

## Evaluation of MODIS and TRMM Satellite Data for Drought Monitoring in the Urmia Lake Basin

Sima Kazempour Choursi<sup>1</sup>, Mahdi Erfanian<sup>2\*</sup>, Zahra Ebadi Nehari<sup>3</sup>

<sup>1</sup> PhD Candidate in Watershed Management Sciences and Engineering, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran

<sup>2</sup> Associate Professor in Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran

<sup>3</sup> MSc Graduated in Watershed Management Engineering, Faculty of Natural Resources, Urmia University, Urmia, Iran

### Abstract

The aim of this study was to evaluate the capability of remote sensing data for drought monitoring of Urmia Lake Basin (ULB). For this purpose, the MODIS NDVI/LST data and TRMM satellite rainfall data were downloaded on monthly scale from 2000 to 2014. After data processing, drought indices including Temperature Condition Index (TCI), Vegetation Condition Index (VCI), Precipitation Condition Index (PCI), Composite indices include CI1, CI2, CI3 and Vegetation Health Index (VHI) were calculated for March to September (growing season). To validate the mentioned indicators, Standardized Precipitation Index (SPI) on different time scales (3, 6 and 9 months) was used. Results showed the VCI is the favorable satellite index for monitoring agricultural drought of the ULB during the growing season. SPI3, SPI6 and SPI9 have the highest correlation with the VCI and VHI in March, with PCI and CI1 in April, with TCI, CI3 and CI1 in May, with VCI in June and July, with TCI and VCI in August and September, respectively. Composite indicators presented better results than VCI and TCI in May and April. Therefore it can be concluded that composite indices can provide better results during the wet months (May-April). Also, Drought Severity classification results of the ULB based on VCI showed that highest drought with 93.85, 91.93 and 72 percent in 2000, 2008 and 2001, respectively, and the lowest drought with 1.21, 2.06 and 5.33 percent in 2010, 2007 and 2004 respectively has happened during the growing season (March to September) in the ULB. Using the optimum satellite indices presented in the present study, it is possible to predict and estimate the drought phenomena of Urmia Lake BASIN in different months of the growing season or during the growing season and obtain a better result.

**Key words:** Drought, Urmia Lake, Composite Indices, MODIS, TRMM.

## ارزیابی داده‌های ماهواره‌های MODIS و TRMM در پایش خشکسالی حوضه آبریز

### دریاچه ارومیه

سیما کاظم‌پور چورسی، دانشجوی دکتری علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران  
مهدی عرفانیان<sup>\*</sup>: دانشیار، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران  
زهرآ عبادی نهری: دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

#### چکیده

هدف پژوهش حاضر، ارزیابی داده‌های ماهواره‌ای یا سنجش از دور در پایش خشکسالی حوضه آبریز دریاچه ارومیه است. بدین منظور نخست داده‌های NDVI و LST سنجنده MODIS و داده‌های بارندگی ماهواره TRMM در مقیاس ماهیانه از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۴ دانلود شد. پس از پردازش تصاویر، شاخص‌های خشکسالی VCI، TCI و PCI و شاخص‌های ترکیبی CI1، VHI، CI2 و CI3 برای ماه‌های مارس تا سپتامبر (فصل رشد) محاسبه شدند. برای اعتبارسنجی این شاخص‌ها، شاخص SPI در مقیاس‌های زمانی ۳، ۶ و ۹ ماهه به کار رفت. نتایج به‌طور میانگین نشان داد شاخص ماهواره‌ای مطلوب برای پایش خشکسالی کشاورزی حوضه آبریز دریاچه ارومیه طی فصل رشد، VCI است. شاخص‌های SPI6، SPI3 و SPI9 بیشترین همبستگی را در ماه مارس به ترتیب با VCI و VHI و در ماه آوریل با PCI و CI1، در ماه می با TCI، CI3 و CI2، در ماه ژوئن و جولای با VCI و در ماه‌های آگوست و سپتامبر با TCI و VCI دارند. در ماه‌های می و آوریل شاخص‌های ترکیبی نتایج بهتری نسبت به شاخص‌های VCI و TCI ارائه کردند؛ در نتیجه شاخص‌های ترکیبی طی ماه‌های مرطوب (می و آوریل) نتایج بهتری را ارائه می‌کنند. همچنین نتایج طبقه‌بندی شدت خشکسالی حوضه آبریز دریاچه ارومیه براساس شاخص VCI طی فصل رشد (مارس تا سپتامبر) نشان داد در سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۸ و ۲۰۰۱ به ترتیب با ۹۳/۸۵، ۹۱/۹۳ و ۷۲ درصد، بیشترین و در سال‌های ۲۰۱۰، ۲۰۰۷ و ۲۰۰۴ به ترتیب با ۱/۲۱، ۲/۰۶ و ۵/۳۳ درصد، کمترین خشکسالی (ضعیف تا بسیار شدید) در سطح حوضه روی داده است. با استفاده از شاخص‌های ماهواره‌ای مطلوب ارائه شده در پژوهش حاضر، امکان پیش‌بینی و برآورد منطقه‌ای پدیده خشکسالی حوضه آبریز دریاچه ارومیه در ماه‌های مختلف فصل رشد یا طی فصل رشد و دستیابی به نتیجه بهتر وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: خشکسالی، دریاچه ارومیه، شاخص ترکیبی، MODIS، TRMM.

## مقدمه

چشمگیری بر فعالیت‌های کشاورزی، اقتصادی و اجتماعی منجر می‌شود (Riebsame et al., 1991: 79). شدت این پدیده به شرایط آب‌وهوایی منطقه و وضعیت تعادل آب و انرژی بستگی دارد. تغییرات آب‌وهوایی در اثر گرم‌شدن کره زمین، الگوهای بارش در سطح جهان را تغییر داده (Peñuelas et al., 2009: 887) و به شدیدتر شدن خشکسالی در سال‌های اخیر انجامیده است.

برای ارزیابی خشکسالی و تعیین شدت و وسعت آن، از شاخص‌های مختلفی استفاده می‌شود. بیشتر این روش‌ها مبتنی بر داده‌های زمینی است و خشکسالی را به صورت نقطه‌ای برآورد می‌کنند. در بیشتر مطالعات انجام‌شده تاکنون از روش‌های زمین‌آماری برای تعمیم اطلاعات نقطه‌ای به سطح استفاده شده است. درون‌یابی مکانی مقادیر شاخص‌های خشکسالی، اطلاعات ارزشمندی را در شرایط فعلی خشکسالی در اختیار قرار می‌دهد؛ با این حال عدم قطعیت زیادی ممکن است وجود داشته باشد؛ چون عوامل زیادی بر فرایند درون‌یابی تأثیر می‌گذارد؛ بنابراین سنجش از دور که برای استخراج ویژگی‌های هواشناسی یا بیوفیزیکی سطوح زمین استفاده می‌شود، در زمینه پایش خشکسالی توجه بسیاری از پژوهشگران را به خود جلب کرده است. در مناطقی که با کمبود یا نبود ایستگاه‌های زمینی مواجه‌اند، استفاده از داده‌های سنجش از دور ممکن است تنها منبع در دسترس برای پایش پدیده خشکسالی باشد. ماهواره‌های MODIS<sup>1</sup> (اسپکترورادیومتر تصویربردار با قدرت تفکیک متوسط) و TRMM<sup>2</sup> (مأموریت اندازه‌گیری باران

خشکسالی، پدیده‌ای پیچیده است که شدت آن به شرایط آب‌وهوایی منطقه و وضعیت تعادل آب و انرژی بستگی دارد. خشکسالی، معلول یک دوره شرایط آب‌وهوایی خشک و غیرعادی است که آثار آن بیشتر به تغییر پوشش گیاهی منجر می‌شود (Du et al., 2012: 1). خشکسالی به صورت مستقیم یا غیرمستقیم آثار سوء اجتماعی و اقتصادی دارد و آثار آن به طور کلی به محیطی، اقتصادی و اجتماعی دسته‌بندی می‌شود. در این میان، کشاورزی با توجه به وابستگی به آب، معمولاً نخستین بخشی است که از خشکسالی زیان می‌بیند. خشکسالی کشاورزی عبارت است از دوره‌ای که طی آن مقدار رطوبت خاک و محصول نهایی به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد. این نوع خشکسالی زمانی به وجود می‌آید که در فاصله بین دو بارندگی، ذخیره رطوبتی خاک در منطقه ریشه برای زنده ماندن محصولات کشاورزی و گیاهان طبیعی و مراتع کفایت نکند (Gustard & Tate, 2000: 25). این وضعیت معمولاً در اثر نبود یا کمبود جریان رطوبت برای تغذیه منطقه ریشه (خشکسالی خاک) یا زمانی رخ می‌دهد که رطوبت نسبی هوا به اندازه‌ای کم است که رطوبت موجود خاک قادر به جبران میزان هدررفت رطوبت بر اثر تبخیر و تعرق نیست (خشکسالی جوی)؛ به بیان دیگر این نوع خشکسالی زمانی روی می‌دهد که رطوبت در دسترس خاک برای محصولات کشاورزی به سطحی برسد که باعث پژمردگی گیاه و آثار زیان‌بار برای میزان تولید محصول شود.

خشکسالی، یکی از پرهزینه‌ترین بلاهای طبیعی است؛ زیرا به کاهش منابع آب و در نتیجه آثار

<sup>1</sup> Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer

<sup>2</sup> Tropical Precipitation Measuring Mission

چشمگیربودن تغییرات شاخص سلامت گیاه (VHI<sup>۲</sup>) به‌ویژه در مناطق زیر کشت دیم بوده است.

شمسی‌پور و همکاران (۱۳۸۹) کارایی شاخص‌های گیاهی و حرارتی شامل شاخص تفاضل نرمال‌شده پوشش گیاهی NDVI، شاخص وضعیت گیاه (VCI<sup>۳</sup>) و شاخص سلامت گیاه (VHI) ماهواره NOAA را بین سال‌های ۱۹۹۸ و ۲۰۰۴ در منطقه بیابانی و خشک کاشان بررسی کردند. آنها با توجه به ردیابی مناسب پوشش سطحی با شاخص‌های پوشش گیاهی و حساسیت مناسب شاخص‌های حرارتی به تغییرات دمایی محیط، بهره‌گیری از داده‌های سنجش از دور ماهواره‌ای را در مطالعات محیطی مناطق خشک و بیابانی توصیه کردند.

باعقیده و همکاران (۱۳۹۰) شاخص NDVI را در تحلیل خشکسالی استان اصفهان در دوره آماری ۱۹۹۷ تا ۲۰۰۳ بررسی کردند. آنها بدین منظور از تصاویر ماهواره NOAA و داده‌های بارش ایستگاه‌های زمینی بهره بردند. نتایج حاصل از همبستگی نشان داد NDVI، جایگزین مناسبی برای شاخص‌های اقلیمی در ارزیابی خشکسالی‌هاست.

رضایی مقدم و همکاران (۱۳۹۱) کارایی شاخص وضعیت گیاه (VCI) و وضعیت دمای (TCI<sup>۴</sup>) به‌دست‌آمده از ماهواره MODIS را در برآورد خشکسالی حوضه دریاچه ارومیه ارزیابی کردند. نتایج آنها نشان داد تصاویر ماهواره MODIS، جایگزین مناسبی برای شاخص‌های هواشناسی در برآورد خشکسالی است. آنها با توجه به اینکه تصاویر ماهواره‌ای نسبت به روش‌های هواشناسی مزایایی

مناطق گرمسیری) با قابلیت دسترسی آسان، از جمله داده‌های مبتنی بر سنجش از راه دور هستند که به‌منظور پایش خشکسالی استفاده می‌شود (Li et al., 2010: 44). ماهواره TRMM داده‌های بارش را با قدرت تفکیک مکانی و زمانی مختلف برای کل جهان ارائه می‌کند؛ بنابراین در مناطق بدون باران‌سنج کاربرد فراوانی دارد (Gupta et al., 2014: 4422). پس از راه‌اندازی ماهواره TRMM، مطالعات متعددی در زمینه ارزیابی و کالیبراسیون تولیدات بارش این ماهواره انجام شده است؛ با این حال پژوهش‌های کمتری وجود دارد که کارایی این مجموعه داده در پایش خشکسالی را گزارش کند. در میان شاخص‌های ماهواره‌ای، شاخص تفاضل نرمال‌شده پوشش گیاهی NDVI<sup>۱</sup> یکی از معروف‌ترین شاخص‌هاست و به‌طور گسترده در پایش خشکسالی استفاده می‌شود (Son et al., 2012: 418).

### پیشینه پژوهش

تاکنون سازمان‌های مرتبط فعالیت‌های مختلفی را در زمینه پایش و پیش‌بینی پدیده خشکسالی انجام داده‌اند. یکی از روش‌ها، استفاده از شاخص‌های به‌دست‌آمده از اطلاعات ماهواره‌ای است (زمانیان و همکاران، ۱۳۹۱: ۴۴).

جهانبخش و همکاران (۱۳۸۸) با استفاده از شاخص‌های مربوط به خشکسالی کشاورزی، تغییرات پوشش گیاهی دشت سراب را ارزیابی و دو دوره خشکسالی (۱۳۸۰) و ترسالی (۱۳۸۳) را تحلیل کردند. آنها در مطالعه خود از تصاویر سنجنده ETM<sup>+</sup> و ماهواره SPOT بهره بردند. نتایج نشان‌دهنده

<sup>۲</sup> Vegetation Health Index

<sup>۳</sup> Vegetation Condition Index

<sup>۴</sup> Temperature Condition Index

<sup>۱</sup> Normalized Difference Vegetation Index

همچون تعداد نقاط نمونه‌برداری بیشتر، سطح پوشش وسیع‌تر، قدرت تفکیک زمانی بیشتر و هزینه کمتر دارند، استفاده از دانش سنجش از دور را پیشنهاد کردند.

در مطالعه‌ای میرموسوی و کریمی (۱۳۹۲) به‌منظور بررسی اثر خشکسالی بر پوشش گیاهی در استان کردستان، از داده‌های هواشناسی و سنجش از دور استفاده کردند. آنها نخست شاخص بارندگی استاندارد (SPI) را برای ۶ ایستگاه هواشناسی استان طی سال‌های ۲۰۰۹-۲۰۰۰ محاسبه و براساس ۴۰ تصویر ۱۶ روزه برگرفته از سنجنده MODIS در ماه‌های آگوست، سپتامبر، اکتبر و نوامبر، شاخص NDVI را به دست آوردند. نتایج این مطالعه نشان داد بین میانگین شاخص‌های SPI و NDVI همبستگی زیادی (۰/۷۷) در سطح معناداری ۰/۱ وجود دارد. همچنین مقایسه بین این دو شاخص نشان‌دهنده دقت بسیار زیاد شاخص NDVI نسبت به شاخص SPI بود؛ زیرا میانگین سالیانه SPI از شش ایستگاه سینوپتیک در پهنه استان کردستان گرفته شده است، اما شاخص NDVI وضعیت پوشش گیاهی را در پهنه استان کردستان در ابعاد پیکسل نشان می‌دهد و این مسئله باعث افزایش دقت در تفکیک پدیده خشکسالی و تأثیرات آن بر پوشش گیاهی می‌شود.

رضایی بنفشه و همکاران (۱۳۹۴) کارایی شاخص وضعیت پوشش گیاهی VCI را در تحلیل خشکسالی کشاورزی استان آذربایجان شرقی ارزیابی کردند. برای محاسبه شاخص VCI از داده‌های ماهواره MODIS طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۱ (جز ۲۰۰۷) برای اول ماه ژوئن استفاده کردند. نتایج بیان‌کننده بیشترین خشکسالی به ترتیب در سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۰۸ و

۲۰۰۰ و کمترین خشکسالی در سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۰۳ بود. به‌منظور ارزیابی موفقیت، مقادیر VCI در ۹ ایستگاه سینوپتیک را استخراج و با مقادیر SPI سه‌ماهه در سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۰۸، ۲۰۰۰، ۲۰۱۰ و ۲۰۰۳ مقایسه کردند. نتایج SPI نیز نشان‌دهنده بیشترین خشکسالی در سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۰۸ و ۲۰۰۰ و کمترین خشکسالی در سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۰۳ بود.

پیش‌نماز احمدی و همکاران (۱۳۹۶) خشکسالی شمال غرب ایران را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای MODIS و TRMM بررسی کردند. نتایج نشان می‌دهد سال ۲۰۰۸، بیشترین خشکسالی و ۲۰۱۰ و ۲۰۱۱، کمترین خشکسالی را داشته است.

تنکابایل و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۰۴) با محاسبه شاخص‌های NDVI، VCI، TCI و VHI به ارزیابی و پایش خشکسالی در منطقه جنوب غربی آسیا (افغانستان، پاکستان و دو کشور در غرب هند) اقدام کردند. نتایج این مطالعه نشان داد استفاده از داده‌های سنجش از دور در پایش خشکسالی جنوب غربی آسیا با توجه به گسترش و فراوانی خشکسالی و نبود مشاهدات زمینی نقش ارزشمندی دارد. همچنین این پژوهش روش‌هایی را برای پایش خشکسالی با استفاده از اتصال داده‌های سنجنده AVHRR با داده‌های روزانه سنجنده MODIS پیشنهاد می‌کند.

کوغان و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۰۴) با استفاده از سری داده‌های ماهواره NOAA-AVHRR، خشکسالی مغولستان را بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد

<sup>۱</sup> Thenkabail et al.

<sup>۲</sup> Kogan et al.

بررسی کردند. بدین منظور از داده‌های ایستگاه‌های زمینی و داده‌های TRMM چهار حوضه آبخیز بهره بردند. نتایج تجزیه و تحلیل دو مجموعه داده نشان داد استفاده از داده‌های سنجش از دور از جمله داده‌های TRMM به منظور پایش وضعیت خشکسالی آفریقا، عملی و قابل اعتماد است.

ژانگ و جیا<sup>۶</sup> (۲۰۱۳) خشکسالی هواشناسی منطقه نیمه‌خشک شمال چین را با استفاده از داده‌های سنجش از دور چند سنسور مایکروویو تجزیه و تحلیل کردند. نتایج آنها بیان‌کننده عملکرد بهتر شاخص‌های مایکروویو ترکیبی در پایش خشکسالی بود.

کیم و همکاران<sup>۷</sup> (۲۰۱۷) به منظور تجزیه و تحلیل خشکسالی، شاخص خشکسالی (SDCI<sup>۸</sup>) را با استفاده همزمان از مؤلفه‌های بارش، دما و گیاه محاسبه کردند. نتایج SDCI با برداشت محصولات کوهستانی مقایسه شد و همبستگی متقابل مثبتی را نشان داد.

الحق و ژانگ<sup>۹</sup> (۲۰۱۸) مطالعه‌ای را با هدف بررسی و تحلیل ویژگی‌های خشکسالی بر پایه دو شاخص خشکسالی هواشناسی SPI و شاخص شدت خشکسالی DSI و تأثیر خشکسالی بر بهره‌وری ذرت خوشه‌ای در سودان از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۱ انجام دادند. برای شناسایی مناطق خشک و مرطوب، از داده‌های بارش ماهواره TRMM از سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۱ استفاده و در مقیاس فصلی (جولای - اکتبر) نقشه‌برداری شد. یافته‌های این پژوهش نشان داد وضعیت خشکی در سراسر سودان در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف متغیر است. نتایج DSI نشان

شاخص VHI، ترکیبی از VCI و TCI، نتایج بهتری دارد.

سالازار و همکاران<sup>۱</sup> (۲۰۰۸) در مطالعه خود دریافتند شاخص VCI برای پایش خشکسالی در مقیاس‌های بزرگ از جمله خشکسالی کشاورزی مناسب است و ارتباطی قوی با عملکرد محصول دارد. ری و همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۱۰) از داده‌های NDVI و LST سنجنده مودیس و داده‌های بارندگی ماهواره TRMM به منظور برآورد خشکسالی منطقه مرطوب (کارولینا) و منطقه خشک (آریزونا) طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۹ استفاده کردند. آنها در مطالعه خود نتیجه گرفتند تغییرات شاخص SDCI<sup>۳</sup>، ترکیبی از داده‌های NDVI، LST و TRMM، نتایج بهتری را در برآورد خشکسالی در هر دو اقلیم مطالعه‌شده ارائه می‌کند.

دو و همکاران<sup>۴</sup> (۲۰۱۲) خشکسالی منطقه شاندونگ چین را با استفاده از داده‌های MODIS و TRMM طی دوره آماری ۱۱ ساله (۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰) ارزیابی کردند. نتایج آنها نشان داد شاخص ترکیبی به‌دست‌آمده از این دو سری داده، نتایج بهتری را در برآورد خشکسالی منطقه ارائه می‌دهد. آنها همچنین ثابت کردند این شاخص، یک شاخص نظارت جامع بر خشکسالی است و علاوه بر اطلاعات خشکسالی هواشناسی، تأثیر خشکسالی را نیز بر کشاورزی منعکس می‌کند.

نومن و همکاران<sup>۵</sup> (۲۰۱۲) وضعیت خشکسالی کشور آفریقا را با استفاده از داده‌های TRMM\_3B43

<sup>6</sup> Zhang & Jia

<sup>7</sup> Kim et al

<sup>8</sup> Scaled Drought Condition Index

<sup>9</sup> Elhag & Zhang

<sup>1</sup> Salazar et al

<sup>2</sup> Rhee et al

<sup>3</sup> Scaled Drought Condition Index

<sup>4</sup> Du et al

<sup>5</sup> Naumann et al

کار رفته است. این داده‌ها برحسب میلی‌متر و تهیه شده از سازمان هواشناسی کشور است.

### داده‌های ماهواره‌ای

داده‌های سنجش از دور شامل داده‌های شاخص تفاضل نرمال‌شده پوشش گیاهی NDVI و داده‌های دمای سطح زمین<sup>۱</sup> LST ماهواره MODIS و داده‌های بارندگی سری 3B43 ماهواره TRMM هستند. در پژوهش حاضر، داده‌های ماهیانه شاخص تفاضل نرمال‌شده پوشش گیاهی (MOD13A3.005) و داده‌های هشت‌روزه دمای سطح زمین (MOD11A2.005) با قدرت تفکیک مکانی یک کیلومتر با دوره آماری ۱۵ ساله طی ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۴ از سایت ناسا دانلود و ماه‌های مارس تا سپتامبر (فصل رشد گیاهان) به‌منظور ارزیابی شاخص‌های خشکسالی در نظر گرفته شدند. داده‌های هشت‌روزه LST از روز ژولین ۶۱ تا ۲۷۳ پردازش و مقادیر ماهیانه با میانگین وزنی محاسبه شدند. پیش از انجام محاسبات، سیستم مختصات هر دو سری داده با استفاده از نرم‌افزار MRT<sup>۲</sup> از سینوسی به UTM تغییر یافت. داده‌های سری 3B43 شامل میزان بارندگی ماهیانه (میلی‌متر بر ساعت) با قدرت تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه‌اند؛ بنابراین این داده‌ها به‌منظور تطابق مقیاس مکانی با داده‌های NDVI و LST به قدرت تفکیک مکانی یک کیلومتر تبدیل می‌شوند.

### روش‌شناسی پژوهش

داد بیشتر مناطق سودان از سال ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۱ متأثر از خشکسالی بوده است. همبستگی مکانی بین محصولات DSI، SPI3 و بارندگی TRMM نشان داد در اراضی کشاورزی همبستگی، مثبت و معنادار و در مناطق کوهستانی، منفی است. همچنین رابطه بین DSI و متغیر استاندارد عملکرد محصول (St.Y) برای ذرت در دو منطقه کشاورزی اصلی (مناطق مرکزی و شرقی) در دوره ۲۰۰۱-۲۰۱۱ بررسی شد که تطابق خوبی داشت. این مطالعه نشان داد DSI برای نظارت بر خشکسالی کشاورزی استفاده می‌شود و به‌منزله یک شاخص جایگزین برای ارزیابی عملکرد محصول در سودان در بعضی سطوح به کار می‌رود.

جمع‌بندی نتایج این پژوهش‌ها نشان می‌دهد معمولاً شاخص‌های خشکسالی سنجش از دور موجود با استفاده از باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک محاسبه و به‌طور گسترده در پایش خشکسالی کشاورزی استفاده می‌شود؛ با این حال کاربرد آنها در پایش خشکسالی هواشناسی محدود است و شاخصی وجود ندارد که بازتاب‌دهنده اطلاعاتی جامع از خشکسالی هواشناسی و خشکسالی کشاورزی باشد؛ بنابراین این پژوهش با هدف استفاده از شاخص‌های مختلف (وضعیت گیاه، دمای خاک و بارش)، ارائه شاخص تلفیقی و ارزیابی قابلیت شاخص‌ها انجام می‌شود.

### داده‌های پژوهش

#### داده‌های زمینی

در این مطالعه، داده‌های بارندگی ماهیانه ۷ ایستگاه سینوپتیک واقع در محدوده حوضه آبریز دریاچه ارومیه (شکل ۱) طی دوره آماری ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۴ به

<sup>۱</sup> Land Surface Temperature

<sup>۲</sup> MODIS Reprojection Tool

بارندگی هر پیکسل، حداقل و حداکثر آن در ماه مدنظر و در طول دوره آماری بررسی شده‌اند.

$$PCI = \frac{TRMM - TRMM_{\min}}{TRMM_{\max} - TRMM_{\min}} \quad (۳)$$

به‌منظور پایش جامع خشکسالی منطقه پژوهش و ارزیابی قابلیت داده‌های ماهواره‌ای از شاخص‌های خشکسالی ترکیبی استفاده می‌شود. شاخص سلامت گیاه VHI، ترکیبی از VCI و TCI است و اثر ترکیبی تنش رطوبت و گرما را نشان می‌دهد (رابطه ۴). شاخص <sup>۱</sup>CI، ترکیبی از سه متغیر VCI، TCI و VHI است که در این پژوهش با سه مجموعه وزنی مختلف (روابط ۷-۵) بررسی شده است (Rhee et al., 2010: 2877)

$$VHI = 0.5 \times VCI + 0.5 \times TCI \quad (۴)$$

$$CI_1 = (1/3) \times TCI + (1/3) \times PCI + (1/3) \times VCI \quad (۵)$$

$$CI_2 = (1/4) \times TCI + (2/4) \times PCI + (1/4) \times VCI \quad (۶)$$

$$CI_3 = (2/5) \times TCI + (2/5) \times PCI + (1/5) \times VCI \quad (۷)$$

اعتبارسنجی با استفاده از شاخص بارندگی استاندارد شده SPI

شاخص SPI را در سال ۱۹۹۳، مرکز ملی کلرادو و مرکز ملی کاهش خشکسالی ایالات متحده آمریکا به‌منظور تعریف و پایش وضعیت فعلی خشکسالی معرفی کردند. این شاخص براساس استانداردسازی احتمال بارش‌های ثبت شده در ایستگاه‌های هواشناسی در دوره‌های زمانی متفاوت محاسبه می‌شود (McKee, 1993: 183).

شاخص‌های خشکسالی مبتنی بر سنجش از دور

به‌منظور پایش خشکسالی حوضه آبریز دریاچه ارومیه، شاخص‌های وضعیت گیاه (VCI) و وضعیت دما (TCI) با استفاده از داده‌های ماهواره MODIS محاسبه می‌شوند. برای نخستین بار در سال ۱۹۹۵ کوگان شاخص VCI را پیشنهاد داده است. این شاخص نشان‌دهنده وضع پوشش گیاهی یک منطقه و تابعی از حداقل و حداکثر NDVI برای دوره‌ای چند ساله است. شاخص TCI برای تعیین پدیده خشکسالی مرتبط با درجه حرارت پیشنهاد شده است (Kogan, 1995: 94). پدیده خشکسالی رطوبت خاک را کاهش می‌دهد و باعث تنش حرارتی سطح زمین می‌شود؛ بنابراین مقدار LST در سال خشکسالی بیشتر برآورد می‌شود. الگوریتم محاسباتی این شاخص‌ها مشابه است و با روابط زیر محاسبه می‌شود. مقادیر حداقل و حداکثر به ترتیب نشان‌دهنده حداقل و حداکثر مقدار مؤلفه در ماه مدنظر و در کل دوره بررسی شده (۲۰۰۰ تا ۲۰۱۴) است (Du et al., 2012: 2).

$$VCI = \frac{NDVI - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \quad (۱)$$

$$TCI = \frac{LST_{\max} - LST}{LST_{\max} - LST_{\min}} \quad (۲)$$

داده‌های بارندگی TRMM مستقیماً با شاخص‌های VCI و TCI امکان تجزیه و تحلیل ندارد؛ بنابراین در این پژوهش از شاخص وضعیت بارش (PCI) برای تشخیص میزان کسری بارش و خشکسالی استفاده می‌شود. این شاخص با استفاده از رابطه ۳ محاسبه می‌شود (Du et al., 2012: 4). مؤلفه‌های TRMM،  $TRMM_{\min}$  و  $TRMM_{\max}$  به ترتیب نشان‌دهنده مقادیر

<sup>1</sup> Composite index



رودخانه و منابع ذخیره در دوره‌ای طولانی‌تر به ناهنجاری‌های بارش واکنش نشان می‌دهند. در این مطالعه سری زمانی مجموعه داده‌های SPI با استفاده از داده‌های بارندگی ایستگاههای باران‌سنجی واقع در حوضه در طول دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۴ محاسبه و برای اعتبارسنجی شاخص‌های خشکسالی مبتنی بر سنجش از دور استفاده می‌شود. طبقه‌بندی شدت خشکسالی براساس شاخص‌های مطالعه‌شده در جدول (۱) نشان داده شده است.

شاخص بارش استاندارد شده SPI برپایه این حقیقت استوار است که کسری بارش تأثیرات متفاوتی بر آب‌های زیرزمینی، ذخیره منابع، رطوبت خاک، پوشش برف و جریان جویبار دارد. شاخص بارش استاندارد شده، کسری بارش را برای مقیاس‌های زمانی چندگانه (۳، ۶، ۱۲، ۲۴ و ۴۸ ماهه) محاسبه می‌کند. این مقیاس‌های زمانی تأثیر خشکسالی را بر موجود بودن منابع آبی متفاوت بازتاب می‌دهد.

شرایط رطوبتی خاک دو برابر ناهنجاری‌های بارش در یک مقیاس نسبتاً کوتاه واکنش نشان می‌دهد؛ در حالی که آب‌های زیرزمینی، جریان

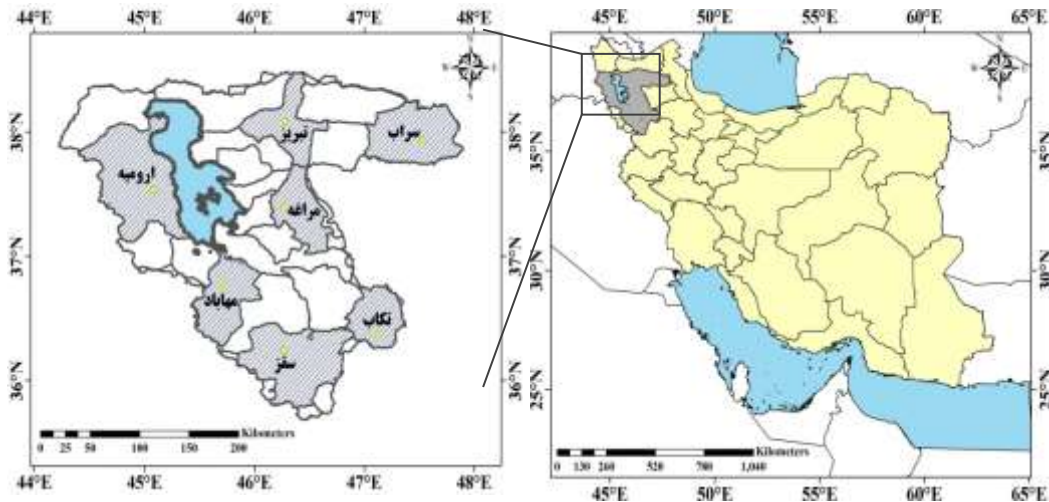
جدول ۱. طبقه‌بندی شدت خشکسالی با شاخص SPI و شاخص‌های ماهواره‌ای

CI, PCI, TCI, VCI	SPI	طبقه شدت خشکسالی
<۰/۱	$SPI < -2$	خشکسالی بسیار شدید
۰/۱-۰/۱۹۹	$-2 \leq SPI < -1/5$	خشکسالی شدید
۰/۲-۰/۲۹۹	$-1/5 \leq SPI < -1$	خشکسالی متوسط
۰/۳-۰/۳۹۹	$-1 \leq SPI < 0$	خشکسالی ضعیف
$\geq 0/4$	$SPI > 0$	غیرخشکسالی

#### محدوده پژوهش

۳٪ مساحت کل کشور ایران را دربرمی‌گیرد. حوضه آبریز این دریاچه با داشتن دشت‌هایی مانند تبریز، ارومیه، بناب، مهاباد، میاندوآب، نقده، سلماس، پیرانشهر، آذرشهر و اشنویه، یکی از کانون‌های ارزشمند فعالیت کشاورزی و دامداری در ایران به شمار می‌رود. مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های سینوپتیک مطالعه‌شده در جدول (۲) ارائه شده است.

دریاچه ارومیه، بزرگ‌ترین دریاچه داخلی ایران و دومین دریاچه آب شور دنیاست. حوضه آبریز دریاچه ارومیه 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 (شکل ۱). این محدوده با مساحت تقریبی ۵۱۸۷۶ کیلومترمربع پیرامون



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی محدوده مطالعه شده و ایستگاه‌های سینوپتیک

جدول ۲. مشخصات ایستگاه‌های سینوپتیک مطالعه شده در حوضه آبریز دریاچه ارومیه

نام ایستگاه	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ارتفاع از سطح دریا (متر)
تبریز	۳۸°۰۵'	۴۶°۱۷'	۱۳۶۱
ارومیه	۳۷°۳۲'	۴۵°۰۵'	۱۳۱۵/۹
مراغه	۳۷°۲۴'	۴۶°۱۶'	۱۴۷۷
مهاباد	۳۶°۷۶'	۴۵°۷۱'	۱۳۸۵
تکاب	۳۶°۳۸'	۴۷°۱۱'	۱۷۶۵
سراب	۳۷°۹۳'	۴۷°۵۳'	۱۶۸۲
سقز	۳۶°۲۵'	۴۶°۲۶'	۱۵۲۳

### یافته‌های پژوهش

پس از پردازش اولیه تصاویر ماهواره‌ای با MRT، شاخص‌های خشکسالی مبتنی بر سنجش از دور برای ماههای مارس تا سپتامبر (فصل رشد) طی دوره آماری ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۴ در محیط نرم‌افزار ArcGIS محاسبه شدند. مقادیر هریک از این شاخص‌ها، به‌طور میانگین از محدوده شهرستان‌های دربرگیرنده ایستگاه‌های سینوپتیک مطالعه شده استخراج شدند. ضریب همبستگی بین شاخص‌های زمینی (SPI3، SPI6 و SPI6) و شاخص‌های ماهواره‌ای (VCI، TCI، PCI، VHI، CI1، CI2، CI3) طی فصل رشد به تفکیک حوضه و هریک از ایستگاه‌های سینوپتیک مطالعه شده

در جدول (۳) ارائه می‌شود. در حوضه آبخیز دریاچه ارومیه طی فصل رشد، شاخص SPI3، بیشترین همبستگی (۰/۴۳) را با CI1 و شاخص‌های SPI6 و SPI9، بیشترین همبستگی را (به ترتیب با ۰/۶۲ و ۰/۶۸) با VCI دارند. همچنین در ایستگاه ارومیه و تبریز نتایج بیان‌کننده وجود همبستگی زیاد بین SPI3 و CI1 با ۰/۵۲، SPI6 و SPI9 و VCI به ترتیب با ۰/۶۶ و ۰/۶۲ است.

شاخص SPI3 در تمامی ایستگاه‌های مطالعه شده همبستگی بیشتری با شاخص‌های تلفیقی (CI1، CI2 و CI3) نسبت به سایر شاخص‌ها دارد. این شاخص در ایستگاه‌های تکاب با ۰/۳۳، CI1، در ایستگاه‌های

سراب، ۰/۳۸ و ۰/۴۵ در ایستگاه سقز، ۰/۴۷ و ۰/۵۵ در ایستگاه مراغه و ۰/۵۰ و ۰/۵۳ در ایستگاه مهاباد، بیشترین همبستگی را با VCI دارند.

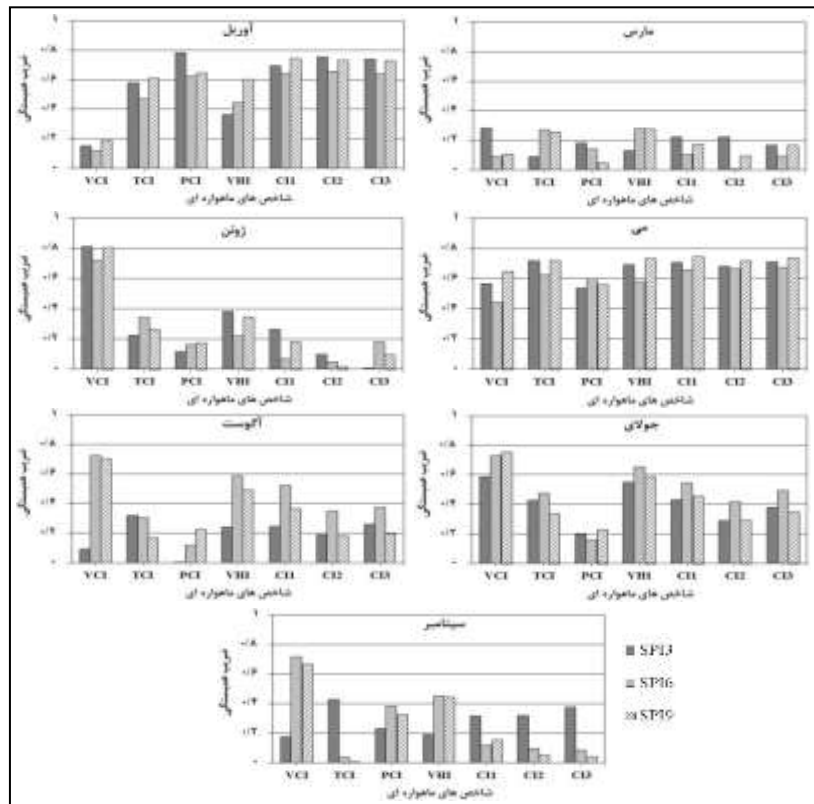
سراب و مهاباد به ترتیب با ۰/۳۹ و ۰/۲۲ با VHI، در سقز و مراغه به ترتیب با ۰/۲۵ و ۰/۳۶ با CI3، بیشترین همبستگی را نشان می‌دهد. شاخص‌های SPI6 و SPI9 به ترتیب با ۰/۶۵ و ۰/۶۴ در ایستگاه

جدول ۳. ضریب همبستگی بین شاخص‌های زمینی و ماهواره‌ای طی فصل رشد

ایستگاه	شاخص‌های ماهواره‌ای شاخص‌های زمینی	VCI	TCI	PCI	VHI	CI1	CI2	CI3
حوضه آبخیز	SPI3	۰/۲۷	۰/۳۲	۰/۱۵	۰/۳۸	۰/۴۳	۰/۳۶	۰/۴۰
	SPI6	۰/۶۲	۰/۲۴	۰/۱۲	۰/۵۱	۰/۴۵	۰/۳۱	۰/۳۳
	SPI9	۰/۶۸	۰/۲۵	۰/۱۳	۰/۵۴	۰/۴۹	۰/۳۵	۰/۳۶
ارومیه	SPI3	۰/۴۲	۰/۴۰	۰/۱۱	۰/۵۰	۰/۵۲	۰/۴۱	۰/۴۶
	SPI6	۰/۶۶	۰/۳۱	۰/۰۴	۰/۵۶	۰/۵۲	۰/۳۸	۰/۴۰
	SPI9	۰/۶۶	۰/۳۳	۰/۰۲	۰/۵۷	۰/۵۲	۰/۳۷	۰/۴۰
تکاب	SPI3	۰/۱۳	۰/۲۷	۰/۱۵	۰/۲۸	۰/۳۳	۰/۲۹	۰/۳۲
	SPI6	۰/۴۰	۰/۲۳	۰/۰۶	۰/۴۲	۰/۳۹	۰/۲۸	۰/۳۱
	SPI9	۰/۵۳	۰/۲۵	۰/۰۷	۰/۵۱	۰/۴۷	۰/۳۴	۰/۳۶
تبریز	SPI3	۰/۲۸	۰/۳۲	۰/۲۹	۰/۳۹	۰/۵۲	۰/۴۸	۰/۴۹
	SPI6	۰/۶۲	۰/۱۹	۰/۰۹	۰/۴۷	۰/۴۵	۰/۳۴	۰/۳۴
	SPI9	۰/۶۲	۰/۱۷	۰/۰۸	۰/۴۶	۰/۴۳	۰/۳۲	۰/۳۲
سراب	SPI3	۰/۳۱	۰/۲۹	۰/۱۶	۰/۳۹	۰/۳۷	۰/۳۶	۰/۳۸
	SPI6	۰/۶۵	۰/۱۹	۰/۰۱	۰/۴۸	۰/۳۳	۰/۲۹	۰/۳۰
	SPI9	۰/۶۴	۰/۱۸	۰/۱۱	۰/۴۷	۰/۴۲	۰/۳۷	۰/۳۶
سقز	SPI3	۰/۰۶	۰/۲۱	۰/۱۳	۰/۱۹	۰/۲۴	۰/۲۲	۰/۲۵
	SPI6	۰/۳۸	۰/۲۰	۰/۰۱	۰/۳۶	۰/۲۹	۰/۱۹	۰/۲۲
	SPI9	۰/۴۵	۰/۲۲	۰/۰۲	۰/۴۰	۰/۳۲	۰/۲۰	۰/۲۳
مراغه	SPI3	۰/۰۹	۰/۳۰	۰/۱۶	۰/۲۷	۰/۳۵	۰/۳۱	۰/۳۶
	SPI6	۰/۴۷	۰/۱۹	۰/۰۶	۰/۳۹	۰/۳۹	۰/۲۸	۰/۳۰
	SPI9	۰/۵۵	۰/۱۹	۰/۰۴	۰/۴۳	۰/۴۱	۰/۲۹	۰/۳۱
مهاباد	SPI3	۰/۱۸	۰/۱۹	۰/۰۱	۰/۲۲	۰/۱۹	۰/۱۴	۰/۱۷
	SPI6	۰/۵۰	۰/۲۵	۰/۰۴	۰/۴۳	۰/۳۴	۰/۲۲	۰/۲۵
	SPI9	۰/۵۳	۰/۲۴	۰/۰۳	۰/۴۴	۰/۳۶	۰/۲۳	۰/۲۶

ماه‌های مختلف و مقیاس زمانی SPI متفاوت است. این امر حاکی است قابلیت شاخص‌ها در پایش خشکسالی حوضه آبریز دریاچه ارومیه تا حد زیادی در طول فصل رشد متغیر است.

ضریب همبستگی بین SPI در مقیاس‌های زمانی ۳، ۶ و ۹ ماهه و شاخص‌های خشکسالی ماهواره‌ای برای هر ماه طی فصل رشد خلاصه شده است (شکل ۲). نتایج نشان می‌دهد مقدار R براساس



شکل ۲. ضریب همبستگی بین شاخص‌های خشکسالی ماهواره‌ای و SPI طی فصل رشد (مارس - سپتامبر)

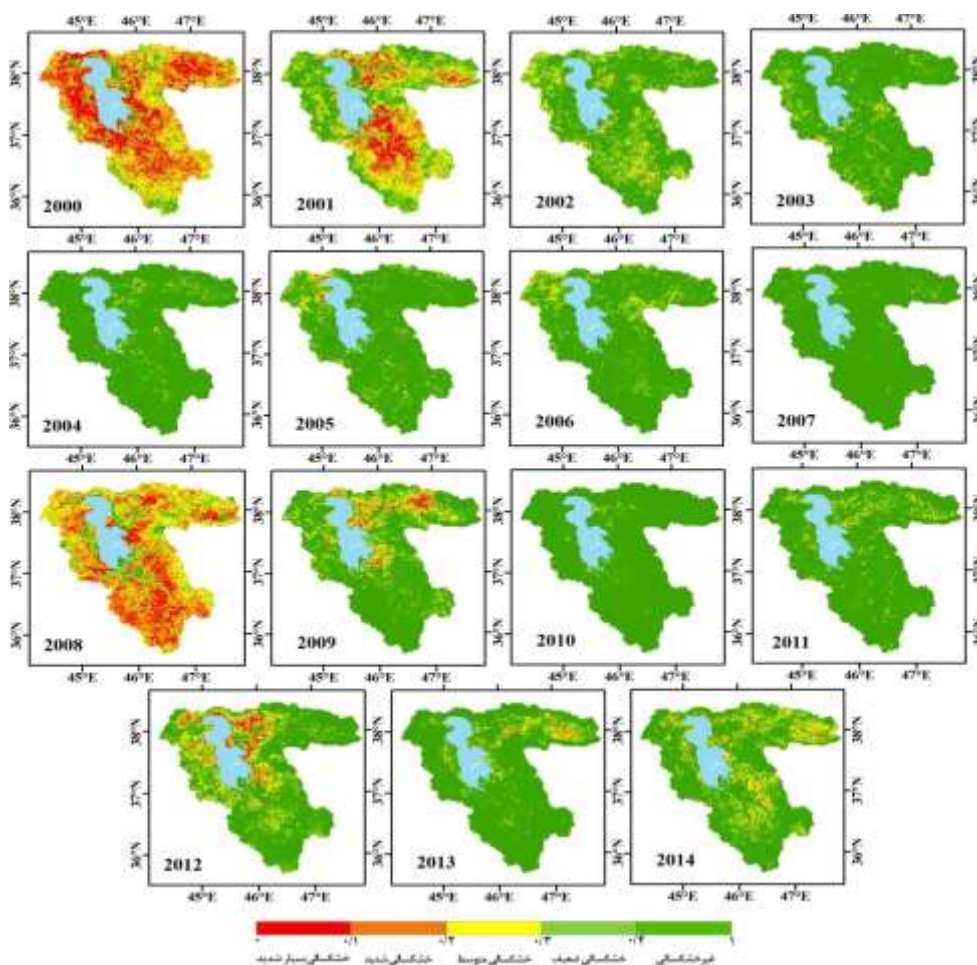
دارد. در ماه ژوئن، شاخص‌های VCI برخلاف دیگر شاخص‌ها، همبستگی‌ای قوی (بیش از ۰/۷) با شاخص SPI (۳، ۶ و ۹ ماهه) دارند؛ بنابراین شاخص‌های VCI، بهترین عملکرد را در پایش خشکسالی حوضه آبریز دریاچه ارومیه در ماه ژوئن از خود نشان می‌دهند. همچنین در ماه جولای بیشترین مقادیر همبستگی مربوط به شاخص‌های VCI و VHI است. در ماه آگوست، بیشترین همبستگی SPI6 و SPI9 به ترتیب با ۰/۷۲ و ۰/۷۰ مربوط به شاخص VCI است. در ماه سپتامبر بیشترین همبستگی SPI3 مربوط به TCI و شاخص‌های تلفیقی CI1، CI2 و CI3 است. در صورتی که SPI6 و SPI9 بیشترین مقدار همبستگی را با VCI و VHI دارند.

در ماه مارس، شاخص‌های SPI3، SPI6 و SPI9 بیشترین همبستگی را به ترتیب با ۰/۲۸، ۰/۲۸ و ۰/۲۷ با شاخص‌های VCI و VHI دارند. در ماه آوریل، SPI در مقیاس‌های مطالعه‌شده همبستگی زیادی (۰/۶) را با شاخص‌های ترکیبی (CI1، CI2 و CI3) و شاخص PCI نشان می‌دهد؛ به طوری که SPI3 با ۰/۷۹، SPI6 با ۰/۶۶ و SPI9 با ۰/۷۵، بیشترین همبستگی را به ترتیب با PCI، CI2 و CI1 دارند. کمترین همبستگی مربوط به شاخص VCI است.

نتایج ماه می نشان می‌دهد شاخص‌های SPI3، SPI6 و SPI9 بیشترین همبستگی را به ترتیب با ۰/۷۲، ۰/۶۷ و ۰/۷۵ با شاخص‌های TCI، CI1 و CI3 دارند. همچنین تقریباً بین تمامی شاخص‌های ماهواره‌ای و زمینی در ماه می همبستگی زیادی وجود

متوسط بیشترین همبستگی را با شاخص‌های زمینی طی کل فصل رشد دارد (جدول ۳)، توزیع مکانی طبقات وضعیت خشکسالی از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۲ طی فصل رشد براساس شاخص VCI در شکل (۳) نشان داده شده است.

هدف اصلی این مطالعه، ارزیابی قابلیت داده‌های ماهواره‌ای و ارائه شاخص خشکسالی مطلوب برای پیش خشکسالی کشاورزی حوضه آبریز دریاچه ارومیه طی کل فصل رشد و ماه‌های مارس تا سپتامبر است؛ بنابراین با توجه به اینکه شاخص VCI به‌طور



شکل ۳. توزیع مکانی وضعیت خشکسالی براساس شاخص VCI طی فصل رشد ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۴

حوضه متأثر از خشکسالی بوده و در سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۲ حوالی دریاچه متأثر از خشکسالی قرار گرفته است. درصد زیر پوشش هریک از طبقات شدت خشکسالی براساس شاخص VCI طی فصل رشد (۲۰۰۰ تا ۲۰۱۴) در جدول (۴) نشان داده شده است.

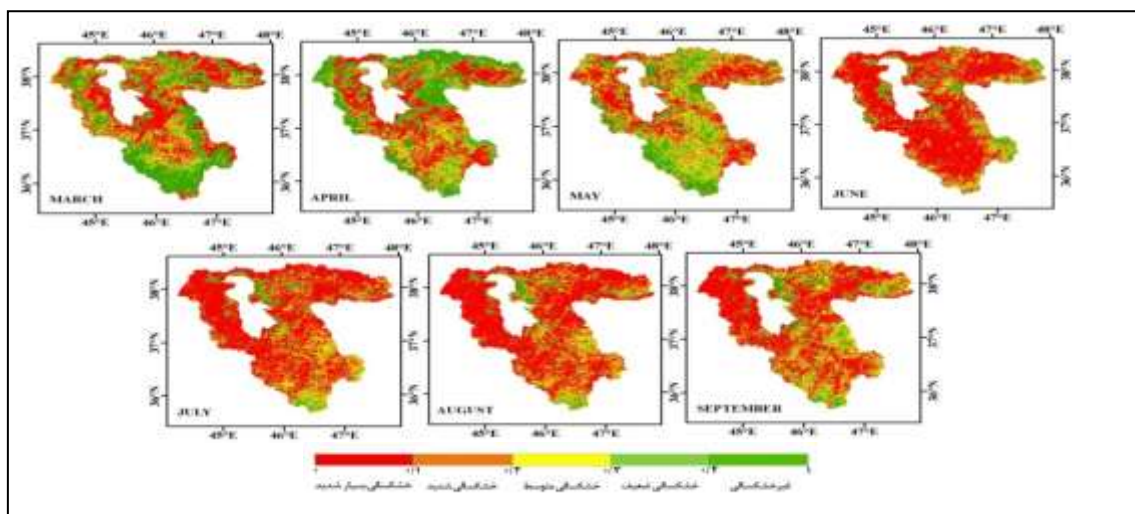
در سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۸ و ۲۰۰۱ به ترتیب با ۹۳/۸۵، ۹۱/۹۳ و ۷۲ درصد، بیشترین خشکسالی (ضعیف تا بسیار شدید) در سطح حوضه روی داده است. کمترین خشکسالی به ترتیب با ۱/۸۹، ۲/۰۶ و ۵/۳۳ درصد در سال‌های ۲۰۱۰، ۲۰۰۷ و ۲۰۰۴ دیده می‌شود. در سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۰۸ تقریباً کل سطح

جدول ۴. درصد طبقات شدت خشکسالی براساس شاخص VCI طی فصل رشد ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۴

سال	غیرخشکسالی	خشکسالی ضعیف	خشکسالی متوسط	خشکسالی شدید	خشکسالی بسیار شدید
۲۰۰۰	۶/۱۵	۱۰/۳۷	۲۵/۵۶	۳۴/۷۲	۲۳/۲۱
۲۰۰۱	۲۸/۰۰	۲۵/۲۴	۲۱/۸۷	۱۵/۸۳	۹/۰۶
۲۰۰۲	۶۸/۴۶	۲۲/۵۷	۷/۴۹	۱/۳۲	۰/۱۶
۲۰۰۳	۸۷/۳۰	۹/۷۸	۲/۳۶	۰/۵۱	۰/۰۵
۲۰۰۴	۹۴/۶۷	۳/۹۳	۱/۱۵	۰/۲۲	۰/۰۳
۲۰۰۵	۸۶/۷۳	۱۰/۱۶	۲/۳۷	۰/۵۸	۰/۱۶
۲۰۰۶	۸۵/۷۵	۱۱/۱۸	۲/۷۶	۰/۲۹	۰/۰۲
۲۰۰۷	۹۷/۹۴	۱/۶۶	۰/۳۲	۰/۰۶	۰/۰۱
۲۰۰۸	۸/۰۷	۱۲/۴۸	۲۸/۸۶	۳۶/۰۰	۱۴/۵۹
۲۰۰۹	۶۹/۴۱	۱۶/۶۰	۸/۲۵	۴/۴۲	۱/۳۲
۲۰۱۰	۹۸/۱۱	۱/۴۱	۰/۳۸	۰/۱۰	۰/۰۱
۲۰۱۱	۸۹/۵۶	۷/۴۳	۲/۳۷	۰/۵۹	۰/۰۵
۲۰۱۲	۶۴/۴۲	۱۷/۹۸	۹/۷۷	۵/۱۹	۲/۶۳
۲۰۱۳	۸۸/۰۲	۷/۰۲	۳/۵۰	۱/۲۷	۰/۱۸
۲۰۱۴	۶۹/۸۷	۱۸/۲۹	۸/۷۴	۲/۷۸	۰/۳۲

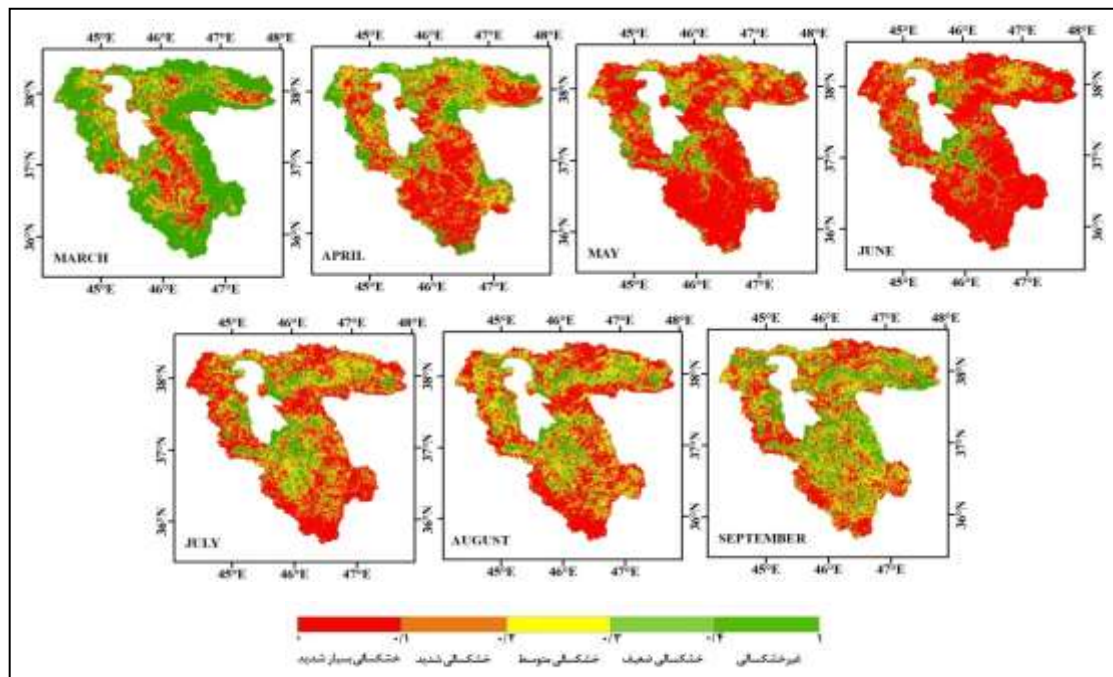
توزیع زمانی مکانی شدت خشکسالی سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۰۸ به ترتیب در شکل‌های (۴) و (۵) ارائه شده است. نتایج سال ۲۰۰۰ نشان می‌دهد خشکسالی بسیار شدید در حوالی دریاچه ارومیه و شرق حوضه رخ داده است. در ماه آوریل خشکسالی بیشتر در قسمت‌های غربی و جنوبی دریاچه و در ماه می در غرب دریاچه رخ داده است. در ماه جولای شدت خشکسالی افزایش یافته و در ماه سپتامبر به نسبت کاهش یافته است. بیشترین خشکسالی (شدید تا بسیار

شدید) با ۸۰ و ۷۹ درصد به ترتیب در ماه‌های آگوست و جولای سال ۲۰۰۰ رخ داده است (شکل ۴). نتایج خشکسالی سال ۲۰۰۸ بیان‌کننده وجود روند افزایشی شدت خشکسالی از ماه مارس تا ژوئن است؛ به طوری که در ماه‌های می و ژوئن جز سطح اندکی تقریباً تمام سطح حوزه متأثر از خشکسالی شدید و بسیار شدید است. در ماه جولای و آگوست شدت خشکسالی در حاشیه حوضه شدید و در ماه سپتامبر رو به کاهش است (شکل ۵).



شکل ۴. توزیع مکانی شدت خشکسالی ماه‌های مارس تا سپتامبر براساس شاخص VCI در سال ۲۰۰۰





شکل ۵. توزیع مکانی شدت خشکسالی ماه‌های مارس تا سپتامبر براساس شاخص VCI در سال ۲۰۰۸

### نتیجه‌گیری

پدیده خشکسالی به‌مثابه بلایی طبیعی همواره باعث خسارات اقتصادی وسیعی می‌شود. کم‌توجهی به پدیده خشکسالی در ایران به‌منزله کشور مستعد خشکسالی باعث شده است هرساله آسیب‌های اقتصادی و اجتماعی بسیار زیادی به پیکره اقتصاد ایران وارد شود. وجود شاخص‌های مناسب و قابل اعتماد به نحوی که خشکسالی را به‌طور مؤثری ارزیابی و پیش‌کنند، امری ضروری و اساسی است. اندازه‌گیری‌های میدانی برای تولید شاخص‌های خشکسالی از دقت زیادی برخوردار است. از سویی تهیه این شاخص‌ها در پهنه‌های وسیع بسیار پرهزینه است. مشاهدات فضایی از طریق قابلیت دریافت اطلاعات با قدرت تفکیک مکانی و زمانی در سطح وسیعی از زمین، امکان پیش‌خشکسالی‌ها را با استفاده از تکنولوژی سنجنش از دور فراهم می‌آورد.

پژوهش حاضر با هدف ارزیابی قابلیت داده‌های ماهواره‌ای MODIS و TRMM در پیش‌خشکسالی حوضه آبریز دریاچه ارومیه انجام شده است. استفاده از اطلاعات کشاورزی و هواشناسی در محاسبه شاخص‌ها، ترکیب شاخص‌ها به‌منظور پیش‌جامع خشکسالی و ارزیابی این نتایج، از مزایای پژوهش حاضر به‌شمار می‌رود.

نتایج همبستگی شاخص‌های ماهواره‌ای (VCI، TCI، PCI، VHI، CI1، CI2، CI3) و شاخص‌های زمینی (SPI3، SPI6، SPI9) به‌طور میانگین نشان می‌دهد شاخص ماهواره‌ای مطلوب برای پیش‌خشکسالی حوضه آبریز دریاچه ارومیه طی فصل رشد، شاخص VCI است. شاخص‌های SPI6، SPI3 و SPI9 در ماه‌های مارس به ترتیب بیشترین همبستگی را با VCI و VHI، در ماه آوریل با PCI و CI1، در ماه می با TCI، CI3 و CI1، در ماه ژوئن و

و ارائه نقشه‌های شدت خشکسالی سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۰۸ به‌مثابه خشک‌ترین سال از مزایای پژوهش حاضر است؛ زیرا تاکنون در پژوهش‌های مربوط به حوضه آبخیز دریاچه ارومیه، این حوضه صرفاً برای یک ماه خاص بررسی و از استفاده از شاخص‌های ترکیبی صرف‌نظر شده است (رضایی مقدم و همکاران، ۱۳۹۱ و رضایی بنفشه و همکاران، ۱۳۹۴).

با استفاده از شاخص‌های ماهواره‌ای مطلوب ارائه‌شده در پژوهش حاضر، امکان پیش‌بینی و برآورد منطقه‌ای پدیده خشکسالی حوضه آبریز دریاچه ارومیه در ماه‌های مختلف فصل رشد یا طی فصل رشد فراهم و نتیجه بهتری برآورد می‌شود. همچنین با توجه به اینکه معمولاً تعداد ایستگاه‌های هواشناسی کافی نیست یا پراکنش مناسبی در سطح منطقه مطالعه شده ندارند، استفاده از فناوری سنجش از دور به‌منظور ارزیابی و پایش هرچه دقیق‌تر پدیده خشکسالی به‌ویژه در مناطق بدون ایستگاه‌های زمینی یا مناطقی با شبکه ایستگاه‌های زمینی پراکنده و نامنظم پیشنهاد می‌شود.

#### منابع

باعقیده، محمد، علیجانی، بهلول، ضیاییان، پرویز، (۱۳۹۰). بررسی امکان استفاده از شاخص

پوشش گیاهی NDVI در تحلیل خشکسالی‌های

استان اصفهان، نشریه مطالعات جغرافیایی مناطق

خشک، دوره ۱، شماره ۴، ۱۶-۱.

پیش‌نماز احمدی، مجید، هوشمند، علی، زمانی، فهیمه،

(۱۳۹۶). پایش خشکسالی شمال غرب کشور با

استفاده از داده‌های MODIS و TRMM،

جولای با VCI و در ماه‌های آگوست و سپتامبر با TCI و VCI دارند. در ماه‌های می و آوریل شاخص‌های ترکیبی نتایج بهتری را نسبت به شاخص‌های VCI و TCI ارائه کرده‌اند؛ در نتیجه شاخص‌های ترکیبی طی ماه‌های مرطوب (می و آوریل) نتایج بهتری را ارائه می‌کنند.

نتایج مطالعات ری و همکاران (۲۰۱۰) و دو و همکاران (۲۰۱۲) نیز بیان‌کننده عملکرد بهتر شاخص‌های ترکیبی در پایش خشکسالی ماه‌های مرطوب است. همچنین مقادیر همبستگی نشان می‌دهد شاخص‌های ماهواره‌ای در ماه‌های آوریل و می عملکرد بهتری در برآورد خشکسالی منطقه مطالعه شده نسبت به سایر ماه‌های مطالعه شده دارند. نتایج طبقه‌بندی شدت خشکسالی حوضه آبریز دریاچه ارومیه براساس شاخص ترکیبی VCI طی فصل رشد (مارس تا سپتامبر) نشان داد در سال ۲۰۰۰ و ۲۰۰۸ تقریباً کل سطح حوضه، در سال ۲۰۰۱ بیشتر قسمت‌های جنوبی دریاچه ارومیه و در سال ۲۰۱۲ حوالی دریاچه متأثر از خشکسالی (ضعیف تا بسیار شدید) بوده است. دیگر سال‌های مطالعه شده به نسبت کمتر در معرض خشکسالی قرار گرفته و سال‌های ۲۰۱۰، ۲۰۰۷ و ۲۰۰۴ به ترتیب با ۱/۸۹، ۲/۰۶ و ۵/۳۳ درصد، کمترین خشکسالی (ضعیف تا بسیار شدید) را دارند.

ارزیابی دقت شاخص‌های ماهواره‌ای طی فصل رشد (مارس تا سپتامبر) بین سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۱۴ (دوره ۱۵ ساله) در کل محدوده مطالعاتی و به تفکیک ایستگاه‌های سینوپتیک، ارائه شاخص مطلوب پایش خشکسالی طی ماه‌های مختلف فصل رشد، پایش خشکسالی کل حوضه براساس شاخص مطلوب VCI



گیاهی و حرارتی ماهواره NOAA-AVHRR در تحلیل خشکسالی منطقه کاشان، فصلنامه علمی پژوهشی تحقیقات مرتع و بیابان ایران، دوره ۱۷، شماره ۳، ۶۵-۴۴۵.

میرموسوی، سید حسین، کریمی، حمیده، (۱۳۹۲). مطالعه اثر خشکسالی بر پوشش گیاهی با استفاده از تصاویر سنجنده MODIS (مطالعه موردی: استان کردستان)، مجله جغرافیا و توسعه، دوره ۱۱، شماره ۳۱، ۷۶-۵۷.

Du, L., Tian, Q., Yu, T., Meng, Q., Jancso, T., Udvardy, P., Huang, Y., (2012). A comprehensive drought monitoring method integrating MODIS and TRMM data, International Journal of Applied Earth Observation and Geoformation, Vol 23, Pp 245-253.

Elhag, K., Zhang, W., (2018). Monitoring and Assessment of Drought Focused on Its Impact on Sorghum Yield over Sudan by Using Meteorological Drought Indices for the Period 2001-2011, Remote Sensing, Vol 10 (8), 1231 p.

Gupta, M., Srivastava, P.K., Islam, T., Ishak, A.M.B., (2014). Evaluation of TRMM rainfall for soil moisture prediction in a subtropical climate, Environmental Earth Sciences, Vol 71 (10), Pp 4421-4431.

Heim Jr, R.R., (2002). A review of twentieth-century drought indices used in the United States, Bulletin of the American Meteorological Society, Vol 83 (8), Pp 1149-1165.

Kim, Y., Lee, S.B., Yun, H., Kim, J., Park, Y., (2017, July). A drought analysis method based on modis satellite imagery and AWS data, In Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2017 IEEE International (pp 4862-4865). IEEE.

Kogan, F.N., (1995). Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection,

بیست و چهارمین همایش ملی ژئوماتیک، اردیبهشت ۱۳۹۶.

جهانبخش اصل، سعید، ساری صراف، بهروز، خورشید دوست، علی محمد، رستم‌زاده، هاشم، (۱۳۸۸). ارزیابی تغییرات پوشش گیاهی دشت سراب و تحلیل دو دوره خشکسالی و ترسالی، فصلنامه علمی پژوهشی انجمن جغرافیای ایران، دوره ۷، شماره ۲۳، ۱۱۷-۱۳۲.

رضایی بنفشه، مجید، رضایی، علی، فریدپور، مجتبی، (۱۳۹۴). تحلیل خشکسالی کشاورزی استان آذربایجان شرقی با تأکید بر سنجش از دور و شاخص وضعیت پوشش گیاهی، نشریه دانش آب و خاک، دوره ۲۵، شماره ۱، ۱۲۳-۱۱۳.

رضایی مقدم، محمدحسین، ولی‌زاده کامران، خلیل، رستم‌زاده، هاشم، رضایی، علی، (۱۳۹۱). ارزیابی کارایی داده‌های سنجنده MODIS در برآورد خشکسالی (مطالعه موردی: حوضه آبریز دریاچه ارومیه)، مجله جغرافیا و پایداری محیط، دوره ۲، شماره ۵، ۳۷-۵۲.

زمانیان، محمدتقی، بهیار، محمدباقر، کریمی حسینی، آزاده، وظیفه‌دوست، مجید، (۱۳۹۱). پایش خشکسالی کشاورزی با استفاده از تولیدات ماهواره‌ای سنجنده NOAA-AVHRR، نشریه پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، دوره ۳، شماره ۹، ۴۳-۵۴.

شمسی‌پور، علی‌اکبر، علوی‌پناه، کاظم، محمدی، حسین، (۱۳۸۹). بررسی کارایی شاخص‌های

- and humid regions using multi-sensor remote sensing data**, Remote Sensing of Environment, Vol 114 (12), Pp 2875-2887.
- Riebsame, W.E., Changnon Jr, S.A., Karl, T.R., (1991). **Drought and natural resources management in the United States**, Impacts and implications of the 1987-89 drought, Westview Press Inc.
- Salazar, L., Kogan, F., Roytman, L., (2008). **Using vegetation health indices and partial least squares method for estimation of corn yield**, International Journal of Remote Sensing, Vol 29 (1), Pp 175-189.
- Son, N.T., Chen, C.F., Chen, C.R., Chang, L.Y., Minh, V.Q., (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, Vol 18, Pp 417-427.
- Tate, E.L., Gustard, A., (2000). **Drought definition: a hydrological perspective**, In Drought and drought mitigation in Europe (pp 23-48), Springer, Dordrecht.
- Thenkabail, P.S., Gamage, M.S.D.N., (2004). **The use of remote sensing data for drought assessment and monitoring in Southwest Asia**, Vol 85, Iwmi.
- Zhang, A., Jia, G., (2013). **Monitoring meteorological drought in semiarid regions using multi-sensor microwave remote sensing data**, Remote Sensing of Environment, Vol 134, Pp 12-23.
- Advances in space research, Vol 15 (11), Pp 91-100.
- Kogan, F., Stark, R., Gitelson, A., Jargalsaikhan, L., Dugrajav, C., Tsooj, S., (2004). **Derivation of pasture biomass in Mongolia from AVHRR-based vegetation health indices**, International Journal of Remote Sensing, Vol 25 (14), Pp 2889-2896.
- Li, J.G., Ruan, H.X., Li, J.R., Huang, S.F., (2010). **Application of TRMM precipitation data in meteorological drought monitoring**, Journal of China Hydrology, Vol 30 (4), Pp 43-46.
- McKee, T.B., Doesken, N.J., Kleist, J., (1993, January). **The relationship of drought frequency and duration to time scales**, In Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, Vol 17, No 22, Pp 179-183, Boston, MA: American Meteorological Society.
- Mishra, A.K., Singh, V.P., (2010). **A review of drought concepts**, Journal of hydrology, Vol 391 (1-2), Pp 202-216.
- Naumann, G., Barbosa, P., Carrao, H., Singleton, A., Vogt, J., (2012). **Monitoring drought conditions and their uncertainties in Africa using TRMM data**, Journal of Applied Meteorology and Climatology, Vol 51 (10), Pp 1867-1874.
- Peñuelas, J., Filella, I., (2009). **Phenology feedbacks on climate change**, Science, Vol 324 (5929), Pp 887-888.
- Rhee, J., Im, J., Carbone, G.J., (2010). **Monitoring agricultural drought for arid**

