

ارزیابی کارایی داده‌های سنجنده‌ی MODIS در برآورد خشکسالی

(مطالعه‌ی موردی: حوضه‌ی آبریز دریاچه ارومیه)

محمد حسین رضایی مقدم* - استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه تبریز
خلیل ولی‌زاده کامران - استادیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه تبریز
هاشم رستم زاده - استادیار گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه تبریز
علی رضایی - کارشناس ارشد سنجش از دور و GIS، دانشگاه تبریز

پذیرش مقاله: ۱۳۹۱/۰۴/۲۰ تأیید نهایی: ۱۳۹۱/۰۸/۰۸

چکیده

خشکسالی، پدیده‌ای پیچیده با آثار متفاوت است. از این‌رو برای تعیین شدت و وسعت خشکسالی از شاخص‌ها استفاده می‌شود. در این پژوهش، ارزیابی کارایی داده‌های سنجنده‌ی MODIS، در برآورد خشکسالی از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۱ در حوضه‌ی آبریز دریاچه‌ی ارومیه مورد بررسی قرار گرفت. همچنین از داده‌های سنجنده‌ی MODIS ماهواره‌ی Terra و داده‌های ماهانه‌ی بارش استفاده شد. در این مطالعه شاخص‌های VCI و TCI مورد بررسی قرار گرفتند. برای به‌دست آوردن VCI از NDVI استفاده شد. NDVI از باندهای ۱۳ و ۱۶ به‌دست آمد. همچنین برای محاسبه‌ی TCI از دمای درخشایی حاصل از باند ۳۱ استفاده شد و نقشه‌های خشکسالی از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۱ برای این شاخص‌ها به‌دست آمد. چون نتایج این دو شاخص متفاوت بودند، برای تعیین کارایی این شاخص‌ها، از SPI استفاده شد و این شاخص در مقیاس زمانی سه‌ماهه در سال ۲۰۱۱ محاسبه شد. در ادامه مقادیر شاخص‌های VCI و TCI در سال ۲۰۱۱ از روی تصاویر استخراج و همبستگی پیرسون بین آنها انجام گرفت. ضریب همبستگی VCI با SPI برابر ۰/۷ و همبستگی TCI با SPI برابر ۰/۲۵ است. سطح معناداری نیز برای VCI قابل قبول بود. با توجه به نتایج، VCI و تصاویر MODIS می‌توانند جایگزین مناسبی برای شاخص‌های هواشناسی در برآورد خشکسالی باشند و با توجه به اینکه تصاویر ماهواره‌ای نسبت به روش‌های هواشناسی دارای مزایایی همچون تعداد نقاط نمونه‌برداری بیشتر، سطح پوشش وسیع‌تر، قدرت تفکیک زمانی بالاتر و هزینه کم‌تر هستند، استفاده از دانش سنجش از دور پیشنهاد می‌شود.

کلیدواژه‌ها: خشکسالی، سنجنده‌ی MODIS، شاخص SPI شاخص TCI، شاخص VCI.

مقدمه

میانگین بارش ایران کمتر از یک سوم میانگین بارش سالانه‌ی جهان است و این میزان نیز از توزیع زمانی و مکانی مناسبی برخوردار نیست. خشکسالی یک مخاطره‌ی طبیعی است که همواره بخش‌های مختلف کشور را متأثر کرده است (باعقیده و همکاران، ۱۳۹۰). پدیده‌ی خشکسالی، پدیده‌ای پیچیده با آثار متفاوت است. از این رو از شاخص‌های متفاوت برای تعیین میزان شدت و وسعت خشکسالی استفاده می‌شود. بیشتر شاخص‌هایی که در این زمینه به کار می‌روند، برپایه‌ی معیارهای هواشناسی بوده و متغیرهایی مانند، میزان رطوبت خاک، دما یا به‌ویژه، میزان بارش را مورد بررسی قرار می‌دهند. با فراهم شدن داده‌های ماهواره‌ای متفاوت و فراگیر شدن استفاده از آنها، امکان مطالعه‌ی خشکسالی با استفاده از این فناوری فراهم شده است. با استفاده از شاخص‌های سنجش از دور می‌توان خشکسالی را از طریق آثاری که بر گیاهان و کشاورزی دارد، مطالعه کرد و در نتیجه به نتایج دقیق‌تر و مؤثرتری برای مدل‌سازی خشکسالی دست یافت (هیم^۱، ۲۰۰۲).

در حال حاضر تصاویر ماهواره‌ای به‌طور منظم و با دقت تفکیک مکانی بالا، از سطح زمین تهیه می‌شوند و می‌توانند شرایط نظم و گستردگی فضایی را فراهم کنند. از مزایای استفاده از سنجش از دور نسبت به روش‌های هواشناسی، می‌توان به افزایش نقاط نمونه‌برداری، سطح پوشش وسیع‌تر، قدرت تفکیک زمانی بالاتر و هزینه‌ی کمتر اشاره کرد (ویل‌هایت^۲، ۲۰۰۰).

تا کنون مطالعات زیادی در رابطه با استخراج شاخص‌های خشکسالی از تصاویر ماهواره‌ای انجام شده که در تمامی آنها، عدم قطعیتی مزمن مشاهده می‌شود که گاهی سبب عدم کارایی مدل‌های پیش‌بینی خشکسالی می‌شود. دقت بیشتر در انتخاب و پردازش تصاویر برای استخراج شاخص‌ها، می‌تواند کیفیت آنها را بالا برده و درنهایت سبب کارایی بیشتر در مدل‌های پیش‌بینی خشکسالی شود (ری^۳ و همکاران، ۲۰۱۰).

رحیم‌زاده (۱۳۸۴) قابلیت داده‌های سنجنده‌ی AVHRR^۴ را در برآورد خشکسالی با دو شاخص NDVI^۵ و VCI^۶ مورد بررسی قرار داد. نتایج نشانگر وجود همبستگی بالا بین شاخص VCI و مقادیر بارندگی در ایستگاه‌های سینوپتیک بود.

خواجه (۱۳۸۶) به پایش خشکسالی با شاخص NDVI در استان اصفهان و با استفاده از داده‌های ماهواره NOAA از سال ۱۹۹۲ تا ۲۰۰۳ پرداخت. نتایج حاصل از همبستگی بین شاخص NDVI و SPI، حاکی از امکان استفاده از شاخص NDVI در پایش خشکسالی در استان است.

1. Heim
2. Willhite
3. Rhee
4. Advanced Very High Resolution Radiometer
5. Normalized Deference Vegetarian Index
6. Vegetarian Condition Index

جهانبخش و همکاران (۱۳۸۸) به ارزیابی تغییرات پوشش گیاهی دشت سراب و تحلیل دو دوره‌ی خشکسالی و ترسالی پرداختند. در این مطالعه از تصاویر سنجنده‌ی ETM+ و ماهواره‌ی SPOT و شاخص‌های NDVI، SPI و شاخص VHI^۱ استفاده شده است. نتایج نشانگر بالابودن تغییرات وضعیت سلامت پوشش گیاهی، به‌ویژه در مناطق تحت کشت دیم بوده است.

پرویز و همکاران (۱۳۸۸) به بررسی عملکرد دو شاخص NDVI و VTCI در پایش خشکسالی در حوضه‌ی آبریز سفیدرود با استفاده از تصاویر سنجنده‌ی MODIS^۲ پرداختند. نتایج بیان می‌کند که شاخص VTCI نسبت به شاخص NDVI در تعیین شرایط خشکسالی مؤثرتر است.

شمسی‌پور و همکاران (۱۳۸۹) به ردیابی و تحلیل خشکسالی با شاخص‌های NDVI، VCI و VHI در منطقه‌ی بیابانی و خشک کاشان پرداختند. با توجه به نتایج، بهره‌گیری از داده‌های سنجنش از دور در مطالعات محیطی مناطق خشک و بیابانی توصیه می‌شود.

باعقیده و همکاران (۱۳۹۰) به بررسی شاخص NDVI در تحلیل خشکسالی استان اصفهان پرداختند. داده‌های به‌کار رفته، تصاویر ماهواره‌ی NOAA و داده‌های بارش در ایستگاه‌ها بوده است. در بین دوره‌های زمانی شاخص SPI، دوره‌ی زمانی سه‌ماهه، همبستگی بالایی نشان داد. نتایج حاصل از همبستگی نشان داد که NDVI می‌تواند جایگزین مناسبی برای شاخص‌های اقلیمی در ارزیابی خشکسالی‌ها باشد.

تنکابایل^۳ و همکاران (۲۰۰۴) در منطقه‌ی جنوب‌غربی آسیا با اجرای شاخص‌های VCI، Dev.NDVI، TCI^۴ و VHI به‌ارزیابی خشکسالی پرداختند. این پژوهش روش‌هایی برای پایش خشکسالی با استفاده از اتصال داده‌های تاریخی سنجنده AVHRR با داده‌های روزانه سنجنده مدرن MODIS را پیشنهاد می‌کند.

کارنیلی^۵ و همکاران (۲۰۰۶) به بررسی شاخص VHI در شش منطقه‌ی مختلف در مغولستان پرداختند. نتایج حاصل از منطقه‌ی شمالی نشان داد که افزایش درجه حرارت مطلوب، فعالیت‌های پوشش گیاهی را تحت تأثیر قرار می‌دهد و در نتیجه شاخص VHI در عرض‌های شمالی باید با احتیاط به‌کار رود.

بویان^۶ و همکاران (۲۰۰۶) در منطقه‌ی آرالی هند، خشکسالی را با به‌کارگیری شاخص‌های NDVI، VCI، TCI و VHI حاصل از داده‌های ماهواره NOAA-AVHRR در مقایسه با شاخص‌های آماری SPI و SWI حاصل از ایستگاه‌های هواشناسی و هیدرومتری مورد مطالعه قرار دادند. در این مطالعه ضریب همبستگی بالایی بین VCI و TCI با میزان بارندگی ماهانه مشاهده نشد. بویان (۲۰۰۸) به برآورد خشکسالی

1. Vegetarian Health Index
2. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
3. Thenkabail
4. Temperature Condition Index
5. Karnieli
6. Bhuiyan

صحرای تار^۱ در شمال غربی هند و شرق پاکستان بین سال‌های ۱۹۸۴ تا ۲۰۰۳ و با استخراج داده‌های ماهواره NOAA-AVHRR و به‌کارگیری شاخص‌های NDVI، VCI، TCI و VHI پرداخت. نتایج نشان داد در هر سالی که تنش رطوبتی و حرارتی وجود داشته است، خشکسالی توسعه یافته و از آنجا که بارندگی هر دو تنش مذکور را کاهش می‌دهد، پوشش گیاهی ناجی صحرا است.

ژانگ^۲ و همکاران (۲۰۰۹) در مطالعه‌ای تحلیل کاملی از خشکسالی در منطقه‌ی هوانگهوای^۳ چین با استفاده از تصاویر AVHRR و مقایسه با داده‌های هواشناسی منطقه، طی سال‌های ۱۹۸۱ تا ۲۰۰۸ انجام دادند. در این پژوهش از شاخص هواشناسی Z برای نظارت بر خشکسالی هواشناسی و همچنین VHI استفاده کردند. نتایج نشان داد که خشکسالی با درجه پایین، پدیده‌ای رایج در منطقه‌ی شمال چین است.

روسوینتیارتی^۴ و همکاران (۲۰۱۰) به برآورد خشکسالی در جزیره‌ی جاوای اندونزی پرداختند. آنها برای این کار از تصاویر MODIS برای شاخص EVI و دمای سطح زمین (LST) استفاده کردند. شاخص VHI با استفاده از VCI و TCI به‌دست آمده است و در آخر با استفاده از نقشه‌ی VHI سلامت پوشش گیاهی در جزیره‌ی جاوا به‌دست آمده است.

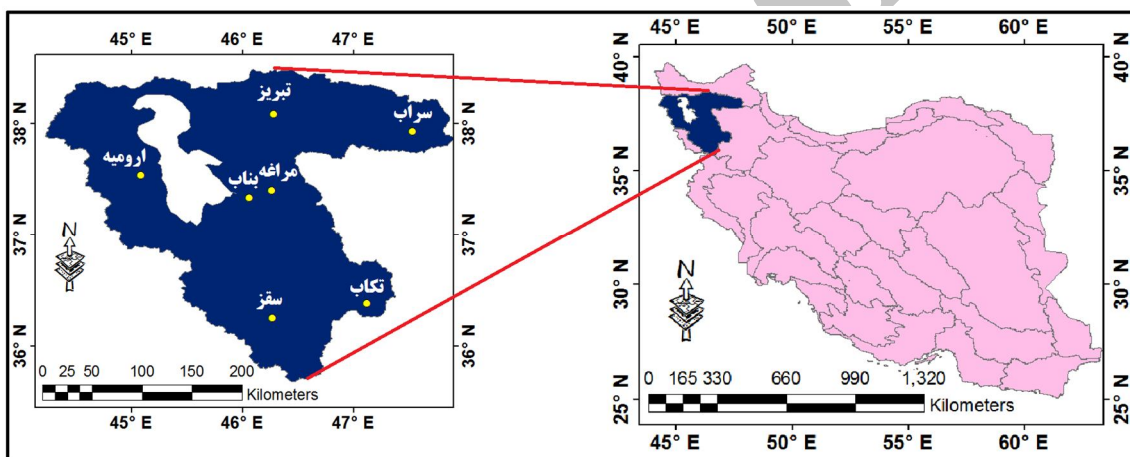
اورنگی^۵ و همکاران (۲۰۱۱) به برآورد خشکسالی در استان فارس ایران با استفاده از تصاویر سنجنده AVHRR و مقایسه با تصاویر ماهواره‌ی SPOT پرداختند. در این پژوهش از شاخص‌های VCI، TCI و VHI استفاده شده است. شاخص‌های SPI و SWI (شاخص استاندارد سطح آب) و DSI (شاخص شدت خشکسالی) به‌دست آمد. نتایج این مطالعه نشان داد که این روش‌ها برای آگاهی از خشکسالی اولیه امیدوار کننده هستند و می‌توانند برای مدیریت ریسک خشکسالی در آب‌وهوای نیمه‌خشک، از جمله استان فارس در ایران استفاده شوند.

با توجه به مطالعات انجام گرفته، شاخص‌های VCI و TCI روش‌های پرکاربردی برای برآورد و ارزیابی خشکسالی از طریق داده‌های ماهواره‌ای هستند. همچنین از شاخص هواشناسی SPI در کنار شاخص‌های سنجش از دوری استفاده می‌شود و این شاخص در مقیاس زمانی سه‌ماهه، به‌عنوان معیاری مناسب برای تعیین کارایی مورد استفاده و پیشنهاد داده شده است. در پژوهش پیش رو، دو هدف عمده در نظر گرفته شده است: اول، کارایی شاخص‌های سنجش از دوری و به‌ویژه شاخص‌های VCI و TCI در برآورد خشکسالی و هدف دوم، استفاده از داده‌های سنجنده‌ی قدرتمند و پرکاربرد MODIS به جای سنجنده‌ی AVHRR است. از اهداف جانبی می‌توان به برآورد خشکسالی حوضه‌ی آبریز دریاچه‌ی ارومیه از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۱ اشاره کرد.

1. Thar
2. Zhang
3. Huanghuai
4. Roswintarti
5. Owrangi

منطقه‌ی مورد مطالعه

در این پژوهش محدوده‌ی مورد مطالعه، حوضه‌ی آبریز دریاچه ارومیه است. این محدوده در مختصات جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۳۰ دقیقه عرض شمالی و ۴۴ درجه و ۱۲ دقیقه تا ۴۷ درجه و ۵۴ دقیقه طول شرقی قرار گرفته است. این منطقه حدود ۴۵۸۰۰ کیلومتر مربع مساحت دارد. از مهم‌ترین عوارض توپوگرافی این منطقه، می‌توان به وجود کوهستان سهند و امتداد رشته‌کوه زاگرس در غرب دریاچه‌ی ارومیه اشاره کرد. جلگه‌ی ارومیه و دشتهای تبریز و سراب، مهم‌ترین مناطق پست ارتفاعی این محدوده را تشکیل می‌دهند. در شکل شماره‌ی ۱، موقعیت حوضه‌ی آبریز دریاچه‌ی ارومیه و ایستگاه‌های سینوپتیک و کلیماتولوژی نشان داده شده است.



شکل ۱. موقعیت حوضه‌ی آبریز دریاچه‌ی ارومیه

مواد و روش‌ها

در پژوهش حاضر از داده‌های ماهواره‌ای و هواشناسی به شرح زیر استفاده شد:

۱. تصاویر طیفی سنجنده‌ی MODIS با قدرت تفکیک مکانی یک کیلومتر، شامل باندهای ۱۳ (۶۷۲-۶۶۲ نانومتر)، ۱۶ (۸۷۷-۸۶۲ نانومتر) و ۳۱ (۱۱/۲۸-۱۰/۷۸ میکرومتر) از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۱ برای هفته‌ی اول ماه می. گفتنی است که تصویر سال ۲۰۱۰ در دسترس نبوده، بنابراین خشکسالی برای این سال محاسبه نمی‌شود. همچنین باید یادآور شد که تصاویر برای یکی از روزهای ۱ تا ۳ می که آسمان خالی از ابر بوده انتخاب شده است. تمامی تصاویر از تارنمای گلوپس^۱ دریافت شده و روی آنها اصلاحات لازم انجام گرفته شده است.

۲. مجموع بارندگی ماه‌های مارس، آوریل و می برای هفت ایستگاه (تبریز، سراب، ارومیه، بناب، مراغه، تکاب، سقز) از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۱.

همچنین در این پژوهش از نرم‌افزارهای ENVI4.7، ERDAS IMAGINE9.2، ArcGIS10، Excel و SPSS استفاده شده است.

برای محاسبه شاخص‌های NDVI، VCI و TCI، ابتدا در نرم‌افزار ENVI، تصحیحات هندسی روی تصاویر موجود انجام گرفت. تصاویر دوباره زمین‌مرجع شدند و باندهای مورد نیاز به‌صورت جداگانه ذخیره و تعداد ۳۳ تصویر آماده شد. بار دیگر یادآور می‌شویم که تصویر سال ۲۰۱۰ در دسترس نبود و در این پژوهش خشکسالی برای این سال محاسبه نشده است.

شاخص NDVI

شاخص NDVI را نخستین بار تاکر^۱ در سال ۱۹۷۹، به‌عنوان شاخصی برای سلامت پوشش گیاهی مطرح کرد.

$$NDVI = (P NIR - P R) / (P NIR + P R) \quad (۱)$$

که در آن P NIR، باند مادون قرمز نزدیک و P R، باند قرمز است. شاخص NDVI پتانسیل گیاهی (تیلت^۲ و همکاران، ۱۹۹۷)، درصد پوشش سبز گیاهی، شاخص درصد نواحی برگ‌دار و انبوه‌های گیاهی را انعکاس می‌دهد. این شاخص رایج‌ترین شاخص پوشش گیاهی است. پوشش گیاهی در حالت سلامت، امواج باند مادون قرمز نزدیک را به خوبی منعکس می‌کند. در این شاخص مقدار عددی هر پیکسل بین +۱ و -۱ تغییر می‌کند. این شاخص برای مناطق دارای پوشش گیاهی از ۰/۱ (تنک) تا ۰/۸ (متراکم) است. (تنکابایل و همکاران، ۲۰۰۲؛ رسولی، ۱۳۸۷: ۴۶۳).

معادله‌ی این شاخص در نرم‌افزار ERDAS اجرا شد. بدین منظور از باندهای ۱۳ و ۱۶ استفاده و NDVI برای سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۱ (اول ماه می) به‌دست آمد.

شاخص VCI

شاخص VCI برای نخستین بار توسط کوگان^۳ در سال ۱۹۹۵ پیشنهاد شده است. این شاخص نشان می‌دهد که چگونه NDVI ماه جاری به NDVI محاسبه شده از طریق ثبت داده‌های دراز مدت نزدیک می‌شود:

$$VCI = (NDVI_i - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min}) \times 100 \quad (۲)$$

در این رابطه $NDVI_{max}$ و $NDVI_{min}$ از طریق داده‌های ثبت شده‌ی دراز مدت (۲۰۰۰ تا ۲۰۱۱) برای

1. Tucker
2. Teillet
3. Kogan

اول ماه می محاسبه شده است و i نشان‌دهنده‌ی سال جاری است. شرایط و وضعیت پوشش گیاهی توسط VCI، به صورت درصد اندازه‌گیری می‌شود. زمانی که مقدار VCI برابر ۱۰۰ درصد باشد، مقدار NDVI برای ماه برابر $NDVI_{max}$ است. درجه‌های مختلفی از شدت خشکسالی با VCI زیر ۴۰ درصد نشان داده می‌شود. زمانی که VCI به صفر درصد نزدیک می‌شود، نشانگر یک ماه بسیار خشک است و وقتی که مقدار NDVI به بیشترین مقدار نزدیک می‌شود، وضعیت خشکسالی بهبود می‌یابد. مقادیر کم VCI برای فواصل زمانی پی‌درپی، اشاره به ازدیاد خشکسالی دارد (تنکابیل و همکاران، ۲۰۰۴).

معادله‌ی این شاخص در Model Maker نرم‌افزار ERDAS اجرا شد و از NDVI به دست آمده برای این کار استفاده شد. در نرم‌افزار ERDAS مدل این شاخص برنامه نویسی و نتایج برای هر سال (۲۰۰۰ تا ۲۰۱۱) محاسبه شد.

شاخص TCI

شاخص TCI را نیز کوگان در سال ۱۹۹۵ پیشنهاد کرد و الگوریتم محاسباتی آن شبیه VCI است؛ ولی معادله‌ی آن برای انعکاس پاسخ حرارتی پوشش گیاهی تعریف شده است (هرچه حرارت بیشتر باشد، میزان شدت خشکسالی نیز بیشتر است). شاخص TCI بر مبنای دمای درخشایی^۱ است و انحراف مقادیر سال جاری را از مقادیر بیشینه‌ی ثبت شده نشان می‌دهد:

$$TCI = (BT_{max} - BT_i) / (BT_{max} - BT_{min}) * 100 \quad \text{رابطه‌ی ۳}$$

در این رابطه، مقادیر BT دمای درخشایی (باند ۳۱) و i نشان‌دهنده‌ی سال جاری است. مقادیر بیشینه و کمینه‌ی BT از داده‌های ثبت شده‌ی درازمدت برای هر سال به دست می‌آید. هنگامی که مقدار TCI به ۱۰۰ درصد می‌رسد BT برای این ماه برابر کمترین مقدار BT درازمدت برای پیکسل است. مقادیر کم TCI (نزدیک به صفر درصد) نشان‌دهنده‌ی هوای بسیار گرم در سال مورد نظر است. هنگامی که TCI به صفر درصد می‌رسد، BT آن سال برابر بیشترین مقدار BT درازمدت برای پیکسل است. در مجموع برای مشاهدات آب‌وهواشناسی، ارتباط بین حرارت سطحی و رطوبت روی زمین، تأثیرات ناحیه‌ای خشکسالی را قبل از دست دادن توده‌های گیاهی کشف می‌کنند. از این رو، TCI می‌تواند نقش مهمی در پایش خشکسالی ایفا کند (تنکابیل و همکاران، ۲۰۰۴).

از باند ۳۱ سنجنده‌ی MODIS که حرارتی بوده، برای محاسبه‌ی این شاخص استفاده شد. بنابراین در Model Maker نرم‌افزار ERDAS مدل این شاخص برنامه نویسی و نتایج برای هر سال به دست آمد. در مطالعه‌ی حاضر تأکید بر دانش سنجش از دور و تصاویر ماهواره‌ای است و از شاخص‌های هواشناسی

برای برآورد خشکسالی استفاده نخواهد شد؛ اما همان گونه که در ادامه نشان داده می‌شود، هر شاخص نتایج متفاوتی را نمایش می‌دهد. بنابراین باید کارایی هر شاخص را ارزیابی کرد تا میزان دقت و توانایی آنها در برآورد خشکسالی مشخص شود. برای این کار، همانند مطالعات دیگری که انجام گرفته از شاخص SPI در مقیاس زمانی سه‌ماهه استفاده خواهد شد.

شاخص SPI

این شاخص برای کمی کردن کمبود بارش یا میزان خشکسالی در بازه‌های زمانی چندگانه (۳، ۶، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه) طراحی شده است. این مقیاس‌های زمانی متفاوت، اثرات ویژه‌ی خشکسالی را روی قابلیت دسترسی به منابع آبی مختلف بیان می‌کند و دقت محاسبات را بالا می‌برد. شاخص SPI در مطالعه‌ی تأثیرات کمبود بارش روی آبهای زیرزمینی، ذخایر و منابع آب سطحی، رطوبت خاک و جریان آبراهه‌ها، کارایی مناسبی دارد (قلی‌زاده، ۱۳۸۳: ۸۲).

بر اساس مطالعه‌ی مک کی و همکارانش (۱۹۹۳)، از بین سری‌های مختلف SPI، دوره‌های زمانی ۱، ۳ و ۶ ماهه، به‌عنوان دوره‌های کوتاه‌مدت و دوره‌های ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه، به‌عنوان دوره‌های بلندمدت تعیین شده‌اند. سری‌های کوتاه‌مدت در بررسی خشکسالی‌های کشاورزی و سری‌های بلندمدت در شناسایی و بررسی خشکسالی‌های هیدرولوژیکی کاربرد دارند.

SPI در مقیاس زمانی سه‌ماهه نوسان‌های زیادی دارد و در مقیاس زمانی بلندمدت، این نوسان‌ها کاهش می‌یابد و می‌تواند چنین تفسیر شود که SPI کوتاه‌مدت نسبت به شرایط رطوبتی بسیار حساس است و بنابراین با کوچک‌ترین تغییر در بارندگی ماهانه، SPI به‌سرعت پاسخ می‌دهد، اگر این تغییرات مثبت باشد SPI به بالای صفر نوسان می‌کند و چنانچه تغییرات منفی باشد، SPI به زیر صفر نوسان می‌کند. این قابلیت، SPI را به‌منزله‌ی یک ابزار قوی برای پایش شرایط رطوبتی و تغییرات کوتاه‌مدت (خشکسالی کشاورزی) نشان می‌دهد (بداق جمالی و همکاران، ۱۳۸۴: ۸۸).

در جدول شماره ۱، رتبه‌بندی خشکسالی با شاخص‌های VCI، TCI و SPI نشان داده شده است.

جدول ۱. رتبه‌بندی خشکسالی با شاخص‌های VCI، TCI و SPI

VCI & TCI	SPI	
< ۱۰	< -۲	خشکسالی بسیار شدید
۱۰ - ۱۹/۹	-۲ - -۱/۴۹	خشکسالی شدید
۲۰ - ۲۹/۹	-۱/۵ - -۰/۹۹	خشکسالی متوسط
۳۰ - ۳۹/۹	-۱ - ۰	خشکسالی خفیف
≥ ۴۰	> ۰	غیر خشکسالی

منبع: بویان، ۲۰۰۸

از آنجا که در این پژوهش بر روش‌های سنجش از دوری تأکید شده است، شاخص SPI فقط برای سال ۲۰۱۱ (با توجه به دوره‌ی ۱۲ ساله) محاسبه شد و با توجه به نتایج همبستگی این شاخص با شاخص‌های سنجش از دوری، موفقیت پژوهش ارزیابی شد. برای محاسبه‌ی SPI در اول ماه می، از مجموع بارندگی‌های فوریه، مارس و آوریل استفاده شد. آماده‌سازی اولیه‌ی داده‌های بارش در نرم‌افزار Excel انجام شد و در ادامه، داده‌ها به نرم‌افزار DIP انتقال یافت و شاخص SPI برای هفت ایستگاه به‌دست آمد. این نرم‌افزار از تارنمای اداره‌ی هواشناسی استان اردبیل تهیه شد.

پس از آنکه معادلات روی تصاویر اجرا شد، نتایج به‌دست آمده به نرم‌افزار Arc Map انتقال یافت و براساس جدول شماره‌ی ۱، رتبه‌بندی خشکسالی شاخص‌ها روی آنها انجام گرفت و نقشه‌های نهایی به‌دست آمد.

درنهایت برای ارزیابی کارایی شاخص‌های VCI و TCI، در نرم‌افزار ArcGIS مقادیر این شاخص‌ها در هفت ایستگاه نام‌برده در سال ۲۰۱۱، از روی نقشه‌ها استخراج شد. سپس بین این مقادیر و مقادیر شاخص SPI در سال ۲۰۱۱ (نسبت به دوره‌ی ۱۲ ساله)، در نرم‌افزار SPSS همبستگی پیرسون برقرار شد و نتایج به‌دست آمد.

یافته‌های پژوهش

پس از انجام محاسبات، نتایج حاصل از شاخص‌های VCI و TCI به‌دست آمد که در ادامه خواهند آمد. در شکل شماره‌ی ۲، نقشه‌های خشکسالی با شاخص VCI و در شکل شماره‌ی ۳، نقشه‌های حاصل از شاخص TCI از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۱ نشان داده شده است.

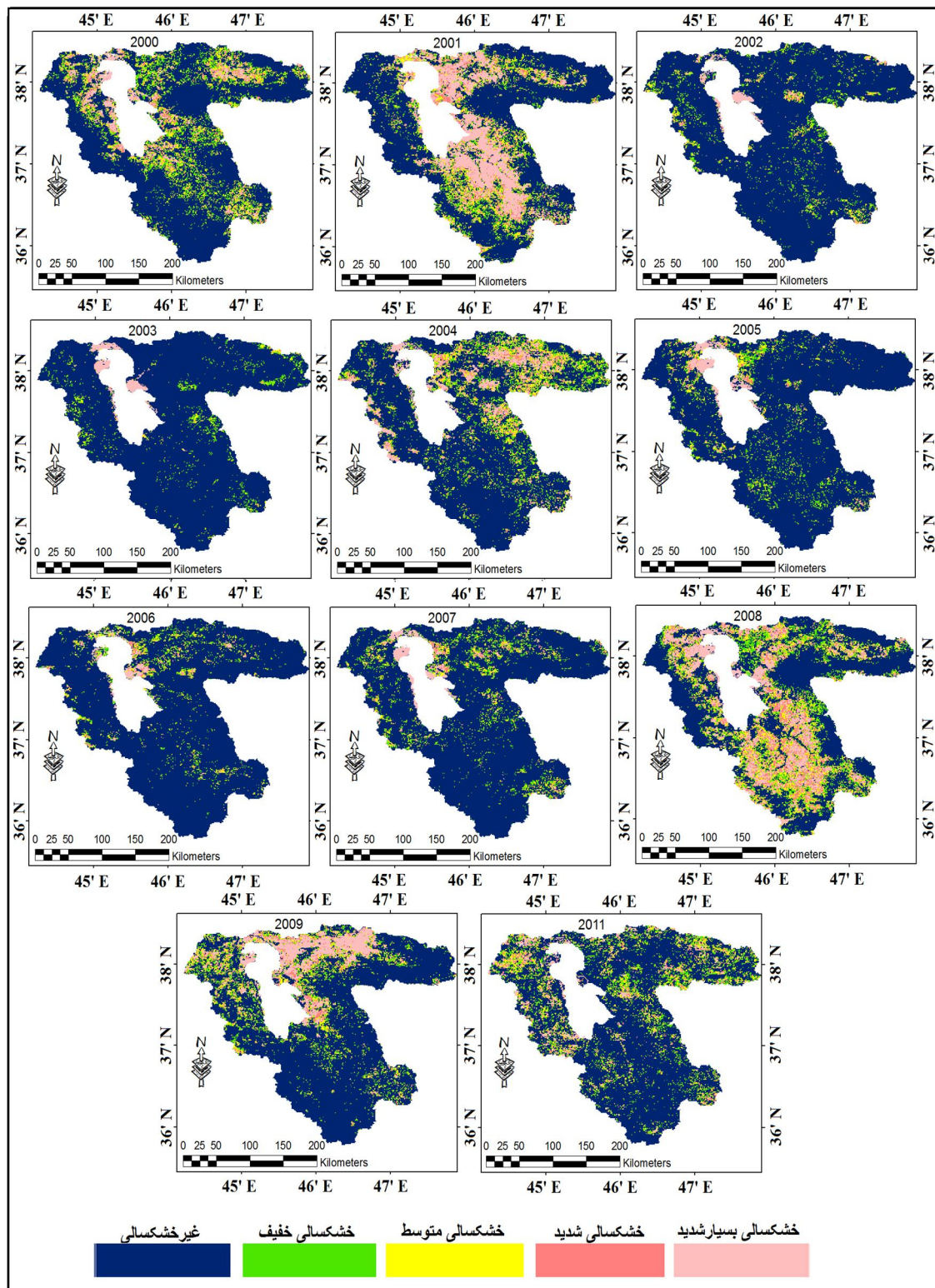
با توجه به شکل شماره‌ی ۲، سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۰۱ و پس از آن، سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۴ و ۲۰۰۹ بیشترین و شدیدترین خشکسالی‌ها را داشته‌اند. در سال ۲۰۰۰ اطراف دریاچه‌ی ارومیه با خشکسالی شدید و بسیار شدید روبه‌رو بوده است. در سال ۲۰۰۱ حوضه‌ی رودخانه‌های سیمینه‌رود، زرینه‌رود و آجی چای با خشکسالی بسیار شدید مواجه شده‌اند. به‌طور کلی محدوده‌های شرقی و جنوبی دریاچه در این سال بیشترین خشکسالی را داشته‌اند. بیشترین خشکسالی‌ها در سال ۲۰۰۴، به حوضه‌ی رودخانه‌ی آجی چای و همچنین شهرستان‌های تبریز و مراغه مربوط می‌شود. در سال ۲۰۰۸ خشکسالی از نوع شدید کمابیش تمامی محدوده را دربرگرفته است. تمامی مناطق اطراف دریاچه‌ی ارومیه در این سال با خشکسالی روبه‌رو بوده‌اند. در سال ۲۰۰۹ شهرستان‌های تبریز، شبستر و ارومیه بیشترین و شدیدترین خشکسالی را داشته‌اند. در سال ۲۰۱۱ خشکسالی به‌صورت پراکنده در کل منطقه دیده می‌شود.

جدول ۲. مساحت و درصد طبقات خشکسالی با استفاده از شاخص VCI از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۱ (km²)

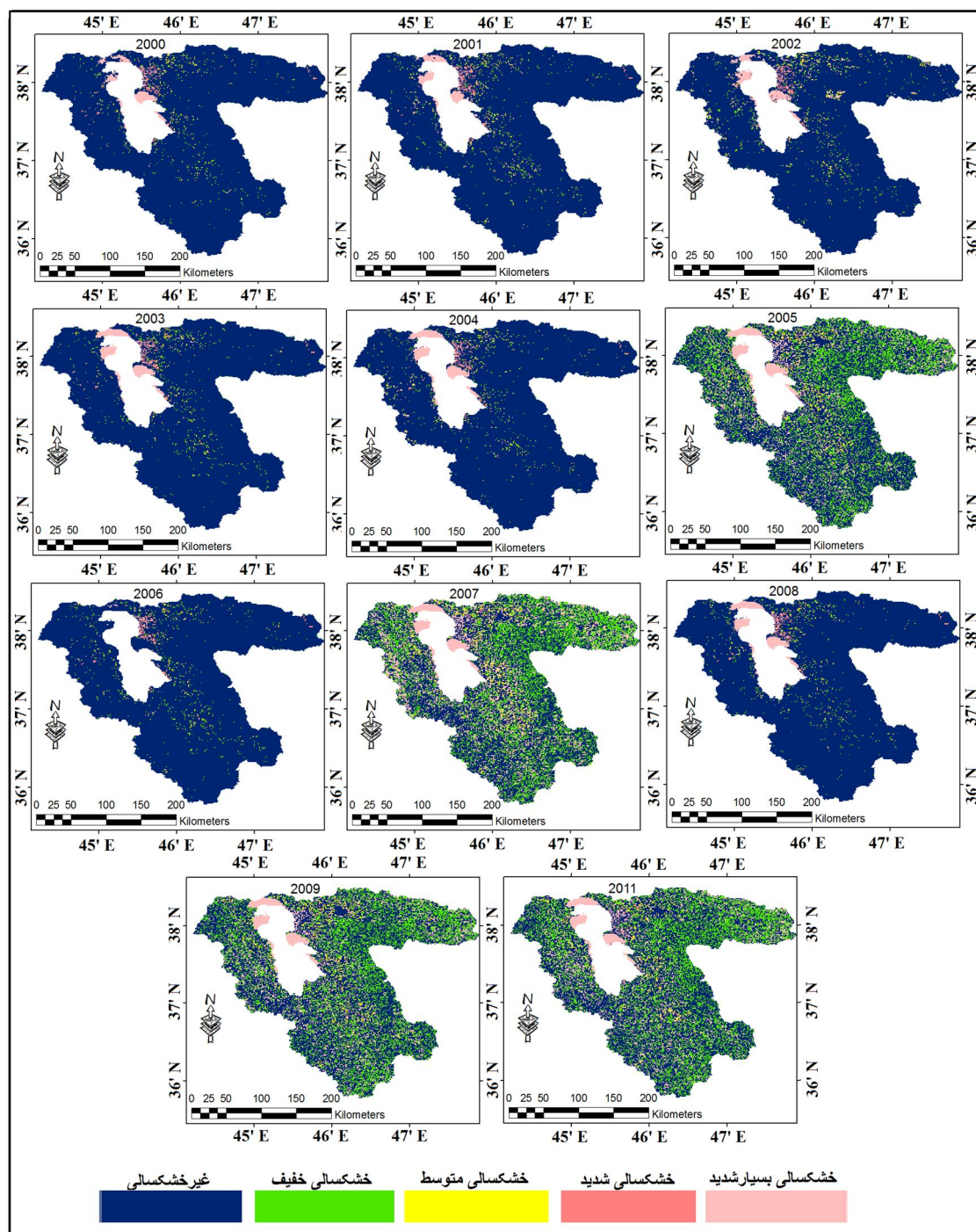
	غیر خشکسالی		خشکسالی خفیف		خشکسالی متوسط		خشکسالی شدید		خشکسالی بسیار شدید	
	مساحت	درصد	مساحت	درصد	مساحت	درصد	مساحت	درصد	مساحت	درصد
۲۰۰۰	۳۱۸۷۶	۶۹/۶	۵۴۵۶	۱۲	۳۷۲۵	۸/۱	۲۲۹۱	۵	۲۴۵۲	۵/۳
۲۰۰۱	۲۶۴۷۳	۵۷/۸	۴۰۵۰	۸/۸	۳۷۴۸	۸/۲	۳۳۲۳	۷/۲	۸۲۰۶	۱۸
۲۰۰۲	۴۱۱۲۰	۹۰	۲۲۹۹	۵	۱۰۷۸	۲/۳	۴۵۸	۱	۸۴۵	۱/۸
۲۰۰۳	۴۲۵۰۸	۹۲/۸	۱۶۹۰	۳/۷	۵۶۹	۱/۲	۱۲۶	۰/۳	۹۰۷	۲
۲۰۰۴	۳۱۹۵۴	۶۹/۹	۴۷۵۶	۱۰/۴	۳۶۱۶	۷/۹	۲۳۵۴	۵/۱	۳۱۱۹	۶/۸
۲۰۰۵	۳۹۹۷۰	۸۷/۲	۲۶۴۰	۵/۷	۱۳۱۳	۲/۸	۶۴۰	۱/۴	۱۲۳۸	۲/۷
۲۰۰۶	۴۱۲۴۶	۹۰	۱۸۳۱	۴	۱۲۱۹	۲/۶	۶۷۷	۱/۵	۸۲۷	۱/۸
۲۰۰۷	۳۹۲۲۶	۸۵/۶	۲۹۴۲	۶/۴	۱۵۹۶	۳/۵	۸۴۹	۱/۸	۱۱۸۷	۲/۶
۲۰۰۸	۲۳۰۹۹	۵۰/۴	۵۸۴۲	۱۲/۷	۵۶۰۲	۱۲/۲	۴۹۳۱	۱۰/۷	۶۳۲۸	۱۴
۲۰۰۹	۳۲۱۶۲	۷۰/۲	۳۸۲۶	۸/۳	۲۹۶۸	۶/۵	۲۱۷۱	۴/۷	۴۶۷۳	۱۰/۲
۲۰۱۱	۳۳۲۶۵	۷۲/۳	۵۱۴۹	۱۱/۲	۳۳۳۲	۷/۳	۲۰۰۱	۴/۳	۲۰۵۳	۴/۴

جدول ۳. مساحت و درصد طبقات خشکسالی با استفاده از شاخص TCI از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۱ (km²)

	غیر خشکسالی		خشکسالی خفیف		خشکسالی متوسط		خشکسالی شدید		خشکسالی بسیار شدید	
	مساحت	درصد	مساحت	درصد	مساحت	درصد	مساحت	درصد	مساحت	درصد
۲۰۰۰	۴۳۹۷۴	۹۶	۴۴۱	۰/۹	۲۶۸	۰/۶	۲۹۸	۰/۶	۸۱۹	۱/۸
۲۰۰۱	۴۳۵۵۳	۹۵/۳	۵۵۴	۱/۲	۳۶۵	۰/۷	۳۵۶	۰/۷	۹۷۲	۲/۱
۲۰۰۲	۴۳۰۴۸	۹۴	۶۹۶	۱/۵	۴۹۶	۱/۱	۳۲۲	۰/۷	۱۲۳۸	۲/۷
۲۰۰۳	۴۳۵۴۶	۹۵/۱	۵۹۲	۱/۳	۲۶۶	۰/۶	۳۰۳	۰/۶	۱۰۹۳	۲/۴
۲۰۰۴	۴۳۳۲۶	۹۴/۶	۵۲۱	۱/۱	۳۲۲	۰/۷	۲۹۲	۰/۶	۱۳۳۹	۳
۲۰۰۵	۲۷۶۲۹	۶۰/۳	۱۰۹۷۴	۲۳/۹	۸۸۱	۱/۹	۱۳۴	۰/۳	۶۱۸۲	۱۳/۵
۲۰۰۶	۴۴۲۹۷	۹۶/۷	۶۹۵	۱/۵	۲۸۲	۰/۶	۳۳۱	۰/۷	۱۹۵	۰/۴
۲۰۰۷	۲۴۲۰۸	۵۳	۱۱۸۱۳	۲۵/۸	۱۰۶۹	۲/۳	۱۶۸	۰/۳	۸۵۴۲	۱۸/۶
۲۰۰۸	۴۳۴۵۳	۹۵	۶۳۲	۱/۴	۲۵۴	۰/۵	۳۲۱	۰/۷	۱۱۴۰	۲/۴
۲۰۰۹	۲۶۰۵۴	۵۷	۱۱۸۱۱	۲۵/۷	۹۶۰	۲/۱	۱۵۸	۰/۳	۶۸۱۷	۱۴/۹
۲۰۱۱	۲۵۶۸۶	۵۶	۱۲۴۸۴	۲۷/۳	۶۵۰	۱/۳	۱۶۰	۰/۴	۶۸۲۰	۱۴/۹



شکل ۲. نقشه‌های خشکسالی حاصل از شاخص VCI از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۱



شکل ۳. نقشه‌های خشکسالی حاصل از شاخص TCI از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۱

با توجه به شکل شماره ۳، سال‌های ۲۰۰۵، ۲۰۰۷، ۲۰۰۹ و ۲۰۱۱ بیشترین خشکسالی را داشته‌اند که بیشتر از نوع خشکسالی خفیف بوده است، بقیه‌ی سال‌ها خشکسالی محسوسی روی نداده است. نکته‌ی گفتنی اینکه در تمامی سال‌ها، در غرب شهرستان تبریز به‌طرف دریاچه‌ی ارومیه خشکسالی‌هایی دیده می‌شود.

همان‌گونه که پیش از این اشاره شد، در این مطالعه بر تصاویر ماهواره‌ای و شاخص‌های سنجش از دوری تأکید شده است. بنابراین همبستگی این شاخص‌ها با شاخص SPI فقط برای سال ۲۰۱۱ محاسبه شد. مقادیر محاسبه شده از شاخص SPI و همچنین مقادیر استخراج شده از شاخص‌های VCI و TCI در سال ۲۰۱۱ در ایستگاه‌ها در جدول شماره‌ی ۴، نشان داده شده است.

جدول ۴. مقادیر شاخص‌های VCI، TCI و SPI در ایستگاه‌ها در سال ۲۰۱۱

SPI	TCI	VCI	
۱/۰۸	۴۴	۸۰	تبریز
۱/۶۶	۴۹	۶۸	بناب
۰/۹۲	۴۲	۴۷	سراب
۱/۰۸	۶۵	۴۸	مراغه
۰/۳۸	۴۸	۴۷	سقز
-۰/۳	۴۵	۳۱	تکاب
۰/۶۷	۳۷	۳۰	ارومیه

با توجه به مقادیر جدول شماره‌ی ۴، ضریب همبستگی بین شاخص VCI و SPI برابر ۰/۷ و بین شاخص TCI و شاخص SPI برابر ۰/۲۵ به دست آمد. سطح معناداری نیز برای شاخص VCI قابل قبول بوده، ولی برای شاخص TCI قابل قبول نیست. بنابراین شاخص VCI همبستگی بیشتری را با بارش سه‌ماهه داشته و نتایج آن قابل اعتمادتر از شاخص TCI است.

بحث و نتیجه‌گیری

در پژوهش پیش رو دو هدف عمده در نظر گرفته شد: اول، کارایی شاخص‌های سنجش از دوری، به‌ویژه شاخص‌های VCI و TCI در برآورد خشکسالی و دوم، استفاده از داده‌های سنجنده‌ی قدرتمند و پُرکاربرد MODIS به‌جای سنجنده AVHRR. از اهداف جانبی می‌توان به برآورد خشکسالی حوضه‌ی آبریز دریاچه‌ی ارومیه از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۱ اشاره کرد. با استفاده از شاخص VCI سال‌های ۲۰۰۸، ۲۰۰۱، ۲۰۰۲، ۲۰۰۴ و ۲۰۰۹ به‌ترتیب بیشترین خشکسالی را داشته‌اند. همچنین با شاخص TCI سال‌های ۲۰۰۵، ۲۰۰۷، ۲۰۰۹ و ۲۰۱۱ از بیشترین میزان خشکسالی برخوردارند. همان‌گونه که دیده می‌شود، نتایج شاخص‌ها متفاوت است، بنابراین باید از یک معیار برای ارزیابی کارایی این شاخص‌ها استفاده می‌شود. شاخص SPI در مقیاس زمانی سه‌ماهه (ارتباط داشتن با پوشش گیاهی) به‌عنوان معیار برگزیده شد. با توجه به نتایج حاصل از همبستگی‌ها، همبستگی شاخص VCI با شاخص SPI برابر ۰/۷ به دست آمد که از همبستگی قوی برخوردار است، بنابراین

شاخص VCI خشکسالی را دقیق‌تر نشان داده و روش مناسب‌تری برای برآورد خشکسالی است. از سوی دیگر، در این پژوهش به جای سنجنده‌ی AVHRR که دارای ۴ باند است، از سنجنده MODIS استفاده شد. این سنجنده دارای ۳۶ باند بوده و تصاویری با قدرت تفکیک مکانی، زمانی و رادیومتریک بهتری ارائه می‌دهد. نتایج نشان داد که با استفاده از تصاویر این سنجنده که از هر نظر قوی‌تر از سنجنده‌ی AVHRR است، می‌توان خشکسالی را محاسبه کرد. در آخر می‌توان این‌گونه نتیجه‌گیری کرد که شاخص VCI و تصاویر MODIS، می‌توانند جایگزین مناسبی برای شاخص‌های هواشناسی برای برآورد خشکسالی باشند و با توجه به اینکه در تصاویر ماهواره‌ای، تعداد نقاط نمونه‌برداری بسیار بیشتر از تعداد ایستگاه‌های زمینی است، استفاده از دانش سنجش از دور پیشنهاد می‌شود.

منابع

- باعقیده، محمد؛ علیجانی، بهلول و ضیائی، پرویز. (۱۳۸۹). بررسی امکان استفاده از شاخص NDVI در تحلیل خشکسالی‌های استان اصفهان، مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، سال اول، شماره ۴، صص. ۱۶-۱.
- بداق جمالی، جواد؛ آسیایی، مهدی؛ صمدی نقاب، سینا و جوانمرد، سهیلا. (۱۳۸۴). مدیریت خشکسالی (شناخت و راهکارها)، چاپ اول، مشهد: انتشارات سخن گستر.
- پرویز، لاله؛ خلقی، محمدرضا؛ ولیزاده کامران، خلیل. (۱۳۸۸). پایش خشکسالی با استفاده از شاخص پوشش گیاهی و دمای سطح زمین حاصل از تصاویر ماهواره‌ی Terra-MODIS، چهارمین کنفرانس سراسری آبخیزداری و مدیریت منابع آب و خاک، آذر ۱۳۸۸، کرمان: ۱۰۸۱-۱۰۷۳.
- جهانبخش اصل، سعید؛ ساری صراف، بهروز؛ خورشید دوست، علی محمد؛ رستم‌زاده، هاشم. (۱۳۸۸). ارزیابی تغییرات پوشش گیاهی دشت سراب و تحلیل دو دوره‌ی خشکسالی و ترسالی، فصلنامه علمی - پژوهشی انجمن جغرافیای ایران، سال هفتم، شماره ۲۳، صص. ۱۳۲-۱۱۷.
- خواجه، فاطمه. (۱۳۸۶). پایش خشکسالی با استفاده از شاخص اختلاف پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) در استان اصفهان، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه اصفهان.
- رحیم زاده، پریناز. (۱۳۸۴). بررسی امکان استفاده از تصاویر NOAA-AVHRR برای پایش خشکسالی، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، دانشکده‌ی محیط زیست.
- شمسی‌پور، علی‌اکبر؛ علوی‌پناه، کاظم؛ محمدی، حسین. (۱۳۸۹). بررسی کارایی شاخص‌های گیاهی و حرارتی ماهواره‌ی NOAA-AVHRR در تحلیل خشکسالی منطقه‌ی کاشان، فصلنامه‌ی علمی - پژوهشی تحقیقات مرتع و بیابان ایران، جلد ۱۷، شماره ۳، صص. ۴۶۵-۴۴۵.
- قلی‌زاده، مریم. (۱۳۸۳). پیش‌بینی و پایش آگاهی خشکسالی در غرب ایران، پایان‌نامه‌ی دکترای اقلیم‌شناسی، تهران: دانشگاه تربیت معلم.

- Bhuiyan, C. (2008). **Desert Vegetarian during Droughts: Response and Sensitivity**, the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVII. Part B 8: 907-912.
- Bhuiyan, C., Singh, R.P., Kogan, F.N. (2006). **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 8: 289–302.
- Heim, R. R. (2002). **A Review of Twentieth-century Drought Indices Used in United States**, Bulletin of the American Meteorological Society, 84: 1149-1165.
- Karnieli, A., Bayasgalan, M., Bayarjargal, Y., Agam, N., Khudulmur, S., Tucker, C. J. (2006). **Comments on the Use of the Vegetation Health Index over Mongolia**, International Journal of Remote Sensing, Vol. 27, No. 10: 2017-2024.
- Kogan, F, N. (1995), Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection, Advances in Space Research, 15 (11): 91-100.
- Mckee, T.B., Doesken, N.J.and Kleist.J. (1993). **the Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scale**, Proceedings of the Eight Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society, Boston, M.A: 179-184.
- Owringi, M. A., Adamowski, J., Rahnemaei, N., Mohammadzadeh, A., Afshin Sharifan, R., et al. (2011). **Drought Monitoring Methodology Based on AVHRR Image and SPOT Vegetation Maps**, Journal of Water Resource and Protection, 2011, 3: 325-334.
- Rhee, J. (2010). **Monitoring Agricultural Drought for Arid and Humid Regions Using Multi-sensor Remote Sensing Data**, Remote Sensing of Environment 114, 2875–2887.
- Roswintarti, O., Oarwati, S., Anggraini, N. (2010). **Potential Drought Monitoring over Agriculture Area in Java Island, Indonesia**, Indonesian National Institute of Aeronautics and Space (LAPAN), Progress Report of SAFE Prototype Year.
- Teillet, P. M., Staenz, K., Willams, D. J. (1997). **Effects of Spectral, Spatial, and Radiometric Characteristics on Remote Sensing Vegetation Indices of Forested Regions**, Remote Sensing of Environment, 61: 139–149.
- Thenkabail, P. S., Gamage, M. S. D. N., Samakhtin, V, U. (2002). **Evaluation of Narrowband and Broadband Vegetation Indices for Determining Optimal Hyperspectral Wavebands for Agricultural Crop Characterization**, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 68: 607-621.
- Thenkabail, P.S., Enclona, E. A., Ashton, M. S., Legg, C., Jean De Dieu, M. (2004). **The Use of Remote Sensing Data for Drought Assessment and Monitoring in Southwest Asia**, International Water Management Institute, PO Box 2075, Colombo, Sri Lanka
- Tucker, C. J. (1979). **Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation**, Remote Sensing of Environment 8: 127–150.
- Wilhite, D. A. (2000). **Drought as a natural hazard**. In: Wilhite, D. A (Editor), **Drought: A Global Assessment**, Routledge, London.

Zhang, M., Zhu, X., Fan, J., Li, G., Zhang, Y. (2009). **Monitoring Drought Dynamics in Huanghuai Region of China Using AVHRR-based Vegetation Health Indices in Comparison with Ground Data**, Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XI, Edited by Christopher M. U. Neale, Antonino Maltese, Proc. of SPIE 10: 1131-1145.