



Adaptive Drought Monitoring with an Integrated Approach of Terrestrial Data and Remote Sensing Technology

Hadi Siasar^{1*}, Mahboubeh Ebrahimi²

1- Department of Agriculture, Faculty of Technology and Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran.

2- Department of Agriculture, Faculty of Technology and Engineering, Payame Noor University, Tehran, Iran.

*Corresponding Author: HadiSiasar@pnu.ac.ir

Keywords:

Drought, SPI index, MODIS sensor, Tehran.

Received:

07 Jul 2025

Revised:

25 Aug 2025

Accepted:

17 Sep 2025

Extended Abstract

Introduction

Drought is an important and influential consequence of climate change. Accurate monitoring and assessment of changes in the level of exposure to drought can help planners and policymakers adopt appropriate management strategies to reduce negative impacts and adapt to new conditions. Due to its specific geographical location and semi-arid climate, Tehran faces frequent periods of drought, and this issue not only affects the quality of life of residents but also constitutes a serious threat to the sustainable development of the city. This study seeks to analyze the correlation between different drought indicators and evaluate their efficiency under the climatic conditions of Tehran in order to provide a suitable model for monitoring and managing drought in metropolitan areas. The results of this study can provide a scientific basis for management decisions in the field of urban water resources.

Materials and Methods

In this study, the SPI, SPEI, PDSI, VCI, TCI, PCI, and SMCi indices were used for drought monitoring. The SPI (Standardized Precipitation Index) is calculated based on deviations of precipitation from the historical average and is suitable for assessing hydrological drought. The SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index)

How to cite this article:

Siasar, H; & Ebrahimi, M. (2025). Adaptive Drought Monitoring with an Integrated Approach of Terrestrial Data and Remote Sensing Technology. *Journal of Drought and Climate change Research (JDCR)*, 4(13), 61-80. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2025.9699.1154>



considers evapotranspiration and water balance in addition to precipitation and is useful for areas sensitive to temperature changes. The PDSI (Palmer Drought Severity Index) is a comprehensive model that combines soil moisture, precipitation, and temperature and indicates the severity of long-term drought. The Vegetation Condition Index (VCI) uses NDVI data to assess vegetation health. The Temperature Condition Index (TCI) measures heat stress based on land surface temperature. The Precipitation Condition Index (PCI) is used to determine drought conditions based on precipitation data, and the Soil Moisture Condition Index (SMCI) is used to determine drought conditions based on soil moisture. The drought classes for the different indices are specified.

Meteorological data were collected from various sources over a 22-year period from January 2000 to December 2022. Although this period is shorter than the standard minimum of 30 years, it was selected due to the limited availability of reliable and continuous meteorological data and its compatibility with the length of the available MODIS data record.

Results and Discussion

Analysis of monthly temporal trends of drought shows that the VCI index has high sensitivity to vegetation cover responses to moisture changes, with extreme variations ranging from 20% during dry periods to 70% during wet periods. Analysis of the TCI index reveals that thermal stress has had a significant impact on drought intensity. This index decreased to 30% in hot months (such as August 2016) and reached 65% in cooler months. The SPI index declined to -2.5 during severe droughts (January 2008) and increased to $+1.7$ during wet periods (March 2012). The SPEI index, which accounts for evapotranspiration, indicates that rising temperatures during warm months have had a compounded effect on drought severity. The SMCI index, as a measure of soil moisture, shows sharp fluctuations, ranging from 15% during dry periods to 70% during wet periods.

Analysis of seasonal temporal trends of drought shows that summer, as a critical season, exhibits the greatest vulnerability to drought. The graphs indicate that during the summers of 2008, 2010, and 2016, all indices declined sharply and simultaneously. The TCI index reached its lowest values during these periods, indicating severe heat stress. These conditions were accompanied by a simultaneous decrease in the SMCI index, reflecting a substantial reduction in soil moisture. In contrast, the fall season shows a different pattern. In the falls of 2009 and 2011, the SPI index exhibited a notable decrease, although this decline was less severe than in summer. Conversely, the falls of 2013 and 2019 were characterized by a relative increase in all indices, indicating an improvement in climatic conditions. According to the graphs, winter generally exhibits more balanced conditions; however, the winters of 2008 and 2016 were exceptions, during which the SPI and SMCI indices showed significant declines. This seasonal analysis indicates that drought patterns in Tehran follow a distinct seasonal cycle, although the intensity and duration of these patterns vary from year to year.

The annual trends of vegetation-related indices also indicate significant changes (Mann–Kendall: $Z = -1.98$, $P < 0.05$). Specifically, the VCI increased from 0.534 in 2000 to 0.612 in 2022. At the same time, the TCI increased from 0.668 to 0.681, with a Sen's slope estimated at +0.008 per year, indicating increasing thermal stress. The SMCI index also shows a decline from 0.170 to 0.126 ($Z = -2.12$, $P < 0.05$), indicating a significant reduction in soil moisture.

Conclusion

Due to their strong correlation and outstanding ability to reflect precipitation changes, rainfall-related indices are the best option for assessing droughts caused by reduced rainfall. The role of temperature and vegetation in intensifying or mitigating the effects of drought was also clearly revealed in this study. The negative impact of temperature on increasing drought severity and the positive role of vegetation in moderating these effects emphasize the importance of considering these factors in climate analyses and in developing strategies to address drought. In general, the analysis of various drought indices in Tehran indicates that the city has been continuously facing drought conditions. The intensity and spatial extent of this phenomenon have varied depending on the year and geographical location. The results of this study suggest that addressing drought in Tehran requires comprehensive and multifaceted programs that consider all aspects of drought and integrate multiple data sources.



پایش تطبیقی خشکسالی با رویکرد تلفیقی داده‌های زمینی و فناوری سنجش از دور

هادی سیاسر^{۱*}، محبوبه ابراهیمی^۲

۱- استادیار گروه کشاورزی، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.

۲- استادیار گروه کشاورزی، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.

*نویسنده مسئول: HadiSiasar@pnu.ac.ir

چکیده

واژه‌های کلیدی:

خشکسالی شهری، شاخص SPI، سنجنده MODIS، تهران.

خشکسالی به عنوان یکی از مخرب‌ترین بلایای طبیعی، پدیده‌ای است که با کاهش قابل توجه بارندگی نسبت به میانگین بلندمدت منطقه تعریف می‌شود و اثرات گسترده‌ای بر سیستم‌های اکولوژیکی، اقتصادی و اجتماعی دارد. این پدیده که ماهیتی خزنده، تدریجی و فراگیر دارد، برخلاف سایر مخاطرات طبیعی فاقد نقطه شروع و پایان مشخص است و می‌تواند ماه‌ها یا حتی سال‌ها ادامه یابد. کمبود پوشش ایستگاه‌های هواشناسی و ناهمگنی زمانی- مکانی داده‌ها، ارزیابی دقیق خشکسالی در کلان‌شهرهایی مانند تهران را با عدم قطعیت همراه کرده است. این پژوهش با هدف ارائه چارچوبی یکپارچه برای پایش خشکسالی شاخص‌های سنجش از دور VCI از MOD13A2، TCI از MOD11A2، PCI از محصول بارش ماهواره‌ای، و SMCI از رطوبت خاک را در کنار شاخص‌های هواشناسی-هیدرولوژیکی (SPEI، SPI) و PDSI طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ برای تهران و حومه ادغام می‌کند. پیش‌پردازش و استخراج شاخص‌ها در بستر Google Earth Engine انجام شد و سپس با آزمون‌های من-کندال و شیب سن، روندها و با ضریب پیرسون، همبستگی بین شاخص‌ها در مقیاس‌های ماهانه، فصلی و سالانه تحلیل گردید. نتایج نشان داد شاخص‌های مبتنی بر بارش (SPEI و PCI) بیشترین توان توضیح تغییرات کوتاه‌مدت را دارند و با شاخص وضعیت رطوبتی خاک SMCI همبستگی بالایی نشان می‌دهند؛ در مقابل VCI به نوسانات رطوبتی با وقفه زمانی پاسخ می‌دهد و TCI رابطه‌ای معکوس و معنادار با شدت خشکسالی در مقیاس‌های بلندمدت (PDSI/SPEI) دارد. از منظر زمانی، تابستان‌ها با ترکیب کمبود بارش و تنش حرارتی، بیشترین آسیب‌پذیری را ثبت کردند و سال‌های ۲۰۰۸، ۲۰۱۰ و ۲۰۱۶ دوره‌های حاد خشکسالی بودند. همگرایی شواهد نشان می‌دهد رویکرد چندشاخصه پیشنهادی ضمن کاهش عدم قطعیت، تصویر دقیق‌تری از دینامیک خشکسالی شهری فراهم می‌کند و می‌تواند مبنای برنامه‌ریزی مدیریت تقاضای آب، هشدار زودهنگام و اصلاح الگوی سبز شهری قرار گیرد.

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۰۴/۱۶

تاریخ ویرایش:

۱۴۰۴/۰۶/۰۳

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۶/۲۶

مقدمه

خشکی و خشکسالی از پیامدهای مهم و تاثیرگذار تغییر اقلیم به‌شمار می‌رود. پایش و ارزیابی دقیق تغییرات در میزان مواجهه با خشکی می‌تواند به برنامه‌ریزان و سیاست‌گذاران در زمینه اتخاذ استراتژی‌های مدیریتی مناسب برای کاهش اثرات منفی و سازگاری با شرایط جدید کمک نماید (Ramezani Etedali et al., 2025).

در دهه‌های اخیر، افزایش جمعیت گسترش شهرنشینی و تغییرات اقلیمی فشار بیشتری بر منابع آبی وارد کرده و خشکسالی را به یکی از بحران‌های کلیدی در مناطقی نظیر تهران تبدیل کرده است (Pokhrel et al., 2021). تهران به دلیل موقعیت جغرافیایی خاص خود و اقلیم نیمه‌خشک، به طور مکرر با دوره‌های خشکسالی مواجه است و این مسئله نه تنها کیفیت زندگی ساکنان را تحت تأثیر قرار می‌دهد، بلکه تهدیدی جدی برای توسعه پایدار این شهر به‌شمار می‌رود (Hosseini et al., 2024).

برای برآورد خشکسالی در یک منطقه روش‌های متفاوتی وجود دارد اکثر این روش‌ها نیاز به داشتن داده‌های بلندمدت هواشناسی یا هیدرولوژیکی معتبر است. استفاده از شاخص‌های هیدرولوژیکی و هواشناسی از دیرباز به طور گسترده در جهان برای تحلیل خشکسالی مورد استفاده قرار گرفته است (Dutta et al., 2015). یکی از پرکاربردترین آنها شاخص بارش استاندارد شده (SPI) است. این شاخص تغییرات بارش را در بازه‌های زمانی مختلف بررسی کرده و توانایی پیش‌بینی خشکسالی‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت را دارد (McKee et al., 1993). شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) نیز با ترکیب داده‌های بارش و دما، تغییرات تبخیر و تعرق را نیز در نظر می‌گیرد و برای تحلیل اثرات تغییرات اقلیمی بر خشکسالی بسیار مناسب است (Vicente-Serrano et al., 2010). شاخص شدت خشکسالی پالمرد (PDSI) با استفاده از داده‌های بارش و دمای بلندمدت، شدت خشکسالی را تخمین می‌زند. این شاخص به دلیل تأکید بر شرایط خاک، در مطالعات بلندمدت و منطقه‌ای کارایی دارد، اما ممکن است برای تحلیل خشکسالی‌های کوتاه‌مدت دقت کمتری داشته باشد (Wang et al., 2021).

داده‌های هواشناسی به دلیل دسترسی محدود به محل اندازه‌گیری و در مواردی به دلیل ناقص بودن اطلاعات آن برای ارزیابی به ویژه در مناطق با وسعت زیاد چندان مناسب نیستند از طرفی به دلیل فقدان داده‌ها و عدم دقت در برداشت آنها برآورد خشکسالی با مشکلاتی نظیر عدم دقت در زمان، شدت وقوع و همچنین تعیین دقیق خسارت ناشی از آن روبرو است. بنابراین استفاده از روش‌های سنجش از دور و تصاویر ماهواره‌ای جهت تعیین شاخص‌های مرتبط با خشکسالی به دلیل ارزان بودن، قابل تکرار بودن، سهولت دسترسی، قابلیت به روز شدن و پوشش سطوح وسیع می‌تواند ضمن جبران نواقص داده‌های هواشناسی، ارتباط بین خشکسالی هواشناسی و شاخص‌های مربوط به پوشش گیاهی را فراهم نماید (Rostami, 2017). یکی از پرکاربردترین شاخص‌های مبتنی بر تصاویر سنجش از دور، شاخص نرمال شده اختلاف پوشش گیاهی NDVI می‌باشد این شاخص با تحلیل بازتاب نور مرئی و نزدیک به مادون قرمز، تغییرات پوشش گیاهی را در طول زمان ارزیابی می‌کند (Chen et al., 2023). شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI)، نسخه تکمیلی NDVI است که تغییرات نسبی سلامت پوشش گیاهی را در مقایسه با مقادیر تاریخی تحلیل می‌کند و برای مناطق خشک و نیمه‌خشک بسیار مفید است (Zhao et al., 2021). در کنار شاخص‌های پوشش گیاهی، شاخص وضعیت دما (TCI) برای ارزیابی اثرات حرارتی خشکسالی استفاده می‌شود. این شاخص با تحلیل داده‌های دمای سطح زمین، استرس‌های حرارتی وارده بر پوشش گیاهی را ارزیابی می‌کند. شاخص PCI برای ارزیابی بارش در مناطق مختلف استفاده می‌شود (Du et al., 2013). Kogan (1995) و شاخص SMCL نیز به منظور پایش رطوبت خاک و تحلیل شرایط خشکسالی کشاورزی به کار می‌رود (Seiler et al., 1998).

مطالعات زیادی در مورد کاربرد اطلاعات سنجش از دور در ارزیابی خشکسالی‌های کشاورزی و هیدرولوژیکی انجام شده است. شمسی پور و همکاران (Shamsi pur et al., 2010) کارایی شاخص‌های گیاهی و حرارتی شامل شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی

نتیجه گرفتن شاخص SPI بالاترین میزان همبستگی را با شاخص NDVI دارد لذا می توان از این شاخص برای پایش خشکسالی به طور موثری استفاده کرد. سیاسر و همکاران (Siasar et al., 2023) وضعیت خشکسالی در استان گلستان را با مقایسه داده های بدست آمده از سنجنده مودیس با شاخص SPI بررسی کردند و نتیجه گرفتن بیشترین همبستگی بین شاخص SPI و شاخص TCI و کمترین همبستگی بین شاخص SPI و شاخص VHI مشاهده شد همچنین بخش اعظم منطقه مورد مطالعه در گستره کلاس های خشکسالی خیلی شدید و شدید قرار دارد و نیازمند بازنگری در مدیریت و بهینه سازی در مصرف منابع می باشد. فخر و نظری (Fakhar and Nazari., 2024) پژوهشی جهت شناسایی و توصیف خشکسالی با استفاده از شاخص های چندگانه مبتنی بر MODIS انجام دادند که در آن ویژگی های زمانی- مکانی شدت و فراوانی خشکسالی در کل کشور را در بازه زمانی سال های ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۱ با استفاده از شاخص بارش استاندارد شده به صورت یک ماهه SPI-1، سه ماهه SPI-3 و یکساله SPI-12، براساس مجموعه داده بارش CHIRPS با قدرت تفکیک مکانی ۵ کیلومتر، شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI)، شاخص وضعیت دما (TCI) و شاخص سلامت پوشش گیاهی (VHI) مورد بررسی قرار دادند. بررسی نسبت کلاس های خشکسالی بر اساس شاخص TCI نشان داد نسبت مساحت مناطقی که در سال ۲۰۲۰ و ۲۰۲۱ در کلاس خشکی شدید قرار گرفتند به ترتیب ۳۶/۷٪ و ۴۳/۲٪ بوده که حدود ۷ درصد افزایش داشت. مقایسه مساحت کلاس خشکسالی دو شاخص TCI و VCI نیز نشان داد که شاخص VCI در سال ۲۰۲۰ و ۲۰۲۱ به میزان ۳/۷٪ و ۵/۱٪ سطح مناطقی که در کلاس خشکسالی شدید قرار داشت را بیشتر برآورد کرد. همچنین شاخص VHI نشان داد ۶ استان ناحیه جنوبی کشور، بین بازه زمانی سال های ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۱ خشکسالی طولانی مدت را تجربه کرده اند. بتارای و همکاران (Bhattarai et al., 2024) مطالعه ای در حوضه رودخانه گانداکی نیال با استفاده از چهار شاخص پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI)، شاخص آب نرمال شده NDWI دمای سطح

NDVI، شاخص وضعیت گیاه VCI و شاخص سلامت گیاه VHI با تصاویر ماهواره NOAA بین سال های ۱۹۹۸ و ۲۰۰۴ در منطقه بیابانی و خشک کاشان بررسی کردند. آنها با توجه به ردیابی مناسب پوشش سطحی با شاخص های پوشش گیاهی و حساسیت مناسب شاخص های حرارتی به تغییرات دمایی محیط، بهره گیری از داده های سنجنش از دور ماهواره ای را در مطالعات محیطی مناطق خشک و بیابانی توصیه کردند. مودن زاده و همکاران (Moezanzadeh et al., 2012) با استفاده از سنجنده مودیس به بررسی خشکسالی کشاورزی و ارتباط آن با خشکسالی هواشناسی در حوضه آبریز نیشابور بین سال های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۰ پرداخت، نتایج این تحقیق نشان داد که بیشترین ضریب همبستگی بین نمایه NDVI و مقادیر بارندگی برای بارش های با تاخیر زمانی شش ماهه بدست آمده است. میرموسوی و کریمی (Mirmousavi and Karimi., 2013) به منظور بررسی اثر خشکسالی بر پوشش گیاهی در استان کردستان، از داده های هواشناسی و سنجنش از دور استفاده کردند. آنها نخست شاخص بارندگی استاندارد SPI را برای ۶ ایستگاه هواشناسی استان طی سال های ۲۰۰۰-۲۰۰۹ محاسبه و براساس ۴۰ تصویر ۱۶ روزه برگرفته از سنجنده مودیس در ماه های آگوست، سپتامبر، اکتبر و نوامبر، شاخص NDVI را به دست آوردند. نتایج این مطالعه نشان داد بین میانگین شاخص های SPI و NDVI همبستگی زیادی ۰/۷۷ در سطح معناداری ۰/۰۱ وجود دارد. همچنین مقایسه بین این دو شاخص نشان دهنده دقت بسیار زیاد شاخص NDVI نسبت به شاخص SPI بود، زیرا میانگین سالیانه SPI از شش ایستگاه سینوپتیک در پهنه استان کردستان گرفته شده است، اما شاخص NDVI وضعیت پوشش گیاهی را در پهنه استان کردستان در ابعاد پیکسل نشان می دهد و این مسئله باعث افزایش دقت در تفکیک پدیده خشکسالی و تأثیرات آن بر پوشش گیاهی می شود.

آرخی و همکاران (Arkhi et al., 2022) همبستگی شاخص های پوشش گیاهی در تحلیل خشکسالی با استفاده از تصاویر مودیس را در استان های قم، اصفهان، مرکزی و چهارمحال بختیاری بررسی کردند و

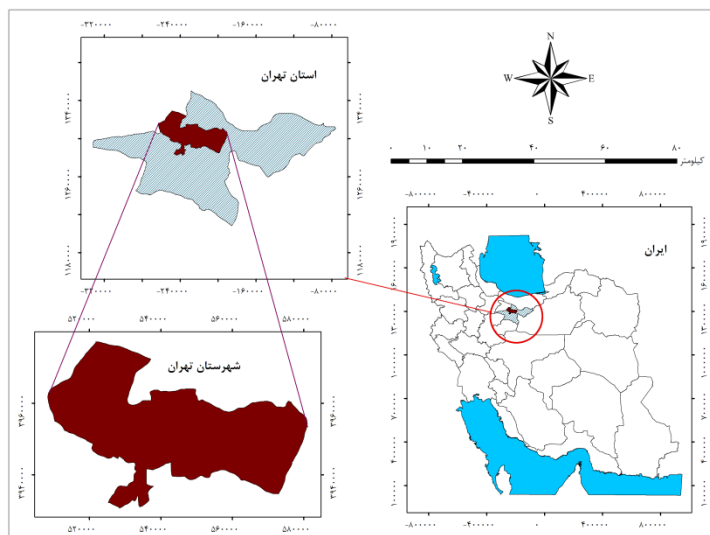
بین شاخص‌های مختلف خشکسالی و ارزیابی کارایی آنها در شرایط اقلیمی تهران می‌باشد تا بتواند الگویی مناسب برای پایش و مدیریت خشکسالی در کلانشهرها ارائه دهد. نتایج این تحقیق می‌تواند مبنایی علمی برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی در حوزه منابع آب شهری فراهم آورد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

این مطالعه با هدف ارزیابی مقایسه‌ای شاخص‌های خشکسالی در تهران با استفاده از داده‌های سنجش از دور و هواشناسی صورت گرفته است. منطقه مورد مطالعه شامل شهر تهران و حومه آن می‌باشد (شکل ۱) که در طول‌های جغرافیایی ۵۱ درجه تا ۵۱ درجه و ۷ دقیقه شرقی و ۳۵ درجه و ۵ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۹ دقیقه عرض شمالی واقع شده است. تهران دارای آب و هوای نیمه خشک است و با دوره‌های خشکسالی متعدد مواجه می‌شود. بارش معمولاً در زمستان زیاد و در تابستان کم است به نحوی که متوسط بارندگی سالانه بدست آمده از ایستگاه‌های هواشناسی موجود در این محدوده مطالعاتی حدود ۲۲۹ است.

زمین (LST) و شاخص خشکسالی نرمال شده (NDDI) در ژانویه و نوامبر بین سال‌های ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۱ انجام دادند. نتایج بدست آمده نشان داد که پوشش گیاهی متراکم در ژانویه در مقایسه با سال‌های ۱۹۹۱ تا ۲۰۲۱ به میزان ۹۳.۲۶ درصد کاهش یافته است. به طور کلی تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی به طور قابل توجهی در روند افزایشی خشکسالی در طول دوره ۳۰ ساله در حوضه رودخانه گانداکی نقش دارند. پژوهش حاضر نوآوری‌های قابل توجهی در حوزه مطالعات خشکسالی شهری ارائه می‌دهد. نخست، کاربرد همزمان شاخص‌های خشکسالی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و زمینی در یک دوره ۲۲ ساله (۲۰۰۰-۲۰۲۲) برای اولین بار در تهران انجام شده است. دوم، توسعه الگوریتم پردازش خودکار داده‌ها در بستر گوگل ارث انجین که امکان پایش مستمر و دقیق خشکسالی را فراهم می‌آورد. سوم، ارائه روش نوین در تحلیل الگوهای زمانی خشکسالی با استفاده از تکنیک‌های آماری پیشرفته که منجر به شناسایی الگوهای پنهان خشکسالی شهری شده است. هدف اصلی این پژوهش، ارائه چارچوبی جامع و کارآمد برای پایش و ارزیابی خشکسالی در محیط‌های شهری پیچیده است. این مطالعه به دنبال تحلیل همبستگی



شکل ۱. نقشه منطقه مورد مطالعه (تهران و حومه)

Fig 1. Map of the study area (Tehran and suburbs)

داده های انجام تحقیق

در این پژوهش از شاخص های SPI، PCI،TCI،VCI،PDSI،SPEI برای پیش خشکسالی استفاده شده است شاخص SPI (Standardized Precipitation Index) بر پایه انحراف بارش از میانگین تاریخی محاسبه می شود و برای ارزیابی خشکسالی هیدرولوژیکی مناسب است شاخص SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index) علاوه بر بارش، تبخیر و تعادل آب را در نظر می گیرد و برای مناطق حساس به تغییرات دمایی مفید است؛ و شاخص PDSI (Palmer Drought Severity Index) یک مدل جامع است که رطوبت خاک، بارش و دما را ترکیب کرده و شدت خشکسالی بلندمدت را نشان می دهد. شاخص وضعیت پوشش گیاهی VCI (Vegetation condition index) از داده های NDVI برای ارزیابی سلامت پوشش گیاهی استفاده می کند. شاخص وضعیت دمایی TCI (Temperature Condition Index) تنش حرارتی را بر اساس دمای سطح زمین اندازه گیری می کند. از شاخص وضعیت بارش PCI (Participation Condition Index) برای تعیین وضعیت خشکسالی براساس داده های بارش و شاخص وضعیت رطوبتی خاک SMCI (Soil Moisture Condition Index) برای تعیین وضعیت خشکسالی بر مبنای میزان رطوبت خاک مورد استفاده قرار می گیرد. کلاس طبقات خشکسالی برای شاخص های مختلف در جدول (۲) مشخص شده است.

داده های هواشناسی از منابع مختلف برای دوره زمانی ۲۲ ساله از ژانویه ۲۰۰۰ تا دسامبر ۲۰۲۲ جمع آوری شدند. این دوره با وجود کوتاه تر بودن از استاندارد حداقل ۳۰ ساله بر اساس محدودیت دسترسی به داده های معتبر و پیوسته هواشناسی و انطباق آنها با طول دوره داده های موجود سنجنده مودیس انتخاب گردید (جدول ۱). این داده ها شامل داده های بارش (PR) از مجموعه داده های GPM (Huffman et al., 2007) و رطوبت خاک (SM) از مجموعه داده های GLDAS بودند. در این پژوهش، فرآیند پردازش داده های ماهواره ای طی مراحل متعدد و با دقت بالا انجام گرفت. ابتدا، داده های سنجنده MODIS با قدرت تفکیک مکانی ۱ کیلومتر از محصول

MOD13A2 دریافت شد. پیش پردازش های اولیه شامل تصحیحات اتمسفری با استفاده از الگوریتم S6 تصحیحات هندسی با روش نقاط کنترل زمینی (GCP) با خطای RMS کمتر از ۰/۵ پیکسل انجام شد. سپس، داده های NDVI با استفاده از روش میانگین گیری زمانی (Time-composite) به صورت ماهانه تجمیع شدند. تحلیل های آماری با استفاده از آزمون های پارامتریک شامل ضریب همبستگی پیرسون در سطح معناداری ۹۵ درصد و آنالیز واریانس یک طرفه (One-way ANOVA) برای مقایسه میانگین های گروهی انجام گرفت. همچنین، برای بررسی روند تغییرات زمانی از آزمون من-کندال و تخمین گر شیب سن استفاده شد. تمامی محاسبات آماری با استفاده از نرم افزار R نسخه ۴،۲،۰ و بسته های «trend» و «stats» انجام گرفت. داده های سنجنش از دور از منابع مختلفی جمع آوری شدند (Rodell et al., 2004). داده های MODIS NDVI مجموعه داده های MOD13A2 برای شاخص پوشش گیاهی (VCI) با رزولوشن زمانی ۱۶ روز و رزولوشن مکانی ۱ کیلومتر استفاده شدند (Huete et al., 2002). داده های MODIS LST از مجموعه داده های MOD11A2 برای شاخص وضعیت دما (TCI) با رزولوشن زمانی ۸ روز و رزولوشن مکانی ۱ کیلومتر مورد استفاده قرار گرفتند (Wan et al., 2002). داده های بارش TRMM از مجموعه داده های B423 برای شاخص وضعیت بارندگی (PCI) با رزولوشن زمانی ماهانه و رزولوشن مکانی ۰/۲۵ درجه به کار رفتند (Huffman et al., 2007). همچنین، داده های رطوبت خاک AMSR-E از مجموعه داده های MAIAC برای شاخص وضعیت رطوبت خاک (SMCI) با رزولوشن مکانی ۰/۲۵ درجه استخراج شدند (Owe et al., 2008).

جدول ۱. شاخص‌ها، منابع داده، روش و مرجع

Table 1. Indicators, data sources, method and reference

مرجع Reference	روش محاسبه Formula	منبع داده Source of data	شاخص خشکسالی Drought Index
Mckee et al., 1993	$SPI = \frac{P_i - \bar{P}}{S}$	بارش Precipitation	شاخص SPI SPI Index
Vicente-Serrano et al., 2010	$D_i = P_i - PET_i$	بارش و تبخیر-تعرق Precipitation and Evapotranspiration	شاخص SPEI SPEI Index
Palmer, 1965		مدل های تعادل آبی Water balance models	شاخص PDSI PDSI Index
Kogan, 1995	$VCI = \frac{NDVI_i - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}}$	MODIS	شاخص وضعیت پوشش گیاهی VCI Vegetation condition Index (VCI)
Kogan, 1997	$TCI = \frac{LST_{max} - LST_i}{LST_{max} - LST_{min}}$	MODIS	شاخص وضعیت دمایی TCI Temperature Condition Index (TCI)
Zhang&Jia., 2013	$SMCI = \frac{SM_{max} - SM_i}{SM_{max} - SM_{min}}$	AMSR-E	شاخص وضعیت رطوبتی خاک SMCI Soil Moisture Condition Index(SMCI)
Rhee et al., 2010	$PCI = \frac{P_{max} - P_i}{P_{max} - P_{min}}$	TRMM	شاخص وضعیت بارندگی PCI Precipitation Condition Index(PCI)

i: گام زمانی (به عنوان مثال ماه نام) در شاخص‌های تجمیعی مانند SPI معمولاً K- ماهه است (K=1,3,6,12,24)

P_i : بارش مشاهده شده/تجمیع شده در گام زمانی i (میلیمتر)

\bar{P} : میانگین بلندمدت بارش در همان مقیاس زمانی و همان پیکسل/ایستگاه (میلیمتر)

S یا σ : انحراف معیار بلندمدت بارش در همان مقیاس (میلیمتر)

P_{min} و P_{max} : کمینه و بیشینه تاریخی بارش در دوره مینا/هر پیکسل/ایستگاه، همان مقیاس)

$NDVI_i$: مقدار NDVI در گام زمانی i (بدون بعد، داده MODIS)

$NDVI_{min}$ و $NDVI_{max}$: کمینه و بیشینه تاریخی NDVI در دوره مینا/برای همان پیکسل)

LST_i : دمای سطح زمین در گام زمانی i (کلوین یا درجه سانتیگراد/داده MODIS)

LST_{min} و LST_{max} : کمینه و بیشینه تاریخی LST در دوره مینا/هر پیکسل/ایستگاه، همان مقیاس)

SM_i : رطوبت خاک در گام زمانی i ($\frac{m^3}{m^3}$) یا درصد، داده AMSR-E/AMSR2 یا GLDAS)

SM_{min} و SM_{max} : کمینه و بیشینه تاریخی رطوبت خاک در دوره مینا/برای همان پیکسل)

جدول ۲. طبقات خشکسالی کشاورزی براساس شاخص های مختلف

Table 2. Agricultural drought classes based on different indicators

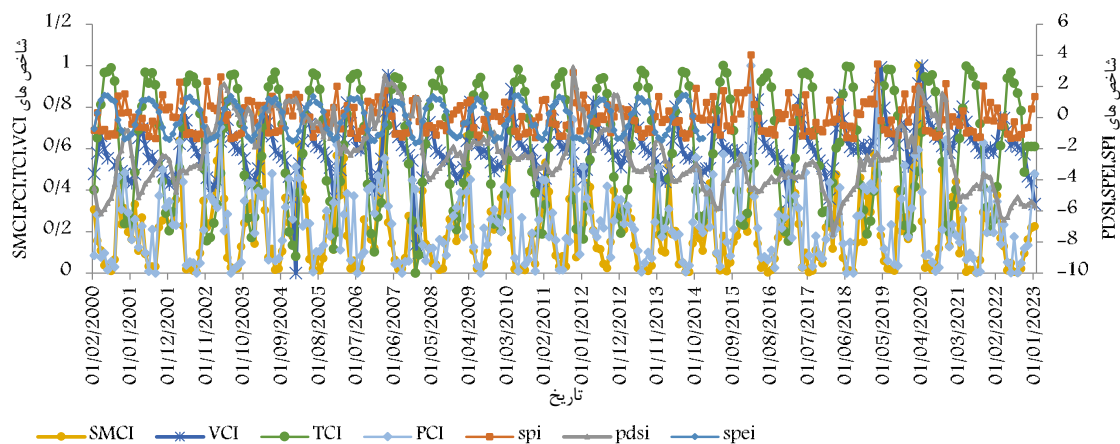
شاخص PDSI PDSI Index	شاخص SPEI SPEI Index	شاخص SPI SPI Index	شاخص SMCI SMCI Index	شاخص PCI PCI Index	شاخص TCI TCI Index	شاخص VCI VCI Index	طبقه خشکسالی Drought Class
-4 >	-2 >	-2 >	0-0,1	0-0,1	0-0,1	0-0,1	خشکسالی بسیار شدید Very severe drought
(-3,99) - (-3)	(-1,99) - (-1,5)	(-1,99) - (-1,5)	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	خشکسالی شدید Severe drought
(-2,99) - (-2)	(-1,49) - (-1)	(-1,49) - (-1)	0,2-0,3	0,2-0,3	0,2-0,3	0,2-0,3	خشکسالی متوسط Moderate drought
(-1,99) - (-1)	(-0,99) - (0)	(-0,99) - (0)	0,3-0,4	0,3-0,4	0/3-0,4	0,3-0,4	خشکسالی ملایم Mild drought
-0/5 <	0 <	0 <	0,5-1	0,5-1	0,5-1	0,5-1	شرایط نرمال Normal conditions

نتایج و بحث

تحلیل روندهای زمانی خشکسالی در مقیاس ماهانه

بر اساس تحلیل داده‌ها و نمودار سری زمانی شاخص‌های خشکسالی در مقیاس ماهانه برای منطقه تهران (۲۰۰۰-۲۰۲۲)، الگوهای پیچیده و معناداری از تغییرات زمانی در شدت و گستره خشکسالی قابل مشاهده است (شکل ۲). در بررسی شاخص‌های مرتبط با پوشش گیاهی، شاخص VCI با تغییرات شدید از ۲۰ درصد در دوره‌های خشک تا ۷۰ درصد در دوره‌های مرطوب، حساسیت بالای پوشش گیاهی به تغییرات رطوبتی را نشان می‌دهد. تحلیل شاخص TCI آشکار می‌سازد که تنش‌های حرارتی تأثیر قابل توجهی بر شدت خشکسالی داشته‌اند. این شاخص در ماه‌های گرم (مانند آگوست ۲۰۱۶) به ۳۰ درصد کاهش یافته، در حالی که در ماه‌های خنک‌تر به ۶۵ درصد رسیده

است. این تغییرات با نوسانات شاخص‌های بارشی همبستگی معناداری نشان می‌دهند. شاخص‌های بارشی SPI و PCI نیز تغییرات قابل توجهی را نمایش می‌دهند. میزان شاخص SPI در دوره‌های خشکسالی شدید به ۲/۵- رسیده (ژانویه ۲۰۰۸)، در حالی که در دوره‌های مرطوب به ۱/۷+ افزایش یافته است (مارس ۲۰۱۲). شاخص SPEI با در نظر گرفتن تبخیر و تعرق، نشان می‌دهد که افزایش دما در ماه‌های گرم تأثیر مضاعفی بر شدت خشکسالی داشته است. شاخص SMCI، به عنوان معیاری از رطوبت خاک، نوسانات شدیدی را از ۱۵ درصد در دوره‌های خشک تا ۷۰ درصد در دوره‌های مرطوب نشان می‌دهد. این تغییرات با الگوهای بارش و دما همبستگی بالایی دارند و تأثیر مستقیم شرایط اقلیمی بر رطوبت خاک را تأیید می‌کنند.



شکل ۲. نمودار سری زمانی شاخص‌های خشکسالی در مقیاس ماهانه برای منطقه تهران (۲۰۰۰-۲۰۲۲)

Fig 2. Time series chart of drought indicators on a monthly scale for the Tehran region (2000-2022)

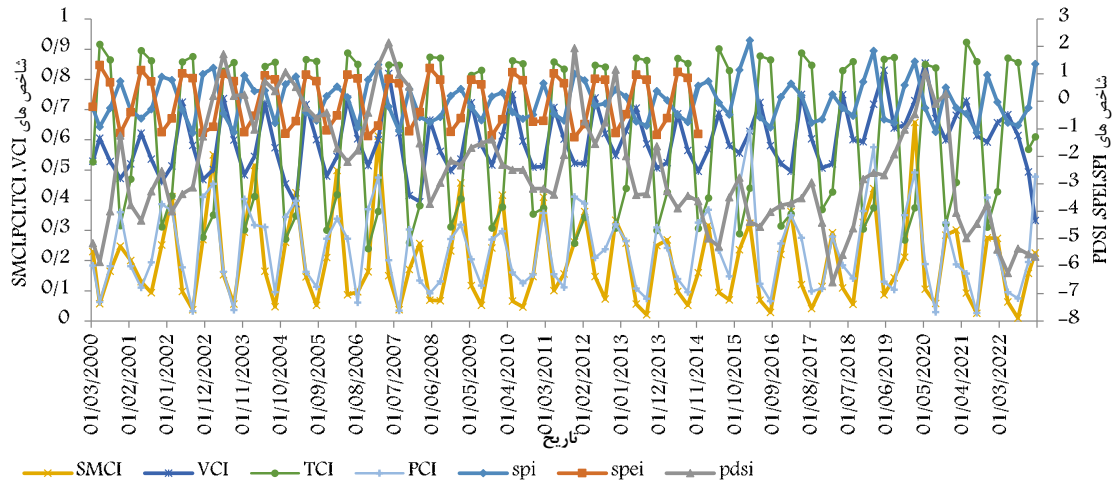
تحلیل روندهای زمانی خشکسالی در مقیاس فصلی

تحلیل جامع نمودارهای سری زمانی و داده‌های فصلی شاخص‌های خشکسالی در منطقه تهران (۲۰۰۰-۲۰۲۲) نشان می‌دهد در فصل بهار، نمودارها نوسانات قابل توجهی در شدت خشکسالی دارند. (شکل ۳) شاخص SPI در بهار سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۱۶ به پایین‌ترین مقادیر خود (کمتر از -۲) رسیده که نشان‌دهنده خشکسالی شدید هواشناسی در این دوره‌ها است. در همین زمان‌ها، شاخص VCI نیز کاهش چشمگیری را نشان می‌دهد که بیانگر تأثیر مستقیم کمبود بارش بر پوشش گیاهی است. تابستان به عنوان فصل بحرانی،

بیشترین آسیب‌پذیری را نسبت به خشکسالی نشان می‌دهد. نمودارها نشان می‌دهند که در تابستان‌های ۲۰۰۸، ۲۰۱۰ و ۲۰۱۶، همه شاخص‌ها به طور همزمان کاهش شدیدی داشته‌اند. شاخص TCI در این دوره‌ها به پایین‌ترین سطح خود رسیده که نشان‌دهنده تنش حرارتی شدید است. این شرایط با کاهش همزمان در شاخص SMCI همراه بوده که بیانگر افت شدید رطوبت خاک است. در فصل پاییز، نمودارها روند متفاوتی را نشان می‌دهند. در پاییز سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۱، شاخص SPI کاهش معناداری را نشان می‌دهند، اما این کاهش به شدت تابستان نیست. در

که شاخص‌های SPI و SMCI کاهش قابل توجهی را نشان می‌دهند. این تحلیل فصلی نشان می‌دهد که الگوهای خشکسالی در تهران از یک چرخه فصلی مشخص پیروی می‌کنند، اما شدت و مدت این الگوها در سال‌های مختلف متفاوت است.

مقابل، پاییز ۲۰۱۳ و ۲۰۱۹ با افزایش نسبی در تمامی شاخص‌ها همراه بوده که نشان‌دهنده بهبود شرایط اقلیمی است. زمستان، با توجه به نمودارها، معمولاً شرایط متعادل‌تری را نشان می‌دهد. با این حال، زمستان‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۱۶ استثنا بوده‌اند، جایی



شکل ۳. نمودارهای سری زمانی و داده‌های فصلی شاخص‌های خشکسالی در منطقه تهران (۲۰۰۰-۲۰۲۲)

Fig 3. Time series graphs and seasonal data of drought indicators in the Tehran region (2000-2022)

اقلیمی و هیدرولوژیکی رخ داد به طوری که شاخص SPI به مقادیر منفی رسید. این تغییرات با کاهش شاخص SMCIPCTCI و افزایش تدریجی شاخص تنش حرارتی TCI همراه بود. سال‌های ۲۰۰۸-۲۰۱۰ به‌عنوان یک دوره بحرانی در شدت خشکسالی شناسایی می‌شوند. در این بازه، تمامی شاخص‌ها کاهش چشمگیری را تجربه کردند. شاخص SPI به حدود ۲- رسید. شاخص TCI نیز افزایش قابل توجهی را نشان داد که نشان‌دهنده افزایش تنش حرارتی و کاهش شدید رطوبت خاک بود. این دوره با شرایط اقلیمی بسیار خشک و آسیب‌های گسترده به پوشش گیاهی مشخص شد. در دوره ۲۰۱۱-۲۰۱۵، نوسانات شاخص‌ها کاهش یافت و شرایط نسبتاً پایداری در خشکسالی مشاهده شد. افزایش تنش آبی، که در کاهش AET و افزایش PET منعکس شد، از ویژگی‌های برجسته این دوره است. اگرچه در سال ۲۰۱۹ بهبود موقتی در تمامی شاخص‌ها ثبت شد، این روند کوتاه‌مدت بود و شرایط خشکسالی در سال‌های بعد تشدید شد.

الگوهای پنج‌ساله (میانگین متحرک) نیز تصویر مشابهی از تغییرات ارائه می‌کنند. با این حال، ارزیابی

تحلیل روندهای زمانی خشکسالی در مقیاس سالانه (۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲)

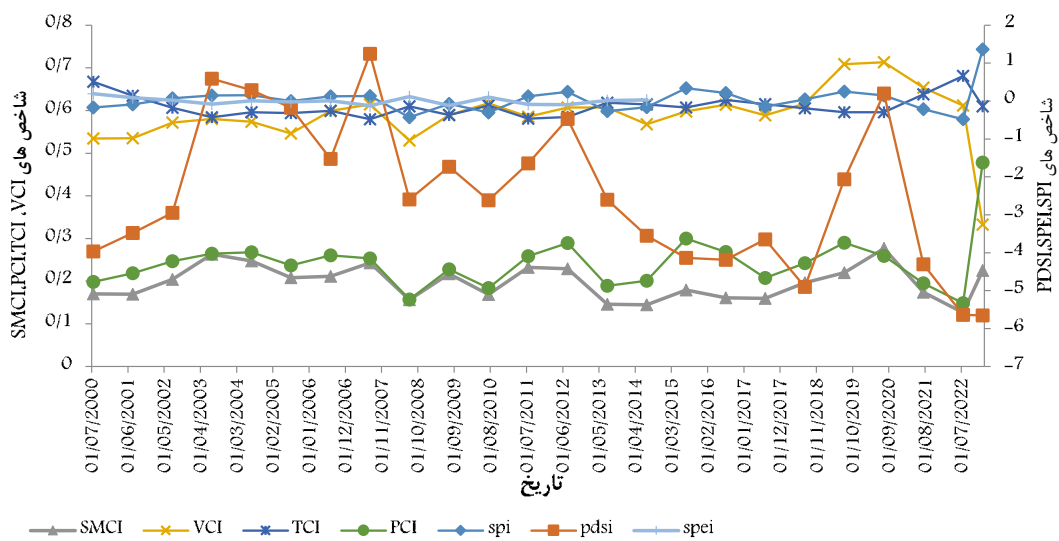
تحلیل روندهای زمانی خشکسالی در مقیاس سالانه طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ در منطقه تهران (شکل ۵) با استفاده از شاخص‌های متعددی مانند PDSI, SPEI, TCI, VCI, SMCIPCTCI, SPI و PCI انجام شده است که هر یک جنبه‌ای خاص از خشکسالی را ارزیابی می‌کنند. روندهای مشاهده‌شده، تأثیرات متقابل پیچیده عوامل اقلیمی و هیدرولوژیکی را نمایان می‌کنند. در دوره اولیه (۲۰۰۰-۲۰۰۲)، شاخص‌های مورد بررسی نشان‌دهنده شرایط نسبتاً نرمال با نوسانات جزئی بودند. شاخص SPI مقادیر مثبت اندکی را نشان داد که حاکی از شرایط اقلیمی مطلوب‌تر بود این دوره از نظر رطوبت خاک و پوشش گیاهی شرایط پایدارتری داشت که در شاخص‌های SMCIPCTCI و VCI نیز منعکس شده است. در دوره میانی (۲۰۰۳-۲۰۰۷) تغییرات قابل توجهی در شدت خشکسالی مشاهده شد. سال ۲۰۰۴ به‌عنوان نقطه اوج این دوره، مقادیر بالای شاخص SPI که نشان‌دهنده شرایط اقلیمی مطلوب بود. با این حال از سال ۲۰۰۶ به بعد کاهش مداومی در شاخص‌های

است (شکل ۴). این داده‌ها به‌وضوح نشان می‌دهند که خشکسالی نه‌تنها شدت یافته، بلکه بازه‌های زمانی آن نیز طولانی‌تر شده است. در مجموع، این تحلیل جامع نشان می‌دهد که منطقه تهران با روند فزاینده خشکسالی مواجه است و این موضوع نیازمند اقدام فوری برای مدیریت منابع آب و کاهش اثرات خشکسالی است. استفاده از شاخص‌های مختلف در پایش خشکسالی، امکان شناسایی بهتر روندها و بهبود استراتژی‌های مدیریتی را فراهم می‌کند. این یافته‌ها تأکید می‌کنند که برنامه‌ریزی دقیق و اقدامات پیشگیرانه برای کاهش اثرات خشکسالی و بهبود تاب‌آوری منطقه در برابر تنش‌های اقلیمی، ضروری است.

بررسی روندهای سالانه شاخص‌های مرتبط با پوشش گیاهی نیز حاکی از تغییرات معنادار است (من-کندال $Z = -1.98, P < 0.05$). در این میان VCI از ۰/۵۳۴ در سال ۲۰۰۰ به ۰/۶۱۲ در سال ۲۰۲۲ تغییر کرده است. هم‌زمان TCI از ۰/۶۶۸ به ۰/۶۸۱ افزایش یافته و شیب سن آن $+0/008$ در سال برآورد شده که دلالت بر تقویت تنش حرارتی دارد. شاخص SMCI نیز از ۰/۱۷۰ به ۰/۱۲۶ کاهش نشان می‌دهد $Z = -2/12, P < 0/05$ ، که بیانگر افت معنادار رطوبت خاک است.

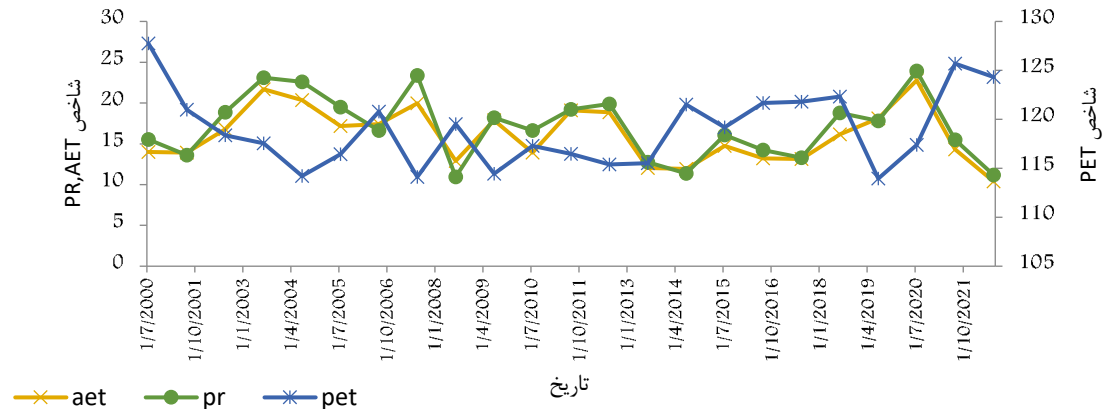
«روند» به معنای آماری آن بر پایه آزمون من-کندال و تخمین‌گر شیب سن برای کل دوره انجام شده است. در بازه بلندمدت ۲۰۰۰-۲۰۲۲، نتایج نشان می‌دهد خشکسالی در تهران به‌صورت تدریجی و سامانه‌مند تشدید شده است؛ به‌طور مشخص، برای SPI مقدار Z برابر با $-2/45$ (و برای PDSI شیب سن برابر با $-0/15$ در سال به‌دست آمد. هم‌راستا با این نتایج، شاخص SPI از $-0/167$ به $-0/481$ کاهش یافته و شاخص PDSI در سال ۲۰۲۲ به کمینه $-5/641$ رسیده است.

بررسی روندهای بلندمدت سالانه نشان می‌دهد شاخص‌های مرتبط با پوشش گیاهی نیز روند نزولی معناداری دارند. شاخص VCI از ۰/۵۳۴ در سال ۲۰۰۰ به ۰/۶۱۲ در سال ۲۰۲۲ تغییر کرده است. هم‌زمان، شاخص TCI از ۰/۶۶۸ به ۰/۶۸۱ افزایش یافته که نشان‌دهنده افزایش تنش حرارتی است. شاخص SMCI نیز کاهش قابل توجهی را از ۰/۱۷۰ به ۰/۱۲۶ نشان می‌دهد که بیانگر افت شدید رطوبت خاک است. از دیدگاه هیدرولوژیکی، تبخیر و تعرق واقعی (AET) از $14/01$ به $10/39$ میلی‌متر کاهش یافته و تبخیر و تعرق پتانسیل (PET) از $127/74$ به $124/31$ میلی‌متر تغییر کرده است. افزایش شکاف میان AET و PET نشان‌دهنده تشدید تنش آبی در منطقه



شکل ۴. نمودار روندهای زمانی خشکسالی در مقیاس سالانه طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ در منطقه تهران

Fig 4. Graph of drought time trends in yearly scale during the period 2000 to 2022 in the Tehran region



شکل ۵. نمودار تغییرات زمانی شاخص های AET، PET و PR در مقیاس سالانه طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ در منطقه تهران

Fig 5. Graph of temporal changes of AET, PET and PR indices in yearly scale during the period 2000 to 2022 in the Tehran

ماهیت متفاوت این شاخص در محاسبه خشکسالی و تأخیر زمانی آن در واکنش به تغییرات کوتاه مدت باشد. تحلیل ماتریس همبستگی شاخص های خشکسالی در مقیاس فصلی، نشان می‌دهد دوره های کوتاه مدت شاخص های SPI و PCI، همانند مقیاس ماهانه، همبستگی های بالایی را نشان می‌دهند که تأییدکننده پایداری و قابلیت اعتماد این شاخص ها در ارزیابی تغییرات بارش فصلی است. در مقابل، PDSI، همبستگی های نسبتاً ضعیفی با اکثر شاخص ها نشان می‌دهد که می‌تواند ناشی از تأخیر زمانی این شاخص در واکنش به تغییرات فصلی باشد. شاخص های TCI، VCI، همانند وضعیت ماهانه در مقیاس های فصلی نیز بالاترین همبستگی را با شاخص SPEI و دوره های طولانی مدت شاخص SPI (SPI-9) نشان می‌دهند و شاخص های مرتبط با بارش و رطوبت خاک PCI و SMCI با دوره های کوتاه مدت شاخص SPI (SPI-1)، SPI-2 و SPI-3) همبستگی بهتری را نشان می‌دهند. این الگوهای همبستگی نشان می‌دهند که در مقیاس فصلی، شاخص های خشکسالی روابط پیچیده تر و قوی تری نسبت به مقیاس ماهانه دارند. این امر اهمیت استفاده از رویکرد چندشاخصه در ارزیابی خشکسالی فصلی و لزوم توجه به تعاملات متقابل بین شاخص ها را برجسته می‌سازد. تحلیل ماتریس همبستگی شاخص های خشکسالی نشان می‌دهد که در مقیاس زمانی سالانه، الگوهای همبستگی متمایزی نسبت به مقیاس های ماهانه و فصلی وجود دارد.

تحلیل همبستگی شاخص های خشکسالی تهران:

ارزیابی جامع و چندلایه

تحلیل همبستگی شاخص های خشکسالی در تهران بر سه مقیاس زمانی ماهانه، فصلی و سالانه انجام شده است (جدول ۳، ۴ و ۵). این تحلیل نشان می‌دهد که شاخص های خشکسالی در مقیاس ماهانه، روابط پیچیده و متقابلی با یکدیگر دارند. در میان شاخص های خشکسالی شاخص های بارشی SPI و PCI همبستگی کامل (۱/۰۰) با یکدیگر نشان می‌دهند که تأییدکننده دقت و قابلیت اعتماد یکسان این شاخص ها در پایش تغییرات بارش ماهانه است. در بررسی سایر شاخص های سنجش از دور و دوره های مختلف شاخص SPI، پایین ترین ضریب همبستگی بین SPI-1 و شاخص TCI (رابطه منفی ۰/۵۵۹-) مشاهده می‌شود که می‌تواند ناشی از تفاوت ماهیت این دو شاخص باشد. شاخص SPI-9 همبستگی بهتری با شاخص TCI نشان داد. از بین شاخص های هیدرولوژیکی بهترین همبستگی بین شاخص SPEI و شاخص های TCI و VCI مشاهده می‌شود که میتواند به دلیل ماهیت تبخیر و تعرق شاخص SPEI در همبستگی بیشتر آن با شاخص های مربوط به شرایط پوشش گیاهی و حرارتی خاک باشد. از طرفی بالاترین همبستگی بین شاخص های VCI و TCI با ضریب همبستگی ۰/۵۵۱ مشاهده می‌شود. شاخص PDSI همبستگی های نسبتاً ضعیفی با اکثر شاخص ها نشان می‌دهد (اغلب کمتر از ۰/۲۵). این ارتباط ضعیف می‌تواند به دلیل

دوره‌های کوتاه مدت شاخص SPEI، SPI و PDSI همبستگی پایینی دارد. شاخص PCI و SPI-1 مانند مقیاس‌های زمانی دیگر، همبستگی کامل (۱,۰۰) را نشان می‌دهند که تأییدکننده پایداری و قابلیت اعتماد این شاخص‌ها در ارزیابی خشکسالی سالانه است. علاوه بر این، همبستگی قوی آنها نشان‌دهنده اهمیت بارش در تعیین شدت خشکسالی سالانه است. این الگوهای همبستگی در مقیاس سالانه نشان می‌دهند که روابط بین شاخص‌ها در این مقیاس زمانی قوی‌تر و پایدارتر از مقیاس‌های کوتاه‌تر است.

شاخص TCI نمونه جالبی از همبستگی‌های منفی را نشان می‌دهد. این شاخص قوی‌ترین همبستگی منفی را با PDSI دارد (۰/۷۱-). این روابط معکوس نشان می‌دهد که افزایش تنش حرارتی (کاهش TCI) با افزایش شدت خشکسالی در مقیاس سالانه ارتباط مستقیم دارد. در حالیکه این شاخص همبستگی بالایی با شاخص SPEI دارد. شاخص VCI الگوی منحصر به فردی را نشان می‌دهد، این الگو نشان می‌دهد که شاخص پوشش گیاهی در مقیاس سالانه، ارتباط نزدیک‌تری با شاخص‌های TCI و SPI-9 نشان می‌دهد ولی با شاخص سنجش از دور بارشی PCI،

جدول ۳. همبستگی بین شاخص‌های مختلف خشکسالی در مقیاس ماهانه

Table 3. Correlation between different drought indices on a monthly scale

SPI_24	SPI_12	SPI_9	SPI_6	SPI_3	SPI_2	SPI_1	PDSI	SPEI	SMCI	PCI	TCI	VCI	
0,11	0,14	0,50	0,42	0,05	-0,04	-0,10	-0,05	0,65	-0,05	-0,10	0,55	1,00	VCI
-0,01	-0,03	0,35	0,01	-0,53	-0,62	-0,59	-0,20	0,98	-0,56	-0,58	1,00	0,55	TCI
0,12	0,23	0,11	0,35	0,68	0,81	0,98	0,23	-0,63	0,62	1,00	-0,58	-0,10	PCI
0,07	0,09	-0,02	0,32	0,55	0,60	0,61	0,25	-0,53	1,00	0,62	-0,56	-0,05	SMCI

جدول ۴. همبستگی بین شاخص‌های مختلف خشکسالی در مقیاس فصلی

Table 4. Correlation between different drought indices on a seasonal scale

SPI_24	SPI_12	SPI_9	SPI_6	SPI_3	SPI_2	SPI_1	PDSI	SPEI	SMCI	PCI	TCI	VCI	
0,17	0,21	0,58	0,45	0,01	-0,17	-0,31	0,00	0,76	-0,31	-0,30	0,61	1,00	VCI
-0,01	-0,03	0,34	0,00	-0,55	-0,68	-0,75	-0,21	0,99	-0,74	-0,74	1,00	0,61	TCI
0,05	0,19	0,03	0,37	0,84	0,95	1,00	0,20	-0,80	0,79	1,00	-0,74	-0,30	PCI
0,06	0,10	-0,06	0,36	0,71	0,75	0,79	0,23	-0,69	1,00	0,79	-0,74	-0,31	SMCI

جدول ۵. همبستگی بین شاخص‌های مختلف خشکسالی در مقیاس سالانه

Table 5. Correlation between different drought indices on an annual scale

SPI_24	SPI_12	SPI_9	SPI_6	SPI_3	SPI_2	SPI_1	PDSI	SPEI	SMCI	PCI	TCI	VCI	
0,42	0,45	0,52	0,41	-0,12	0,22	0,22	0,31	-0,58	0,09	-0,46	-0,10	1,00	VCI
-0,25	-0,38	-0,43	-0,55	-0,59	-0,62	-0,62	-0,71	0,88	-0,73	-0,41	1,00	-0,10	TCI
-0,07	0,20	0,17	0,36	0,88	0,60	0,61	0,01	-0,71	0,55	1,00	-0,41	-0,46	PCI
0,26	0,41	0,43	0,52	0,67	0,67	0,68	0,72	-0,73	1,00	0,55	-0,73	0,09	SMCI

اطمینان ۹۵ درصد وجود دارد ($\lambda = 0.342$, $p < 0.001$). شاخص TCI همبستگی منفی قوی با PDSI ($r = -0.709$, $p < 0.001$) نشان می‌دهد که می‌تواند ناشی از تأثیر متقابل دما و رطوبت خاک باشد. این یافته با نتایج تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) تأیید می‌شود، به طوری که دو مؤلفه اول ۷۸/۵ درصد از

تحلیل علل تفاوت‌های شاخص‌های خشکسالی تحلیل علمی تفاوت‌های مشاهده شده بین شاخص‌های خشکسالی، پیچیدگی‌های قابل توجهی را در رفتار این شاخص‌ها آشکار می‌سازد. نتایج تحلیل واریانس چندمتغیره (MANOVA) نشان داد که تفاوت معناداری بین عملکرد شاخص‌ها در سطح

۲/۵-رسیده (ژانویه ۲۰۰۸)، در حالی که در دوره‌های مرطوب به ۱/۷+ افزایش یافته است (مارس ۲۰۱۲). شاخص SPEI با در نظر گرفتن تبخیر و تعرق، نشان می‌دهد که افزایش دما در ماه‌های گرم تأثیر مضاعفی بر شدت خشکسالی داشته است. شاخص SMCI، به عنوان معیاری از رطوبت خاک، نوسانات شدیدی را از ۱۵ درصد در دوره‌های خشک تا ۷۰ درصد در دوره‌های مرطوب نشان می‌دهد. نتایج تحلیل همبستگی شاخص‌های خشکسالی در تهران نشان می‌دهد شاخص‌های مرتبط با بارندگی به دلیل همبستگی کامل و توانایی برجسته در بازتاب تغییرات بارش، بهترین گزینه برای ارزیابی خشکسالی‌های ناشی از کاهش بارندگی هستند. این ویژگی‌ها اهمیت بارش را به عنوان یک عامل کلیدی در مطالعه خشکسالی تأیید می‌کنند و ضرورت استفاده از این شاخص‌ها را در تحلیل‌های اقلیمی نشان می‌دهند. نقش دما و پوشش گیاهی در تشدید یا کاهش اثرات خشکسالی نیز در این مطالعه به خوبی آشکار شد. تأثیر منفی دما بر افزایش شدت خشکسالی و نقش مثبت پوشش گیاهی در تعدیل این اثرات، بر اهمیت در نظر گرفتن این عوامل در تحلیل‌های اقلیمی و تدوین راهبردهای مقابله با خشکسالی تأکید دارد. به طور کلی بررسی شاخص‌های مختلف خشکسالی در تهران نشان داد که این شهر به طور مداوم با مشکلات خشکسالی مواجه بوده است. شدت و گستردگی این پدیده بسته به سال و موقعیت جغرافیایی متفاوت بوده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که برای مقابله با خشکسالی در تهران، نیاز به برنامه‌های جامع و چندجانبه است که به تمامی جنبه‌های خشکسالی پرداخته و از ترکیب داده‌های مختلف استفاده کنند. مدیریت مؤثر منابع آب، آموزش و آگاهی‌سازی عمومی، و پشتیبانی از تحقیقات و نوآوری‌ها از جمله راهکارهای مهم برای کاهش تأثیرات خشکسالی در این شهر محسوب می‌شوند. برنامه‌ریزی منابع آب باید شامل سیاست‌های پایدار برای مدیریت تقاضا و عرضه آب، افزایش بهره‌وری مصرف آب در بخش‌های مختلف، به‌ویژه در کشاورزی و شهری، و توسعه منابع آبی جایگزین مانند بازیافت آب و استفاده از آب‌های

واریانس کل داده‌ها را تبیین می‌کنند. آنالیز حساسیت شاخص‌ها نشان داد که NDVI نسبت به تغییرات کوتاه‌مدت بارش حساسیت کمتری (ضریب حساسیت = ۰/۳۴) در مقایسه با PCI (ضریب حساسیت = ۰/۸۲) دارد. این تفاوت را می‌توان به تأخیر زمانی در پاسخ پوشش گیاهی به تغییرات بارش نسبت داد. تحلیل رگرسیون چندگانه نشان داد که ۶۵ درصد از تغییرات NDVI توسط ترکیبی از بارش و دما تبیین می‌شود (شاخص SMCI) ($R^2 = 0.65$, $F = 45.23$, $p < 0.001$) نوسانات شدیدتری را در مقیاس فصلی نشان می‌دهد (CV = 42.3%) که می‌تواند ناشی از تغییرات فصلی در تبخیر و تعرق و همچنین تأثیر بافت خاک باشد. تحلیل طیفی داده‌ها نشان داد که شاخص‌های مبتنی بر داده‌های ماهواره‌ای VCI و TCI الگوهای نوسانی منظم‌تری نسبت به شاخص‌های زمینی دارند ($p < 0.05$). این تفاوت می‌تواند به دلیل قدرت تفکیک زمانی و مکانی متفاوت داده‌های مورد استفاده باشد. آزمون همگنی واریانس‌ها (Levene's test) نشان داد که پراکندگی داده‌ها در شاخص‌های مختلف متفاوت است ($F = 12.45$, $p < 0.001$) این ناهمگنی می‌تواند ناشی از حساسیت متفاوت شاخص‌ها به متغیرهای محیطی و روش‌های محاسباتی متفاوت باشد.

نتیجه‌گیری

بررسی نوسانات ماهانه شاخص‌های خشکسالی نشان می‌دهد شاخص‌های مرتبط با پوشش گیاهی شاخص VCI با تغییرات شدید از ۲۰ درصد در دوره‌های خشک تا ۷۰ درصد در دوره‌های مرطوب، حساسیت بالای پوشش گیاهی به تغییرات رطوبتی را نشان می‌دهد. تحلیل شاخص TCI آشکار می‌سازد که تنش‌های حرارتی تأثیر قابل توجهی بر شدت خشکسالی داشته‌اند. این شاخص در ماه‌های گرم (مانند آگوست ۲۰۱۶) به ۳۰ درصد کاهش یافته، در حالی که در ماه‌های خنک‌تر به ۶۵ درصد رسیده است. این تغییرات با نوسانات شاخص‌های بارشی همبستگی معناداری نشان می‌دهند. شاخص‌های بارشی SPI و PCI نیز تغییرات قابل توجهی را نمایش می‌دهند. میزان شاخص SPI در دوره‌های خشکسالی شدید به

Geography and Environmental Hazards, 11(3), 189-224. <https://doi.org/10.22067/geoch.2021.72253.1102> (In Persian)

Bhattarai, A., Timilsina, S., Ayer, S., Paudel, G. and Maharjan, M. (2024). Evaluation of Drought in Gandaki River Basin of Nepal. *Journal of Drought and Climate change Research*, 2(2), 1-26. doi: <https://doi.org/10.22077/jdc.2023.6865.1046>

Chen, D., Hu, H., Liao, C., Ye, J., Bao, W., Mo, J., Wu, Y., Dong, T., Fan, H., Pei, J. (2023). Crop NDVI time series construction by fusing Sentinel-1, Sentinel-2, and environmental data with an ensemble-based framework. *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 215, 108388. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108388>

Du, L., Tian, Q., Yu, T., Meng, Q., Jancso, T., Udvardy, P., Huang, Y. (2013). A comprehensive drought monitoring method integrating MODIS and TRMM data. *International Journal of Applied Earth Observation and geoinformation*. Volume 23, Pages 245-253, ISSN 1569-8432. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.09.010>

Dutta, D., Kundu, A., Patel, N.R., Saha, S.K., & Siddiqui, A.R., (2015). Assessment of agricultural drought in Rajasthan (India) using remote sensing derived Vegetation Condition Index (VCI) and Standardized Precipitation Index (SPI). *Egypt. J. Remote Sens. Sp. Sci.* 18(1), 53–63; Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2015.03.006>

Fakhar, M. S. and Nazari, B. (2024). Monitoring and Assessing Spatial and Temporal Characteristics of Drought in Iran Using Remote Sensing. *Journal of*

غیرمعارف باشد.

پیشنهادات برای تحقیقات آتی

برای تکمیل دانش و بهبود مدیریت خشکسالی، پژوهش‌های آینده باید در چند زمینه گسترش یابند. یکی از اولویت‌ها، استفاده از شاخص‌های جدید و پیشرفته، از جمله شاخص‌های مبتنی بر هوش مصنوعی و یادگیری ماشین، برای تحلیل دقیق‌تر و پیش‌بینی تغییرات خشکسالی است. این فناوری‌ها می‌توانند تحلیل‌های مکانی و زمانی پیچیده‌تری ارائه دهند و دقت پایش را افزایش دهند. همچنین، بررسی تأثیر تغییرات اقلیمی بر الگوهای خشکسالی در مناطق مختلف، به ویژه در شهرهایی با شرایط مشابه تهران، باید در دستور کار قرار گیرد. این مطالعات می‌توانند با استفاده از داده‌های بلندمدت اقلیمی و شبیه‌سازی‌های پیشرفته، به درک بهتر از ارتباط میان تغییرات جهانی و خشکسالی‌های منطقه‌ای کمک کنند. در نهایت، این پژوهش بر اهمیت همکاری‌های بین‌بخشی و استفاده از رویکردهای چندشاخصه تأکید دارد تا از طریق پایش مستمر و تصمیم‌گیری مبتنی بر داده، بتوان چالش خشکسالی را به صورت علمی و عملی مدیریت کرد. راهبردهای پیشنهاد شده در این مطالعه، اگر به درستی اجرا شوند، می‌توانند به کاهش اثرات خشکسالی و بهبود تاب‌آوری زیست‌محیطی و اجتماعی در تهران و مناطق مشابه منجر شوند.

سپاسگزاری

باتشکر از کارشناسان محترم سازمان هواشناسی و شرکت آب منطقه‌ای شهر تهران که در زمینه تهیه داده‌های مورد نیاز این تحقیق همکاری نمودند.

منابع

Arkhi, S., Barzegar, S.M., Emadaldin, S. (2022). Investigating the efficiency of indices derived from remote sensing technology VCI, TCI and VHI in drought assessment with MODIS images (Case study: central regions of Iran).

- [org/10.1016/0273-1177\(95\)00079-T](https://doi.org/10.1016/0273-1177(95)00079-T)
- Kogan, F. N. (1997). Global drought watch from space. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(4), 621-636. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078%3C0621:GDWFS%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078%3C0621:GDWFS%3E2.0.CO;2)
- McKee, T.B., Doesken, N.J. and Kleist, J. 1993. The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. 8th Conference on Applied Climatology, Anaheim, 17-22 January 1993, 179-184.
- Mirmousavi, S.H., Karimi, H. (2013). Effect of drought on vegetation using MODIS sensor images, case: Kurdistan Province. *Geography and Development*, 11(31), 57-76. <https://doi.org/10.22111/gdij.2013.794>. (In Persian)
- Moezanzadeh, R., Arshad, S., Ghahraman, B., Davari, K. (2012). Drought monitoring in non-irrigated crops using remote sensing techniques. *Quarterly Journal of Water and Irrigation Management*, Volume: 2, Issue: 2.P1-14. <https://doi.org/10.22059/jwim.2013.30339>. (In Persian)
- Owe, M., de Jeu, R. A. M., & Holmes, T. R. H. (2008). Multi-Sensor Historical Climatology of Satellite-Derived Global Land Surface Moisture. *Journal of Geophysical Research*, 113, Article F01002. <https://doi.org/10.1029/2007JF000769>
- Pokhrel, Y., Felfelani, F., Satoh, Y., Boulange, J., Burek, P., Gädeke, A., & Wada, Y. (2021). Global terrestrial water storage and drought severity under climate change. *Nature Climate Change*, 11(3), 226-233. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-0080-8>
- Drought and Climate change Research*, 2(1), 39-58. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2024.7011.1050>. (In Persian)
- Ramezani Etedali, H. and Koochi, S. (2025). Investigating the impact of climate change on the aridity in Iran with population exposure approach. *Journal of Drought and Climate change Research*, 3(1), 17-38. <https://doi.org/10.22077/jdcr.2024.8258.1079>. (In Persian)
- Hosseini, N., Ghorbanpour, M. & Mostafavi, H. (2024). Habitat potential modelling and the effect of climate change on the current and future distribution of three *Thymus* species in Iran using MaxEnt. *Sci Rep*. 14, 3641. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-53405-5>. (In Persian)
- Huete, A. R., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1-2), 195-213. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)
- Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Nelkin, E. J., Wolff, D. B., Adler, R. F., Gu, G., Stocker, E. F. (2007). The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *Journal of Hydrometeorology*, 8(1), 38-55. <https://doi.org/10.1175/JHM560.1>
- Kogan, F. N. (1995). Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in Space Research*, 15(11), 91-100. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(95\)00079-T](https://doi.org/10.1016/0273-1177(95)00079-T)

- Siasar, H., Mohammad Rezapour, U., Khodamoradpour, M. (2024). 'Drought monitoring using MODIS sensor data and comparison with SPI meteorological index in short-term periods, case study: Golestan province', *Journal of Geography and Development*, 22(74), pp. 166-186. <https://doi.org/10.22111/gdij.2024.8175>. (In Persian)
- Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S., & López-Moreno, J.I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696-1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Wan, Z., Zhang, Y., Zhang, Q., & Li, Z. L. (2002). Validation of the land-surface temperature products retrieved from Terra Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data. *Remote Sensing of Environment*, 83(1-2), 163-180. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00093-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00093-7)
- Wang, JI., Yu, Yh. (2021). Comprehensive drought monitoring in Yunnan Province, China using multisource remote sensing data. *J. Mt. Sci.* 18, 1537–1549. <https://doi.org/10.1007/s11629-020-6333-7>
- Zhang, A., Jia, G. (2013). Monitoring meteorological drought in semiarid regions using multi-sensor microwave remote sensing data, *Remote Sensing of Environment*, 134,12-23. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.02.023>
- Zhao, X., Xia, H., Pan, L., Song, H., Niu, W., Wang, R., Li, R., Bian, X., Guo, Y., & Qin, Y. (2021). Drought Monitoring over doi.org/10.1038/s41558-020-00972-w
- Rhee, J., Im, J., & Carbone, G. J. (2010). Monitoring agricultural drought for arid and humid regions using multi-sensor remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*, 114(12), 2875-2887. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.07.005>
- Rodell, M., Houser, P. R., Jambor, U., Gottschalck, J., Mitchell, K., Meng, C.-J., Toll, D. (2004). The global land data assimilation system. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85(3), 381–394. <https://doi.org/10.1175/BAMS-85-3-381>
- Rostami, A., Bazaneh, M., Raeini M. (2017). Spatial and temporal monitoring of agricultural drought using MODIS sensor images and remote sensing technology (case study: East Azerbaijan province). *Soil and Water Science*. Volume 27. Number 3. Pages 213-226. https://water-soil.tabrizu.ac.ir/article_6228.html. (In Persian)
- Seiler, R. A., Kogan, F., Sullivan, J. (1998). AVHRR-based vegetation and temperature condition indices for drought detection in Argentina. *Advances in Space Research*, 21(3), 481-484. [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(97\)00884-3](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(97)00884-3)
- Shamsipur, A.A., Alavi panah, S.A., Mohammadi, H. (2010). Efficiency of vegetation and thermal indices of NOAA-AVHRR satellite in ecological drought analysis of Kashan region. *Iranian Rangeland and Desert Research*, 3. 445-465. https://ijrdr.areeo.ac.ir/article_102940.html?lang=en. (In Persian)

Yellow River Basin from 2003–2019 Using Reconstructed MODIS Land Surface Temperature in Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 13(18), 3748. <https://doi.org/10.3390/rs13183748>

