

تعیین یک شاخص بهینه چندسنسوره سنجش از دوری به منظور ارتقای فرایند پایش زمان واقعی خشکسالی در مناطقی با پوشش اراضی ناهمگن

مهسا خدایی^۱، روزبه شاد^{۲*}، یاسر مقصودی مهرانی^۳، مرجان قائمی^۲

۱. کارشناس ارشد مهندسی سنجش از دور، دانشکده عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

۲. استادیار، دانشکده عمران، دانشگاه فردوسی مشهد

۳. استادیار، دانشکده ژئوماتیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی

(تاریخ دریافت ۱۳۹۵/۰۶/۲۹؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۵/۰۸/۲۹)

چکیده

در مقاله حاضر شاخص ترکیبی بهبودیافته خشکسالی (OSDI)، برای پایش زمان واقعی این پدیده در مناطقی با پوشش اراضی ناهمگن پیشنهاد می‌شود. بارش به‌عنوان یکی از عوامل مهم خشکسالی، توسط اندازه‌گیری ایستگاه‌های زمینی و به‌کمک داده‌های برآورد بارش TRMM در این مطالعه وارد شد. سپس، هریک از سه شاخص نرمال‌شده رطوبت، شامل شاخص‌های تفاضل نرمال‌شده پوشش گیاهی (NDVI)، مرئی-طول موج کوتاه مادون قرمز خشکسالی (VSDI) و ظرفیت آب سطح (SWCI)، به‌صورت جداگانه همراه با دو شاخص وضعیت بارش (PCI) و دمای سطح زمین (LST)، وارد آنالیز مؤلفه اصلی (PCA) شدند. مؤلفه اصلی به‌دست‌آمده از این آنالیزها با عنوان شاخص‌های ترکیبی خشکسالی SDI1، SDI2 و SDI3 معرفی شد. در ادامه، عملکرد سه شاخص خروجی به‌کمک شاخص هواشناسی بارش استاندارد شده (SPI) در مقیاس یک و سه ماهه ارزیابی شدند. نتایج نشان داد نمایه به‌دست‌آمده از آنالیز PCA روی شاخص‌های نرمال‌شده VSDI، LST و PCI، بهترین عملکرد را در پایش زمان واقعی خشکسالی استان‌های تهران و قم، ارائه می‌دهد. شاخص ترکیبی بهینه خشکسالی (OSDI) نام‌گذاری شد. سپس، به‌منظور ارزیابی توانایی شاخص پیشنهادی در مناطقی با پوشش ناهمگن، ۴۲ تصویر Landsat7 به‌کار گرفته شدند. سه شاخص نرمال‌شده NDVI، SWCI و VSDI به‌عنوان تنها فاکتور مؤثر در تفاوت عملکرد سه نمایه SDI1، SDI2 و OSDI، توسط تصاویر Landsat7 تولید و عملکرد آنها در پوشش‌های اراضی متنوع به‌کمک شاخص SPI ارزیابی شد. ضریب تبیین مناسب میان شاخص نرمال‌شده VSDI و SPI یک‌ماهه، قابلیت شاخص OSDI را در پایش زمان واقعی خشکسالی در مناطق ناهمگن تأیید کرد. نقشه‌های شاخص یادشده نشان دادند در سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۰۹ و ۲۰۱۴ در مناطق مرکزی و جنوب شرق استان تهران و مناطق مرکزی و شمالی استان قم، خشکسالی شدیدی رخ داده است.

کلیدواژگان: بارش، پوشش گیاهی، دما، سنجش از دور، شاخص ترکیبی خشکسالی، PCA.

پیشینه تحقیق

برای مطالعه و ارزیابی خشکسالی، شاخص‌های متعددی ارائه شده است که هر یک قوت‌ها و ضعف‌های خود را دارند [۱]. یکی از تفاوت‌های عمده خشکسالی با دیگر بلایای طبیعی که پایش آن را با مشکل مواجه می‌سازد، وقوع تدریجی و طولانی‌تر این پدیده است [۲ و ۳]. در مطالعات اولیه زمین‌مبنای پایش خشکسالی، شاخص‌های هواشناسی مانند شاخص بارش استاندارد شده (SPI) [۴ و ۵] استفاده شده‌اند. شاخص‌های هواشناسی خشکسالی که به اطلاعات ایستگاه‌های زمینی متکی هستند، به علت کمبود آمار اقلیمی (ایستگاه‌های هواشناسی)، برای ارزیابی پدیده خشکسالی در سطح وسیع و پیوسته چندان مناسب به نظر نمی‌رسند. از آنجا که سنجش از دور توانایی ثبت جزئیات مکانی را دارد [۶]، می‌تواند در شناسایی زمان شروع خشکسالی، طول دوره و اندازه آن، به کار گرفته شود [۸]. برخی پارامترهای زمینی و هواشناسی مانند بارش، رطوبت خاک، دمای سطح زمین، تنش پوشش گیاهی ناشی از خشکسالی و نظیر آن، با خشکسالی ارتباط تنگاتنگی دارند. پژوهشگران شاخص‌های پوشش گیاهی مانند شاخص تفاضل نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) [۸]، شاخص شرایط پوشش گیاهی (VCI) [۹ و ۱۰] را به منظور پایش خشکسالی معرفی کردند. مشکلات اصلی شاخص‌های خشکسالی مبتنی بر رطوبت پوشش گیاهی زمانی بروز می‌کند که منطقه مطالعه شده از لحاظ پوشش ناهمگن باشد [۱۱، ۱۲ و ۱۳]. از دیگر ایرادهای شاخص‌های رطوبت پوشش گیاهی آن است که گیاهان (به دلیل ماهیت ذاتی خود)، توانایی مقابله با خشکسالی در کوتاه‌مدت را دارند. همچنین، تأثیر پارامترهای متغیر در دوره خشکسالی (مانند بارش) بر پوشش گیاهی، معمولاً به صورت آنی بروز نمی‌کند. از این رو، عملکرد این شاخص‌ها در فرایند پایش خشکسالی با تأخیر صورت می‌گیرد [۱۴، ۱۵ و ۱۶]. برای رفع این مشکل محققان شاخص‌هایی مانند شرایط آب سطح (SWCI) [۴] و شاخص عمودی خشکسالی (PDI) [۵] را به منظور پایش رطوبت خاک ارائه دادند [۱۳]. عملکرد این شاخص‌ها

به دلیل گستردگی انواع خاک و توپوگرافی زمین با چالش‌هایی روبه‌روست [۱۸]. در ادامه، شاخص‌های معدودی مانند شاخص خشکسالی طول موج مرئی- کوتاه مادون قرمز (VSDI) [۲] به منظور پایش هم‌زمان رطوبت خاک و گیاه در مطالعات خشکسالی ارائه شدند. مقایسه شاخص VSDI با چندین شاخص دیگر نشان داد این شاخص همبستگی زیادی با شاخص کسر آب (FWI) [۷] دارد و در پایش زمان واقعی خشکسالی با استفاده از رطوبت خاک و گیاه عملکرد قابل قبولی را ارائه می‌دهد [۲]. با ورود شاخص دمای سطح زمین (LST) [۹] و به دنبال آن معرفی شاخص وضعیت دما (TCI) [۹، ۱۹ و ۲۰] در مطالعات خشکسالی، شاخص‌های ترکیبی جدیدی مانند شاخص سلامت گیاه (VHI) [۹ و ۱۰] معرفی شدند. شاخص VHI بیانگر آن است که وقتی دو پارامتر دما و رطوبت با یکدیگر ادغام شوند، ابزار قابل اعتمادتری در پایش خشکسالی فراهم می‌شود [۲۱]. از آنجا که هیچ‌یک از شاخص‌های یاد شده پارامترهای آب و هوایی را که طی دوره خشکسالی به شدت متغیرند، در نظر نگرفته‌اند، محققان تلاش کرده‌اند تا داده‌های بارش را نیز همراه با دیگر پارامترهای تحت تأثیر خشکسالی در نظر بگیرند [۲۲، ۲۳ و ۲۴]. در سال‌های اخیر استفاده از تصاویر (TRMM) [۱۲] در مطالعات خشکسالی و مسائل مختص به حوضه هیدرولوژیکی به عنوان جایگزین داده‌های بارش ایستگاه‌های زمینی گسترش یافته است [۲۴، ۲۳ و ۳]. در مطالعه‌ای در آمریکا، شاخص نرمال شده وضعیت خشکسالی (SDCI) [۱۳] با تکیه بر این امر معرفی شد که پارامترهای تحت تأثیر خشکسالی مانند پوشش گیاهی، دمای سطح زمین و مقدار بارش هر یک با توجه به نوع پوشش و اقلیم منطقه مطالعاتی سهم مخصوص به خود را در مطالعه خشکسالی دارند [۲۳]. برای تعریف این شاخص چندین شاخص رطوبت گیاهی از جمله NDVI، شاخص LST و داده‌های برآورد بارش TRMM با ضرایب وزنی تجربی با یکدیگر ترکیب شدند. در نهایت، نتایج ارزیابی نشان داد ترکیب وزنی سه داده VCI، TRMM و LST

6. Visible Shortwave Infrared Drought Index
7. Fractional Water Index
8. Real Time
9. Land Surface Temperature
10. Temperature Condition Index
11. Vegetation Health Index
12. Tropical Rainfall Measuring Mission
13. Scaled Drought condition Index

1. Standardized Precipitation Index
2. Normalized Difference Vegetation Index
3. Vegetation Condition Index
4. Surface Water Condition Index
5. Perpendicular Drought Index

آنالیز PCA وارد می‌شوند. مؤلفه‌های اساسی به دست آمده از اعمال PCA بر این سه شاخص با عنوان سه شاخص ترکیبی خشکسالی معرفی می‌شوند. مطالعه حاضر عملکرد هریک از این شاخص‌ها را با یکدیگر مقایسه و در نهایت بهترین شاخص را به عنوان شاخص ترکیبی بهینه خشکسالی معرفی می‌کند.

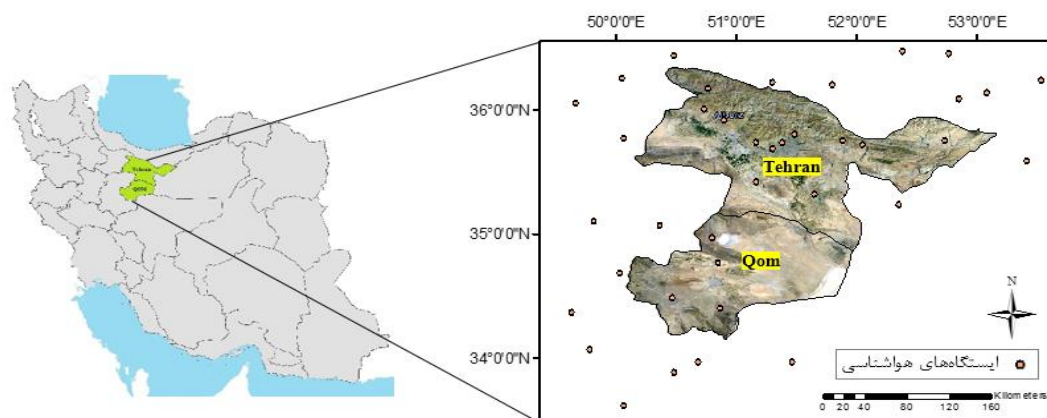
منطقه مطالعاتی و داده‌ها

کشور ایران همانند بسیاری از کشورهای دیگر خاورمیانه از نظر تأمین آب در وضعیت مناسبی قرار ندارد. این کشور به دلیل قرار گرفتن روی کمربند خشک جغرافیایی و نوار بیابانی ۲۵ تا ۴۰ درجه عرض شمالی، جزء مناطق کم‌باران جهان به‌شمار می‌آید. استان تهران و قم نیز از جمله استان‌هایی هستند که درباره وضعیت خشکسالی آنها در چند سال اخیر، مدام هشدار داده شده است. مطالعه خشکسالی در استان تهران، پایتخت کشور، به دلیل حساسیت این استان و همچنین جمعیت بسیار زیادی که در خود جای داده است، اهمیت ویژه‌ای دارد. در این مطالعه استان‌های تهران و قم واقع در بخش شمالی کشور با مساحت $3/04 \times 10^4 \text{ km}^2$ در محدوده طول جغرافیایی $31^\circ 50'$ تا $53^\circ 10'$ و عرض جغرافیایی $34^\circ 7'$ تا $21^\circ 36'$ بررسی شده‌اند. میانگین دمای سالانه هر دو استان بین ۱۷ تا ۲۰ درجه متغیر بوده و متوسط بارندگی سالانه این دو استان بین ۲۰۰ تا ۶۰۰ میلی‌متر است. از شمال تا جنوب استان تهران به دلیل شرایط طبیعی متفاوت، اقلیم متنوعی دیده می‌شود. قسمت‌های شمالی بیشتر زمستان‌های سرد و تابستان‌های معتدل و قسمت‌های جنوبی زمستان‌های سرد و تابستان‌های گرم دارند. استان قم نیز اقلیم خشک و نیمه‌خشک دارد.

شکل ۱ منطقه مطالعاتی را به همراه توزیع ایستگاه‌های سینوپتیک در سطح استان‌های تهران، قم و استان‌های مجاور این دو استان، نشان می‌دهد. در این تحقیق ماه‌های مارس تا می و سپتامبر تا نوامبر دوره هفت‌ساله ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۴ بررسی شدند. به‌طور کلی، داده‌های استفاده شده در این مطالعه به دو قسمت تقسیم می‌شوند: الف) داده‌های زمین‌منا و ب) داده‌های سنجش از دوری.

به صورت $1/4 \times \text{ScaledLST} + 2/4 \times \text{ScaledTRMM} + 1/4 \times \text{VCI}$ بهترین نتیجه را در برآورد خشکسالی در سطح منطقه ارائه می‌دهد. نتایج مطالعات برخی محققان نشان داده است شاخص‌های ترکیبی پایش خشکسالی، نسبت به شاخص‌های منفرد عملکرد بهتری را در بخش‌های آب و هوایی مختلف ارائه می‌دهند [۲۳]. در ادامه، معرفی شاخص‌های ترکیبی خشکسالی، محققان از آنالیز مؤلفه اصلی (PCA) به منظور حذف وابستگی میان شاخص‌های خشکسالی مختلف استفاده کردند [۳]. در تحقیقی سه شاخص TRMM، VCI و TCI، هریک به ترتیب به عنوان مؤلفه‌ای از بارش، وضعیت رطوبت پوشش گیاهی و دمای خاک در آنالیز PCA وارد شدند و در نتیجه مؤلفه اصلی آنالیز به عنوان شاخص ترکیبی خشکسالی (SDI) معرفی شد [۳]. در تحقیق یادشده، نتایج ارزیابی این شاخص ترکیبی با شاخص SPI، عملکرد قابل قبول آن را در پایش خشکسالی منطقه مطالعاتی نشان داد. با این حال، همبستگی میان شاخص یادشده و شاخص SPI سه ماه نشان‌دهنده تأخیر در پایش روند خشکسالی توسط این شاخص بوده است [۳].

این مقاله به دنبال آن است که با بهبود انتخاب داده‌های ورودی در فرایند مطالعه، شاخصی جامع برای پایش زمان واقعی خشکسالی در مناطقی با پوشش اراضی متنوع ارائه کند. به منظور بررسی تأثیر فصل بر شاخص‌های پیشنهادی در این مقاله، عملکرد آنها در ماه‌های مارس تا می به عنوان فصل بهار و ماه‌های سپتامبر تا نوامبر به عنوان فصل پاییز مطالعه شده است. در این مقاله به منظور افزایش دقت داده‌های بارش ورودی و کاهش خطای ناشی از ریسپل کردن داده‌های TRMM (با تفکیک مکانی ۲۵ کیلومتر) به رزولوشن ۵۰۰ متر، از داده‌های برآورد بارش TRMM به عنوان داده کمکی در فرایند کوکریجینگ، در کنار داده‌های ایستگاه‌های زمینی استفاده شده است. علاوه بر این، به منظور مقایسه عملکرد شاخص‌های NDVI، SWCI و VSDI (به ترتیب به عنوان شاخص رطوبت گیاه، شاخص رطوبت خاک و شاخص رطوبت گیاه و خاک)، هریک پس از نرمال‌سازی به‌طور جداگانه همراه با شاخص‌های بارش و دمای سطح زمین و



شکل ۱. موقعیت منطقه مطالعاتی و ایستگاه‌های هواشناسی منطقه

داده‌های زمین‌مبنا

به‌منظور آماده‌سازی داده ورودی بارش، داده‌های بارش تجمعی ماهانه ۱۶ ایستگاه سینوپتیک در سطح منطقه و ۲۵ ایستگاه در استان‌های مجاور، برای سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۴، از طریق سازمان هواشناسی ایران تهیه شدند. شایان یادآوری است که اعتبارسنجی شاخص‌های ترکیبی ارائه‌شده، به‌کمک شاخص SPI در مقیاس یک و سه ماهه انجام می‌گیرد تا عملکرد شاخص‌ها در برآورد وضعیت خشکسالی، در دو بازه زمانی متفاوت، ارزیابی شود. این شاخص با استفاده از داده‌های بارش تجمعی ماهانه ۱۶ ایستگاه تهران و قم در سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۴ تولید می‌شود. همچنین به‌منظور تفکیک اراضی و مقایسه عملکرد شاخص‌های معرفی‌شده در پوشش‌های متنوع، از نقشه‌های کاربری اراضی دو سال ۲۰۰۶ و ۲۰۱۳ در مقیاس $\frac{1}{1,000,000}$ منطقه استفاده می‌شود.

داده‌های سنجش از دوری

در این مطالعه شاخص‌های ماهواره‌ای مبتنی بر وضعیت رطوبت خشکسالی شامل سه دسته: الف) شاخص‌های رطوبت پوشش گیاهی؛ ب) شاخص‌های رطوبت خاک و ج) شاخص‌های رطوبت توأم خاک و گیاه هستند. در این مطالعه شاخص‌های NDVI، VSDI و SWCI هر یک به‌ترتیب به‌عنوان شاخص رطوبت پوشش گیاهی، شاخص رطوبت خاک و شاخص رطوبت خاک و گیاه، به‌کار برده می‌شوند. در ادامه، هر یک از این شاخص‌های یادشده به‌طور خلاصه معرفی خواهند شد.

شاخص تفاضل نرمال‌شده پوشش گیاهی (NDVI)

شاخص NDVI به‌عنوان شاخص رطوبت پوشش گیاهی تعریف و به‌صورت گسترده‌ای استفاده شد [۸].

$$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{Red}}{R_{NIR} + R_{Red}} \quad (1)$$

که در آن R_{NIR} و R_{Red} میزان بازتابندگی در باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک هستند. در این مطالعه سری زمانی شاخص‌های NDVI شش ماه مطالعاتی سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۴، توسط باندهای ۱ و ۲ محصول بازتاب سطحی سنجنده مودیس (MOD09A1 collection v005) با رزولوشن ۵۰۰ متر تهیه می‌شود. شایان یادآوری است که بازه مقادیر NDVI بین -۱ تا +۱ متغیر است. با وجود استفاده گسترده از این شاخص در مطالعات مختلف پایش پوشش گیاهی و خشکسالی، شاخص یادشده مشکلاتی مانند حساسیت به وضعیت اتمسفری، خاک موجود در زمینه گیاه و اشباع مقادیر NDVI در گیاهانی با تاج چندلایه و متراکم دارد [۲۵، ۷ و ۳]. شاخص NDVI و به‌طور کلی شاخص‌های مبتنی بر وضعیت رطوبت پوشش گیاهی، بیشتر به‌دلیل تأخیری که میان تأثیر بارش بر وضعیت گیاه وجود دارد، تأخیر یک تا سه ماهه در نمایش وضعیت خشکسالی هستند. در نتیجه، کارآمدی آنها در پایش زمان واقعی خشکسالی کاهش خواهد یافت [۲۶ و ۲۳].

شاخص شرایط آب سطح (SWCI)

شاخص SWCI به‌عنوان ترکیبی از دو محدوده طیفی طول موج کوتاه مادون قرمز (SWIR)^۱ معرفی شده و به

1. Shortwave Infrared

توسط باندهای ۱، ۳ و ۵ محصول MOD09A1 تهیه می‌شود. هرچه این شاخص به یک نزدیک‌تر باشد، وضعیت رطوبت مطلوب‌تر است. مقادیر VSDI بیشتر از یک، نشان‌دهنده عوارضی همچون آب، پوشش برف و یا یخ هستند [۲]. بنابراین، در این مطالعه به منظور همانندسازی بازه شاخص VSDI به دو شاخص SWCI و NDVI، پس از تولید شاخص VSDI هر ماه، مقادیر بیشتر از یک در ۱- ضرب شدند تا بازه این شاخص نیز به ۱ و ۱- تغییر کند.

شاخص دمای سطح زمین (LST)

همان طور که توضیح داده شد، شاخص دمای سطح زمین (LST) توسط سری‌های زمانی محصول MOD11A2 به کمک باندهای حرارتی سنجنده MODIS محاسبه می‌شود. به منظور برآورد دمای ماهانه سطح زمین، تصاویر مختص به هر ماه تهیه و پس از پیش‌پردازش، تصاویر LST ماهانه محاسبه می‌شوند. در محاسبه LST ماهانه از آنجا که قدرت تفکیک زمانی این تصویر ۸ روزه است و تهیه تصویر از روز اول ماه صورت می‌گیرد، برای محاسبه LST ماهانه به چهار تصویر LST ماه مد نظر احتیاج است. بدین منظور پس از تهیه ۴ تصویر LST ماه یادشده، LST آن ماه به کمک میانگین وزنی چهار تصویر LST و با توجه به تعداد روزهای دخیل هریک در ماه محاسبه می‌شود.

داده‌های بارش ماهواره TRMM

در مناطقی با ایستگاه‌های زمینی نقطه‌ای و پراکنده، شرایط خشکسالی مناطق نمونه‌برداری نشده به وسیله تکنیک‌هایی مانند درون‌یابی مکانی داده‌های نمونه‌برداری شده، برآورد می‌شوند. در سال‌های اخیر استفاده از مدل‌های مختلفی براساس الگوریتم‌های تخمین بارندگی مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای ارائه شده‌اند. در این میان می‌توان به تصاویر TRMM اشاره کرد که به‌طور گسترده‌ای در مطالعات بارندگی دهه اخیر استفاده شده است. ماهواره TRMM مأموریت مشترک سازمان ملی هوانوردی و فضایی ایالات متحده آمریکا (NASA) ^۱ و آژانس اکتشافات هوا فضا ژاپن (JAXA) ^۲ است. داده‌های TRMM-3B43 این ماهواره، شامل داده‌های نرخ بارش تجمعی ماهانه (mm/h) با رزولوشن مکانی $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ هستند. در این مطالعه تلاش می‌شود با ادغام

محتوای رطوبت خاک حساس است. بازه مقادیر این شاخص بین ۱- تا ۱+ متغیر است. نتایج تحقیقات انجام‌شده نشان می‌دهند این شاخص همبستگی خوبی با رطوبت خاک ۵۰ cm -۰ دارد [۲۷]. همچنین، شاخص SWCI در مقایسه با شاخص NDVI در حدود دو تا چهار هفته پاسخ سریع‌تری به تغییرات بارش نشان می‌دهد [۲].

$$SWCI = \frac{R_{SWIR\epsilon} - R_{SWIR\gamma}}{R_{SWIR\epsilon} + R_{SWIR\gamma}} \quad (2)$$

R_{SWIR7} و R_{SWIR6} به ترتیب بازتاب در باندهای ۶ و ۷ محصول MOD09A1 سنجنده مودیس هستند.

شاخص طول موج مرئی- کوتاه مادون قرمز خشکسالی (VSDI)

پاسخ طیفی گیاه به تنش آبی در مطالعات زیادی روی گیاهان مختلف، بحث شده است. برخی محققان بر این موضوع تأکید دارند که بازتاب در باند NIR (۱/۳-۰/۷۴ میکرومتر) بیشتر به تغییرات ساختار درونی برگ حساس است و در مقایسه با دیگر نواحی طیفی حساسیتی کمتری به تغییرات رطوبت دارد [۲۹ و ۲۸]. به همین دلیل می‌توان گفت که بازتاب طیف NIR به شدت به نوع گیاه، سطح برگ و تراکم گیاه وابسته است [۲۹]. از طرفی محققان دریافته‌اند که با کاهش آب موجود در گیاه، بازتاب در باند red و SWIR به وضوح افزایش یافته و بازتاب در طیف آبی با تغییرات ناچیزی همراه است [۲۹ و ۲۸]. علاوه بر این، مطالعات بازتاب طیفی خاک خشک و مرطوب نیز نشان می‌دهند با کاهش رطوبت خاک، بازتاب طیف SWIR به وضوح بیش از طیف‌های دیگر افزایش می‌یابد [۲۹، ۲۸ و ۲]. همچنین طیف آبی به‌عنوان طیفی است که کمترین تغییرات بازتاب را در مواجهه با کاهش رطوبت خاک نشان می‌دهد [۲۹ و ۲]. بنابراین، به منظور بررسی وضعیت رطوبتی خاک و گیاه با کاهش تأثیر ساختار برگ، اختلاف بین طیف آبی به‌عنوان باندی که کمترین حساسیت را به تغییرات رطوبتی خاک و گیاه نشان می‌دهد و طیف‌های SWIR و قرمز به‌عنوان حساس‌ترین باندها به تنش آبی گیاه و خاک، قابل استفاده‌اند. بدین ترتیب شاخص VSDI براساس تعریف یادشده معرفی شد [۲].

$$VSDI = 1 - \left[\frac{R_{SWIR} - R_{blue}}{R_{red} - R_{blue}} \right] \quad (3)$$

که در آن R_{SWIR} ، R_{blue} و R_{red} به ترتیب بازتاب باندهای SWIR، آبی و قرمز هستند. در مقاله حاضر این شاخص

تصاویر توسط ابزار (MRT)^۱ (ارائه شده در سایت MODIS) از سیستم تصویر Sinudual به سیستم تصویر UTM-WGS84 تبدیل شدند. پیش از ورود هر یک از شاخص‌های یادشده به آنالیز PCA لازم است که فرایند استانداردسازی روی پارامترهای ورودی به این آنالیز صورت گیرد، در ادامه ورودی‌های استاندارد شده آنالیز PCA توضیح داده می‌شوند.

شاخص‌های نرمال شده ورودی آنالیز PCA

شاخص‌های وضعیت رطوبت

شاخص NDVI دو مؤلفه اکولوژی و آب و هوا دارد. شاخص VCI به منظور بهبود عملکرد شاخص NDVI، نوسانات کوتاه مدت که مختص به فاکتور آب و هوا است را از تغییرات طولانی مدت اکوسیستمی، جدا می‌کند [۳۰ و ۳]. مطالعات مختلف نشان داده‌اند در پایش خشکسالی به کمک رطوبت گیاه، عملکرد VCI نسبت به NDVI بهتر بوده است [۳۰].

$$VCI = \frac{NDVI_j - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \quad (۴)$$

که در آن $NDVI_j$ ، مقدار پیکسل NDVI ماهانه در ماه j است. همچنین $NDVI_{min}$ و $NDVI_{max}$ به ترتیب مقادیر کمینه و بیشینه NDVI ماهانه در پیکسل معادل هستند که با تطبیق پیکسل‌های تصاویر NDVI ماه j در سال‌های ۲۰۰۸-۲۰۱۴ محاسبه شده‌اند. مشابه با الگوریتمی که برای VCI استفاده شد، شاخص SWCI نیز به منظور کاهش تأثیرات آب و هوایی طولانی مدت، به صورت رابطه ۶ نرمال سازی می‌شود.

$$nSWCI = \frac{SWCI_j - SWCI_{min}}{SWCI_{max} - SWCI_{min}} \quad (۵)$$

در رابطه یادشده $SWCI_j$ ، مقدار پیکسل SWCI ماهانه ماه j است. همچنین، $SWCI_{min}$ و $SWCI_{max}$ به ترتیب مقادیر کمینه و بیشینه SWCI ماهانه در پیکسل معادل هستند که با تطبیق پیکسل‌های تصاویر SWCI ماه j در سال‌های ۲۰۰۸-۲۰۱۴ محاسبه شده‌اند. به طور مشابه با الگوریتم VCI و $nSWCI$ ، شاخص VSDI نیز نرمال می‌شود.

$$nVSDI = \frac{VSDI_j - VSDI_{min}}{VSDI_{max} - VSDI_{min}} \quad (۶)$$

در رابطه یادشده $VSDI$ ، مقدار پیکسل VSDI ماهانه ماه j است و $VSDI_{min}$ و $VSDI_{max}$ به ترتیب مقادیر

داده‌های TRMM و ایستگاه سینوپتیک در روش کوکریجینگ داده ورودی بارش سطحی تولید شود.

روش کار

در این مطالعه فاکتورهای بارش، وضعیت رطوبت خاک/گیاه و دمای سطح زمین با یکدیگر ترکیب و هم‌زمان در پایش خشکسالی استان‌های تهران و قم به کار برده شدند. سه شاخص NDVI، SWCI و VSDI به صورت جداگانه با دو فاکتور بارش و دمای سطح زمین توسط آنالیز مؤلفه اصلی (PCA) ادغام شدند. پس از حذف وابستگی میان شاخص‌های ورودی، مؤلفه‌های اول این آنالیز که شامل ۷۵ درصد اطلاعات داده‌های ورودی هستند، به عنوان شاخص SDI معرفی شدند. جدول ۱ شاخص‌های ترکیبی تولید شده با نام‌های SDI1، SDI2 و SDI3 را به همراه پارامترهای ورودی آنها به تفکیک معرفی می‌کند.

جدول ۱. شاخص‌های ترکیبی معرفی شده و پارامترهای ورودی در هر یک از آنها

شاخص‌های ورودی PCA	شاخص معرفی شده
PC1 (TCI, VCI, PCI)	SDI1=
PC1 (TCI, nVSDI, PCI)	SDI2=
PC1 (TCI, nSWCI, PCI)	SDI3=

در این مطالعه برای محاسبه شاخص‌های NDVI، SWCI و VSDI باندهای تصاویر بازتاب سطح سنجنده MODIS (MOD09A11 collection v005) که از سایت (<http://reverb.echo.nasa.gov>) تهیه شدند، استفاده شد. محصول MOD09A1 سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۴ ماه‌های مارس تا می و سپتامبر تا نوامبر تهیه و پس از اعمال پیش‌پردازهای اولیه روی آنها شاخص‌های ماهانه VCI، SWCI و VSDI با وزن دهی به تصاویر ۸ روزه، براساس تعداد روزهای متعلق به هر ماه محاسبه شدند. این تصاویر ۸ روزه شامل ۷ باند پوشش دهنده طیف‌های مرئی، NIR و SWIR، با رزولوشن ۵۰۰ متر هستند. شایان یادآوری است که MOD09A1 در فقدان جذب و پراکنش اتمسفری برآوردی از بازتاب طیفی سطح فراهم می‌کنند. در ادامه، موزاییک پوشش دهنده منطقه مطالعاتی، موزاییک h22v05 در نظر گرفته شد. پس از محاسبه شاخص‌های یادشده، به منظور ترکیب داده‌های مختلف سنجش از دوری با یکدیگر این

TRMM، تلاش می‌شود تا داده‌های این ماهواره به‌عنوان داده کمکی همبسته به کمک روش درون‌یابی کوکریجینگ درون‌یابی شوند. به‌منظور ارزیابی کارآمدی روش کوکریجینگ به کمک تصاویر TRMM، باید نتیجه اجرای آن با دیگر روش‌های رایج در پهنه‌بندی بارش ارزیابی شود. تصاویر برآورد بارش TRMM نیز مانند هر داده ورودی دیگری به بررسی و پیش‌پردازش اولیه نیاز دارند. بنابراین، برای اطمینان از دقت و کارایی این داده‌ها در سطح منطقه، لازم است میزان برآورد بارش این ماهواره با مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده در سطح منطقه، مقایسه شود. از این‌رو، آنالیز همبستگی پیرسون بین بارش تجمعی ماهانه اندازه‌گیری شده در هر ایستگاه و بارش برآورد شده توسط ماهواره TRMM در همان نقطه، برای هر شش ماه مطالعاتی سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۴ انجام شد. نتایج نشان دادند همبستگی بین داده‌های TRMM-3B43 و بارش اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های زمینی در سطح بسیار قابل قبولی است. در ۴۱ ایستگاه مطالعاتی، ضریب همبستگی پیرسون برای همه ایستگاه‌ها به جز ایستگاه‌های قم و کوشک، از ۰/۷۴ تا ۰/۹۵ متغیر است. این موضوع بیانگر آن است که این داده‌ها به‌عنوان داده همبسته، برای ورود به فرایند کوکریجینگ مناسب‌اند. به‌منظور افزایش کارایی تصاویر TRMM و کاهش اطلاعات نادرست در داده‌های ورودی، پیکسل مختص به دو ایستگاه قم، کوشک و مناطق مجاور آنها از سری تصاویر ماهواره‌ای TRMM-3B43 حذف و به‌صورت No Data ذخیره می‌شود. سپس، رایج‌ترین روش‌های پهنه‌بندی مانند IDW، Kriging (عادی، ساده و عمومی) و CoKriging (به‌همراه داده‌های کمکی TRMM) در نرم‌افزار ArcGIS و روی ۱۶ ایستگاه سینوپتیک در منطقه مطالعاتی و ۲۵ ایستگاه سینوپتیک در استان‌های مجاور اعمال شد. پس از اعمال روش‌های درون‌یابی یادشده، نتایج آنها توسط روش ارزیابی متقابل^۳ به کمک شاخص‌های RMSE، MAE و MBE ارزیابی شدند که به‌طور معمول برای بررسی عملکرد روش‌های پهنه‌بندی به کار می‌روند. شایان یادآوری است که هرچه مقدار کمیت RMSE به صفر نزدیک‌تر باشد، خطا کمتر خواهد بود [۳۲]. MAE و MBE نیز در حالت ایده‌آل نزدیک به صفر هستند. همچنین مقادیر مثبت و منفی در این دو کمیت به ترتیب

کمینه و بیشینه VSDI ماهانه در پیکسل معادل طی سال‌های ۲۰۰۸-۲۰۱۴ هستند.

مقادیر هر سه شاخص VCI، nVSDI و nSWCI بین صفر (شرایط نامساعد) و یک (شرایط مطلوب) متغیر است. بدین ترتیب سری شاخص‌های VCI، nVSDI و nSWCI برای شش ماه مطالعاتی در سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۴ محاسبه شده و هریک به‌صورت جداگانه به‌عنوان شاخص رطوبت وارد مطالعه خواهند شد.

شاخص نرمال وضعیت دمای سطح زمین (TCI)

شاخص TCI با الگوریتمی مشابه شاخص VCI، به‌منظور بهبود عملکرد شاخص LST معرفی شده است [۹]. برخلاف شاخص VCI دمای زیاد نشان‌دهنده شرایط نامطلوب خشک و دمای سطح کم، شرایط مطلوب را مشخص می‌کند [۳۱]. بنابراین، شاخص TCI به‌صورت رابطه ۷ تعریف می‌شود.

$$TCI = \frac{LST_{max} - LST_j}{LST_{max} - LST_{min}} \quad (7)$$

در رابطه یادشده LST_j ، مقدار پیکسل LST ماهانه ماه j است و LST_{min} و LST_{max} به ترتیب مقادیر کمینه و بیشینه LST ماهانه در پیکسل معادل طی سال‌های ۲۰۰۸-۲۰۱۴ هستند.

شاخص وضعیت بارش

از جمله معایب تصاویر TRMM می‌توان به رزولوشن مکانی نامناسب آنها اشاره کرد. در بیشتر مطالعات خشکسالی داده‌های برآورد بارش ماهواره TRMM به‌عنوان داده بارش تعمیم‌یافته به سطح، به‌صورت مستقیم وارد مطالعه می‌شوند. به‌منظور آنالیز هم‌زمان داده‌های سنجش از دوری، لازم است که رزولوشن این تصاویر با دیگر داده‌های استفاده‌شده در تحقیق یکسان باشد. از این‌رو، باید در تحقیق حاضر تصاویر یادشده (داده‌های TRMM) ریزمقیاس شوند. با توجه به اختلاف زیاد بین رزولوشن تصویر TRMM و دیگر شاخص‌های ماهواره‌ای (۰/۲۵° و ۵۰۰ متر)، به‌کارگیری تکنیک‌های متداول ریسمپل کردن مانند نزدیک‌ترین همسایگی^۱ و بایلینیر^۲ می‌تواند خطای بسیار زیادی را وارد اطلاعات بارش کند. در این مطالعه، به‌منظور کاهش خطای داده‌های ورودی و افزایش کارایی تصاویر برآورد بارش

(عادی، ساده و عمومی) و Cokriging (به کمک TRMM-3B43) را در ۴۲ ماه مطالعاتی (۶ ماه در هر سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۴) نشان می‌دهد.

نشان‌دهنده بیش‌برآورد و برآورد نقصانی (کمتر از مقدار واقعی) هستند [۳۲]. جدول ۳ میانگین RMSE، MAE و MBE به‌دست‌آمده از روش‌های درون‌یابی IDW، Kriging

جدول ۲. میانگین مقادیر MAE، RMSE و MBE به‌دست‌آمده از اعمال روش‌های درون‌یابی بر داده‌های بارش ماهانه ماه‌های مطالعاتی ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۴

روش	RMSE	MAE	MBE
IDW	۰/۳۸۳۹	۰/۲۵۲۲	-۰/۰۶۱۸
Kriging (ساده)	۰/۴۱۰۳	۰/۳۰۸۱	-۰/۰۸۳۲
Kriging (عادی)	۰/۳۰۷۶	۰/۲۷۰۵	۰/۰۴۷۶
Kriging (جهانی)	۰/۴۳۱۴	۰/۲۹۹۶	-۰/۰۷۵۹
Co-Kriging (عادی)	۰/۱۸۷۸	۰/۱۷۰۶	-۰/۰۲۲۶

موجود در یک فضای چندحالتی همبسته، به‌صورت مجموعه‌ای از مؤلفه‌های غیرهمبسته خلاصه می‌شوند. به‌صورتی که هر یک از مؤلفه‌های غیرهمبسته ترکیب خطی از متغیرهای اصلی هستند. مؤلفه‌های غیرهمبسته به‌دست‌آمده اصطلاحاً مؤلفه‌های اساسی نامیده می‌شوند. در این مقاله آنالیز PCA در نرم‌افزار ENVI انجام شد که در نتیجه آن شاخص به‌دست‌آمده از ترکیب سه شاخص VCIPCI و TCI با عنوان شاخص SDI1 معرفی شد. همچنین، شاخص به‌دست‌آمده از ترکیب TCI، nSWCI و PCI به‌عنوان شاخص SDI2 در نظر گرفته و شاخص به‌دست‌آمده از ترکیب TCI و nVSDI به‌عنوان SDI3 پیشنهاد شد. در نهایت، سری زمانی شاخص‌های SDI1-SDI3 برای ماه‌های مارس، آوریل، می، سپتامبر، اکتبر و نوامبر در سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۴ تهیه شدند.

اعتبارسنجی

شاخص بارش استاندارد شده (SPI)

در این مطالعه به‌منظور اعتبارسنجی و بررسی چگونگی عملکرد شاخص‌های ارائه‌شده از شاخص استاندارد بارش به‌نام SPI استفاده می‌شود. این شاخص در درجه اول یک شاخص خشکسالی هواشناسی و فاکتور مؤثر در محاسبه آن عنصر بارندگی است [۵ و ۴]. اگرچه شاخص‌های هواشناسی خشکسالی به‌دلیل وابستگی به ایستگاه‌های زمینی، محدودیت‌هایی دارند، ماهیت و عملکرد قابل قبول آنها در نقاط ایستگاه‌های هواشناسی سبب شده است که در مطالعات مختلف، از آنها به‌عنوان ابزار برای ارزیابی شاخص‌های

میانگین هر یک از سه پارامتر ارزیابی RMSE، MAE و MBE نشان می‌دهد روش کوکریجینگ به‌کمک داده‌های همبسته برآورد بارش TRMM-3B43، نتیجه دقیق‌تری را در فرایند درون‌یابی داده‌های بارش ارائه می‌کند. بنابراین، برای هر ۴۲ ماه مطالعاتی، تصویر رستری بارش با ابعاد پیکسلی ۵۰۰ متر به‌کمک روش کوکریجینگ عادی محاسبه شد. در ادامه، تصاویر رستری تولیدشده از روش کوکریجینگ (مشابه با شاخص‌های توضیح داده‌شده) نرمال‌سازی و با عنوان شاخص نرمال‌شده وضعیت بارش معرفی شدند.

$$PCI = \frac{(Pre_j - Pre_{min})}{Pre_{max} - Pre_{min}} \quad (8)$$

که در آن پارامتر Pre_j مقدار پیکسل تصویر Precipitation ماهانه ماه زاست. همچنین، Pre_{min} و Pre_{max} به‌ترتیب مقادیر کمینه و بیشینه ماهانه در پیکسل معادل هستند که با تطبیق‌دادن پیکسل‌های ماه ز تصاویر بارش در سال‌های ۲۰۰۸-۲۰۱۴ محاسبه شده‌اند.

شاخص‌های ترکیبی به‌دست‌آمده از آنالیز مؤلفه اصلی (PCA)

اگرچه شاخص‌های وضعیت خاک-پوشش گیاهی، وضعیت دما و وضعیت بارش به‌منظور پایش خشکسالی به‌کار گرفته می‌شوند، میان آنها اطلاعات وابسته‌ای وجود دارد. از طرفی در فصول مختلف هیچ رابطه مستقیم و جهانی میان آنها مشهود نیست [۳]. آنالیز مؤلفه اصلی تکنیکی است که از آن برای حذف و یا کاهش افزونگی در یک مجموعه داده و فشرده‌سازی اطلاعات استفاده می‌شود؛ به‌گونه‌ای که اطلاعات بسیار کمی از دست بروند [۳]. در این روش، متغیرهای

و nVSDI تعمیم داده می‌شود. پس از اعمال پیش‌پردازش‌های لازم روی تصاویر لندست و تبدیل مقادیر DN آنها به مقادیر بازتابندگی بالای اتمسفر، سری زمانی هریک از شاخص‌های VCI, nSWCI و nVSDI برای شش ماه مطالعاتی سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۴ توسط باندهای این ماهواره ایجاد شدند. مطالعات نشان دادند در سنجنده لندست ۷، باند ۵ (۱,۵۵-۱,۷۷ mm) همبستگی بیشتری نسبت به باند ۷ (۲/۰۸-۲/۳۵) با محتوای آب برگ دارد [۱۳]. بنابراین، در مقاله حاضر از باند ۵ لندست برای ساخت شاخص nVSDI استفاده شد. همچنین، شاخص NDVI توسط باندهای ۳ و ۴ این سنجنده و شاخص SWCI به کمک دو باند ۵ و ۷ آن ساخته شدند. شایان یادآوری است که از نقشه کاربری اراضی سال ۲۰۱۲ در مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰ سازمان وزارت جهاد کشاورزی به منظور طبقه‌بندی کاربری اراضی منطقه مطالعاتی استفاده شد. بدین صورت که در ۴۲ ماه مطالعاتی، مقدار میانگین هریک از سه شاخص VCI, nVSDI و nSWCI (تولیدشده توسط تصاویر لندست) در پوشش‌های اراضی‌ای که در نزدیکی خود ایستگاه زمینی دارند، محاسبه و سپس مقادیر یادشده همراه با مقادیر شاخص SPI وارد آنالیز رگرسیون شدند.

یافته‌ها و نتایج

در فرایند توصیف‌شده، سه شاخص SDI1، SDI2 و SDI3 به کمک آنالیز PCA تولید شدند و شرایط خشکسالی در سطح استان‌های تهران و قم توسط این سه شاخص برای دوره زمانی ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۴ پایش شد. جدول ۳ ضرایب تعیین به‌دست‌آمده از آنالیز رگرسیون بین شاخص‌های SPI در ۱۶ ایستگاه و میانگین سه شاخص SDI1، SDI2 و SDI3 را نشان می‌دهد.

ماهواره‌ای استفاده شود. با توجه به اینکه در مطالعات گذشته تأخیر زمانی یک تا سه ماه میان SPI و پاسخ برخی شاخص‌های پایش خشکسالی مانند NDVI، مشخص شده است [۲۷، ۷ و ۳]، در این مطالعه SPI1 و SPI3 (که به ترتیب نشان‌دهنده SPI یک‌ماهه و SPI سه‌ماهه هستند) با استفاده از اطلاعات ۱۶ ایستگاه سینوپتیک زمینی سال‌های ۱۹۸۰-۲۰۱۴ محاسبه و به کار گرفته می‌شوند. برای اعتبارسنجی شاخص‌های پیشنهادی، آنالیز رگرسیون بین هریک از شاخص‌های SDI1، SDI2، SDI3 با دو شاخص SPI1 و SPI3 در ۱۶ ایستگاه صورت پذیرفت. بدین‌منظور میانگین مقادیر SDI در اطراف هر ایستگاه سینوپتیک محاسبه و در آنالیز رگرسیون وارد شد.

کلاس‌بندی اراضی پوشش گیاهی در سطح منطقه به کمک

تصاویر Landsat+ ETM+ 7

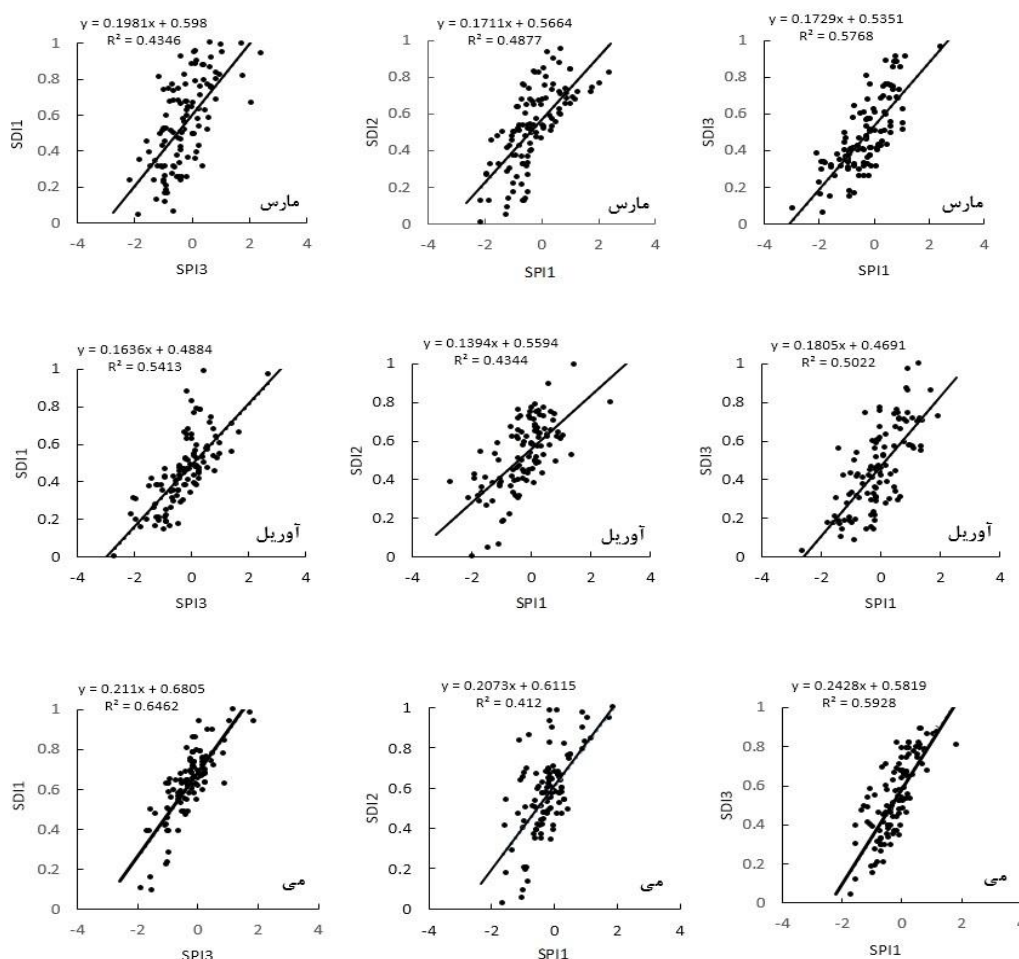
نوع پراکندگی کاربری اراضی یکی از عواملی است که پایش خشکسالی را در مناطقی با تنوع اراضی مختلف دچار مشکل می‌کند. با توجه به رزولوشن متوسط تصاویر MODIS، به‌منظور بررسی دقیق‌تر عملکرد شاخص‌های معرفی شده در پوشش اراضی مختلف به تصاویری با قدرت مکانی بیشتر نیاز است. از این‌رو، تصاویر Landsat7 سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۴ برای شش ماه مارس، آوریل، می، سپتامبر، اکتبر و نوامبر از سایت (earthexplorer.usgs.gov) تهیه و پردازش شدند. این تصاویر به‌علت رزولوشن مکانی مناسب (۳۰ متر) توانایی بیشتری در تفکیک پوشش‌های اراضی مختلف دارند. از آنجا که تنها فاکتور متغیر در هریک از سه شاخص SDI1، SDI2 و SDI3 پارامتر رطوبت خاک- گیاه است، در این قسمت از مطالعه، عملکرد سه شاخص VCI، nSWCI و nVSDI ارزیابی شد. در انتها، نتایج به‌دست‌آمده از این ارزیابی به هریک از شاخص‌های دربرگیرنده سه شاخص VCI، nSWCI

جدول ۳. ضرایب تبیین (R^2) آنالیز رگرسیون میان هریک از سه شاخص SDI1، SDI2 و SDI3 با شاخص‌های SPI1 و SPI3

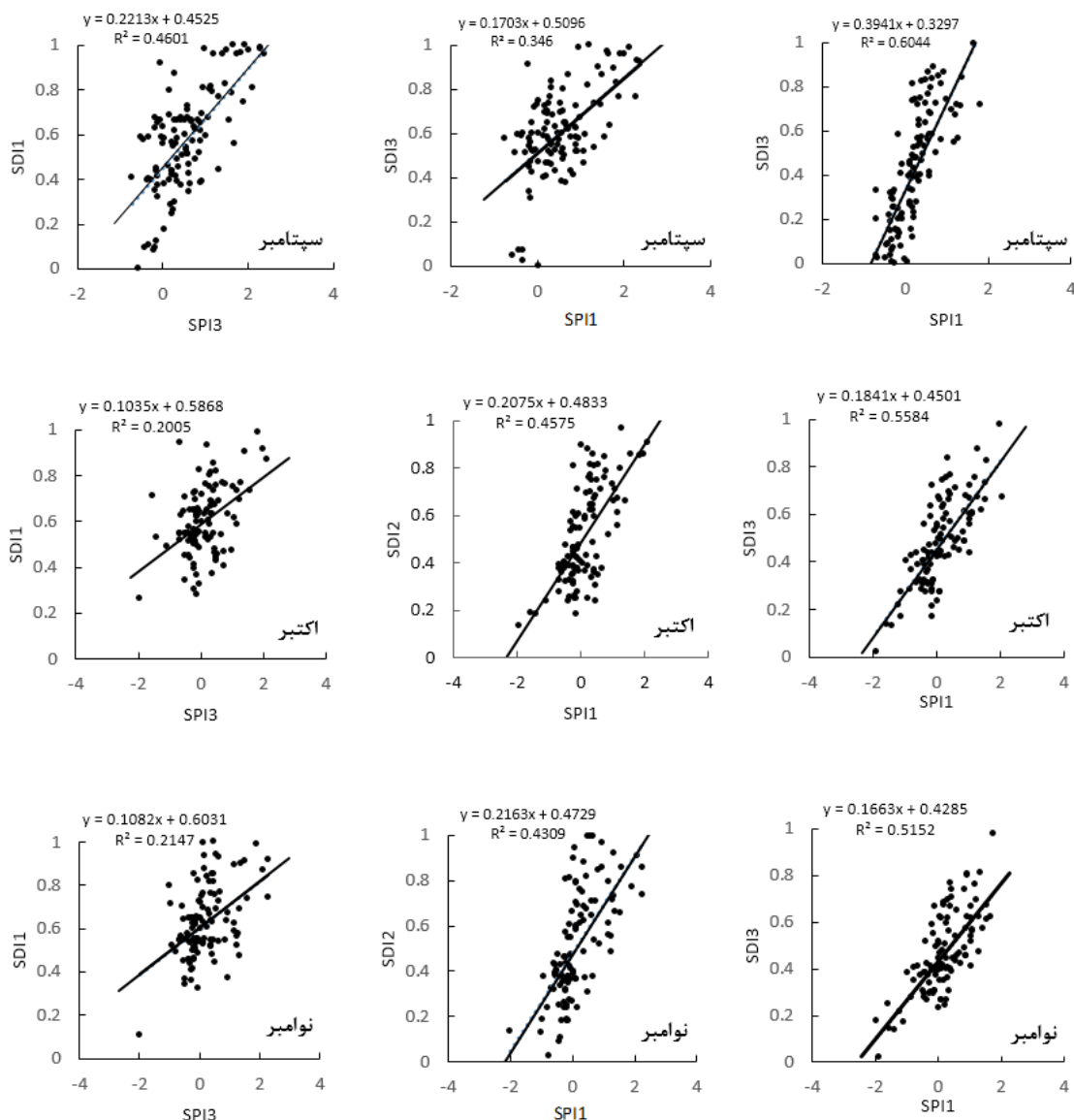
R^2 (SDI1-SPI1)	R^2 (SDI1-SPI3)	R^2 (SDI2-SPI1)	R^2 (SDI2-SPI3)	R^2 (SDI3-SPI1)	R^2 (SDI3-SPI3)	R^2
N=۱۱۲	N=۱۱۲	N=۱۱۲	N=۱۱۲	N=۱۱۲	N=۱۱۲	ماه
۰/۳۱۱۲	۰/۴۳۴۶	۰/۴۹۱۳	۰/۴۸۷۷	<u>۰/۵۷۶۸</u>	۰/۳۹	مارس
۰/۴۶	<u>۰/۵۳۷۶</u>	۰/۴۳۷	۰/۲۹۸۳	۰/۵۰۲۲	۰/۴۱۹۲	آوریل
۰/۴۵۱۴	<u>۰/۶۴۶۲</u>	۰/۴۰۳۳	۰/۳۵۸	۰/۶۰۱۹	۰/۴۳۱۷	می
۰/۲۸۶۷	۰/۳۵۳۹	۰/۴۶۰۱	۰/۳۲۷۹	<u>۰/۶۰۴۴</u>	۰/۴۶۳	سپتامبر
۰/۱۲۵	۰/۲۱۰۴	۰/۴۳۶۶	۰/۳۱۹	<u>۰/۵۵۸۴</u>	۰/۳۳۹۲	اکتبر
۰/۱۱۸۲	۰/۲۱۷۱	۰/۴۳۰۵	۰/۲۵۴۴	<u>۰/۵۱۵۲</u>	۰/۲۹۳۹	نوامبر

ماه‌های دیگر به‌ویژه ماه‌های فصل آفول رشد گیاه، ضعیف‌تر از دو شاخص دیگر است (جدول ۴). اگرچه شاخص SDI2 (شامل شاخص nSWCI) نسبت به شاخص SDI1 عملکرد ضعیف‌تری در برخی ماه‌های سال نشان داده است، نسبت به شاخص SDI1 پاسخ متعادل‌تر و قابل قبول‌تری را (در بیشتر ماه‌های مطالعاتی) ارائه می‌کند. نتایج جدول ۴ نشان می‌دهند که در بیشتر ماه‌ها شاخص SDI3 (شامل شاخص رطوبت پوشش گیاهی و خاک nVSDI) پاسخی متعادل و مناسب را به پایش وضعیت خشکسالی منطقه ارائه می‌دهد. همچنین، مقدار زیاد ضریب تعیین شاخص یادشده با داده‌های SPI یک‌ماهه، نشان‌دهنده توانایی زیاد آن در پایش زمان واقعی (Real Time) خشکسالی در کوتاه‌مدت است. در شکل‌های ۲ و ۳ نمودارهای آنالیز رگرسیون شاخص‌های SDI1، SDI2 و SDI3 برای ماه‌های مطالعاتی به ترتیب با SPI3 و SPI1 و SPI3

نتایج بیانگر آن هستند که در شاخص‌های پایش رطوبت گیاهی پارامترهایی مانند نوع پوشش گیاهی، ریشه گیاه، دوره رشد گیاه و نظایر آن، تأثیر زیادی بر عملکرد شاخص‌ها دارند. همچنین عملکرد شاخص‌های گیاهی در مناطقی با پوشش گیاهی کم‌تراکم و تنک به دلیل تأثیر خاک زمینه، دچار اختلال می‌شود. گیاهان به دلیل ویژگی ذاتی خود توانایی مقابله با کمبود رطوبت را دارند؛ از این رو ممکن است رخداد خشکی در منطقه را با تأخیر نشان دهند. بنابراین، همان‌طور که مطالعات مختلف نیز نشان داده‌اند، ضریب تعیین میان شاخص SDI1 (شامل داده ورودی رطوبت گیاه VCI) و شاخص SPI3، در مقایسه با شاخص SPI1، بیشتر است. شاخص‌های SDI2 و SDI3 نیز به ترتیب بیشترین ضریب تعیین را با شاخص‌های SPI3 و SPI1 نشان دادند. اگرچه عملکرد شاخص SDI1 در ماه‌های آوریل و می بهتر از دو شاخص دیگر ارزیابی شده است، عملکرد این شاخص در



شکل ۲. نمودار آنالیز رگرسیون سه شاخص SDI1، SDI2 و SDI3 به ترتیب با شاخص‌های SPI3، SPI1 و SPI1 در ماه‌های مارس، آوریل، می

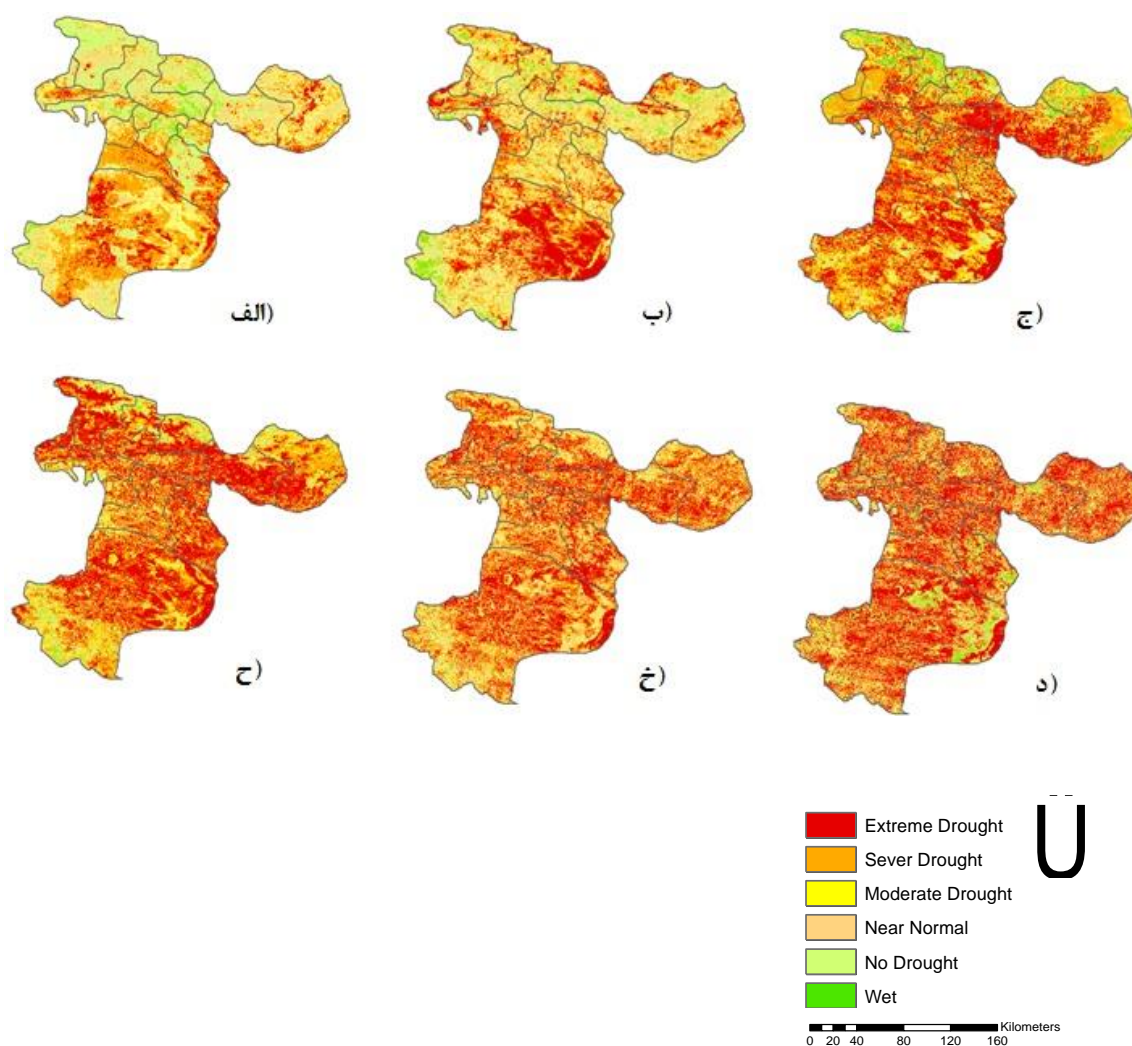


شکل ۳. نمودار آنالیز رگرسیون سه شاخص SDI1، SDI2 و SDI3 به ترتیب با شاخص‌های SPI1، SPI3 و SPI1 در ماه‌های سپتامبر، اکتبر و نوامبر

یادشده بررسی شد و خشکسالی سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۰۹ و نیز سال ۲۰۱۴ که توسط سازمان خشکسالی ایران تأیید شده است، به درستی پایش شد. شکل ۴ شاخص OSDI مختص به شش ماه مطالعاتی مارس، آوریل، می، سپتامبر، اکتبر و نوامبر سال ۲۰۱۴، را نشان می‌دهد. مقادیر این شاخص همچون شاخص‌های دیگر خشکسالی به شش دسته از خشکسالی شدید تا وضعیت تر تقسیم می‌شود [۳].

نتایج اعتبارسنجی نشان داد در میان سه شاخص ترکیبی پیشنهادی، شاخص SDI3 (شامل شاخص nVSDI، بهترین عملکرد را در پایش زمان واقعی خشکسالی در سطح منطقه مطالعاتی (با پوشش اراضی ناهمگن) دارد. از این‌رو، شاخص یادشده به‌عنوان شاخص ترکیبی بهینه خشکسالی (OSDI)^۱ معرفی و پیشنهاد می‌شود. در ادامه، در این تحقیق وضعیت خشکسالی منطقه مطالعاتی برای سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۴ توسط شاخص

1. Optimized Synthesized Drought Index



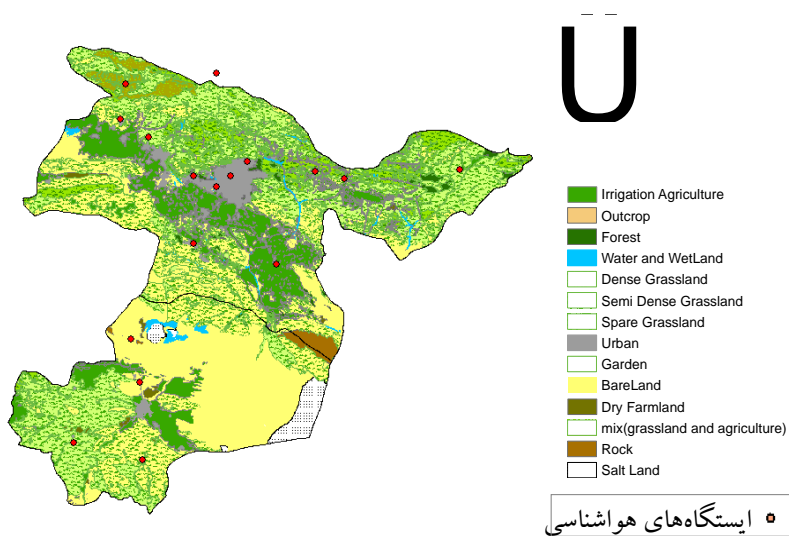
شکل ۴. نمایش وضعیت خشکسالی استان‌های تهران و قم. الف، ب، ج، خ، د، به ترتیب نقشه OSDI ماه‌های مارس، آوریل و می و سپتامبر، اکتبر و نوامبر ۲۰۱۴

مساعدی را تجربه می‌کند. از آنجا که در این مطالعه، آخرین ماه مطالعاتی نوامبر سال ۲۰۱۴ در نظر گرفته شده و وضعیت خشکسالی سال ۲۰۱۵ پایش نشده است، زمان پایان این دوره خشکسالی مشخص نیست. همان طور که نتایج نشان می‌دهد شاخص OSDI توانایی مشخص کردن دوره شروع و پایان خشکسالی را در سطح منطقه دارد. همچنین این شاخص، شدت و گستره وقوع خشکسالی را نیز براساس کلاس‌بندی نشان می‌دهد که برای مقادیر آن انجام شده است. شروع خشکسالی بسیار شدید توسط شاخص OSDI در سطح منطقه مطالعاتی و در ماه می سال ۲۰۱۴ شناسایی شد. علاوه بر خشکسالی شدید در سال ۲۰۱۴، خشکسالی سال‌های ۲۰۰۸-۲۰۰۹ نیز توسط

مطابق شکل ۴ در بخش‌هایی از جنوب استان تهران و بخش‌های مرکزی استان قم در ماه مارس خشکسالی شدیدی اتفاق افتاده است. در مناطق شمالی و شرقی استان قم و بخش‌هایی از استان تهران نیز خشکسالی در ماه آوریل گسترش بیشتری داشته است. مطابق شکل ۴ خشکسالی منطقه‌ای ماه‌های آوریل و می در ماه‌های سپتامبر، اکتبر و نوامبر از حالت منطقه‌ای خارج و به همه استان تهران و قم گسترش یافته است. منطقه شمالی استان تهران که در ماه‌های مارس، آوریل و می در وضعیت هشدار نبود، در ماه اکتبر به تدریج وارد وضعیت خشکسالی شده است. علاوه بر این، جنوب غرب استان قم از جمله مناطقی است که در بیشتر ماه‌های مطالعاتی وضعیت

nVSDI (به دست آمده از تصاویر لندست)، در اطراف ایستگاه‌های زمینی آب و هواشناسی محاسبه شدند. در سطح منطقه مطالعاتی، متناسب با نوع اقلیم و آب و هوای منطقه اراضی دیم بسیار کمی وجود دارند. همچنین به منظور دقیق بودن نتایج ارزیابی، اراضی بررسی شده باید در نزدیکی ایستگاه هواشناسی قرار داشته باشند. از این رو، تعداد داده‌های ورودی در نظر گرفته شده برای برخی اراضی از جمله اراضی دیم بسیار کمتر از مناطق دیگر بوده است. بنابراین، فرایند ارزیابی آنها با استفاده از داده‌های نمونه بسیار کم، دقیق نبوده و آنالیز رگرسیون در این نوع اراضی انجام نشده است. جدول ۴ نتایج آنالیز رگرسیون شاخص‌های VCI، nSWCI، nVSDI تولید شده توسط لندست ۷ را در چند کاربری اراضی مختلف (برای شش ماه مطالعاتی سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۲)، به کمک شاخص‌های SPI یک و سه ماهه نشان می‌دهد.

شاخص OSDI پایش شد. سازمان هواشناسی کشور، خشکسالی سال ۲۰۰۸ را به عنوان یکی از خشکسالی‌های شدید سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ تأیید می‌کند. همچنین شروع دوره خشکسالی شدید در سال ۲۰۱۴ نیز توسط سایت این سازمان تأیید شده است. همچنین، فرایند بررسی عملکرد شاخص‌های پیشنهادی با در نظر گرفتن پوشش‌های اراضی مختلف نیز انجام پذیرفت. در این مطالعه به منظور بررسی عملکرد شاخص‌های ارائه شده در اراضی مختلف، از نقشه‌های کاربری اراضی سال‌های ۲۰۰۶ و ۲۰۱۴ سازمان وزارت جهاد کشاورزی در مقیاس $\frac{1}{100000}$ ، به منظور طبقه‌بندی کاربری اراضی استفاده شده است (شکل ۵). به منظور بررسی عملکرد سه شاخص VCI، nVSDI و nSWCI در هریک از انواع پوشش اراضی، اراضی‌ای در نظر گرفته شدند که در نزدیکی ایستگاه‌های زمینی بودند. مقادیر میانگین سه شاخص VCI، nSWCI و



شکل ۵. طبقه‌بندی پوشش اراضی منطقه مطالعاتی

جدول ۴. نتایج آنالیز رگرسیون سه شاخص VCI، nVSDI، nSWCI تولید شده توسط Landsat7 با شاخص SPI1 یا SPI3 در چند کاربری اراضی مختلف (برای ۴۲ ماه مطالعاتی)

			R^2
R^2 (nVSDI-SPI1)	R^2 (nSWCI-SPI1)	R^2 (VCI-SPI3)	نوع پوشش اراضی
۰/۵۲۷	۰/۵۰۶۱	۰/۲۲۱۲	خاک بایر و مرتع تنک
۰/۴۹۸۸	۰/۲۹۳۳	۰/۴۰۳۳	مرتع نیمه متراکم
۰/۵۵۴۲	۰/۲۷۲۲	۰/۵۸۱۸	جنگل و مرتع متراکم
۰/۱۷۵۵	۰/۲۵۴	۰/۱۷۸۴	زمین کشاورزی آبیاری

شاخص (OSDI) معرفی شد. در حقیقت، شاخص OSDI انحراف بارش، تنش حرارتی خاک و وضعیت رطوبت خاک- گیاه را در دوره خشکسالی ترکیب می‌کند. ضریب تبیین زیاد میان شاخص یادشده و شاخص SPI یک‌ماهه، نشان‌دهنده توانایی OSDI در پایش بدون تأخیر خشکسالی است. نقشه این شاخص در شش ماه مطالعاتی بازه زمانی ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۴، خشکسالی شدید سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۱۴ در سطح این منطقه را تأیید کرد. به‌منظور ارزیابی توانایی OSDI در پایش خشکسالی در اراضی ناهمگن، شاخص‌های وضعیت رطوبت به‌عنوان تنها پارامتر متغیر در هریک از سه شاخص توسط Landsat 7 تولید شدند. نتایج آنالیز رگرسیون میان میانگین این مقادیر در نزدیکی ایستگاه‌های سینوپتیک (با پوشش اراضی مختلف) نشان داد شاخص OSDI مناسب‌ترین و متعادل‌ترین پاسخ را در پوشش اراضی متنوع ارائه می‌دهد. نتایج همچنین نشان داد این نمایه توانایی پایش زمان شروع، طول دوره، وسعت و شدت خشکسالی را دارد. این نتایج ثابت می‌کند که روش جدید پایش خشکسالی که به‌کمک ترکیب داده‌های چند سنجنده ماهواره‌ای و داده‌های زمینی معرفی شده است، برای پایش زمان واقعی خشکسالی در سطح مناطقی با پوشش ناهمگن مناسب است.

منابع

- [1]. Niazi Y, Talebi A, Mokhtari M.H, Vazifedoust M. Evaluating a new combination of drought index based on remote sensing data (RCDI) within the Central Iran. Iranian Journal of Eco Hydrology. 2017; 3(1):31-43.[Persian]
- [2]. Zhang N, Hong Y, Qin Q, Liu L. VSDI: a visible and shortwave infrared drought index for monitoring soil and vegetation moisture based on optical remote sensing. International journal of remote sensing. 2013; 34(13):4585-609.
- [3]. Du L, Tian Q, Yu T, Meng Q, Jancso T, Udvardy P, Huang Y. A comprehensive drought monitoring method integrating MODIS and TRMM data. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2013;23:245-53.
- [4]. McKee TB, Doesken NJ, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology 1993; 17(22): 179-183.

همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود ضریب تعیین میان شاخص SPI3 و شاخص VCI در جنگل و مرتع متراکم بیش از سایر اراضی است. به‌نظر می‌رسد زیادنبودن ضریب تبیین بین این دو شاخص در مناطق جنگلی، مرتع متراکم و نیمه‌متراکم ناشی از پایین‌بودن همبستگی آنها در ماه‌های فصل پاییز باشد. شاخص SWCI به‌عنوان یک شاخص برآوردکننده رطوبت خاک، در مناطقی با خاک بایر و پوشش گیاهی تنک عملکرد بسیار خوبی ارائه می‌دهد. با این‌حال، در مناطق پوشیده از پوشش گیاهی متراکم و نیمه‌متراکم ضعیف عمل می‌کند. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهند، در بیشتر پوشش‌ها شاخص nVSDI عملکرد قابل قبولی ارائه می‌دهد. شایان یادآوری است که در مناطق مرتعی بیشتر پوشش گیاهی کمتر تحت تأثیر عوامل انسانی نظیر آبیاری قرار می‌گیرد. علاوه بر این، در اراضی کشاورزی آبی به‌دلیل آبیاری دائم توسط کشاورزان وضعیت پوشش گیاهی گویای وضعیت خشکسالی منطقه نیست. بنابراین، مقدار ضریب تعیین بسیار کم میان شاخص‌های ماهواره‌ای و SPI در این مناطق طبیعی به‌نظر می‌رسد. نتایج این ارزیابی بیانگر آن است که شاخص nVSDI بهترین عملکرد را در انواع پوشش اراضی شامل خاک بایر، مرتع تنک، نیمه‌متراکم و متراکم دارد. از این‌رو، شاخص OSDI به‌عنوان شاخص دربرگیرنده این نمایه، بدون در نظر گرفتن ملاحظات مختص به پوشش، خشکسالی سطح منطقه را در مناطقی با پوشش اراضی ناهمگن به‌صورت زمان واقعی پایش می‌کند.

نتیجه‌گیری

این مطالعه شاخص ترکیبی بهینه‌شده خشکسالی (OSDI) را به‌کمک یک سری از شاخص‌های ماهواره‌ای در محدوده استان‌های تهران و قم، به‌وسیله آنالیز PCA معرفی کرد. در این مقاله، هریک از سه شاخص VCI، nVSDI و nSWCI به‌طور جداگانه به‌همراه شاخص‌های TCI و PCI وارد آنالیز PCA شدند. در نتیجه مؤلفه اصلی به‌دست‌آمده از هریک از این آنالیزها به‌عنوان شاخص‌های ترکیبی معرفی شدند. نتایج آنالیز رگرسیون میان این شاخص‌ها و شاخص خشکسالی SPI یک و سه ماهه نشان داد مؤلفه اصلی به‌دست‌آمده از اعمال PCA بر سه شاخص nVSDI، TCI و PCI عملکرد بهتری را در پایش زمانی واقعی خشکسالی ارائه می‌دهد. این شاخص به‌عنوان

- [5]. Jahangir M, Khoshmashraban M, Yousefi H. Monitoring and forecasting drought conditions using standardized precipitation index (SPI) and Artificial Neural Network (Case Study: Tehran and Alborz provinces). *Iranian Journal of Eco Hydrology*. 2016; 2(4):417-28. [Persian]
- [6]. Kogan FN. Global drought watch from space. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1997;78(4):621-36.
- [7]. Hao C, Zhang J, Yao F. Combination of multi-sensor remote sensing data for drought monitoring over Southwest China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2015;35:270-83.
- [8]. Tucker CJ. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote sensing of Environment*. 1979;8(2):127-50.
- [9]. Kogan FN. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in Space Research*. 1995;15(11):91-100.
- [10]. Kogan FN. Droughts of the late 1980s in the United States as derived from NOAA polar-orbiting satellite data. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 1995;76(5):655-68.
- [11]. Huete AR. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote sensing of environment*. 1988;25(3):295-309.
- [12]. Huete AR, Tucker CJ. Investigation of soil influences in AVHRR red and near-infrared vegetation index imagery. *International Journal of Remote Sensing*. 1991;12(6):1223-42.
- [13]. Ghulam A, Qin Q, Zhan Z. Designing of the perpendicular drought index. *Environmental Geology*. 2007;52(6):1045-52.
- [14]. Ghulam A, Qin Q, Teyip T, Li ZL. Modified perpendicular drought index (MPDI): a real-time drought monitoring method. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2007;62(2):150-64.
- [15]. Bajgiran PR, Darvishsefat AA, Khalili A, Makhdom MF. Using AVHRR-based vegetation indices for drought monitoring in the Northwest of Iran. *Journal of Arid Environments*. 2008;72(6):1086-96.
- [16]. Wang J, Rich PM, Price KP. Temporal responses of NDVI to precipitation and temperature in the central Great Plains, USA. *International Journal of Remote Sensing*. 2003;24(11):2345-64.
- [17]. Ghulam A, Li ZL, Qin Q, Yimit H, Wang J. Estimating crop water stress with ETM+ NIR and SWIR data. *Agricultural and forest meteorology*. 2008;148(11):1679-95.
- [18]. Shahabfar A, Ghulam A, Eitzinger J. Drought monitoring in Iran using the perpendicular drought indices. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2012;18:119-27.
- [19]. Bhuiyan C, Singh RP, Kogan FN. Monitoring drought dynamics in the Aravalli region (India) using different indices based on ground and remote sensing data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2006;8(4):289-302.
- [20]. Jain SK, Keshri R, Goswami A, Sarkar A, Chaudhry A. Identification of drought-vulnerable areas using NOAA AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*. 2009;30(10):2653-68.
- [21]. Kogan F, Stark R, Gitelson A, Jargalsaikhan L, Dugrajav C, Tsooj S. Derivation of pasture biomass in Mongolia from AVHRR-based vegetation health indices. *International Journal of Remote Sensing*. 2004;25(14):2889-96.
- [22]. Zhang A, Jia G. Monitoring meteorological drought in semiarid regions using multi-sensor microwave remote sensing data. *Remote sensing of Environment*. 2013;134:12-23.
- [23]. Rhee J, Im J, Carbone GJ. Monitoring agricultural drought for arid and humid regions using multi-sensor remote sensing data. *Remote Sensing of Environment*. 2010;114(12):2875-87.
- [24]. Almazroui M. Calibration of TRMM rainfall climatology over Saudi Arabia during 1998–2009. *Atmospheric Research*. 2011;99(3):400-14.
- [25]. Huete A, Didan K, Miura T, Rodriguez EP, Gao X, Ferreira LG. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote sensing of environment*. 2002;83(1):195-213.
- [26]. Quiring SM, Ganesh S. Evaluating the utility of the Vegetation Condition Index (VCI) for monitoring meteorological drought in Texas. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2010;150(3):330-9.
- [27]. Zhang HW, Chen HL, Shen S, Zhou G, Yu W. Drought remote sensing monitoring based on the surface water content index (SWCI) method. *Remote Sensing Technology and Application*. 2008; 23(6):624-8.
- [28]. Chuvieco E, Riano D, Aguado I, Cocero D. Estimation of fuel moisture content from multitemporal analysis of Landsat Thematic Mapper reflectance data: applications in fire

- danger assessment. *International Journal of Remote Sensing*. 2002;23(11):2145-62.
- [29]. Ceccato P, Flasse S, Tarantola S, Jacquemoud S, & Grégoire J. M. Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain. *Remote sensing of environment*. 2001; 77(1), 22-33.
- [30]. Kogan FN. Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas. *International Journal of Remote Sensing*. 1990;11(8):1405-19.
- [31]. Singh RP, Roy S, Kogan F. Vegetation and temperature condition indices from NOAA AVHRR data for drought monitoring over India. *International Journal of Remote Sensing*. 2003;24(22):4393-402.
- [32]. Hooshangi N, Alesheikh A.A, Helali H. Regional review of potential solar radiation. Evaluation and optimization of interpolation methods in the country. *Journal of Regional Planning*. 2014; 4: 1-16. [Persian]