پتانسیل در ماه  $j$ ام از سال  $i$ ام می‌باشند.  $N$  نشان‌دهنده تعداد سال‌های دوره آماری می‌باشد.  $k$  نشان‌دهنده تعداد ماه‌های پیوسته می‌باشد. برآزش مقدارهای  $x_k$  در برخی مناطق جهان به توزیع‌های متفاوت نشان داد که توزیع گاما بهترین برآزش را ارائه می‌کند (۴۲). برای مشاهده سایر مراحل محاسبه شاخص RDI به (۶) مراجعه

شد (۴). کلاس‌های شاخص SPI مطابق جدول ۲ طبقه‌بندی شد.

شاخص بارش - تبخیر و تعرق پتانسیل استاندارد شده

(SPEI)

تخمین، مقادیر بارندگی و تبخیر و تعرق پتانسیل بر اساس مجموع سالانه برای دوره زمانی مورد نظر برای هر ایستگاه با SPEI به دست آمد. سپس طبق رابطه ۱، مقادیر مجموع تبخیر و تعرق پتانسیل از مجموع بارش به دست آمده در هر گام زمانی کسر شد.

$$Di = Pi - PETi \quad (۱)$$

در این رابطه  $Di$  تفاوت بارش،  $Pi$  تبخیر و تعرق پتانسیل،  $PETi$  بر حسب  $mm$  برای سال  $i$  است. برای محاسبه SPEI به یک توزیع سه پارامتری نیاز است که مقادیر منفی را شامل شود. بر اساس پژوهش‌های انجام شده، با توجه به سازگاری بیشتر توزیع لجستیک با چولگی و همچنین دنباله طولانی‌تر در مقادیر انتهایی، این توزیع کارآمدی بیشتری را در تعیین تابع احتمال (pdf) داده‌های سری زمانی  $D$  به نمایش گذاشته است (۳۱). شکل کلی تابع چگالی احتمال مربوط به توزیع لجستیک لگاریتمی طبق رابطه ۲ است:

$$f(x) = \frac{\beta}{\alpha} + \left( \frac{x-\gamma}{\alpha} \right) \beta - 1 \left[ \left( 1 + \left( \frac{x-\gamma}{\alpha} \right) \beta \right) \right]^{-2} \quad (۲)$$

که در این رابطه  $\alpha$ ،  $\beta$  و  $\gamma$  پارامترهای مقیاس، شکل و مبدا می‌باشد.  $x$  نیز نشان‌دهنده سری تجمعی برای مقادیر  $D$  در مقیاس زمانی تعیین شده می‌باشد. پارامترهای این توزیع را می‌توان از روش‌های مختلفی محاسبه کرد. در این مطالعه روش گشتاورهای  $L$  طبق روابط ۳ تا ۵ مورد استفاده قرار گرفت.

$$\beta = \frac{2w_1 - w_0}{6w_1 - w_0 - 6w_2} \quad (۳)$$

$$\alpha = \frac{(w_0 - 2w_1)\beta}{\Gamma(1 + \frac{1}{\beta})\Gamma(1 - \frac{1}{\beta})} \quad (۴)$$

$$\gamma = w_0 - \alpha\Gamma(1 + \frac{1}{\beta})\Gamma(1 - \frac{1}{\beta}) \quad (۵)$$

در این رابطه  $\Gamma$  بیانگر تابع گاما و  $w_0$ ،  $w_1$  و  $w_2$  بیانگر شتاورهای وزنی احتمال هستند. پس از تابع توزیعی لوگ

با تفکیک مکانی مشابه نقشه‌های TVDI محاسبه شدند. در مرحله بعد، برای هر سال از دوره آماری مورد مطالعه، ابتدا شاخص‌های SPI، RDI و SPEI با یکدیگر و سپس هر کدام با شاخص TVDI از طریق محاسبه میانگین ضریب تبیین مقایسه شدند. سپس از ضرایب تعیین سالانه به دست آمده برای کل دوره آماری میانگین گرفته شد. ارزیابی عملکرد شاخص‌های SPI، RDI و SPEI بر اساس میانگین ضریب تبیین دوره آماری بین هر یک از شاخص‌های مذکور و شاخص TVDI انجام شد.

### ■ نتایج و بحث

#### بررسی شاخص SPI

نقشه‌های درون‌یابی شده شاخص SPI سالانه بر اساس مقدارهای این شاخص در ۱۶ ایستگاه منتخب فلات مرکزی ایران با استفاده از روش وزن دهی فاصله معکوس تهیه شده است. نقشه‌های خشکسالی مربوط به سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۰۴ به‌عنوان نمونه ارائه شده است (شکل ۲). هر چه مقدارهای برآورد شده شاخص SPI کمتر باشد، شدت خشکسالی بیشتر است. الگوی خشکسالی بر اساس شاخص SPI در سال‌های مختلف دوره آماری نسبتاً متفاوت است. بر اساس نتایج شاخص SPI، در سال ۲۰۱۷ خشکسالی وسیعی در منطقه مورد مطالعه رخ داده است. هدف اصلی پژوهش حاضر، ارزیابی خشکسالی در منطقه مورد مطالعه نمی‌باشد، بلکه هدف ارزیابی کارایی شاخص‌های مورد استفاده در منطقه مورد مطالعه است تا در نهایت شاخص کارآمدتر مشخص گردد. SPI کارآیی لازم برای محاسبه خشکسالی‌های کوتاه‌مدت که در بررسی‌های کشاورزی برای ارزیابی رطوبت قابل‌دسترس گیاه مناسب است را ارائه دهد. همچنین با استفاده از این شاخص می‌توان خشکسالی‌های بلندمدت که در ارزیابی جریان‌های رودخانه‌ای و نیز مخازن آب زیرزمینی مهم می‌باشد را مطالعه کرد.

#### بررسی شاخص SPEI

این شاخص بر اساس داده‌های بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل به‌دست می‌آید. نقشه‌های خشکسالی پهنه‌بندی شده شاخص SPEI برای سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۱۲ در شکل ۳ نمایش داده شده است.

شود. جدول طبقات خشکسالی بر اساس شاخص RDI نیز مانند شاخص SPI می‌باشد (جدول ۲). شاخص‌های خشکسالی مورد استفاده در این بررسی در نرم افزار متلب در مقیاس سالانه محاسبه شدند.

#### تخمین رطوبت خاک (TVDI)

یکی از شاخص‌های تعریف شده با استفاده از نمودار پراکندگی دما / پوشش گیاهی، شاخص TVDI است (۳۵). شاخص رطوبتی TVDI به کمک مقدارهای NDVI و دمای سطح زمین (TS) به‌دست می‌آید. این شاخص به صورت یک مثلث پراکندگی می‌باشد که بسته به شرایط آب و هوایی و پوشش گیاهی متغیر است. پارامتر صحیح مدل، نیاز به وضعیت آب و هوای منطقه برای مشخص کردن لبه‌های مثلث تبخیری دارد. به‌خصوص هنگام استفاده از تصاویر با وضوح فضایی کم، پیکسل ۱۰۰۰m یا بیشتر. این شاخص از رابطه ۹ محاسبه می‌شود.

$$TVDI = \frac{T_s - T_{smin}}{T_{smax} - T_{smin}} \quad (9)$$

که  $T_s$  بیانگر دمای سطح زمین است.  $T_{smax}$  نیز از رابطه ۱۰ به‌دست می‌آید.  $T_{smin}$  بیانگر دمای حداقل در سطح زمین می‌باشد.

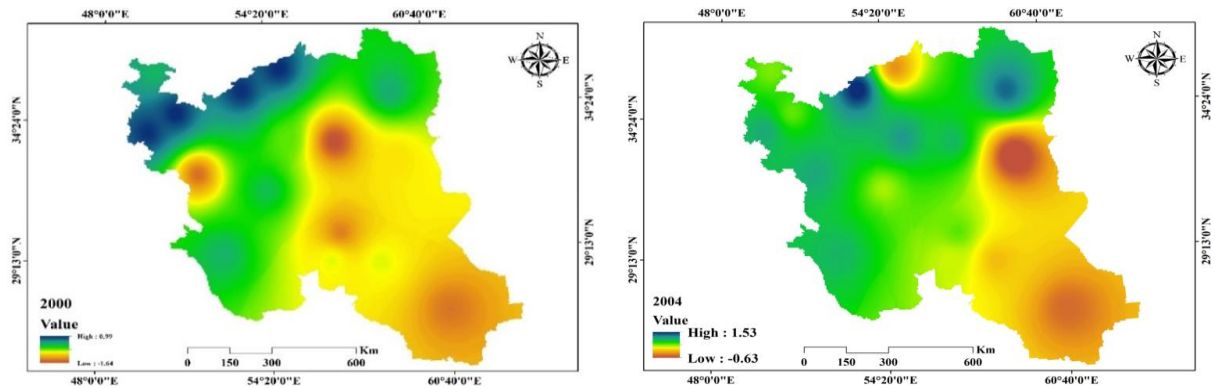
$$T_s \max = (a + b) * NDVI \quad (10)$$

در این رابطه NDVI بیانگر شاخص پوشش گیاهی است و با استفاده از رابطه ۱۱ محاسبه می‌شود. همچنین مقدارهای  $a$  و  $b$  از طریق رابطه‌ی خط بین دما و پوشش گیاهی به‌دست می‌آید.

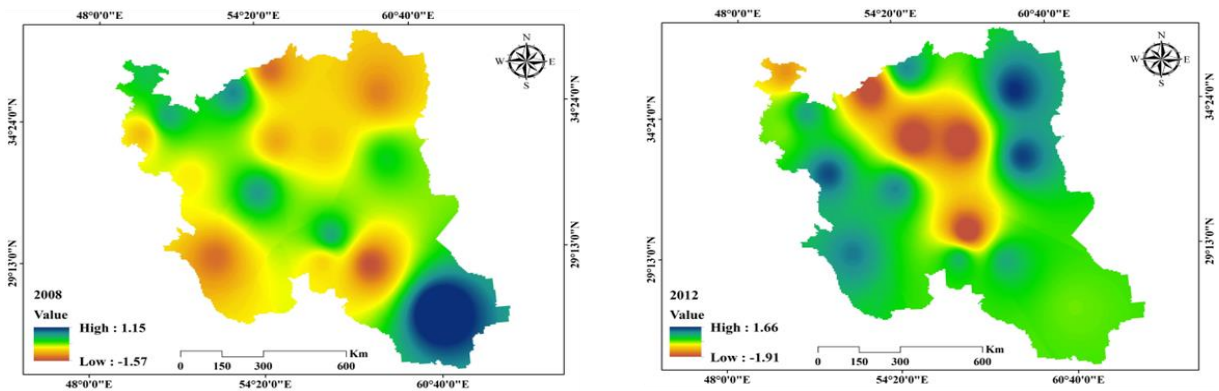
$$NDVI = \frac{R - NIR}{R + NIR} \quad (11)$$

در این رابطه NIR بیانگر باند مادون قرمز نزدیک و R نشان‌دهنده باند قرمز می‌باشد.

شاخص TVDI ماهانه با استفاده از تصاویر متوسط ماهانه محاسبه شده برای LST و NDVI در سامانه گوگل ارث انجین برای دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۱ محاسبه شد. برای محاسبه میانگین سالانه TVDI، میانگین نقشه‌های TVDI مربوط به ۱۲ ماه هر سال محاسبه شد (۸، ۱۳). نقشه‌های درون‌یابی شده SPI، RDI و SPEI نیز در مقیاس سالانه و



شکل ۲. مقدارهای SPI سالانه فلات مرکزی ایران در سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۰۴



شکل ۳. مقدارهای SPEI سالانه فلات مرکزی ایران در سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۱۲

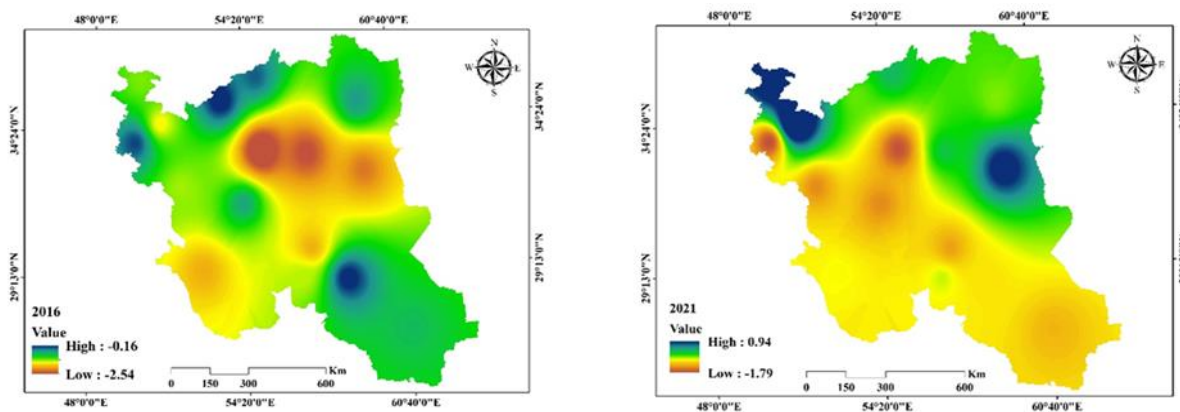
بیشتر با وقوع خشکسالی روبرو بوده است. همچنین بر اساس شاخص RDI نیز در سال ۲۰۲۱ خشکسالی گسترده‌ای در منطقه مورد بررسی اتفاق افتاده است. اما به‌طور کلی پراکنش مکانی خشکسالی در منطقه مورد بررسی بر اساس دو شاخص RDI و SPEI که از داده‌های مشابه استفاده می‌کنند، نسبتاً متفاوت است.

**بررسی رطوبت خاک با استفاده از شاخص TVDI**  
برآورد رطوبت خاک برای مدیریت بهینه منابع آب و خاک ضروری است. رطوبت خاک فاکتوری مهم در چرخه هیدرولوژیک است که در توازن جهانی انرژی و آب به دلیل اثر بر فرآیندهای هیدرولوژیک، اکولوژیک و اقلیمی دارد. رطوبت یکی از عوامل مهم و حیاتی برای پوشش گیاهی و هر جاندار زنده و غیره زنده دیگری است. مقدار شاخص رطوبتی TVDI، بین صفر و ۱ یا صفر و ۱۰۰ درصد متغیر می‌باشد. مقدارهای شاخص TVDI در منطقه فلات مرکزی ایران برای سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۲۱ به عنوان سال‌های اول و آخر دوره آماری در شکل ۵ نمایش داده شده است.

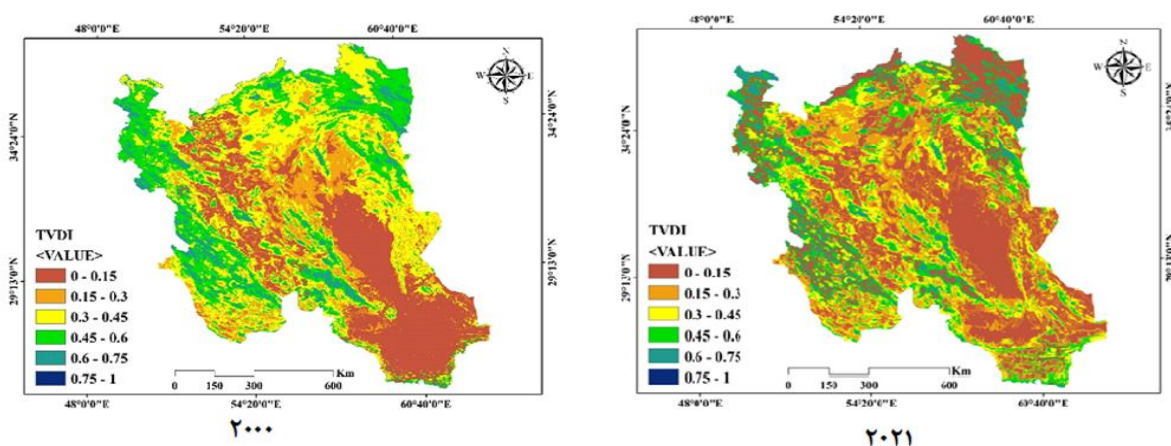
بر اساس جدول ۲، طبقه‌بندی مقدارهای هر سه شاخص SPEI، RDI و یکسان است. بنابراین در مورد شاخص SPEI نیز، مقدارهای کمتر نشان‌دهنده خشکسالی شدیدتر و مقدارهای بزرگ‌تر بیانگر ترسالی بیشتر هستند. بر اساس نتایج، جنوب شرق منطقه مورد بررسی در طول دوره آماری نسبت به دیگر مناطق با وقوع خشکسالی‌های بیشتری مواجه بوده است. همچنین بر پایه شاخص SPEI، سال ۲۰۲۱ که سال آخر دوره آماری می‌باشد، گسترده‌ترین خشکسالی در طول دوره آماری در منطقه مورد مطالعه رخ داده است.

#### بررسی شاخص خشکسالی RDI

وجه مشترک شاخص‌های RDI و SPEI اینست که هر دو شاخص به کمک داده‌های بارندگی و تبخیر و تعرق برآورد می‌شوند. مقدارهای RDI برای سال‌های ۲۰۱۶ و ۲۰۲۱ در شکل ۴ نمایش داده شده است. بر اساس شاخص RDI نیز مانند SPEI، بخش‌های جنوب شرقی ایران مرکزی در طول دوره آماری نسبت به سایر مناطق



شکل ۴. مقدارهای RDI سالانه در فلات مرکزی ایران در سال‌های ۲۰۲۱ و ۲۰۱۶



شکل ۵. مقدارهای شاخص TVDI برای سال‌های ۲۰۲۱ و ۲۰۰۰

نمایش داده شده است. میانگین ضرایب همبستگی بین SPEI و RDI و همچنین بین SPI و SPEI پایین‌تر از میانگین ضرایب تعیین بین RDI و SPEI است. طبیعتاً چون شاخص SPI یک شاخص بارش محور است و برای محاسبه آن فقط اطلاعات بارش مورد نیاز است، تطابق کمتری را با شاخص‌های SPEI و RDI ارائه می‌دهد. البته لازم به ذکر است تطابق SPI و SPEI اندکی بیشتر از RDI و SPEI باشد. تطابق RDI و SPEI نیز طبیعتاً چون هر دو شاخص از پارامترهای یکسانی برای تخمین خشکسالی استفاده می‌کنند، به‌طور قابل توجهی از دو مورد قبلی بالاتر است.

هدف اصلی پژوهش حاضر تعیین شاخص کارآمدتر از بین شاخص‌های SPI، SPEI و RDI در تخمین خشکسالی در مناطق مرکزی ایران از طریق بررسی میزان تطابق این سه شاخص با شاخص TVDI می‌باشد. به‌عنوان

نتایج نشان داد که در دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۵، بیشترین مقدار رطوبت سطحی در شمال و جنوب غرب فلات مرکزی است. در این ۶ سال، کمترین میزان رطوبت مربوط به مرکز فلات مرکزی و کویر می‌باشد. در این منطقه به‌دلیل دمای زیاد و عدم وجود پوشش گیاهی، مقدار این شاخص بسیار کم و در بیشتر موارد نزدیک صفر می‌باشد. در همه این ۶ سال، میزان رطوبت در نواحی کوهستانی و ارتفاع زیاد با پوشش گیاهی بالا بیشتر بوده است. در بازه زمانی ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۱، تغییرات رطوبت نسبت به بازه اول کمتر است. در سال ۲۰۰۴ حداکثر رطوبت تا نزدیک ۱ نیز می‌باشد، اما در بازه دوم حداکثر تا ۰/۶ رسیده است.

#### بررسی میزان تطابق شاخص‌های خشکسالی

میزان تطابق سه شاخص خشکسالی مورد استفاده با یکدیگر برای هر یک از سال‌های دوره آماری در (جدول ۳)

فلات مرکزی ایران دارد. بنابراین عملکرد بهتری را ارائه می دهد.

در حالیکه ایران مرکزی از خشکسالی های مکرر رنج می برد، تغییرات مکانی و زمانی و نیروهای محرک خشکسالی در این منطقه تحت تغییرات آب و هوایی هنوز به طور کامل مشخص نشده است. هر رخداد خشکسالی دارای ویژگی های مکانی و زمانی منحصر به فردی است. با این حال، شاخص های مختلف پایش خشکسالی ممکن است نتایج نسبتاً متفاوتی را برای یک رویداد مشخص خشکسالی ارائه دهند (۸). خشکسالی های هواشناسی به دلیل کمبود بارندگی و تبخیر زیاد رخ می دهد. وقوع خشکسالی های هواشناسی اغلب باعث بروز و آغاز انواع دیگر خشکسالی ها می شود (۲۹). بنابراین پایش کارآمد خشکسالی های هواشناسی ضروری است، زیرا این پایش ها مبنی هشدارهای اولیه و انجام مدیریت ریسک در حوزه منابع آب و تولیدات کشاورزی است (۱۱).

یک شاخص کارآمد برای ارزیابی وضعیت رطوبت خاک شناخته شده است. همچنین (جدول ۳) ضرایب تعیین بین SPI، SPEI و RDI و شاخص TVDI را برای هر یک از سال های دوره آماری نشان می دهد. نتایج (جدول ۳) نشان می دهد، در بیشتر سال ها، شاخص SPI کمترین و شاخص SPEI بیشترین تطابق را با شاخص TVDI ارائه می دهند. بررسی میانگین ضرایب تبیین شاخص ها نشان می دهد عملکرد شاخص های SPI و RDI با مقدار میانگین به ترتیب ۰/۵۱ و ۰/۵۴ از SPEI با میانگین ۰/۶۶ کمتر است. بارش به عنوان ورودی اصلی و تبخیر و تعرق پتانسیل به عنوان خروجی اصلی یک سامانه آبی در نظر گرفته می شوند. طبیعتاً چون SPI تبخیر و تعرق پتانسیل را در نظر نمی گیرد، تطابق کمتری با تغییرات رطوبت خاک دارد. از بین دو شاخص RDI و SPEI که هر دو متغیر اصلی ورودی (بارش) و خروجی (تبخیر و تعرق) را در نظر می گیرند، SPEI دارای تطابق بیشتری با تغییرات رطوبت خاک در

جدول ۳: ضرایب تبیین بین شاخص های SPI، RDI و SPEI و همچنین هر یک از این شاخص ها با TVDI

سال	SPEI و SPI	RDI و SPI	SPEI و RDI	TVDI و SPI	TVDI و RDI	TVDI و SPEI
۲۰۰۰	۰/۳۸	۰/۲۵	۰/۴۲	۰/۳۳	۰/۴	۰/۵۵
۲۰۰۱	۰/۴۱	۰/۳۳	۰/۵۵	۰/۴	۰/۵	۰/۶۸
۲۰۰۲	۰/۵۲	۰/۴۲	۰/۶۳	۰/۳	۰/۳۲	۰/۴۷
۲۰۰۳	۰/۳	۰/۳۵	۰/۴۴	۰/۴۵	۰/۵	۰/۶۵
۲۰۰۴	۰/۳۸	۰/۴۱	۰/۷۲	۰/۵۵	۰/۴۷	۰/۶۶
۲۰۰۵	۰/۳۸	۰/۲	۰/۶۶	۰/۵	۰/۶	۰/۶۸
۲۰۰۶	۰/۴۴	۰/۳۶	۰/۵۵	۰/۴۷	۰/۵	۰/۶۹
۲۰۰۷	۰/۵۸	۰/۴۱	۰/۴۷	۰/۵۲	۰/۶۳	۰/۷
۲۰۰۸	۰/۶۲	۰/۴۲	۰/۶۵	۰/۶	۰/۵۵	۰/۷۷
۲۰۰۹	۰/۴۱	۰/۳۳	۰/۵	۰/۵۵	۰/۶۳	۰/۶۹
۲۰۱۰	۰/۳۳	۰/۲۵	۰/۴	۰/۵	۰/۵۸	۰/۵۹
۲۰۱۱	۰/۱۸	۰/۴۱	۰/۴۷	۰/۴۴	۰/۵	۰/۶۳
۲۰۱۲	۰/۲۹	۰/۴۴	۰/۵۵	۰/۵۲	۰/۴۸	۰/۶
۲۰۱۳	۰/۳۴	۰/۵۲	۰/۶۶	۰/۶۳	۰/۶	۰/۷۸
۲۰۱۴	۰/۳۹	۰/۵۲	۰/۷	۰/۵۵	۰/۵	۰/۵۷
۲۰۱۵	۰/۳۵	۰/۳۱	۰/۵	۰/۴۸	۰/۶۳	۰/۶۹
۲۰۱۶	۰/۴۲	۰/۱۹	۰/۳۳	۰/۴۴	۰/۵۵	۰/۷۴
۲۰۱۷	۰/۳۷	۰/۳۳	۰/۴۵	۰/۵	۰/۴۷	۰/۵۵
۲۰۱۸	۰/۴۲	۰/۳۸	۰/۵۵	۰/۶۳	۰/۶	۰/۶۸
۲۰۱۹	۰/۳۳	۰/۳	۰/۴	۰/۵۷	۰/۵۹	۰/۷۵
۲۰۲۰	۰/۵۱	۰/۵	۰/۶۶	۰/۵۵	۰/۶۲	۰/۶۶
۲۰۲۱	۰/۶	۰/۴۸	۰/۷۴	۰/۶۶	۰/۷۲	۰/۸۲
میانگین	۰/۴	۰/۳۷	۰/۵۵	۰/۵۱	۰/۵۴	۰/۶۶

چنگ<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۲۲)، چن و همکاران (۲۰۲۴) گزارش کرده اند TVDI محتوای رطوبت خاک مناطق مورد مطالعه را به‌طور کارآمدی منعکس کرده است (۳۵، ۱۲، ۹). میانگین تطابق بین شاخص‌های RDI و SPEI در دوره آماری مورد مطالعه بر اساس جدول ۳ برابر ۰/۵۵ بود. در حالیکه جدول ۳ نشان می‌دهد ضریب تبیین بین شاخص‌های TVDI و SPEI برابر ۰/۶۶ می‌باشد. بنابراین، تطابق SPEI و TVDI به طور قابل توجهی نسبت به RDI و SPEI بیشتر است. در نتیجه اگر بر اساس بررسی‌های انجام گرفته جهانی، SPEI را به عنوان یک شاخص کارآمد خشکسالی در نظر بگیریم (۱۵)، در این بررسی شاخص TVDI کارآیی قابل قبولی را در ارزیابی عملکرد شاخص‌های خشکسالی هواشناسی نشان داده است.

### ۳. آیا شاخص TVDI برای پایش خشکسالی نیز مناسب است؟

برای بررسی خشکسالی کشاورزی که با کاهش رطوبت خاک آغاز می‌شود، می‌توان از TVDI استفاده کرد. TVDI شاخصی مهم برای تولید محصولات کشاورزی نیز می‌باشد (۱۳). تبخیر و تعرق عنصر مهمی در این دو نوع خشکسالی است و فرآیندهای فیزیولوژیک و هواشناسی محصول را کنترل می‌کند (۲۶).

در بسیاری از مناطق شاخص TVDI به طور مستقیم برای پایش خشکسالی نیز به کار گرفته شده است. تحقیقات شامل مناطق مختلف آب و هوایی مانند مناطق خشک شمال آفریقا (۲۴)، آب و هوای مدیترانه ای استرالیا (۴۰)، مناطق معتدل اروپا (۳۸)، تا جنگل‌های بارانی گرمسیری آمریکای جنوبی (۱۸)، استان هنان در چین (۲۷) و یوننان در چین (۱۳) بر سازگاری و کاربرد گسترده TVDI در ارزیابی شرایط خشکسالی تأکید می‌کند.

در دهه‌های اخیر، فراوانی خشکسالی‌ها افزایش یافته است. توسعه روش‌های جدید برای ارزیابی رویدادهای خشکسالی می‌تواند به ما در درک بهتر الگوهای مکانی-زمانی خشکسالی و شکل‌گیری استراتژی‌های خشکسالی کمک کند. اخیراً نسخه‌های بهبود یافته TVDI معرفی

انتخاب شاخص خشکسالی اقلیمی مناسب، گام آغازین پژوهش‌های خشکسالی است. با توجه به نتایج به دست آمده در این مطالعه، سه سوال پژوهشی مطرح شد که در بخش زیر این سوال‌ها بیان شده است و سپس در مورد آنها بحث شده است. در پایان این بخش، چند مورد از محدودیت‌های تحقیق نیز ذکر شده است.

### ۱. کدام یک از سه شاخص SPEI، RDI و SPEI برای پایش خشکسالی‌های اقلیمی ایران مرکزی مناسبتر است؟

با بررسی تطابق شاخص TVDI با سه شاخص SPEI، RDI و SPEI در ایران مرکزی مشخص شد: شاخص SPEI که یک شاخص بارش محور است، کمترین ارتباط را با TVDI از بین سه شاخص نشان داد. در حالیکه دو شاخص RDI و SPEI بر اساس بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل هستند و تطابق SPEI با TVDI بیشتر بود. بنابراین از بین سه شاخص به کار برده شده، SPEI دارای تطابق نسبتاً قابل قبولی با TVDI بود. نتایج به‌دست آمده در راستای نتایج دیگر محققان در این زمینه است (۱۱، ۲۶، ۱۳، ۸).

البته به این نکته باید توجه داشت که با توجه به مشکل محاسبه مقادیرهای تبخیر و تعرق واقعی، شاخص‌هایی مانند RDI و SPEI از تبخیر و تعرق پتانسیل به جای تبخیر و تعرق واقعی استفاده می‌کنند که ممکن است برخی عدم قطعیت‌ها را در برآورد یا پیش‌بینی وقوع خشکسالی ایجاد کند. همچنین در مقیاس‌های زمانی کوتاه، SPEI ارتباط نزدیکی با رطوبت خاک دارد، در حالی که در مقیاس‌های زمانی طولانی‌تر، SPEI بیشتر به آب‌های زیرزمینی و ذخایر مخازن مربوط است (۴۲).

### ۲. شاخص TVDI به عنوان معیار تغییرات رطوبت خاک برای ارزیابی عملکرد شاخص‌های خشکسالی اقلیمی مناسب می‌باشد؟

پژوهش‌های متعددی TVDI را برای طیف وسیعی از کاربردها از جمله نظارت بر خشکسالی، تخمین عملکرد محصول و ارزیابی رطوبت خاک استفاده کرده‌اند (۸). بسیاری از محققان مانند شاهمرادی و همکاران (۲۰۲۱)،

<sup>1</sup> Cheng

محدود و اکوسیستم شکننده، به مراتب بیشتر می‌باشد. در پژوهش حاضر برای مشخص کردن شاخص کارآمد برای ارزیابی خشکسالی در نواحی مرکزی ایران، عملکرد شاخص‌های SPI، SPEI و RDI از طریق بررسی میزان تطابق این سه شاخص با تغییرات رطوبت خاک بر مبنای شاخص TVDI بررسی شد. بر اساس نتایج، SPI که یک شاخص بارش محور می‌باشد، ضعیف‌ترین عملکرد را بین شاخص‌های مورد استفاده نشان داد. شاخص‌های RDI و SPEI برای تخمین شدت خشکسالی از آمار بارندگی و تبخیر و تعرق پتانسیل استفاده می‌کنند. نتایج نشان داد در فلات مرکزی ایران، SPEI نسبت به RDI عملکرد بهتری دارد. بنابراین بر اساس نتایج این پژوهش، توصیه می‌شود برای پیش‌بینی خشکسالی هواشناسی و پیش‌بینی آن در مناطق ایران مرکزی به منظور برنامه‌ریزی مدیریت بهینه منابع آب، از شاخص SPEI استفاده شود. با توجه به معرفی شاخص‌های ترکیبی سنجش از دوری که هم از داده‌های اقلیمی و هم از داده‌های سنجش از دوری برای تخمین خشکسالی استفاده می‌کند، پیشنهاد می‌شود عملکرد این شاخص‌ها نیز در مناطق فلات مرکزی ایران بررسی شود. همچنین پیشنهاد می‌شود کارایی این شاخص‌ها با شاخص SPEI مقایسه شود. در پایان توصیه می‌شود عملکرد شاخص SPEI از طریق مقایسه با شاخص‌های پوشش گیاهی مانند VCI و VHI و همچنین مقدارهای مشاهداتی رطوبت خاک نیز مورد بررسی قرار گیرد.

#### ■ سپاسگزاری

نویسندگان از سازمان هواشناسی کشور بابت در اختیار قرار دادن داده‌های هواشناسی قدردانی می‌کنند.

شده‌اند که بر پایه پژوهش‌های انجام شده، عملکرد بهتری نسبت به شاخص TVDI دارد (۴۳). همچنین برای پیش‌بینی، یک شاخص جامع خشکسالی جدید به نام شاخص خشکسالی هواشناسی و کشاورزی (MADI<sup>۱</sup>) توسعه داده شد که شاخص استاندارد شده بارش و تبخیر و تعرق پتانسیل (SPEI) و TVDI را ترکیب می‌کند (۴۴).

#### ۴. محدودیت‌های پژوهش

برخی از محدودیت‌های تحقیق به شرح زیر می‌باشد: طول دوره آماری در مطالعات خشکسالی را معمولاً حداقل ۳۰ سال در نظر می‌گیرند. به دلیل محدودیت در دسترسی به تصاویر ماهواره‌ای، طول دوره تحقیق در این مطالعه ۲۲ سال در نظر گرفته شد.

داده‌های NDVI مورد استفاده در محاسبه شاخص TVDI تحت تأثیر پس‌زمینه خاک در مناطق با پوشش گیاهی کم قرار می‌گیرند و در مناطق با پوشش گیاهی زیاد، ممکن است شرایط اشباع را نشان دهند (۱۲)،

پاسخ پوشش گیاهی به بارندگی ممکن است همراه با تأخیر زمانی باشد که در این بررسی تأخیر زمانی در نظر گرفته نشد (۳۶).

ورودی‌های محاسبه TVDI همه از داده‌های سنجش از دور هستند که وضعیت سطح زمین و پوشش گیاهی را نشان می‌دهند. با این حال، تأثیر توپوگرافی و ابرها ممکن است داده‌های از دست رفته و عدم قطعیت را به همراه داشته باشد (۲۶).

#### ■ نتیجه‌گیری

با توجه به اینکه خشکسالی در هر اقلیمی می‌تواند اتفاق بیفتد، اثرات منفی این پدیده در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند فلات مرکزی ایران به دلیل منابع آب

#### ■ References

1. Abadeh, M., & Khosroshahi, M. (2021). Assessment and drought monitoring using Standardized Precipitation (SPI) and Standardized Precipitation Evapotranspiration (SPEI) Indices in Hormozgan province. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 28(4), 718-73. DOI: <https://doi.org/10.22092/ijrdr.2021.125248> [In Persian]
2. Abbasi, A., Khalili, K., Behmanesh, J., & Shirzad, A. (2020). Application of support vector machine and bayesian network for agricultural drought prediction. *Watershed Engineering and Management*, 12(1),

- 107-124. DOI: [doi.org/10.22092/ijwmse.2019.122619.1519](https://doi.org/10.22092/ijwmse.2019.122619.1519)
3. Asadi, M. A. (2019). Potential evapotranspiration prediction using nonlinear autoregressive model with exogenous input (NARX) (case study, Yazd Province, Iran). *Journal of Arid Biome*, 8(2), 37-49. DOI: <https://doi.org/10.29252/aridbiom.2019.1403> [In Persian]
  4. Asadi, M. A., Jamnezhad, F., Ekhtesasi, M. R., & Hosseini, S. Z. (2022). Investigating the effects of drought and land-use changes on quantity and quality of groundwater resources: a case study of Darab plain. *Desert Ecosystem Engineering*, 9(28), 89-102. DOI: <https://doi.org/10.22052/deej.2020.9.28.59> [In Persian]
  5. Asadi, M. A., Akhzari, D., & Nouri, H. (2021). Zoning of Drought by Integrating Satellite Imagery and Ground-Based Climate Data (Case study: Malayer Plain). *Environmental Science and Technology*, 23(4), 83-96. DOI: <https://doi.org/10.30495/GIRS.2022.690925> [In Persian]
  6. Asadi Zarch, M. A. (2022). Past and future global drought assessment. *Water Resources Management*, 36(13), 5259-5276. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11269-022-03304-z>
  7. Blenkinsop, S., & Fowler, H. J. (2007). Changes in drought frequency, severity and duration for the British Isles projected by the PRUDENCE regional climate models. *Journal of hydrology*, 342(1-2), 50-71. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.05.003>
  8. Chen, A., Jiang, J., Luo, Y., Zhang, G., Hu, B., Wang, X. & Zhang, S. (2023). Temperature vegetation dryness index (TVDI) for drought monitoring in the Guangdong Province from 2000 to 2019. *PeerJ* 11, e16337. DOI: <https://doi.org/10.7717/peerj.16337>
  9. Guojian, C. H. E. N., Ning, F., Jianfeng, L., Xinghua, W. U., & Xianyong, D. (2024). Spatiotemporal Variation and Drivers of Drought Based on TVDI in the Lower Reaches of the Jinsha River. *Journal of Resources and Ecology* 15(1), 44-54. DOI: <https://doi.org/10.5814/j.issn.1674-764x.2024.01.004>
  10. Chen, S., Wen, Z., Jiang, H., Zhao, Q., Zhang, X. & Chen, Y. (2015). Temperature Vegetation Dryness Index Estimation of Soil Moisture under Different Tree Species. *Sustainability* 7, 11401-11417. DOI: <https://doi.org/10.3390/su70911401>
  11. Chen, S., Zhang, L., Liu, X., Guo, M., & She, D. (2018). The Use of SPEI and TVDI to Assess Temporal-Spatial Variations in Drought Conditions in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River Basin, China. *Advances in Meteorology*, 2018(1), 9362041. DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/9362041>
  12. Cheng, L., Liu, S., Mo, X., Hu, S., Zhou, H., Xie, C., Nielsen, S., Grosen, H., & Bauer-Gottwein, P. (2023). Assessing the Potential of 10-m Resolution TVDI Based on Downscaled LST to Monitor Soil Moisture in Tang River Basin, China. *Remote Sensing*, 15(3), 744. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs15030744>
  13. Deng, H., Cheng, F., Wang, J. & Wang, C. (2021). Monitoring of Drought in Central Yunnan, China Based on TVDI Model. *Polish Journal of Environmental Studies*, 30(4), 3511-3523. DOI: <https://doi.org/10.15244/pjoes/130952>
  14. Farrokhzadeh, B., choobeh, S. & Bazrafshan, O. B. (2020). Assessing the climate change effects on Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI), case study: Latian dam. *Journal of Rainwater Catchment Systems*, 8(3), 59-72. DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.24235970.1399.8.3.4.3> [In Persian]
  15. Gebrechorkos, S. H., Peng, J., Dyer, E., Miralles, D. G., Vicente-Serrano, S. M., Funk, C., Beck, H. E., Asfaw, D. T., Singer, M. B. & Dadson, S. J. (2023) Global high-resolution drought indices for 1981–2022, *Earth System Science Data*, 15, 5449–5466. DOI: <https://doi.org/10.5194/essd-15-5449-2023>
  16. Gholizadeh, R., Yilmaz, H., & Danandeh Mehr, A. (2022). Multitemporal meteorological drought forecasting using Bat-ELM. *Acta Geophysica*, 70(2), 917-927. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11600-022-00739-1>
  17. Gupta, A., Rico-Medina, A., & Caño-Delgado, A. I. (2020). The physiology of plant responses to drought. *Science*, 368(6488), 266-269. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.aaz7614>
  18. Holzman, M. E, Rivas, R. & Piccolo, M. C. (2014). Estimating soil moisture and the relationship with

- crop yield using surface temperature and vegetation index. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 28, 181–192. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2013.12.006>.
19. Hosseini-Moghari, S. M., Araghinejad, S., & Ebrahimi, K. (2019). Application of GRACE satellite observations in drought monitoring (case study: Markazi Basin, IRAN). *Iran-Water Resources Research*, 15(1), 92-103. DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.17352347.1398.15.1.7.4> [In Persian]
20. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2007). Synthesis Report 2007, AR4, Cambridge University Press, Cambridge. *United Kingdom and New York, USA*.
21. Jiao, W., Wang, L., & McCabe, M. F. (2021). Multi-sensor remote sensing for drought characterization: current status, opportunities and a roadmap for the future. *Remote Sensing of Environment*, 256, 112313. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112313>
22. Keyantash, J., & Dracup, J.A. (2002). The Quantification of Drought Indices. *American Meteorological Society*, 83(8): 1167–1180. DOI: <https://doi.org/10.1175/1520-0477-83.8.1167>
23. khamvshi, S. & Aram, b. (2013). Comparative study of SPI and DI drought indices in Kermanshah synoptic station. *The first national conference of Water, Man, Earth; Esfahan*. 1-13. DOI: <https://doi.org/10.22067/jsw.v0i0.3605> [In Persian]
24. Krishnan, S. & Indu, J. (2023). Assessing the potential of temperature/vegetation index space to infer soil moisture over Ganga Basin. *Journal of Hydrology*, 621, 129611. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129611>
25. Lee, S., Moriasi, D. N., Mehr, A. D., & Mirchi, A. (2024). Sensitivity of Standardized Precipitation and Evapotranspiration Index (SPEI) to the choice of SPEI probability distribution and evapotranspiration method. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 53, 101761. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101761>
26. Li, S., Yao, Z., Liu, Z. et al. (2019). The spatio-temporal characteristics of drought across Tibet, China: derived from meteorological and agricultural drought indexes. *Theoretical and Applied Climatology*, 137, 2409–2424. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2733-9>
27. Li, Y., Wang, X., Wang, F., Feng, K., Li, H., Han, Y., & Chen, S. (2024). Temporal and Spatial Characteristics of Agricultural Drought Based on the TVDI in Henan Province, China. *Water*, 16(7), 1010. DOI: <https://doi.org/10.3390/w16071010>
28. McKee, T.B., Doesken, N.J., & Kleist, J. (1995). *Drought Monitoring with Multiple Time Scales*. In Proc, 9th Conf. on Applied Climatology, January 15- 20, American Meteorological Society, Massachusetts. 233-236.
29. Mishra, A. K., Sivakumar, B. & Singh, V. P. (2015). Drought processes, modeling, and mitigation. *Journal of Hydrology*. 526, 1–2. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.054>
30. Pei, W., Hao, L., Fu, Q., Ren, Y. & Li, T. (2024). The standardized precipitation evapotranspiration index based on cumulative effect attenuation. *Journal of Hydrology*, 635, 131148. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.131148>
31. Saeidipour, M., Radmanesh, F., Eslamian, S. & Sharifi, M. R. (2019). Regionalization Analysis of SPI and SPEI Drought Indices for Karoon Basin. *Journal of Water and Soil Science*, 23(2), 397-415. DOI: <http://dx.doi.org/10.29252/jstnar.23.2.397> [In Persian]
32. 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(2-3), 213-224. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00274-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00274-7)
33. Senay, G. B., Velpuri, N. M., Bohms, S., Budde, M., Young, C., Rowland, J., & Verdin, J. P. (2015). Drought monitoring and assessment: remote sensing and modeling approaches for the famine early warning systems network. In *Hydro-meteorological hazards, risks and disasters*, 233-262. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394846-5.00009-6>
34. Seneviratne, S. I., Corti, T., Davin, E. L., Hirschi, M., Jaeger, E. B., Lehner, I. & Teuling, A. J. (2010). Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate: A review. *Earth-Science Reviews*,

- 99(3-4), 125-161. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.02.004>
35. Shahmoradi, Salah, Ghafarian Malmiri, Hamidreza, Amini, Mohammad. (2021). Derivation of surface soil moisture index (TVDI) using temperature/vegetation scatter diagram and MODIS images. *Remote Sensing and Geographic Information System in Natural Resources*, 12(1), 38-62. DOI: <https://doi.org/10.30495/girs.2021.675968> [In Persian]
36. Shamloo, N., Faridhosseini, A. R., Alizadeh, A., & Omidvar, J. (2018). Drought monitoring using Temperature Vegetation Dryness Index (TVDI) from MODIS satellite images on a regional scale. *Iranian Journal of Irrigation & Drainage*, 12(3), 525-535. [In Persian]
37. Sharghi, T., Bari Abarghuei, H., Asadi, M. A., & Kousari, M. R. (2010). Estimation of reference evapotranspiration using FAO-Penman-Monteith method and its zonation in Yazd province. *Journal of Arid Biome*, 1(1), 25-33. DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.2008790.1389.1.1.3.7> [In Persian]
38. Shi, S., Yao, F., Zhang, J., & Yang, S. (2020). Evaluation of temperature vegetation dryness index on drought monitoring over Eurasia. *IEEE Access*, 8, 30050–30059. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2972271>
39. Stage, J. H., Tallaksen, L. M., Xu, C. Y., & Van Lanen, H. A. J. (2014). *Standardized precipitation-evapotranspiration index (SPEI): Sensitivity to potential evapotranspiration model and parameters*. In E. Servat, J.-E. Paturel, A. Dezetter, G. Laaha, J.-F. Boyer, D. Ruelland, S. Demuth, G. Mahe, T. M. Daniell, & H. A. J. van Lanen (Eds.), *Hydrology in a Changing World: Environmental and Human Dimensions - Proceedings of FRIEND-Water 2014* (pp. 367-373). (IAHS-AISH Proceedings and Reports; Vol. 363). Copernicus Publications. <https://iahs.info/uploads/dms/16617.66-367-373-363-55-Paper-213-Stage.pdf>
40. Tao, L., Ryu, D., Western, A. & Boyd, D. (2021). A new drought index for soil moisture monitoring based on MPDI-NDVI trapezoid space using modis data. *Remote Sensing*, 13, 1–20. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13010122>
41. Turco, M., Jerez, S., Donat, M. G., Toreti, A., Vicente-Serrano, S. M. & Doblaz-Reyes, F. J. (2020). A global probabilistic dataset for monitoring meteorological droughts. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 101, E1628–E1644. DOI: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-19-0192.1>
42. Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S. & López-Moreno, J. I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of climate*, 23(7), 1696-1718. DOI: <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
43. Wang, H., Li, Z., Zhang, W. *et al.* (2022). A Modified Temperature-Vegetation Dryness Index (MTVDI) for Assessment of Surface Soil Moisture Based on MODIS Data. *Chinese Geographical Science*, 32, 592–605. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11769-022-1288-y>
44. Wei, W.1., Pang, S. F.1., Xie, B. B., Zhou, J. J. & Zuou, L. (2020). Analysis of spatiotemporal characteristics of drought in an arid region of Northwest China. *Applied Ecology and Environmental Research*, 18(4), 5293-5314. DOI: [http://dx.doi.org/10.15666/aeer/1804\\_52935314?](http://dx.doi.org/10.15666/aeer/1804_52935314?)