

ارزیابی پایش خشکسالی کشاورزی با استفاده از شاخص‌های مختلف بر اساس داده‌های زمینی و سنجش از دور، مطالعه موردی: حوزه آبخیز دریاچه ارومیه

نغمه نوابی^۱، مه‌نوش مقدسی^{۲*} و ناصر گنجی خرم‌دل^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اراک، ^۲ دانشیار، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اراک و ^۳ استادیار، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه اراک

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۸/۱۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۱۲

چکیده

خشکسالی پدیده‌ای است، طبیعی که تقریباً در تمامی اقلیم‌های جهان رخ می‌دهد. اثرات این پدیده خزننده و آرام در مناطق خشک و نیمه‌خشک به دلیل بارندگی سالانه کمترشان، بیشتر است. در مقابل روش‌های سنتی که مبتنی بر مشاهدات ایستگاه‌های هواشناسی هستند و بیشتر به بررسی خشکسالی هواشناسی می‌پردازند، استفاده از تکنیک سنجش از دور و تصاویر ماهواره‌ای به‌عنوان یک ابزار مفید برای پایش خشکسالی کشاورزی مورد توجه قرار گرفته است. در پژوهش حاضر، هدف مقایسه و ارزیابی پایش خشکسالی کشاورزی در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه با استفاده از شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI)، شاخص سلامت پوشش گیاهی (VHI) و شاخص وضعیت دمایی (TCI) طی سال‌های ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۰ با استفاده از سنجده مادیس است. بدین منظور، ابتدا شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI) از روی تصاویر مادیس طی ماه‌های خرداد، تیر، مرداد و شهریور محاسبه شد. سپس، با مقایسه میانگین این شاخص طی ماه‌های مذکور، ماه شهریور با بیشینه مقدار به‌عنوان ماه معرف برگزیده شد. با توجه به کمینه و بیشینه شاخص NDVI در ماه شهریور سال‌های ۱۳۸۲ و ۱۳۸۷، نقشه‌های پهنه‌بندی شاخص‌های خشکسالی سنجش از دور VCI، VHI و TCI تهیه شده است. در ادامه، برای بررسی عملکرد شاخص‌های خشکسالی کشاورزی مقادیر ضریب همبستگی برای نمایه‌های VCI، VHI و TCI با شاخص هواشناسی SPI محاسبه شد. نتایج نشان داد که نمایه سنجش از دور از دقت خوبی در برآورد پراکندگی مکانی و زمانی خشکسالی کشاورزی برخوردار است، به‌طوری‌که ضریب همبستگی بین نمایه VHI و SPI برابر ۰/۸۶ به‌دست آمد که نشان‌دهنده تطابق این شاخص با شاخص هواشناسی SPI است.

واژه‌های کلیدی: شاخص بارش استاندارد شده (SPI)، شاخص سلامت پوشش گیاهی (VHI)، شاخص نرمال‌شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI)، شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI)، شاخص وضعیت دمایی (TCI)

مقدمه

منابع آبی، کشاورزی، محیط زیست و حتی بخش‌های اجتماعی و اقتصادی جامعه را تحت تاثیر قرار می‌دهد. شاخص‌های معمول ارزیابی و پایش خشکسالی اغلب وابسته به داده‌های بارش هستند. یکی از مهمترین

خشکسالی از جمله بلاهای طبیعی با شروعی آرام و ماهیتی خزننده است که تقریباً در تمام اقلیم‌ها رخ می‌دهد و در یک دوره زمانی نسبتاً طولانی، اقلیم،

کشاورزی پیشنهاد دادند. این شاخص از جایگزینی NDVI و TS با شاخص اختلاف آب نرمال شده NDWI و تفاوت تضاد شبانه روز d_{ts} به دست می آید. بدین منظور، از تصاویر ماهواره‌های مادیس طی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۱، داده‌های بارش ماهانه طی سال‌های ۱۹۷۰ تا ۲۰۱۰ و داده‌های سالانه عملکرد گندم زمستانه طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۲ استفاده شده است. نتایج نشان داد که شاخص مناسبی برای پایش خشکسالی کشاورزی است. Sharful و همکاران (۲۰۱۳) به ارزیابی آسیب‌پذیری خشکسالی در شمال غرب بنگلادش با استفاده از تصاویر NDVI و LST سنجنده MODIS پرداختند. آن‌ها پس از محاسبه شاخص VCI از NDVI، شاخص TCI از LST، شاخص VHI را برای سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۸ و ۲۰۱۴ محاسبه کردند. نتایج نشان داد که شاخص VHI برای تعیین مناطق تحت تأثیر خشکسالی شاخص مناسبی است. Zhang و همکاران (۲۰۱۳) در منطقه شمال چین، خشکسالی را با به‌کارگیری شاخص‌های PCI، SMTCI، PTCI، PSMCI، VCI، TCI، SMCi و MIDI حاصل از داده‌های ماهواره‌های MODIS، TRMM و AQUA در مقایسه با شاخص آماری SPI مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که در عین حال، شاخص MIDI عملکرد بهتری نسبت به شاخص‌های خشکسالی سنجنش از راه دور دیگر، در نظارت بر خشکسالی دارد. این شاخص، بالاترین همبستگی را با SPI یک‌ماهه نشان داد. نتایج نشان داد که MIDI شاخص بسیار قابل اعتماد در نظارت بر خشکسالی هواشناسی کوتاه‌مدت در سراسر شمال چین و یا مناطق مشابه در سطح جهانی دارد. Zambrano و همکاران (۲۰۱۶) در منطقه بیویو شیلی به منظور بررسی خشکسالی کشاورزی، شاخص‌های VCI و SPI در مقیاس زمانی یک تا شش ماه طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۵ در ۲۶ ایستگاه مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد، SPI سه‌ماهه بیشترین همبستگی ($r=0.77$) را با شاخص VCI دارد. Asik و Yildirim (۲۰۱۸) خشکسالی کشاورزی در دشت کاواکدره ترکیه را به‌وسیله شاخص‌های NDVI و SAVI و دمای سطح ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که هر دو شاخص مذکور با دمای سطح طی فصل

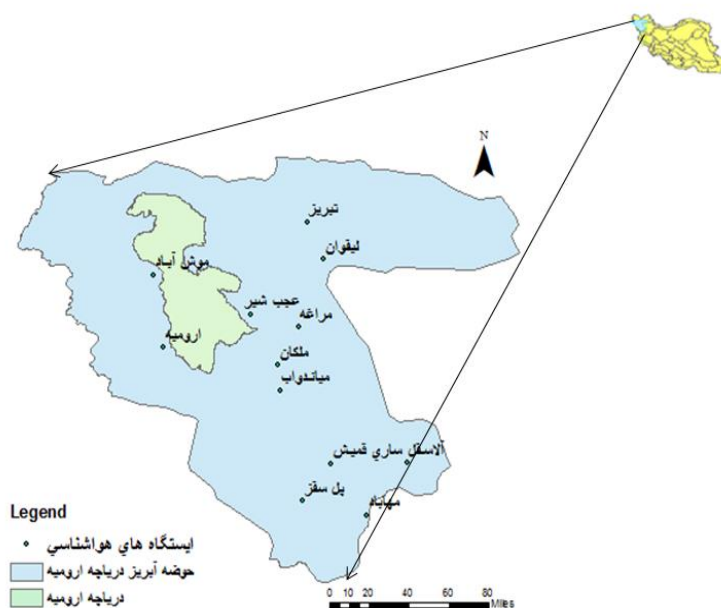
این شاخص‌ها، شاخص بارش استاندارد شده (SPI) است. داده‌های هواشناسی به‌علت دسترسی محدود به محل اندازه‌گیری و در مواردی به‌دلیل ناقص بودن اطلاعات آن برای ارزیابی به‌ویژه در مناطق بزرگ چندان مناسب نیست. بنابراین، استفاده از تکنیک‌های سنجنش از دور، تصاویر ماهواره‌ای و تعریف شاخص‌های مرتبط با سنجنش از دور به‌دلیل ارزان و قابل تکرار بودن، به‌روز بودن و در برگرفتن سطح وسیعی از منطقه مطالعاتی می‌تواند ضمن پوشش کاستی‌های مرتبط با داده‌های هواشناسی ایستگاهی، ارتباط میان خشکسالی هواشناسی و خشکسالی کشاورزی را در پایش دقیق‌تر برقرار سازد (Rostami و همکاران، ۲۰۱۷). با استفاده از شاخص‌های سنجنش از دور می‌توان خشکسالی خصوصاً از نوع کشاورزی را مطالعه کرد و در نتیجه به نتایج دقیق‌تر و موثرتری برای مدل‌سازی خشکسالی دست یافت (Heim، ۲۰۰۲). یکی از موثرترین شاخص‌ها، شاخص نرمال‌شده اختلاف پوشش گیاهی NDVI است (Jensen، ۱۹۹۶) که نخستین‌بار به‌وسیله Tucker به‌عنوان شاخص سلامت تراکم پوشش گیاهی مطرح شد (Tucker، ۱۹۹۷). این شاخص نه‌تنها قابلیت تهیه نقشه حضور پوشش گیاهی بر پایه پیکسل را دارد، بلکه توانایی تعیین تراکم پوشش گیاهی در یک پیکسل را نیز دارا است (Zhang و همکاران، ۲۰۰۳). در همین خصوص، تحقیقات متعددی در سطح جهان صورت پذیرفته است که در بیشتر آن‌ها با به‌کارگیری داده‌ها و روش‌های سنجنش از دور، اقدام به پهنه‌بندی شدت و وسعت خشکسالی کشاورزی شده است. Owrangi و همکاران (۲۰۱۱) به برآورد خشکسالی در استان فارس ایران با استفاده از تصاویر AVHRR و مقایسه با تصاویر ماهواره‌ای SPOT پرداختند. در این پژوهش، از شاخص‌های VCI، TCI و VHI در مقایسه با شاخص‌های SPI، SWI و DSI استفاده شده است. نتایج این پژوهش نشان داد که این روش‌ها برای آگاهی از خشکسالی اولیه مناسب هستند و می‌توانند برای مدیریت ریسک خشکسالی در آب و هوای نیمه‌خشک از جمله استان فارس در ایران استفاده شوند. Son و همکاران (۲۰۱۲) در پژوهش خود شاخص جدیدی به‌نام VDI را برای پایش خشکسالی

ماهواره‌ای بررسی می‌شود.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعاتی و داده‌ها: منطقه مورد مطالعه، حوزه آبخیز دریاچه ارومیه با طول جغرافیایی $7^{\circ} 44'$ تا $53^{\circ} 47'$ شرقی و عرض جغرافیایی $30^{\circ} 40'$ تا $38^{\circ} 30'$ شمالی در شمال غرب کشور ایران قرار دارد. این حوضه یکی از شش حوضه اصلی ایران است که از سمت شمال به حوضه رودخانه ارس، از سمت شرق به حوزه آبخیز سفیدرود، از سمت جنوب به حوزه آبخیز شیروان و از غرب به حوزه آبخیز زاب و در قسمت‌هایی از مرز ایران به کشورهای عراق و ترکیه محدود شده است. این حوضه که در سه استان آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی و کردستان واقع شده است، دارای وسعت 59123 کیلومتر مربع و وسعت دریاچه حدوداً 2000 کیلومتر مربع است.

آبیاری، جایی که درجه حرارت افزایش یافته و بارندگی کاهش یافته، به‌طور موثری رطوبت قابل دسترس را کاهش داده است، همبستگی منفی دارند. همبستگی بین NDVI و دمای سطح در سال 2013 حدود $-0/893$ و در سال 2014 حدود $-0/6$ و همبستگی بین شاخص SDVI و دمای سطح در سال 2013 حدود $-0/857$ و در سال 2014 حدود $-0/783$ است. ترکیب NDVI و SAVI با دمای سطح، اطلاعات مفیدی را برای پایش خشکسالی کشاورزی فراهم می‌آورد. بنابراین، با توجه به تحقیقات فوق، در پژوهش حاضر هدف ارزیابی پایش مکانی و زمانی خشکسالی کشاورزی با استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی VCI، VHI و TCI در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه برای سال‌های 1379 تا 1390 است و در ادامه همبستگی بین شاخص زمینی SPI و شاخص منتخب



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعاتی و ایستگاه‌های هواشناسی منتخب

آن‌ها انتخاب شده‌اند. دوره زمانی مورد مطالعه از سال 1379 تا 1390 شمسی (2000 تا 2011 میلادی) است.

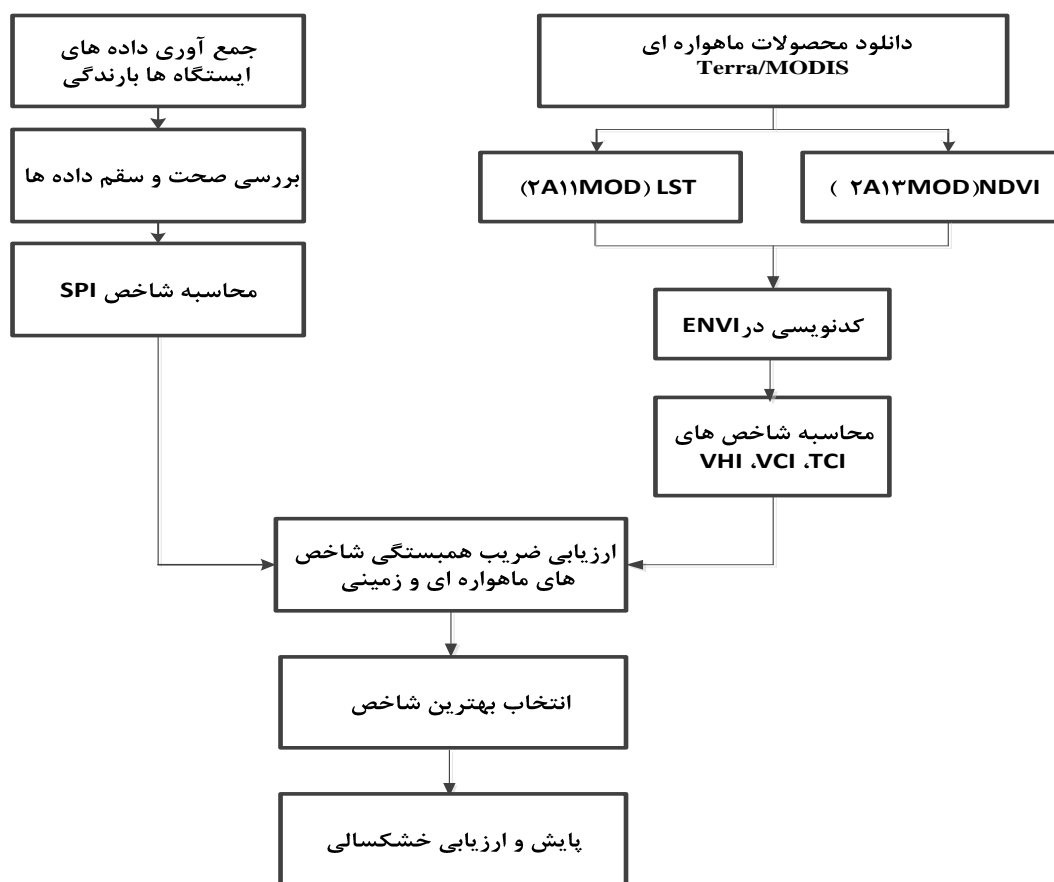
تصاویر ماهواره‌ای: با توجه به دقت زمانی، پوشش طیفی بالا، سهولت دسترسی، عدم نیاز به تصحیح اتمسفری و زمین مرجع نمودن تصاویر از محصولات

داده‌های زمینی: در این پژوهش، از آمار بارندگی 12 ایستگاه هواشناسی واقع در حوزه آبخیز دریاچه ارومیه (ایستگاه ارومیه، مهاباد، مراغه، سقز، تبریز، ملکان، آلاسفل، عجب شیر، لیقوان، میاندوآب، موش‌آباد و ساری قامیش) استفاده شد (شکل ۱). ایستگاه‌ها بر مبنای طول دوره آماری و قابل اعتماد بودن داده‌های

اتمسفیری ندارند. بنابراین، محصولات مذکور برای دوره آماری ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۰ استفاده شده است. پس از دریافت تصاویر برای پردازش و کدنویسی از نرم‌افزار ArcGIS و ENVI برای تهیه نقشه‌های خشکسالی از 9.3 استفاده شده است.

روش پژوهش: برای دنبال کردن بهتر، فلوچارت پژوهش در زیر ارائه شده است و در ادامه به روش‌های مورد استفاده در آن پرداخته می‌شود (شکل ۲).

سنجنده مادیس برای محاسبه شاخص‌های خشکسالی کشاورزی استفاده شده است. اطلاعات سنجش از دور مورد استفاده در این پژوهش، شامل محصولات آماده MOD013A2 و MOD11A2 است که به ترتیب مربوط به سری‌های زمانی شاخص NDVI و LST است که مستقیماً از سایت سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده آمریکا پیاده‌سازی (Download) شده است و نیاز به تصحیح هندسی، رادیومتریکی و



شکل ۲- فلوچارت تحقیق

است. کمبود بارش در مقیاس‌های زمانی کوتاه‌مدت، عمدتاً بر روی وضعیت رطوبت خاک و طولانی‌مدت اغلب بر روی آب‌های زیرزمینی، جریان رودخانه و ذخایر منابع آب موثر است. این شاخص از طریق معادله (۱) قابل محاسبه است.

$$SPI = \frac{Pi - P}{S} \quad (1)$$

که در آن، P_i مقدار بارش در دوره مورد نظر، p میانگین درازمدت برای دوره مورد نظر و S انحراف معیار مقدار بارش است. برای محاسبه این نمایه، از

شاخص‌های خشکسالی

الف) شاخص مبتنی بر داده‌های زمینی: شاخص زمین‌مرجع برای تصاویر ماهواره‌ای، شاخص SPI بوده است که بر مبنای آمار ایستگاه‌های زمینی محاسبه شد. شاخص SPI به وسیله McKee و همکارانش از دانشگاه ایالات کلرادو، در سال ۱۹۹۳ تدوین شد. این شاخص، یکی از شاخص‌های اساسی است که برای محاسبه آن، نیازمند داشتن میانگین و انحراف معیار درازمدت مقادیر بارندگی برای دوره‌های مورد مطالعه

VCI شاخصی است که وضعیت پوشش گیاهی را بر حسب $NDVI_{min}$ و $NDVI_{max}$ برای یک منطقه خاص در درازمدت بیان کرده و به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$100 \times VCI = \frac{NDV_j - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \quad (2)$$

که در آن، $NDVI_{max}$ و $NDVI_{min}$ در طول یک ماه محاسبه می‌شود و j نمایه ماه مورد نظر است. شرایط پوشش گیاهی زمین به وسیله شاخص VCI بر حسب درصد بیان می‌شود. اگر مقدار این شاخص بین ۵۰ تا ۱۰۰ درصد باشد، نشان‌دهنده شرایط مطلوب یا شرایط بالای نرمال می‌باشد. در حالی که اگر VCI به صفر نزدیک شود، نشان‌دهنده وجود یک خشکسالی شدید در ماه است. مطالعات متعدد نشان می‌دهد که شاخص VCI نسبت به شاخص NDVI نتایج بهتری را برای بررسی میزان بارندگی خصوصا در مناطقی که از نظر جغرافیایی غیرهمگون هستند، نشان می‌دهد (Thenkabail و Gamage, ۲۰۰۴).

توزیع گاما برای برآزش داده‌های بارش استفاده می‌شود که پس از انجام محاسبه‌های لازم و تعیین پارامترهای مربوط به نمایه SPI انجام می‌گیرد. پس از محاسبه مقدار SPI در هر بازه زمانی، وضعیت رطوبتی به طبقات مختلف تقسیم می‌شود (جدول ۱).

ب) شاخص‌های مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای: پایش خشکسالی با استفاده از روش‌های دورسنجی و تصاویر ماهواره‌ای، نیازمند استخراج شاخص‌های مختلف از باندهای طیفی نوری و گرمایی است. در این پژوهش، با استفاده از شاخص NDVI و LST، اقدام به محاسبه و استخراج سه شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI)، سلامت پوشش گیاهی (VHI) و وضعیت دمایی (TCI) شده است که در ادامه به طور مختصر شرح داده خواهند شد.

شاخص وضعیت پوشش گیاهی VCI (Vegetation Condition Index): این شاخص اولین بار به وسیله Kogan در سال ۱۹۹۷ پیشنهاد شد.

جدول ۱- طبقه‌بندی خشکسالی با شاخص‌های VCI، TCI، VHI و SPI

SPI	VHI	TCI	VCI	طبقات خشکسالی
< -۲	< ۱۰	< ۱۰	< ۱۰	خشکسالی بسیار شدید
-۱/۵ تا -۱/۹۹	< ۲۰	< ۲۰	< ۲۰	خشکسالی شدید
-۱ تا -۱/۴۹	< ۳۰	< ۳۰	< ۳۰	خشکسالی متوسط
۰ تا -۰/۹۹	< ۴۰	< ۴۰	< ۴۰	خشکسالی خفیف
> ۰	> ۴۰	> ۴۰	> ۴۰	ترسالی

شاخص سلامت پوشش گیاه (VHI (Vegetation Health Index): این نمایه ترکیبی است از نمایه‌های VCI و TCI که با استفاده از داده‌های ماهواره NOAA سنجنده AVHRR برای نمایه تنش خشکسالی که تابعی از تازگی پوشش گیاهی و دما است، محاسبه شده و برای سلامت پوشش گیاهی به کار برده می‌شود (Kogan و همکاران، ۲۰۰۵). به عبارت دیگر، اثر ترکیبی تنش رطوبت و گرما بوده و به کمک رابطه (۴) محاسبه می‌شود.

$$VHI = aVCI + bTCI \quad (4)$$

که در آن، VCI و TCI نمایه شرایط دما و a و b ضرایبی هستند که سهم نمایه‌های VCI و TCI را در VHI به صورت کمی در می‌آورند.

شاخص وضعیت دما (TCI (Temperature Condition Index): این شاخص نیز به وسیله Kogan (۱۹۹۷) مطرح شد. این شاخص که بر اساس دمای درخشندگی استوار است، برای بررسی عملکرد پوشش گیاهی نسبت به دما ارائه شده است. در این شاخص، زمانی که دما به بالاترین مقدار خود می‌رسد، خشکسالی نیز به حد نصاب خود می‌رسد که با استفاده از رابطه (۳) نشان داده می‌شود.

$$TCI = \frac{BT_{max} - BT_j}{BT_{max} - BT_{min}} \quad (3)$$

که در آن، BT دمای درخشندگی، BT_{min} و BT_{max} مقدار دمای درخشندگی بیشینه و کمینه برای یک پریود زمانی در بلندمدت است.

نتایج و بحث

در این بخش، ابتدا نتایج حاصل از نقشه‌های خشکسالی کشاورزی مستخرج از محصولات ماهواره‌ای و سپس، خشکسالی هواشناسی ارائه می‌شود. در آخر، با مقایسه و ارزیابی این نقشه‌ها، اقدام به ارائه شاخص مناسب برای پایش خشکسالی منطقه مورد مطالعه شد.

پایش خشکسالی کشاورزی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای

برآورد شاخص پوشش گیاهی تفاضل نرمال شده (NDVI): در این راستا، ۴۸ تصویر از آرشیو وبسایت www.earthdata.nasa.gov پیاده‌سازی شده

است. سپس، هر تصویر به‌عنوان ورودی نرم‌افزار ENVI4.2 قرار گرفت و پس از اعمال کد دستوری، مقادیر این شاخص برای سال‌های ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۰ ماه‌های خرداد، تیر، مرداد و شهریور محاسبه شد.

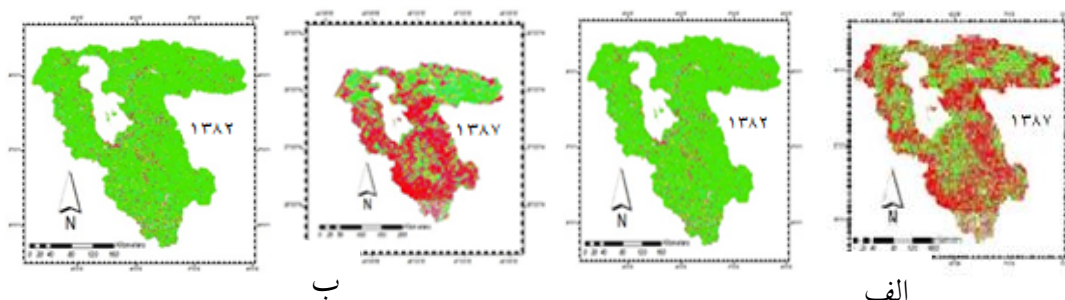
معرفی ماه منتخب بر اساس شاخص NDVI: برای تعیین بیشترین میزان پوشش گیاهی در طول سال، ابتدا تصاویر شاخص NDVI تهیه شد و با مقایسه مقدار میانگین هر یک از ماه‌های خرداد، تیر، مرداد و شهریور، ماه شهریور با بالاترین مقدار NDVI به‌عنوان ماه معرف برگزیده شد (جدول ۲). بنابراین، برای دوره آماری ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۰ NDVI و LST برای ماه شهریور محاسبه شده است.

جدول ۲- مقادیر میانگین شاخص NDVI در دوره آماری ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۰

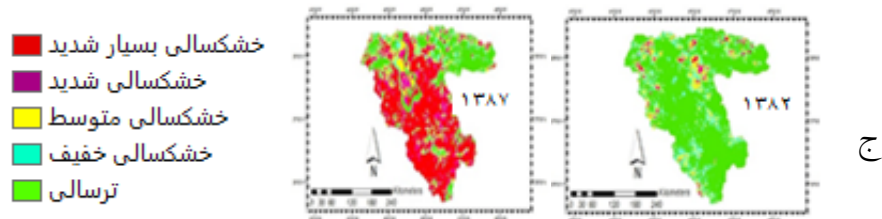
شهریور	مرداد	تیر	خرداد	سال - ماه
۰/۱۵۴	-۰/۰۳۰	-۰/۰۱۴	۰/۰۱۲	۱۳۷۹
۰/۱۷۰	-۰/۰۳۲	-۰/۰۰۱	۰/۰۱۳	۱۳۸۰
۰/۱۹۴	-۰/۰۱۶	۰/۰۰۷	۰/۰۳۳	۱۳۸۱
۰/۱۸۸	-۰/۰۰۷	۰/۰۱۹	۰/۰۱۹	۱۳۸۲
۰/۱۸۱	-۰/۰۰۸	۰/۰۲۰	۰/۰۲۸	۱۳۸۳
۰/۱۸۳	-۰/۰۱۵	۰/۰۱۸	۰/۰۳۶	۱۳۸۴
۰/۱۷۳	-۰/۰۲۰	۰/۰۱۲	۰/۰۴۲	۱۳۸۵
۰/۱۹۲	-۰/۰۱۰	۰/۰۱۸	۰/۰۴۹	۱۳۸۶
۰/۱۶۱	-۰/۰۳۱	-۰/۰۱۶	۰/۰۰۲	۱۳۸۷
۰/۱۷۱	-۰/۰۲۲	-۰/۰۰۴	۰/۰۲۴	۱۳۸۸
۰/۱۸۲	-۰/۰۱۹	۰/۰۰۸	۰/۰۵۲	۱۳۸۹
۰/۱۹۱	-۰/۰۱۰	۰/۰۲۵	۰/۰۱۹	۱۳۹۰

۲ قابل مشاهده است، نقشه‌های پهنه‌بندی شاخص‌های خشکسالی سنجش از دور VCI، VHI و TCI در این سال‌ها تهیه شده است (شکل ۳).

پهنه‌بندی شاخص‌های خشکسالی کشاورزی: با توجه به کمینه و بیشینه شاخص NDVI در ماه شهریور سال ۱۳۸۲ و ۱۳۸۷ همان‌طور که در جدول



شکل ۳- الف) نقشه‌های شاخص VCI، ب) نقشه‌های شاخص VHI سال‌های ۱۳۸۲ و ۱۳۸۷ در محدوده حوزه آبخیز دریاچه ارومیه



ادامه شکل ۳- ج) نقشه‌های شاخص TCI سال‌های ۱۳۸۲ و ۱۳۸۷ در محدوده حوزه آبخیز دریاچه ارومیه

جدول ۳- مقادیر نمایه SPI سالانه در ایستگاه‌های منتخب حوزه آبخیز ارومیه طی دوره آماری ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۰

ایستگاه	۱۳۷۹	۱۳۸۰	۱۳۸۱	۱۳۸۲	۱۳۸۳	۱۳۸۴	۱۳۸۵	۱۳۸۶	۱۳۸۷	۱۳۸۸	۱۳۸۹	۱۳۹۰
ارومیه	-۱/۶۸	-۰/۹۶	۰/۲۵	۰/۳۴	۰/۵۷	-۱/۰۷	-۰/۱	۱/۵۴	-۲/۱۹	۰/۵۷	۰/۹۵	۰/۱۱
مهاباد	-۱/۳۴	-۱/۹۸	۰/۳	۱/۱	۰/۵۷	۰/۲۵	۰/۵۶	۰/۹۷	-۱/۹۱	-۰/۵۳	۰/۳۸	۰/۳۲
مراغه	-۰/۹۳	-۱/۶۸	۰/۶۱	-۰/۲	۰/۵۷	۰/۲۲	۰/۴۱	۱/۰۲	-۱/۹۶	-۰/۵۸	۱/۴۱	۰/۲۱
سفر	-۰/۸۶	-۲/۳۱	-۰/۶۸	۱/۳۴	-۰/۰۵	۰/۱۱	۰/۴۸	۰/۳۶	-۱/۰۸	۰/۴۱	۱/۳۱	۰/۱۲
تبریز	-۱/۳۲	-۱/۴۳	۱/۱۷	۰/۲۹	۰/۹۴	-۰/۳۲	-۰/۹۹	۰/۴	-۱/۹	۰/۳۶	۱/۲۴	۰/۲۴
ملکان	-۱/۸۶	-۱/۸	۰/۲۱	۰/۴۷	۰/۶۹	۰/۳	۰/۰۲	۱/۰۵	-۲/۰۲	-۰/۵۴	۱/۰۱	۰/۶۵
آلاسقل	-۱/۲۴	-۱/۷۸	۰/۶۲	۱/۵۷	۰/۲۸	۰/۶۹	-۰/۳۹	۰/۷۱	-۱/۷۵	-۰/۴۱	۰/۷۱	-۰/۲۲
عجب شیر	-۱/۹۹	-۱/۱۴	۰/۴۹	-۰/۳۸	۰/۶۲	۰/۵۵	-۰/۰۷	۰/۷۵	-۲/۵۵	۰	۰/۷۸	۰/۹۸
لیقوان	-۱/۰۷	-۲/۱۱	۰/۸۳	۰/۸۱	۰/۵۶	۰/۳۲	-۰/۸	۱/۳۹	-۱/۴۱	۰/۳۸	۰/۲۵	۰/۲
میاندوآب	-۱/۵۴	-۱/۳۲	-۰/۰۱	۱	۱/۰۸	۰/۵۱	۰/۲۹	۰/۸۸	-۲/۱	-۱/۰۳	۰/۷۱	۰
موش آباد	۰/۰۳	۰/۴۴	۰/۰۸	۱/۴۱	-۰/۶۷	۰/۲	۰/۶۴	-۲/۰۹	۰/۱۹	۱/۳۱	-۰/۱۹	-۱/۳۲
ساری قامیش	-۰/۹۶	-۲/۰۲	۰/۲۶	۰/۴۵	-۰/۲۵	۰/۱۵	۰/۳۳	۱/۲۶	-۱/۸۱	۰/۵۹	۱/۱۳	۰/۰۷

علت این امر واقع شدن این مناطق در حاشیه رودخانه و بنابراین، متفاوت بودن اقلیم آن با سایر مناطق است. نتایج حاصل از شاخص‌ها نشان می‌دهد که استفاده از آن‌ها، نتایج دقیق‌تر و قابل قبول‌تری را برای بررسی خشکسالی و یا ترسالی در منطقه به ما ارائه می‌دهد.

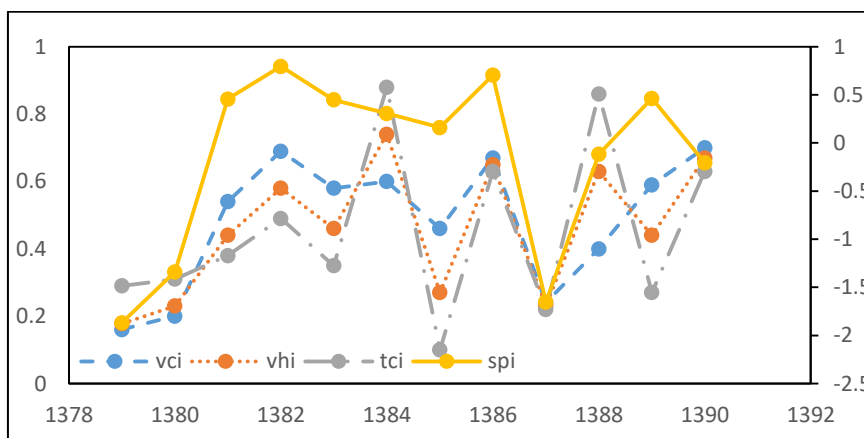
تحلیل خشکسالی کشاورزی با استفاده از داده‌های زمینی: در این بخش، به منظور ارزیابی دقیق‌تر شاخص‌های ماهواره‌ای به دلیل نداشتن مینا و محدوده عددی یکسان از یک شاخص زمین مرجع که با استفاده از داده‌های زمینی، قابل محاسبه است، استفاده شد. به طوری که بتوان شاخص‌های خشکسالی ماهواره‌ای را به وسیله شاخص زمینی حاصل از داده‌های هواشناسی مورد بررسی و مقایسه قرار داد. در این پژوهش، برای ارزیابی و پایش خشکسالی کشاورزی از SPI سالانه برای ۱۲ ایستگاه باران‌سنجی طی سال‌های ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۰ استفاده شد (جدول ۳).

چنان‌که انتظار می‌رود، بررسی نقشه‌های شاخص VCI و VHI نشان می‌دهد که در سال ۱۳۸۷ (سال خشک) غالب مناطق حوزه مقادیر کمتری برای این شاخص‌ها نسبت به سال ۱۳۸۲ دارند. همچنین، بررسی نقشه TCI نیز نشان می‌دهد که در سال خشک غالب مناطق حوزه از لحاظ شاخص دمایی در وضعیت بدتری قرار دارند. با این حال، شاخص‌های پوشش گیاهی (VCI و VHI) در دشت‌های حاشیه دریاچه، حتی در سال ۱۳۸۲ نیز نسبت به سایر مناطق حوزه مقادیر کمتری داشته، در وضعیت زیر نرمال قرار دارند. همان‌طور که برای شاخص NDVI و LST بحث شد، دشت‌های کشاورزی حاشیه رودخانه و همچنین، مناطقی از حوزه که غالباً دارای پوشش جنگلی متراکم هستند، از لحاظ شاخص‌های خشکسالی کشاورزی و دمایی حتی در سال ۱۳۸۷ نیز نسبت به سایر مناطق در وضعیت بهتری قرار دارند.

همان‌طور که قابل مشاهده است، شدیدترین خشکسالی در سال ۱۳۸۷ اتفاق افتاده است. در این سال، بیشتر ایستگاه‌ها از لحاظ مقدار نمایه SPI در وضعیت خشکسالی متوسط، زیاد و شدیدتر از سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۳۸۰ قرار دارند. فقط ایستگاه موش‌آباد با مقدار ۰/۱۹ در شرایط تقریباً نرمال است و ایستگاه عجب‌شیر با مقدار ۲/۵۵- و ایستگاه سقز با مقدار ۱/۰۸- دارای کمینه مقدار نمایه SPI می‌باشند. این وضعیت در شاخص‌های خشکسالی کشاورزی حاصل از سنجش از دور نیز کاملاً مشهود است.

ارزیابی شاخص‌های خشکسالی کشاورزی

(ماهواره‌ای و زمینی): به‌منظور بررسی شاخص‌های خشکسالی ماهواره‌ای با استفاده از شاخص زمین‌مرجع SPI مقادیر میانگین شاخص‌های VHI، VCI و TCI محاسبه شد و سپس، با شاخص SPI سالانه از طریق نمودار مقایسه شد (شکل ۴). با توجه به نتایج نمودار می‌توان گفت، هر سه شاخص خشکسالی با شاخص هواشناسی مطابقت دارد، با این تفاوت که شاخص‌های VHI و VCI که مبنای محاسبه آن‌ها شاخص NDVI است، تطابق بیشتری نسبت به شاخص TCI که مبنای محاسبه آن LST است، دارند و شاخص SPI را تایید می‌کنند.



شکل ۴- نمودار تغییرات نمایه‌های خشکسالی کشاورزی و هواشناسی در دوره مورد مطالعه

در ادامه، برای بررسی عملکرد شاخص‌های خشکسالی کشاورزی مقادیر ضریب همبستگی برای نمایه‌های VHI، VCI و TCI با شاخص هواشناسی SPI محاسبه شد (جدول ۴). با توجه به نتایج، بیشترین مقدار همبستگی برای شاخص VHI برابر با مقدار ۰/۸۶ است که نشان‌دهنده تطابق این شاخص با شاخص هواشناسی SPI است. از طرف دیگر، کمترین مقدار ضریب همبستگی همان‌طور که انتظار

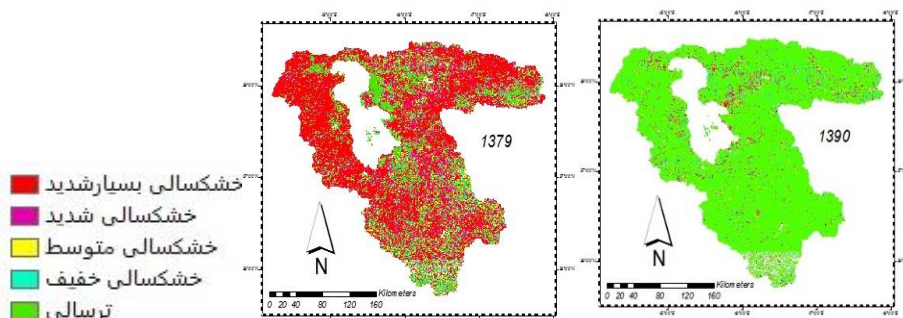
می‌رود، مربوط به شاخص TCI با مقدار ۰/۲۷ است که نشان‌دهنده کمترین تطابق SPI در سال نرمال و تر با شاخص TCI است. نتایج برای سه شاخص نشان داد که این شاخص‌ها مکمل هم هستند و شاخص‌های حساسی برای ارزیابی خشکسالی به‌شمار می‌روند و شاخص TCI برای ارزیابی خشکسالی پوشش گیاهی یک شاخص غیرقابل اعتماد و برای مطالعه در آینده توصیه نمی‌شود.

جدول ۴- مقادیر ضریب همبستگی نمایه‌ها در حوزه آبخیز ارومیه در دوره آماری ۱۳۷۹-۱۳۹۰

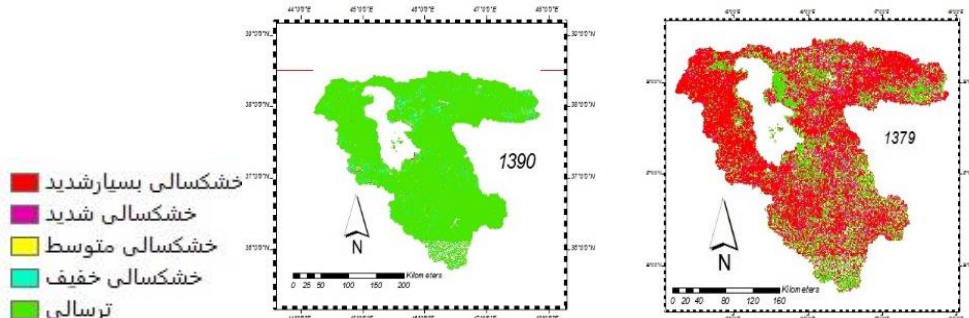
شاخص	SPI	VCI	VHI	TCI
SPI	۱/۰۰	۰/۶۰	۰/۸۶	۰/۲۷
VCI	۱/۰۰	۰/۷۴	۰/۳۶	۰/۸۴
VHI	۱/۰۰	۱/۰۰	۰/۸۴	۰/۲۷
TCI	۱/۰۰	۰/۲۷	۰/۳۶	۰/۸۴

VHI، به ترتیب بالاترین ضریب همبستگی با شاخص هواشناسی SPI صورت گرفته است. با توجه به محدودیت فضا، فقط سال اول (۱۳۷۹) و سال آخر (۱۳۹۰) دوره آماری ارائه شده است (شکل‌های ۵ و ۶).

ارزیابی مکانی شاخص‌های خشکسالی: با توجه به هدف پژوهش که ارزیابی شاخص‌های خشکسالی و در نهایت، انتخاب بهترین شاخص برای تحلیل خشکسالی در منطقه مورد نظر است، طی دوره منتخب، تحلیل مکانی شاخص‌ها با استفاده از شاخص‌های VCI و



شکل ۵- نقشه‌های خشکسالی حاصل از شاخص VCI در حوزه آبخیز ارومیه در سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۳۹۰



شکل ۶- نقشه‌های خشکسالی حاصل از شاخص VHI در حوزه آبخیز ارومیه در سال‌های ۱۳۷۹ و ۱۳۹۰

برای شاخص VCI در سال ۱۳۷۹ حدود ۵۱ درصد با خشکسالی بسیار شدید روبرو بوده است و در سال ۱۳۸۰، ۴۴ درصد محدوده را دربر می‌گیرد. سال ۱۳۸۲ با ۲/۱۷ درصد و پس از آن سال ۱۳۹۰ با ۲/۱۹ کمترین میزان خشکسالی را در طبقه بسیار شدید، دارا بودند و به همین صورت برای شاخص VHI با توجه به جدول ۷ در سال ۱۳۷۹ حدود ۳۶ درصد با خشکسالی بسیار شدید روبرو بوده است و در سال ۱۳۷۸، ۲۴ درصد کل محدوده را دربر گرفته است. سال ۱۳۸۴ با ۰/۰۹ درصد و پس از آن سال ۱۳۸۸ با ۰/۱۰ کمترین میزان خشکسالی را در طبقه بسیار شدید، دارا بودند.

تحلیل مکانی شاخص‌های خشکسالی: برای شاخص VCI سال‌های به ترتیب ۱۳۷۹، ۱۳۸۰ و ۱۳۸۷ بیشترین میزان وسعت خشکسالی را دارا بودند، به طوری که با ۸۴، ۸۱ و ۷۸ درصد مساحت منطقه با شدت‌های مختلف روبرو شده است (جدول ۵). به همین صورت برای VHI به ترتیب سال‌های ۱۳۷۹، ۱۳۸۰ و ۱۳۸۷ بیشترین میزان وسعت خشکسالی را با مساحت‌های ۸۸، ۸۶ و ۸۵ درصد از کل منطقه دارا بود (جدول ۶). همچنین، برای شاخص VCI به ترتیب سال‌های ۱۳۹۰، ۱۳۸۲ و ۱۳۸۶ و برای شاخص VHI سال‌های ۱۳۸۴، ۱۳۸۸ و ۱۳۹۰ کمترین میزان وسعت خشکسالی را داشتند. با توجه به جدول ۶،

جدول ۵- درصد مساحت طبقات خشکسالی حوزه آبخیز دریاچه ارومیه طی سال‌های ۱۳۷۹-۱۳۹۰ با استفاده از شاخص VCI

سال	بسیار شدید	شدید	متوسط	خفیف	ترسالی
۱۳۷۹	۵۰/۷۸	۱۳/۴۵	۱۱/۴۵	۸/۲۹	۱۶/۰۳
۱۳۸۰	۴۳/۳۴	۱۵/۳۳	۱۲/۶۸	۱۰/۱۸	۱۸/۴۴
۱۳۸۱	۵/۴۱	۵/۷۸	۸/۳۴	۱۱/۲۶	۶۹/۱۸
۱۳۸۲	۲/۱۷	۲/۶۳	۴/۱۰	۶/۲۷	۸۴/۸۲
۱۳۸۳	۳/۳۹	۳/۸۶	۶/۲۳	۹/۸۰	۷۶/۶۹
۱۳۸۴	۳/۳۱	۴/۲۵	۶/۶۴	۹/۵۲	۷۶/۲۶
۱۳۸۵	۷/۶۲	۸/۰۳	۱۱/۷۳	۱۵/۰۰	۵۷/۵۹
۱۳۸۶	۲/۳۷	۲/۵۱	۴/۲۰	۶/۵۱	۸۴/۳۸
۱۳۸۷	۳۳/۰۸	۱۷/۹۹	۱۴/۹۵	۱۱/۹۲	۲۲/۰۴
۱۳۸۸	۱۵/۰۲	۱۱/۲۶	۱۲/۹۰	۱۳/۲۰	۴۷/۵۹
۱۳۸۹	۴/۳۵	۴/۳۳	۶/۴۸	۹/۲۱	۷۵/۶۰
۱۳۹۰	۲/۱۹	۲/۳۵	۳/۹۹	۶/۱۱	۸۵/۳۲

جدول ۶- درصد مساحت طبقات خشکسالی حوزه آبخیز دریاچه ارومیه طی سال‌های ۱۳۷۹-۱۳۹۰ با استفاده از شاخص VHI

سال	بسیار شدید	شدید	متوسط	خفیف	ترسالی
۱۳۷۹	۳۵/۳۴	۲۵/۱۸	۱۵/۴۶	۱۲/۰۲	۱۲
۱۳۸۰	۱۶/۸۹	۲۸/۲۵	۲۵/۴۸	۱۵/۷۵	۱۳/۶۰
۱۳۸۱	۲/۴۷	۷/۴۵	۱۴/۲۸	۱۸/۲۳	۵۷/۵۵
۱۳۸۲	۰/۲۰	۰/۹۷	۳/۶۳	۸/۶۲	۸۶/۵۵
۱۳۸۳	۰/۸۳	۳/۷۹	۱۰/۲۹	۱۹/۷۶	۶۵/۳۰
۱۳۸۴	۰/۰۹	۰/۰۱	۰/۲۳	۱/۳۵	۹۸/۳۰
۱۳۸۵	۱۲/۱۰	۲۱/۳۲	۲۶/۴۰	۲۰/۵۰	۱۹/۶۶
۱۳۸۶	۰/۱۱	۰/۲۰	۱/۳۹	۴/۵۵	۹۳/۷۳
۱۳۸۷	۲۳/۳۶	۲۴/۹۲	۲۱/۷۰	۱۴/۹۴	۱۵/۰۵
۱۳۸۸	۰/۱۰	۰/۰۳	۰/۶۲	۳/۸۳	۹۵/۴۰
۱۳۸۹	۲/۱۵	۶/۱۷	۱۲/۵۰	۱۹/۰۷	۶۰/۰۹
۱۳۹۰	۰/۱۳	۰/۲۷	۱/۵۰	۴/۶۱	۹۳/۴۸

نتیجه‌گیری

این پژوهش، حاصل تلاشی است، برای ارزیابی پایش خشکسالی کشاورزی بر اساس داده‌های زمینی و سنجش از دور که یافته‌های زیر به‌عنوان نتایج آن قابل ارائه است. مقادیر شاخص NDVI طی سال‌های ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۰ برای ماه‌های خرداد، تیر، مرداد و شهریور محاسبه شد. پس از محاسبه شاخص NDVI با مقایسه مقدار میانگین هر یک از ماه‌های خرداد، تیر، مرداد و شهریور، ماه شهریور با بیشینه مقدار NDVI به‌عنوان ماه معرف برگزیده شد. با توجه به کمینه و بیشینه شاخص NDVI در ماه شهریور سال ۱۳۸۲ و

۱۳۸۷، نقشه‌های پهنه‌بندی خشکسالی برای شاخص‌های VCI، VHI و TCI تهیه شد. بررسی نقشه‌های شاخص VCI و VHI نشان داد که در سال ۱۳۸۷ (سال خشک) غالب مناطق حوضه، مقادیر کمتری برای این شاخص‌ها نسبت به سال ۱۳۸۲ دارند. همچنین، بررسی نقشه TCI نیز نشان می‌دهد که در سال خشک غالب مناطق حوضه از لحاظ شاخص دمایی در وضعیت بدتری قرار دارند. با این حال، شاخص‌های پوشش گیاهی (VCI و VHI) در دشت‌های حاشیه دریاچه، حتی در سال ۱۳۸۲ نیز نسبت به سایر مناطق حوضه مقادیر کمتری داشته، در

همبستگی همانطور که انتظار می‌رود، مربوط به شاخص TCI با مقدار ۰/۲۷ است که نشان‌دهنده کمترین تطابق SPI در سال نرمال و تر با شاخص TCI است. نتایج حاصل از این پژوهش، با یافته‌های محققان دیگر مانند Damavandi و همکاران (۲۰۱۶)، Zamanian و همکاران (۲۰۱۶) و Gidey و همکاران (۲۰۱۸) و دیگر محققان نشان از دقت بسیار خوب روش استفاده از شاخص سنجش از دوری (VHI) در پایش خشکسالی است. در صورت در دسترس بودن تصاویر ماهواره‌ای بدون پوشش ابر، امکان ارزیابی خشکسالی با شاخص‌های VCI، VHI و TCI، نسبت به شاخص استاندارد بارش SPI، بسیار مناسب‌تر است. مورد شاخص‌های ماهواره‌ای، عواملی مانند دمای سطح زمین، بارش و وضعیت پوشش گیاهی هم‌زمان در پایش ماهواره‌ای خشکسالی نقش ایفا می‌کنند. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که شاخص ترکیبی VHI نسبت به شاخص‌های منفرد VCI و TCI نتایج بهتری را ارائه می‌دهد. همچنین، شاخص‌های با عامل وضعیت پوشش گیاهی VHI و VCI نتایج قابل قبول‌تری را نسبت به شاخص با عامل دما TCI ارائه می‌دهند.

وضعیت زیر نرمال قرار دارند. مقادیر شاخص بارندگی استاندارد شده (SPI) برای ۱۲ ایستگاه باران‌سنجی منطقه مطالعاتی طی سال‌های ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۰ نشان داد که شدیدترین خشکسالی در سال ۱۳۸۷ اتفاق افتاده است. دو ایستگاه موش‌آباد و سقز در سال ۱۳۸۷ در شرایط تقریباً نرمال بوده، به طوری که ایستگاه موش‌آباد با مقدار ۰/۱۹ دارای بیشینه و ایستگاه عجب‌شیر با مقدار ۲/۵۵- و ایستگاه ارومیه با مقدار ۲/۱۹- دارای کمینه مقدار نمایه SPI در سال ۱۳۹۰ می‌باشند. مقایسه مقادیر میانگین شاخص‌های VHI، VCI و TCI با شاخص SPI نشان داد، هر سه شاخص خشکسالی ماهواره‌ای با شاخص SPI مطابقت دارد، با این تفاوت که شاخص‌های VHI و VCI که مبنای محاسبه آن‌ها شاخص NDVI است، تطابق بیشتری نسبت به شاخص TCI که مبنای محاسبه آن LST است، دارند و شاخص SPI را تایید می‌کنند. مقادیر ضریب همبستگی شاخص‌های VCI، VHI و TCI، با شاخص SPI نشان داد، بیشترین مقدار همبستگی برای شاخص VHI برابر با مقدار ۰/۸۶ است که نشان‌دهنده تطابق این شاخص با شاخص SPI است. از طرف دیگر، کمترین مقدار ضریب

منابع مورد استفاده

1. Dabrowska-Zielinska, K., F. Kogan, A. Ciolkosz, M. Gruszczynska and W. Kowalik. 2002. Modelling of crop growth conditions and crop yield in Poland using AVHRR-based indices. *International Journal of Remote Sensing*, 23(6): 1109-1123.
2. Damavandi, A.A., M. Rahimi, M.R. Yazdani and A.A. Noroozi. 2016. Spatial monitoring of agricultural drought through time series data of NDVI and LST indices and Modis data in Lake Urmia Catchment. *Scientific Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 25(99): 25-48 (in Persian).
3. Gidey, E., O. Dikinya, R. Sebego, E. Segosebe and A. Zenebe. 2018. Analysis of the long-term agricultural drought onset, cessation, duration, frequency, severity and spatial extent using Vegetation Health Index (VHI) in Raya and its environs, Northern Ethiopia. *Environmental Systems Research*, 7(1): 13-29.
4. Heim, R.R. 2002. A review of twentieth-century drought indices used in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83(8): 1149-1166.
5. Kogan, F.N. 1997. Global drought watch from space. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(4): 621-636.
6. Kogan, F.N. 2005. NOAA/AVHRR satellite data based indices for monitoring agricultural droughts. New York, Oxford University Press, 88 pages.
7. McKee, T.B., N.J. Doesken and J. Kleist. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, 17(22): 179-183.
8. Orhan, O., S. Ekerin and F. Dadaser-Celik. 2014. Use of Landsat land surface temperature and vegetation indices for monitoring drought in the Salt Lake Basin area, Turkey. *The Scientific World Journal*, 2014(1): 14-29.
9. Son, N.T., C.F. Chen, C.R. Chen, L.Y. Chang and V.Q. Minh. 2012. Monitoring agricultural drought in the Lower Mekong Basin using MODIS NDVI and land surface temperature data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 18: 417-427.

10. Owrangi, M.A., J. Adamowski, M. Rahnamaei, A. Mohammadzadeh and R.A. Sharifan. 2011. Drought monitoring methodology based on AVHRR images and SPOT vegetation maps. *Journal of Water Resource and Protection*, 3(5): 325-346.
11. Rostami, A., M. Bzane and M. Raini. 2016. Spatial and temporal monitoring of agricultural drought using Modis imagery and remote sensing technology. *Journal of Soil and Water Science*, 27: 213-226 (in Persian).
12. Tonini, F., G.J. Lasinio and H.H. Hochmair. 2012. Mapping return levels of absolute NDVI variations for the assessment of drought risk in Ethiopia. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 18: 564-572.
13. Tucker, C.J. 1979. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2): 127-150.
14. Yıldırım, T. and Ş. Aşık. 2018. Index-based assessment of agricultural drought using remote sensing in the semi-arid region of Western Turkey. *Journal of Agricultural Sciences*, 24(4) : 510-516.
15. Zhang, J. 2004. Risk assessment of drought disaster in the maize-growing region of Songliao Plain, China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 102(2): 133-153.
16. Zhang, N., Y. Hong, Q. Qin and L. Liu. 2013. VSDI: a visible and shortwave infrared drought index for monitoring soil and vegetation moisture based on optical remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 34(13): 4585-4609.
17. Zhang, X., M.A. Friedl, C.B. Schaaf, A.H. Strahler, J.C. Hodges, F. Gao and A. Huete. 2003. Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 84(3): 471-475.
18. Zamanian, M.T., M.B. Behyar, A. Hosseini Karimi and M. Vazife Dust. 2016. Monitoring and analysis of drought using NOAA-AVHRR satellite sensing products 2012. *Journal of Climatological Research*, 9(3): 33-54.
19. Zambrano, F., M. Lillo-Saavedra, K. Verbist and O. Lagos. 2016. Sixteen years of agricultural drought assessment of the BioBío region in Chile using a 250 m resolution Vegetation Condition Index (VCI). *Remote Sensing*, 8(6): 530-549.