

Monitoring of agricultural and meteorological drought using satellite data in Chaharmahal and Bakhtiari Province

M. Yaghoubi^{1*}, A. Ghasemi² and S. Hamzeh³

Extended Abstract

Introduction:

Drought is one of the most important climate hazards that has widespread impacts on water resources, agriculture and ecosystems. Monitoring and assessing this phenomenon requires the use of valid indicators and reliable data. Preventive measures and planning against drought are of great importance in reducing its effects, which requires the use of sufficient knowledge in drought forecasting. Recently, remote sensing and techniques developed based on satellite images have been able to provide appropriate estimates of drought on a regional scale. Currently, satellite images are regularly obtained from the Earth's surface with high spatial resolution and can provide valuable spatial data. The advantages of using remote sensing over meteorological methods include increased sampling points, wider coverage area, higher temporal resolution and lower cost. Using drought indices based on remote sensing data, it is possible to examine spatial patterns of drought. However, these indices are geographically or temporally specific and their accuracy decreases when used in other regions and times. In this regard, the main objective of this study is to investigate the spatial and temporal distribution patterns of drought and determine the performance of remote sensing indices in the spring and summer seasons in Chaharmahal and Bakhtiari province.

Materials and Methods:

Chaharmahal and Bakhtiari Province plays a key role in providing water resources in Iran, as it is the headwaters of the Karun and Zayandeh Rood rivers. This makes accurate and timely monitoring of drought in the province essential. The current study, along with validating satellite image precipitation data, examined the correlation of each satellite index with the Standardized Precipitation Index (SPI), a globally standard index for drought assessment. In this study, a set of indices based on remote sensing data, including the Vegetation Condition Index (VCI), Temperature Condition Index (TCI) and Plant Health Index (VHI), was used to assess the drought situation in Chaharmahal and Bakhtiari Province. These indices were calculated using MODIS sensor images on a seasonal scale, and for the period 2000 to 2023 for 33 stations. In addition, evaluated IMERG satellite precipitation data were also used. The IMERG data is a satellite precipitation dataset with a spatial resolution of 0.1°, produced by combining data from the TRMM and GPM satellites. To calculate drought indices, MODIS data from the Terra satellite image series were used. In this study, Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) data with a spatial resolution of 1000 meters and a temporal resolution of 16 days were used. The NDVI index is one of the most widely used indices in vegetation and drought studies, because its changes can indicate the health status of vegetation over different time periods. In addition, land surface temperature (LST) data with a spatial resolution of 1000 m and a temporal resolution of 8 days were also used. These data were prepared using thermal bands and allow for the examination of temperature changes in the region at different temporal and spatial scales.

Results and Discussions:

The assessment of IMERG precipitation data accuracy revealed high correlations with values ranging between 0.83 and 0.96. These results indicated that IMERG precipitation satellite data can be used as an acceptable source for drought monitoring. The results also showed that based on the spring VCI index, which is highly sensitive to changes in vegetation cover, the year 2000 was the driest year with about 78 percent of the

1- PhD student, Department of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahrood University, Shahrood, Iran

2- Associate Professor of Water Engineering Department, Faculty of Agriculture, Shahrood University, Shahrood, Iran

3- Associate Professor of Remote Sensing and GIS Department, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

* Corresponding Author: yaghoubi@stu.sku.ac.ir

Received: 2025/12/15

Accepted: 2026/01/27

province's area affected by drought, while in 2020, about 88 percent of the province was without drought. The TCI index, which mainly reflects temperature conditions and heat stress, showed that in years with adequate precipitation, the index value increased due to a decrease in land surface temperature (such as 2019). In contrast, in dry years such as 2008 and 2021, TCI values decreased, indicating an intensification of the effect of drought through increased heat stress. The quarterly SPI index in spring showed the highest significant correlation with the TCI, VHI and VCI indices (0.85, 0.81 and 0.65, respectively), indicating the effect of temperature and short-term precipitation in determining the health and greenness of vegetation in spring. In summer, the highest correlation was related to the twelve-month and six-month SPI with the VCI index, because the effect of precipitation on vegetation appears with a time lag. Therefore, TCI and VHI indices in spring along with VCI in summer can provide a more accurate and complete picture of the vegetation response to spring precipitation in the province.

Conclusion:

One of the important findings of this study is that the northern and eastern regions of the province are more vulnerable to drought. This finding can help provincial decision-makers prioritize areas of the province in terms of allocating financial resources to implement drought adaptation methods to avoid farmers' conflicts. These areas can also be prioritized for water resource allocation or intra-provincial water transfer projects. In addition, these areas can be prioritized for drought resilience projects, such as planning for appropriate crop timing, changing cropping patterns, selecting drought-resistant species and modifying or replacing irrigation methods.

Keyword: IMERG Precipitation, Remote Sensing, Drought Indices, MODIS

Citation: Yaghoubi, M., Ghasemi, A., Hamzeh, S., 2026. Monitoring of agricultural and meteorological drought using satellite data in Chaharmahal and Bakhtiari Province. *Iranian Water Research Journal*, 20(60), pp. 17-34.
<https://dx.doi.org/10.22034/iwrj.2026.14764.2607>

Copyright: © Authors, Published by Iranian Water Research Journal. This is an open-access article distributed under the CC-BY 4.0 (license <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



پایش خشکسالی کشاورزی و هواشناسی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در استان چهارمحال و بختیاری

مریم یعقوبی^{۱*}، احمدرضا قاسمی^۲ و سعید حمزه^۳

چکیده

پایش و ارزیابی خشکسالی نیازمند استفاده از شاخص‌های معتبر و داده‌های قابل اعتماد است. در این پژوهش، برای ارزیابی وضعیت خشکسالی در استان چهارمحال و بختیاری از شاخص‌های مبتنی بر داده‌های سنجش از دور شامل شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI)، شاخص وضعیت دمایی (TCI) و شاخص سلامت گیاهی (VHI) استفاده شد. این شاخص‌ها با استفاده از تصاویر سنجنده MODIS در مقیاس فصلی و در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ برای ۳۳ ایستگاه محاسبه گردیدند. علاوه بر این از داده‌های ارزیابی شده بارش ماهواره‌ای IMERG نیز استفاده شد. میزان همبستگی این داده‌ها با داده‌های بارش واقعی بالا و بین ۰/۸۳ تا ۰/۹۶ به دست آمد. نتایج شاخص VCI که حساسیت بالایی به تغییرات پوشش گیاهی دارد، در فصل بهار نشان داد، سال ۲۰۰۰ خشک‌ترین سال (۷۸ درصد استان درگیر خشکسالی) و سال ۲۰۲۰ در وضعیت بدون خشکسالی (حدود ۸۸ درصد استان) قرار دارد. نتایج شاخص TCI نیز که بازتاب کننده تنش حرارتی است، نشان داد که در سال‌های با بارش مناسب، به دلیل کاهش دمای سطح زمین مقدار شاخص افزایش یافته است (مانند سال ۲۰۱۹). در مقابل، در سال‌های خشک مانند ۲۰۰۸ و ۲۰۲۱ مقادیر TCI کاهش یافته که بیانگر تشدید اثر خشکسالی از طریق افزایش تنش حرارتی است. همچنین نتایج نشان داد که SPI سه‌ماهه فصل بهار، بالاترین همبستگی معنی‌دار را با شاخص‌های TCI، VHI و VCI دارد (به ترتیب ۰/۸۵، ۰/۸۱ و ۰/۶۵)، که نشان دهنده تأثیر دما و بارش‌های کوتاه‌مدت در تعیین وضعیت سلامت و سبزیگی پوشش گیاهی در بهار است. در فصل تابستان بیشترین همبستگی مربوط به SPI دوازده‌ماهه و شش‌ماهه با شاخص VCI بود زیرا اثر بارش بر پوشش گیاهی با یک تأخیر زمانی ظاهر می‌شود. بنابراین شاخص‌های TCI و VHI در فصل بهار و VCI در فصل تابستان می‌تواند تصویر دقیق‌تر از پاسخ پوشش گیاهی به بارش در استان فراهم کند.

واژه‌های کلیدی: بارش IMERG، سنجش از دور، شاخص‌های خشکسالی، MODIS

ارجاع: یعقوبی، م.، قاسمی، ا.ر.، حمزه، س.، ۱۴۰۵. پایش خشکسالی کشاورزی و هواشناسی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در استان چهارمحال و بختیاری. مجله پژوهش آب ایران، ۲۰(۶۰)، صص. ۱۷-۳۴. <https://dx.doi.org/10.22034/iwrj.2026.14764.2607>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

۲- دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران.

۳- دانشیار گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

* نویسنده مسئول: yaghoubi@stu.sku.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۱/۰۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۲۴

مقدمه

خشکسالی به عنوان یکی از مخرب‌ترین فاجعه‌های طبیعی جهان محسوب می‌شود که در آن مناطق محدود یا وسیعی درگیر کمبود آب و کاهش عملکرد محصولات کشاورزی می‌شوند (Zhang et al., 2021).

خشکسالی هم در مناطق پربارش و هم در مناطق کم‌بارش رخ می‌دهد. شدت و مدت آن با میزان بارش ثبت‌شده، تبخیر و تعرق پتانسیل و توزیع مکانی انواع خاک و ویژگی‌های پوشش گیاهی تعیین می‌شود. خشکسالی در ماهیت خود می‌تواند هواشناسی، کشاورزی، هیدرولوژیکی و اجتماعی-اقتصادی باشد (Almamalachy, 2017; Mtilatila et al., 2020).

خشکسالی هواشناسی نشان‌دهنده کمبود بارندگی در مقایسه با میانگین بلندمدت است. در حالی که خشکسالی کشاورزی به عنوان کمبود رطوبت خاک مورد نیاز برای تأمین نیازهای گیاهان در نتیجه‌ی کمبود مداوم بارش‌ها تعریف می‌شود. خشکسالی هیدرولوژیکی نیز منجر به کاهش منابع آب سطحی و زیرزمینی و خشکسالی اجتماعی-اقتصادی با محدودیت در دسترسی به آب و محصولات آب‌بر باعث می‌شود که تقاضا به طور قابل توجهی از عرضه تجاوز کند (Mtilatila et al., 2020).

اقدامات پیشگیرانه و برنامه‌ریزی در برابر خشکسالی در کاهش اثرات آن از اهمیت به‌سزایی برخوردار است که مستلزم استفاده از دانش کافی در پیش‌بینی خشکسالی است. امروزه سنجش از دور و تکنیک‌های توسعه‌یافته بر اساس تصاویر ماهواره‌ای توانسته است برآوردهای مناسبی از خشکسالی در مقیاس منطقه‌ای ارائه دهند. در حال حاضر تصاویر ماهواره‌ای به طور مرتب از سطح زمین با دقت تفکیک مکانی بالا تهیه می‌شوند و می‌توانند داده‌های مکانی با ارزشی را فراهم کنند. از مزایای استفاده از سنجش از دور نسبت به روش‌های هواشناسی می‌توان به افزایش نقاط نمونه‌برداری، محدوده پوشش وسیع‌تر، وضوح زمانی بالاتر و هزینه کمتر اشاره کرد (Wilhite, 2000).

آسیب‌های ناشی از خشکسالی به دلیل پیامدهای اجتماعی-اقتصادی و زیست‌محیطی آن‌ها قابل توجه‌تر از سایر مخاطرات طبیعی است. به این منظور، درک جامع‌تری از این پدیده یک پیش‌نیاز برای توسعه ابزارهای نظارت و پیش‌بینی خشکسالی است. بنابراین برای نظارت بر خشکسالی، شاخص‌های مختلفی توسعه داده شده‌اند (Liu et al., 2020; Zhong et al., 2021). با استفاده از شاخص‌های خشکسالی بر اساس داده‌های سنجش از دور، امکان بررسی الگوهای مکانی خشکسالی وجود دارد. با این حال، این شاخص‌ها وابسته به

جغرافیا یا زمانی خاص هستند و دقت آنها در هنگام استفاده در مناطق و زمان‌های دیگر کاهش می‌یابد (Huang et al., 2020). بنابراین، انتخاب شاخص‌های مناسب در هر منطقه برای پژوهش‌های خشکسالی بر اساس داده‌های سنجش از دور چالش‌برانگیز به نظر می‌رسد (Zhang et al., 2017).

تاکنون پژوهش‌های بسیار زیادی در دنیا در ارتباط با ارزیابی و پایش خشکسالی با استفاده از شاخص‌ها و روش‌های مختلف انجام شده است که در زیر به برخی از موارد سال‌های اخیر اشاره می‌شود.

(Hamzeh et al., 2017) مطالعه‌ای به منظور بررسی الگوهای مکانی و زمانی خشکسالی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای سنجنده مودیس بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۳ در استان مرکزی انجام و نشان دادند عملکرد شاخص VCI در مقیاس فصلی بهتر است. (Salimi et al., 2018) در مطالعه‌ای با استفاده از شاخص SDI به ارزیابی خشکسالی در استان خراسان رضوی پرداختند. به منظور صحت‌سنجی شاخص ترکیبی رابطه همبستگی این شاخص با شاخص SPI در بازه‌های زمانی ۳، ۶ و ۹ ماهه در طول فصل رشد بررسی شد. مقایسه میان مجموع بارش سالانه و میانگین بلندمدت بارش در ۱۰ ایستگاه هواشناسی در این استان انجام و همبستگی شاخص VCI و شاخص ترکیبی با میزان عملکرد دیم دو گیاه گندم و جو بررسی شد. نتایج حاکی از بروز خشکسالی در سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۰۲، ۲۰۰۶، ۲۰۰۸ در استان خراسان رضوی بود. همچنین نتایج صحت‌سنجی نیز حاکی از وجود همبستگی بالا میان شاخص ترکیبی و SPI بود. (Nawabi et al., 2019) خشکسالی کشاورزی حوضه‌آبخیز دریاچه ارومیه را با استفاده از سه شاخص سلامت پوشش گیاهی (VHI)، وضعیت پوشش گیاهی (VCI) و شاخص وضعیت دمایی (TCI) بررسی کردند. نتایج این پژوهش نشان داد که سنجش از دور دقت خوبی در برآورد توزیع مکانی و زمانی خشکسالی کشاورزی دارد و ارتباط قوی‌تری بین شاخص سلامت پوشش گیاهی (VHI) و شاخص SPI وجود دارد. (Arabi and badraghnejad, 2021) در مطالعه‌ای در دامنه شرقی زاگرس نشان دادند شاخص‌های سنجش از دور دقت مناسبی در پایش خشکسالی دارند. به‌طورکلی از این پژوهش چنین استنباط شده که نیمه شرقی استان‌های مورد مطالعه خشکسالی شدیدتری را نسبت به نیمه غربی تجربه کرده‌اند. همچنین شاخص TCI بالاترین همبستگی را با SPI نشان داد.

پژوهش (Babaei et al., 2025) در پایش خشکسالی استان چهارمحال و بختیاری گزارش کردند در بین شاخص‌های VCI،

مطالعه خشکسالی یک منطقه از بین شاخص‌های متعدد ارائه شده، یک چالش جدی می‌باشد.

استان چهارمحال و بختیاری به این دلیل که سرشاخه رودخانه‌های کارون و زاینده‌رود می‌باشد، نقش کلیدی در تأمین منابع آبی کشور دارد. این امر پایش دقیق و به‌موقع خشکسالی استان را ضروری می‌سازد. در این راستا، هدف اصلی این پژوهش بررسی الگوهای توزیع مکانی و زمانی خشکسالی و تعیین عملکرد شاخص‌های سنجش از دوری در فصل‌های بهار و تابستان در این استان است. این مطالعه هم‌زمان با اعتبارسنجی داده‌های بارش تصاویر ماهواره‌ای، به بررسی همبستگی هر یک از شاخص‌های ماهواره‌ای با شاخص بارش استاندارد شده (SPI)، به‌عنوان شاخص استاندارد جهانی برای ارزیابی خشکسالی، می‌پردازد.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش استان چهارمحال و بختیاری با وسعت ۱۶۴۲۱ کیلومتر مربع و متوسط بارش سالانه ۵۵۰ میلی‌متر است. این استان در بخش مرکزی رشته کوه‌های زاگرس و بین عرض ۳۱ درجه و ۹ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۴۸ دقیقه شمالی و طول ۴۹ درجه و ۲۸ دقیقه و تا ۵۱ درجه و ۲۵ دقیقه شرقی واقع شده است. ارتفاعات این استان سرچشمه سرشاخه‌های دو رودخانه دائمی زاینده‌رود و کارون است. میانگین ارتفاع منطقه از سطح دریا ۲۱۵۳ متر است که سبب شکل‌گیری اقلیم کوهستانی و سرد شده است. با این حال، پراکندگی مکانی بارش‌ها، تفاوت‌های ارتفاعی و تغییرات زمانی بارندگی، استان را در معرض نوسانات اقلیمی قرار داده است.

داده‌های مورد استفاده

داده‌های بارش

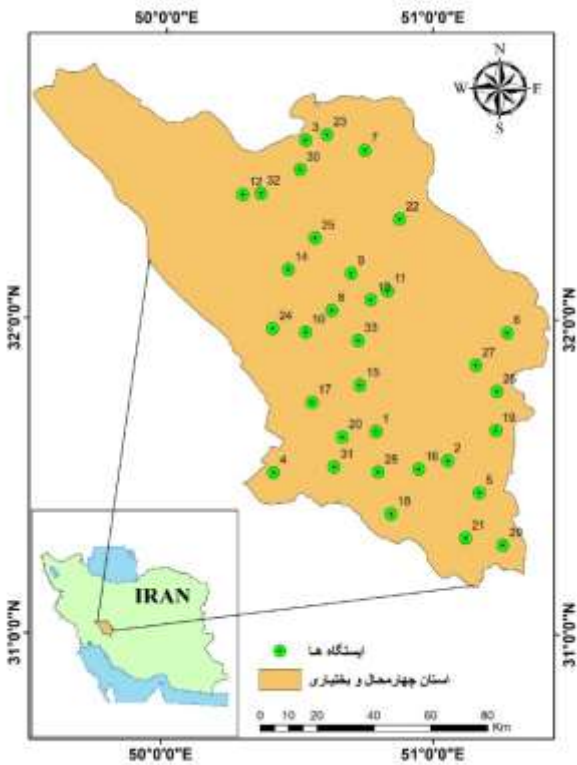
در این پژوهش با توجه به طول دوره آماری، موقعیت ایستگاه‌ها و قابل اعتماد بودن داده‌ها، ۳۳ ایستگاه هواشناسی در استان مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۱). به‌منظور اطمینان از همگن بودن داده‌ها در طول دوره آماری از آزمون توالی استفاده شد. دوره آماری مورد بررسی از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ (۲۴ سال) و مقیاس زمانی ماهانه است. شکل ۱، موقعیت جغرافیایی استان چهارمحال و بختیاری در ایران و همچنین ایستگاه‌های مورد استفاده را نشان می‌دهد.

TCI، VHI و PCI شاخص عملکرد بهتری دارد. در این مطالعه شاخص‌ها با شاخص ترکیبی سنجش از دوری CDI مقایسه شد و نتایج حاکی از برتر بودن شاخص ترکیبی نسبت به شاخص‌های منفرد می‌باشد. (Hao et al. (2015 در مطالعه‌ای ۱۰ شاخص خشکسالی را در سه منطقه با پوشش گیاهی و ویژگی‌های زمین‌شناسی متنوع در چین ارزیابی و گزارش دادند که دقت شاخص‌ها بستگی به نوع پوشش گیاهی و فصل دارد.

Huang et al. (2020) عملکرد سه شاخص سنجش از دور خشکسالی را در دو منطقه با تولید عمده کشاورزی در شمال چین مقایسه و بیان کردند که شاخص استرس خشکسالی (DSI) از دیگر شاخص‌ها بهتر عمل کرده و با رطوبت خاک و شاخص بارش استاندارد شده (SPI) رابطه قوی‌تری داشت.

Chen et al. (2020) با استفاده از داده‌های بارش ماهواره TRMM به پایش خشکسالی در حوضه یانگتس چین پرداختند. در این پژوهش با استفاده از داده‌های بارش ایستگاه‌های هواشناسی در دوره آماری ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۶، شاخص SPI در مقیاس‌های یک، ۳، ۶ و ۱۲ ماهه محاسبه شد. به‌منظور ارزیابی دقت داده‌های بارش ماهواره TRMM رابطه همبستگی بین این داده‌ها و SPI در مقیاس‌های زمانی مورد مطالعه بررسی شد. نتایج نشان داد در مقیاس‌های یک، ۳ و ۶ ماهه همبستگی بالایی برابر با ۰/۷ و در مقیاس ۱۲ ماهه همبستگی کمتری برابر با ۰/۵ با داده‌های بارش TRMM وجود دارد. نتایج ایشان نشان داد که داده‌های بارش TRMM می‌تواند یک منبع مناسب داده برای پایش خشکسالی فراهم نماید. Wei et al. (2021) دقت چند شاخص سنجش از دور خشکسالی را در چین مقایسه کردند و مشاهده کردند که شاخص وضعیت گیاهی (VCI) در مناطق خشک و نیمه خشک عملکرد بهتری دارد. (Vahidi et al. (2023 در پژوهشی، وضعیت خشکسالی شهرستان نطنز استان اصفهان را با شاخص‌های سنجش از دور در بازه زمانی ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۱ بررسی کردند. نتایج کلی این مطالعه نشان‌دهنده شدت خشکسالی منطقه در حال افزایش است و شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI) با بیشترین همبستگی با شاخص SPI، به‌عنوان بهترین شاخص برای پایش خشکسالی شناسایی شد. پژوهش‌های انجام شده نشان می‌دهد که شاخص‌های متعددی در ارتباط با خشکسالی کشاورزی ارائه شده است که هر یک بر اساس پارامترهای خاصی محاسبه می‌گردد.

با توجه به شرایط اقلیمی کشور، نمی‌توان در مطالعه خشکسالی از هر شاخص گیاهی در هر منطقه‌ای استفاده کرد و انتظار نتایج مشابهی داشت و انتخاب یک شاخص برای



شکل ۱- محدوده مورد مطالعه و ایستگاه‌های مورد استفاده

شاخص‌های خشکسالی مورد استفاده

شاخص بارش استاندارد شده (SPI)

شاخص (Standardized Precipitation Index) SPI یکی از پرکاربردترین شاخص‌های آماری برای پایش خشکسالی است که نخستین بار توسط McKee et al. (1993) معرفی شد. این شاخص بر پایه تحلیل آماری داده‌های بارش بلندمدت در مقیاس‌های زمانی مختلف (مانند یک‌ماهه، ۳ ماهه، ۶ ماهه و ۱۲ ماهه) محاسبه می‌شود. در گام نخست، داده‌های بارش تاریخی به یک توزیع احتمالی مناسب، معمولاً توزیع گامای دوپارامتری، برازش داده می‌شوند که به صورت رابطه ۱ تعریف می‌گردد:

$$0 < x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}, x \frac{1}{\beta^{\alpha} \Gamma(\alpha)} = g(x) \quad (1)$$

که در آن: α پارامتر شکل، β پارامتر مقیاس و $\Gamma(\alpha)$ تابع گاما است. پس از برآورد پارامترها، احتمال تجمعی بارش محاسبه شده و سپس به توزیع نرمال استاندارد با میانگین صفر و واریانس یک تبدیل می‌شود. این تبدیل موجب می‌شود که شاخص SPI بدون بعد شده و امکان مقایسه شرایط خشکسالی در اقلیم‌ها و بازه‌های زمانی متفاوت را فراهم آورد (Degerli and Turhan, 2025).

در این پژوهش مبنای تحلیل‌ها سال آبی در نظر گرفته شده است. هر سال آبی در ایران بازه زمانی از آغاز فصل پاییز تا پایان فصل تابستان را شامل می‌شود.

داده‌های ماهواره‌ای

برای محاسبه شاخص‌های خشکسالی از اطلاعات سنجنده مودیس (MODIS)، از سری تصاویر ماهواره ترا استفاده شد. در این پژوهش از داده‌های نمایه شاخص نرمال‌شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI) با قدرت تفکیک مکانی ۱۰۰۰ متر و تفکیک زمانی ۱۶ روز استفاده شد. شاخص NDVI یکی از شاخص‌های پرکاربرد در مطالعات پوشش گیاهی و خشکسالی است، زیرا تغییرات آن می‌تواند بیانگر وضعیت سلامت پوشش گیاهی در بازه‌های زمانی مختلف باشد. علاوه بر این از داده‌های دمای سطح زمین (LST) با وضوح مکانی ۱۰۰۰ متر و تفکیک زمانی ۸ روز نیز استفاده شد. این داده‌ها با استفاده از باندهای حرارتی تهیه شده و امکان بررسی تغییرات دمایی منطقه را در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف فراهم می‌کند. قابل ذکر است دو شاخص NDVI و LST به‌تنهایی شدت خشکسالی را نسبت به شرایط اقلیمی بلندمدت منطقه بیان نمی‌کنند، به همین دلیل، در این مطالعه از شاخص‌های کاملتری (VCI و TCI) که مستقیماً از NDVI و LST استخراج می‌شوند استفاده شده است. به‌عبارت دیگر شاخص‌های انتخاب‌شده در واقع شکل تکامل‌یافته شاخص‌های پایه NDVI و LST هستند و توانایی بیشتری در نمایش شرایط واقعی خشکسالی منطقه دارند.

برای داده‌های بارش مورد استفاده از داده‌های IMERG، استفاده شد. IMERG یک مجموعه داده بارش ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی ۰/۱ درجه است که از ترکیب داده‌های ماهواره‌های TRMM و GPM تولید می‌شود. این داده‌ها به‌صورت روزانه و ماهانه در دسترس بوده و به دلیل پوشش سراسری و پیوستگی زمانی، ابزاری مناسب برای پایش بارش در مناطقی با کمبود داده‌های زمینی محسوب می‌شوند (Huffman et al., 2015). این داده‌ها پس از اعتبارسنجی با داده‌های ایستگاه‌های زمینی، برای تهیه نقشه‌های شاخص خشکسالی (SPI) در منطقه مورد مطالعه، استفاده شدند. تمامی داده‌های ماهواره‌ای مورد استفاده در این پژوهش با کدنویسی و انجام محاسبات در محیط گوگل ارث انجامین آماده‌سازی و در مقیاس‌های زمانی و مکانی مورد نیاز در این تحقیق، دریافت شدند.

شاخص وضعیت دمایی (TCI)

شاخص TCI (Temperature Condition Index) نمایانگر وضعیت دمایی منطقه است. شاخص TCI تنش گیاهی ناشی از دمای بالا و همچنین رطوبت زیاد را شناسایی می‌کند. مقادیر پایین TCI نشان‌دهنده هوای گرم است و در بازه‌های زمانی طولانی‌تر، نشان‌دهنده خشکسالی می‌باشد. در این شاخص نیز خشکسالی‌ها با استفاده از آستانه‌های شاخص VCI شناسایی می‌شوند (جدول ۱). این شاخص با استفاده از رابطه ۳ محاسبه می‌شود (Kogan et al., 1995; Zhao et al., 2022):

$$TCI = \frac{LST_{max} - LST}{LST_{max} - LST_{min}} \quad (3)$$

که در رابطه بالا $LST_{max, min}$ به ترتیب بیشینه و کمینه دمای سطح زمین در بازه مشابه در محدوده مورد مطالعه می‌باشد.

شاخص سلامت گیاهی (VHI)

شاخص سلامت گیاهی VHI (Vegetation Health Index) که وضعیت سلامت گیاهی را از ترکیب شاخص‌های TCI و VCI توصیف می‌کند. VHI به‌عنوان شاخص خشکسالی کشاورزی در نظر گرفته می‌شود. در این شاخص نیز خشکسالی‌ها با استفاده از آستانه‌های جدول ۱ شناسایی می‌شوند (Bhuiyan et al., 2017; Zhao et al., 2022). VHI با استفاده از رابطه ۴ محاسبه می‌شود (Kogan et al., 2005):

$$VHI = \alpha VCI + (1 - \alpha) TCI \quad (4)$$

که در آن: VCI و TCI به ترتیب شاخص‌های وضعیت پوشش گیاهی و شاخص شرایط دمایی هستند و آلفا یک ضریب است که عموماً ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۱- آستانه‌های طبقه‌بندی خشکسالی برای

شاخص‌های VCI، TCI و VHI	
شاخص	کلاس خشکسالی
<۱۰	خشکسالی بسیار شدید
۱۰-۱۹/۹	خشکسالی شدید
۲۰-۲۹/۹	خشکسالی متوسط
۳۰-۳۹/۹	خشکسالی خفیف
≥۴۰	بدون خشکسالی

با این حال، دقت آن به شدت وابسته به طول دوره آماری و کیفیت داده‌های بارش است و در مناطقی با داده‌های کوتاه‌مدت یا پراکنده، کاربرد شاخص با محدودیت همراه خواهد بود (Guttman, 1999; Hayes et al., 2011).

مقادیر مثبت شاخص SPI نشان‌دهنده شرایط ترسالی و مقادیر منفی این شاخص بیانگر خشکسالی هستند. بر اساس طبقه‌بندی Mckee et al. (1993) مقادیر بین ۱- تا ۱/۴۹- بیانگر خشکسالی متوسط، ۱/۵- تا ۱/۹۹- خشکسالی شدید و مقادیر کمتر از ۲- خشکسالی بسیار شدید محسوب می‌شوند. در مقابل، مقادیر بالاتر از ۱+ بیانگر شرایط مرطوب تا بسیار مرطوب هستند (Aydin, 2025).

قابل ذکر است که استفاده از شاخص‌های دیگر به جای SPI مانند شاخص SPEI که تبخیر و تعرق را نیز در نظر می‌گیرد می‌تواند به درک بهتری از تعامل بین خشکسالی هواشناسی و کشاورزی در منطقه منجر شود. علی‌رغم این موضوع، به دلیل اینکه این شاخص نیازمند داده‌های بلندمدت تبخیر و تعرق برای تمام ایستگاه‌های استان بود و به دلیل محدودیت در برخی پارامترهای اساسی مانند تابش خورشیدی در اغلب ایستگاه‌های استان، استفاده از این شاخص با محدودیت مواجه شد، بنابراین به استناد پژوهش‌های متعدد انجام شده در دنیا از شاخص SPI استفاده شد.

شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI)

شاخص VCI (Vegetation Condition Index) تغییرات پوشش گیاهی را با مقادیر حداقل و حداکثر تاریخی NDVI مقایسه کرده و از این طریق، تأثیر خشکسالی بر پوشش گیاهی و شدت آن را ارزیابی می‌کند (Kogan et al., 1995). مقادیر پایین این شاخص نشان‌دهنده تنش در پوشش گیاهی است؛ در حالی که مقادیر بالا شرایط بهتر از حد نرمال را نشان می‌دهند که بیانگر پوشش گیاهی سالم است (جدول ۱). این شاخص با استفاده از رابطه ۲ محاسبه می‌شود (Kogan et al., 1995):

$$VCI = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \quad (2)$$

که در آن: NDVI شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی و $NDVI_{max, min}$ به ترتیب بیشینه و کمینه شاخص NDVI در بازه مشابه می‌باشند (Li et al., 2025). مقادیر NDVI نیز با کدنویسی از محیط گوگل ارث انجین استخراج شد.

شدید است و دوره‌های تر و خشک به صورت متناوب در طول سال‌ها تکرار شده‌اند. این مقیاس برای شناسایی رخداد‌های کوتاه مدت مناسب است، اما به دلیل دامنه تغییرات بالا، کمتر می‌تواند شدت و تداوم خشکسالی را بازنمایی کند.

شکل (۳b) تغییرات بارش در بازه‌های ۳ ماهه را نمایش می‌دهد و الگوهای پایدارتر و کم‌نوسان‌تری نسبت به SPI-1 ارائه می‌دهد. SPI-3 تغییرات فصلی را بهتر نشان می‌دهد. خشکسالی‌های شدید در سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۸، ۲۰۱۱، ۲۰۱۸ و ۲۰۲۱ به وضوح در این شاخص نمایان شده و مقادیر منفی آن به کمتر از ۲- رسیده است. همچنین دوره‌های ترسالی قابل توجه در سال‌های ۲۰۰۳، ۲۰۰۵، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۲ مشاهده می‌شود که مقادیر حدود ۲+ را ثبت کرده‌اند.

نتایج سری زمانی شاخص SPI-6 (شکل ۳c) نیز مانند SPI-3 سال‌های ترسالی و خشکسالی شدید را نشان می‌دهد با این تفاوت که شدت خشکسالی در آن بیشتر و دوره‌های خشک و تر طولانی‌تر و مشخص‌تر هستند. این امر نشان می‌دهد که مقیاس‌های میان مدت (۶ ماهه) برای پایش وضعیت رشد محصولات کشاورزی و مدیریت منابع آب کارایی بالاتری دارند.

شاخص SPI-12 (شکل ۳d) نیز شرایط تجمعی بارش را در بازه‌های سالانه نشان می‌دهد. این مقیاس تغییرات بلندمدت‌تر را بهتر بازتاب داده و توانسته است تداوم دوره‌های خشک یا تر را با دقت بیشتری آشکار سازد.

در مجموع، مقیاسه سری‌های زمانی شاخص نشان می‌دهد که SPI-1 برای آشکارسازی تغییرات سریع و رخداد‌های کوتاه مدت، SPI-3 و SPI-6 برای ارزیابی تغییرات فصلی و میان مدت و SPI-12 برای پایش تغییرات بلندمدت اقلیمی و اثرات تجمعی بارش مناسب‌تر است. این نتایج اهمیت انتخاب مقیاس زمانی مناسب در مطالعات خشکسالی را برجسته می‌سازد، زیرا واکنش پوشش گیاهی و منابع آبی به بارش در بازه‌های زمانی مختلف متفاوت است. بنابراین، معمولاً SPI یک و ۳ ماهه برای اندازه‌گیری خشکسالی هواشناسی استفاده می‌شود، در حالی که SPI ۶ ماهه برای توصیف خشکسالی کشاورزی استفاده می‌شود (Zhang et al. 2021).

در انتها برای مقایسه نتایج و بررسی ارتباط شاخص‌های سنجش از دور با شاخص SPI از ضریب همبستگی پیرسون استفاده و تحلیل مکانی داده‌ها با استفاده از روش‌های زمین‌آمار انجام شد.

نتایج و بحث

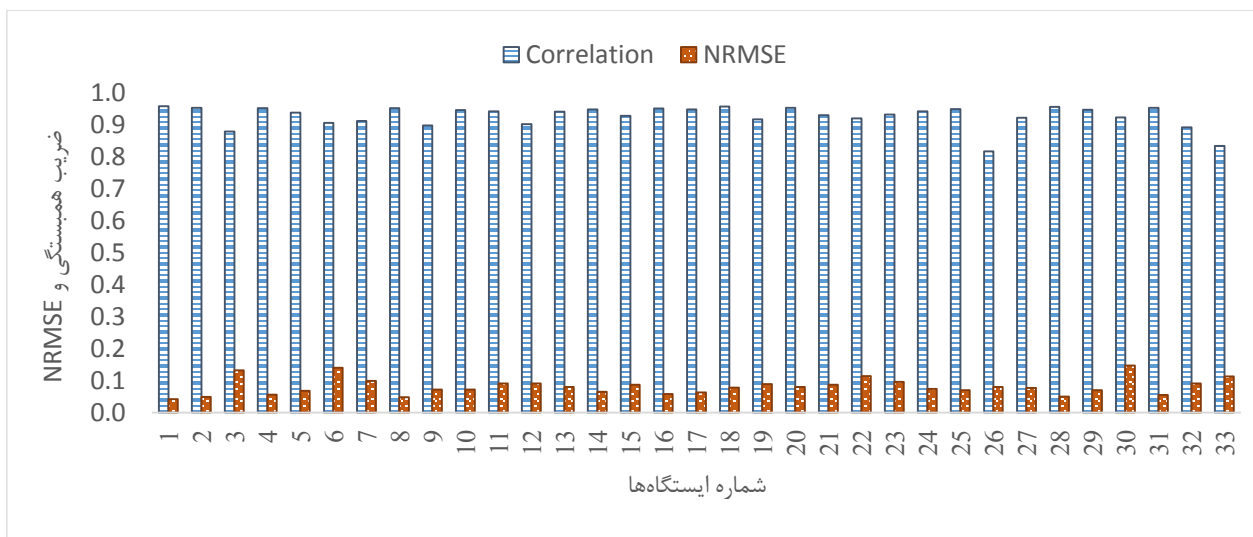
ارزیابی محصول بارش IMERG

در گام نخست این پژوهش، به منظور اطمینان از دقت داده‌های ماهواره‌ای بارش IMERG این داده‌ها با داده‌های مشاهده‌ای ایستگاه‌های باران‌سنجی استان چهارمحال و بختیاری مقایسه شد. این ارزیابی برای دوره‌ی آماری ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ و در مقیاس ماهانه انجام شد. نتایج نشان داد که میزان همبستگی بین داده‌های بارش ایستگاهی و داده‌های ماهواره‌ای در همه ایستگاه‌ها در سطح معنی‌داری ۰/۰۱ معنی‌دار بوده و مقدار ضریب همبستگی در دامنه‌ای بین ۰/۸۳ تا ۰/۹۶ قرار دارد (شکل ۲).

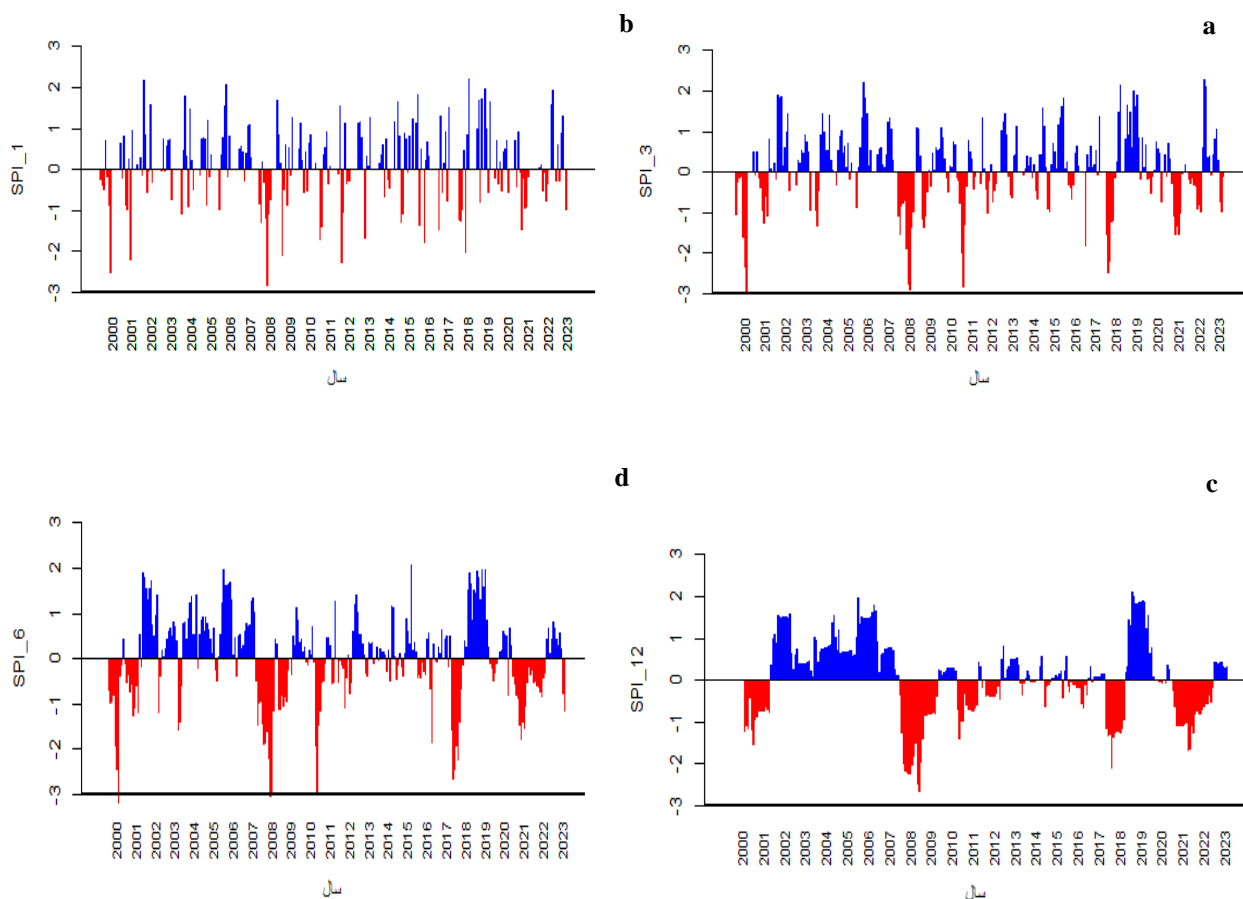
برای بررسی خطا نیز از شاخص ریشه میانگین مربعات خطای نرمال شده (NRMSE) استفاده شد. بر اساس مطالعات پیشین (Tafi et al., 2021)، مقدار کمتر از ۰/۳ یا ۳۰ درصد برای این شاخص، خطای قابل قبول و کمتر از ۰/۱ خطای بسیار کم یا دقت بسیار خوب تلقی می‌شود. محاسبات نشان داد که در تمامی ایستگاه‌ها مقدار NRMSE کمتر از ۰/۳ است (شکل ۲). مقادیر NRMSE در ایستگاه‌های مورد استفاده بین ۰/۰۴ تا ۰/۱۵ متغیر است که دلالت بر دقت قابل قبول تا بسیار خوب داده‌های IMERG نسبت به داده‌های بارش واقعی در تمام ۳۳ ایستگاه مورد بررسی دارد.

میزان خطا در برخی از ایستگاه‌های مرتفع، بیشتر از دیگر ایستگاه‌ها بود که احتمالاً ناشی از محدودیت قدرت تفکیک مکانی محصول IMERG در مناطق کوهستانی می‌باشد. نتایج این مرحله بیانگر آن است که داده‌های ماهواره‌ای بارش IMERG می‌توانند به عنوان یک منبع قابل قبول برای محاسبه شاخص‌های خشکسالی در استان چهارمحال و بختیاری استفاده شوند.

نتایج سری زمانی شاخص SPI در مقیاس‌های مختلف (ماهانه، ۳ ماهه، ۶ ماهه و ۱۲ ماهه) تصویری واضح از تغییرات خشکسالی و ترسالی در استان چهارمحال و بختیاری در دوره‌ی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ ارائه می‌دهد. نمودار SPI-1 (شکل ۳a) نشان می‌دهد که نوسانات کوتاه مدت بارش در مقیاس ماهانه بسیار



شکل ۲- نتایج ارزیابی بارش ماهانه ماهواره‌ای IMERG بر اساس ضریب همبستگی و شاخص NRMSE



شکل ۳- سری زمانی SPI در مقیاس‌های زمانی (a) یک‌ماهه (b) ۳ ماهه (c) ۶ ماهه (d) ۱۲ ماهه

مساحت استان در تابستان‌ها (حدود ۵۱ درصد) در طبقه بدون خشکسالی ($VCI \geq 40$) قرار داشته است. در مقابل، سهم مجموع خشکسالی‌های بسیار شدید و شدید در کل دوره حدود ۸ درصد است. با این حال، در برخی سال‌ها مانند ۲۰۰۸ و ۲۰۲۱ به صورت مقطعی خشکسالی شدید مشاهده می‌شود. بررسی اولیه نشان می‌دهد که افزایش بارش به‌ویژه در فصل بهار به‌طور مستقیم با افزایش سهم بدون خشکسالی در شاخص‌های VCI و VHI همخوانی دارد.

در سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۸ و ۲۰۲۱ که بر اساس شاخص SPI در مقیاس‌های مختلف، خشکسالی شدید تشخیص داده شدند، شاخص‌های دیگر نیز با افت شدید روبرو هستند. در مقابل، در سال‌هایی که شاخص SPI ترسالی را نشان داد، مانند سال‌های ۲۰۱۰، ۲۰۱۳ و ۲۰۱۹ بیشترین درصد مساحت بدون خشکسالی در استان ثبت شده است.

در بررسی نتایج و تحلیل مکانی، مناطق شمال و شرق استان شامل شهرکرد، بروجن، اردل و سامان بیشترین آسیب‌پذیری را در سال‌های خشک نشان داده‌اند، در حالی که مناطق غربی و جنوبی مانند لردگان و کوهرنگ معمولاً شرایط پایدارتر و بدون خشکسالی داشته‌اند. به‌طور خاص، سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۸ و ۲۰۱۸ سال‌های بحرانی خشکسالی بوده‌اند. با این حال، از سال ۲۰۱۳ به بعد روند کلی به سمت بهبود شرایط و افزایش سطح مناطق بدون خشکسالی حرکت کرده است.

تحلیل همبستگی شاخص‌ها

نتایج تحلیل همبستگی بین شاخص‌های ماهواره‌ای VCI، TCI و VHI با شاخص بارش استاندارد شده (SPI) فصل بهار نشان می‌دهد که بارش‌های بهاره، تأثیرات متفاوتی بر پوشش گیاهی در فصل‌های بهار و تابستان دارند (جدول ۲). شاخص SPI ۳ ماهه فصل بهار، بالاترین همبستگی معنی‌دار را با دیگر شاخص‌ها نشان داد، که به ترتیب برابر با ۰/۸۵، ۰/۸۱ و ۰/۶۵ برای شاخص‌های TCI، VHI و VCI است که نشان‌دهنده تأثیر دما و بارش‌های کوتاه‌مدت در تعیین وضعیت سلامت و سبزیگی پوشش گیاهی است. مقدار این همبستگی‌ها با بارش‌های تجمعی (SPI ۶ ماهه و ۱۲ ماهه) کمتر و بین ۰/۴۰ تا ۰/۵۶ متغیر است. به عبارت دیگر شاخص SPI ۳ ماهه بیشترین همبستگی را در فصل بهار با شاخص TCI نشان داده است.

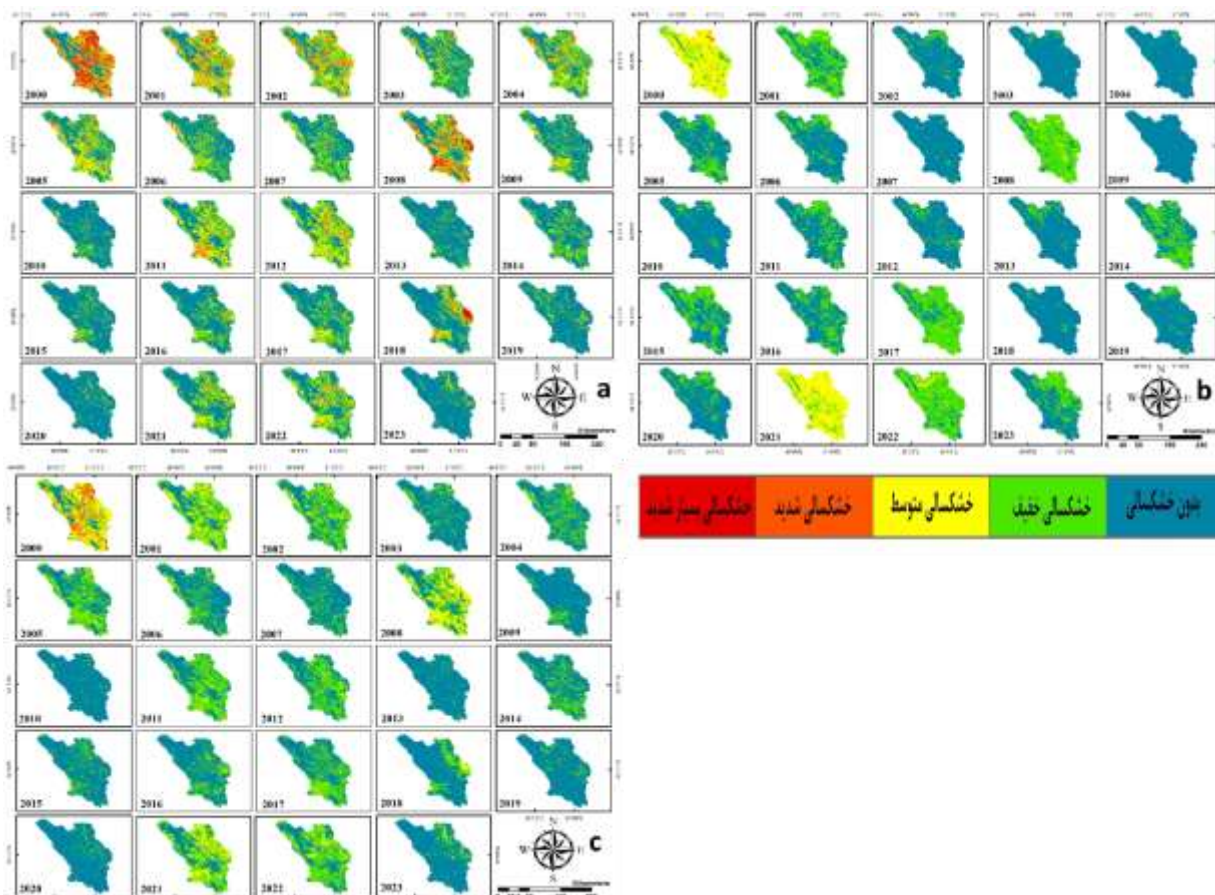
نتایج بررسی شاخص VCI در فصل بهار (شکل ۴a و ۵a) نشان داد که شدت و گستره خشکسالی در استان چهارمحال و بختیاری با نوسانات زیادی همراه است. سال ۲۰۰۰ خشک‌ترین سال این دوره بوده؛ به‌طوری‌که حدود ۷۸ درصد مساحت استان درگیر خشکسالی شده است (شکل ۵a). در مقابل، سال ۲۰۲۰ حدود ۸۸ درصد استان در وضعیت بدون خشکسالی قرار دارد. در کل دوره مورد مطالعه، به‌طور میانگین بیش از نیمی از استان (حدود ۵۷ درصد) در وضعیت بدون خشکسالی بوده و خشکسالی بسیار شدید سهمی ناچیز (حدود یک درصد) داشته است.

این شاخص به دلیل حساسیت بالا به تغییرات پوشش گیاهی، به‌ویژه در فصل رشد همبستگی قوی‌تری با SPI دارد. Hamzeh et al. (2017) در مطالعه‌ای با استفاده از داده‌های سنجنده مودیس در استان مرکزی نیز نشان دادند عملکرد شاخص VCI در مقیاس فصلی بهتر است.

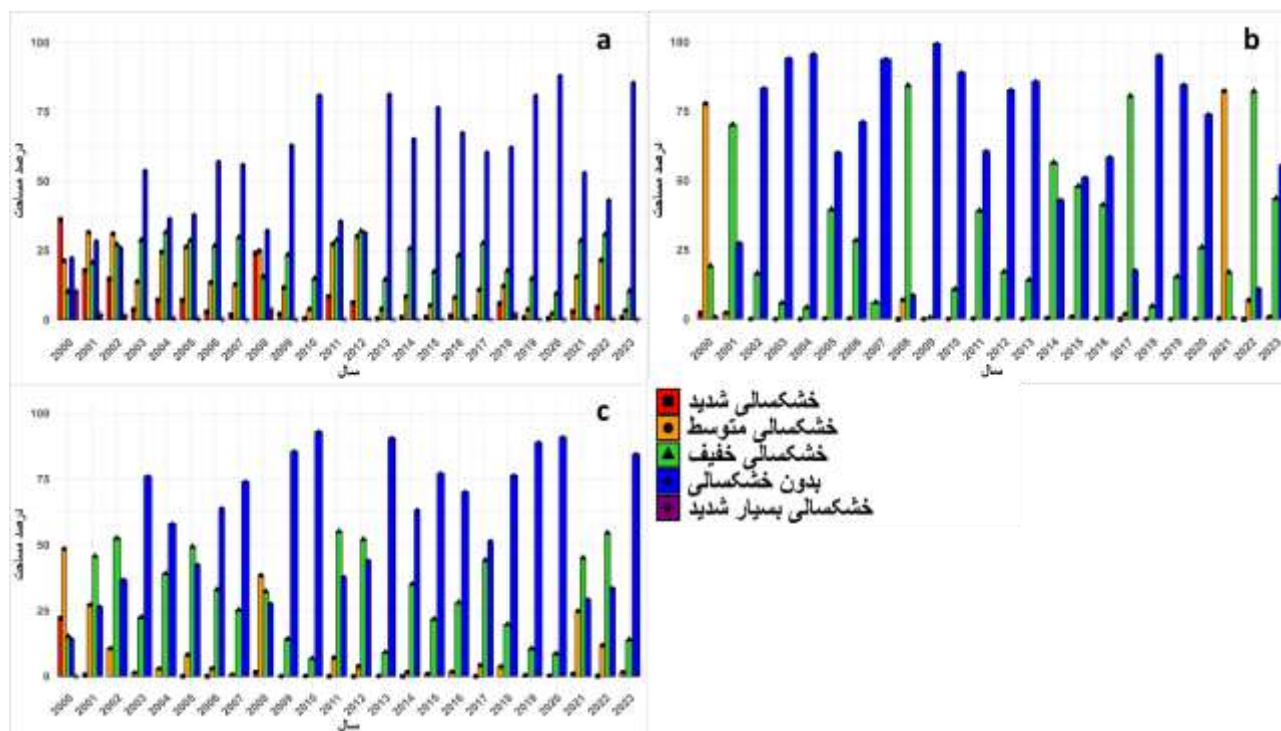
نتایج شاخص TCI (شکل ۴b و ۵b) که شرایط دمایی و تنش حرارتی را بازتاب می‌دهد، نشان داد که در سال‌های با بارش مناسب، کاهش دمای سطح زمین باعث افزایش مقادیر TCI شده است (مانند سال ۲۰۱۹). در مقابل، در سال‌های خشک همچون ۲۰۰۸ و ۲۰۲۱ مقادیر TCI کاهش یافته که بیانگر تشدید اثر خشکسالی از طریق افزایش تنش حرارتی است.

شکل‌های ۴c و ۵c نشان‌دهنده پایش خشکسالی بر اساس شاخص ترکیبی VHI است که علاوه بر شرایط دمایی، پوشش گیاهی را نیز لحاظ می‌کند. بر اساس این شاخص، استان چهارمحال و بختیاری در فصل بهار در بیشتر سال‌های دو دهه اخیر در وضعیت بدون خشکسالی یا خشکسالی خفیف قرار داشته است. با این حال، بیش از ۶۰ تا ۷۰ درصد مساحت استان در سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۸ و به‌ویژه سال ۲۰۲۱ -به‌عنوان سال‌های بحرانی- تحت خشکسالی متوسط و شدید بودند که این موضوع با کاهش بارش بهاری نیز همخوانی دارد.

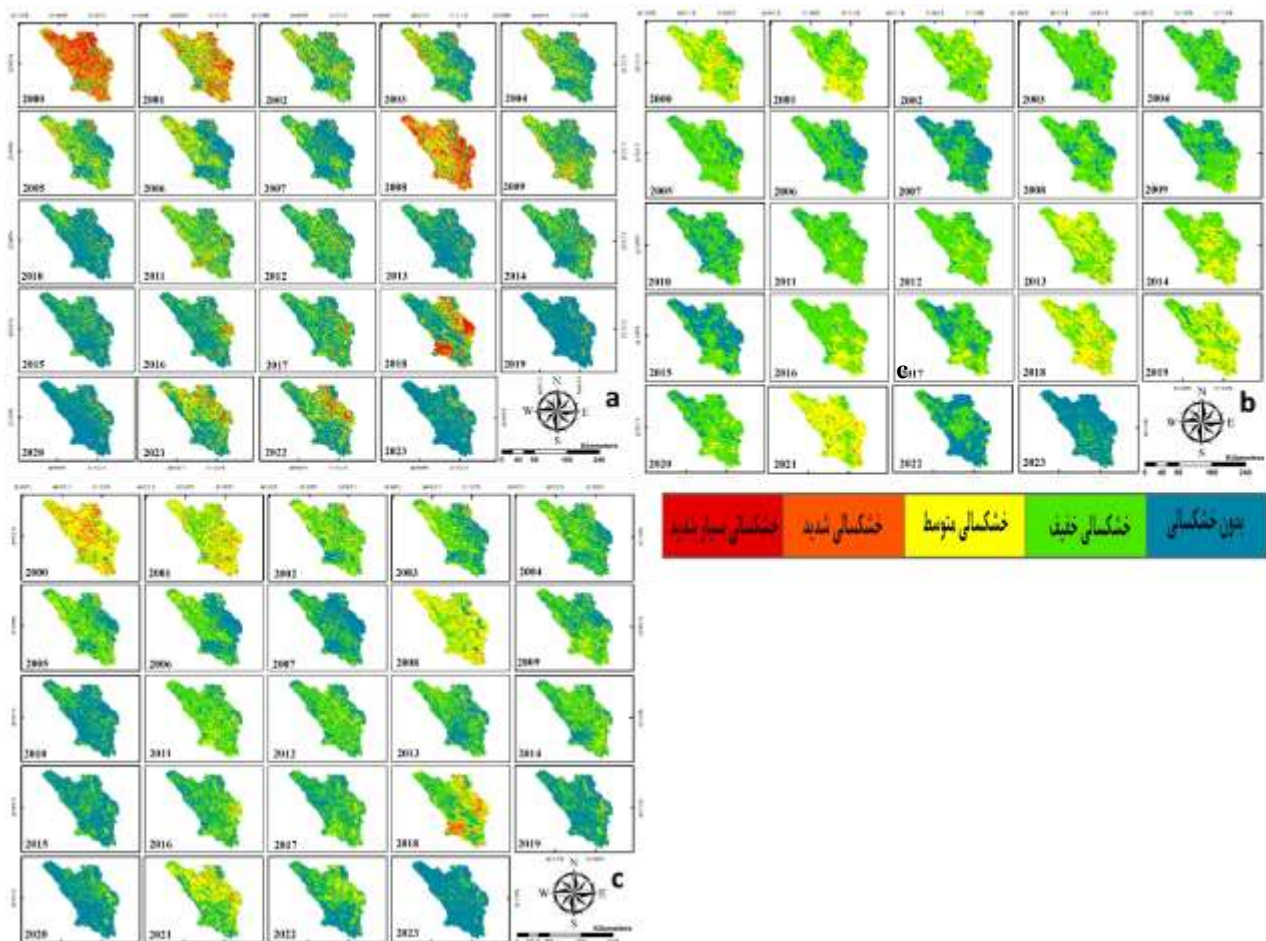
تحلیل تغییرات شاخص VCI در فصل تابستان (شکل ۶a و ۷a) نشان داد که از سال ۲۰۰۰ تا حدود ۲۰۰۸، به‌ویژه در طبقات خشکسالی شدید و متوسط، افزایش مشاهده می‌شود و در مقابل از سال ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۰، کاهش خشکسالی و افزایش پوشش گیاهی سالم مشاهده می‌شود. از ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۳، تغییرات معکوسی ظاهر شده و درصد مساحت طبقات خشکسالی خفیف و متوسط دوباره افزایش یافته است؛ گرچه شدت آن نسبت به اوایل دهه ۲۰۰۰ کمتر است. میانگین درصد مساحت در هر طبقه نشان می‌دهد که طی بازه مورد مطالعه، بیش از نیمی از



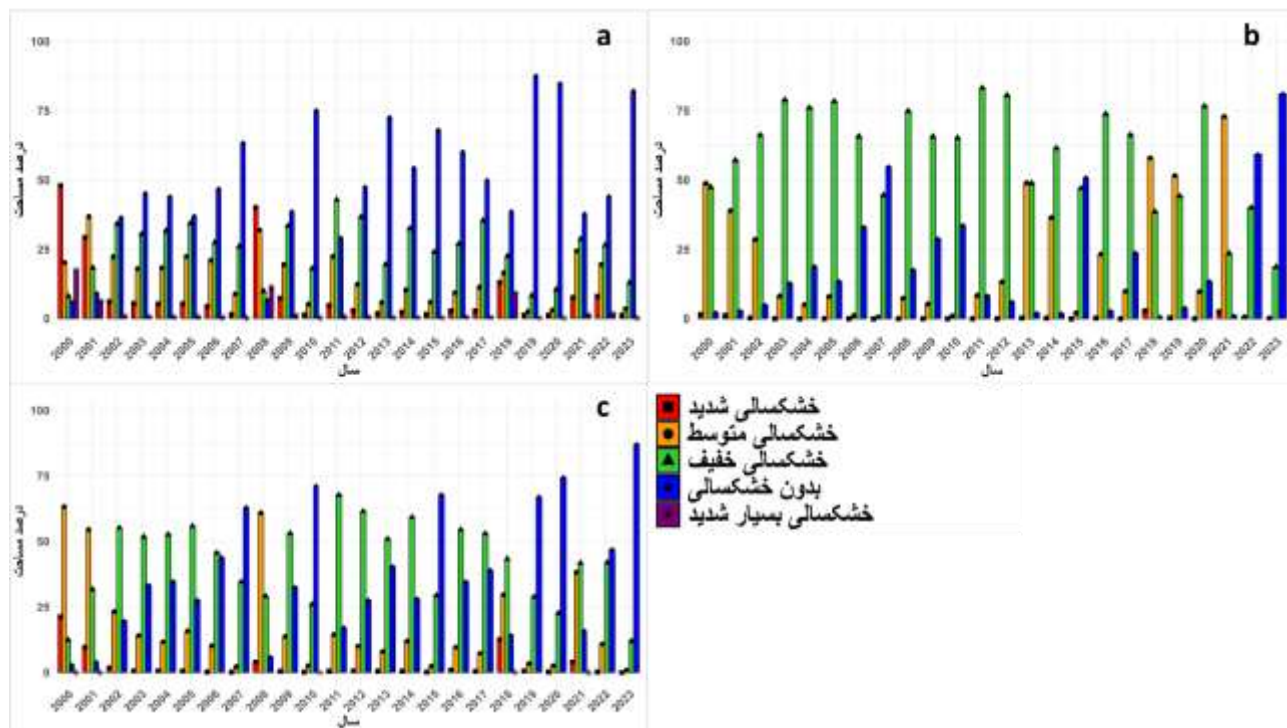
شکل ۴- الگوهای زمانی- مکانی شاخص‌ها در فصل بهار در بازه سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ (a) شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI)، (b) شاخص وضعیت دمایی (TCI) و (c) شاخص سلامت گیاهی (VHI)



شکل ۵- درصد مساحت طبقه‌بندی شاخص‌ها در فصل بهار در بازه ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ (a) شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI)، (b) شاخص وضعیت دمایی (TCI) و (c) شاخص سلامت گیاهی (VHI)



شکل ۶- الگوهای زمانی- مکانی شاخص‌ها در فصل تابستان در بازه ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ (a) شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI)، (b) شاخص وضعیت دمایی (TCI) و (c) شاخص سلامت گیاهی (VHI)



شکل ۷- درصد مساحت طبقه‌بندی شاخص‌ها در فصل تابستان در بازه سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ (a) شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI)، (b) شاخص وضعیت دمایی (TCI) و (c) شاخص سلامت گیاهی (VHI)

(Ab) نشان می‌دهد که بیشترین همبستگی مثبت اغلب در نواحی مرکزی و شمال غربی استان دیده می‌شود که با رنگ‌های سبز و آبی مشخص است، به‌ویژه در ارتفاعات میانی و مناطق کوهپایه‌ای، شرایط حرارتی نقش تعیین‌کننده‌ای در بازتاب اثر بارش‌های بهاره داشته و همبستگی بالاتر از ۰/۸۰ به دست آمده است، در حالی که در بخش‌های جنوبی و شرقی، لکه‌های زرد و نارنجی بیانگر کاهش همبستگی هستند و نشان می‌دهد که بارش بهار تأثیر مستقیم کمتری بر پوشش گیاهی داشته است.

الگوی VCI متفاوت بوده و ناهمگنی بیشتری را آشکار می‌سازد (شکل ۸a). به‌طوری‌که در بخش‌های شمالی و حاشیه شرقی استان همبستگی منفی یا بسیار ضعیف مشاهده شده است، در حالی که در نواحی مرکزی و جنوب غربی، مقادیر بالای همبستگی مثبت (رنگ‌های سبز و آبی) نشان‌دهنده تأثیر مستقیم بارش بر وضعیت سبزیگی است. در نقشه VHI (شکل ۸c) نیز الگوی مشابهی با TCI دیده می‌شود، به‌گونه‌ای که اغلب مناطق مرکزی، غربی و شمال غربی استان دارای همبستگی مثبت و بالا هستند؛ در حالی که نواحی جنوب شرقی و بخش‌هایی از دشت‌های جنوبی همبستگی ضعیف‌تری دارند. این الگوها در مجموع نشان می‌دهند که مناطق مرتفع و نیمه‌کوهستانی استان واکنش سریع‌تری به بارش‌های کوتاه‌مدت بهاره نشان می‌دهند، در حالی که در مناطق دشت و جنوب شرقی استان این رابطه ضعیف‌تر است که می‌تواند ناشی از شرایط اقلیمی خشک‌تر، محدودیت‌های خاکی و نوع کاربری اراضی باشد. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که اثر بارش‌های بهاره بر پوشش گیاهی در استان هم‌زمان تحت تأثیر شرایط مکانی و اکولوژیک قرار دارد و شاخص‌ها بسته به ویژگی‌های هر منطقه الگوهای متفاوتی از همبستگی را بازتاب می‌دهند.

به‌طور کلی، الگوی مکانی همبستگی‌ها بیانگر آن است که میزان همخوانی بین SPI و شاخص‌های سنجش از دوری بسته به فصل و نوع شاخص تغییر می‌کند و انتخاب مناسب‌ترین شاخص در مطالعات خشکسالی نیازمند توجه هم‌زمان به شرایط فصلی و مکانی منطقه مورد مطالعه است. (Hao et al. (2015) نیز در پژوهشی در چین نشان دادند که دقت شاخص‌های خشکسالی بستگی به نوع پوشش گیاهی و فصل دارد.

مطالعات دیگری نیز در مناطق مختلف نشان دادند که شاخص SPI بیشترین همبستگی را با شاخص TCI دارد. برای نمونه Arabi and badraghnejad (2021) در مطالعه‌ای در منطقه شرقی زاگرس نشان دادند شاخص TCI بالاترین همبستگی را با SPI دارد. همچنین Babaei et al. (2025) نیز بهترین عملکرد در استان چهارمحال و بختیاری را برای شاخص TCI گزارش کردند.

در فصل تابستان، الگوی متفاوتی مشاهده شد، بیشترین همبستگی به VCI تعلق داشت. مقادیر همبستگی این شاخص با SPI ۱۲ ماهه ۰/۷۰ و با SPI شش‌ماهه ۰/۶۵ است. Vahidi et al. (2023) نیز بالاترین همبستگی شاخص SPI را در شهرستان نطنز برای شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI) گزارش نمودند.

مقایسه همبستگی‌ها نشان داد که در بازه‌های میان‌مدت و بلندمدت همبستگی VCI با SPI افزایش می‌یابد، زیرا اثر بارش بر پوشش گیاهی با یک تأخیر زمانی ظاهر می‌شود. همبستگی ضعیف SPI با TCI در تابستان به‌طور طبیعی ناشی از غلبه تنش حرارتی و تبخیر و تعرق بالا می‌باشد. همبستگی بالای SPI شش‌ماهه با TCI (۰/۸۱) نیز بیانگر آن است که شاخص‌های تجمیعی ۶ ماهه عملکرد مشابهی با فصل بهار داشته و نقش مهمی در ردیابی اثر خشکسالی بر پوشش گیاهی دارد. بنابراین شاخص TCI و VHI در فصل بهار و VCI در فصل تابستان می‌تواند تصویر دقیق‌تر و کامل‌تری از پاسخ پوشش گیاهی به بارش‌های بهاره فراهم آورد. این نتایج نشان می‌دهد که بارش‌های بهاره بیشترین تأثیر را بر کاهش تنش حرارتی و بهبود شرایط رشد گیاهان دارند و شاخص VHI به‌عنوان شاخصی ترکیبی توانسته است در هر دو فصل هم‌زمان شرایط رطوبتی و دمایی را بازتاب دهد.

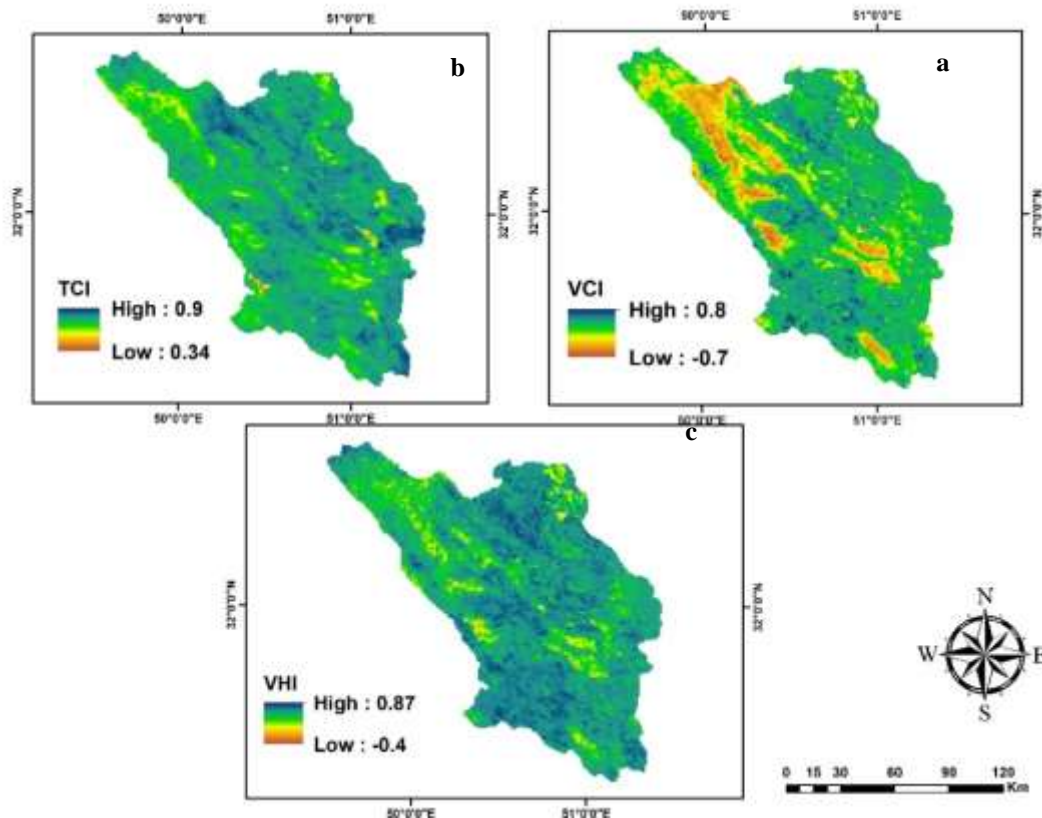
این الگو اهمیت تحلیل فصلی و چندمقیاسی شاخص‌ها را در مطالعات خشکسالی برجسته کرده و نشان می‌دهد استفاده صرف از مقیاس‌های سالانه یا ماهانه می‌تواند منجر به پنهان ماندن بخشی از عکس‌العمل‌های واقعی پاسخ پوشش گیاهی به شرایط خشکسالی شود.

تحلیل مکانی

تغییرات مکانی همبستگی SPI سه‌ماهه فصل بهار با سه شاخص مورد بررسی در سطح استان نشان داد که الگوی مکانی ارتباط بارش‌های بهاره با پوشش گیاهی در بخش‌های مختلف استان یکسان نبوده و تفاوت‌های قابل توجهی دارند. نقشه TCI (شکل

جدول ۲- مقادیر همبستگی شاخص‌های سنجش از دوری و SPI

فصل‌ها	فصل بهار			فصل تابستان		
شاخص‌ها	VCI	TCI	VHI	VCI	TCI	VHI
SPI-3	۰/۶۵	۰/۸۵	۰/۸۱	۰/۴۱	۰/۱۳	۰/۳۳
SPI-6	۰/۵۲	۰/۵۶	۰/۵۸	۰/۶۵	۰/۳۴	۰/۵۸
SPI-12	۰/۵۰	۰/۴۰	۰/۵۱	۰/۷۰	۰/۲۳	۰/۵۷



شکل ۸- همبستگی مکانی شاخص SPI سه‌ماهه و (a) شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI)، (b) شاخص وضعیت دمایی (TCI) و (c) شاخص سلامت گیاهی (VHI) در فصل بهار

نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش در گام نخست نشان داد که داده‌های ماهواره‌ای بارش IMERG می‌توانند به عنوان یک منبع قابل قبولی برای محاسبه شاخص‌های خشکسالی در استان چهارمحال و بختیاری استفاده شود. نتایج ارزیابی خشکسالی در استان نیز نشان داد که شدت و گستره خشکسالی با نوسانات زیادی همراه است. شاخص‌های TCI و VHI در فصل بهار و شاخص VCI در فصل تابستان می‌توانند تصویر دقیق‌تر و کامل‌تری از پاسخ پوشش گیاهی به بارش‌های بهاره در استان فراهم کنند.

نتایج همبستگی بین شاخص‌ها با SPI نیز نشان داد که مقدار همبستگی به شدت به مقیاس زمانی و فصل وابسته است.

بالاترین میزان همبستگی در فصل بهار و بازه‌های سه‌ماهه، مشاهده شد. به طوری که شاخص VHI و TCI به ترتیب با ضرایب ۰/۸۵ و ۰/۸۱ ارتباط قوی‌تری با SPI فصل بهار داشتند. به عبارت دیگر بارش‌های بهاری نقش تعیین‌کننده‌ای در وضعیت خشکسالی کشاورزی در این فصل دارند. افزایش تدریجی دما در این فصل و ایجاد شرایط مناسب برای شروع رشد گیاهان و استفاده از منابع آب ذخیره شده در خاک سطحی (رطوبت سطحی خاک) می‌تواند دلیل این امر باشد. در مقابل در فصل تابستان شاخص VCI بیشترین همبستگی را به ترتیب با SPI دوازده ماهه و شش ماهه نشان داد. مقایسه همبستگی‌ها نشان داد که در بازه‌های میان‌مدت و بلندمدت همبستگی VCI با SPI افزایش می‌یابد، زیرا اثر بارش بر پوشش گیاهی با یک تأخیر زمانی ظاهر می‌شود.

مشارکت نویسندگان

نحوه و میزان مشارکت نویسندگان در انجام این پژوهش به صورت زیر است:

نویسنده اول: جمع‌آوری، تحلیل داده‌ها و نگارش مقاله

نویسنده دوم: راهنمایی، کنترل نتایج و ویرایش مقاله

نویسنده سوم: راهنمایی و بازبینی نتایج

اصول اخلاقی

نویسندگان اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر عملی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تایید همه آنها می‌باشد.

منابع

1. Arabi, Z. and badraghnejad, A., 2021. Correlation Analysis of Drought Time Series Based on Modis Satellite Images and Standardized Precipitation Climate Index (SPI) on the eastern slope of Zagros. *Journal of Spatial Analysis Enviromental Hazarts*, 8 (4), pp. 71-88. <https://doi.org/10.22034/gp.2021.44939.2803> [In Persian].
2. Almamalachy, Y., 2017. Utilization of Remote Sensing in Drought Monitoring Over Iraq. *PhD thesis, Portland State University, Portland*.
3. Aydin, M., 2025. Evaluation of the Usability of the Rainfall Anomaly Index (RAI) Instead of the Standard Precipitation Index (SPI). *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 49(1), pp. 763-785. <https://doi.org/10.1007/s40996-024-01516-4>.
4. Babaei, E., Asadi Zarch, M.A., Hosseini, S.Z. and Shahmoradi, S., 2025. Performance evaluation of composite remote sensing indices in drought assessment (case study: Chaharmahal and Bakhtiari Province, Iran). *Journal of Natural Environmental Hazards*, 14(43), pp. 155-180. <https://doi.org/10.22111/jneh.2024.49797.2067> [In Persian].
5. Bhuiyan, C., Saha, A. K., Bandyopadhyay, N. and Kogan, F.N., 2017. Analyzing the impact of thermal stress on vegetation health and agricultural drought—a case study from Gujarat, India. *GIScience & Remote Sensing*, 54(5), pp. 678-699. <https://doi.org/10.1080/15481603.2017.1309737>
6. Chen, S., L. Zhang, Y. Zhang, M. and X. Liu., 2020. Evaluation of Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) satellite precipitation products for drought monitoring over the middle and lower reaches of the Yangtze River Basin, China. *Journal of Geographical Sciences*, 30(1), pp. 53-67. <https://doi.org/10.1007/s11442-020-1714-y>

دلیل عکس‌العمل متفاوت فصل‌ها و تأخیر زمانی مشاهده شده بین بارش و واکنش پوشش گیاهی در استان چهارمحال و بختیاری ناشی از ترکیب مکانیزم‌های اقلیمی، هیدرولوژیکی و اکولوژیکی در منطقه است که مهمترین آنها اقلیم کوهستانی منطقه با بارش زمستانی عمدتاً برفی است که منجر به ذخیره و انتقال آب در خاک در طول زمان طولانی‌تری می‌شود و دسترسی گیاه به رطوبت را با تأخیر زمانی بیشتری امکان‌پذیر می‌کند. همچنین ویژگی‌های گیاهی منطقه مانند گیاهان چندساله و وجود جنگل‌های زاگرس به دلیل ریشه‌های عمیق، منجر به عکس‌العمل تدریجی نسبت به رطوبت خاک و یا دما می‌شود. همچنین تحلیل‌های مکانی نشان داد که مناطق شمالی و شرقی استان بیشترین آسیب‌پذیری را در برابر خشکسالی دارند، در حالی‌که مناطق غربی و جنوبی -مناطق با بارش بیشتر- یعنی لردگان و کوهرنگ، معمولاً شرایط پایدارتر و بدون خشکسالی داشته‌اند. این یافته می‌تواند به تصمیم‌گیران استان در اولویت‌بندی مناطق استان از نظر تخصیص منابع مالی برای اجرای روش‌های سازگاری با خشکسالی و یا آمادگی برای مدیریت اعتراضات کشاورزان کمک نماید. همچنین این مناطق می‌توانند در اولویت اول تخصیص منابع آبی و یا طرح‌های انتقال آب درون استانی قرار گیرند. علاوه بر این مناطق فوق می‌توانند در اولویت طرح‌های افزایش تاب‌آوری در برابر خشکسالی مانند برنامه‌ریزی برای زمان‌بندی مناسب کشت، تغییر الگوی کشت و انتخاب گونه‌های مقاوم به خشکی و اصلاح یا جایگزینی روش‌های آبیاری قرار گیرند.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از سازمان هواشناسی کشور به خاطر در اختیار قرار دادن داده‌ها و اطلاعات و از دانشگاه شهرکرد که حامی مالی این تحقیق می‌باشد تشکر می‌نمایند.

تضاد منافع نویسندگان

نویسندگان هیچ‌گونه تضاد منافی در این مقاله نداشته و این موضوع مورد تایید همه نویسندگان است.

دسترسی به داده‌ها

این تحقیق مربوط به پایان نامه دکتری نویسنده اول می‌باشد و همه اطلاعات و نتایج در متن مقاله ارائه شده است.

- vegetation temperature condition index generation through a fusion framework. *Computers and Electronics in Agriculture*, 234, 110256.
17. Liu, Q., Zhang, S., Zhang, H., Bai, Y. and Zhang, J., 2020. Monitoring drought using composite drought indices based on remote sensing. *Science of the Total Environment*, 711, 134585.
 18. McKee, T. B., Doesken, N. J. and Kleist, J., 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales, *In Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, Anaheim*, 17(22), pp. 179-183.
 19. Mtilatila, L., Bronstert, A., Bürger, G. and Vormoor, K., 2020. Meteorological and hydrological drought assessment in Lake Malawi and Shire River basins (1970–2013). *Hydrological Sciences Journal*, 65(16), pp.2750-2764. <https://doi.org/10.1080/02626667.2020.1837384>
 20. Nawabi, N., Maghdesi, M. and Ganji, N., 2019. Assessment of agricultural drought monitoring using various indices based on ground and remote sensing data: Case study of Lake Urmia watershed. *Journal of Watershed Engineering and Management*, 13(1), pp. 1–12. [in Persian].
 21. Salimi, M., Sanaeinezhad, S, H., Sepehr, A. and Sabet, L., 2018. Drought monitoring based on satellite index (SDI) and TRMM data. (Case Study; Khorasan Razavi province. *Nivar*, 42(102), pp. 19–30. [in Persian].
 22. Tafi, Sh., Baladi, A., Soltani, A. and Pighan, Kh., 2021. Comparison and Evaluation of Estimating Reference Evapotranspiration Methods in Three General Categories Based on Temperature, Radiation and Mass Transfer (Case Study: Lorestan Province). *Nivar*, 44(110), pp. 107-120. [in Persian].
 23. Vahidi, S., Amini, AS. and Hatamzadeh, V., 2023. Remote Sensing Indexes Assessment for Drought Monitoring Using Sentinel Satellite Imagery: A Case Study from Natanz County, Iran. *Asian Journal of Geographical Research*, 6(1), pp. 35-43. <https://doi.org/10.9734/ajgr/2023/v6i1175>
 24. Wei, W., Zhang, J., Zhou, L., Xie, B., Zhou, J. and Li, C., 2021. Comparative evaluation of drought indices for monitoring drought based on remote sensing data. *Environmental Science and Pollution Research*, 28 (16), pp. 20408–20425. <https://doi.org/10.1080/01431160500034235>
 25. Wilhite, D., 2000. Chapter 1. Drought as a natural hazard: concepts and definitions. In: Donald A. Wilhite (Ed.), *Drought Mitigation Center Faculty, a global assessment. Vol. I. London (UK): Routledge*; pp. 3–18.
 26. Zhang, L., Jiao, W., Zhang, H., Huang, C. and Tong, Q., 2017. Studying drought phenomena in the
 7. Degerli, S. and Turhan, E., 2025. An evaluation of spatiotemporal changes of meteorological drought in the Mediterranean sub-basins in Türkiye using discrepancy precipitation and standardized precipitation index. *Natural Hazards*, 121(2), pp. 2293-2322. https://ideas.repec.org/a/spr/nathaz/v121y2025i2d10.1007_s11069-024-06906-5.html
 8. Guttman, N.B., 1999. Accepting the standardized precipitation index: a calculation algorithm. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 35(2), pp. 311-322. <https://doi.org/10.1111/j.17521688.1999.tb03592.x>
 9. Hamzeh, S., Farahani, Z., Mahdavi, Sh., Chatrabgoun, A. and Gholamnia, M., 2017. Spatio-temporal monitoring of agricultural drought using remote sensing data: Case study of Markazi Province, Iran. *Spatial Analysis of Environmental Hazards*, 4(3), pp. 53-70. [In Persian].
 10. Hao, C., Zhang, J. and Yao, F., (2015). Combination of multi-sensor remote sensing data for drought monitoring over Southwest China. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 35, pp. 270-283.
 11. Hayes, M., Svoboda, M., Wall, N. and Widhalm, M., 2011. The Lincoln declaration on drought indices: universal meteorological drought index recommended. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 92(4), pp.485-488. <https://doi.org/10.1175/2010BAMS3103.1>
 12. Huffman, G.J., Bolvin, D.T., Nelkin, E.J. and Tan, J., 2015. Integrated multi-satellite retrievals for GPM (IMERG) technical documentation. *Nasa/Gsfc Code*, 612(47), 2019.
 13. Huang, J., Zhuo, W., Li, Y., Huang, R., Sedano, F., Su, W. and Zhang, X., 2020. Comparison of three remotely sensed drought indices for assessing the impact of drought on winter wheat yield. *International Journal of Digital Earth*, 13 (4), 504–526. <https://doi.org/10.1080/17538947.2018.1542040>
 14. Kogan, F.N., (1995). Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in space research*, 15(11), pp. 91-100. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(95\)00079-T](https://doi.org/10.1016/0273-1177(95)00079-T)
 15. Kogan, F., B. Yang, G. Wei, P. and Xianfeng, J., 2005. Modelling corn production in China using AVHRR-based vegetation health indices. *International Journal of Remote Sensing*. 26(11), 2325–2336.
 16. Li, M., Wang, P., Tansey, K., Sun, Y., Guo, F. and Zhou, J., 2025. Improved field-scale drought monitoring using MODIS and Sentinel-2 data for

- continental United States in 2011 and 2012 using various drought indices. *Remote Sensing of Environment*, 190, pp. 96–106.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.12.010>
27. Zhang, Y., Liu, X., Jiao, W., Zeng, X., Xing, X., Zhang, L. and Hong, Y., 2021. Drought monitoring based on a new combined remote sensing index across the transitional area between humid and arid regions in China. *Atmospheric Research*, 264, pp. 105850.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105850>
28. Zhao, X., Xia, H., Liu, B. and Jiao, W., 2022. Spatiotemporal comparison of drought in Shaanxi–Gansu–Ningxia from 2003 to 2020 using various drought indices in Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 14, pp. 1570.
<https://doi.org/10.3390/rs14071570>
29. Zhong, S., Sun, Z. and Di, L., 2021. Characteristics of vegetation response to drought in the CONUS based on long-term remote sensing and meteorological data. *Ecological Indicators*, 127, pp. 107767.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105850>

نسخه پیش نویس