

Agricultural drought monitoring and assessment using single and multiple indicators based on remote sensing data (case study of Tehran)

H. Siasar^{1*}, M. Ebrahimi²

Extended Abstract

Introduction:

In recent decades, population growth, urbanization, and climate change have increased pressure on water resources, making drought a major crisis in cities like Tehran. Tehran's semi-arid climate and geography lead to frequent droughts that reduce the quality of life and threaten sustainable development. Hydrological and meteorological indices, especially the Standardized Precipitation Index (SPI), based on recorded precipitation remain the standard for estimating drought over various timescales, enabling short and long term forecasts. Although short statistical periods limit analyses, they are standard in remote sensing and do not compromise accuracy. Reliable drought assessment requires high quality ground data; scarcity or errors can skew drought timing, severity, and impact estimates. This study validates Google Earth Engine satellite data against ground SPI measurements ($r = 0.29$) and applies pixel-level analysis to retain spatial detail. Building on composite indicator findings from urban contexts, the current study has addressed research gaps in Tehran by deriving drought indices via remote sensing. These cost effective, repeatable, and scalable methods could overcome meteorological data limitations and link meteorological drought to vegetation health indicators.

Methods:

This study evaluates drought indicators in Tehran by integrating remote sensing and meteorological data from January 2000 to December 2022, covering a 23-year period to approach the recommended 30-year climatological baseline. The meteorological data includes precipitation from local stations and NASA's GPM product, as well as soil moisture data from the Global Land Data Assimilation System (GLDAS) and local monitoring networks. The Standardized Precipitation Index (SPI) was calculated using rainfall data at six temporal scales (1, 3, 6, 9, 12, and 24 months) to quantify meteorological drought and serve as a reference for evaluating remote sensing indicators. Satellite-derived variables were accessed via Google Earth Engine, including the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and land surface temperature (LST), both of which were corrected for atmospheric and geometric distortions. Monthly NDVI composites were created to align with meteorological data, facilitating the analysis of vegetation dynamics and temperature variations in Tehran. The datasets were co-registered to a common 1 km grid for pixel-level analysis, allowing for a direct comparison between SPI and remote sensing indices. This comprehensive framework enhances our understanding of urban drought monitoring by evaluating the strengths and weaknesses of both meteorological and remote sensing methods. The findings offer beneficial perspectives on urban planning and environmental management, assisting stakeholders in making informed decisions about drought response and resource management in Tehran.

1- Assistant Professor of Department of Agricultural, Payame Noor University, Tehran, Iran.

2- Assistant Professor of Department of Agricultural, Payame Noor University, Tehran, Iran.

Corresponding Author: hadisiasar@pnu.ac.ir

Received: 2025/05/24

Accepted: 2025/08/09

Results:

The analysis of composite drought indices across various timescales (monthly, seasonal, and annual) revealed significant sensitivities and patterns in response to climate variability. Monthly fluctuations in these indices highlighted their responsiveness to short-term changes, with the Vegetation Health Index (VHI) ranging from 47% in 2022 to 65% in 2020. Such variations may indicate vegetation stress stemming from rising temperatures, alterations in irrigation, or changes in water management practices. Similarly, the Standardized Drought Condition Index (SDCI) exhibited sharp shifts between 20% and 70%, reflecting rapid transitions between wet and dry periods, a trend also observed in other composite indicators. At the seasonal level, distinct cycles were apparent. The Optimized Vegetation Drought Index (OVDI), which aligns with plant growth patterns, peaked in spring and summer while declining in autumn and winter. The SDCI also displayed seasonal patterns but with greater year-to-year variability, suggesting that meteorological factors can diverge from vegetation responses. This divergence underscores the influence of sudden weather changes, such as unexpected droughts or heavy rainfall, on how vegetation adapts. Understanding these dynamics is crucial for developing effective agricultural strategies and managing water resources in the context of climate change. On an annual scale, long-term trends came into focus. From 2000 to 2012, the SDCI showed a slight downward trend, indicating a prolonged drought, before gradually improving. In contrast, the OVDI has been steadily increasing since 2012, suggesting vegetation recovery and improved hydrological conditions. Comparing these indices highlights the complex nature of drought, revealing instances where vegetation-focused metrics diverge from those based on meteorological data.

Conclusion:

The temporal trend of droughts periodic patterns, with the years 2000–2002 classified mainly as the moderate drought category, while 2003–2006 showed a relative improvement and a trend towards mild or no drought conditions. The return to moderate to severe droughts in 2007–2010, followed by a gradual improvement from 2011 to 2020 (with exceptions such as 2013 and 2015, which experienced moderate droughts), emphasizes the need for continuous monitoring. On a monthly and seasonal scale, the months of February, July, and November, and the summer season, showed the highest drought intensity, while April and October, and the winter season, were more favorable. Mann-Kendall trend analysis revealed that SDCI showed significant decreasing trends at seasonal ($P=0.049$) and annual ($P=0.018$) scales, indicating drought intensification. Conversely, vegetation indices (VCI, VHI, NDVI) exhibited significant increasing trends, suggesting vegetation recovery despite meteorological drought conditions. Correlation analysis also highlighted the pivotal role of composite indices. These indices not only had strong correlations with independent factors (such as precipitation and vegetation), but also provided the ability to accurately reflect changes at different time scales. Precipitation indices such as SPI and PCI, with their perfect correlation, are ideal tools for assessing droughts caused by rainfall deficiency, while the role of temperature (exacerbation) and vegetation (modification) emphasizes the importance of a multidimensional approach.

Keywords : Drought, OVDI, SDCI, Tehran, VHI.

Citation: Siasar, H., Ebrahimi, M. 2025. Agricultural drought monitoring and assessment using single and multiple indicators based on remote sensing data (case study of Tehran). *Iranian Water Research Journal*. 58(3). pp.79-97. <https://dx.doi.org/10.22034/iwrj.2025.15218.2687>.



پایش و ارزیابی خشکسالی کشاورزی با استفاده از شاخص‌های منفرد و چندگانه مبتنی بر داده‌های سنجش از دور (مطالعه موردی شهرستان تهران)

هادی سیاسر^{۱*}، محبوبه ابراهیمی^۲

چکیده

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی مقایسه‌ای شاخص‌های خشکسالی بر اساس داده‌های سنجش از دور در شهرستان تهران در دوره زمانی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ انجام شده است. از داده‌های ماهواره‌ای تصاویر گوگل ارث انجین برای محاسبه شاخص‌های منفرد خشکسالی شامل شاخص وضعیت دمایی (TCI)، شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI)، شاخص وضعیت بارندگی (PCI) و شاخص وضعیت رطوبتی خاک (SMCI) استفاده شد. به منظور ارزیابی شاخص‌های خشکسالی سنجش از دور با داده‌های واقعی از شاخص بارش استاندارد شده (SPI) استفاده شد. شاخص‌های ترکیبی خشکسالی شامل شاخص سلامت پوشش گیاهی (VHI)، شاخص خشکسالی مقیاس‌بندی شده (SDCI) و شاخص پوشش گیاهی بهینه‌شده (OVDI) با استفاده از شاخص‌های منفرد محاسبه گردید. در این پژوهش به جای استفاده از میانگین‌گیری برای کل منطقه، شاخص‌های خشکسالی برای هر پیکسل (با ابعاد ۱ کیلومتر برای محصولات MODIS و ۰/۲۵ درجه برای AMSR-E و TRMM) به صورت مجزا محاسبه و تحلیل شدند. نتایج تحلیل‌های پیکسل‌محور نشان داد که شاخص‌های ترکیبی خشکسالی نسبت به شاخص‌های تک‌موردی دقت بالاتری در ارزیابی شرایط خشکسالی دارند. شاخص SDCI که از ترکیب وزنی شاخص‌های VCI، TCI و PCI با استفاده از روش وزن‌دهی تجربی بدست آمد، دقت بالایی در ارزیابی خشکسالی داشت. معیار اصلی سنجش دقت شاخص‌های سنجش از دور، همبستگی آن‌ها با شاخص SPI (محاسبه‌شده بر اساس داده‌های زمینی) است. نتایج آزمون من-کندال نشان داد که شاخص SDCI در مقیاس‌های فصلی و سالانه روند کاهشی معنی‌دار (تشدید خشکسالی) و شاخص‌های پوشش گیاهی (VCI، VHI، NDVI) روند افزایشی معنی‌دار (بهبود وضعیت) داشتند. همبستگی‌های قوی بین شاخص‌های مختلف نیز نشان‌دهنده ارتباط قوی بین این شاخص‌ها و دقت بالای آن‌ها در پایش خشکسالی است. برای نمونه، همبستگی بین شاخص‌های SDCI و OVDI به میزان ۰/۸۴ در مقیاس ماهانه و ۰/۹۰ در مقیاس فصلی و سالانه است. استفاده از شاخص‌های ترکیبی VHI، SDCI و OVDI در کنار شاخص‌های منفرد می‌تواند به بهبود دقت و کارایی پایش خشکسالی کمک کند و اطلاعات مفیدی برای مدیریت منابع آب و کشاورزی فراهم آورد.

واژه‌های کلیدی: تهران، خشکسالی، SDCI، OVDI، VHI.

ارجاع: قنبری عدیوی، ا.، خسروی، م.، ۱۴۰۴. مروری بر تحقیقات انجام شده در خصوص حفاظت سواحل مبتنی بر زیست بوم ساحلی با تمرکز بر الگوی جریان و انتقال رسوب. مجله پژوهش آب ایران، ۵۸(۳)، صص. ۹۷-۴۵. <https://dx.doi.org/10.22034/iwrj.2025.15225.2686>

۱- استادیار گروه کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

۲- استادیار گروه کشاورزی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران.

* نویسنده مسئول: hadisiasar@pnu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۰۳

مقدمه

در دهه‌های اخیر، رشد جمعیت، گسترش شهرنشینی و تغییرات اقلیمی فشار فزاینده‌ای بر منابع آب وارد کرده و خشکسالی را به یکی از بحران‌های کلیدی کلان‌شهرهایی چون تهران تبدیل کرده است (Pokhrel et al., 2021).

تهران به سبب موقعیت جغرافیایی ویژه و اقلیم نیمه‌خشک، به‌طور مکرر دوره‌های خشکسالی را تجربه می‌کند، پدیده‌ای که نه تنها کیفیت زندگی ساکنان را متأثر می‌سازد، بلکه توسعه پایدار شهر را نیز با مخاطره روبه‌رو می‌کند (Hosseini et al., 2024). برای برآورد خشکسالی، استفاده از شاخص‌های هواشناسی و هیدرولوژیکی مانند شاخص بارش استاندارد شده (SPI) که بر پایه داده‌های واقعی بارش زمینی محاسبه می‌شود، رایج است. این شاخص تغییرات بارش را در بازه‌های زمانی مختلف رصد کرده و توانایی تمایز خشکسالی‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت را دارد (Mckee, 1993). هرچند دوره‌های آماری کوتاه مدت می‌توانند محدودیت‌هایی ایجاد کنند، این امر در سنجش از دور متعارف است و لزوماً دقت محاسبات را کاهش نمی‌دهد. با این حال، فقدان یا خطای داده‌های ایستگاهی در بسیاری از مناطق می‌تواند بر برآورد زمان وقوع، شدت و نیز سنجش دقیق خسارت اثر منفی بگذارد (Dutta et al., 2015). با استفاده از سنجش از دور ماهواره‌ای می‌توان با هزینه کم، تکرارپذیری، سهولت دسترسی، قابلیت به‌روزرسانی و پوشش گسترده، نواقص داده‌های زمینی را جبران و ارتباط میان خشکسالی هواشناسی و پاسخ پوشش گیاهی را تعیین کرد (Rostami, 2017). یکی از شناخته‌شده‌ترین شاخص‌های سنجش از دور خشکسالی، شاخص نرمال شده اختلاف پوشش گیاهی NDVI محاسبه‌شده از بازتاب طیف مرئی و نزدیک مادون قرمز است که تغییرات پوشش گیاهی را در طول زمان پایش می‌کند (Chen et al., 2023). شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI) نسخه تکمیلی NDVI است که وضعیت نسبی پوشش را نسبت به تاریخچه محلی تحلیل می‌کند و برای نواحی خشک و نیمه‌خشک سودمند است (Zhao et al., 2021). در کنار آن، شاخص وضعیت دمایی (TCI) با تکیه بر دمای سطح زمین، استرس حرارتی وارده بر پوشش را ارزیابی می‌کند. شاخص وضعیت بارش (PCI) نیز برای ارزیابی بارش در مناطق مختلف به کار می‌رود (Kogan, 1995; Du et al., 2013).

شاخص وضعیت رطوبتی خاک SMCL برای پایش رطوبت خاک و تحلیل خشکسالی کشاورزی استفاده می‌شود (Seiler et al., 1998). با وجود کارآمدی این سنجه‌ها، اتکای منفرد به

یک شاخص، همه جنبه‌های بروز و تکوین خشکسالی را برای مدیریت آب و خاک آشکار نمی‌سازد. برای نمونه، کاهش عملکرد می‌تواند با ثبات سرسبزی و شاخص سطح برگ رخ دهد، بنابراین شاخص‌های مبتنی بر سبزینگی، بدون تغییر رنگ یا تعداد برگ، افت ناشی از خشکسالی را ثبت نمی‌کنند (Zhang et al., 2016).

خشکسالی در دماهای بالا و رطوبت نسبی پایین تشدید می‌شود و بر مؤلفه‌های هواشناسی، هیدرولوژیکی و گیاهی اثر می‌گذارد، تحت چنین وضعیتی، شاخص‌های صرفاً بارشی قادر به توصیف تنش آبی ناشی از افزایش کسری فشار بخار (VPD) در موج‌های گرما نیستند (Almeida and Ladsberg, 2003). بنابراین، شاخص‌های منفرد برای ثبت فرآیندهای پیچیده و اثرات متنوع خشکسالی کافی نیستند و باید به چارچوب‌های کل‌نگر متکی شد (Hoa and Binh, 2016). بر همین مبنا شاخص‌های ترکیبی توسعه یافتند تا هم‌زمان، طیفی از متغیرهای هواشناسی، هیدرولوژیکی و عملکرد گیاه را در نظر بگیرند. ترکیب وزنی VCI و TCI در قالب شاخص سلامت پوشش گیاهی (VHI) امکان تحلیل هم‌زمان اثرات دما و پوشش را فراهم می‌آورد (Kogan et al., 2022). شاخص ترکیبی خشکسالی مقیاس بندی شده (SDCI) که ترکیبی از شاخص‌های منفرد TCI، PCI و VCI است برای پایش خشکسالی کشاورزی در هر دو حالت خشک/نیمه خشک و مرطوب/نتایج مطلوبی ارائه می‌دهد (Rhee et al., 2010). شاخص ترکیبی OVDI (شاخص پوشش گیاهی بهینه‌شده)، مشتق از TCI، VCI، PCI و SMI نیز برای ارزیابی خشکسالی کشاورزی مناسب گزارش شده است (Du et al., 2013).

Wassie et al. (2022) با تحقیقی در شمال اتیوپی بیان کردند ادغام شاخص‌های منفرد خشکسالی با در نظر گرفتن هم‌زمان اثرات بارش، دما، پوشش گیاهی و رطوبت خاک تصویر یکپارچه و دقیق‌تری از چرخه‌های خشکسالی ارائه می‌دهد. شواهد تجربی برتری نسبی رویکرد ترکیبی را تأیید می‌کند. بر اساس نتایج بدست آمده در این پژوهش طی دوره مطالعه هیچ سالی عاری از خشکسالی نبود، TCI تنش خشکسالی را نسبت به سایر شاخص‌ها نسبتاً اغراق آمیز نشان داد همچنین شاخص VHI مساحت و سطح تنش کمتری را نسبت به شاخص‌های مولد خود (VCI و TCI) گزارش کرد. سال‌های ۲۰۰۲، ۲۰۰۴، ۲۰۰۹، ۲۰۱۰ و ۲۰۱۵ به‌عنوان سال‌های خشکسالی شدید شناخته شدند. (Jalili (2005) در مطالعه ای از آمار بارندگی روزانه ایستگاه‌های استان تهران و از تصاویر

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

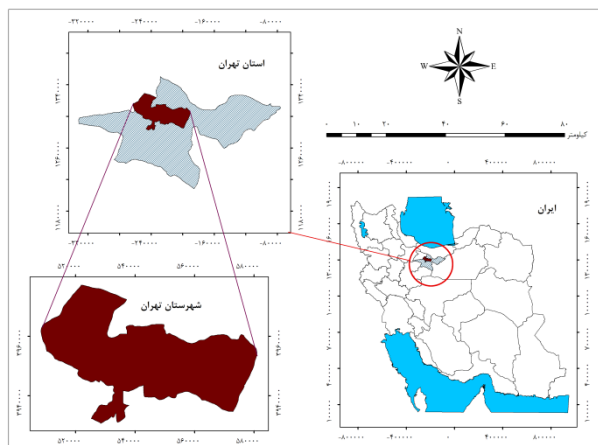
این مطالعه با هدف ارزیابی مقایسه‌ای شاخص‌های خشکسالی در شهرستان تهران (تهران، کن، آفتاب) با استفاده از داده‌های هواشناسی و سنجش از دور صورت گرفته است. منطقه مورد مطالعه شامل شهر تهران و حومه آن می‌باشد (شکل ۱) که در طول‌های جغرافیایی $51^{\circ}0'$ تا $51^{\circ}7'$ شرقی و عرض‌های جغرافیایی $35^{\circ}5'$ تا $35^{\circ}9'$ شمالی واقع شده است. تهران با توجه به تنوع توپوگرافی و پوشش گیاهی، دارای سطوح قابل توجهی از پوشش طبیعی، مراتع و اراضی کشاورزی دیم و آبی است که تحت تأثیر تغییرات بارش و خشکسالی قرار دارند. بر اساس نقشه کاربری اراضی منطقه، حدود ۳۵٪ از مساحت محدوده مطالعاتی را اراضی کشاورزی دیم و مراتع تشکیل می‌دهد که مستقیماً به بارندگی وابسته‌اند. همچنین مناطق جنوبی تهران با اقلیم خشک‌تر، کاملاً وابسته به نزولات جوی و آب‌های سطحی هستند که به شدت تحت تأثیر خشکسالی قرار می‌گیرند. این ویژگی‌ها، منطقه تهران را به محدوده‌ای مناسب برای مطالعه خشکسالی کشاورزی با روش‌های سنجش از دور تبدیل کرده است. متوسط بارندگی سالانه بدست آمده از ایستگاه‌های هواشناسی موجود در این محدوده مطالعاتی حدود ۲۷۴ میلی‌متر و میانگین دمای حداقل و حداکثر صفر و ۳۷ درجه سانتیگراد است.

داده‌های انجام تحقیق

داده‌های هواشناسی از منابع مختلف برای دوره زمانی ژانویه ۲۰۰۰ تا دسامبر ۲۰۲۲ جمع‌آوری شدند. این دوره زمانی با توجه به طول دوره آماری داده‌های سنجنده مودیس به منظور همپوشانی بهتر انتخاب شده است. این داده‌ها شامل داده‌های بارش (PR) از مجموعه داده‌های GPM (Huffman et al., 2007)، داده‌های رطوبت خاک (SM) از مجموعه داده‌های سنجش از دور GLDAS و ایستگاه‌های زمینی سنجش رطوبت خاک بدست آمدند. برای برآورد خشکسالی هواشناسی از شاخص SPI استفاده شد. این شاخص با استفاده از داده‌های بارش واقعی ثبت شده در ایستگاه هواشناسی در محدوده مطالعاتی تهران با طول دوره آماری ۲۳ ساله ۲۰۰۰-۲۰۲۲، محاسبه گردید. به دلیل سهولت کاربرد و انعطاف‌پذیری زیاد این شاخص به طور گسترده برای پایش خشکسالی با مقیاس‌های زمانی مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین برای صحت سنجی داده‌های سنجش از دور نیز

(Siasar et al. 2024) ماهواره AVHRR به ترتیب برای محاسبه نمایه‌های SPI، NDVI و VCI استفاده کرد نتایج این مطالعه نشان داد نمایه SPI ضرایب همبستگی قابل قبولی با نمایه‌های ماهواره‌ای داشته و در بین مقیاس‌های زمانی یک ماهه و سه ماهه، نمایه‌های هواشناسی سه ماهه در بیشتر موارد همبستگی بهتری را نشان دادند. وضعیت خشکسالی در استان گلستان را با مقایسه داده‌های بدست آمده از سنجنده مودیس و 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 کلاس‌های خشکسالی خیلی شدید و شدید قرار دارد و نیازمند بازنگری در مدیریت و بهینه‌سازی در مصرف منابع می‌باشد. هدف اصلی این پژوهش مقایسه و ارزیابی شاخص‌های منفرد و ترکیبی خشکسالی و تحلیل همبستگی آن‌ها با شاخص SPI (محاسبه‌شده از داده‌های واقعی بارش ایستگاهی) در منطقه تهران است. با توجه به شرایط خاص اقلیمی و توپوگرافی تهران، قرارگیری در دامنه‌های جنوبی البرز، تنوع ارتفاعی ۹۰۰ تا ۲۲۰۰ متر و تأثیرپذیری از اقلیم نیمه‌خشک و کوهستانی و نیز اهمیت آن به‌عنوان پایتخت با جمعیت بالا و منابع آب محدود، ضرورت این پژوهش را دوچندان می‌کند. نوآوری مطالعه در بهره‌گیری هم‌زمان از داده‌های زمینی با دوره آماری مناسب برای تفسیر داده‌های سنجش‌ازدور، تحلیل پیکسل‌محور شاخص‌های خشکسالی، صحت‌سنجی منسجم داده‌های سنجش‌از دور با داده‌های زمینی و ارائه شاخص‌های بهینه برای پایش خشکسالی در شرایط خاص تهران است. داده‌های ورودی از ایستگاه‌های هواشناسی اخذ و با اسکریپت‌نویسی در سامانه GEE پردازش شدند. برآیند این چارچوب با کارگیری شاخص‌های منفرد SPI، VCI، TCI، PCI و SMCI و همچنین شاخص‌های ترکیبی VHI، SDCI و OVDI می‌تواند دقت و کارایی پایش را ارتقا دهد و برای مدیریت منابع آب و کشاورزی در تهران اطلاعات عملی فراهم کند. از آن‌جا که تهران مکرراً با دوره‌های خشکسالی روبه‌روست و خشکسالی بر کشاورزی، منابع آب و اقتصاد اثرات مخرب دارد، اتکاء به شاخص‌های دقیق و جامع برای پایش ضروری است. این مطالعه با مقایسه شاخص‌های متنوع و توسعه رویکردهای ترکیبی، تلاش می‌کند، سنجش دقیق‌تری از خشکسالی ارائه و زمینه را برای تصمیم‌سازی آگاهانه، مدیریت بهینه و افزایش تاب‌آوری مهیا کند.

مطالعاتی تهران صحت‌سنجی شد، ضرایب همبستگی بین بارش ماهواره‌ای و زمینی ۰/۸۷ و برای رطوبت خاک ۰/۷۹ بدست آمد که دلالت بر دقت قابل قبول داده‌های ماهواره‌ای دارد.



شکل ۱- نقشه منطقه مورد مطالعه تهران و حومه

استفاده می‌شود. در این مطالعه از شاخص SPI با مقیاس‌های یک‌ماهه، سه ماهه، شش ماهه، نه ماهه، یک‌ساله و دو ساله استفاده شده است (جدول ۱).

در این پژوهش، داده‌های ماهواره‌ای از محصولات پردازش شده شامل MOD13A2 برای NDVI و MOD11A2 برای LST از طریق سامانه Google Earth Engine استخراج و به کار گرفته شد. برای افزایش دقت و انطباق محلی، پیش‌پردازش‌های تکمیلی در GEE انجام گرفت: تصحیح‌های اتمسفری با الگوریتم S6 و تصحیحات هندسی مبتنی بر نقاط کنترل زمینی (GCP) با خطای میانگین مربعات ریشه (RMS) کمتر از ۰/۵ پیکسل انجام و سپس داده‌های NDVI با روش تجمع زمانی (time-composite) به مقیاس ماهانه تبدیل شد تا محاسبه شاخص‌های خشکسالی با دقت بالاتر انجام پذیرد.

داده‌های استخراج شده (بارش و رطوبت خاک) ابتدا با داده‌های زمینی ایستگاه هواشناسی و پایش رطوبت خاک در محدوده

جدول ۱- فهرست ایستگاه‌های زمینی مورد استفاده برای محاسبه شاخص SPI

نام ایستگاه	نوع/مرجع	طول (°E)	عرض (°N)	ارتفاع (m)	طول رکورد پیوسته
مهرآباد (Syn.)	IRIMO	۵۱/۳۱	۳۵/۶۹	۱۱۹۰	۲۵ سال
آبعلی (Syn.)	IRIMO	۵۰/۹۰	۳۵/۷۷	۲۲۳۰	۲۴ سال
فیروزکوه (Syn.)	IRIMO	۵۲/۷۷	۳۵/۷۶	۱۹۵۰	۲۵ سال
امام خمینی (Syn.)	IRIMO	۵۱/۱۵	۳۵/۴۲	۱۰۰۹	۲۳ سال
کرج (Syn.)	IRIMO	۵۰/۸۳	۳۵/۸۲	۱۳۱۲	۲۵ سال
ورامین (Syn.)	IRIMO	۵۱/۶۵	۳۵/۳۳	۱۰۱۵	۲۵ سال
دماوند (Auto)	TRWA*	۵۲/۰۵	۳۵/۷۰	۲۰۴۰	۲۰ سال
رباط-کریم (Auto)	TRWA	۵۱/۰۷	۳۵/۴۹	۱۱۰۵	۲۰ سال
شهریار (Auto)	TRWA	۵۱/۰۸	۳۵/۶۵	۱۱۲۰	۲۰ سال
اسلام‌شهر (Auto)	TRWA	۵۱/۲۳	۳۵/۵۶	۱۰۸۰	۱۸ سال
پاکدشت (Auto)	TRWA	۵۱/۶۷	۳۵/۴۸	۱۰۴۰	۱۹ سال
حسن‌آباد (Auto)	TRWA	۵۱/۵۰	۳۵/۳۷	۱۰۶۰	۱۸ سال
۹۰۰ ایستگاه خودکار	TRWA	—	—	—	۱۸-۲۰ سال

* TRWA = Tehran Regional Water Authority.

داده‌های سنجش از دور نیز از منابع مختلفی جمع‌آوری شدند (Rodell et al., 2004). داده‌های MODIS NDVI مجموعه داده‌های MOD13A2 برای شاخص پوشش گیاهی (VCI) با رزولوشن زمانی ۱۶ روز و رزولوشن مکانی ۱ کیلومتر استفاده شدند (Huete et al., 2002). داده‌های MODIS LST از مجموعه داده‌های MOD11A2 برای شاخص وضعیت دما (TCI) با رزولوشن زمانی ۸ روز و رزولوشن مکانی ۱ کیلومتر مورد استفاده قرار گرفتند (Wan et al., 2002). داده‌های بارش TRMM از مجموعه داده‌های "3" B42 برای شاخص وضعیت بارندگی (PCI) با رزولوشن زمانی ماهانه و رزولوشن مکانی

تحلیل‌های آماری با آزمون‌های پارامتریک شامل ضریب همبستگی پیرسون در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ و آنالیز واریانس یک‌طرفه (One-way ANOVA) با مقدار احتمال ۰/۰۵ برای مقایسه میانگین‌های گروهی انجام شد. برای روندهای زمانی از آزمون غیرپارامتری من-کندال در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ و از تخمین گر شیب سن برای برآورد میزان تغییرات استفاده شد. مزیت من-کندال بی‌نیازی از نرمال بودن داده‌ها می‌باشد. محاسبات آماری در نرم‌افزار R نسخه ۴.۲.۰ و با بسته‌های 'trend' (برای من-کندال و شیب سن)، 'stats' (برای ANOVA) و 'corrplot' (برای تحلیل همبستگی) انجام گرفت.

۰/۲۵ درجه به کار رفتند (Huffman et al., 2007). همچنین، داده‌های رطوبت خاک AMSR-E از مجموعه داده‌های MAIAC برای شاخص وضعیت رطوبت خاک (SMCI) با رزولوشن مکانی ۰/۲۵ درجه استخراج شدند (Owe et al., 2008). شاخص‌های VCI، TCI، PCI و SMCI با بهره‌گیری از داده‌های استخراج شده محاسبه گردید. همچنین، شاخص‌های ترکیبی VHI، SDCI و OVDI از طریق ترکیب خطی وزنی شاخص‌های منفرد، بر اساس روابط و ضرایب وزنی مندرج در جدول (۲)، به دست آمدند. طبقه‌بندی سطوح خشکسالی بر پایه شاخص‌های مختلف نیز در جدول (۳) ارائه شده است. وزن‌ها به‌ازای میانگین ۱۶۹ پیکسل کشاورزی شهرستان تهران محاسبه شد و انحراف استاندارد مکانی هر وزن کوچکتر از ۰/۳ بود، بنابراین به‌صورت ثابت در سراسر منطقه مطالعاتی اعمال شد.

نتایج و بحث

تحلیل روند شاخص‌های خشکسالی در مقیاس ماهانه

تحلیل سری زمانی شاخص‌های خشکسالی در مقیاس ماهانه در دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ (شکل ۲) نشان می‌دهد که هر شاخص بُعد مشخصی از دینامیک خشکسالی تهران را آشکار می‌کند و در مجموع تصویری همگرا اما چندلایه ارائه می‌دهد. شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI) از حدود ۲۰ درصد در دوره‌های خشک تا ۷۰ درصد در دوره‌های مرطوب نوسان کرده است، بدین‌معنا که حساسیت پوشش گیاهی به کمبود رطوبت بسیار بالاست. در مقابل، شاخص وضعیت دما (TCI) که بازتاب‌دهنده تنش حرارتی است، در ماه‌های گرم مانند اوت ۲۰۱۶ به حدود ۳۰ درصد رسیده است ولی در ماه‌های خنک‌تر تا حدود ۶۵ درصد افزایش یافته است. این دو شاخص، طبق

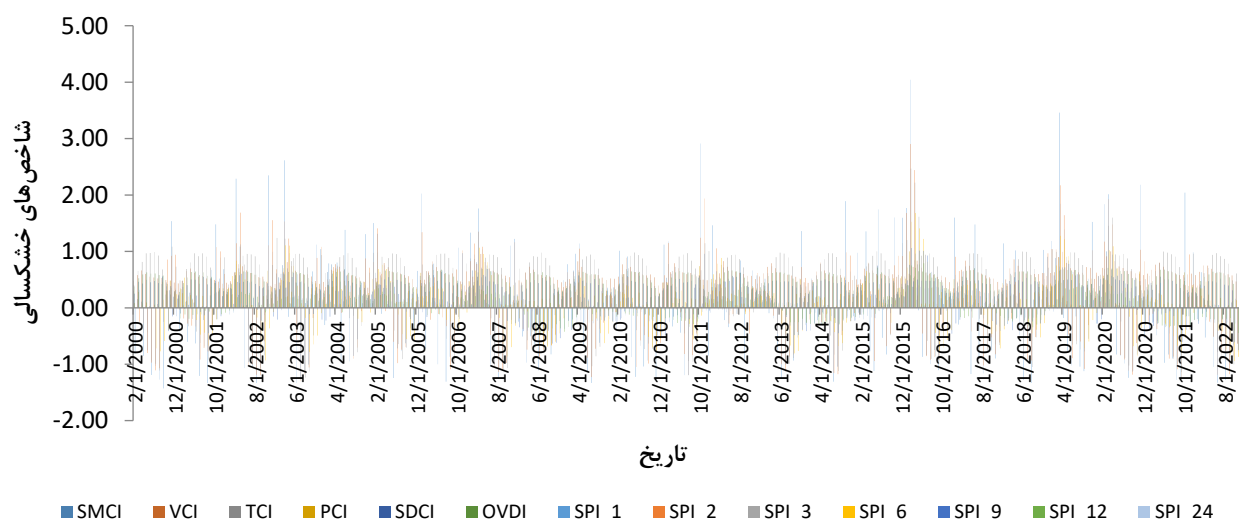
فرمول‌های استاندارد در بازه‌ی صفر تا ۱۰۰ درصد استانداردسازی شدند، مقادیر نزدیک صفر بیانگر تنش شدید و مقادیر نزدیک صد نشانگر شرایط ایده‌آل است (Kagon, 1998). نوسانات حرارتی و پوشش گیاهی با تغییرات بارشی همگام هستند. شاخص بارش استاندارد شده (SPI) از ۲/۵- در ژانویه ۲۰۰۸ (خشکسالی شدید) تا ۱/۷+ در مارس ۲۰۱۲ (ترسالی) تغییر کرده است. شاخص بارندگی PCI نیز همان الگو را تأیید می‌کند. رطوبت خاک (SMCI) بین ۱۵ درصد در دوره‌های خشک و ۷۰ درصد در دوره‌های مرطوب متغیر بوده که همگنی بالای بارش، دما و رطوبت خاک را بازتاب می‌دهد. شاخص‌های ترکیبی چشم‌اندازی جامع‌تری از وضعیت خشکسالی ارائه می‌کنند. شاخص سلامت پوشش گیاهی (VHI)، که هم‌زمان اثر رطوبت و دما را می‌سنجد، حداقل ۴ درصد را در ژانویه ۲۰۰۵ و حداکثر ۸۸ درصد را در می ۲۰۲۰ ثبت کرده است. شاخص مقیاس‌بندی شده خشکسالی (SDCI) بین ۲۵ تا ۷۲ درصد و شاخص پوشش گیاهی (OVDI) از ۸ درصد در دسامبر ۲۰۰۷ تا ۷۱ درصد در ژوئن ۲۰۰۷ و ۷۰ درصد در مارس ۲۰۲۰ نوسان داشته‌اند. بررسی هم‌زمان همه شاخص‌ها حاکی از آن است که شدیدترین دوره‌های خشکسالی ماهانه به ژانویه ۲۰۰۸ و اوت ۲۰۱۶ تعلق دارند، در این دو مقطع، تقریباً تمام شاخص‌های منفرد و ترکیبی به کمینه‌های تاریخی خود نزدیک شده‌اند. در مقابل، مقاطع ترسالی عمدتاً در سال‌های ۲۰۱۲ و ۲۰۲۰ مشاهده شده است. تثبیت این نتایج با چند شاخص، برتری رویکرد چندمعیاره را نسبت به اتکای صرف بر یک شاخص واحد نشان می‌دهد و لزوم استفاده از ابزارهای ترکیبی را در تصمیم‌سازی‌های مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی محیطی تهران برجسته می‌سازد.

جدول ۲- شاخص‌های مورد استفاده به همراه منابع داده‌ها

شاخص خشکسالی	منبع داده	فرمول پایه	منطق وزنی در ادبیات	روش بهینه سازی در این پژوهش	وزن‌های به‌دست‌آمده برای تهران	مرجع
شاخص SPI	بارش	$SPI = \frac{P_i - \bar{P}}{S}$				Mckee et al., (1993)
شاخص پوشش گیاهی VCI	MODIS	$VCI = \frac{NDVI_i - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}}$				Kogan, (1995)
شاخص وضعیت دما TCI	MODIS	$TCI = \frac{LST_{max} - LST_i}{LST_{max} - LST_{min}}$				Kogan, (1997)
شاخص وضعیت رطوبتی خاک SMCI	AMSR-E	$SMCI = \frac{SM_{max} - SM_i}{SM_{max} - SM_{min}}$				Zhang and Jia., (2013)
شاخص وضعیت بارندگی PCI	TRMM	$PCI = \frac{P_{max} - P_i}{P_{max} - P_{min}}$				Du et al., (2013)
شاخص سلامت پوشش گیاهی VHI	VCI, TCI	$VHI = \alpha VCI_i + (1 - \alpha) TCI_i$	Kogan (2022) $\alpha = 0.5$ پیش فرض	آزمون شبکه‌ای $\alpha = 0.30 \dots 0.70$ با گام ۰/۰۲؛ تابع هدف = بیشینه کردن r با SPI-6	$\alpha_{opt} = 0.48$ (≈ 0.5)	Kogan, (1997)
شاخص وضعیت خشکسالی مقیاس بندی شده SDCI	VCI, TCI, PCI	$SDCI = \alpha VCI_i + \beta TCI_i + \gamma PCI_i$	Rhee et al. (2010) $\alpha = \beta = \gamma = \frac{1}{3}$	رگرسیون خطی چندمتغیره (Dependent = SPI-9) + محدودیت $\alpha + \beta + \gamma = 1$ ؛ $\alpha, \beta, \gamma \geq 0$ ؛ اعتبارسنجی متقابل (K-fold (k=5	$\alpha = 0.38$, $\beta = 0.27$, $\gamma = 0.35$	Rhee et al., (2010)
شاخص خشکسالی پوشش گیاهی بهینه شده OVDI	VCI, TCI, PCI, SMCI	$OVDI = \alpha VCI_i + \beta TCI_i + \gamma PCI_i + \delta SMCI_i$	Du et al. (2013) $\alpha = \beta = \gamma = \delta = 0.25$	روش «Entropy-PCA» برای وزن اولیه + پالایش با الگوریتم PSO جهت کمینه کردن RMSE در برابر SPI-12؛ قیود $\alpha + \beta + \gamma + \delta = 1$	$\alpha = 0.28$ $\beta = 0.24$ $\gamma = 0.22$ $\delta = 0.26$	Hao et al., (2015)

جدول ۳- طبقه بندی خشکسالی براساس شاخص‌های مختلف (Rhee et al., 2010; Wei et al., 2021; Kogan, 2022)

کلاس خشکسالی	SPI	VCI	PCI	TCI	SMCI	VHI	SDCI	OVDI
خشکسالی بسیار شدید	< -2	$0 - 0.1$	$0 - 0.1$	$0 - 0.1$	$0 - 0.1$	$0 - 0.1$	$0 - 0.2$	$0 - 0.2$
خشکسالی شدید	$(-1/5) - (-1/99)$	$0.1 - 0.2$	$0.1 - 0.2$	$0.1 - 0.2$	$0.1 - 0.2$	$0.1 - 0.2$	$0.2 - 0.3$	$0.2 - 0.4$
خشکسالی متوسط	$(-1) - (-1/49)$	$0.2 - 0.3$	$0.2 - 0.3$	$0.2 - 0.3$	$0.2 - 0.3$	$0.2 - 0.3$	$0.3 - 0.4$	$0.4 - 0.6$
خشکسالی خفیف	$0 - (-0.99)$	$0.3 - 0.4$	$0.3 - 0.4$	$0.3 - 0.4$	$0.3 - 0.4$	$0.3 - 0.4$	$0.4 - 0.5$	$0.6 - 0.8$
نرمال	$0.99 - 0.1$	$0.4 - 0.5$	$0.4 - 0.5$	$0.4 - 0.5$	$0.4 - 0.5$	$0.4 - 0.5$	$0.5 - 0.8$	$0.8 - 1$



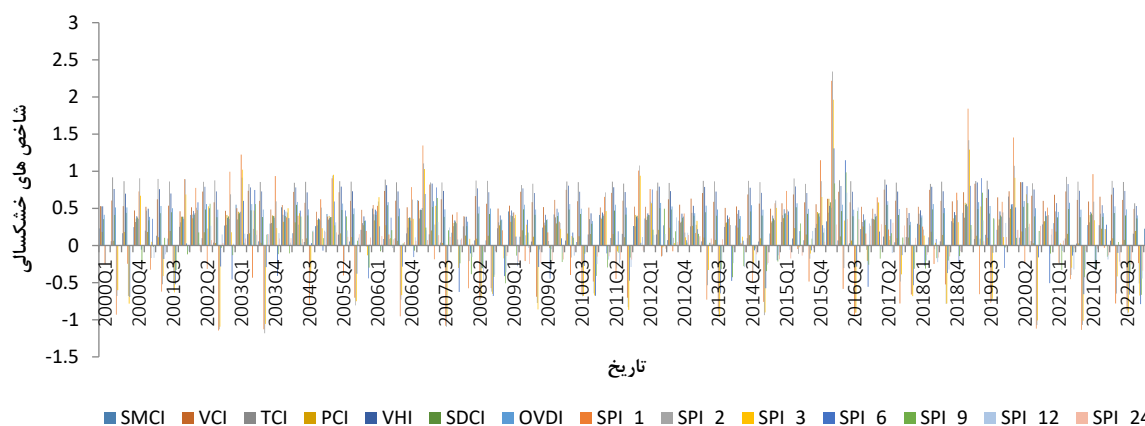
شکل ۲- تغییرات شاخص‌های منفرد و ترکیبی خشکسالی در مقیاس ماهانه تهران (۲۰۲۲-۲۰۰۰)

تحلیل روند شاخص‌های خشکسالی در مقیاس فصلی

بر پایه تحلیل جامع نمودارهای سری زمانی و داده‌های فصلی شاخص‌های خشکسالی تهران در دوره ۲۰۲۲-۲۰۰۰، الگوهای فصلی معنی‌دار و پایداری قابل تشخیص است (شکل ۳). این ارزیابی با اتکاء به مجموعه‌ای از شاخص‌های تک‌متغیره و ترکیبی شامل SPI (هواشناسی)، VCI (پوشش گیاهی)، TCI (تنش حرارتی)، SMCI (رطوبت خاک) و نیز شاخص‌های تلفیقی SDCI، VHI و OVDI با استفاده از آزمون غیرپارامتریک من-کندال و تخمین‌گر شیب سن انجام شد. یافته‌ها نشان می‌دهد در بهار شاخص SPI روند معنی‌داری نشان نداد ($Z=0/209$ ، $P>0/05$ ، $\beta \approx 0/001$). Sen در واحد سال). نمودارها نوسانات شدید را تأیید می‌کنند، به گونه‌ای که در بهار سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۱۶ مقدار SPI به کمتر از ۲- رسیده و هم‌زمان افت چشمگیر VCI وابستگی مستقیم پوشش گیاهی به کمبود بارش را آشکار می‌سازد. بهار سال‌های ۲۰۱۲ و ۲۰۱۸ با $SPI>1$ و $SDCI \approx 0/6$ از شرایط مطلوب‌تر برخوردار است. در تابستان (بحرانی‌ترین فصل) TCI روند کاهشی معنی‌داری را نشان می‌دهد ($P<0/05$ ، $Z=-2/41$ ، $\beta \approx -0/08$ در واحد سال) که تقویت تنش حرارتی را برجسته می‌کند. در تابستان‌های ۲۰۰۸، ۲۰۱۰ و ۲۰۱۶ همه شاخص‌ها هم‌زمان افت شدید داشته‌اند، TCI به کمینه خود رسیده و کاهش هم‌زمان SMCI افت محسوس

رطوبت خاک را بازتاب می‌دهد. در پاییز، روند کاهشی SDCI ضعیف‌تر اما معنی‌دار است ($Z=-1/97$ ، $P<0/05$ ، $\beta \approx -0/04$ در واحد سال) و نمودارها الگوی دوگانه‌ای را نشان می‌دهند.

در سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۱ شاخص SPI و SDCI کاهش معنی‌دار دارند (نه به شدت تابستان)، حال آنکه در ۲۰۱۳ و ۲۰۱۹ افزایش نسبی همه شاخص‌ها بیانگر بهبود اقلیم است. در زمستان، هرچند نمودارها عموماً تعادل بیشتری را نمایش می‌دهند، آزمون‌ها روند کاهشی معنی‌دار SMCI را تأیید می‌کنند ($Z=-2/28$ ، $P<0/05$ ، $\beta \approx -0/06$ در واحد سال) که حاکی از کاهش تدریجی رطوبت خاک است. زمستان‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۱۶ با افت محسوس SPI و SMCI استثنا هستند، در مقابل زمستان‌های ۲۰۱۲ و ۲۰۲۰ با مقادیر مثبت همه شاخص‌ها به‌ویژه SDCI بهترین شرایط دوره را رقم زده‌اند. برآیند فصلی این است که خشکسالی تهران چرخه‌ای مشخص دارد اما شدت و دوام آن سال‌به‌سال تغییر می‌کند. شاخص‌های ترکیبی SDCI، VHI و OVDI با تلفیق مؤلفه‌های هواشناسی، پوشش گیاهی، حرارتی و رطوبتی تصویر دقیق‌تری از پویایی فصلی ارائه می‌دهند و نتایج آماری بلندمدت بر روند کلی تشدید خشکسالی در فصول گرم‌تر و ضرورت برنامه‌ریزی راهبردی و درازمدت برای مدیریت منابع آب و تقویت سامانه‌های پایش و هشدار تأکید می‌کند.



شکل ۳- تغییرات داده‌های فصلی شاخص‌های خشکسالی در منطقه تهران (۲۰۲۲-۲۰۰۰)

تحلیل روند شاخص‌های خشکسالی در مقیاس سالانه

تحلیل روندهای زمانی خشکسالی در مقیاس سالانه در دوره ۲۰۲۲-۲۰۰۰ برای منطقه تهران (شکل ۴)، مبتنی بر داده‌های دقیق سنجنده مودیس و مجموعه‌ای از شاخص‌های SPI، SMCI، VCI، TCI، PCI، SDCI، VHI و OVDI، تصویری منسجم از تغییرات شدت و گستره خشکسالی ارائه می‌کند. ارزیابی روندها با آزمون غیرپارامتریک من-کندال و تخمین‌گر شیب سن انجام و نتایج در جدول (۷) خلاصه شد. کلیه آزمون‌ها بر پایه دوره آماری ۲۳ ساله اجرا گردید. در دوره اولیه ۲۰۰۰-۲۰۰۲، شرایط عمدتاً نرمال با نوسانات جزئی مشاهده شد. من-کندال برای SPI روند کاهشی ضعیفی را گزارش کرد ($P < 0.05$)، $Z = -1.52$ ، $\beta\text{-Sen} \approx -0.02$ در واحد سال)، اما مقادیر اندک مثبت SPI و ثبت SDCI بالاتر از ۰/۵ در کنار پایداری نسبی SMCI و VCI، بیانگر وضعیت اقلیمی نسبتاً مطلوب و رطوبت و پوشش گیاهی پایدارتر است.

در دوره میانی ۲۰۰۳-۲۰۰۷، شدت تغییرات افزایش یافت. برای VCI روند افزایشی بسیار معنی‌دار ثبت شد ($P < 0.001$)، $Z = 3.962$ ، $\beta\text{-Sen} \approx 0.004$ در واحد سال). سال ۲۰۰۴ نقطه اوج با مقادیر بالای SPI و SDCI بود، اما از ۲۰۰۶ به بعد، کاهش پیوسته شاخص‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی رخ داد، SPI به مقادیر منفی رسید، SMCI افت کرد و TCI روند افزایشی تدریجی تنش حرارتی را نشان داد. سال‌های ۲۰۰۸-۲۰۱۰ به عنوان دوره‌ای بحرانی شناخته می‌شوند، SDCI روند کاهشی معنی‌دار داشت ($P < 0.05$)، $Z = -2.28$ ، $\beta\text{-Sen} \approx -0.06$ در واحد سال)، همه شاخص‌ها افت چشمگیر نشان دادند، SPI به

حدود ۲- نزدیک شد، SDCI به کمتر از ۰/۳ سقوط کرد و افزایش TCI حاکی از تشدید تنش حرارتی و کاهش شدید رطوبت خاک بود، پیامد آن خشکی بسیار شدید و آسیب گسترده به پوشش گیاهی است. طی ۲۰۱۱-۲۰۱۵ نوسانات کاهش یافت و نوعی پایداری نسبی شکل گرفت، هرچند OVDI روند کاهشی معنی‌دار داشت ($P < 0.05$)، $Z = -2.37$ ، $\beta\text{-Sen} \approx -0.05$ در واحد سال) و مقادیر منفی شاخص‌های اقلیمی استمرار خشکی را نشان داد. دوره پایانی ۲۰۱۶-۲۰۲۲ نگران‌کننده است؛ VHI روند کاهشی معنی‌دار دارد ($P < 0.05$)، $Z = -2.15$ ، $\beta\text{-Sen} \approx -0.04$ در واحد سال) و شاخص SDCI به کمینه دوره (کمتر از ۰/۴-) رسید، هرچند بهبود موقتی ۲۰۱۹ کوتاه‌مدت بود.

تحلیل پنجره‌های میان‌مدت پنج‌ساله نیز همین الگو را تأیید می‌کند: در ۲۰۰۵-۲۰۰۰ و ۲۰۰۶-۲۰۱۰ نوسانات SDCI ملایم است، اما از ۲۰۱۱ به بعد شدت نوسان و شیب‌های منفی افزایش می‌یابد؛ SMCI و SPI روند نزولی قابل‌توجهی دارند که افت تدریجی رطوبت خاک و کاهش بارش را بازتاب می‌دهد. در جمع‌بندی، PCI روند کاهشی معنی‌داری را نشان می‌دهد ($P < 0.05$)، $Z = -2.41$ ، $\beta\text{-Sen} \approx -0.07$ در واحد سال) و شاخص SPI کاهش مستمر از ۰/۱۶۷- به ۰/۴۸۱- را تجربه کرده است. بنابراین تشدید و طولانی‌تر شدن بازه‌های خشکسالی محرز است و ضرورت اقدام فوری در مدیریت منابع آب، پایش چندشاخصه و برنامه‌ریزی پیشگیرانه برای ارتقای تاب‌آوری منطقه را برجسته می‌سازد.



شکل ۴- تغییرات شاخص‌های خشکسالی در مقیاس سالانه طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ در منطقه تهران

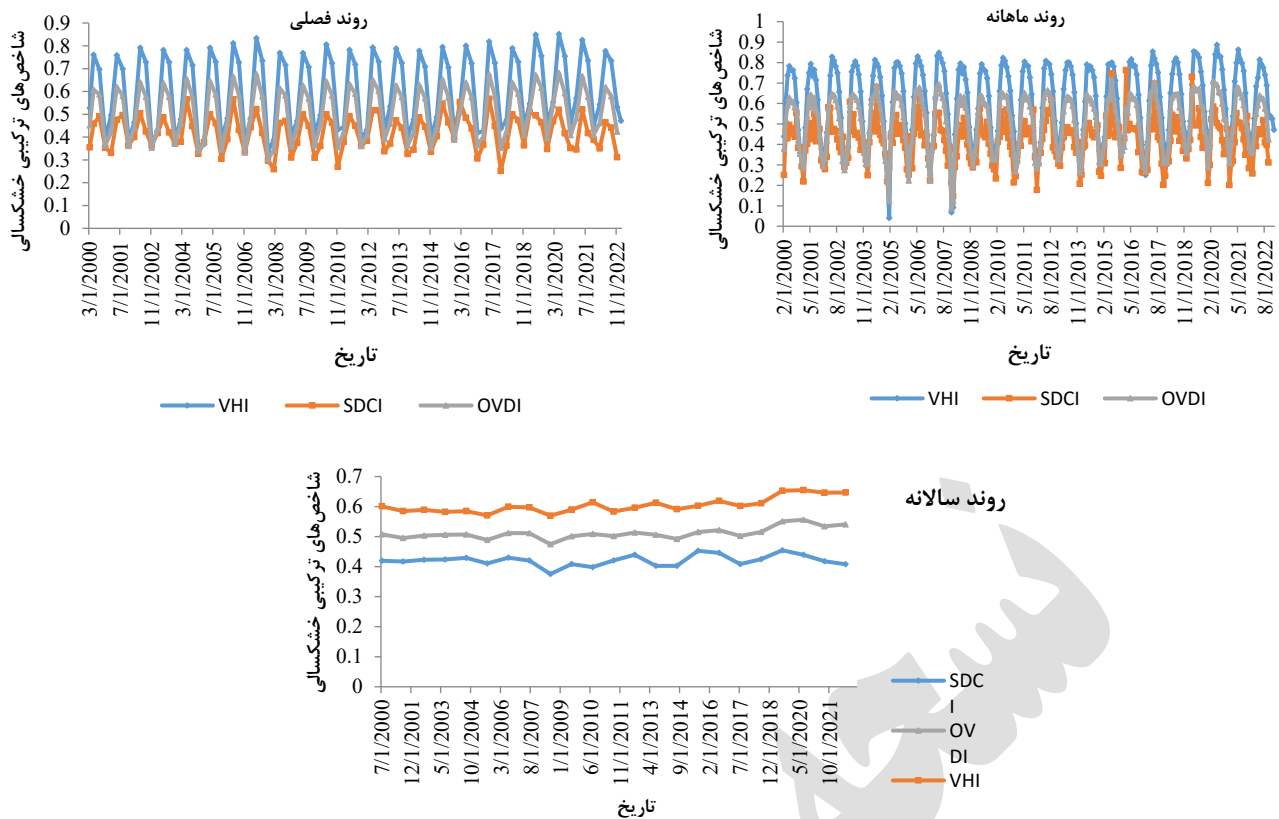
۲۰۱۲ روندی صعودی کلی دارد و به بهبود تدریجی وضعیت پوشش گیاهی اشاره می‌کند. مقایسه شاخص‌ها نشان می‌دهد در برخی دوره‌ها OVDI (متمرکز بر پوشش گیاهی) رفتاری متفاوت از SDCI (با مؤلفه‌های هواشناسی) دارد، این تفاوت می‌تواند به تأخیر پاسخ پوشش گیاهی یا تأثیر مدیریت آب مربوط باشد. در مجموع، تحلیل چند شاخصه در مقیاس‌های زمانی مختلف، تصویری جامع از خشکسالی فراهم می‌آورد و مبنایی برای تصمیم‌سازی آگاهانه در مدیریت خشکسالی و برنامه‌ریزی بلندمدت منابع آب است.

نتایج صحت‌سنجی داده‌های رطوبت خاک و بارش استخراج شده از محیط گوگل ارث انجین با داده‌های زمینی

داده‌های استخراج شده از گوگل ارث انجین (بارش و رطوبت خاک) ابتدا با داده‌های زمینی ۱۲ ایستگاه هواشناسی و ۵ ایستگاه پایش رطوبت خاک در محدوده مطالعاتی تهران صحت‌سنجی شدند (جدول ۴). نتایج صحت‌سنجی نشان داد که همبستگی بین داده‌های بارش ماهواره‌ای و زمینی ۰/۸۷ و برای داده‌های رطوبت خاک ۰/۷۹ است که بیانگر دقت قابل قبول داده‌های ماهواره‌ای است. سپس تحلیل‌های آماری با استفاده از آزمون‌های پارامتریک شامل ضریب همبستگی پیرسون در سطح معنی‌داری ۰/۰۵ و آنالیز واریانس یک‌طرفه (One-way ANOVA) با مقدار احتمال ۰/۰۵ برای مقایسه میانگین‌های گروهی انجام گرفت. برای انجام صحت‌سنجی مراحل زیر انجام شد.

بررسی روند تغییرات شاخص‌های ترکیبی خشکسالی SDCI، VHI و OVDI

روند تغییرات شاخص‌های ترکیبی خشکسالی در سه مقیاس ماهانه، فصلی و سالانه در شکل (۵) نشان می‌دهد که در مقیاس ماهانه همه شاخص‌ها نوسانات قابل توجهی دارند و حساسیت بالای آن‌ها به تغییرات کوتاه‌مدت اقلیمی را بازتاب می‌کنند. شاخص VHI، که به‌طور هم‌زمان اثر خشکسالی بر پوشش گیاهی و دمای سطح زمین را می‌سنجد، بین حداقل ۴۷ درصد در سال ۲۰۲۲ و حداکثر ۶۵ درصد در سال ۲۰۲۰ نوسان کرده است؛ این دامنه، نسبت به سایر شاخص‌ها، می‌تواند بیانگر پاسخ پوشش گیاهی به تغییرات اقلیمی، افزایش دمای سطح یا اثر مدیریت منابع آب باشد. شاخص SDCI نیز در بازه ۲۰ تا ۷۰ درصد تغییر کرده و الگوی رفت‌وبرگشت سریع بین شرایط مرطوب و خشک را نشان می‌دهد. الگوی مشابه با شدت‌های متفاوت در سایر شاخص‌ها نیز دیده می‌شود. در مقیاس فصلی، الگوها شفاف‌تر هستند، شاخص OVDI چرخه‌ای تکرارشونده و هم‌بسته با فصل‌های رشد گیاهی دارد و معمولاً در بهار و تابستان مقادیر بالاتری ثبت می‌کند، درحالی‌که SDCI ضمن حفظ الگوی فصلی، تغییرپذیری بین‌سالی بیشتری نشان می‌دهد. در مقیاس سالانه، روندهای بلندمدت آشکار می‌شود، شاخص SDCI در مقیاس فصلی و سالانه روند کاهشی معنی‌داری (به ترتیب $P=0/049$ و $P=0/018$) نشان داد که بیانگر تشدید خشکسالی در دوره مطالعاتی است و سپس روندی صعودی یافته که می‌تواند نمایانگر دوره‌ای خشکسالی طولانی‌مدت و بهبود تدریجی پس از آن باشد. هم‌زمان، OVDI از حدود



شکل ۵- روند تغییرات ماهانه، فصلی و سالانه شاخص‌های ترکیبی خشکسالی SDCI، VHI و OVDI در منطقه تهران در دوره سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲

تحلیل حساسیت

تحلیل حساسیت شاخص‌های ترکیبی نسبت به پارامترهای تشکیل‌دهنده آنها انجام گرفت تا اهمیت نسبی هر متغیر در عملکرد شاخص‌ها مشخص شود. نتایج نشان داد که در شاخص SDCI، متغیر رطوبت خاک بیشترین تأثیر را در مناطق با پوشش گیاهی متراکم و متغیر دما در مناطق کم‌پوشش دارد.

مقایسه با وقایع تاریخی

نتایج شاخص‌های مختلف با وقایع تاریخی خشکسالی‌های ثبت شده در منطقه (به ویژه خشکسالی‌های سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۱۸-۲۰۱۶) مقایسه شدند و میزان صحت تشخیص این دوره‌ها توسط هر شاخص مورد ارزیابی قرار گرفت (جدول ۶). نتایج این تحلیل نشان داد شاخص‌های ترکیبی SDCI و OVDI با اختلاف کمتر نسبت به مقادیر SPI ایستگاهی، عملکرد بهتری در تشخیص شدت خشکسالی‌های تاریخی داشته‌اند.

صحت‌سنجی با داده‌های مرجع زمینی

تمامی شاخص‌های استخراج شده از داده‌های سنجش از دور NDVI، TCI، VCI، PCI، VHI، SDCI و OVDI با شاخص SPI بدست آمده از داده‌های بارندگی ایستگاه‌های هواشناسی زمینی مقایسه شدند، معیارهای آماری مختلف برای مقایسه شاخص‌های خشکسالی با شاخص SPI ایستگاهی مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۵). این معیارها شامل ضریب همبستگی پیرسون (r)، ضریب تبیین (R^2)، خطای جذر میانگین مربعات (RMSE)، میانگین خطای مطلق (MAE)، میانگین خطای اریبی (MBE) و شاخص توافق ویلموت (d) است. بر اساس این نتایج آماری میانگین خطای مطلق (MAE) شاخص SDCI در تشخیص دوره‌های خشکسالی شدید ۰/۰۷ و برای دوره‌های متوسط ۰/۰۴ بدست آمد که پایین‌ترین میزان خطا در میان تمامی شاخص‌های بررسی شده است.

جدول ۴- نتایج صحت‌سنجی داده‌های بارش و رطوبت خاک برای ایستگاه‌های منطقه مورد بررسی

مجموعه داده	متغیر	معیار	ایستگاه ورامین	ایستگاه کرج	میانگین ۲۱ ایستگاه
GPM-IMERG پس از تصحیح خطا	بارش ماهانه (mm)	r	۰/۸۸	۰/۸۶	۰/۸۴
		RMSE	۱۲/۴	۱۴/۱	۱۵/۲
		NSE	۰/۷۶	۰/۷۱	۰/۶۹
GLDAS-NOAH عمق ۳۰-۳۰۰ cm پس از QM	رطوبت خاک (% vol)	r	۰/۷۸	۰/۸۱	۰/۷۷
		RMSE	۳/۴	۳/۱	۳/۵
		NSE	۰/۶۱	۰/۶۷	۰/۵۸

جدول ۵- معیارهای آماری مقایسه شاخص‌های خشکسالی با SPI ایستگاهی

شاخص	r	R ²	RMSE	MAE	MBE	d
NDVI	۰/۶۴	۰/۴۱	۰/۳۷	۰/۳۱	-۰/۱۵	۰/۶۷
TCI	۰/۶۲	۰/۳۸	۰/۴۲	۰/۳۵	۰/۱۸	۰/۶۲
VCI	۰/۶۷	۰/۴۵	۰/۳۴	۰/۲۹	-۰/۱۳	۰/۷۰
PCI	۰/۷۶	۰/۵۸	۰/۲۹	۰/۲۵	۰/۰۹	۰/۷۳
VHI	۰/۷۳	۰/۵۳	۰/۳۱	۰/۲۶	-۰/۱۱	۰/۷۴
SDCI	۰/۸۵	۰/۷۳	۰/۲۱	۰/۱۸	۰/۰۶	۰/۸۵
OVDI	۰/۸۲	۰/۶۸	۰/۲۴	۰/۲۱	-۰/۰۸	۰/۸۱

جدول ۶- مقایسه عملکرد شاخص‌های خشکسالی در تشخیص دوره‌های خشک تاریخی (۲۰۰۰-۲۰۲۲)

دوره خشکسالی	SPI داده‌های	TCI	VCI	PCI	SDCI	OVDI
۲۰۰۸ شدید	-۱/۷۸	-۱/۴۲	-۱/۳۶	-۱/۶۵	-۱/۷۱	-۱/۶۹
۲۰۱۱ متوسط	-۱/۳۱	-۱/۰۸	-۱/۱۲	-۱/۲۲	-۱/۲۷	-۱/۲۵
۲۰۱۶-۲۰۱۷ شدید	-۱/۹۲	-۱/۵۷	-۱/۴۹	-۱/۷۶	-۱/۸۵	-۱/۸۳
۲۰۲۱ متوسط	-۱/۲۸	-۱/۰۳	-۱/۰۵	-۱/۱۹	-۱/۲۴	-۱/۲۳

مقادیر منفی تر نشان دهنده شدت بیشتر خشکسالی است. مقادیر نزدیک تر به SPI نشان دهنده دقت بالاتر شاخص می‌باشد.

نتایج آزمون‌های من-کندال، شیب سن و آنالیز واریانس

نتایج آزمون‌های من-کندال و تخمین گر شیب سن نشان داد که الگوهای متفاوتی از روند در شاخص‌های خشکسالی در بازه ۲۰۰۰-۲۰۲۲ وجود دارد (جدول ۷). در مقیاس ماهانه، شاخص‌های بارشی SPI ($P=0/58450$) و شاخص PCI ($P=0/54920$) و همچنین شاخص ترکیبی SDCI ($P=0/37340$) روند معنی‌داری نشان ندادند، که نشان‌دهنده نوسانات کوتاه‌مدت بدون روند خطی مشخص است. در مقابل، شاخص‌های پوشش گیاه NDVI ($\beta_{Sen}=0/8210$ ، $P=0/00005$) و شاخص VCI ($P=0/00006$) روندهای افزایشی بسیار معنی‌داری در سطح ۰/۰۰۱ نشان دادند. در مقیاس فصلی، شاخص SDCI روند کاهشی معنی‌دار ($Z=-1/970$ ، $P=0/0488$)، شاخص VHI با $\beta_{Sen}=0/040$ ، در سطح ۰/۰۵ نشان داد. شاخص VCI ($P=0/14320$) روند غیرمعنی‌دار داشت. شاخص‌های پوشش گیاهی NDVI ($P=0/03394$) و شاخص VCI ($P=0/01924$) روندهای افزایشی معنی‌داری در سطح ۰/۰۵

نشان دادند. در مقیاس سالانه، شاخص SDCI روند کاهشی معنی‌دار قوی‌تری ($\beta_{Sen}=-0/050$ ، $Z=-2/370$ ، $P=0/0178$) نشان داد. قوی‌ترین روندهای معنی‌دار مربوط به شاخص‌های پوشش گیاهی بود VCI ($P=0/00007$)، شاخص VHI ($P=0/00022$) و شاخص NDVI ($P=0/000434$) همگی روندهای افزایشی بسیار معنی‌دار نشان دادند. این نتایج نشان می‌دهد که علی‌رغم عدم وجود روند معنی‌دار در شاخص‌های بارشی، شاخص‌های پوشش گیاهی بهبود تدریجی و شاخص ترکیبی SDCI روند کاهشی (تشدید خشکسالی) را در مقیاس‌های فصلی و سالانه نشان می‌دهند.

یافته‌های آزمون آنوا (One-way ANOVA) برای مقایسه میانگین شاخص‌ها در بین کلاس‌های خشکسالی (جدول ۸) و نیز بین فصول (جدول ۹) نشان داد که تفاوت میانگین‌ها در بیشتر شاخص‌ها معنی‌دار است. این نتایج بیانگر آن است که تغییر از یک کلاس خشکسالی به کلاس دیگر، به‌طور معنی‌داری مقدار شاخص‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. آزمون

توکی نیز مشخص کرد که بیشترین تفاوت معنی دار بین کلاس خشکسالی شدید و نرمال وجود دارد

جدول ۷- نتایج آزمون من-کندال (Z) و شیب سن (β Sen) برای شاخص های خشکسالی در سه مقیاس زمانی (ماهانه، فصلی و سالانه)

مقیاس زمانی	شاخص	Z (M-K)	p-value	β Sen (واحد/دوره)	جهت روند	نتیجه ($\alpha=0.05$)
ماهانه	Pr(GPM)	-۱/۷۰۴	۰/۰۸۸۳۹	-۰/۰۲	کاهشی	ns
	Pr(precipitation)	-۰/۳۹۶	۰/۶۹۱۹۰	-۰/۰۰۸	کاهشی	ns
	Pr(Chrips)	۱/۳۶۵	۰/۱۷۲۲۰	۰/۰۲۵	افزایشی	ns
	NDVI	۴/۰۴۴	۰/۰۰۰۰۵	۰/۸۲۱۰	افزایشی	***
	Nratio	۴/۲۹۵	۰/۰۰۰۰۲	۰/۰۰۲	افزایشی	***
	TCI	۰/۲۰۲	۰/۸۳۹۷۰	۰/۰۰۰۰	افزایشی	ns
	VCI	۴/۰۰۸	۰/۰۰۰۰۶	۰/۰۰۰۰	افزایشی	***
	VHI	۱/۵۵۴	۰/۱۲۰۲۰	۰/۰۰۰۰	افزایشی	ns
	PCI	-۰/۵۹۹	۰/۵۴۹۲۰	۰/۰۰۰۰	کاهشی	ns
	SPI	-۰/۵۴۷	۰/۵۸۴۵۰	۰/۰۰۰۰	کاهشی	ns
	pr	-۱/۰۴۶	۰/۲۹۵۶۰	-۰/۰۰۷	کاهشی	ns
	SDCI	۰/۸۹۰	۰/۳۷۳۴۰	۰/۰۰۰۰	افزایشی	ns
	Pr(GPM)	-۱/۲۳۸	۰/۲۱۵۷۰	-۰/۰۹۱۰	کاهشی	ns
	Pr(precipitation)	۰/۲۵۶	۰/۷۹۸۳۰	۰/۰۲۶	افزایشی	ns
	Pr(Chrips)	۱/۳۴۴	۰/۱۷۸۹	۰/۱۳۲۰	افزایشی	ns
	NDVI	۲/۱۲۱	۰/۰۳۳۹۴	۲/۲۴۹۰	افزایشی	*
فصلی	Nratio	۲/۳۶۶	۰/۰۱۷۹۷	۰/۰۰۶	افزایشی	*
	TCI	۰/۱۰۸	۰/۹۱۴۱	۰/۰۰۰۰	افزایشی	ns
	VCI	۲/۳۴۱	۰/۰۱۹۲۴	۰/۰۰۱	افزایشی	*
	VHI	۱/۴۶۴	۰/۱۴۳۲۰	۰/۰۰۰۰	افزایشی	ns
	PCI	۰/۱۱	۰/۹۱۲۸۰	۰/۰۰۰۰	افزایشی	ns
	SPI	۰/۲۰۹	۰/۳۸۴۴۰	۰/۰۰۰۱	افزایشی	ns
	pr	-۰/۶۳۷	۰/۵۲۴۰۰	-۰/۰۱۹۰	کاهشی	ns
	SDCI	-۱/۹۷۰	۰/۰۴۸۸	-۰/۰۴۰	کاهشی	*
	Pr(GPM)	-۱/۸۱۱	۰/۰۷۰۱۸	-۰/۴۰۶۰	کاهشی	ns
	Pr(precipitation)	۰/۸۶۸	۰/۳۸۵۳۰	۰/۲	افزایشی	ns
سالانه	Pr(Chrips)	۱/۷۶۱	۰/۰۷۸۲۲	۰/۴۹۶۰	افزایشی	ns
	NDVI	۲/۸۵۳	۰/۰۰۴۳۴	۸/۶۵۴۰	افزایشی	**
	Nratio	۳/۰۵۱	۰/۰۰۲۲۸	۰/۰۲۵۰	افزایشی	**
	TCI	۱/۰۰۴	۰/۳۱۵۰۶۰	۰/۰۰۱	افزایشی	ns
	VCI	۳/۹۶۲	۰/۰۰۰۰۷	۰/۰۰۴۰	افزایشی	***
	VHI	۳/۶۹۷	۰/۰۰۰۲۲	۰/۰۰۲	افزایشی	***
	PCI	۰/۵۷۱	۰/۵۶۸۳۰	۰/۰۰۱	افزایشی	ns
	SPI	۰/۶۷	۰/۵۰۳	۰/۰۰۵	افزایشی	ns
	pt	-۰/۶۷	۰/۵۰۳	-۰/۰۸۹۰	کاهشی	ns
	SDCI	-۲/۳۷۰	۰/۰۱۷۸	-۰/۰۵۰	کاهشی	*

ns: غیر معنی دار، * $p < ۰/۰۵$ ، ** $p < ۰/۰۱$ ، *** $p < ۰/۰۰۱$ ، $\alpha = ۰/۰۵$

جدول ۸- نتایج آزمون واریانس یک‌طرفه برای مقایسه میانگین شاخص‌ها بین کلاس‌های خشکسالی (بر مبنای SPI)

شاخص	منبع تغییر	درجه آزادی	درجه آزادی	F	p-value	نتیجه
Pr(GPM)	کلاس‌های خشکسالی (بر مبنای	۴	۲۷۳	۵۵/۷۳۹	۰/۰۰۰۰	***
Pr(precipitation)	کلاس‌های خشکسالی (بر مبنای	۴	۲۷۳	۱۷۸/۸۷	۰/۰۰۰۰	***
Pr(Chrips)	کلاس‌های خشکسالی (بر مبنای	۴	۲۷۳	۴۱/۵۷۵	۰/۰۰۰۰	***
NDVI	کلاس‌های خشکسالی (بر مبنای	۴	۲۷۳	۲/۴۹۳	۰/۰۰۴۳۴	*
Nratio	کلاس‌های خشکسالی (بر مبنای	۴	۲۷۳	۲/۸۹	۰/۰۰۲۲۷	*
TCI	کلاس‌های خشکسالی (بر مبنای	۴	۲۷۳	۲۶/۵۶۸	۰/۰۰۰۰	***
VCI	کلاس‌های خشکسالی (بر مبنای	۴	۲۷۳	۳/۲۵۶	۰/۰۰۱۲۴	*
VHI	کلاس‌های خشکسالی (بر مبنای	۴	۲۷۳	۱۸/۱۷۵	۰/۰۰۰۰	***
PCI	کلاس‌های خشکسالی (بر مبنای	۴	۲۷۳	۲۰۹/۰۱۲	۰/۰۰۰۰	***
Pr	کلاس‌های خشکسالی (بر مبنای	۴	۲۷۳	۲۷/۷۶۱	۰/۰۰۰۰	***

ns: P > ۰/۰۵, *P < ۰/۰۵, **P < ۰/۰۱, ***P < ۰/۰۰۱; α = ۰/۰۵

جدول ۹- نتایج آزمون واریانس یک‌طرفه برای مقایسه میانگین شاخص‌ها بین فصول

شاخص	منبع تغییر	درجه آزادی	درجه آزادی (درون گروه)	F	p-value	نتیجه
Pr(GPM)	فصل (بهار/تابستان/پاییز/زمستان)	۳	۲۷۴	۲۵/۳۶۴	۰/۰۰۰۰	***
Pr(precipitation)	فصل (بهار/تابستان/پاییز/زمستان)	۳	۲۷۴	۲۷/۹۹۲	۰/۰۰۰۰	***
Pr(Chrips)	فصل (بهار/تابستان/پاییز/زمستان)	۳	۲۷۴	۵۱/۴۳۳	۰/۰۰۰۰	***
NDVI	فصل (بهار/تابستان/پاییز/زمستان)	۳	۲۷۴	۱۳۱/۳۴۱	۰/۰۰۰۰	***
Nratio	فصل (بهار/تابستان/پاییز/زمستان)	۳	۲۷۴	۱۲۰/۸۹۲	۰/۰۰۰۰	***
TCI	فصل (بهار/تابستان/پاییز/زمستان)	۳	۲۷۴	۳۰۶/۳۰۳	۰/۰۰۰۰	***
VCI	فصل (بهار/تابستان/پاییز/زمستان)	۳	۲۷۴	۱۶۰/۰۱۱	۰/۰۰۰۰	***
VHI	فصل (بهار/تابستان/پاییز/زمستان)	۳	۲۷۴	۳۲۴/۷۵۵	۰/۰۰۰۰	***
PCI	فصل (بهار/تابستان/پاییز/زمستان)	۳	۲۷۴	۲۶/۰۰۲	۰/۰۰۰۰	***
SPI	فصل (بهار/تابستان/پاییز/زمستان)	۳	۲۷۴	۲۷/۱۰۱	۰/۰۰۰۰	***

ns: (معنی دار نیست) P > ۰/۰۵, *P < ۰/۰۵, **P < ۰/۰۱, ***P < ۰/۰۰۱; α = ۰/۰۵

تحلیل همبستگی شاخص‌های خشکسالی تهران: ارزیابی جامع و چندلایه

تحلیل همبستگی شاخص‌های خشکسالی در تهران، نشان‌دهنده وجود ارتباطات قوی، معنی‌دار و متنوع میان شاخص‌های مختلف است که برای درک بهتر روندهای خشکسالی و طراحی سیاست‌های بهینه مدیریت منابع حیاتی است. این تحلیل بر سه مقیاس زمانی ماهانه، فصلی و سالانه انجام شده و نتایج کلیدی زیر به تفصیل ارائه می‌شود.

تحلیل ماتریس همبستگی شاخص‌های خشکسالی در مقیاس ماهانه

تحلیل ماتریس همبستگی شاخص‌های خشکسالی در مقیاس ماهانه، الگوهای متنوع و معنی‌داری از ارتباطات بین شاخص‌های مختلف را نمایان می‌سازد (جدول ۱۰). این تحلیل نشان می‌دهد که شاخص‌های خشکسالی در مقیاس ماهانه، روابط پیچیده و متقابلی با یکدیگر دارند. در میان شاخص‌های

ترکیبی SDCI و OVDI با ضریب همبستگی ۰/۸۴ ارتباط قوی و مثبتی را نمایش می‌دهند که نشان‌دهنده حساسیت مشابه این شاخص‌ها به تغییرات شرایط خشکسالی است. شاخص OVDI همبستگی قابل توجهی با شاخص‌های VHI، VCI (به ترتیب ۰/۹۸، ۰/۸۱) نشان می‌دهد. از نظر همبستگی‌های منفی، قوی‌ترین رابطه معکوس بین شاخص TCI و اکثر شاخص‌های منفرد و ترکیبی مشاهده می‌شود. شاخص‌های بارشی SPI، PCI و SMCi به دلیل ماهیت‌های بارشی، همبستگی بالایی را با یکدیگر نشان می‌دهند که تأییدکننده دقت و قابلیت اعتماد یکسان این شاخص‌ها در پایش تغییرات بارش ماهانه است. این الگوهای همبستگی نشان می‌دهند که در مقیاس ماهانه، شاخص‌های مختلف خشکسالی جنبه‌های متفاوتی از این پدیده را منعکس می‌کنند. استفاده از رویکرد چندشاخصه می‌تواند به درک جامع‌تری از وضعیت خشکسالی منجر شود، زیرا هر شاخص بخش خاصی از تغییرات محیطی را پوشش می‌دهد.

جدول ۱۰- همبستگی بین شاخص‌های مختلف خشکسالی در مقیاس ماهانه (۲۰۰۰-۲۰۲۲)، n=۳۹۶

شاخص	SPI	PCI	SMCI	VCI	TCI	VHI	OVDI	SDCI
SPI	۱/۰۰	۰/۹۵*	۰/۹۳*	۰/۳۵	-۰/۴۲*	۰/۴۰*	۰/۴۸*	۰/۴۵*
PCI		۱/۰۰	۰/۹۴*	۰/۳۰	-۰/۵۸*	۰/۳۸	۰/۴۴*	۰/۶۰*
SMCI			۱/۰۰	۰/۲۸	-۰/۵۶*	۰/۳۶	۰/۴۲*	۰/۵۸*
VCI				۱/۰۰	-۰/۷۱*	۰/۸۸*	۰/۸۱*	۰/۷۶*
TCI					۱/۰۰	-۰/۸۶*	-۰/۹۱*	-۰/۷۸*
VHI						۱/۰۰	۰/۹۸*	۰/۸۹*
OVDI							۱/۰۰	۰/۸۴*
SDCI								۱/۰۰

ضریب همبستگی پیرسون $p < ۰/۰۰۱$ ، $p < ۰/۰۱$ ، $p < ۰/۰۵$ ، ns: (معنی دار نیست)

تحلیل همبستگی در مقیاس فصلی

تحلیل ماتریس همبستگی شاخص‌های خشکسالی در مقیاس فصلی، الگوهای قابل توجهی از روابط متقابل بین شاخص‌های مختلف را آشکار می‌سازد (جدول ۱۱). بررسی دقیق این روابط نشان‌دهنده پیچیدگی تعاملات بین شاخص‌ها در ارزیابی پدیده خشکسالی است. در میان شاخص‌های ترکیبی، قوی‌ترین همبستگی مثبت بین OVDI و VHI با ضریب همبستگی ۰/۹۸ مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده عملکرد بسیار نزدیک این دو شاخص در مقیاس فصلی و ماهیت گیاهی یکسان آنها است. همچنین SDCI و OVDI با ضریب همبستگی ۰/۹۰ ارتباط قوی و مثبتی را نشان می‌دهند که تأییدکننده حساسیت مشابه این شاخص‌ها به تغییرات فصلی شرایط خشکسالی است. از نظر همبستگی‌های منفی، قوی‌ترین رابطه معکوس بین TCI و شاخص‌های مرتبط با بارندگی SPI، PCI و SMCI مشاهده می‌شود. این همبستگی

منفی قوی نشان می‌دهد که در مقیاس فصلی، افزایش تنش حرارتی با افزایش شدت خشکسالی و کاهش میزان بارندگی و رطوبت خاک ارتباط مستقیم دارد. شاخص‌های بارشی SPI و PCI، همانند مقیاس ماهانه، همبستگی کامل (۱/۰۰) را نشان می‌دهند که تأییدکننده پایداری و قابلیت اعتماد این شاخص‌ها در ارزیابی تغییرات بارش فصلی است. شاخص VCI همبستگی‌های متوسط تا قوی با سایر شاخص‌ها نشان می‌دهد، از جمله همبستگی مثبت با شاخص OVDI با ضریب ۰/۸۲ و شاخص SDCI با ضریب ۰/۷۶ و نشان‌دهنده اهمیت پوشش گیاهی در ارزیابی خشکسالی فصلی است. این الگوهای همبستگی نشان می‌دهند که در مقیاس فصلی، شاخص‌های خشکسالی روابط پیچیده‌تر و قوی‌تری نسبت به مقیاس ماهانه دارند. این امر اهمیت استفاده از رویکرد چندشاخصه در ارزیابی خشکسالی فصلی و لزوم توجه به تعاملات متقابل بین شاخص‌ها می‌باشد.

جدول ۱۱- همبستگی بین شاخص‌های مختلف خشکسالی در مقیاس فصلی (۲۰۰۰-۲۰۲۲)، n=۱۳۲

شاخص	SPI میانگین فصلی	PCI	SMCI	VCI	TCI	VHI	OVDI	SDCI
SPI	۱/۰۰	۰/۹۷*	۰/۹۵*	۰/۳۵	-۰/۶۵*	۰/۴۵*	۰/۵۰*	۰/۵۲*
PCI		۱/۰۰	۰/۹۳*	۰/۳۰	-۰/۶۳*	۰/۴۲*	۰/۴۸*	۰/۵۰*
SMCI			۱/۰۰	۰/۲۸	-۰/۶۰*	۰/۴۰*	۰/۴۶*	۰/۴۹*
VCI				۱/۰۰	-۰/۷۸*	۰/۸۲*	-۰/۸۲*	۰/۷۶*
TCI					۱/۰۰	-۰/۹۰*	-۰/۹۲*	-۰/۸۸*
VHI						۱/۰۰	-۰/۹۸*	۰/۹۰*
OVDI							۱/۰۰	۰/۹۰*
SDCI								۱/۰۰

ضریب همبستگی پیرسون $p < ۰/۰۰۱$ ، $p < ۰/۰۱$ ، $p < ۰/۰۵$ ، ns: (معنی دار نیست)

تحلیل همبستگی در مقیاس سالانه

تحلیل ماتریس همبستگی شاخص‌های خشکسالی در مقیاس سالانه، نشان می‌دهد که در مقیاس زمانی سالانه، الگوهای همبستگی متمایزی نسبت به مقیاس‌های ماهانه و فصلی وجود دارد (جدول ۱۲). در میان شاخص‌های ترکیبی، قوی‌ترین همبستگی بین OVDI و VHI با ضریب همبستگی (۰/۹۳) مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده عملکرد کاملاً یکسان این دو

شاخص در ارزیابی خشکسالی سالانه است. همچنین، این دو شاخص با SPI-9 و SPI-12 همبستگی بهتری نسبت به سایر دوره‌ها نشان می‌دهند که بیانگر نقش کلیدی بارش در محاسبات این شاخص‌های ترکیبی است. SDCI به عنوان یک شاخص ترکیبی دیگر همبستگی قابل توجهی با شاخص‌های بارشی SPI و PCI دارد که نشان‌دهنده حساسیت این شاخص به تغییرات بارش سالانه است. شاخص TCI نمونه جالبی از

مقیاس‌های زمانی دیگر، همبستگی کامل (۱/۰۰) را نشان می‌دهند که تأییدکننده پایداری و قابلیت اعتماد این شاخص‌ها در ارزیابی 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. این امر اهمیت استفاده از رویکرد چندشاخصه در ارزیابی خشکسالی سالانه را برجسته می‌سازد و نشان می‌دهد که ترکیب شاخص‌های مختلف می‌تواند به درک جامع‌تری از وضعیت خشکسالی در مقیاس سالانه منجر شود.

همبستگی‌های منفی را نشان می‌دهد. این شاخص قوی‌ترین همبستگی منفی را با شاخص SMCi (۰/۷۳-) دارد. این روابط معکوس نشان می‌دهد که افزایش تنش حرارتی با افزایش شدت خشکسالی در مقیاس سالانه ارتباط مستقیم دارد. شاخص VCI الگوی منحصر به فردی را نشان می‌دهد، با همبستگی قوی با OVDI با ضریب ۰/۸۹ و همبستگی متوسط با SDCI با ضریب همبستگی ۰/۷۴ این الگو نشان می‌دهد که شاخص وضعیت پوشش گیاهی در مقیاس سالانه، ارتباط نزدیک‌تری با شاخص‌های ترکیبی مرتبط با پوشش گیاهی دارد تا با شاخص‌های بارشی. شاخص‌های بارشی SPI و PCI، مانند

جدول ۱۲. همبستگی بین شاخص‌های مختلف خشکسالی در مقیاس سالانه (۲۰۰۰-۲۰۲۲)، n=۳۳

شاخص	SPI میانگین سالانه	PCI	SMCI	VCI	TCI	VHI	OVDI	SDCI
SPI	۱/۰۰	۱/۰۰*	۰/۹۲*	۰/۴۰	-۰/۵۲*	۰/۵۵*	۰/۶۰*	۰/۶۲*
PCI		۱/۰۰	۰/۹۰*	۰/۳۸	-۰/۵۰*	۰/۵۳*	۰/۵۸*	۰/۶۰*
SMCI			۱/۰۰	۰/۳۶	-۰/۷۳*	۰/۵۰*	۰/۵۷*	۰/۶۵*
VCI				۱/۰۰	-۰/۸۲*	۰/۸۹*	۰/۸۹*	۰/۷۴*
TCI					۱/۰۰	-۰/۸۸*	-۰/۹۱*	-۰/۷۹*
VHI						۱/۰۰	۰/۹۳*	۰/۸۶*
OVDI							۱/۰۰	۰/۸۵*
SDCI								۱/۰۰

ضریب همبستگی پیرسون $p < ۰/۰۰۱$ ***، $p < ۰/۰۱$ **، $p < ۰/۰۵$ *، ns: معنی دار نیست

نتیجه‌گیری

با توجه به یافته‌های این مطالعه، که بر پایه تحلیل جامع داده‌های سنجش از دور و هواشناسی در شهرستان تهران در دوره آماری سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ انجام شده، می‌توان نتیجه گرفت که منطقه تهران به طور مداوم با چالش‌های خشکسالی مواجه بوده است. شدت و گستره این پدیده، بسته به عوامل زمانی و مکانی، نوسانات قابل توجهی نشان می‌دهد. شاخص‌های ترکیبی، نظیر شاخص خشکسالی مقیاس‌بندی‌شده (SDCI) و شاخص خشکسالی پوشش گیاهی بهینه‌شده (OVDI)، به دلیل ادغام چندین متغیر کلیدی (مانند پوشش گیاهی، دما، بارش و رطوبت خاک)، دقت بالاتری نسبت به شاخص‌های منفرد در ارزیابی شدت و مدت خشکسالی ارائه می‌دهند. این برتری، که از طریق همبستگی‌های قوی با شاخص استاندارد بارش (SPI) محاسبه‌شده از داده‌های زمینی تأیید می‌شود، امکان تحلیل جامع‌تری از دینامیک خشکسالی را فراهم می‌آورد.

روند زمانی خشکسالی‌ها حاکی از الگوهای دوره‌ای است، سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۲ عمدتاً در طبقه‌بندی خشکسالی متوسط قرار می‌گیرند، در حالی که ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۶ بهبود نسبی نشان داده و به سمت شرایط ملایم یا بدون خشکسالی

گرایش دارند. بازگشت به خشکسالی‌های متوسط تا شدید در ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰، و سپس بهبود تدریجی از ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۰ (با استثنایهایی مانند ۲۰۱۳ و ۲۰۱۵ که خشکسالی متوسط را تجربه کردند)، بر لزوم پایش مداوم تأکید دارد. در مقیاس ماهانه و فصلی، ماه‌های فوریه، ژوئیه و نوامبر و فصل تابستان بیشترین شدت خشکسالی را نشان می‌دهند. در مقابل ماه‌های آوریل و اکتبر و فصل زمستان وضعیت مساعدتری دارند. تحلیل همبستگی‌ها نیز نقش محوری شاخص‌های ترکیبی را برجسته می‌سازد. این شاخص‌ها نه تنها همبستگی قوی با عوامل مستقل (مانند بارش و پوشش گیاهی) دارند، بلکه قابلیت بازتاب دقیق تغییرات در مقیاس‌های زمانی مختلف را فراهم می‌کنند. شاخص‌های بارشی مانند SPI و PCI، با همبستگی کامل خود، ابزارهای مناسبی برای ارزیابی خشکسالی‌های ناشی از کمبود بارش هستند، هرچند شاخص‌های مذکور در مقیاس ماهانه فاقد روند معنی‌دار بودند، در حالی که نقش دما (تشدیدکننده) و پوشش گیاهی (تعدیل‌کننده) بر اهمیت رویکرد چندبعدی تأکید دارد. روند کاهش شاخص SDCI (تشدید خشکسالی) و روند افزایشی شاخص‌های پوشش گیاهی ممکن است ناشی از بهبود مدیریت آب، آبیاری یا سازگاری پوشش گیاهی باشد. در نهایت، این

- pressure deficit using a dense network of automatic weather stations in coastal Brazil. *Agricultural and Forest Meteorology*. 118(3-4), pp. 237-250. [https://doi.org/10.1016/S01681923\(03\)00122-9](https://doi.org/10.1016/S01681923(03)00122-9)
2. Chen, D., Hu, H., Liao, C., Ye, J., Bao, W., Mo, J., et al., 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*, 215(c), pp.108388. doi: [10.1016/j.compag.2023.108388](https://doi.org/10.1016/j.compag.2023.108388)
 3. Du, L., Tian, Q., Yu, T., Meng, Q., Jancso, T., Udvardy, P., et al., 2013. A comprehensive drought monitoring method integrating MODIS and TRMM data, International, *Journal of Applied Earth Observation and geoinformation*, 23(A), pp. 245-253, DOI:[10.1016/j.jag.2012.09.010](https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.09.010)
 4. Dutta, D., Kundu, A., Patel, N.R., Saha, S.K., and Siddiqui, A.R., 2015. Assessment of agricultural drought in Rajasthan (India) using remote sensing derived Vegetation Condition Index (VCI) and Standardized Precipitation Index (SPI). *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 18(1), pp.53-63. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejrs.2015.03.006>
 5. Hao, C., Zhang, J. and Yao, F., 2015. Combination of multi-sensor remote sensing data for drought monitoring over Southwest China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 35(B), pp. 270-283. [Doi.org/10.1016/j.jag.2014.09.011](https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.09.011).
 6. Hosseini, N., Ghorbanpour, M. and 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. *Scientific Reports*, 14, 3641. [Doi.org/10.1038/s41598-024-53405-5](https://doi.org/10.1038/s41598-024-53405-5).
 7. Huete, A. R., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., and Ferreira, L. G., 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83(1-2), pp.195-213. DOI: [10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)
 8. Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Nelkin, E. J., Wolff, D. B., Adler, R. F., Gu, G., et al., 2007. The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *Journal of Hydrometeorology*, 8(1), pp.38-55. <http://dx.doi.org/10.1175/JHM560.1>
 9. Jalili, S., 2005. Comparison of satellite and meteorological indicators in drought monitoring (case study of Tehran province) supervised by Morid Saeed, Master's thesis, Tarbiat Modares University (Inpersian). <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.2008479.1388.39.1.8.7>
 10. Kogan, F.N., 1997. Global drought watch from space. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(4), pp.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)

یافته‌ها کاربردهای عملی گسترده‌ای در مدیریت منابع آب و کشاورزی ارائه می‌دهند. ادغام شاخص‌های ترکیبی در سامانه‌های هشدار زودهنگام و پایش خشکسالی می‌تواند تصمیم‌گیری‌ها را ارتقا دهد و استراتژی‌های پیشگیرانه را تقویت کند. برای مقابله مؤثر با خشکسالی در تهران، پیشنهاد می‌شود برنامه‌های جامع چندجانبه‌ای تدوین شود که شامل مدیریت تقاضا و عرضه آب، افزایش بهره‌وری (به ویژه در بخش‌های کشاورزی و شهری)، توسعه منابع جایگزین (مانند بازیافت آب)، آموزش عمومی و حمایت از تحقیقات نوآورانه هستند. چنین رویکردی نه تنها اثرات منفی خشکسالی را کاهش می‌دهد بلکه می‌تواند پایه‌ای علمی برای سیاست‌گذاری در کلان‌شهر تهران و مناطق مشابه فراهم آورد و تأکید می‌کند که بدون ادغام داده‌های زمینی و ماهواره‌ای، دقت ارزیابی‌ها محدود خواهد ماند.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از سازمان آب منطقه‌ای استان تهران و سازمان هواشناسی به خاطر در اختیار قرار دادن داده و اطلاعات تشکر می‌نمایند.

تضاد منافع نویسندگان

در این مقاله هیچ‌گونه تضاد منافی وجود ندارد و این مسئله مورد تایید همه نویسندگان است

دسترسی به داده‌ها

همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است

مشارکت نویسندگان

نحوه و میزان مشارکت نویسندگان در انجام این پژوهش به صورت زیر است:

نویسنده اول: جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل اولیه داده‌ها
نویسنده دوم: تحلیل داده‌ها، رسم نمودارها ویرایش و بازبینی مقاله، کنترل نتایج

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر عملی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تایید همه آنها می‌باشد.

منابع

1. Almeida, C. and Landsberg, J.J., 2003. Evaluating methods of estimating global radiation and vapor

- in *Space Research*, 21(3), pp.481-484.
[https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(97\)00884-3](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(97)00884-3)
20. 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. [In parsian]
<https://doi.org/10.22111/gdij.2024.8175>
21. Wan, Z., Zhang, Y., Zhang, Q. and 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), pp.163-180.
[http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00093-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00093-7)
22. Wassie, S.B., Mengistu, D.A. and Berlie, A.B., 2022. Trends and spatiotemporal patterns of meteorological drought incidence in North Wollo, northeastern highlands of Ethiopia. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(12), p.1158.
<https://doi.org/10.1007/s12517-022-10423-9>
23. Wei, W., Zhang, J., Zhou, L., Xie, B., Zhou, J., Li, C., 2021. Comparative evaluation of drought indices for monitoring drought based on remote sensing data, *Environmental Science and Pollution Research International*. 28, pp. 20408–20425.
[doi: 10.1007/s11356-020-12120-0](https://doi.org/10.1007/s11356-020-12120-0)
24. Zhang, A., and Jia, G., 2013. Monitoring meteorological drought in semiarid regions using multi-sensor microwave remote sensing data, *Remote Sensing of Environment*, (134), pp.12-23.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.02.023>
25. Zhang, J., Mu, Q., Huang, J., 2016. Assessing the remotely sensed Drought Severity Index for agricultural drought monitoring and impact analysis in North China, *Ecological Indicators*, (63), pp. 296-309.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.11.062>
26. Zhao, X., Xia, H., Pan, L., Song, H., Niu, W., Wang, R., et al., (2021). Drought Monitoring over Yellow River Basin from 2003–2019 Using Reconstructed MODIS Land Surface Temperature in Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 13(18), pp.37-48,
doi.org/10.3390/rs13183748
11. Kogan, F. N., 1995. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in Space Research*, 15(11), pp.91-100.
[https://doi.org/10.1016/0273-1177\(95\)00079-T](https://doi.org/10.1016/0273-1177(95)00079-T)
12. Kogan, F., 2022. New Remote Sensing Vegetation Health Technology. In: *Remote Sensing Land Surface Changes*. Springer, Cham. pp. 121–148.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-96810-6_5
13. 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, California, The U.S.A., pp, 179-184.
14. Owe, M., R. de Jeu, and Holmes, T., 2008. Multisensor historical climatology of satellite-derived global land surface moisture, *Journal of Geophysical Research*, 113(F), pp.01002.
<https://doi.org/10.1029/2007JF000769>
15. Pokhrel, Y., Felfelani, F., Satoh, Y., Boulange, J., Burek, P., Gädeke, et al., 2021. Global terrestrial water storage and drought severity under climate change. *Nature Climate Change*, 11(3), 226-233.
<https://doi.org/10.1038/s41558-020-00972-w>
16. Rhee, J., Im, J., and 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.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2010.07.005>
17. Rodell, M., Houser, P. R., Jambor, U., Gottschalck, J., Mitchell, K., Meng, C.-J., et al., 2004. The global land data assimilation system. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85(3), pp. 381–394.
<https://doi.org/10.1175/BAMS-85-3-381>
18. 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*. 27(3), pp.213-226.[In parsian]
<https://doi.org/10.22092/ijwmse.2020.126860.1684>
19. Seiler, R. A., Kogan, F., and Sullivan, J., 1998. AVHRR-based vegetation and temperature condition indices for drought detection in Argentina. *Advances*