

مقاله علمی-پژوهشی

## ارزیابی و پایش خشکسالی هیدرولوژیکی و کشاورزی با استفاده از شاخص‌های منفرد و چندگانه SDI و OMDI، MIDI (مطالعه موردی تهران)

هادی سیاسی<sup>۱\*</sup>، محبوبه ابراهیمی<sup>۲</sup>

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۲۴

### چکیده

خشکسالی یکی از مهم‌ترین مخاطرات طبیعی است که محیط زیست، کشاورزی، منابع آب و اقتصاد را عمیقاً تحت تأثیر قرار می‌دهد. اطلاعات دقیق درباره شدت، مدت و گستره آن برای کاهش آسیب‌پذیری و مدیریت مخاطرات ضروری است. این پژوهش برای مقایسه شاخص‌های پایش خشکسالی با داده‌های سنجش از دور در شهرستان تهران انجام شد. در این مطالعه به‌طور خاص از شاخص‌های ترکیبی خشکسالی نظیر شاخص خشکسالی سنتز شده SDI، شاخص خشکسالی یکپارچه مایکروویو MIDI و شاخص خشکسالی هواشناسی بهینه شده OMDI استفاده شده است به منظور محاسبه شاخص‌های مذکور از داده‌های ماهواره‌ای گوگل ارث انجین و برای ارزیابی آنها از داده‌های زمینی (بارش و رطوبت خاک) در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ استفاده شد. شاخص‌های منفرد سنجش از دور که برای محاسبه شاخص‌های ترکیبی یا چندگانه استفاده شدند شامل شاخص وضعیت دمایی TCI، شاخص وضعیت پوشش گیاهی VCI، شاخص وضعیت بارندگی PCI و شاخص وضعیت رطوبتی خاک SMCi همچنین از مقیاس‌های زمانی مختلف شاخص بارش استاندارد شده SPI به منظور ارزیابی شاخص‌های سنجش از دور ماهواره‌ای با داده‌های واقعی زمینی استفاده شد. نتایج بدست آمده نشان داد خشکسالی در مقیاس‌های ماهانه، فصلی و سالانه نوسان دارد. شاخص‌های ترکیبی، به‌ویژه MIDI و OMDI، به دلیل تلفیق چند عامل مؤثر، دقت و جامعیت بیشتری درباره شدت و مدت خشکسالی ارائه می‌دهند. بررسی روندها نشان می‌دهد سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰ خشکسالی متوسط و شدید داشته‌اند و ماه‌های فوریه، ژوئیه، نوامبر و فصل تابستان بیشترین خشکسالی و ماه‌های آوریل و اکتبر و فصل زمستان وضعیت بهتری دارند. این یافته‌ها تأکید می‌کند شاخص‌های ترکیبی تصویری دقیق و جامع از خشکسالی در تهران ارائه داده و مبنای قابل اعتمادی برای برنامه‌ریزی مدیریت منابع آب، کشاورزی و سامانه‌های هشدار زودهنگام فراهم می‌کنند.

واژه‌های کلیدی: خشکسالی، شهرستان تهران، MIDI، OMDI، SDI

### مقدمه

کمک کند تا آسیب‌پذیری مناطق آسیب‌دیده از خشکسالی و خطرات مرتبط با آن را کاهش دهند. یکی از چالش‌های عمده مدل‌سازی خشکسالی در ایران، در دسترس نبودن داده‌های هواشناسی در بسیاری از نقاط کشور است. پایش خشکسالی بر اساس داده‌های سنجش از دور می‌تواند بر چالش‌های جمع‌آوری داده‌های مشاهده زمینی غلبه کند و برای پایش مداوم فرایندها و تغییرات خشکسالی در زمان و مکان استفاده شود (Hao and Singh., 2015). پرکاربردترین شاخص‌های مبتنی بر تصاویر سنجش از دور شامل شاخص‌های ارزیابی وضعیت پوشش گیاهی (VCI)، 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)، شاخص وضعیت دمایی (TCI) که برای ارزیابی اثرات

خشکسالی یک امر طبیعی، موقت و پدیده‌ای تکراری ناشی از کمبود بارندگی است که بر سلامت و رفاه افراد تأثیر منفی می‌گذارد و اقتصاد و سیاست جامعه با پیامدهای گسترده مواجه می‌شود؛ تغییرات اقلیمی نیز با افزایش شدت و فراوانی خشکسالی، این آثار منفی را تشدید کرده و نیاز به پایش دقیق‌تر را برجسته کرده است (Rahman et al., 2025; Ghobadi & Bادهیان, 2025). اطلاعات در مورد شدت، مدت و پوشش مکانی خشکسالی می‌تواند به تصمیم‌گیرندگان

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

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

\*-نویسنده مسئول (Hadi.Siasar@pnu.ac.ir)

همکاران از شاخص‌های منفرد و ترکیبی برای سنجش خشکسالی چین در فاصله سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۱ پرداختند، مقیاس‌های زمانی مختلف شاخص شدت خشکسالی پالم (PDSI) و شاخص بارش استاندارد (SPI) برای ارزیابی شاخص‌های خشکسالی سنجش از دور در مناطق مختلف استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد که شاخص‌های مختلف خشکسالی دارای ویژگی‌های خاصی در انواع مختلف کاربری زمین در چین هستند. شاخص‌های VCI و TCI می‌توانند شرایط خشکسالی بلند مدت را بهتر پایش کنند، اما همبستگی ضعیفی با شاخص خشکسالی مرجع زمینی در مناطق جنگلی و مرتعی دارند. همبستگی SPI-1 با PCI بیشتر از همبستگی با سایر شاخص‌های منفرد است که نشان می‌دهد PCI یک شاخص خشکسالی کوتاه‌مدت خوب است. شاخص SMCI همبستگی بهتری با شاخص خشکسالی کوتاه‌مدت ایستگاهی دارد، اما برای پایش خشکسالی در مناطقی مانند زمین‌های جنگلی متراکم و مرتع مناسب نیست. همبستگی شاخص خشکسالی زمینی با شاخص‌های ترکیبی خشکسالی MIDI، OVDI، OMDI، SDCI و SDI بهتر از همبستگی با شاخص‌های منفرد خشکسالی است (Wei et al., 2021). ویسی و همکاران با هدف شناسایی و توصیف خشکسالی‌های کشاورزی با استفاده از شاخص‌های چندگانه مبتنی بر MODIS در شمال وولو، اتیوپی پژوهشی انجام دادند. نتایج این تحقیق نشان داد در دوره مطالعه، هیچ سال بدون خشکسالی در منطقه وجود نداشت. شاخص TCI تنش خشکسالی را نسبت به سایر شاخص‌ها نسبتاً اغراق‌آمیز نشان داد. با این حال، VHI پوشش مساحت کمتر و سطح تنش کمتری را نسبت به شاخص‌های منفرد منتج از آن VCI و TCI نشان داد. به طور خاص، سال‌های ۲۰۰۲، ۲۰۰۴، ۲۰۰۹، ۲۰۱۰ و ۲۰۱۵ همگی به عنوان سال‌های خشکسالی شدید شناسایی شدند، که در آنها بیش از ۶۰٪ از منطقه تحت تأثیر خشکسالی قرار گرفت (Wassie et al., 2022). قبادی و همکاران از شاخص‌های خشکسالی NDVI، VCI، TCI و VHI بدست آمده از داده‌های لندست و مودیس جهت روندیابی خشکسالی در مناطق مختلف ایران استفاده کردند و نتیجه گرفتند با استفاده از شاخص‌های مذکور می‌توان روندهای خشکسالی را با دقت قابل قبولی بدست آورد همچنین تحلیل تصاویر سال‌های ۲۰۰۴، ۲۰۱۴ و ۲۰۲۴ نشان داد مساحت مناطق بدون خشکسالی در استان لرستان طی بیست سال گذشته حدود ۱۴/۷ درصد کاهش یافته و مناطق خشکسالی خفیف و متوسط به ترتیب ۶/۵ و ۸/۲ درصد افزایش یافته‌است، که با کاهش پوشش گیاهی و افزایش اراضی بایر همبستگی معنی داری دارد (Ghobadi and Badehian, 2025). در پنجاب پاکستان با استفاده از شاخص‌های VCI، TCI و VHI مبتنی بر داده‌های MODIS دریافتند که در بازه ۲۰۰۱-۲۰۱۸ خشکسالی‌های شدید تا خفیف رخ داده و این خشکسالی‌ها باعث

حرارتی خشکسالی استفاده می‌شود، این شاخص با تحلیل داده‌های دمای سطح زمین، استرس‌های حرارتی وارده بر پوشش گیاهی را ارزیابی می‌کند (Kogan et al., 2022)، شاخص وضعیت بارش PCI که برای ارزیابی بارش در مناطق مختلف استفاده می‌شود (Du et al., 1995; Kogan 2013) و شاخص وضعیت رطوبتی خاک SMCL نیز به منظور پایش رطوبت خاک و تحلیل شرایط خشکسالی کشاورزی به کار می‌رود (Seiler et al., 1998).

شاخص‌های ارزیابی خشکسالی مبتنی بر مشاهدات زمینی یا تصاویر ماهواره‌ای به دلیل وجود فرایندهای پیچیده، اثرات و برهمکنش‌های متقابل و متنوع به صورت منفرد قادر به ارزیابی دقیق خشکسالی‌ها نیستند (Hao and Singh., 2015). برای این منظور شاخص‌های خشکسالی ترکیبی با هدف در نظرگرفتن رویکرد چندگانه و همزمان فرایندهای اساسی دخیل در خشکسالی مانند شرایط سلامت پوشش گیاهی، وضعیت دمایی، شرایط خاک و بارش و تبخیر و تعرق با دقت بالاتری به بررسی این پدیده می‌پردازند و امروزه مورد توجه محققین این حوزه قرار گرفته‌اند. به عنوان مثال شاخص ترکیبی خشکسالی مایکروویو MIDI که از شاخص‌های وضعیت رطوبتی خاک SMCI، شاخص وضعیت دمایی TCI و شاخص وضعیت بارش PCI منتج شده است یک شاخص خشکسالی بهینه است که به خوبی شرایط خشکسالی هیدرولوژیکی در شرایط نیمه خشک را نشان می‌دهد (Zhang and Jia., 2013). شاخص خشکسالی هواشناسی بهینه شده (OMDI) که بر اساس شاخص‌های منفرد خشکسالی VCI، TCI، PCI و SMCI بدست می‌آید، به عنوان ابزاری برای شناسایی و پایش همزمان خشکسالی کشاورزی و هواشناسی کاربرد دارد (Hao and Singh., 2015) و در نهایت شاخص خشکسالی سنتز شده (SDI)، که با استفاده از شاخص‌های منفرد TCI، PCI، و VCI قابل حصول است شاخص خوبی برای ارزیابی خشکسالی کشاورزی است (Du et al., 2013).

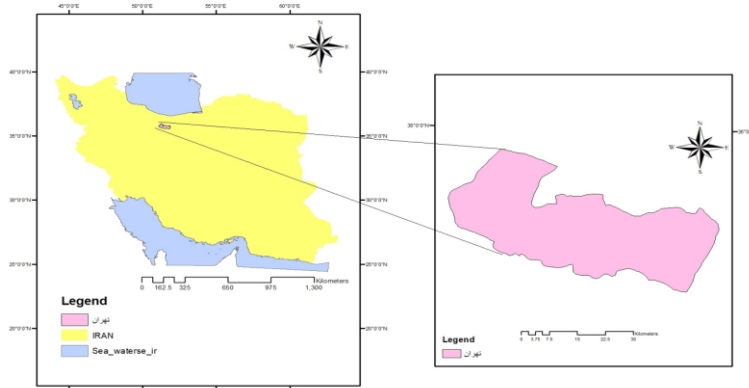
جهانبخش و همکاران (۱۳۸۸) با استفاده از شاخص‌های مربوط به خشکسالی کشاورزی، تغییرات پوشش گیاهی دشت سراب را ارزیابی و دو دوره خشکسالی ۱۳۸۰ و ترسالی ۱۳۸۳ را تحلیل کردند. آنها در مطالعه خود از تصاویر سنجنده ETM و ماهواره SPOT بهره بردند. نتایج نشان دهنده چشمگیر بودن تغییرات شاخص سلامت گیاه VHI به ویژه در مناطق زیر کشت دیم بوده است. سیاسر و همکاران (۱۴۰۲) وضعیت خشکسالی در استان گلستان را با مقایسه داده‌های 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 کلاس‌های خشکسالی خیلی شدید و شدید قرار دارد و نیازمند بازنگری در مدیریت و بهینه سازی در مصرف منابع است. وی و

رفت. تهران، به دلیل موقعیت جغرافیایی و اقلیم نیمه خشک، بارها با خشکسالی‌های مکرر روبه‌رو شده است؛ این پدیده افزون بر خدشه به کیفیت زندگی ساکنان، آینده توسعه پایدار پایتخت را نیز تهدید می‌کند (Hosseini et al., 2024). در این چارچوب، پژوهش حاضر به صورت سیستماتیک هفت شاخص منفرد و ترکیبی پایش خشکسالی را که بر پایه تصاویر سنجنش از دور و داده‌های زمینی استخراج می‌شوند، انتخاب و مقایسه کرده است. داده‌ها از طریق ایستگاه‌های هواشناسی و اسکرپت‌نویسی در سامانه گوگل ارث انجین فراهم شد تا ارتباط شاخص‌ها با داده‌های ایستگاهی در محدوده تهران تحلیل شود. تکرار خشکسالی‌های شدید و اثرات سوء آن بر کشاورزی، منابع آب و اقتصاد شهری ضرورت به‌کارگیری شاخص‌های دقیق و جامع برای پایش و مدیریت خشکسالی را دوچندان می‌کند؛ این مطالعه با توسعه و تلفیق شاخص‌ها می‌کوشد دقت برآوردها را افزایش داده و راهکارهای مؤثرتری برای مدیریت خشکسالی در این منطقه ارائه دهد.

### روش انجام تحقیق

این مطالعه با هدف ارزیابی مقایسه‌ای شاخص‌های خشکسالی در تهران با استفاده از داده‌های سنجنش از دور و هواشناسی صورت گرفته است. منطقه مورد مطالعه شامل شهرستان تهران (تهران، کن و آفتاب) 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 دارای آب و هوای نیمه خشک است و با دوره‌های خشکسالی متعدد مواجه می‌شود. بارش معمولاً در زمستان‌ها زیاد است به نحوی که متوسط بارندگی سالانه بدست آمده از ایستگاه‌های هواشناسی موجود در این محدوده مطالعاتی حدود ۳۵۱ میلی‌متر و دمای حاصله بین میانگین حداقل و حداکثر ۰ و ۳۷ درجه سانتیگراد برآورد شده است.

کاهش عملکرد محصولات اصلی مانند برنج (۳۹ درصد)، نیشکر (۳۴ درصد) و گندم (۲۵ درصد) شده است و شاخص VHI بیشترین همبستگی را با عملکرد نخود و VCI بیشترین همبستگی را با عملکرد نیشکر و برنج داشت (Rahman et al., 2025). بابایی و همکاران (۱۴۰۴) در تحقیقی از شاخص ترکیبی CDI (ترکیب شاخص‌های VCI، TCI و PCI) برای ارزیابی خشکسالی در استان چهارمحال و بختیاری در دوره زمانی سال‌های ۲۰۰۱-۲۰۲۰ استفاده کردند، نتایج بدست آمده نشان داد این شاخص با ضریب تعیین  $0/83$  بیشترین تطابق را با شاخص SPI داشت و کارایی آن از شاخص‌های منفرد VCI، TCI و PCI بیشتر بود. شاهیگی و همکاران (۱۴۰۴) با استفاده از سه شاخص SPI، PDSI و SRI و تلفیق آنها در قالب شاخص ترکیبی MCDI برای ۱۰ ایستگاه هواشناسی ایران طی دوره ۱۹۹۰-۲۰۲۱ نشان دادند که کوتاه‌ترین دوره بازگشت ۵۰ ساله خشکسالی به ترتیب در تبریز و تهران ۱۰ ماه با شدت‌های  $6/53$  و  $8/95$  و طولانی‌ترین آن در مشهد ۳۰ ماه با شدت  $26/34$  است و برای دوره بازگشت ۱۰۰ ساله نیز کمترین مدت در تبریز ۱۳ ماه (شدت  $13/75$ ) و بیشترین مدت در کرمان ۴۸ ماه (شدت  $42/56$ ) ثبت شده است؛ این پژوهش تأکید می‌کند که استفاده از شاخص MCDI امکان ارزیابی جامع خشکسالی و برنامه‌ریزی مدیریت منابع آب را فراهم می‌آورد. عسگری و همکاران (۱۴۰۴) در مطالعه‌ای جنگل‌های بلوط استان ایلام را با تحلیل شاخص SPI و روند سبزیگی NDVI بررسی کردند، نتایج بدست آمده نشان داد در سال‌های ۲۰۰۷، ۲۰۰۸، ۲۰۱۱، ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶ بیشترین فراوانی خشکسالی رخ داده است و از ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ حدود  $17/894$  هکتار از جنگل‌های بلوط خشکیده و تخریب شدند. همبستگی بین خشکسالی هواشناسی و خشکیدگی بلوط در دوره‌های ۲۰۰۲-۲۰۰۶، ۲۰۰۷-۲۰۱۱ و ۲۰۱۲-۲۰۱۶ به ترتیب  $96/6/4$ ،  $95/4/8$  و  $98/8$  درصد ( $0/988$ ) و  $0/980$ ،  $0/995$  ( $R^2 =$ ) بوده و پیش‌بینی شده در صورت تداوم این روند سالانه بیش از  $4/118$  هکتار دیگر از این جنگل‌ها از بین خواهد



شکل ۱- نقشه منطقه مورد مطالعه (شهرستان تهران)

### داده‌های انجام تحقیق

برای انجام این پژوهش داده‌های هواشناسی از منابع مختلف برای دوره زمانی ژانویه ۲۰۰۰ تا دسامبر ۲۰۲۲ جمع‌آوری شدند. این داده‌ها شامل داده‌های بارش (PR) از مجموعه داده‌های GPM (Huffman et al., 2007) و رطوبت خاک (SM) از مجموعه داده‌های GLDAS بودند. برای برآورد خشکسالی هواشناسی از شاخص SPI استفاده شد. به دلیل سهولت کاربرد و انعطاف پذیری این شاخص، به طور گسترده برای پایش خشکسالی با دوره‌های زمانی مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد همچنین برای صحت سنجی داده‌های سنجش از دور استفاده می‌شود در این مطالعه از شاخص SPI با مقیاس‌های یک ماهه، سه ماهه، شش ماهه، نه ماهه، یکساله و دوساله استفاده شده است. همچنین فرآیند پردازش داده‌های ماهواره‌ای طی مراحل متعدد و با دقت بالا انجام گرفت. ابتدا، داده‌های سنجنده MODIS با قدرت تفکیک مکانی ۱ کیلومتر از محصول MOD13A2 دریافت شد. پیش‌پردازش‌های 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، داده‌های NDVI با استفاده از روش میانگین‌گیری زمانی (Time-composite) به صورت ماهانه تجمیع شدند. تحلیل‌های آماری با استفاده از آزمون‌های پارامتریک شامل ضریب همبستگی پیرسون در سطح معناداری ۹۵ درصد و آنالیز واریانس یک‌طرفه ۰/۵۲۴ (One-way ANOVA) برای مقایسه میانگین‌های 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 نرم‌افزار R نسخه ۴.۲۰ بسته‌های 'stats' و 'trend' انجام گرفت.

داده‌های سنجش از دور از منابع مختلفی جمع‌آوری شد (Rodell et al., 2014). 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 دمایی (TCI) با رزولوشن مکانی ۱ کیلومتر مورد استفاده قرار گرفتند (Wan et al., 2002). داده‌های بارش TRMM از مجموعه داده‌های "3B42" برای شاخص وضعیت بارندگی (PCI) با رزولوشن زمانی ماهانه و رزولوشن مکانی 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). علاوه بر این، برای ارزیابی جامع‌تر، شاخص‌های ترکیبی شامل شاخص خشکسالی یکپارچه مایکروویو (MIDI)، شاخص خشکسالی هواشناسی بهینه شده (OMDI) و شاخص خشکسالی سنتز شده (SDI) با ترکیب وزنی شاخص‌های منفرد محاسبه شدند (جدول ۱). این شاخص‌ها با استفاده از ترکیب داده‌های سنجش از دور و هواشناسی، تصویری جامع و دقیق از وضعیت خشکسالی در منطقه مورد مطالعه ارائه می‌دهند (Vicente-Serrano et al., 2010). برای تحلیل داده‌ها و ارزیابی شاخص‌های مختلف، از تحلیل همبستگی پیرسون استفاده شد. طبقات مختلف خشکسالی براساس شاخص‌های مورد مطالعه در جداول (۲) ارائه شده است.

### نتایج و بحث

#### تحلیل روندهای زمانی خشکسالی در مقیاس ماهانه

بر اساس تحلیل داده‌ها و نمودار سری زمانی شاخص‌های خشکسالی در مقیاس ماهانه برای شهرستان تهران (۲۰۰۰-۲۰۲۲)، الگوهای پیچیده و معناداری از تغییرات زمانی در شدت و گستره خشکسالی قابل مشاهده است (شکل ۲).

جدول ۱- شرح شاخص‌های خشکسالی مبتنی بر سنجش از دور، شامل نام‌ها، منابع داده‌ها، فرمول‌های محاسبه‌شده و مراجع

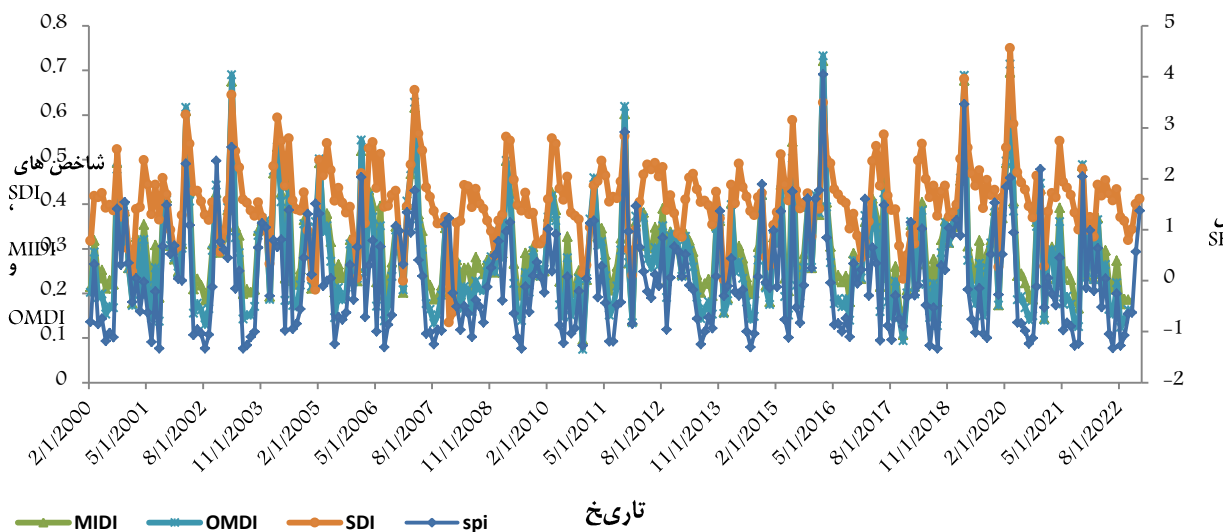
مرجع	معادله	منبع داده	شاخص خشکسالی
Kogan, 1995	$VCI = \frac{NDVI_i - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}}$	MODIS	VCI
Kogan, 1997	$TCI = \frac{LST_{max} - LST_i}{LST_{max} - LST_{min}}$	MODIS	TCI
Zhang&Jia., 2013	$SMCI = \frac{SM_{max} - SM_i}{SM_{max} - SM_{min}}$	AMSR-E	SMCI
Rhee et al., 2010	$PCI = \frac{P_{max} - P_i}{P_{max} - P_{min}}$	TRMM	PCI
این مطالعه	$PCA$	VCI,TCI,PCI,SMCI	SDI
این مطالعه	$MIDI = \frac{VCI_i + TCI_i + PCI_i + SMCI_i}{4}$	VCI,TCI,PCI,SMCI	MIDI
این مطالعه	$OMDI = \alpha VCI_i + \beta TCI_i + \gamma PCI_i$	VCI,TCI,PCI	OMDI

جدول ۲- کلاس‌های خشکسالی بر اساس شاخص‌های مختلف

SPI	VCI	TCI	PCI	SMCI	MIDI	OMDI	SDI	کلاس‌های خشکسالی
کمتر از ۲-	0-0,1	0-0,1	0-0,1	0-0,1	0-0,1	0-0,2	0-0,2	خشکسالی بسیار شدید
(-1.99) - (-1.5)	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,1-0,2	0,2-0,4	0,2-0,4	خشکسالی شدید
(-1.49) - (-1)	0,2-0,3	0,2-0,3	0,2-0,3	0,2-0,3	0,2-0,3	0,4-0,6	0,4-0,6	خشکسالی متوسط
(-0.99) - (0)	0,3-0,4	0,3-0,4	0,3-0,4	0,3-0,4	0,3-0,4	0,6-0,8	0,6-0,8	خشکسالی خفیف
0-1	0,5-1	0,5-1	0,5-1	0,5-1	0,4-1	0,8-1	0,8-1	نرمال

نرمال) و حداقل آن ماه مارس ۲۰۱۰ رخ داده است. شاخص خشکسالی سنتز شده SDI از حداقل ۱۳ درصد در دسامبر ۲۰۰۷ (خشکسالی بسیار شدید) تا حداکثر ۷۴ درصد در مارس ۲۰۲۰ در نوسان است که نشان می‌دهد این شاخص بیشتر از الگوی شاخص‌های منفرد مربوط به پوشش گیاهی تبعیت می‌کند. در مجموع، تحلیل روندهای ماهانه نشان می‌دهد که شدیدترین دوره‌های خشکسالی در دسامبر ۲۰۰۷، ژانویه ۲۰۰۸، مارس ۲۰۱۰ و اگوست ۲۰۱۶ رخ داده است. شاخص‌های ترکیبی با ارائه دیدگاهی جامع‌تر، ابزار مناسب‌تری برای پایش و ارزیابی خشکسالی در مقیاس ماهانه فراهم می‌کنند. این یافته‌ها اهمیت استفاده از رویکرد چندشاخصه در مدیریت منابع آب و برنامه‌ریزی‌های محیطی را برجسته می‌سازد.

تحلیل جامع شاخص‌های مختلف، تصویر روشنی از دینامیک خشکسالی در منطقه ارائه می‌دهد. در بررسی شاخص‌های مختلف خشکسالی میزان شاخص SPI در دوره‌های خشکسالی شدید به  $2/5-$  رسیده (ژانویه ۲۰۰۸)، در حالی که در دوره‌های مرطوب به  $1/7+$  افزایش یافته است (مارس ۲۰۱۲). شاخص‌های ترکیبی MIDI و OMDI با ترکیب پارامترهای مختلف، تصویر جامع‌تری از وضعیت خشکسالی ارائه می‌دهند. شاخص MIDI در مقیاس ماهانه از حداقل ۹/۵ درصد در مارس ۲۰۱۰ خشکسالی بسیار شدید تا حداکثر ۷۲ درصد در فوریه ۲۰۱۶ شرایط نرمالی را نشان داد. شاخص OMDI نیز الگوی مشابهی را با شاخص MIDI در مقیاس ماهانه نشان می‌دهد و حداکثر مقدار آن به میزان ۷۳ درصد در فوریه ۲۰۱۶ (شرایط



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

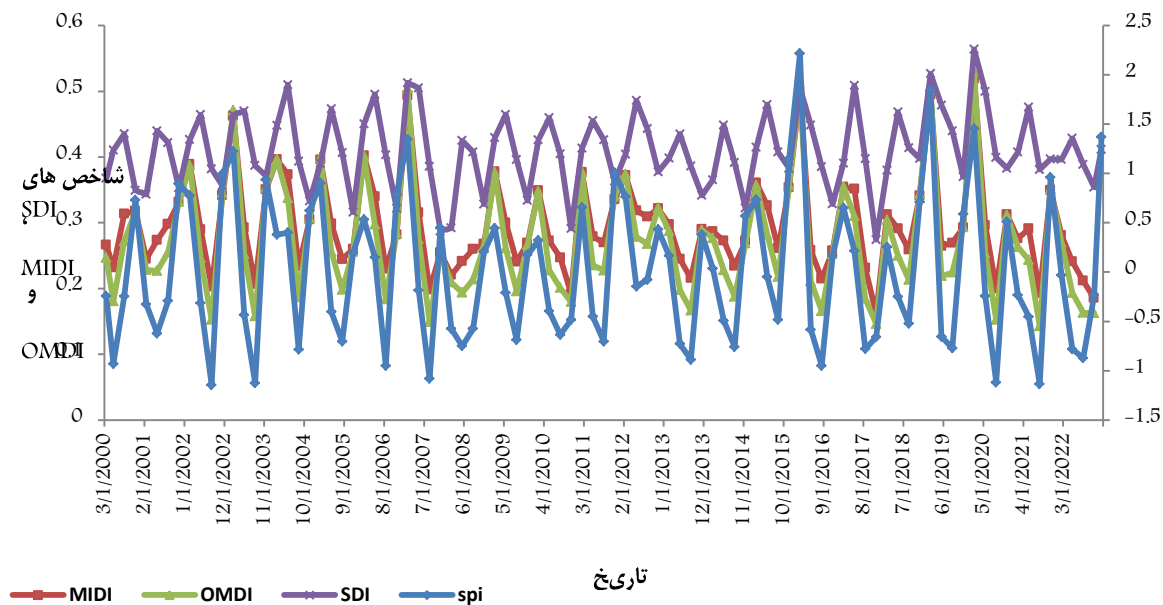
مثبت و در تابستان و پاییز بیشترین مقادیر منفی را نشان می‌دهد. این شاخص در پاییز سال ۲۰۰۲ به پایین‌ترین مقدار منفی خود ( $1/14-$ ) رسید. بهار سال ۲۰۱۶ با حداکثر مقدار مثبت SPI بزرگتر از یک ( $2/22$ ) شرایط مطلوب‌تری را از نقطه نظر این شاخص تجربه کرد. شاخص TCI در زمستان ۲۰۰۶ به پایین‌ترین سطح خود رسیده (۲۴درصد) این شرایط با کاهش همزمان در شاخص SMCI (۱۶ درصد) همراه بوده که بیانگر افت شدید رطوبت خاک است. شاخص

### تحلیل روندهای زمانی خشکسالی در مقیاس فصلی

بر اساس تحلیل جامع نمودارهای سری زمانی و داده‌های فصلی شاخص‌های خشکسالی در شهرستان تهران (۲۰۲۲-۲۰۰۰)، می‌توان الگوهای پیچیده و معناداری از تغییرات فصلی را شناسایی کرد (شکل ۳). این تحلیل با استفاده از شاخص‌های مختلف، تصویر دقیقی از دینامیک خشکسالی در مقیاس فصلی ارائه می‌دهد. از نظر شاخص SPI مقادیر این شاخص در فصل بهار و زمستان بیشترین مقادیر

فصول بهار و تابستان (اثرات پوشش گیاهی) می‌باشد. 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. شاخص‌های ترکیبی با در نظر گرفتن همزمان چندین پارامتر، تصویر دقیق‌تری از این تغییرات فصلی ارائه می‌دهند.

های ترکیبی MIDI، OMDI و SDI روند مشابهی را نشان می‌دهند حداکثر میزان این شاخص‌ها در فصل بهار ۲۰۲۰ و حداقل مقادیر آن‌ها در زمستان ۲۰۱۷ مشاهده شد. بررسی کلی روند فصلی این شاخص‌ها نشان دهنده شرایط مطلوب‌تر در فصول زمستان و بهار (به استثنای زمستان ۲۰۱۷) برای شاخص‌های MIDI و OMDI و همچنین مقادیر بیشتر و شرایط مطلوب‌تر برای شاخص SDI در



شکل ۳- نمودار سری زمانی شاخص‌های ترکیبی خشکسالی در مقیاس فصلی شهرستان تهران (۲۰۲۲-۲۰۰۰)

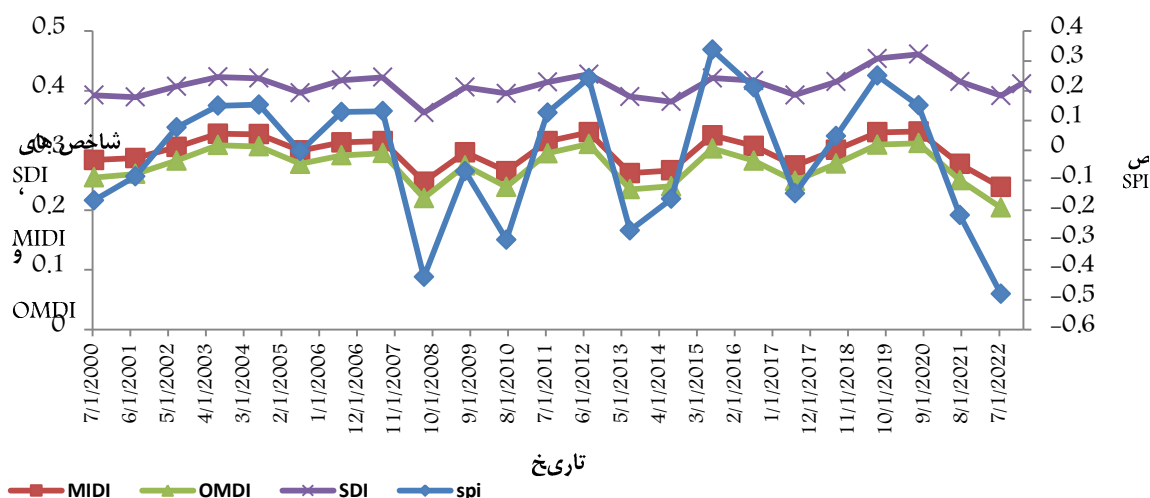
شاخص‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی رخ داد، به طوری که شاخص SPI به مقادیر منفی رسید و شاخص‌های ترکیبی مانند MIDI کاهش محسوسی را نشان دادند. سال‌های ۲۰۰۸-۲۰۱۰ به عنوان یک دوره بحرانی در شدت خشکسالی شناسایی می‌شوند. در این بازه، تمامی شاخص‌ها کاهش چشمگیری را تجربه کردند. شاخص SPI به حدود ۲- رسید، و شاخص MIDI به مقادیر کمتر از ۰/۳ کاهش یافتند. 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. با این حال، شاخص‌های ترکیبی همبستگی بالایی را در این دوره نشان دادند که حاکی از تداوم شرایط خشک در بیشتر مناطق بود. علی‌رغم کاهش نسبی شدت خشکسالی، شاخص‌های اقلیمی همچنان مقادیر منفی داشتند که نشان دهنده آسیب‌پذیری اقلیمی منطقه است. دوره پایانی (۲۰۱۶-۲۰۲۲) نشان دهنده روند نگران‌کننده‌ای در شدت خشکسالی است. در این دوره، کاهش چشمگیری در مقادیر شاخص‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی مشاهده شد. به‌ویژه در سال

### تحلیل روندهای زمانی خشکسالی در مقیاس سالانه (۲۰۰۰-۲۰۲۲)

تحلیل روندهای زمانی خشکسالی در مقیاس سالانه طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ در شهرستان تهران (شکل ۴) بر پایه داده‌های دقیق و شاخص‌های متنوع، تصویری جامع از تغییرات شدت و گستره خشکسالی ارائه می‌دهد. این تحلیل با استفاده از شاخص‌های متعددی مانند SPI، MIDI، OMDI و SDI 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، در حالی که شاخص‌های ترکیبی مانند MIDI مقادیر بالای ۰/۵ را ثبت کردند. سال ۲۰۰۴ به عنوان نقطه اوج این دوره، مقادیر بالای شاخص‌های SPI و MIDI را ثبت کرد که نشان دهنده شرایط اقلیمی مطلوب بود. با این حال، از سال ۲۰۰۶ به بعد، کاهش مداومی در

این داده‌ها به‌وضوح نشان می‌دهند که خشکسالی نه تنها شدت یافته، بلکه بازه‌های زمانی آن نیز طولانی‌تر شده است. در مجموع، این تحلیل جامع نشان می‌دهد که شهرستان 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 چندگانه در پایش خشکسالی، امکان شناسایی بهتر روندها و بهبود استراتژی‌های مدیریتی را فراهم می‌کند. این یافته‌ها تاکید می‌کنند که برنامه‌ریزی دقیق و اقدامات پیشگیرانه برای کاهش اثرات خشکسالی و بهبود تاب‌آوری منطقه در برابر تنش‌های اقلیمی، ضروری است.

۲۰۲۲ شاخص‌های ترکیبی مانند MIDI کاهش شدیدی را تجربه کردند. بررسی روندهای میان مدت (پنج ساله) نیز الگوهای مشابهی را نشان می‌دهد. در دوره‌های ۲۰۰۵-۲۰۰۶ و ۲۰۱۰-۲۰۰۶، شاخص‌های OMDI و MIDI تغییرات پایدار و نوسانات ملایمی را نشان دادند، اما از سال ۲۰۱۱ به بعد، نوسانات شدیدتر و تغییرات بیشتری در شاخص‌ها ثبت شد. شاخص‌های هیدرولوژیکی مانند SPI روند نزولی قابل توجهی را نشان دادند که بیانگر کاهش بارش است. روندهای بلندمدت (۲۰۰۰-۲۰۲۲) نمایانگر تغییرات سیستماتیک و تدریجی خشکسالی در شهرستان تهران است. به‌طور مشخص، شاخص SPI کاهش مستمری را از ۰/۱۶۷- به ۰/۴۸۱- نشان داد.



شکل ۴- نمودار سری زمانی شاخص‌های ترکیبی خشکسالی در مقیاس سالانه شهرستان تهران (۲۰۰۰-۲۰۲۲)

شاخص در پایش خشکسالی ماهانه تقریباً یکسان است. این نتیجه با داده‌های پژوهش تاورنتام که همبستگی‌های بالای ۰/۸۳ تا ۰/۹۳ بین شاخص‌های مرکب VHI و VCI گزارش کرده است، همسو می‌باشد (Thavorntam & Shahnawaz, 2022). همچنین، شاخص OMDI با شاخص‌های بارشی SPI-1 و PCI به ترتیب همبستگی‌های ۰/۹۱ و ۰/۹۲ نشان داد؛ چنین همخوانی با مطالعات داخلی تأیید می‌کند که شاخص‌های ترکیبی مانند CDI می‌توانند جایگزینی دقیق برای شاخص SPI باشند و قدرت تبیین بیشتری دارند (بابایی و همکاران، ۱۴۰۴). بررسی همبستگی‌های منفی نیز نشان می‌دهد که افزایش دمای سطح زمین (نمایه TCI هم‌زمان با کاهش بارش رخ می‌دهد؛ این نتیجه با یافته‌های تحقیق تاورنتام همخوان است که همبستگی پایین بین شاخص حرارتی VHI و SPI را در مقیاس‌های کوتاه‌مدت گزارش کرده بود.

### تحلیل همبستگی شاخص‌های خشکسالی شهرستان تهران: ارزیابی جامع و چندلایه

تحلیل همبستگی شاخص‌های خشکسالی در تهران، نشان‌دهنده وجود ارتباطات قوی، معنادار 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. به‌منظور مقایسه، یافته‌های این پژوهش با نتایج مطالعات اخیر در مناطق دیگر نیز تطبیق داده شده است.

### تحلیل ماتریس همبستگی شاخص‌های منفرد و ترکیبی خشکسالی با شاخص مرجع زمینی SPI در مقیاس ماهانه

بررسی ماهانه ماتریس همبستگی شاخص‌ها (جدول ۳) نشان می‌دهد، شاخص‌های ترکیبی MIDI و OMDI با ضریب ۰/۹۸ بیشترین همبستگی مثبت را داشتند؛ این بدان معناست که عملکرد این دو

جدول ۳- همبستگی بین شاخص های مختلف خشکسالی در مقیاس ماهانه

SPI_24	SPI_12	SPI_9	SPI_6	SPI_3	SPI_2	SPI_1	SDI	OMDI	MIDI	PCI	TCI	VCI	SMCI	شاخص خشکسالی
0/07	-0/02	-0/02	0/32	0/55	0/60	0/62	0/36	0/81	0/74	0/62	-0/56	-0/05	1/00	SMCI
0/11	0/14	0/50	0/42	0/05	-0/04	-0/11	0/75	0/09	0/20	-0/10	0/55	1/00	-0/05	VCI
-0/01	-0/03	0/35	0/01	-0/53	-0/62	-0/59	0/44	-0/41	-0/25	-0/58	1/00	0/55	-0/56	TCI
0/12	0/23	0/11	0/35	0/68	0/81	1/00	0/33	0/92	0/87	1/00	-0/58	-0/10	0/62	PCI
0/14	0/24	0/29	0/48	0/59	0/67	0/86	0/71	0/98	1/00	0/87	-0/25	0/20	0/74	MIDI
0/14	0/23	0/21	0/45	0/65	0/74	0/91	0/59	1/00	0/98	0/92	-0/41	0/09	0/81	OMDI
0/13	0/20	0/53	0/52	0/22	0/21	0/32	1/00	0/59	0/71	0/33	0/44	0/75	0/36	SDI

جدول ۴- همبستگی بین شاخص های مختلف خشکسالی در مقیاس فصلی

SPI_24	SPI_12	SPI_9	SPI_6	SPI_3	SPI_2	SPI_1	SDI	OMDI	MIDI	PCI	TCI	VCI	SMCI	شاخص خشکسالی
0/15	0/20	0/07	0/44	0/74	0/78	0/81	0/22	0/90	0/83	0/81	-0/63	-0/17	1/00	SMCI
0/25	0/30	0/63	0/51	0/12	-0/03	-0/17	0/77	0/00	0/14	-0/17	0/63	1/00	-0/17	VCI
0/05	0/04	0/38	0/07	-0/43	-0/55	-0/63	0/51	-0/50	-0/33	-0/63	1/00	0/63	-0/63	TCI
0/15	0/28	0/15	0/44	0/86	0/95	1/00	0/21	0/94	0/88	1/00	-0/63	-0/17	0/81	PCI
0/24	0/36	0/38	0/65	0/85	0/87	0/88	0/59	0/98	1/00	0/88	-0/33	0/14	0/83	MIDI
0/21	0/33	0/27	0/59	0/87	0/91	0/94	0/43	1/00	0/98	0/94	-0/50	0/00	0/90	OMDI
0/23	0/33	0/65	0/68	0/41	0/29	0/20	1/00	0/43	0/59	0/21	0/51	0/77	0/22	SDI

جدول ۵- همبستگی بین شاخص های مختلف خشکسالی در مقیاس سالانه

SPI_24	SPI_12	SPI_9	SPI_6	SPI_3	SPI_2	SPI_1	SDI	OMDI	MIDI	PCI	TCI	VCI	SMCI	شاخص های خشکسالی
0/26	0/41	0/43	0/53	0/67	0/6	0/54	0/74	0/86	0/85	0/55	-0/73	0/09	1	SMCI
0/42	0/45	0/52	0/413	-0/12	-0/37	-0/45	0/49	0/33	0/34	-0/46	-0/10	1/00	0/08	VCI
-0/25	-0/38	-0/44	-0/55	-0/59	-0/46	-0/39	-0/44	-0/7	-0/66	-0/41	1/00	-0/10	-0/73	TCI
-0/07	0/19	0/17	0/36	0/88	0/98	0/99	0/51	0/96	0/96	1	-0/41	-0/46	0/55	PCI
0/44	0/73	0/78	0/83	0/93	0/95	0/96	0/84	0/99	1	0/97	-0/66	0/34	0/85	MIDI
0/43	0/72	0/77	0/83	0/93	0/95	0/96	0/83	1	0/99	0/96	-0/7	0/33	0/86	OMDI
0/36	0/61	0/63	0/69	0/7	0/58	0/49	1	0/83	0/84	0/51	-0/44	0/49	0/74	SDI

## نتیجه گیری

خشکسالی یکی از مخاطرات طبیعی است که با تأثیر بر منابع آب، کشاورزی و محیط زیست پیامدهای اقتصادی گسترده‌ای دارد و پایش دقیق شدت، مدت و گستره آن برای کاهش آسیب‌پذیری ضروری است. این مطالعه روند و شدت خشکسالی تهران را طی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ با بهره‌گیری از شاخص‌های متعدد و داده‌های سنجش از دور بررسی کرده است. شاخص‌های مستقل شامل سری‌های مختلف شاخص بارش استاندارد در مقیاس‌های زمانی متفاوت و شاخص‌های رطوبت خاک، دما و پوشش گیاهی بودند. برای ارزیابی جامع‌تر از شاخص‌های ترکیبی مانند شاخص‌های سنتز شده، تجمیع شده میکروویو و بهینه‌سازی شده استفاده شد. داده‌ها از تصاویر گوگل ارث انجین و اندازه‌گیری‌های زمینی گردآوری شد. نتایج نشان دادند خشکسالی در تهران نوسانات چشمگیری در مقیاس‌های ماهانه، فصلی و سالانه دارد و شاخص‌های ترکیبی به دلیل ترکیب چند عامل، دقت بالاتری ارائه می‌دهند، برای نمونه در مقیاس ماهانه دامنه تغییر شاخص ترکیبی تجمیع شده از حدود ۹/۵ تا ۷۲ درصد متغیر بود. روند سالانه نشان داد سال‌های ابتدایی دهه ۲۰۰۰ بیشتر در دسته خشکسالی متوسط قرار داشتند، در میانه دهه بهبود نسبی مشاهده شد، دوره ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰ دوباره خشکسالی‌های متوسط و شدید رخ داد و از ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۰ شاخص‌ها عموماً کاهش خشکسالی را نشان دادند، هرچند سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۵ همچنان خشکسالی متوسط داشتند. تحلیل ماهانه و فصلی نیز بیان کرد که ماه‌های فوریه، ژوئیه و نوامبر و فصل تابستان (ژوئن تا اگوست) به دلیل کاهش بارش و افزایش تبخیر، بیشترین شدت خشکسالی را تجربه کردند، در حالی که ماه‌های آوریل و اکتبر و فصل زمستان به دلیل بارش بیشتر شرایط مناسب‌تری داشتند. این یافته‌ها بر اهمیت توزیع زمانی بارش در شدت خشکسالی دلالت دارد و نشان می‌دهد شاخص‌های ترکیبی تفاوت‌های زمانی و مکانی را بهتر از شاخص‌های منفرد آشکار می‌کنند.

یافته‌های دیگر نشان داد شاخص‌های ترکیبی همبستگی قوی با شاخص‌های مستقل دارند و تغییرات خشکسالی را در مقیاس‌های مختلف منعکس می‌کنند، در حالی که شاخص‌های بارشی مانند SPI و PCI برای ارزیابی خشکسالی‌های ناشی از کاهش بارش مناسب‌تر هستند. همچنین دما و پوشش گیاهی در شدت خشکسالی اثرگذارند. دماهای بالا خشکسالی را تشدید می‌کند و پوشش گیاهی متراکم آن را تعدیل می‌کند. مدیریت مؤثر خشکسالی در تهران نیازمند پایش مداوم و برنامه‌ریزی منطقه‌ای مبتنی بر مجموعه‌ای از شاخص‌ها است تا مناطق حساس شناسایی و برای کاهش تنش آبی اقدامات هدفمند شامل بهینه‌سازی برداشت از آب‌های زیرزمینی، کاهش برداشت‌های

## تحلیل ماتریس همبستگی شاخص‌های منفرد و ترکیبی خشکسالی با شاخص مرجع زمینی SPI در مقیاس فصلی

در مقیاس فصلی نیز بیشترین همبستگی بین شاخص‌های ترکیبی MIDI و OMDI با ضریب ۰/۹۸ را نشان می‌داد (جدول ۴). همچنین نتایج این جدول با نتایج مطالعه ویسی هم‌راستا است که همبستگی قوی بین VCI و SPI سه‌ماهه در فصل بهار ( $r=0/68$ ) و همبستگی ضعیف‌تری را در پاییز ( $r=0/36$ ) گزارش کرد. وجود همبستگی منفی بین TCI و شاخص‌های بارش و رطوبت خاک نشان می‌دهد که کاهش بارش‌ها در مقیاس فصلی با افزایش تنش حرارتی و تشدید خشکسالی همراه است؛ این نتیجه با یافته‌های پژوهش تاورنتم که تأثیر ارتفاع و دمای پایین را در کاهش همبستگی حرارتی با بارش نشان داده بود، تناسب دارد. همچنین، شاخص VCI همبستگی نسبتاً قوی با SDI ( $0/۸۲$ ) دارد که نقش پوشش گیاهی را در سنجش خشکسالی فصلی برجسته می‌کند. شاخص‌های ترکیبی MIDI و OMDI با دوره‌های کوتاه مدت شاخص SPI-1 همبستگی بالایی نشان داد ( $0/۸۸$  و  $0/۹۴$ )، از طرفی شاخص SDI با دوره‌های میان مدت شاخص SPI-6 همبستگی بالاتری داشت ( $0/۶۸$ ) در مجموع، تحلیل فصلی نشان می‌دهد که شاخص‌های کوتاه‌مدت SPI برای ارزیابی وضعیت فصلی مفیدتر هستند و تلفیق شاخص‌های پوشش گیاهی، دما و بارش تصویری جامع‌تر از خشکسالی ارائه می‌دهد.

## تحلیل ماتریس همبستگی شاخص‌های منفرد و ترکیبی خشکسالی با شاخص مرجع زمینی SPI در مقیاس سالانه

در مقیاس سالانه نیز یافته‌ها نشان از همبستگی کامل شاخص‌های ترکیبی MIDI و OMDI دارند (جدول ۵) و این بیانگر عملکرد کاملاً مشابه آن‌ها در پایش خشکسالی سالانه است. این توافق با مطالعات بین‌المللی تأیید می‌شود که شاخص‌های مرکب را برای تشخیص نوسانات سالانه دقیق‌تر از شاخص‌های منفرد می‌دانند. شاخص TCI بیشترین همبستگی منفی را با شاخص SMCI ( $-0/۷۳$ ) و همچنین همبستگی منفی قابل توجهی با MIDI و OMDI نشان می‌دهد؛ این روابط معکوس تبیین می‌کند که افزایش دمای سطح زمین همراه با کاهش رطوبت خاک به تشدید خشکسالی در مقیاس سالانه می‌انجامد. شاخص SDI نیز با شاخص‌های SPI سه‌ماهه تا نه‌ماهه همبستگی بیشتری دارد که نشان می‌دهد واکنش پوشش گیاهی نسبت به تغییرات بارندگی معمولاً با تأخیر همراه است و نمی‌توان آن را صرفاً با شاخص‌های کوتاه‌مدت تبیین کرد. این الگوها بر ضرورت استفاده از رویکرد چندشاخصه و تحلیل‌های میان‌مدت برای ارزیابی دقیق خشکسالی در طول سال تأکید می‌کنند.

۳۵(۷۶): ۳۰۸-۳۲۵.

موزن‌زاده، ر.، ارشد، ص.، قهرمان، ب. و داوری، ک. ۱۳۹۱. پایش خشکسالی در محصولات دیم با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور. فصلنامه مدیریت آب و آبیاری. ۲(۲): ۱-۱۴.

میرموسوی، س. ح. و کریمی، ح. ۱۳۹۲. بررسی تأثیر خشکسالی بر پوشش گیاهی با استفاده از تصاویر سنجنده MODIS (مورد: استان کردستان). جغرافیا و توسعه. ۱۱(۳۱): ۵۷-۷۶.

Du, L., Tian, Q., Yu, T., Meng, Q., Jancso, T., Udvardy, P. and Huang, Y. 2013. A comprehensive drought monitoring method integrating MODIS and TRMM data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 23: 245-253. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2012.09.010>

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). *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*. 18(1): 53-63. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejrs.2015.03.006>

Ghobadi, M., and Bادهیان، Z. 2025. Assessment of agricultural drought severity using multi-temporal remote sensing data in Lorestan region. *Scientific Reports*. 15(1): 18528. <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-025-03087-4>

Hao, Z., and Singh, V.P. 2015. Drought characterization from a multivariate perspective: A review. *Journal of Hydrology*. 527: 668-678. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.05.031>

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. <https://doi.org/10.22067/geoeh.2021.72253.1102>

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): 195-213. [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. and 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. <http://dx.doi.org/10.1175/JHM560.1>

Kogan, F. 2022. New remote sensing vegetation health technology. In: *Remote Sensing Land Surface*

غیرمجاز و ارتقای بهره‌وری سامانه‌های آبیاری انجام شود. حفظ و تقویت پوشش گیاهی و خاک در مناطقی که کاهش آن‌ها مشاهده می‌شود و شناسایی نوسانات ناگهانی بارش یا دما نیز ضروری است. همچنین توسعه سامانه‌های هشدار زود هنگام مبتنی بر شاخص‌های ترکیبی و داده‌های به‌روز می‌تواند هشدارهای پیشگیرانه صادر کند و در سال‌هایی که افزایش خشکسالی ثبت می‌شود، خسارات را کاهش دهد. اجرای اقدامات پیشگیرانه محلی و منطقه‌ای به ارتقای تاب‌آوری جوامع در برابر پیامدهای اقتصادی و اجتماعی خشکسالی کمک خواهد کرد. این پژوهش تأکید دارد که مدیریت پایدار خشکسالی در تهران مستلزم رویکردی جامع و چندبعدی است و پیشنهاد می‌کند در تحقیقات آینده از شاخص‌های نوظهور مبتنی بر هوش مصنوعی و یادگیری ماشین برای بهبود دقت پایش و بررسی اثر تغییرات اقلیمی بر الگوهای خشکسالی در تهران و شهرهای مشابه استفاده شود تا ارتباط میان تغییرات جهانی و خشکسالی‌های منطقه‌ای بهتر روشن گردد. همکاری بین‌بخشی برای مدیریت ضروری است.

## منابع

بابایی، ا.، اسدی، م. ا.، حسینی، س. ز.، العابدین. و شاهمردادی، ص. ۱۴۰۴. بررسی عملکرد ترکیبی شاخص‌های سنجش از دوری در برآورد خشکسالی (منطقه مورد مطالعه: استان چهارمحال و بختیاری). *مخاطرات محیط طبیعی*. ۱۴(۴۳): ۱۵۵-۱۸۰.

جلیلی، س. ۱۳۸۴. مقایسه شاخص‌های ماهواره‌ای و هواشناسی در پایش خشکسالی (مطالعه موردی استان تهران). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.

جهانبخش اصل، س.، ساری صراف، ب.، خورشیددوست، ع. م. و رستم‌زاده، ح. ۱۳۸۸. ارزیابی تغییرات پوشش گیاهی دشت سراب و تحلیل دو دوره خشکسالی و ترسالی. *جغرافیا*. ۷(۲۳): ۱۱۸-۱۳۴.

سیاسر، ه.، محمدرضاپور، ا. و خدامرادپور، م. ۱۴۰۲. پایش خشکسالی با استفاده از داده‌های سنجنده MODIS و مقایسه آن با شاخص هواشناسی SPI در دوره‌های کوتاه‌مدت (مطالعه موردی: استان گلستان). *مجله جغرافیا و توسعه*. ۲۲(۷۴): ۶۶-۱۸۶.

شاهبگی، ن.، پیرزاده، ب. و پیری، ج. ۱۴۰۴. ارزیابی شاخص ترکیبی خشکسالی «MCDI» بر اساس توزیع مشترک چندمتغیره. *مجله جغرافیا و توسعه*. ۲۳(۷۸): ۱۰۵-۱۳۲.

عسگری، ش. ا.، رضیعی، ط.، جعفری، م. ر. و نوروزی، ع. ا. ۱۴۰۴. بررسی اثرات خشکسالی هواشناسی در خشکیدگی جنگل‌های بلوط محدوده استان ایلام. *تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*.

- meteorological and satellite-based drought indices. *International Journal of Geoinformatics*. 18(5): 627–644. <http://dx.doi.org/10.52939/ijg.v18i5.2367>
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S. and López-Moreno, J. I. 2010. A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*. 23(7): 1696–1718. <http://dx.doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- 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): 163–180. [http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00093-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00093-7)
- Wassie, S. B., Mengistu, D. A. and Birlie, A. B. 2022. Agricultural drought assessment and monitoring using MODIS-based multiple indices: the case of North Wollo, Ethiopia. *Environmental Monitoring and Assessment*. 194: 787. <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-022-10455-4>
- Wei, W., Zhang, J., Zhou, L., et al. 2021. Comparative evaluation of drought indices for monitoring drought based on remote sensing data. *Environmental Science and Pollution Research*. 28: 20408–20425. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-12120-0>
- Zhang, A. and Jia, G. 2013. Monitoring meteorological drought in semiarid regions using multi-sensor microwave remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*. 134: 12–23. <http://dx.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. and Qin, Y. 2021. Drought monitoring over the Yellow River Basin from 2003–2019 using reconstructed MODIS land surface temperature in Google Earth Engine. *Remote Sensing*. 13(18): 3748. <http://dx.doi.org/10.3390/rs13183748>
- Changes. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-96810-6\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-96810-6_5)
- 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)
- 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)
- Owe, M., R. de Jeu and Holmes, T. Holmes. 2008. Multisensor historical climatology of satellite-derived global land surface moisture. *Journal of Geophysical Research*. 113: F01002. <http://dx.doi.org/10.1029/2007JF000769>
- Rahman, G., Khalid, S., Arshad, S., Moazzam, M. F. U. and Kwon, H. H. 2025. Remote sensing-based spatiotemporal assessment of agricultural drought and its impact on crop yields in Punjab, Pakistan. *Scientific Reports*. 15(1): 20586. <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-025-06095-6>
- 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>
- Rodell, M., Houser, P. R., Jambor, U., Gottschalck, J., Mitchell, K., Meng, C.-J. and 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>
- Seiler, R. A., Kogan, F. and 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)
- Thavorntam, W. and Shah Nawaz, S. 2022. Evaluation of drought in the north of Thailand using

## Hydrological and Agricultural Drought Assessment and Monitoring Using Single and Multiple MIDI, OMDI and SDI Indices (Tehran Case Study)

H Siasar<sup>1\*</sup>, M Ebrahimi<sup>2</sup>

Received: May.31, 2025

Accepted: Sep.15, 2025

### Abstract

Drought is one of the most important natural hazards that deeply affects the environment, agriculture, water resources and economy. Accurate information about its intensity, duration and extent is essential for reducing vulnerability and managing risks. This study was conducted to compare drought monitoring indicators with remote sensing data in Tehran city. In particular, this study used composite drought indicators such as the Synthesized Drought Index (SDI), the Integrated Microwave Drought Index (MIDI) and the Optimized Meteorological Drought Index (OMDI). In order to calculate the aforementioned indicators, Google Earth Engine satellite data was used and for their evaluation, ground data (precipitation and soil moisture) were used in the period from 2000 to 2022. The individual remote sensing indices used to calculate the composite or multiple indices included the temperature condition index (TCI), vegetation condition index (VCI), precipitation condition index (PCI), and soil moisture condition index (SMCI). Different time scales of the standardized precipitation index (SPI) were also used to evaluate the satellite remote sensing indices with real ground data. The results showed that drought fluctuates on monthly, seasonal, and annual scales. The composite indices, especially MIDI and OMDI, provide more accuracy and comprehensiveness about the severity and duration of drought due to the integration of several effective factors. The trend analysis shows that the years 2007 to 2010 had moderate and severe droughts, with February, July, November, and the summer months having the most drought, and April, October, and the winter months having a better situation. These findings emphasize that the composite indices provide an accurate and comprehensive picture of drought in Tehran and provide a reliable basis for planning water resources management, agriculture, and early warning systems.

**Keywords:** Drought, MIDI, OMDI, SDI, Tehran County

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

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

(\* - Corresponding Author Email: Hadisiasar@pnu.ac.ir)