ارزیابی شاخص ذخیره آب پوشش گیاهی (VSWI) تصاویر سری زمانی سنجنده مودیس در پایش خشکسالی حوضه آبخیز گاوخونی

مرضیه سادات میراحسنی[۱]، عبدالرسول سلمان‌ماهینی[۱*]، علیرضا سفیانیان[۲]، رضا مدرس[۳]، رضا جعفری[۳] و جهانگیر محمدی[۴]

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۶/۸ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۱/۱۰)

چکیده

خشکسالی به‌دلیل گستردگی مقیاس زمان و فضای تأثیر، یکی از اصلی‌ترین عوامل گسیختگی توان اکولوژیک به‌شمار می‌آید. کارایی پایش خشکسالی منطقه‌ای با استفاده از شاخص‌های هواشناسی به‌دلیل محدودیت پراکنش مکانی یک چالش است. در پژوهش حاضر، ۱۶۸ تصویر سری‌زمانی سنجنده مودیس شامل شاخص پوشش گیاهی تفاوت نرمال (NDVI) و دمای سطح زمین(LST) به‌کار گرفته شد. با تلفیق این دو شاخص، شاخص ذخیره آب پوشش گیاهی (VSWI) جهت ارزیابی خشکسالی نزدیک به زمان واقعی و پایش زمانی- پراکندگی مکانی آن در حوضه آبخیز گاوخونی طی دوره رویشی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۴ به‌کار رفت. شاخص SPI مبنا قرار داده شد و بازخورد شاخص‌های ماهواره‌ای و هواشناسی با استفاده از آزمون پارامتری همبستگی پیرسون ارزیابی شد. نتایج بررسی روابط بین مقادیر سری‌زمانی میانگین سالانه شاخص VSWI و SPI در دوره زمانی مشابه، مقدار ۰/۵۷۸ را نشان داد. جهت بررسی دقیق‌تر معنی‌داری روابط شاخص‌ها، آزمون غیرپارامتری همبستگی اسپیرمن به مطالعه اضافه شد که معناداری را تأیید نمود. همچنین، نتایج الگوی پراکندگی مکانی خشکسالی شاخص سالانه VSWI مربوط با ۱۲ سال نشان داده شد که بیانگر خشکسالی شدید بلند مدت در قسمت‌های جنوب شرقی سد زاینده‌رود و کل محدوده تالاب گاوخونی بود. انطباق این نقشه با نقشه خشکسالی هواشناسی حاکی از کارایی تلفیق شاخص‌های ماهواره‌ای NDVI و LST در پایش خشکسالی است.

واژه‌های کلیدی: شاخص‌های NDVI، LST، آزمون‌های همبستگی پیرسون و اسپیرمن، رطوبت خاک، SPI

۱. گروه محیط زیست، دانشکده محیط زیست و شیلات، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
۲. گروه محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان
۳. گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه صنعتی اصفهان
۴. گروه جنگلداری، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان
*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: rassoulmahiny@gmail.com

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.24763128.1396.6.4.7.0]
[DOI: 10.29252/ijae.6.4.31]

مقدمه

خشکسالی پیاپی و کمبود آب در حوضه آبخیز گاوخونی که دارای نقش حیاتی در بوم‌شناسی، محیط زیست، کشاورزی، صنعت، توریسم و سلامت ساکنین است، اهمیت پایش آن را روشن می‌سازد. خشکسالی الگوی هشدار نامنظم بارش است که به تغییرات پوشش گیاهی منجر می‌شود، زیرا آب عامل محدود کننده رشد گیاهان است. از طرفی، تغییر در سطح پوشش نقشی پویا در تعادل سطح انرژی و آب دارد (۱۸ و ۲۶). پاسخ‌های گیاهی به تنش کم آبی و دما بستگی به فراوانی و بزرگی اختلال دارد. بررسی خشکسالی با استفاده از سنجش از دور میسر است. کارایی پایش خشکسالی از طریق شاخص‌های ماهواره‌ای مانند شاخص تفاوت پوشش گیاهی نرمال (NDVI: Normalized Difference Vegetation Index) (۴۰) در دهه‌های گذشته ثابت شده است (۳۶). از دیدگاه لنفردی و همکاران (۱۸)، شاخص NDVI به‌دست آمده از داده‌های سنجش از دور برای شناسایی تنش پوشش گیاهی نیز قابل اعتماد است، از این‌رو برای بررسی تغییرات بوم‌شناسی و محیط زیست مورد استفاده قرار می‌گیرد. بررسی توزیع مکانی مقادیر NDVI، شناسایی اشکال در ویژگی‌های ساختاری و عملکردی پوشش گیاهی و تشخیص مناطق با تولید پوشش گیاهی کمتر را مقدور می‌سازد. بر این اساس، تاکر و چادوری (۳۹) نشان داده‌اند که شاخص NDVI به‌دلیل بررسی ظرفیت فتوسنتز می‌تواند در پایش خشکسالی بسیار مفید باشند. از دیدگاه تاکر و چادوری، (۳۹) شاخص NDVI به‌عنوان یک نسبت نرمال برای نشان دادن پاسخ نزدیک به زمان واقعی پوشش گیاهی به تغییر اقلیم کارا است، از این‌رو، NDVI می‌تواند جایگزین مناسبی برای شاخص‌های اقلیمی در ارزیابی و پایش خشکسالی‌ها باشد، ولی پاسخ این شاخص ممکن است نسبت به زمان واقعی تأخیر داشته باشد. به بیان سینگ و همکاران (۳۰) و تیان و همکاران (۳۶)، NDVI برای پایش خشکسالی دارای دو محدودیت اصلی شامل، تأخیر زمانی آشکار بین بارندگی و پاسخ NDVI و کمی نفوذ بارش در فصل رشد (دوره تولید دانه گیاهی) است. از طرفی، از آنجا که به‌دلیل خشکسالی درجه حرارت افزایش می‌یابد، رطوبت بیشتری از پوشش گیاهان تبخیر می‌شود. تکرار خشکسالی و پدیده گرم شدن محلی کره زمین منجر به بازخورد منفی بر پوشش گیاهی موجود می‌شود (۱۸). از آنجا که داده‌های حرارتی بسیار با شاخص NDVI همبسته هستند، هنگامی که به تنهایی استفاده شوند اطلاعات اضافی قابل توجهی نسبت به NDVI ارائه نمی‌کنند. از این‌رو دمای سطح زمین (LST: Land Surface Temperature) که به رطوبت خاک و تنش آب پوشش گیاهی حساس است را می‌توان به‌عنوان یک متغیر پاسخ سریع خشکسالی با تلفیق با پوشش گیاهی به‌کار برد (۱۱). با توجه به پوشش نواحی گیاهی، LST را می‌توان برابر با دمای تاج و پوشش گیاه دانست (۱۹). شاخص LST که از داده حرارتی مادون قرمز (TIR) برابر بین ۸ تا ۱۵ میکرومتر مشتق شده است به‌عنوان دمای پوسته زمین و یکی از پارامترهای کلیدی در فیزیک فرایندهای سطح زمین در مقیاس‌های منطقه‌ای و جهانی و همچنین یک شاخص مناسب بررسی تنش و تعادل انرژی در سطح زمین، می‌تواند اطلاعات مهمی در مورد خواص فیزیکی سطح و اقلیم ارائه دهد (۱۴). به بیان تیان و همکاران (۳۶)، داده‌های ماهواره‌ای برای تهیه نقشه و پایش سطح زمین از طریق ترکیب کاربردی LST و NDVI تفسیر مکانیکی‌تری ارائه داده است و این داده‌ها منبع مهمی برای پایش خشکسالی هستند. گوتز (۱۴)، یک همبستگی منفی معنی‌دار بین LST و NDVI در چند مقیاس گزارش داد. این به‌خاطر تغییرات وسیع در پوشش گیاهی و رطوبت خاک است که نشان می‌دهد دمای سطح به سرعت با تنش آب افزایش می‌یابد. نمانی و همکاران (۱۶)، با بررسی ارتباط بین شاخص NDVI و LST به همبستگی منفی بین این دو متغیر و همچنین تأثیر قوی عدم وجود پوشش گیاهی در تغییرات مکانی LST، به‌دلیل حساسیت زیاد نسبت LST به NDVI به شرایط رطوبتی سطح پی بردند. براساس یافته آنها در صورت وجود رطوبت در محصول، نسبت LST/NDVI در طول زمان خشکسالی افزایش می‌یابد، زیرا شیب منفی نسبت

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.24763128.1396.6.4.7.0]
[DOI: 10.29252/ijae.6.4.31]

LST/NDVI به‌دلیل دمای پایین سطح است. در شرایط خشک و در زمان رطوبت کمتر خاک درجه حرارت برگ‌های در حال رشد می‌تواند به‌عنوان شاخص مناسبی برای تنش رطوبتی گیاه شناخته شود (به‌خصوص از زمان ظهور خشکسالی) (۳۴). دی و همکاران (۱۳) ثابت کردند که با وقوع خشکسالی، LST کمی زودتر از کاهش پوشش گیاهی افزایش می‌یابد. هم‌زمان، در شار انرژی باید تعادل ایجاد شود، با افزایش شار انرژی افزایش حرارت قابل ملاحظه‌ای در دمای برگ رخ می‌دهد (۳۴). این تعادل شار انرژی از سطح زمین همان LST است (۴۱). در طول خشکسالی و یا شرایط خشک (کمبود رطوبت خاک)، افزایش درجه حرارت برگ، نشان‌دهنده اختلال رطوبت گیاهان قبل از شروع خشکسالی است (۳۴). لازم به‌ذکر است که پاسخ تنش درجه حرارت تاج پوشش ممکن است حتی زمانی که گیاه سبز باشند نیز رخ دهد؛ زیرا بسته شدن روزنه‌ها می‌تواند به کاهش از دست دادن آب به وسیله تعرق و در نتیجه جریان شار حرارتی منجر شود (۱۰، ۱۱ و ۱۵). وان و همکاران (۴۱)، با استفاده از همبستگی منفی بین شاخص NDVI و LST، خشکسالی پوشش گیاهی جلگه‌های جنوبی منطقه تگزاس و اوکلاهاما را با استفاده از تصاویر مودیس پایش و تأخیر زمانی بین بارش و NDVI را با همبستگی قابل قبول محاسبه کردند. به بیان آنها از آنجا که، داده‌های بارش دارای محدودیت قدرت تفکیک مکانی ضعیف، به‌خصوص در مناطق دورافتاده با دسترسی دشوار و در برخی کشورهای در حال توسعه هستند، شاخص NDVI و داده‌های LST ماهواره‌ای می‌تواند منبع ارزشمند اطلاعات برای پایش خشکسالی ارائه دهد. محققان مختلف شاخص‌های سلامت گیاهان و خشکسالی را براساس نسبت‌های LST-NDVI نشان داده‌اند؛ از جمله شاخص سلامت گیاهان (VHI: Vegetation Health Index) (۱۷)؛ شیب LST-NDVI (۲۵)؛ شاخص ذخیره آب پوشش گیاهی (VSWI: Vegetation Supply Water Index) (۱۰)؛ شاخص کسری آب (WDI: Water Deficit Index) (۲۳)؛ شاخص شرایط دمای گیاهان (۴۲)؛ شاخص خشکسالی دما و رطوبت (TVDI: Temperature-Vegetation Dryness Index) (۲۸)؛ شاخص وضعیت درجه حرارت پوشش گیاهی (VTCI:Temperature Condition Index Vegetation) (۴۱)، شاخص شدت خشکسالی (DSI: Drought Severity Index) (۲۴) و شاخص کمبود رطوبت خاک (SWDI: Soil Wetness Deficit Index) (۱۶). کارلسون و همکاران (۱۰)، مشاهده کردند که ترکیب پوشش گیاهی و دما می‌تواند به‌عنوان نشانگر واجد شرایط رطوبت خاک درنظر گرفته شود. شاخص VSWI یکی از شاخص‌های سلامت گیاهان و خشکسالی است که با بازتاب سطح زمین و ویژگی‌های حرارتی تلفیق یافته است و به‌طور مستقیم با بارش باران و محتوای آب خاک به‌ویژه در شرایط خشک ارتباط دارد. شاخص VSWI را به‌طور فیزیکی می‌توان به‌صورت نسبت اختلاف LST با پیکسل NDVI آن جهت ارائه رطوبت خاک در محدوده وسیع لایه سطحی، فرض کرد. این شاخص بیان می‌کند که اگر آب ذخیره شده در خاک برای حفظ رشد موجود ناکافی باشد، اختلال ایجاد می‌شود. ارزیابی خشکسالی براساس شاخص VSWI دو ویژگی عمده گیاهی را در پاسخ به شرایط خشکسالی بروز می‌دهد، یعنی بهبود و اثرات گیاهی، که نشان‌دهنده VSWI به‌عنوان یک رویکرد نزدیک به زمان واقعی مناسب برای پایش خشکسالی است (۱۱). ابراهیمی و همکاران (۱)، خشکسالی در منطقه شیرکوه را با استفاده از شاخص ذخیره آب گیاه (VSWI)، شاخص‌های عمودی خشکسالی (PDI: Perpendicular Drought Index) و شاخص عمودی اصلاح شده (MPDI: Modified Perpendicular Drought Index) بررسی نمودند. آنان شاخص VSWI مبتنی بر چند تصویر را مبنای مقایسه نتایج با شاخص‌های مبتنی بر تک تصویر قرار دادند. نتایج حاصله، شدت خشکسالی را در هر دو تصویر به صورت پیکسل های آمیخته با تغییر و بدون تغییر نشان داد. زورمند و همکاران (۴۴)، شاخص SPI(Standardized Precipitation Index) بازه‌های زمانی مختلف را مبنای ارزیابی شاخص‌های PDI، MPDI و TVDI قرار دادند. وو و لو (۴۳)، از شاخص VSWI اصلاح شده روزانه جهت پایش خشکسالی

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.24763128.1396.6.4.7.0]
[DOI: 10.29252/ijae.6.4.31]

در سال ۲۰۰۶ در سیچوان و چونگ کینگ در چین استفاده کردند که تمام مراحل ظهور و توسعه تا کاهش و ناپدید شدن خشکسالی را نشان داد. آنها شاخص‌های وضعیت پوشش گیاهی (VCI: Vegetation Condition Index)، شاخص وضعیت درجه حرارت (TCI: Temperature Condition index)، VTCI، TVDI و VSWI اصلاح شده روزانه را محاسبه کردند. همچنین، از شاخص بارش نسبی (RPI: Relative Precipitation Index) برای بررسی تأثیر شاخص VSWI اصلاح شده استفاده کردند. نتایج همبستگی بالا و معنی‌دار مثبت بین شاخص‌های VSWI اصلاح شده روزانه و RPI و هماهنگی بالا در توزیع مکانی و تحلیل سری زمانی و محاسبات ساده‌تر و فهم و ثبات کاربرد آسان‌تر را نشان داد.

جهت بررسی رابطه بین پارامترهای سری زمانی سالانه خشکسالی هواشناسی SPI و خشکسالی ماهواره‌ای VSWI نیاز به آزمون‌های آماری است (۲۰). در آزمون‌های پارامتری مانند همبستگی پیرسون فرضیاتی نظیر نرمال بودن، ایستایی و مستقل بودن داده‌ها از هم وجود داشته و ممکن است این فرضیات برای متغیرهای اقلیمی، آب‌شناختی و شناخت تغییرات محیطی درست نباشد، در این پژوهش جهت مقایسه عملکرد مدل، آزمون غیرپارامتری همبستگی اسپیرمن بین روابط استفاده شد (۸، ۱۲ و ۲۲). ناظری تهرودی و همکاران (۸)، از آزمون اسپیرمن جهت بررسی روند حجم خشکی رودخانه‌های حوضه دریاچه ارومیه استفاده کردند. نتایج نشان داد که آزمون اسپیرمن روند یکسان ارائه می‌کند. دفاریا پرس و همکاران (۱۲)، از آزمون‌های غیرپارامتری جهت مطالعه تصاویر LST و الگوی کاربری اراضی حاصل از ماهواره لندست ۵ تا ۸ در ریودوژانیرو برزیل استفاده کردند. نتایج مطالعه حاصل بیانگر از سطح معنی‌داری ۵ درصد تصاویر ۱۵ سال اخیر در مطالعه داشت. هدف عمده پژوهش حاضر ارزیابی کارایی شاخص ماهواره‌ای VSWI در پایش خشکسالی و بررسی پراکندگی مکانی و زمانی آن در حوضه آبخیز گاوخونی بین سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۱۴ است. در این راستا معنی‌داری ارتباط آماری بین شاخص‌های VSWI و SPI بررسی می‌شود. در این پژوهش فرض می‌شود، شاخص SPI با شاخص VSWI رابطه معکوس دارند. اگر چنین روابطی برقرار شود، داده‌های ماهواره‌ای می‌توانند برای پایش خشکسالی استفاده شود.

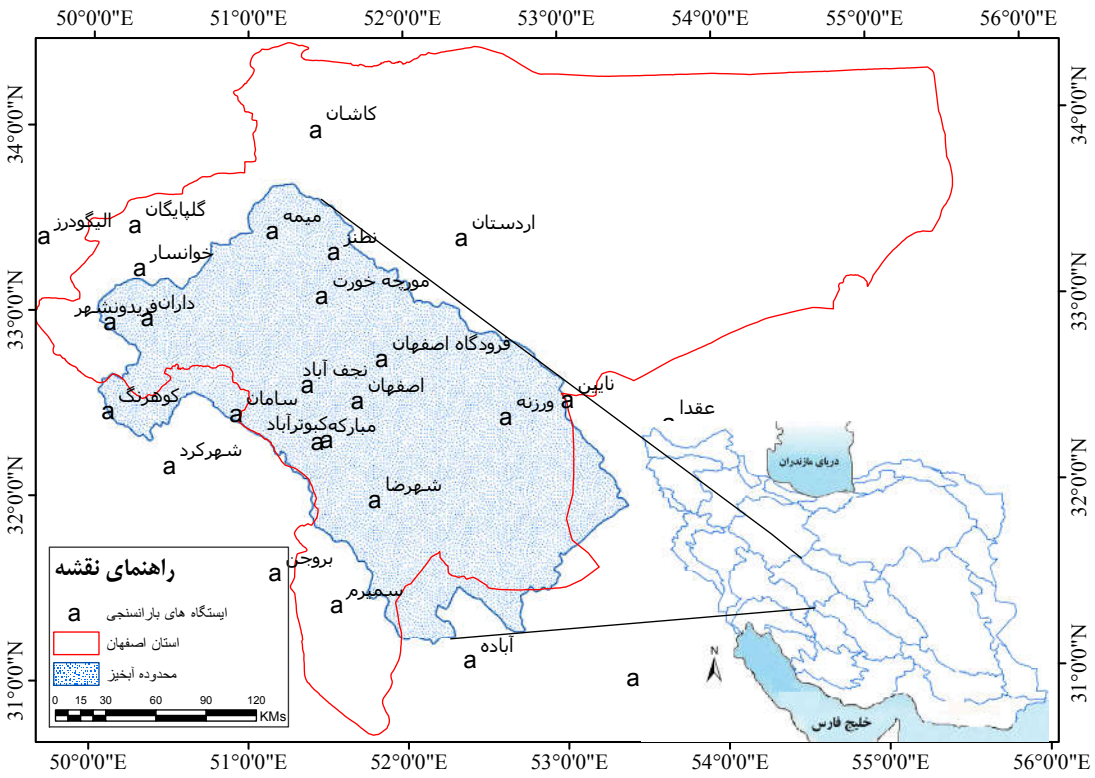
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه حوزه آبخیز گاوخونی است، که حوزه آبخیز زاینده‌رود را نیز شامل می‌شود. مساحت آن حدود ۴۱۳۴۷ کیلومتر مربع در فلات مرکزی ایران که بین طول جغرافیایی ′۲۴ °۵۰ تا ′۲۵ °۵۳ و عرض جغرافیایی ′۱۱ °۳۱ تا ′۴۱ °۳۲ قرار گرفته است (شکل ۱). شیب عمومی از سمت غرب به شرق کاهنده است و هرچه به قسمت‌های شرقی آن نزدیک می‌شویم، از ارتفاع زمین کاسته می‌شود تا جایی‌که مرز شرقی حوضه، در نزدیکی دشت‌های کویری قرار دارد. متوسط ارتفاع زمین از سطح دریاهای آزاد در این حوضه بین ۲۵۰۰ متر در غرب و ۱۰۰۰ متر در شرق متفاوت است.

رودخانه زاینده‌رود در امتداد تقریبی غرب- شرق در جریان است و از کوه‌های زاگرس در غرب استان اصفهان سرچشمه گرفته و به تالاب گاوخونی در شرق می‌رسد. این رودخانه آب آبیاری، شرب و صنایع مهم کشور را تأمین می‌کند. اقلیم بیشتر حوضه خشک و نیمه‌خشک است. متوسط درجه حرارت ماهانه از ۳ درجه سانتی‌گراد در ژانویه تا ۲۹ درجه سانتی‌گراد در جولای متغیر است. رشته کوه‌های مرتفع زاگرس در غرب و مناطق پست بیابانی در شرق تغییرات مکانی شدید بارش سالانه را از بیش از ۷۰۰ تا ۱۵۰۰ میلی‌متر (غالبا به شکل ذوب برف) در بهار تا کمتر از ۸۰ میلی‌متر به دنبال داشته است (۳ و ۴). میزان بارش از سالی به سال دیگر تفاوت دارد و خشکسالی‌های مکرر شناخته شده است. میانگین بارش در حوزه در سال ۱۳۸۴ معادل ۲۰۹/۵ میلی‌متر است (۲). از این میزان بارش در ماه‌های سرد و زمستان حادث

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.24763128.1396.6.4.7.0]
[DOI: 10.29252/ijae.6.4.31]



شکل ۱. موقعیت حوضه آبخیز گاوخونی و پراکنش ایستگاه‌های بارانسنجی مورد استفاده

می‌شود و فقط در بعضی مواقع در اثر بارش کافی رواناب مهمی در دشت‌های رسوبی ایجاد می‌شود. این درحالی است که تبخیر و تعرق پتانسیل ۱۵۰۰ میلی‌متر گزارش شده است (۴). پوشش گیاهی منطقه غالباً شامل مرتع خوب، متوسط، ضعیف و جنگل تنک و نسبتاً تنک، مزارع و زمین‌های کشاورزی دیم و آبی و باغات و دوره رشد یا رویشی در حوضه آبخیز گاوخونی از ماه آوریل تا اکتبر است (۷). زاینده‌رود بعد از طی مسیر حدود ۳۵۰ کیلومتر به تالاب گاوخونی که طبق کنوانسیون رامسر یکی از تالاب‌های مهم ایران به‌شمار می‌رود، می‌ریزد. بخش زیادی از این تالاب به دلایل مختلف خشک شده است. تالاب گاوخونی نقش حیاتی در تضمین توسعه پایدار ساکنان بخش مرکزی ایران دارد. از سوی دیگر، از نقطه نظر حفاظت، این تالاب به‌عنوان یکی از اکوسیستم‌های ارزشمند در مرکز ایران محسوب می‌شود (۲۹).

پوشش گیاهی در اطراف تالاب بسیار محدود و عمدتاً محدود به‌گونه‌های هالوفیت است. هرگونه پوشش گیاهی قابل توجه در خارج از مناطق تالابی وجود ندارد. بنابراین ارتباط مهم بین پوشش گیاهی و آبیاری وجود دارد (۳۷). علاوه بر این، در مورد تپه‌های ماسه‌ای که در اطراف تالاب واقع شده‌اند، اکوسیستم تالاب گاوخونی در جلوگیری از بروز پدیده گردو غبار، تأمین آب تصفیه آب و حفظ ثبات آنها نقش چشمگیری ایفا می‌کند. لازم به‌ذکر است که اخیراً خشکسالی‌های مکرر مشکلات آلودگی و محیط زیست را افزایش داده و منجر به عواقب ناگوار در تالاب گاوخونی شده است. همچنین تغییر شرایط اقلیمی این اکوسیستم طبیعی را به یک نمک‌زار تبدیل می‌کند (۲۹). این مشکلات باعث افزایش خطر خشکسالی در حوضه آبخیز گاوخونی شده که نشان‌دهنده نیاز مبرم به ارزیابی و پایش خشکسالی و ایجاد راهبردهایی برای کاهش اثرات

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.24763128.1396.6.4.7.0]
[DOI: 10.29252/ijae.6.4.31]

خشکسالی است.

داده‌های مورد استفاده

در پژوهش حاضر، حداکثر بازه زمانی دوره آماری بلندمدت ممکن و موجود با شروع یکسان مدنظر بود. از آنجا که داده‌های بارش واجد این شرایط از ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۴ موجود بود (۶)، از تصاویر سری زمانی ماهانه NDVI و LST محصولات سنجنده مودیس همزمان (۲۰۰۳ تا ۲۰۱۴) با آن نیز استفاده شد. تصاویر ماهانه مورد استفاده در پژوهش (۸۴ تصویر سری زمانی) از وب‌سایت شرکت ناسا (۴۵) بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۴ گرفته شد.

داده هواشناسی جهت تعیین شاخص بارش استاندارد (SPI)

در پژوهش حاضر شاخص SPI مبنا قرار داده شد. جهت تهیه شاخص SPI نیز، از آنجا که حداکثر پراکندگی مکانی ایستگاه‌های هواشناسی (۲۶ ایستگاه) در منطقه و حداکثر بازه زمانی دوره آماری بلندمدت ممکن و موجود با شروع یکسان مدنظر بود، از داده‌های سری زمانی ماهانه سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۴ استفاده شد (شکل ۱). شاخص SPI برای اندازه‌گیری کمبود بارندگی استفاده می‌شود. رطوبت خاک در زمان کوتاه‌تری شرایط غیرنرمال بارندگی را منعکس می‌کند، درحالی‌که آب زیرزمینی، جریان‌های سطحی و ذخائر آب سطحی در زمان طولانی‌تری نسبت به آن عکس‌العمل نشان می‌دهند. ازنظر ریاضی، SPI بر مبنای احتمالات تجمعی بارندگی در یک ایستگاه استوار است. تام (۳۵) دریافت که توزیع گاما برای سری‌های زمانی بارش‌های اقلیمی بهترین برازش را دارد. از این‌رو مک-کی و همکاران (۲۱)، شاخص SPI را بر مبنای توزیع گاما قرار دادند. تابع چگالی یا فراوانی توزیع گاما برحسب رابطه (۱) است.

$$g(x)=\frac{1}{\beta^{\alpha}\Gamma(\alpha)}x^{\alpha-1}\times e^{-x/\beta} \qquad [1]$$

در این رابطه α مشخصه شکل و $\alpha>0$ مشخصه مقیاس و $\beta>0$ ، x میزان بارش و $x>0$ ،$\tau(\alpha)$ تابع گاما است که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\Gamma(\alpha)=\int_{0}^{\infty}x^{\alpha-1}.e^{-x}.dx \qquad [2]$$

این توزیع چوله به راست با حد پایین صفر مشابه توزیع فراوانی بارش است که به‌تدریج فراوانی بارش‌ها افزایش و در نقطه‌ای به اوج می‌رسد و سپس کاهش و در نقطه‌ای به صفر می‌رسد برای محاسبه SPI لازم است، تابع چگالی احتمال توزیع گاما را بر توزیع فراوانی مجموع بارش‌ها (برای هر مقیاس زمانی) در هر ایستگاه برازش دهیم. مقادیر β ، α تابع چگالی احتمال توزیع گاما برای هر ایستگاه، برای هر مقیاس زمانی مدنظر برآورد می‌شود (۲۱). از آنجا که تابع گاما برای مقادیر صفر تعریف شده نیست و توزیع بارندگی ممکن است دارای مقادیر صفر باشد، تابع احتمال تجمعی که در برگیرنده مقادیر صفر هم باشد به‌این صورت می‌شود:

$$H(x)=q+(1-q)G(x) \qquad [3]$$

دراین رابطه q احتمال وجود صفر در مقادیر بارش است. اگر m شمار صفرها در دوره زمانی بارش باشد، q را از تقسیم m بر n می‌توان محاسبه نمود (۳۶). تام جدول‌های تابع گامای ناقص را برای تعیین احتمال تجمعی G(x) به‌کار برد. پس از محاسبه تابع تجمعی کل، H(X)، تغییر شکل تابع تجمعی گاما به متغیر تصادفی نرمال استاندارد Z با میانگین صفر و واریانس یک صورت می‌گیرد که این متغیر همان مقادیر SPI است. چنانچه شمار ایستگاه‌ها زیاد باشد و بخواهیم برای همه مقیاس‌های زمانی و برای هر ماه سال چنین نموداری را رسم کنیم، بسیار سخت بوده و به آسانی امکان‌پذیر نیست بدین منظور Z یا SPI به آسانی از تقریب ابراموویتز و استگون (۹) به دست می‌آید که احتمالات تجمعی را به متغیرتصادفی نرمال استاندارد Z تبدیل می‌کند و به صورت روابط زیر است :

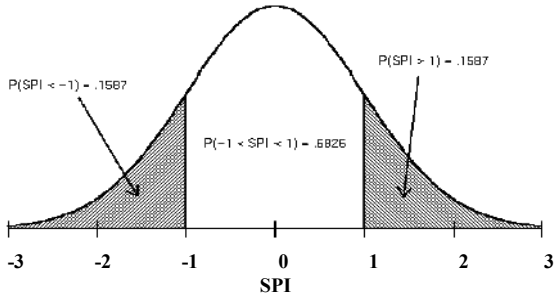
$$Z=SPI=-\left(t-\frac{c_0+c_1t+c_2t^2}{1+d_1t+d_2t^2+d_3t^3}\right) \qquad [4]$$

$$\text{for} \quad 0<H(X)<0.5$$

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.24763128.1396.6.4.7.0]
[DOI: 10.29252/ijae.6.4.31]

جدول ۱. طبقه‌بندی نمایه SPI (۲۲)

طبقه ترسالی یا خشکسالی	ترسالی بسیار شدید	ترسالی شدید	ترسالی ملایم	نزدیک به نرمال	خشکسالی ملایم	خشکسالی شدید	خشکسالی بسیار شدید
مقدار SPI	۲ و بالاتر	۱/۵ تا ۱/۹۹	۱ تا ۱/۴۹	۰/۹۹ تا ۰/۹۹-	۱ -تا ۱/۴۹-	۱/۵ -تا ۱/۹۹-	۲ -و کمتر



شکل ۲. مقادیر SPI دارای توزیع نرمال استاندارد با میانگین ۰ و واریانس ۱ (۱۰)

$$Z = SPI = + \left(t - \frac{c_0 + c_1 t + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t^2 + d_3 t^3} \right) \qquad [5]$$

$$t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(H(x))^2}\right)} \qquad [6]$$

for $0 < H(X) < 0.5$

$$t = \sqrt{\ln\left(\frac{1}{(1.0 - H(x))^2}\right)} \qquad [7]$$

for $0.5 < H(X) < 1.0$

و ثابت‌های معادله عبارتند از:

$c_0 = 2.515517,\ c_1 = 0.802853,\ c_2 = 0.010328,$

$d_1 = 1.432788,\ d_2 = 0.189269,\ d_3 = 0.001308$

از نظر مفهومی SPI نمره سیگمایی یا میزان انحراف استاندارد بالاتر یا پایین‌تر از میانگین را نشان می‌دهد. شکل ۲ نشان می‌دهد که در پایه زمانی که مشخصه‌های گاما برآورد می‌شوند، SPI دارای یک توزیع نرمال استاندارد با میانگین صفر و واریانس یک خواهد بود (۷ و ۹).

با بهره‌گیری از روش تشریح شده در بالا، مقادیر SPI در پایه‌های زمانی مختلف (۳ ماهه، ۶ ماهه و ۱۲ ماهه) به کمک برنامه رایانه‌ای spi_sl_6 برای همه ایستگاه‌ها محاسبه شد. با توجه به اینکه این شاخص در پایه‌های زمانی مختلف و منتهی به همه ماه‌ها می‌تواند محاسبه و استخراج شود ولی به‌دلیل اینکه در این پژوهش تحلیل فراوانی خشکسالی سالیانه مدنظر بود، مناسب‌ترین دوره زمانی برای این کار به جهت مطابقت با داده‌های شاخص‌های ماهواره‌ای، شاخص SPI در پایه زمانی ۱۲ ماهه منتهی به ماه دسامبر بود. بر این اساس دوره زمانی شاخص SPI در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه منتهی به دسامبر محاسبه شد و برای تحلیل فراوانی مورد بهره‌گیری قرار گرفت. شاخص بارش استاندارد ۱۲ ماهه که در این مطالعه به‌کار رفته است نشان‌دهنده الگوهای بارش بلندمدت است، که معمولاً با جریان‌ها، ذخایر و حتی سطح آب‌های زیرزمینی گره خورده است (۳۳). از آنجا که SPI استاندارد شده است، برای اقلیم‌های خشک و مرطوب قابل استفاده و نتایج آن برای دوره موردنظر قابل مقایسه است. برای محاسبه SPIدر ابتدا توزیع آماری مناسب برای آمار بلندمدت بارندگی برازش می‌شود، به‌طوری که متوسط SPI برای آن منطقه و دوره موردنظر صفر خواهد بود. مقدار مثبت SPI نشان‌دهنده بارندگی بیش از بارندگی میانه است و مقدار منفی معنای عکس آن را دارد. مدت دوره خشکسالی با شروع و خاتمه ارقام منفی SPI تعیین می‌شود. طبق این روش، دوره خشکسالی هنگامی اتفاق می‌افتد که SPI به‌طور مستمر به مقدار منفی برسد و این مقدار منفی تداوم داشته باشد، و زمانی شدید است که شاخص بارش استاندارد ۱- یا کمتر باشد و هنگامی پایان می‌یابد که SPI مثبت شود. مقادیر تجمعی SPI نیز، بزرگی و شدت دوره خشکسالی و همچنین دوره های مرطوب را نشان می‌دهد (۲۱). طبقه‌بندی مقادیر SPI در جدول ۱ ارائه شده است (۵ و ۲۱). در این مطالعه، شاخص بارش استاندارد SPI براساس داده‌های ایستگاهی بازه ۱۲ ماهه جهت مقایسه، از نتایج مطالعه میراحسنی (۷) استفاده شد.

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.24763128.1396.6.4.7.0]
[DOI: 10.29252/ijae.6.4.31]

تغییرات تصاویر سری زمانی شاخص MODIS-NDVI

در پژوهش حاضر، از تعداد ۸۴ تصویر سری زمانی ماهانه NDVI سنجنده مودیس (MOD13A3) طی ۷ ماه فصل رویشی (مبتنی بر حضور پوشش گیاهی) در حوضه آبخیز گاوخونی (۶) جهت محاسبه VSWI استفاده شد. انتخاب تصاویر فصل رویشی به جهت این است که، بنا بر یافته کونها و همکاران (۱۱)، شاخص ذخیره آب پوشش گیاهی VSWI در سطوح با پوشش گیاهی بهتر جواب می‌دهد. شاخص NDVI (۳۸) که معروف‌ترین شاخص پوشش گیاهی ماهواره‌ای است با توجه به رابطه (۸) به‌دست می‌آید:

$$NDVI = (NIR - R)/(NIR + R) \qquad [۸]$$

که در معادله مذکور NIR باند مادون قرمز نزدیک و R باند قرمز است.

تغییرات تصاویر سری زمانی شاخص MODIS-LST

همچنین، تعداد ۸۴ تصویر سری زمانی MODIS-LST (MOD11C3) (۴۰) ماهانه متناظر با تصاویر پوشش طی ۷ ماه فصل رویشی حوضه آبخیز گاوخونی استفاده شد. عدد رقومی (DN: Digital Number) داده‌های دمای سطح زمین (LST) از طریق رابطه (۹) به درجه سلسیوس تبدیل شد:

$$T = (DN * ۰/۰۲) - ۲۷۳/۱ \qquad [۹]$$

در این رابطه T دما، DN عدد رقومی پیکسل؛ ۰/۰۲ ضریب تبدیل و °۲۷۳/۱ تفاوت درجه کلوین به درجه سلسیوس است.

شاخص وضعیت حرارتی پوشش گیاهی (VSWI)

شاخص VSWI (۱۰) از رابطه (۱۰) محاسبه شد:

$$VSWI_{ijk} = (LSTijk) / NDVIijk \qquad [۱۰]$$

شاخص VSWI برای پیکسل i در دوره j برای k سال محاسبه شد. لازم به ذکر است که مقادیر زیاد VSWI ناشی از شاخص پوشش گیاهی کم و درجه حرارت زیاد تاج و پوشش است، که نشانگر تنش پوشش گیاهی بوده که می‌تواند منجر به خشکسالی شدید شود. مقادیر کم VSWI نشانگر شاخص پوشش گیاهی زیاد و درجه حرارت کم تاج و پوشش بوده، که نشان‌دهنده سلامت پوشش گیاهی است. در نتیجه، VSWI می‌تواند بیانگر سلامت کلی پوشش گیاهی و مشخص کننده تغییر رطوبت و شرایط حرارتی گیاه باشد (۱۱).

رابطه پارامتر اقلیمی با شاخص ماهواره‌ای

در پژوهش حاضر، به منظور درک رابطه شاخص ماهواره‌ای با شاخص هواشناسی (۱۳ و ۴۳)، رابطه شاخص سالانه VSWI با شاخص سالانه SPI با استفاده ضریب همبستگی پیرسون که یک متغیر فاصله‌ای است بررسی و محاسبه شد. اما، به‌دلیل اینکه تعداد پارامترها کمتر از ۳۰ است (۱۲جفت)، برای بررسی دقیق‌تر و ارزیابی صحت در مرحله بعد از ضریب رتبه‌ای غیرپارامتری اسپیرمن نیز استفاده شد. همبستگی ابزاری آماری برای تعیین نوع و درجه رابطه یک متغیر کمی با متغیر کمی دیگر و یکی از معیارهای مورد استفاده در تعیین همبستگی دو متغیر است. ضریب همبستگی شدت رابطه و همچنین نوع رابطه (مستقیم یا معکوس) را نشان می‌دهد. این ضریب بین ۱ تا ۱- است و در عدم وجود رابطه بین دو متغیر، برابر صفر است (۸ و ۲۰).

آزمون پارامتری همبستگی پیرسون (Pearson Correlation Coefficient)

آزمون پارامتری ضریب همبستگی پیرسون توسط کارل پیرسون در سال ۱۸۹۵ معرفی شد. این ضریب بین دو متغیر تصادفی X و Y به صورت رابطه (۱۱) تعریف می‌شود (۲۷):

$$\begin{aligned} corr &= COV(X/Y)/(\sigma X/\sigma Y) \\ &= E[(X-\mu x)(Y-\mu y)]/(\sigma X/\sigma Y) \end{aligned} \qquad [۱۱]$$

در این رابطه corr نماد معمول برای همبستگی پیرسون، E عملگر امید ریاضی، COV (X, Y) کوواریانس دو متغیر، و σX، σY انحراف معیار هر دو متغیر و سیگما نماد انحراف معیار است. همبستگی وجود یا عدم وجود رابطه بین دو متغیر را نشان داده در صورت وجود شدت آن را تعیین می‌کند. به‌عبارت دیگر، برای تشخیص حضور و اهمیت ضریب همبستگی جدول‌ها با امکانات مختلف استفاده می‌شود. در واقع، رابطه بین دو متغیر می‌تواند مثبت یا منفی باشد. مقادیر نزدیک ۱+ یا ۱- نشان می‌دهد که وابستگی این دو متغیر بیشتر است (۲۱ و ۲۸).

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.24763128.1396.6.4.7.0]
[DOI: 10.29252/ijae.6.4.31]

جدول ۲. داده‌های شاخص SPI و VSWI سالانه ۱۲ ساله در حوضه آبخیز گاوخونی

سال	۲۰۰۳	۲۰۰۴	۲۰۰۵	۲۰۰۶	۲۰۰۷	۲۰۰۸	۲۰۰۹	۲۰۱۰	۲۰۱۱	۲۰۱۲	۲۰۱۳	۲۰۱۴
شاخص SPI سالانه	۰/۱۸	۰/۶۷	۰/۲۵	۰/۶۳	۰/۷۸	-۱/۴۵	-۰/۲۶	۰/۰۹	-۰/۶۳	۰/۱۱	۰/۳۹	۰/۲۶
شاخص VSWI سالانه	۶۲۸/۲۴	۵۸۸	۵۶۸/۴۷	۵۳۳/۴۴	۶۵۹/۳۳	۶۷۳/۴۸	۶۵۲/۵۹	۶۴۹/۸	۶۹۵/۷۱	۶۷۹/۴۵	۶۲۴/۶۱	۶۲۴/۶۱

آزمون غیرپارامتری همبستگی اسپیرمن (Spearman Correlation Coefficient)

ضریب همبستگی اسپیرمن توسط چارلز اسپیرمن در سال ۱۹۰۴ محاسبه شد (۳۱). در صورتی که تعداد داده‌ها کم و فرض نرمال بودن آنها معقول نباشد، یا اینکه داده‌ها فاصله‌ای باشند، ولی مفروضه‌های آمار پارامتری رعایت نشده باشد، از این همبستگی رتبه‌ای غیرپارامتری برای سنجش ضریب همبستگی بین دو متغیر تصادفی استفاده می‌شود. ضریب همبستگی با حرف یونانی ρ یا علامت r_s نشان داده می‌شود. ضریب همبستگی اسپیرمن معادل ناپارامتریک ضریب همبستگی پیرسون به‌شمار می‌رود که میزان همبستگی دو متغیر در سطح رتبه‌ای یا یکی رتبه‌ای و دیگری در سطح فاصله‌ای را اندازه‌گیری می‌کند. همچنین در مواردی که تعداد افراد نمونه کمتر از ۳۰ نفر است، به‌جای ضریب همبستگی پیرسون به‌کار برده می‌شود. مقدار ضریب همبستگی اسپیرمن مانند ضریب همبستگی پیرسون تفسیر می‌شود (۳۱). ضریب همبستگی اسپیرمن از رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود:

$$rs = p = 1 - 6\sum D^2 / N(N^2 - 1) \qquad [12]$$

در این رابطه N تعداد جفت داده‌ها و D تفاوت بین رتبه‌های هر جفت از داده‌ها است (۲۰).

نتایج

شاخص بارش استاندارد (SPI)

داده‌های شاخص سالانه SPI ۱۲ ماهه منتهی به دسامبر حاصل از میانگین داده‌های ماهانه SPI حوضه آبخیز گاوخونی طی ۱۲ سال مطالعه برگرفته از مطالعه میراحسنی (۷)، در جدول ۲ آورده شده است.

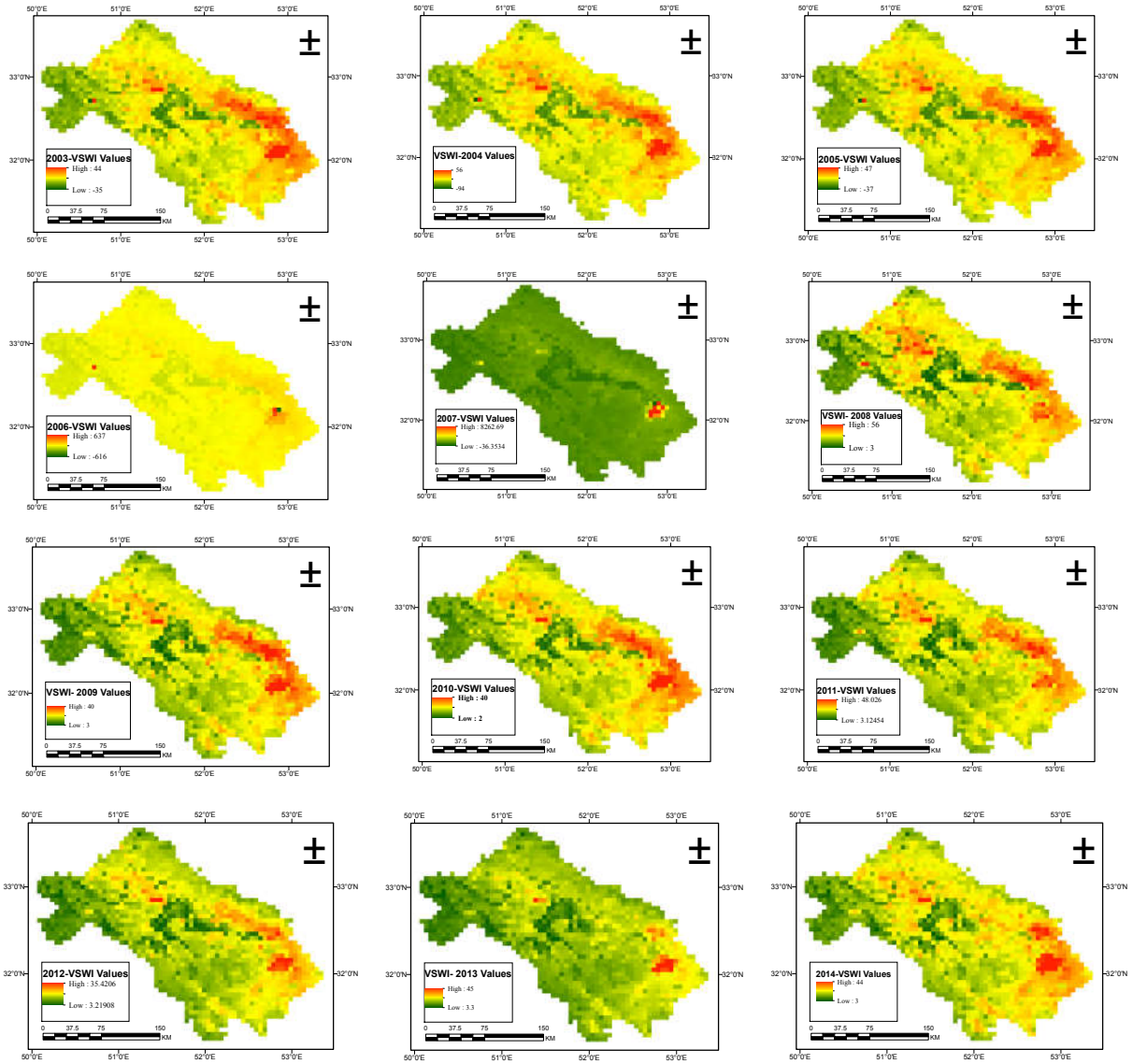
شاخص آب ذخیره پوشش گیاهی (VSWI)

از آنجا که قدرت تفکیک مکانی تصاویر NDVI ماهانه مورد استفاده ۱ کیلومتر و قدرت تفکیک مکانی تصاویر LST ماهانه موجود در وب سایت شرکت ناسا ۵/۶ کیلومتر است، جهت یکسان‌سازی اندازه پیکسل‌های تصاویر بر تصاویر ماهانه NDVI عمل نمونه‌گیری مجدد صورت گرفت. براساس رابطه ۱۰، نقشه‌های سری زمانی میانگین شاخص VSWI سالیانه (شکل ۳) و تجمعی ۱۲ ساله (شکل ۴) حوضه آبخیز گاوخونی تهیه شد. براساس نتایج کارلسون و همکاران (۱۰)، مقادیر زیاد VSWI، دمای تاج پوشش زیاد یا تراکم کم گیاه را نشان می‌دهد و VSWI، نشانگر دمای کم پوشش گیاهی است.

ارزیابی خشکسالی با استفاده از نقشه‌های سری زمانی سالانه شاخص VSWI

برای محاسبه تصاویر ماهانه شاخص VSWI، ۸۴ تصویر سری زمانی ماهانه MODIS NDVI و ۸۴ تصویر سری زمانی ماهانه MODIS-LST متناظر طی دوره رویشی ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۴ مورد استفاده قرار گرفت و ۱۲ نقشه میانگین سالانه ارائه شد که در نقشه‌های شکل ۳ نشان داده شده است. به‌عبارتی،

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.24763128.1396.6.4.7.0]
[DOI: 10.29252/ijae.6.4.31]



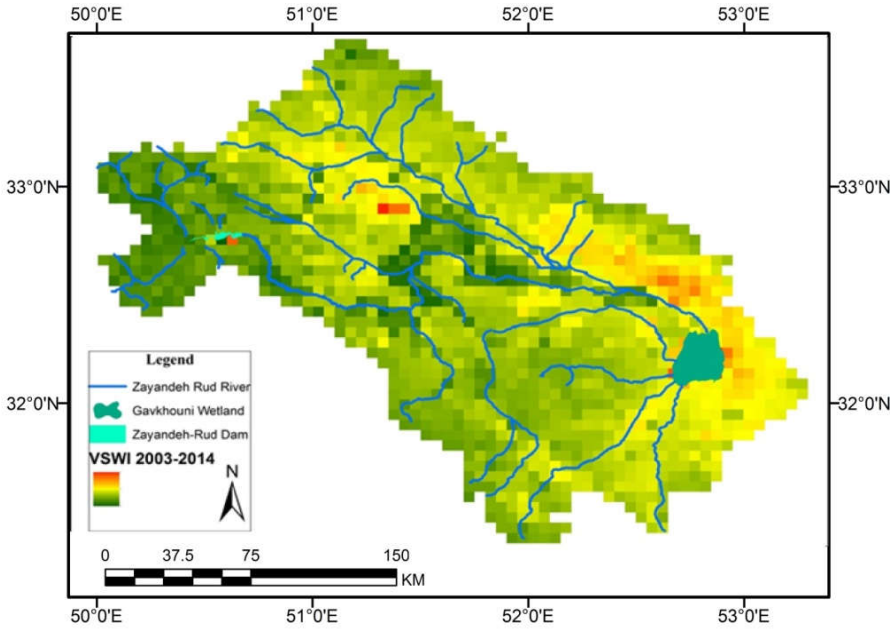
شکل ۳. نقشه‌های سری زمانی سالانه MODIS-VSWI در حوضه آبخیز گاوخونی در دوره رویشی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۴

شاخص VSWI با نسبت‌گیری تصاویر LST ماهانه به پیکسل متناظر NDVI ماهانه با استفاده از رابطه شماره ۱۰ محاسبه شد. لازم به‌ذکر است که پیکسل‌های نارنجی و قرمز با بالاترین میزان VSWI نشانگر خشکسالی شدید هستند.

ارزیابی خشکسالی با استفاده از نقشه‌های میانگین ۱۲ ساله شاخص VSWI

میانگین تجمعی ۱۲ ساله MODIS-VSWI از مقادیر سری زمانی تصاویر MODIS-VSWI سالانه بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۴ در حوضه آبخیز گاوخونی به‌کار رفت. نقشه حاصل در شکل ۳ نشان داده شده است. الگوهای مکانی این شکل (۳) حاکی از آن است که بالاترین مقدار میانگین بلندمدت ۱۲ ساله VSWI، در قسمت شرقی و جنوب شرقی حوضه آبخیز گاوخونی به سمت شمال غربی کشیده شده است، که نشان‌دهنده توزیع کم و نامنظم بارش بلندمدت در این منطقه است.

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.24763128.1396.6.4.7.0]
[DOI: 10.29252/ijae.6.4.31]



شکل ۴. نقشه میانگین ۱۲ ساله MODIS-VSWI در حوضه آبخیز گاوخونی در دوره رویشی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۴

جدول ۳. رابطه پارامترهای SPI و VSWI سالانه

آزمون آماری	آزمون پارامتری همبستگی پیرسون	آزمون غیرپارامتری همبستگی اسپیرمن
ضریب	-۰/۵۷۸	-۰/۶۲

رابطه شاخص ماهواره‌ای با شاخص خشکسالی هواشناسی

به‌منظور درک رابطه شاخص ماهواره‌ای با شاخص هواشناسی، رابطه شاخص سالانه VSWI با شاخص سالانه SPI در حوضه آبخیز گاوخونی طی سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۴ با استفاده ضرایب همبستگی پیرسون و اسپیرمن در نرم‌افزارهای SPSS و Systat محاسبه شد. رابطه پارامترهای SPI و VSWI سالانه در جدول ۳ نشان داده شده است، در این جدول مقادیر ضریب همبستگی پیرسون برابر ۰/۵۷۸- و ضریب همبستگی اسپیرمن برابر ۰/۶۲ است. شکل ۵ نمودار نوسانات شاخص سالانه VSWI با شاخص سالانه SPI طی دوره مطالعه در آبخیز گاوخونی را نشان می‌دهد. بر این اساس، نمودار نشان می‌دهد که این دو شاخص در جهت عکس مقادیر یکدیگر هستند.

بحث

در پژوهش حاضر رویکرد تحلیل خشکسالی به کمک تهیه شاخص ذخیره آب پوشش گیاهی (VSWI) از تصاویر سری زمانی سنجنده مودیس در حوضه آبخیز گاوخونی ارزیابی شده و نتایج ارائه شد. معناداری آزمون‌های همبستگی در شاخص‌های سالانه VSWI و SPI با استفاده از آزمون غیرپارامتری همبستگی اسپیرمن جدول ۲ نشان می‌دهد که داده‌های NDVI و LST ماهانه محصولات مودیس را می‌توان جهت تفسیر زیست محیطی و بوم‌شناسی داده‌های سنجش از دور در شرایط خشکسالی و شرایط کمبود داده ایستگاهی به‌کار گرفت. این مسئله در راستای مطالعات دفریاپرس و همکاران (۱۲) و زورمند و همکاران (۴۴)، است. در این پژوهش، مقادیر همبستگی متغیرهای سالانه VSWI سالانه و SPI، به‌دلیل تفاوت

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.24763128.1396.6.4.7.0]
[DOI: 10.29252/ijae.6.4.31]

شدید گستره میزان بارش (۵۰ میلی‌متر در شرق حوضه تا ۱۵۰۰ میلی‌متر در غرب)، دما (۳ تا ۲۹ درجه سانتی‌گراد) و پوشش گیاهی (کاهش تراکم از غرب تا شرق) در حوضه آبخیز گاوخونی قابل توجیه است. همچنین، همبستگی منفی نشان می‌دهد که با افزایش SPI و کاهش خشکسالی، شاخص VSWI کاهش یافته است. به‌عبارتی، دما کاهش و پوشش گیاهی افزایش می‌یابد که فرض مطالعه را تأیید و با نتیجه مطالعه کوییا و همکاران، (۱۱) مطابقت می‌کند.

نقشه‌های سری زمانی شکل ۳ نشان می‌دهد که کل منطقه مطالعه حوضه آبخیز گاوخونی در سال ۲۰۰۶ تحت شرایط خشکسالی متوسط بوده است. نشانه‌های خشکسالی شدید در طول دوره‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۶ در قسمت‌های مرکز رو به شمال و شمال شرقی حوضه آبخیز بروز کرده است. این زمانی است که پوشش گیاهی مستعد تنش و از دست دادن سلامت شده است. همچنین، اکثر سال‌ها (به استثنای سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۱۳)، بیشتر قسمت‌های حوضه (به استثنای مناطق غربی و مرکزی) در معرض خشکسالی شدید قرار دارند. علاوه بر این، خشکسالی شدید در قسمت‌های شرقی و شمال شرقی تا به سمت مرز رو به شمال در سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۵ و مجدداً ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۰ گسترده‌تر بوده است. به‌علاوه، براساس شکل های ۳ و پیوست، خشکسالی بسیار شدید در محدوده سد زاینده‌رود از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۰۶ و سال ۲۰۰۸ و مجدداً در سال ۲۰۱۲ تا ۲۰۱۴ مشهود است. همچنین، تأثیر خشکسالی در سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰، عمدتاً در شمال غرب و مرکز به‌شدت افزایش یافته است. براساس شکل ۳ پایین‌ترین مقدار میانگین درازمدت VSWI، در بخش‌های غرب و برخی نواحی مرکزی حوضه آبخیز دیده می‌شود، که بیان می‌کند تنها این نواحی طی دوره بلندمدت از خشکسالی در امان بوده‌اند. به‌علاوه، علائم وقوع خشکسالی در مناطق غربی و شمالی حوضه آبخیز گاوخونی مشاهده می‌شود. بعضی از این پیکسل‌های زرد و نارنجی نشانگر خشکسالی که در مرکز و مناطق غربی حوضه آبخیز واقع شده‌اند، زمین‌های کشاورزی و باغات در امتداد رودخانه زاینده‌رود هستند که از خشکسالی در امان نمانده‌اند. در کل، حوضه آبخیز گاوخونی طی دوره بلندمدت مطالعه به طور عمده در نواحی مرکز رو به شمال، شرقی، جنوب شرقی و نزدیک جنوب با شرایط خشکسالی مواجه بوده است. همچنین، براساس شکل ۳ نقشه‌های سال‌های ۲۰۰۶ و ۲۰۱۱ با مطالعه نقشه‌های شدت خشکسالی حاصل از مطالعه خشوعی و همکاران (۳)، از نظر زمانی و مکانی (در سال ۲۰۱۱ در طبقه خشکسالی شدید) مطابقت دارد. لازم به ذکر است که در این مطالعه، از تصاویر دوره رویشی حوضه آبخیز گاوخونی یعنی آوریل تا اکتبر استفاده شد، زیرا بنا بر کوییا و همکاران (۱۱) وقتی زمین با پوشش گیاهی پوشیده شده باشد، LST را می‌توان مشابه دمای سطح تاج پوشش فرض نمود، بر این اساس کارآمدی ارزیابی خشکسالی به‌کمک شاخص VSWI در زمین‌های بدون پوشش گیاهی و لخت کمتر است، زیرا دمای بالاتر پس‌زمینه خاک می‌تواند به‌شدت مانع بوده و بر ارزیابی تأثیر بگذارد. همچنین قسمت‌های خاک لخت و تپه‌های ماسه‌ای هیچ‌گونه شرایط مرطوبی نشان نمی‌دهد. خاک ماسه‌ای که در معرض تابش مستقیم خورشید قرار دارد، نمی‌تواند آب را حفظ کند؛ بنابراین هیچ فعالیت فتوسنتزی در آن وجود ندارد. با این حال، باید توجه داشت که شاخص VSWI می‌تواند برای کنترل اثر خشکسالی در مناطق دارای پوشش گیاهی استفاده شود. اما از آنجا که مناطق شرق و جنوب شرقی حوضه دارای پوشش گیاهی بسیار محدود است، این مسئله ممکن است محدود کننده ارزیابی خشکسالی با استفاده از شاخص ذخیره آب پوشش گیاهی حاصل از تصاویر ماهواره‌ای در این مناطق باشد. هر چند نتایج این مطالعه انطباق چشمگیر نقشه پهنه‌بندی فراوانی خشکسالی شاخص هواشناسی SPI ۱۲ ماهه را با شاخص ماهواره‌ای VSWI مطالعه میراحسنی و همکاران (۶)، نشان داد. به‌عبارتی، توزیع مکانی سالانه VSWI مطابق الگوی بارندگی حاصل از فراوانی نسبی خشکسالی شاخص SPI ۱۲ ماهه بلندمدت است و مناطقی که رطوبت نسبی بالاتری داشتند، با مناطقی که دارای بارش بیشتر و SPI بالاتر بودند شناسایی شد.

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.24763128.1396.6.4.7.0]
[DOI: 10.29252/ijae.6.4.31]

اما با این‌حال، به نظر می‌رسد علاوه بر بارش، عوامل دیگری همچون استفاده از آب‌های زیرزمینی و چاه‌ها جهت تأمین آب آبیاری حوضه، همراه با میزان و زمان‌های مسدود کردن و باز کردن دریچه سد زاینده‌رود، در سلامت و تراکم پوشش گیاهی در در دوره مورد مطالعه در حوضه آبخیز گاوخونی مؤثر است که با مطالعه خشوعی و همکاران (۳)، مطابقت دارد. درنظر گرفتن مقادیر برداشت از چاه‌ها و آب‌های زیرزمینی، با بررسی خشکسالی آب‌شناختی حوضه مورد نیاز است که خارج از محدوده این مطالعه بوده و نیازمند تحقیقات بیشتر جهت پژوهش‌های همه جانبه حوضه آبخیز گاوخونی که منابع آب بخش عمده‌ای از فلات خشک مرکزی ایران را تأمین می‌کند در آینده توصیه می‌شود.

نمودار تغییرات دو متغیر سالانه SPI و VSWI در طول دوره مطالعه در حوضه آبخیز گاوخونی در شکل ۴ نشان داده شد. این نمودار نشان می‌دهد که متغیرها در سال‌های ۲۰۰۳، ۲۰۰۵، ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴ بر هم منطبق هستند. این مقادیر در سال‌های ۲۰۰۴، ۲۰۰۶، ۲۰۰۷، ۲۰۱۰ و ۲۰۱۲ تفاوت کمی دارند و تفاوت آنها در سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۱ نسبتاً زیاد است اما در سال ۲۰۰۸ به حداکثر خود می‌رسد. به‌عبارتی، نمودار تغییرات شاخص‌های سالانه SPI و VSWI نشان داد که بین شاخص‌ها در سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۱ تفاوت نسبتاً زیاد است و در سال ۲۰۰۸ تفاوت بسیار زیاد دارند. از آنجا که براساس مطالعه میراحسنی و همکاران (۶)، حوضه آبخیز گاوخونی در این سال‌ها با خشکسالی شدید شاخص VCI نیز مواجه بود، نتایج این پژوهش با مطالعه مذکور همخوانی دارد.

در مورد تالاب گاوخونی، نقشه‌های شکل ۳ نشان داد که در دوره مطالعه این اکوسیستم ارزشمند همواره و در تمام دوره مطالعه و همه ۱۲ سال همواره با با حداکثر میانگین VSWI یعنی خشکسالی شدید و بسیار شدید روبه رو بوده است که از سال ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۴ گستره آن نیز افزایش پیدا کرده است. این مسئله سبب تنش‌های بسیار شدید در پوشش گیاهی تنک حوضه و ایجاد خاک لخت در مناطق شرق و جنوب شرقی آن شده است و این تالاب در بین فصول رویشی تنها در سال‌های ۲۰۰۶، ۲۰۰۷، ۲۰۰۸ و ۲۰۱۱ از خشکسالی بسیار شدید مصون بوده است. شایان ذکر است که به‌طور کلی، آب‌های سطحی مانند تالاب‌ها، NDVI بالا یا LST بالا را نشان نمی‌دهند. با این حال، به‌طور همزمان، پوشش گیاهی نشان‌دهنده بالاترین مقدار NDVI و در نتیجه پایین‌ترین میانگین LST نسبت به سایر کلاس‌ها است. علاوه بر این، LST پوشش گیاهی و تالاب‌ها متوسط تا کم است، تا منعکس کننده این باشد که این کلاس‌ها دارای میانگین NDVI بالا هستند، که با مطالعه کوپینا و همکاران (۱۱) منطبق است. علاوه بر این، با توجه به نتایج وان و لی (۴۱) حتی با درنظر گرفتن احتمال برخی نسبت‌های کوچک پوشش‌های زمینی تصاویر تالاب‌ها، از آنجا که دمای سطح آب و پوشش گیاهی سالم گرم‌تر از دمای سطح خارج از آب نیست، این اثر مخلوط شده و این امر تأثیر منفی در نتایج مطالعه ندارد. لازم به توضیح است که به جز خشکسالی، این تالاب با چندین مخاطره محیطی دیگر از جمله آلودگی و پدیده گردوغبار روبه‌روست، به‌طوری‌که آن را به شکل مخزنی از فلزات سنگین و خطرناک تبدیل کرده است. این مشکلات وجوب توجه و برنامه‌ریزی اضطراری و هرچه سریعتر مسئولان و اجرای سختگیرانه قوانین را دو صد چندان روشن می‌کند.

نتیجه‌گیری

ارزیابی خشکسالی با استفاده از شاخص‌های هواشناسی ایستگاهی دارای محدودیت‌های پوشش فضایی و الگوی فضایی شرایط خشکسالی در مقیاس منطقه‌ای است. درحالیکه، مطالعه سری زمانی شاخص‌های پوشش گیاهی و دمای سطح زمین حاصل از تصاویر سنجنده مودیس با دارا بودن قدرت تفکیک مکانی نسبتاً بالا و زمانی بالا و بررسی روابط شاخص‌های هواشناسی و ماهواره‌ای با استفاده از آزمون‌های آماری، کارایی و توانایی ارزیابی و پایش خشکسالی را دارا هستند. بنابراین، نتایج این پژوهش حاکی از کارایی بالای شاخص‌های پوشش گیاهی و دمایی ماهواره‌ای محصولات مودیس در نبود داده‌های

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.24763128.1396.6.4.7.0]
[DOI: 10.29252/ijae.6.4.31]

ایستگاهی هواشناسی است. بنابراین، مدل مورد استفاده در پژوهش به‌عنوان راهکار عملی در راستای بهبود کارایی و کاربردی کردن هرچه بیشتر بررسی خشکسالی در اقلیم‌های مشابه اقلیم گاوخونی و برای کل حوضه‌های آبخیز کشور توصیه می‌شود.

سپاسگزاری

نویسندگان پژوهش حاضر از حمایت‌های بی‌دریغ جناب آقای دکتر محبوبی سردبیر محترم نشریه بوم‌شناسی کاربردی کمال امتنان و قدردانی را دارند.

منابع مورد استفاده

۱. ابراهیمی، م.، ر. درویش‌زاده، ع. ا. متکان و د. عاشورلو. ۱۳۸۹. بررسی خشکسالی در مناطق خشک مرکزی ایران با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای با تکیه برشاخص‌های گیاهی (مطالعه موردی :شیرکوه یزد) *علوم محیطی* ۷(۴): ۷۲-۵۹.

۲. خداقلی، م. ۱۳۸۴. بررسی زیست اقلیم گیاهی حوضه آبخیز زاینده‌رود، پایان‌نامهٔ دکتری، دانشگاه اصفهان، دانشکدهٔ ادبیات و علوم انسانی.

۳. خشوعی اصفهانی، م.، ح. ر. صفوی و ا. ر. زمانی. ۱۳۹۵. طراحی سیستم پایش خشکسالی براساس شاخص یکپارچه در حوضه آبریز زاینده‌رود. *نشریه علوم آب و خاک- علوم و فنون کشاورزی و منابع طبیعی* ۲۰(۷۵): ۴۳- ۲۷.

۴. سالمی، ح. ر. و ه. راست. ۱۳۸۳. سیمای کلی آب‌شناختی حوضه آبخیز زاینده‌رود. *دو ماهنامه علمی-پژوهشی آب و فاضلاب* ۱۵(۲): ۱۳-۲.

۵. سعادتی، س.، س. سلطانی و س. اسلامیان. ۱۳۸۶. پهنه‌بندی خشکسالی در استان اصفهان با استفاده از شاخص استاندارد بارش (SPI). *مجله علوم و مهندسی آبخیزداری ایران* ۲(۱): ۶۷-۶۴.

۶. میراحسنی، م.، ع. ر. سلمان ماهینی، ع. ر. سفیانیان، ر. مدرس، ر. جعفری و ج. محمدی. ۱۳۹۶. پایش خشکسالی منطقه‌ای حوضه آبخیز زاینده‌رود براساس تغییرات سری زمانی شاخص VCI سنجنده مودیس و شاخص SPI . *نشریه علمی پژوهشی جغرافیا و مخاطرات محیطی* ۴(۶): ۲۲-۱.

۷. میراحسنی، م.، ۱۳۹۶. تحلیل سری زمانی شناسایی روند تخریب سرزمین بر مبنای تبیین خصوصیات بیوفیزیکی مؤثر با تأکید بر پایش مکانی زمانی خشکسالی و تغییرات پوشش/کاربری اراضی. پایان نامه دکترا. دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.

۸. ناظری تهرودی، م.، ک. خلیلی، ج. بهمنش. ۱۳۹۴. بررسی روند حجم خشکی رودخانه با استفاده از آزمون نقاط چرخش، من-کندال و اسپیرمن (مطالعه موردی: رودخانه‌های حوضه دریاچه ارومیه). *نشریه جغرافیا و برنامه ریزی محیطی* ۲۶(۳): ۳۲۸-۳۱۳.

9. Abramowitz, M. and I. A. Stegun. 1964. *Handbook of* Mathematical Functions: with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables (Vol. 55). Courier Corporation.
10. Carlson, T. N., R. R. Gillies and E. M. Perry. 1994. A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface soil water content and fractional vegetation cover. *Remote Sensing Reviews* 9(1-2): 161-173.
11. Cunha, A. P. M., R. C. Alvalá, C. A. Nobre and M. A. Carvalho. 2015. Monitoring vegetative drought dynamics in the Brazilian semiarid region. *Agricultural and Forest Meteorology* 4: 494-505.
12. De Faria Peres, L., A. J. de Lucena, O. C. Rotunno Filho and J. R. de Almeida França. 2018. The urban heat island in Rio de Janeiro, Brazil, in the last 30 years using remote sensing data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 64: 104-116.

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.24763128.1396.6.4.7.0]
[DOI: 10.29252/ijae.6.4.31]

13. Di, L., D. C. Rundquist and L. Han. 1994. Modelling relationships between NDVI and precipitation during vegetative growth cycles. *International Journal of Remote Sensing* 15(10): 2121-2136.
14. Goetz, S. J. 1997. Multi-sensor analysis of NDVI, surface tempera and biophysical variables at a mixed grassland site. *International Journal of Remote Sensing* 18(1): 71-94.
15. Han, L., P. Wang, H. Yang, S. Liu and J. Wang. 2006. Study on NDVI-T s space by combining LAI and evapotranspiration. *Science in China Series D* 49(7): 747-754.
16. Keshavarz, M. R., M. Vazifedoust and A. Alizadeh. 2014. Drought monitoring using a soil wetness deficit index (SWDI) derived from MODIS satellite data. *Agricultural water management* 132: 37-45.
17. Kogan, F. N. 1995. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in Space Research* 15(11): 91-100.
18. Lanfredi, M., R. Coppola, T. Simoniello, R. Coluzzi, V. Imbrenda and M. Macchiat. 2015. Early identification of land degradation hotspots in complex bio-geographic regions. *Remote Sensing* 7: 8154-8179.
19. Liu, J., J. Wu, Z. Wu and M. Liu. 2013. Response of NDVI dynamics to precipitation in the Beijing-Tianjin sandstorm source region. *International Journal of Remote Sensing* 34(15): 5331-5350.
20. Lowry, R. 2014. Concepts and Applications of Inferential Statistics.
21. McKee, T. B., N. J. Doesken and J. Kleist. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. Boston, MA*: American Meteorological Society* 17(22): 179-183.
22. Modarres, R. and V. D. P. R. da Silva. 2007. Rainfall trends in arid and semi-arid regions of Iran. *Journal of Arid Environments* 70(2): 344-355.
23. Moran, M. S., T. R. Clarke, Y. Inoue and A. Vidal. 1994. Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sensing of Environment* 49(3): 246-263.
24. Mu, Q., M. Zhao, J. S. Kimball, N. G. McDowell and S. W. Running. 2013. A remotely sensed global terrestrial drought severity index. *Bulletin of the American Meteorological Society* 94(1): 83-98.
25. Nemani. R., L. Pierce and S. Running. 1992. Developing satellite-derived estimates of surface moisture status. *Journal of Applied Meteorology* 32: 548-557.
26. Nemani, R. R., C. D. Keeling, H. Hashimoto, W. M. Jolly, S. C. Piper, C. j. Tucker and S.W. Running. 2013. Climate-driven increases in global terrestrial net primary production from 1982 to 1999. *Science* 300(5625): 1560-1563.
27. Pearson, K. 1895. Note on regression and inheritance in the case of two parents. *Proceedings of the Royal Society of London 58*: 240-242.
28. Sandholt, I., K. Rasmussen and J. Andersen. 2002. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sensing of Environment* 79: 213-224.
29. Sarhadi, A. and S. Soltani. 2013. Determination of water requirements of the Gavkhuni wetland, Iran: A hydrological approach. *Journal of Arid Environments* 98: 27-40.
30. Singh, R. P., S. Roy and F. Kogan. 2003. Vegetation and temperature condition indices from NOAA AVHRR data for drought monitoring over India. *International Journal of Remote Sensin*g 24(22): 4393-4402.
31. Spearman, C. 1904. The proof and measurement of association between two things. *The American Journal of Psychology* 15(1): 72-101.
32. Sruthi, S. and M. M. Aslam. 2015. Agricultural drought analysis using the NDVI and land surface temperature data; a case study of Raichur district. *Aquatic Procedia* 4: 1258-1264.
33. Svoboda, M., M. Hayes and D. Wood. 2012. Standardized precipitation index user guide. *World Meteorological Organization Geneva*, Switzerland.
34. Tang, H. and Z. L. Li. 2013. Quantitative Remote Sensing in Thermal Infrared: Theory and Applications. Springer Science & Business Media.
35. Thom, H. C. S. 1966. Some methods of climatological analysis. *WMO Technics/Note Number* 81: 16-22.
36. Tian, M., P. Wang and J. Khan. 2016. Drought forecasting with vegetation temperature condition index using ARIMA models in the guanzhong plain. *Remote Sensing* 8(9): 690-709.
37. Toomanian, N., A. S. M. Gieske and M. Akbary. 2004. Irrigated area determination by NOAA-landsat upscaling techniques, Zayandeh River Basin, Isfahan, Iran. *International Journal of Remote Sensing* 25(22): 4945-4960.
38. Tucker, C. J. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment* 8: 127-150.
39. Tucker, C. J. and B. J. Choudhury. 1987. Satellite remote sensing of drought conditions. *Remote Sensing of Environment* 23: 243-251.
40. Wan, Z. 2006. Collection-5 MODIS Land Surface Temperature Products User's Guide. University of California: Santa Barbara, CA, USA, 35 p.
41. Wan, Z., P. Wang and X. Li. 2004. Using MODIS land surface temperature and normalized difference vegetation

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.24763128.1396.6.4.7.0]
[DOI: 10.29252/ijae.6.4.31]

index products for monitoring drought in the southern Great Plains, USA. *International Journal of Remote Sensing* 25(1): 61-72.
42. Wang, P. X., X. W. Li, J. Y. Gong and C. Song. 2001. Vegetation temperature condition index and its application for drought monitoring. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2001. IGARSS'01. IEEE 2001 International (1): 141-143. IEEE.
43. WU, M. X. and H. Q. LU. 2016. A modified vegetation water supply index (MVWSI) and its application in drought monitoring over Sichuan and Chongqing, China. *Journal of Integrative Agriculture* 15(9): 2132-2141.
44. Zormand, S., R. Jafari and S. Soltani Koupaei. 2017. Assessment of PDI, MPDI and TVDI drought indices derived from MODIS Aqua/Terra Level 1B data in natural lands. *Natural Hazards* 86(2): 757-777.
45. https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataprod/mod13.php.

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-14]

[DOR: 20.1001.1.24763128.1396.6.4.7.0]
[DOI: 10.29252/ijae.6.4.31]

Evaluation of Vegetation Supply Water Index through Time-Series Images of MODIS Products in Drought Monitoring over Gavkhuni Basin

M. Mirahsani[1], A.Salman Mahiny[1*], A. Soffianian[2], R. Moddares[3], R. Jafari[3] and J. Mohammadi[4]

(Received: Aug. 30-2017; Accepted: Jan. 30-2018)

Abstract

Drought is one of the main factors of ecological potential stress due to the wide extension of the time scale and impact space. The performance of regional drought monitoring using the meteorological indicators is a challenge due to spatial distribution constraints. In present study, 168 time series images including NDVI and LST indices were used. Integrating these two indices, VSWI was used to assess near-real-time and spatial-temporal spatial drought monitoring in Gavkhoni basin during 2003 to 2014. The SPI was assigned as the basis and the feedback of satellite and meteorological indices was assessed using Pearson correlation test. The results of the study of the relationships between the mean annual values of the VSWI and SPI indices during the same period showed a value of 0.578. In order to study the significance of the indices correlation, a nonparametric Spearman correlation test was added to the study. In addition, the results of the spatio-temporal pattern of the annual VSWI, indicating a severe long-term drought in the southeastern parts of the Zayandehrud dam and the entire Gavkhoni wetland area. The adaptation of this map to the meteorological drought map indicates the efficiency of integrating NDVI and LST satellite indices in drought monitoring.

Keywords: NDVI, LST, Pearson and Spearman tests, Soil moisture, SPI.

1. Dept. of Environ. Sci., Faculty of Fisheries and Environ. Sci., Gorgan Univ. of Agric. Sci. and Natur. Resour., Gorgan, Iran.
2. Dept. of Environ. Sci., Faculty of Natur. Resour., Isf. Univ. of Tech., Isfahan, Iran.
3. Dept. of Range and Watershed Management, Faculty of Natur. Resour., Esfahan Univ. of Tech., Isfahan, Iran.
4. Dept. of Forestry, Faculty of Forest Sci., Gorgan Univ. of Agric. Sci. and Natur. Resour., Gorgan, Iran.
*: Corresponding Author, Email: rassoulmahiny@gmail.com

[Downloaded from ijae.iut.ac.ir on 2026-11-14]
[DOR: 20.1001.1.24763128.1396.6.4.7.0]
[DOI: 10.29252/ijae.6.4.31]