



Monitoring and Assessing Spatial and Temporal Characteristics of Drought in Iran using Remote Sensing

Mohadese Sadat Fakhar¹, Bijan Nazari^{2*}

1. Ph.D Student, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

2. Associated Professor, Department of Water Engineering, Faculty of Agricultural and Natural Resources, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

*Corresponding Author: b.nazari@eng.ikiu.ac.ir

Keywords:

CHIRPS data, Drought indices, Impacts of drought, Remote sensing.

Extended Abstract

Introduction

Drought is one of the most important and common weather-climatic disasters that have affected different countries around the world. Since drought affects various parts of countries, such as water resources, agriculture, industry, the economy and health, it requires collective and international solutions. Therefore, it seems necessary to investigate this phenomenon in different parts of the world. Drought modeling is an important issue in order to curb or reduce its effects, inform people about its consequences, and plan for the preservation of water resources and social and economic management.

Material and Method

Study area

The studied area is the entire country of Iran, which is located between 25° and 40° North and 44° and 64° East. It covers an area of approximately 1,648,000 square kilometers (Kaboli et al., 2021). Iran is the 17th largest country in the world in terms of area. One of the country's most noticeable characteristics is drought, which typically affects more than two thirds of it and is partly a result of the Iranian plateau's location in the semi-arid tropical belt and surrounding mountains. The average annual temperature in summer is 38 degrees Celsius. The north and northwest regions of the country usually experience temperatures below zero degrees in winter and have humid weather almost the rest of the year (Shahabfar and Eitzinger, 2013). According to Domarton's definitions, Iran has super-arid, dry, and semi-arid regions. The slopes of the Alborz and Zagros mountain ranges are semi-arid (Rahimi et al., 2013). A prolonged period of low rainfall and improper water management has caused devastating droughts in Iran (Jafari et al., 2020). The aim of this study is to identify and describe drought using multiple MODIS-based indicators. For this purpose, the

Received:

02 December 2023

Revised:

22 December 2023

Accepted:

14 January 2024

How to cite this article:

Sadat Fakhar, M., & Nazari, B. (2024). Monitoring and Assessing Spatial and Temporal Characteristics of Drought in Iran using Remote Sensing. *Journal of Drought and Climate change Research*, 2(1), 39-58. [10.22077/JDCR.2024.7011.1050](https://doi.org/10.22077/JDCR.2024.7011.1050)



temporal-spatial characteristics of the intensity and frequency of drought in the entire country in the period from 2001 to 2021 using the standardized precipitation index to one-month SPI-1, three-month SPI-3, and one-year SPI-12, based on the CHIRPS precipitation dataset with a spatial resolution of 5 km, vegetation condition index (VCI), temperature condition index (TCI), and vegetation health index (VHI), were investigated based on specific classifications.

Results and Discussion

The results of the investigations showed that the distribution of rainfall in the southeastern and central regions of the country is less than 200 mm per year. Examining the ratio of drought classes based on the TCI index shows that the area ratio of areas that are in severe drought class in 2020 and 2021 is 36.7% and 43.2%, respectively, which has increased by about 7%. The comparison of the area of the drought class of the TCI and VCI indices also shows that the VCI index has overestimated the area of the droughts that are in the severe drought class by 3.7% and 5.1% in 2020 and 2021, respectively. Examining the difference in drought classification area based on VCI and TCI indices shows that the area ratio of classes that are located in drought-free areas based on the VCI index is about 16.8% higher TCI index.

The drought classification map based on VHI shows that the largest area of the country in 2021 will be covered by severe drought. Most droughts occurred in the central, eastern and southeastern regions. The trend of changes in the indicators shows that the eastern, and southeastern regions and the southern regions of the country are located in areas with severe drought due to the type of climate zoning, but another important point that is important is that a relatively large area of the country was one of the drought-free areas until 2014. It has been gradually reduced, and even the areas that include temperate and drought-free areas have been associated with stress and drought.

Also, the VHI index analysis shows that six provinces in the southern region of the country have experienced long-term drought between 2009 and 2021. Examining the drought trend based on the comparison of different classes of drought using the SPI index shows that the SPI-12 index has provided more acceptable results in order to investigate and monitor the drought over a period of 20 years. In general, the investigations carried out in this research can be effectively used by relevant decision-makers for drought risk management, resilience, sustainable agriculture, and policymaking.



پایش و ارزیابی ویژگی‌های مکانی و زمانی خشکسالی در ایران با استفاده از سنجش از دور

محدثه السادات فخار^۱، بیژن نظری^{۲*}

۱. دانشجوی دکتری، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.
 ۲. دانشیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران.

*نویسنده مسئول: b.nazari@eng.ikiu.ac.ir

چکیده

این مطالعه به شناسایی و توصیف خشکسالی با استفاده از شاخص‌های چندگانه مبتنی بر MODIS می‌پردازد. بنابراین ویژگی‌های زمانی - مکانی شدت و فراوانی خشکسالی در کل کشور در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۱ با استفاده از شاخص بارش استاندارد شده به صورت یک‌ماهه SPI-1، سه‌ماهه SPI-3 و یک‌ساله SPI-12، براساس مجموعه داده بارش CHIRPS با قدرت تفکیک مکانی ۵ کیلومتر، شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI)، شاخص وضعیت دما (TCI) و شاخص سلامت پوشش گیاهی (VHI) مورد بررسی قرار گرفت. پراکندگی بارندگی در نواحی جنوب شرقی و نواحی مرکزی کشور کمتر از ۲۰۰ میلی‌متر در سال است. بررسی نسبت کلاس‌های خشکسالی بر اساس شاخص TCI نشان می‌دهد نسبت مساحت مناطقی که در سال ۲۰۲۰ و ۲۰۲۱ در کلاس خشکی شدید قرار دارند به ترتیب ۳۶/۷ درصد و ۴۳/۲ درصد بوده که حدود ۷ درصد افزایش داشته است. مقایسه مساحت کلاس خشکسالی دو شاخص TCI و VCI نیز نشان می‌دهد که شاخص VCI در سال ۲۰۲۰ و ۲۰۲۱ به میزان ۳/۷ درصد و ۵/۱ درصد سطح مناطقی که در کلاس خشکسالی شدید قرار دارند را بیشتر برآورد نموده است. همچنین شاخص VHI نشان می‌دهد ۶ استان ناحیه جنوبی کشور، بین بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۱ خشکسالی طولانی‌مدت را تجربه کرده‌اند. به‌طور کلی، بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که خشکسالی در کشور در سال‌های اخیر در حال افزایش است و مناطقی در جنوب شرقی و مرکزی کشور بیشتر در معرض خطر قرار دارند. این امر نشانگر نیاز به اقدامات فوری در زمینه مدیریت منابع آبی، کشاورزی پایدار و اقتصاد سبز است. به‌طور کلی بررسی‌های انجام‌شده در این پژوهش می‌تواند به‌طور مؤثر توسط تصمیم‌گیرندگان مربوطه جهت مدیریت ریسک خشکسالی، تاب‌آوری، کشاورزی پایدار و سیاست‌گذاری مورداستفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی:

اثر خشکسالی، داده CHIRPS، سنجش‌از‌دور، شاخص‌های خشکسالی.

تاریخ دریافت:

۱۴۰۲/۰۹/۱۱

تاریخ ویرایش:

۱۴۰۲/۱۰/۰۱

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۲/۱۰/۲۴

مقدمه

خشکسالی یک پدیده طبیعی است که سیستم‌های مختلف اقلیمی، هیدرولوژیکی و محیطی را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Carrão et al., 2016). خشکسالی عموماً ناشی از تغییرات اقلیمی است، مانند دوره‌های بارندگی کمتر که منجر به کمبود آب در نقاط خاصی از چرخه آب یا در طول چرخه می‌شود (McKee et al., 1993). خشکسالی منجر به تخریب خاک، افزایش بیابان‌زایی، تخریب پوشش گیاهی، آتش‌سوزی و سایر پدیده‌های مختلف می‌گردد (Doughty et al., 2018). تغییر در الگوی بارندگی و دما از عوامل تعیین‌کننده خشکسالی است که موجب خسارت قابل توجه به کشاورزی و تولید محصول می‌شود (Zhao et al., 2022). بنابراین، پایش و ارزیابی خشکسالی و تحلیل پویایی مکانی و زمانی آن در مقیاس‌های زمانی متعدد برای حفاظت از محیط‌زیست طبیعی، احیای مراتع و تعادل منابع زمین و آب در برابر شرایط خشکسالی منطقه ضروری است (Jalayer et al., 2022). بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهد که جمعیت جهان در ۳۰ سال آینده بیش از ۷۰ درصد افزایش می‌یابد که این افزایش جمعیت می‌تواند منجر به افزایش شدت خشکسالی شود و می‌تواند تأمین مواد غذایی را در کشورهای مختلف با چالش روبه نماید (Sivakumar, 2021). متأسفانه حدود ۴۰ درصد از مردم آسیا و اقیانوسیه به دلیل خشکسالی و تغییرات آب و هوایی دچار سوء تغذیه و در معرض ناامنی غذایی هستند (Wang et al., 2022). تحقیقات کاربردی در مورد هر نوع خشکسالی به‌طور مؤثری باعث بهبود توانایی جامعه بشری برای واکنش به بلایای خشکسالی می‌شود (Zhao et al., 2022). در طولانی‌مدت استفاده از داده‌های محیطی و اقلیمی برای ایجاد شاخص خشکسالی مؤثرترین روش شناسایی خشکسالی در نظر گرفته شده است (Xu et al., 2021). یکی از قابل مدیریت‌ترین گام‌هایی که می‌توان برای کمک به کاهش اثرات خشکسالی برداشت، مدیریت پایدار آب و همچنین استفاده از مجموعه داده‌های سنجش‌از‌دور برای ارزیابی متغیرهای مرتبط با خشکسالی و طبقه‌بندی شدت خشکسالی در مناطق بزرگ است (Alahacoon et al., 2021). خشکسالی اغلب

به چهار دسته اصلی خشکسالی هواشناسی، خشکسالی هیدرولوژیکی، خشکسالی کشاورزی و خشکسالی اجتماعی-اقتصادی تقسیم‌بندی می‌شود (Sharifi et al., 2022). خشکسالی هواشناسی عمدتاً ناشی از کاهش بارندگی است و خشکسالی کشاورزی عمدتاً در کاهش تولیدات کشاورزی و تخریب جنگل‌ها و مراتع به دلیل تأمین ناکافی آب برای پوشش گیاهی ظاهر می‌شود (Souza et al., 2021). شروع خشکسالی کشاورزی اغلب با کمبود و یا تعویق فصلی شروع می‌شود که منجر به افزایش تنش آبی گیاه، کاهش رطوبت خاک، افزایش تبخیر-تعرق گیاه و از بین رفتن محصول می‌شود. تنش‌های رطوبتی و حرارتی هر دو در برآورد وضعیت کلی پوشش گیاهی مهم می‌باشد (Kogan, 2001). خشکسالی هیدرولوژیکی به‌عنوان کمبود منابع آب سطحی و زیرزمینی تعریف می‌شود که با ارزیابی جریان رودخانه، برف و سطح دریاچه و آب زیرزمینی قابل‌اندازه‌گیری است (Qin et al., 2021). برای درک ارتباط بین خشکسالی‌های کشاورزی و هواشناسی، بررسی همبستگی بین شاخص‌های پوشش گیاهی و تنوع اقلیم ضروری است (Prodhan et al., 2021). روش‌های سنتی برای پایش شرایط خشکسالی بر اساس اندازه‌گیری‌های زمینی متغیرهای اقلیمی، از جمله بارندگی، دما، رطوبت نسبی و محتوای آب خاک می‌باشد (Dasari et al., 2017). در پژوهشی در سال ۱۹۶۵ شاخص شدت خشکسالی (PDSI) توسط پالمر پیشنهاد گردید که اطلاعات بارش، تبخیر و تعرق، رواناب و رطوبت خاک را تحت اصل بیلان آب در نظر می‌گیرد (Palmer, 1965). شاخص نرمال‌شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI) و شاخص دمای سطح زمین (LSt) دو پارامتر کلیدی به‌دست‌آمده از داده‌های طیفی سنجنده MODIS هستند که رطوبت و شرایط حرارتی پوشش گیاهی را نشان می‌دهد (Tucker and Choudhury, 1987). شاخص وضعیت گیاهی (VCI) و وضعیت حرارتی (TCI) دو شاخص خشکسالی هستند که به ترتیب با استفاده از مقادیر بلندمدت NDVI و LSt به دست می‌آیند (Dutta et al., 2015). در پژوهش دیگری، شاخص‌های VCI و TCI با یکدیگر ترکیب و شاخص جدید سلامت گیاهی (VHI) پیشنهاد داده شد

پایش خشکسالی با استفاده از شاخص‌های مختلف خشکسالی هواشناسی استاندارد شده در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰ استفاده شد. محققان در این پژوهش همبستگی میان شاخص بارش و تبخیر و تعرق استاندارد شده با شاخص VCI و TCI را برای یافتن ضریب همبستگی پیرسون بررسی نمودند. به‌طور کلی، نتایج نشان داد شاخص‌های VHI و SPEI همبستگی بهتری دارند و شاخص‌های خشکسالی برای پایش خشکسالی در مناطق فوق خشک مناسب هستند (Ejaz et al., 2023). لذا به‌طور کلی پژوهش‌های صورت گرفته به بررسی خشکسالی، عوامل تعیین‌کننده آن و تأثیرات آن بر سیستم‌های اقلیمی، هیدرولوژیکی و محیطی می‌پردازند. هدف اصلی این مقالات، پایش و ارزیابی خشکسالی در مقیاس‌های زمانی متعدد و ارائه روش‌ها و شاخص‌های مؤثر جهت شناسایی خشکسالی است. در این راستا، استفاده از داده‌های محیطی و اقلیمی، مدیریت پایدار آب، و استفاده از مجموعه داده‌های سنجش‌ازدور برای ارزیابی متغیرهای مرتبط با خشکسالی و طبقه‌بندی شدت آن مورد توجه قرار می‌گیرد. همچنین مطالعات مذکور به اهمیت حفاظت از محیط‌زیست طبیعی، احیای مراتع و تعادل منابع زمین و آب در برابر شرایط خشکسالی اشاره می‌کنند. بنابراین در این پژوهش از شاخص‌های ترکیبی خشکسالی به‌منظور بررسی تغییرات مکانی و زمانی خشکسالی‌های هواشناسی و کشاورزی و تحلیل ارتباط بین آن‌ها استفاده شده است. به همین منظور برای درک بهتری از شرایط محیطی به بررسی شاخص‌های VCI، TCI، VHI و PCI در یک بازه زمانی ۲۰ ساله در مقیاس کل کشور پرداخته شد.

مواد و روش‌ها

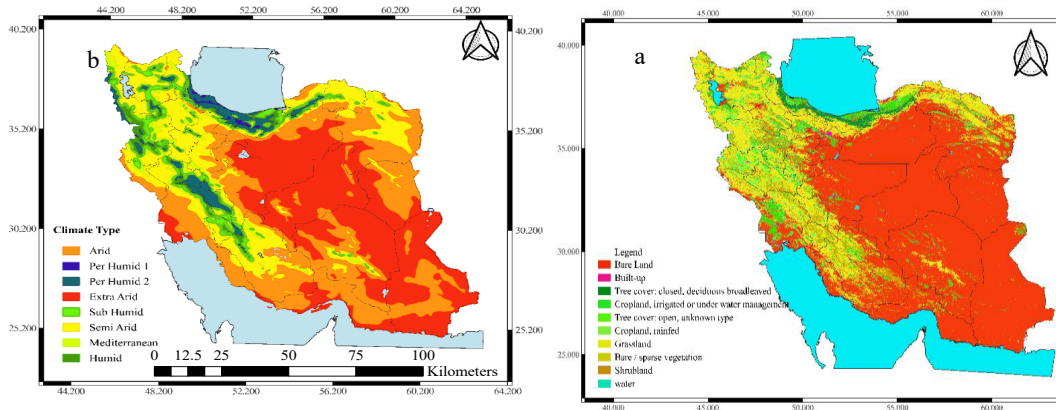
منطقه مورد مطالعه

کشور ایران با مساحت ۱۶۴۸۰۰۰ کیلومتر مربع بین ۲۵ تا ۴۰ درجه شمالی و ۴۴ تا ۶۴ درجه شرقی قرار دارد. (Kaboli et al., 2021). خشکسالی یکی از ویژگی‌های بارز کشور است که معمولاً در اکثر نقاط کشور با شدت‌های مختلف رخ می‌دهد که بخشی از آن به دلیل محاصره فلات ایران توسط کوه‌ها و قرار گرفتن آن در کمربند نیمه‌خشک گرمسیری است.

(Kogan, 2002). در حال حاضر، بسیاری از مطالعات از شاخص‌های مختلف خشکسالی برای تحقیق در مورد ویژگی‌های الگوی مکانی و زمانی خشکسالی تحت شرایط گرمایش جهانی استفاده کرده‌اند. با این حال، نتایج به‌دست‌آمده توسط مطالعات مختلف اغلب متناقض و حتی مخالف هستند. داده‌های حاصل از تصاویر ماهواره‌ای قادرند به‌طور مداوم توزیع مکانی و زمانی از رشد محصولات و وضعیت خشکسالی را ثبت نمایند (Zhou et al., 2020). بنابراین خشکسالی را می‌توان بر اساس تغییرات مشاهده‌شده در سلامت پوشش گیاهی و همچنین پوشش اراضی سطح زمین با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور مورد ارزیابی قرار داد (Silleos et al., 2006). در پژوهشی، با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور و چندین شاخص خشکسالی، وضعیت خشکسالی در استان سیچوان چین بررسی شد که نتایج نشان از خشکسالی شدید بین بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۱ می‌دهد (Ji et al., 2018). در پژوهش دیگری محققان به بررسی و مقایسه شاخص‌های مختلف خشکسالی هواشناسی و کشاورزی در کشور اتیوپی پرداختند که نتایج حاصله بیانگر این بود که به‌منظور برنامه‌ریزی بهتر در مقابله با خشکسالی، بایستی تفاوت‌های بین خشکسالی کشاورزی و هواشناسی هر منطقه مشخص شود (Bayissa et al., 2019). در پژوهشی دیگر به پایش خشکسالی در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۹ میلادی با استفاده از سنجنده MODIS پرداخته شد که محققان از شاخص‌های مختلفی همچون VCI، TCI و VHI برای توصیف خشکسالی کشاورزی در شمال کشور اتیوپی استفاده کردند. نتایج حاصل از بررسی VCI نشان داد در بازه زمانی مورد مطالعه تقریباً در تمامی سال‌ها خشکسالی کشاورزی دیده شده است. همچنین مشاهده گردید که TCI نسبت به سایر شاخص‌ها تنش خشکی نسبتاً بیشتری را برآورد می‌نماید و شاخص VHI پوشش منطقه را کمتر و سطح تنش کمتری را نسبت به شاخص‌های (VCI و TCI) در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد (Was-sie et al., 2022). در تحقیقی در منطقه بسیار خشک عربستان سعودی از تکنیک سنجش‌ازدور به منظور

آب، خشکسالی‌های ویرانگری را در ایران ایجاد کرده است (Jafari et al., 2020). بر اساس گزارش‌ها، ۵۲۰ میلیون دلار از تولیدات کشاورزی ایران به دلیل شرایط خشکسالی در سال ۲۰۰۱ از بین رفته است (Iranian Ministry of Energy, 2018). در حال حاضر یکی از جدیدترین روش‌های تهیه نقشه کاربری اراضی مدل Dynamic World است که نقشه کاربری اراضی با قدرت تفکیک مکانی ده متر را تهیه می‌کند (Brown et al., 2022). به همین منظور آخرین نقشه کاربری اراضی که مربوط به سال ۲۰۲۱ است، با استفاده از مدل Sentinel-2 و بر اساس تصاویر 2 در کلاس در سامانه GEE تهیه گردید که در شکل (۱) قابل ملاحظه است.

نواحی شمال و شمال غرب کشور به‌طورمعمول در زمستان دمای زیر صفر درجه را تجربه می‌کنند و تقریباً در بقیه فصول سال آب‌وهوای مرطوبی را دارند (Shahabfar and Eitzinger, 2013). میانگین بارندگی در نواحی رشته‌کوه‌های البرز شمالی بیش از ۱۰۰۰ میلی‌متر است. کوه‌های البرز و زاگرس به ترتیب بین ۶۰۰ تا ۸۰۰ و ۵۰۰ تا ۶۰۰ میلی‌متر بارندگی دارند. اما نواحی مرکزی با کاهش قابل توجه بارش روبه‌رو هستند. نواحی مرکزی ایران چندین سال است که بارشی نداشته است. بر اساس تعاریف دومارتن، ایران دارای مناطقی فوق خشک، خشک و نیمه‌خشک است. دامنه‌های رشته‌کوه‌های البرز و زاگرس نیمه‌خشک هستند (Rahimi et al., 2013). یک دوره طولانی مدت کم‌بارش و مدیریت نامناسب



شکل ۱. نقشه پهنه‌بندی اقلیمی (a) و نقشه طبقه‌بندی کاربری پوشش اراضی ایران (۲۰۲۱) (b)
 Fig 1. a) Climatic zoning map and b) land use/cover classification map of Iran (2021)

می‌کند. در این پژوهش با توجه به این که مجموعه داده CHIRPS وضوح مکانی بالاتری را نسبت به سایر روش‌های مطرح‌شده دارد (Paredes-Trejo et al., 2017)، بنابراین از این مجموعه داده برای بررسی استفاده شد. سپس مجموعه داده‌های بارش روزانه CHIRPS به مقادیر ماهانه تجمیع و شاخص SPI به صورت یک‌ماهه با نام SPI-1، سه‌ماهه SPI-3 و یک‌ساله SPI-12 محاسبه گردید. داده‌های روزانه CHIRPS را می‌توان به صورت روزانه از طریق پلتفرم GEE محاسبه کرد (https://developers.google.com/earth-engine/data-sets/catalog/UCSB-CHG_CHIRPS_DAILY). پلتفرم GEE یک ابزار قدرتمند سنجش از دور برای استخراج اطلاعات کاربردی از تصاویر ماهواره‌ای است. این

داده‌های مورد استفاده الف- داده‌های بارش

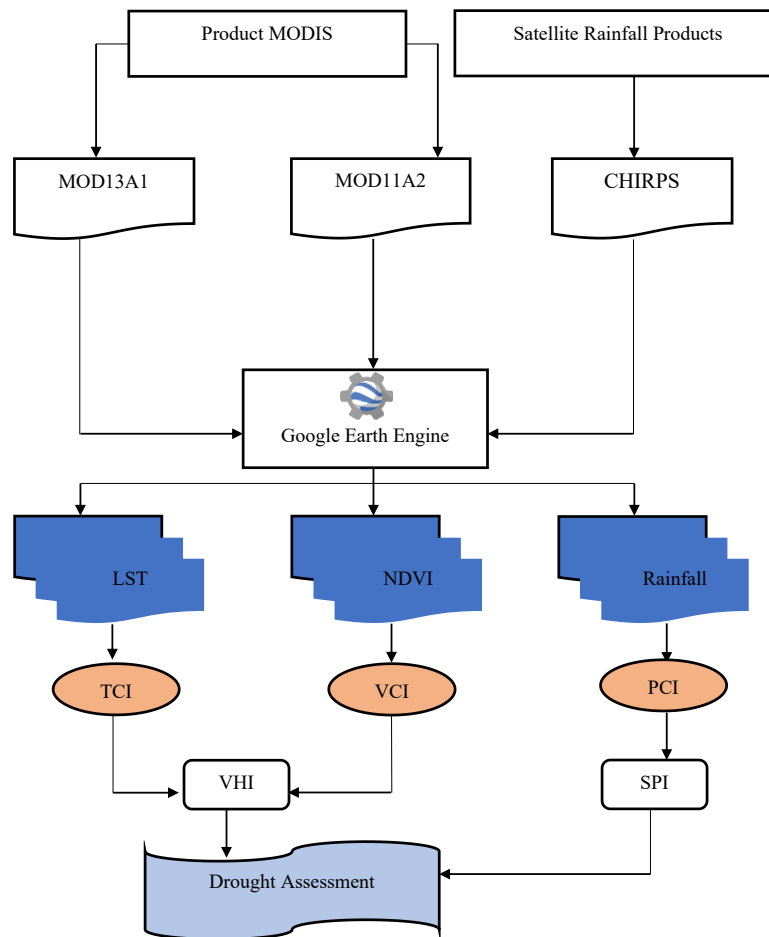
داده‌های بارش مورد استفاده در این مطالعه شامل مجموعه داده‌های بارش روزانه CHIRPS است (Funk et al., 2015). در حال حاضر مجموعه داده‌های بارش متنوعی وجود دارد که این مجموعه داده شامل داده‌های بارش روزانه جهانی از سال ۱۹۸۱ تا حال حاضر است. به‌عنوان مثال مجموعه داده‌های بارش رایج مانند TRMM با تفکیک مکانی ۲۵ کیلومتر، GPM با تفکیک مکانی ۱۱ کیلومتر، PERSIANN با تفکیک مکانی ۲۷ کیلومتر و مجموعه داده CHIRPS با وضوح مکانی ۵ کیلومتر امکان بررسی میزان بارش را به صورت روزانه و برحسب میلی‌متر فراهم

قدرت تفکیک مکانی ۱۰۰۰ متر استفاده شد. داده‌های سنجنده MODIS به دلیل تصویربرداری در بازه زمانی طولانی مدت می‌تواند نتایج ارزشمندی را در اختیار کاربران و کارشناسان حوزه سنجش‌ازدور قرار دهند. با توجه به این که پدیده خشکسالی به صورت آنی رخ نمی‌دهد و تأثیرات آن بعد از گذشت چندین ماه و یا چندین سال نمایان خواهد شد لذا در این پژوهش به منظور بررسی تغییرات سری زمانی و مکانی به بررسی تغییرات خشکسالی در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۲ در پلتفرم GEE پرداخته شد که در مجموع ۵۰۶ تصویر از محصول MOD13A1 و ۱۰۰۵ تصویر از محصول MOD11A2 دریافت شد.

پلتفرم برای استفاده در تحقیقات علوم زمین طراحی شده است. از جمله مزایای این پلتفرم می‌توان به مقرون‌به‌صرفه بودن و پردازش سریع داده‌های مکانی اشاره کرد (Rahaman and Venkatesh, 2020).

ب- داده‌های NDVI و LSt

در این پژوهش از محصولات داده‌های سنجنده MO-DIS از سری تصاویر ماهواره Terra استفاده شده است. لذا از محصولات ۱۶ روزه شاخص گیاهی تفاضلی نرمال شده (NDVI) در قالب فایل MOD13A1 با قدرت تفکیک زمانی ۱۶ روز و قدرت تفکیک مکانی ۲۵۰ متر و شاخص دمای سطح زمین (LSt) در قالب فایل MOD11A2 با قدرت تفکیک زمانی ۸ روزه و



شکل ۲. روند مراحل مورد بررسی در این پژوهش

Fig 2. Steps process of this research

ج- شاخص‌های خشکسالی
شاخص اولیه برای تحقیقات خشکسالی توسط سازمان جهانی هواشناسی شناخته شد (Fang et al., 2019). در

ج- شاخص‌های خشکسالی

شاخص SPI

شاخص بارش استاندارد شده (SPI) توسط (McK-

$$VCI = \frac{(NDVI - NDVI_{min})}{(NDVI_{max} - NDVI_{min})} \times 100 \quad (4)$$

$$TCI = \frac{(LST_{max} - LST)}{(LST_{max} - LST_{min})} \times 100 \quad (5)$$

$$VHI = a \times VCI + b \times TCI \quad (6)$$

که در آن $NDVI_{min}$ ، $NDVI_{max}$ ، LSt_{min} و LSt_{max} به ترتیب حداکثر و حداقل مقادیر NDVI و LSt در دوره ۲۰۰۱-۲۰۲۲ هستند. a ضریب VCI و b ضریب TCI است. از آنجایی که تعیین سهم آب و دما در رشد پوشش گیاهی دشوار است، هنگام محاسبه VHI، ضریب وزنی مشابهی برای شاخص‌های VCI و TCI انتخاب شد ($a=0.5$, $b=0.5$). (Liu et al., 2021).

د- معیار ارزیابی

جدول (۱) طبقه‌بندی شاخص‌های مختلف خشکسالی را نشان می‌دهد که در آن شرایط خشکسالی در منطقه به شش دسته تقسیم شده است. مقادیر کوچک‌تر شاخص‌ها بیانگر شرایط خشکسالی شدیدتر است. با توجه به سیستم طبقه‌بندی خشکسالی در جدول (۱)، در این پژوهش فراوانی، مدت و شدت خشکسالی در ایران در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۱-۲۰۲۲ تجزیه و تحلیل شد. محاسبه فراوانی خشکسالی در رابطه (۷) نشان داده شده است:

$$f = \frac{m}{n} \times 100\% \quad (7)$$

که در آن f فراوانی خشکسالی، m تعداد ماه‌های خشک و n تعداد ماه‌های سال‌های ۲۰۰۱-۲۰۲۲ است.

نتایج و بحث

نتایج برای شاخص‌های مختلف نشان داد که ایران در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۱ به تدریج در معرض خشکسالی قرار گرفته است. با توجه به این که یکی از متغیرهای مهم در بررسی خشکسالی، بارندگی در سطح منطقه می‌باشد به همین منظور به بررسی میانگین سالانه بارندگی در سطح کل کشور در بازه زمانی مورد مطالعه پرداخته شد. بررسی تغییرات بارندگی شکل (۳) نشان می‌دهد در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۷ میانگین بارندگی از مقدار بالاتری برخوردار است اما به تدریج از میزان آن کاسته

دو دهه گذشته، شاخص SPI به‌طور گسترده‌ای برای تحقیقات مختلف خشکسالی استفاده شده است (Won et al., 2020). محاسبه شاخص SPI را می‌توان به دو مرحله تقسیم کرد. ابتدا در گام اول برازش توزیع گاما در سری زمانی طولانی در یک بازه زمانی خاص به‌منظور یافتن توزیع احتمال بارش انجام و در گام دوم توزیع احتمال گاما به توزیع نرمال به‌عنوان SPI تبدیل می‌شود (Hughes and Saunders, 2002). در این پژوهش شاخص SPI در کل کشور به‌صورت یک‌ماهه SPI-1، سه‌ماهه SPI-3 و یک‌ساله SPI-12 در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۱ محاسبه شد. هنگامی که $SPI < 0$ ، نشان‌دهنده بارندگی بیشتر از مقدار متوسط، و شرایط محیطی مرطوب خواهد بود و زمانی که $SPI > 0$ ، نشان‌دهنده وضعیت خشک است که تابع توزیع تناوب آن به شرح زیر است (Zhao et al., 2022).

$$F(x < x_0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{x_0} e^{-x^2/2} dx \quad (1)$$

SPI را می‌توان با معادلات (۲) و (۳) محاسبه کرد:

$$SPI = S \frac{t - (c_2 t + c_1) t + c_0}{[d_3 t + d_2] t + d_1} t + 1.0 \quad (2)$$

$$t = \sqrt{\ln \frac{1}{F^2}} \quad (3)$$

در این معادلات:

$$c_0 = 2.515517, c_1 = 0.802853, c_2 = 0.010328, d_1 = \\ F \leq 0.5, S = -1.432788, d_2 = 0.189269, d_3 = 0.001308 \\ ; F > 0.5, S = 1$$

شاخص سلامت پوشش گیاهی (VHI)

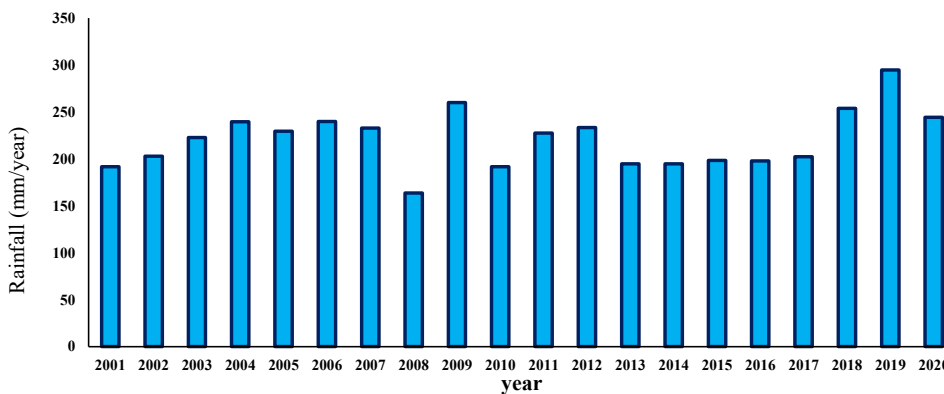
شاخص وضعیت پوشش گیاهی توسط (Kogan, ۱۹۹۰) پیشنهاد شد که با استفاده از شاخص‌های NDVI و LSt و روابط VCI و TCI بررسی می‌شود (Kogan, ۲۰۰۱). VCI و TCI به ترتیب تغییرات پوشش گیاهی و دمای سطح زمین را در طول زمان و مکان منعکس می‌کنند و روش محاسبه در معادلات (۴) و (۵) نشان داده شده است. مقادیر پایین NDVI و LSt بالا معمولاً با رویدادهای شدید خشکسالی همراه است. با ترکیب معادلات (۴) و (۵) می‌توان دریافت که مقادیر کوچک‌تر VCI و TCI بیانگر خشکسالی شدیدتر است. بنابراین، هنگامی که یک رویداد خشکسالی شدید رخ می‌دهد، VHI مقدار کمتری دارد.

جدول ۱. طبقه‌بندی شدت خشکسالی بر اساس شاخص خشکسالی (Zhao et al., 2022).
Table 1. Classification of drought severity based on drought index (Zhao et al., 2022).

کلاس بندی	Classification		شاخص استاندارد شدت بارش SPI	شاخص سلامت گیاهی VHI	شاخص وضعیت دما TCI	شاخص وضعیت گیاهی VCI
کلاس-۱	Class-1	خیلی مرطوب	Very humid	>1	>50	>50
کلاس-۲	Class-2	مرطوب متوسط	Moderately humid	0 to 1	40 to 50	40 to 50
کلاس-۳	Class-3	خشکسالی ضعیف	Weak drought	0 to -0.99	30 to 40	30 to 40
کلاس-۴	Class-4	خشکسالی متوسط	Moderate Drought	-1 to -1.49	20 to 30	20 to 30
کلاس-۵	Class-5	خشکسالی شدید	Severe Drought	-1.5 to -2	10 to 20	10 to 20
کلاس-۶	Class-6	خشکسالی بسیار شدید	Extreme Drought	<-2	<10	<10

مناطق جنوب شرقی و مرکزی ایران، با میانگین بارش سالانه پایین‌تر از حد نرمال، در بیشتر موارد با خشکسالی مواجه هستند. که از جمله دلایل مقدار کم بارندگی در این نواحی می‌توان به قرارگیری این منطقه در اقلیم خشک و بدون پوشش گیاهی اشاره کرد.

می‌شود. به طوری که در بازه زمانی سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۷ در کمترین مقدار خود قرار دارد که این می‌تواند نشان از تشدید پدیده خشکسالی در سطح کشور باشد. علاوه بر میزان بارندگی، نحوه پراکندگی بارندگی نیز در جلوگیری از تشدید خشکسالی می‌تواند مؤثر باشد. بررسی توزیع بارش نشان می‌دهد که



شکل ۳. میانگین بارش سالانه در سطح کشور با استفاده از مجموعه داده CHIRPS

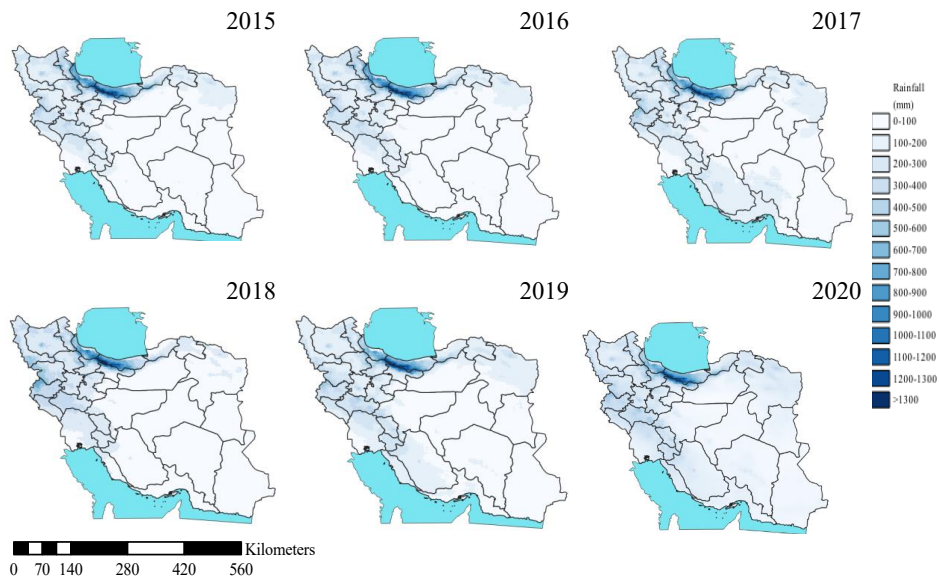
Fig 3. Average annual precipitation in the country using CHIRPS data set

تا ۲۰۱۷ میانگین بارندگی حدود ۴۰۰ mm را داشتند، در بازه زمانی سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۰ به تدریج به مقدار ۲۰۰ mm و کمتر از آن نزدیک شده است. همچنین نواحی غرب و شمال غرب کشور در بازه زمانی سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۷ بر اساس این

گستره بارندگی در نواحی شمال شرق و جنوب غرب کشور در بازه زمانی سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۷ به طور میانگین حدود ۳۵۰ mm در سال است که به تدریج از میزان بارندگی این مناطق کاسته شده و نواحی جنوب غرب و جنوبی کشور که در سال‌های ۲۰۱۵

در بررسی مناطق حاشیه دریای خزر شکل (۴) نیز، مشاهده می‌شود که حجم بارش در این مناطق نیز با کاهش همراه بوده و شدت بارش در نواحی مانند آستارا و تالش، با کاهش قابل توجهی روبرو شده است.

طبقه‌بندی میزان بارندگی بین ۶۰۰ mm تا ۸۰۰ mm در سال را داشته که در سال ۲۰۲۰ با مقدار ۴۰۰ mm تا ۶۰۰ mm همراه بوده است. کاهش حجم بارندگی علاوه بر مناطق مرکزی و خشک کشور در نواحی با اقلیم معتدل و مرطوب نیز به وقوع پیوسته است.



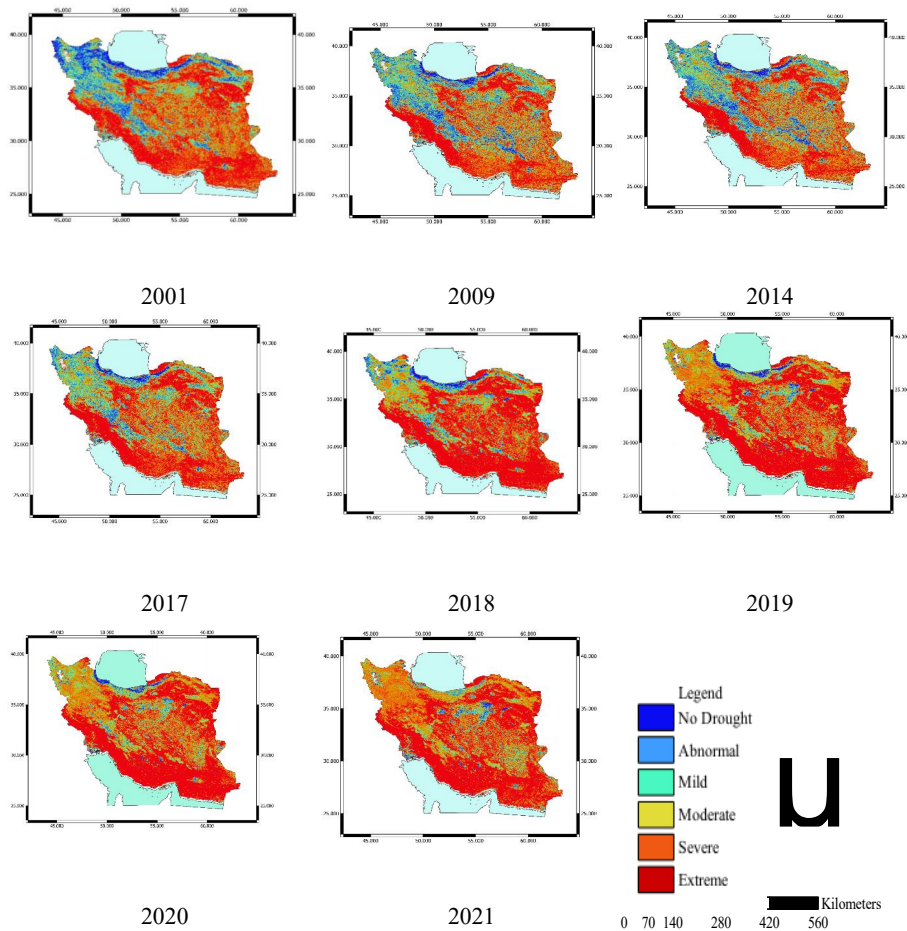
شکل ۴. توزیع پراکندگی بارش در سطح کشور

Fig 4. The distribution of precipitation in the country

در نواحی غرب و شمال غرب کشور با شدت بیشتری افزایش پیدا کرده است بررسی‌ها نشان می‌دهد پهنه وسیعی از استان‌های شمالی کشور و مناطق حاشیه دریای خزر جزء مناطق بدون خشکسالی محسوب می‌شود که روند مساحت این ناحیه به‌طور تقریبی تا سال ۲۰۱۷ از تغییرات زیادی برخوردار نبوده اما از سال ۲۰۱۸ با کاهش جدی روبه‌رو شده است و تنها دو استان مازندران و گیلان و ناحیه محدودی از استان گلستان در کلاس‌بندی مناطق بدون خشکسالی قرار دارند. با این روند تغییرات پیش‌بینی می‌شود که پیشروی خشکسالی در بعضی مناطق مازندران به‌ویژه شرق این استان و غرب استان گیلان عمیق‌تر و جدی‌تر شود. همچنین خشکسالی شدید هر ساله بر اساس شاخص VCI بیشترین مساحت را به خود اختصاص داده است.

شاخص NDVI به‌منظور بررسی و نظارت بر پوشش گیاهی مورد استفاده قرار می‌گیرد و این شاخص به تنهایی برای بررسی خشکسالی مناسب نیست (Kogan

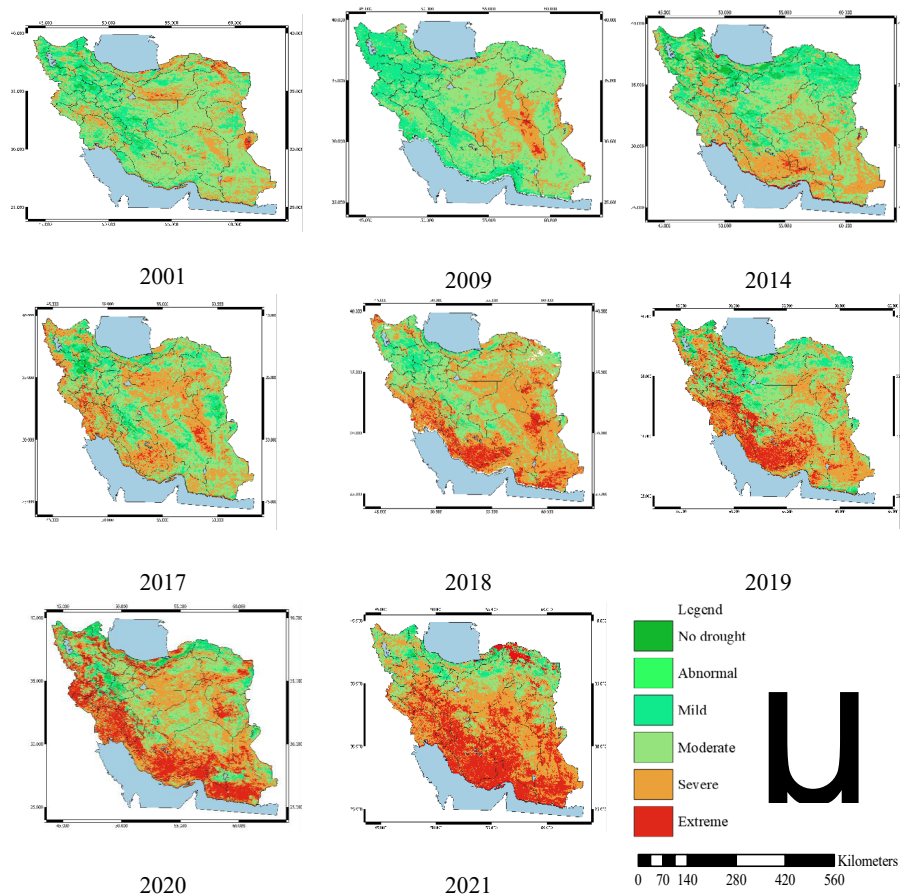
در ادامه شاخص‌های VCI، TCI و VHI بر اساس شاخص‌های NDVI و LSt محاسبه شدند و بر اساس کلاس‌بندی جدول (۱) به ترتیب در شکل‌های (۵) و (۶) و (۷) قابل‌ملاحظه است. بررسی روند تغییرات خشکسالی نشان می‌دهد که در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۹، روند تغییرات خشکسالی با شدت و سرعت کمتری رخ داده است. به‌طوری‌که در شکل (۵) نیز مشخص است، بیشترین تغییرات در نواحی جنوب و جنوب غرب کشور رخ داده است. در این بازه زمانی، نسبت تغییرات خشکسالی در کلاس‌های بسیار شدید و شدید به ترتیب ۱۶/۱ درصد و ۲۴/۹ درصد افزایش یافته است. یکی از دلایل افزایش مساحت کلاس‌هایی با خشکسالی به نسبت بالا را می‌توان کاهش میزان بارندگی و توزیع نامناسب آن در سطح کشور دانست. بررسی تغییرات خشکسالی بر اساس شاخص VCI در بازه زمانی سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۲۱ نشان می‌دهد که روند خشکسالی با شدت بیشتری رو به گسترش است به‌طوری‌که نسبت تغییرات مساحت خشکسالی



شکل ۵. شاخص تغییرات پوشش گیاهی (VCI)
 Fig 5. Vegetation Change Index (VCI)

و جنوبی کشور آغاز شده است که در طی سال‌های مختلف گسترش بیشتری داشته و در نهایت در سال‌های ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۱ بیشترین کلاس از خشکسالی شدید را به خود اختصاص داده است. بررسی نسبت کلاس‌های خشکسالی بر اساس شاخص TCI نشان می‌دهد که نسبت مساحت مناطقی که در سال ۲۰۲۰ و ۲۰۲۱ در کلاس خشکی شدید قرار دارند به ترتیب ۳۶/۷٪ و ۴۳/۲٪ بوده که حدود ۷ درصد افزایش داشته است. مقایسه مساحت کلاس خشکسالی دو شاخص VCI و TCI نیز نشان می‌دهد که شاخص VCI در سال ۲۰۲۰ و ۲۰۲۱ به میزان ۳/۷٪ و ۵/۱٪ سطح مناطقی که در کلاس خشکسالی شدید قرار دارند را بیشتر برآورد کرده است. بررسی اختلاف مساحت کلاس‌بندی خشکسالی بر اساس دو شاخص VCI و TCI نشان می‌دهد که نسبت مساحت کلاس‌هایی که در مناطق بدون خشکسالی قرار دارند بر اساس شاخص VCI حدود ۱۶/۸٪ بیشتر از شاخص TCI است.

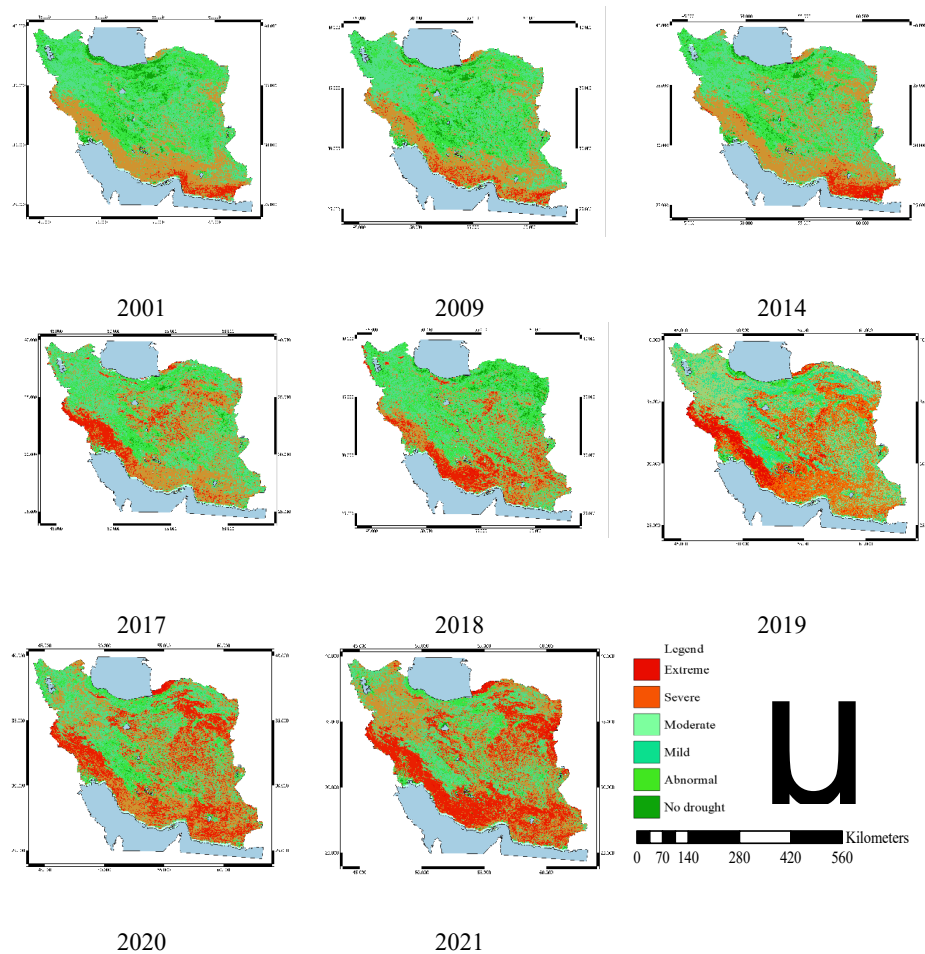
در پژوهشی (Gidey et al., 2016). Citation: "al et Gidey, ۲۰۱۸ و همکاران (2018) نشان دادند نظارت شاخص NDVI در بازه زمانی طولانی مدت و بهره‌گیری از مقادیر VCI و TCI می‌تواند پیش‌بینی خشکسالی را بهبود بخشد. به‌طور کلی شاخص VCI شاخص بهتری نسبت به NDVI برای نظارت بر خشکسالی است زیرا شادابی پوشش گیاهی را نسبت به بهترین و بدترین شرایط در طول فصل‌های مشابه و در سال‌های مختلف نشان می‌دهد. با توجه به این‌که VCI یک شاخص خشکسالی قابل‌اعتماد در مناطق وسیع است بنابراین از این شاخص می‌توان برای تمرکز بر ارزیابی خشکسالی استفاده کرد. در ادامه به بررسی خشکسالی بر اساس شاخص TCI پرداخته شد. بررسی کلاس‌های مختلف نشان می‌دهد که این شاخص تنها نواحی دریای خزر را جزء مناطق بدون خشکسالی طبقه‌بندی کرده است. گسترش خشکسالی به تدریج از سال ۲۰۱۴ با پیشروی از مناطق شرقی



شکل ۶. خشکسالی بر اساس طبقه‌بندی سری زمانی دمای سطح زمین (TCI)
Fig 6. Investigation of drought based on time series classification of surface temperature (TCI) values in the period of 2001 to 2021

است. بررسی شاخص VHI نشان می‌دهد ۶ استان ناحیه جنوبی کشور، بین بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۲۱ خشکسالی طولانی‌مدت را تجربه کرده‌اند. در پژوهشی Golian و همکاران (۲۰۱۵) بررسی خشکسالی هواشناسی و کشاورزی را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. نتایج حاصل حاکی از آن است که تقریباً در همه مناطق ایران خشکسالی‌های شدید بین سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۱ رخ داده است. در پژوهشی دیگر با استفاده از شاخص بارش (SPI) در ایستگاه سینوپتیک ارومیه پژوهشگران دریافتند در طول دوره آماری تحقیق در هر یک از دوره بازگشت‌های ۲۲ گانه خشکسالی شدید رخ داده است (Khalili et al., 2007). بررسی فراوانی خشکسالی می‌تواند در توصیف خشکسالی کشاورزی و برنامه‌ریزی بهتر در مقابله با خشکسالی از اهمیت بالایی برخوردار باشد. در شکل (۸) به بررسی فراوانی مدت و شدت خشکسالی در بازه زمانی سال‌های مورد مطالعه پرداخته شده است.

در ادامه در شکل (۷) به بررسی شاخص VHI پرداخته شد. شاخص VHI می‌تواند برای ارزیابی خشکسالی کشاورزی استفاده شود. شاخص VHI پارامتر دما و پوشش گیاهی را برای ارزیابی دقیق‌تر خشکسالی ادغام می‌کند (Kogan, 1995). نقشه کلاس‌بندی خشکسالی نشان می‌دهد بیشترین مساحت کشور در سال ۲۰۲۱ را خشکسالی شدید تشکیل می‌دهد. بیشترین خشکسالی‌ها در نواحی مرکزی، شرقی و جنوب شرقی رخ داده است. روند تغییرات شاخص‌ها نشان می‌دهد نواحی شرق و جنوب شرق و مناطق جنوبی کشور به دلیل نوع پهنه‌بندی اقلیمی در مناطق با خشکسالی بسیار شدید و شدید قرار دارد. نکته‌ی مهم دیگر اینکه مساحت به نسبت مناسبی از کشور تا سال ۲۰۱۴ جزء مناطق بدون خشکسالی قرار گرفته است که به تدریج با کاهش همراه شده و حتی مناطقی که جزء مناطق معتدل و بدون خشکسالی قرار می‌باشند را با تنش و خشکسالی همراه کرده



شکل ۷. خشکسالی براساس طبقه‌بندی سری زمانی مقادیر VHI

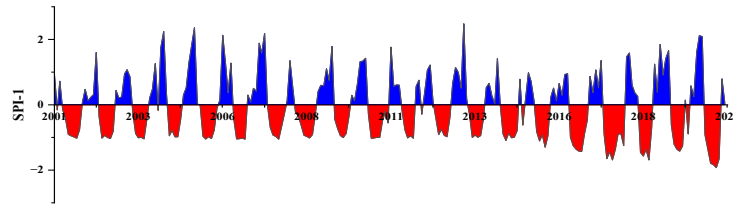
Fig 7. Investigation of drought based on the time series classification of VHI values from 2001 to 2021

در طی سال‌های اخیر نه تنها شیب روند تغییرات با کاهش روبه‌رو نشد بلکه با شدت بیشتری نیز افزایش پیدا کرد به طوری که نسبت مقادیر عددی شاخص SPI-3 در سال ۲۰۲۱ دو برابر مقدار عددی این شاخص در سال ۲۰۱۴ است؛ اما بررسی‌ها و مقایسه کلاس‌های مختلف خشکسالی نشان می‌دهد که شاخص SPI-12 نتایج قابل قبول تری را به منظور بررسی خشکسالی در یک بازه زمانی ۲۰ ساله ارائه داده است. بررسی شاخص SPI-12 نشان می‌دهد که از اواسط سال ۲۰۱۲ به بعد کشور در معرض خشکسالی قرار گرفته و از سال ۲۰۱۷ با افزایش به نسبت قابل ملاحظه‌ای روبه‌رو شده است به طوری که در سال ۲۰۲۱ به بیشترین میزان خود یعنی مقدار عددی ۱/۵۹ رسیده است که به معنی قرارگیری کشور در کلاس خشکسالی شدید و بسیار شدید است. از طرفی بررسی نمودار مساحت کلاس‌های مختلف

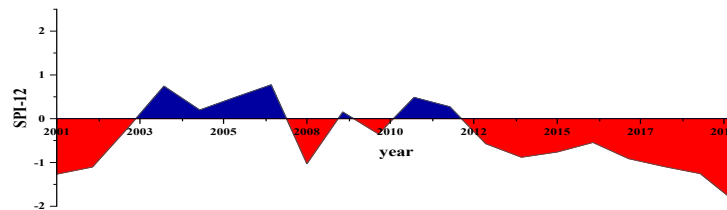
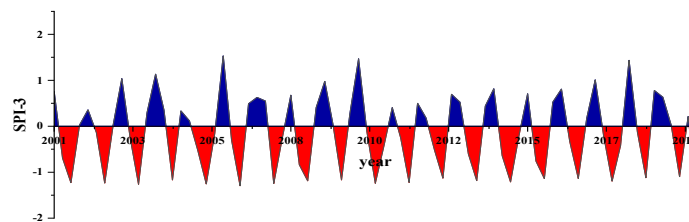
بر اساس نتایج حاصل، شاخص SPI-1 روند نوسانی ترسالی را در ماه‌های با بارش به نسبت مناسب نشان می‌دهد به طوری که هرچه مقدار بارش افزایشی بوده، شاخص SPI-1 نیز برآورد ترسالی داشته است. در مقابل خشکسالی با یک روند یکنواخت و یکسانی برآورد گردیده است با این تفاوت که پهنه وسیع تری از سال در محدوده خشکسالی قرار دارد. بررسی شاخص SPI-3 نتایج متفاوت تری را به نسبت شاخص SPI-1 ارائه کرده است به طوری که این شاخص در بازه زمانی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۷ در محدوده ترسالی قرار داشته است اما به تدریج با تغییراتی همراه شده است. به طوری که در طول سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۵ ملاحظه می‌شود که با یک شیب ملایمی از مقدار عددی ترسالی کاسته شده و به محدوده خشکسالی در حد متوسط نزدیک شده است؛ که این زنگ خطری برای افزایش سطح خشکسالی در منطقه می‌باشد.

این کلاس کاسته شده و در مقابل به مساحت کلاسی با خشکسالی شدید افزوده شده است؛ بنابراین استفاده از شاخص SPI به منظور بررسی خشکسالی در مناطقی با وسعت زیاد از دقت قابل قبولی برخوردار است.

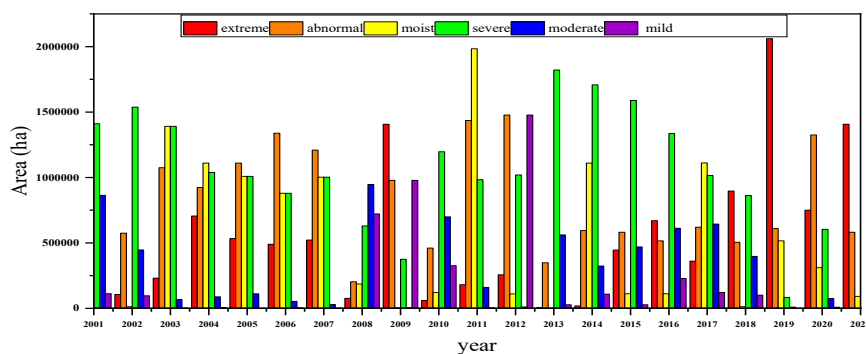
از خشکسالی نیز تا مقدار زیادی به روند تغییرات شاخص SPI-12 نزدیک بوده به طوری که بیشترین مساحت مربوط به کلاس خشکسالی شدید است. از سال ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۰ به تدریج از مقدار عددی مساحت



a



B



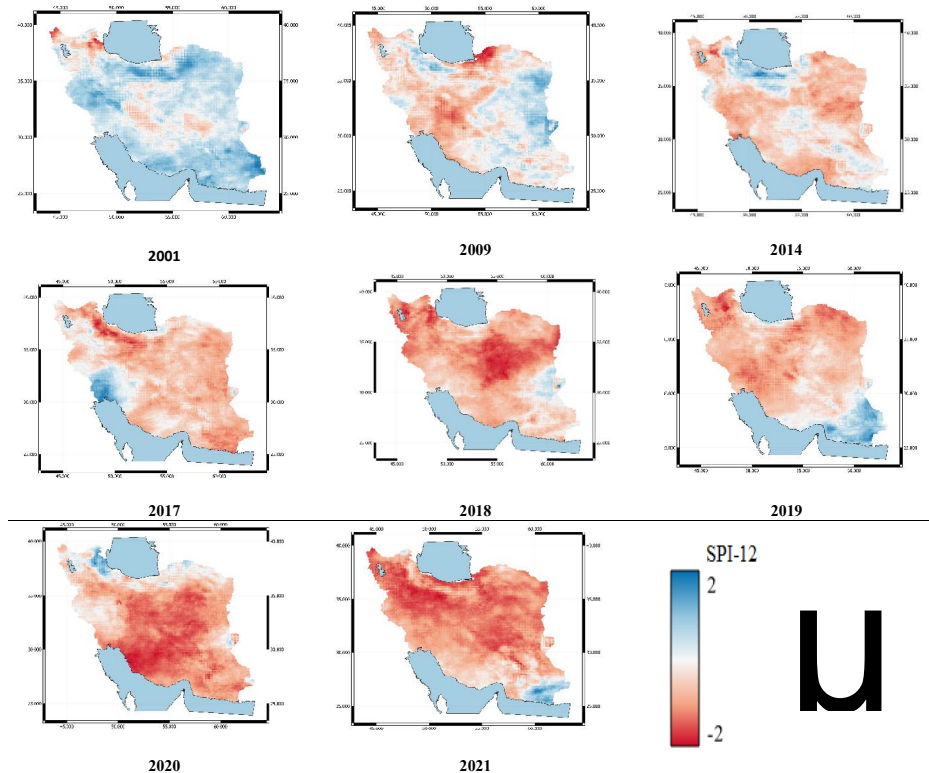
شکل ۸. بررسی فراوانی خشکسالی (a) و مساحت کلاس‌های مختلف در طی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۱ در محدوده مورد مطالعه (b)
 Fig 8. a) Examining the frequency of drought (b) The area of different classes during 2001 and 2021

قرار داشته اما به تدریج در طی سال‌های مختلف بر میزان خشکسالی افزوده شده است به طوری که این میزان افزایش در مناطق مرکزی کشور، روند تغییرات بیشتری را نشان می‌دهد. تغییرات SPI-12

بررسی نقشه پراکندگی شاخص SPI-12 نیز نشان می‌دهد که میزان خشکسالی در بازه زمانی مورد بررسی، روند افزایشی داشته، به طوری که در سال ۲۰۰۱ بخش وسیعی از کشور در محدوده ترسالی

و شمال غرب و پهنه دریای خزر را نیز در بر گرفته است.

نشان می‌دهد که میزان تغییرات در سال‌های اخیر به خصوص در سال‌های ۲۰۱۹ تا ۲۰۲۱ بیشتر شده به طوری که علاوه بر نواحی مرکزی، نواحی غرب



شکل ۹. نقشه پراکندگی مکانی شاخص SPI-12
Fig 9. Spatial distribution map of SPI-12 index

مانند SPI-1، SPI-3، SPI-12، VCI، TCI و VHI، وضعیت خشکسالی و تغییرات آن در طول سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۱ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که در سال‌های اخیر، خشکسالی در کشور در حال افزایش است و مساحت مناطقی که در کلاس خشکی شدید قرار دارند نیز در این دوره زمانی افزایش یافته است. بررسی تفاوت بین شاخص‌های VCI و TCI نشان می‌دهد که شاخص VCI به‌طور کلی تمایل بیشتری به تشخیص خشکسالی دارد و بیشترین سطح مناطقی که در کلاس خشکسالی شدید قرار دارند را برآورد می‌نماید. استفاده از شاخص SPI-12 برای بررسی خشکسالی در یک بازه زمانی ۲۰ ساله پیشنهاد می‌شود زیرا نتایج آن نسبت به سایر شاخص‌ها قابل قبول‌تر است و می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مؤثر برای پایش و برنامه‌ریزی در مقابل خشکسالی استفاده شود.

نتیجه‌گیری

خشکسالی می‌تواند خسارت‌های اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی زیادی را به وجود آورد. ایران هر ساله اثرات اقتصادی و اجتماعی قابل توجهی را بر اثر خشکسالی تجربه می‌کند. بنابراین پایش خشکسالی و بررسی شاخص‌های مختلف خشکسالی به‌منظور جلوگیری از گسترش و وقوع احتمالی رویدادهای خشکسالی شدید در آینده امری ضروری تلقی می‌گردد. نتایج حاصل از تحلیل‌ها نشان می‌دهد که نواحی جنوب شرقی و مرکزی کشور در برابر کمبود بارندگی و خشکسالی بیشتر در معرض خطر قرار دارند. میزان بارندگی در این مناطق کمتر از حد نرمال است و ممکن است بر تأمین منابع آبی و مدیریت اجتماعی و اقتصادی تأثیر منفی بگذارد. در مطالعه حاضر، با استفاده از شاخص‌های مختلف

- ping, *Scientific Data*, 9(1), 251. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01307-4>
- Carrão, H., Naumann, G. & Barbosa, P. (2016). Mapping global patterns of drought risk: An empirical framework based on sub-national estimates of hazard, exposure and vulnerability, *Global Environmental Change*, 39, 108–124. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.04.012>
- Dasari, H. P., V. B. R., Ssvs, R. & Gunta, P. (2017). On the movement of tropical cyclone LEHAR, *Earth Systems and Environment*, 1, 1–14. <https://doi.org/10.1007/s41748-017-0025-7>
- Doughty, R., Xiao, X., Wu, X., Zhang, Y., Bajgain, R., Zhou, Y., Qin, Y., Zou, Z., McCarthy, H. & Friedman, J. (2018). Responses of gross primary production of grasslands and croplands under drought, pluvial, and irrigation conditions during 2010–2016, Oklahoma, USA, *Agricultural Water Management*, 204, 47–59. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.04.001>
- Dutta, D., Kundu, A., Patel, N. R., Saha, S. K. & Siddiqui, A. R. (2015). Assessment of agricultural drought in Rajasthan (India) using remote sensing derived Vegetation Condition Index (VCI) and Standardized Precipitation Index (SPI), *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 18(1), 53–63. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2015.03.006>
- Ejaz, N., Bahrawi, J., Alghamdi, K. M., Rahman, K. U. & Shang, S. (2023). Drought Monitoring Using Landsat Derived Indices and Google Earth Engine Platform: A Case Study from Al-Lith Watershed, Kingdom of Saudi Arabia, *Remote Sensing*, 15(4), 984. <https://doi.org/10.3390/rs15040984>
- Fang, W., Huang, S., Huang, Q., Huang, G., Wang, H., Leng, G., Wang, L. & Guo, Y. (2019). Probabilistic assessment of remote sensing-based terrestrial vegetation vulnerability to drought stress of the
- با توجه به نتایج به دست آمده، توصیه می‌شود که تصمیم‌گیران مربوطه در زمینه مدیریت ریسک خشکسالی و تاب‌آوری، بهره‌برداری پایدار از منابع آبی، توسعه کشاورزی پایدار و اقتصاد سبز اقدامات لازم را انجام دهند. همچنین، این نتایج نیازمند اقدامات فوری بوده و توصیه می‌شود که برنامه‌ها و سیاست‌های مناسب در زمینه مدیریت منابع آب، بهبود کارایی آبیاری، ترویج روش‌های کشاورزی پایدار، و تأمین منابع آب جایگزین برنامه‌های مصرف آب غیرپایدار و توسعه تکنولوژی‌های مرتبط با مدیریت خشکسالی باشد. همچنین، این پژوهش نشان می‌دهد که لازم است سیستم‌های زمانبندی و هشداردهی مبتنی بر داده‌های ماهواره‌ای و شاخص‌های خشکسالی توسعه داده شود تا بتوان به طور دقیق‌تر و به موقع اقدامات مرتبط با خشکسالی را در نظر گرفت. در نهایت، برای تحقیقات آتی در این زمینه توصیه می‌شود که از داده‌های جدیدتر و دقیق‌تر ماهواره‌ای، مدل‌های پیشرفته‌تر تحلیل خشکسالی و به‌روزرسانی داده‌های آماری استفاده شود تا بتوان به تحلیل دقیق‌تر و پایداری از خشکسالی در ایران دست یافت.
- منابع**
- Alahacoon, N., Edirisinghe, M. & Ranagalage, M. (2021). Satellite-based meteorological and agricultural drought monitoring for agricultural sustainability in Sri Lanka, *Sustainability*, 13(6), 3427. <https://doi.org/10.3390/su13063427>
- Bayissa, Y. A., Tadesse, T., Svoboda, M., Wardlow, B., Poulsen, C., Swigart, J. & Van Andel, S. J. (2019). Developing a satellite-based combined drought indicator to monitor agricultural drought: A case study for Ethiopia, *GIScience & Remote Sensing*, 56(5), 718–748. <https://doi.org/10.1080/15481603.2018.1552508>
- Brown, C. F., Brumby, S. P., Guzder-Williams, B., Birch, T., Hyde, S. B., Mazzariello, J., Czerwinski, W., Pasquarella, V. J., Haertel, R. & Ilyushchenko, S. (2022). Dynamic World, Near real-time global 10 m land use land cover map-

- prehensive drought index as an indicator for use in drought monitoring integrating multi-source remote sensing data: a case study covering the Sichuan-Chongqing region, *International Journal of Remote Sensing*, 39(3), 786–809. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1392635>
- Kaboli, S., Hekmatzadeh, A. A., Darabi, H. & Haghighi, A. T. (2021). Variation in physical characteristics of rainfall in Iran, determined using daily rainfall concentration index and monthly rainfall percentage index, *Theoretical and Applied Climatology*, 144, 507–520. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03553-9>
- Khalili, N., Mosaedi, A. & Latifi, N. (2007). Investigation of drought and its occurrence trend in Urmia, *Journal of Agricultural Sciences and Natural Resources*, 14(5), 156-146. [In Persian]
- Kogan, F. (2002). World droughts in the new millennium from AVHRR-based vegetation health indices, *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 83(48), 557–563. <https://doi.org/10.1029/2002EO000382>
- Kogan, F., Guo, W., Strashnaia, A., Kleshenko, A., Chub, O. & Virchenko, O. (2016). Modelling and prediction of crop losses from NOAA polar-orbiting operational satellites, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 7(3), 886–900. <https://doi.org/10.1080/19475705.2015.1009178>
- Kogan, F. N. (1990). Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas, *International Journal of Remote Sensing*, 11(8), 1405–1419. <https://doi.org/10.1080/01431169008955102>
- Kogan, F. N. (2001). Operational space technology for global vegetation assessment, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 82(9), 1949–1964. <https://doi.org/10.1175/1520-0477>
- Kogan, F. N. (1995). Application of vegetation index Loess Plateau in China, *Remote Sensing of Environment*, 232, 111290. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111290>
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L. & Hoell, A. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes, *Scientific Data*, 2(1), 1–21.
- Gidey, E., Dikinya, O., Sebege, R., Segosebe, E. & Zenebe, A. (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, 1–18. <https://doi.org/10.1186/s40068-018-0115-z>
- Golian, S., Mazdiyasi, O. & AghaKouchak, A. (2015). Trends in meteorological and agricultural droughts in Iran, *Theoretical and Applied Climatology*, 119, 679–688. <https://doi.org/10.1007/s00704-014-1139-6>
- Iranian Ministry of Energy (2018). *Annual water resources report*, IME publication. [In Persian]
- Jafari, S. M., Nikoo, M. R., Dehghani, M. & Alijanian, M. (2020). Evaluation of two satellite-based products against ground-based observation for drought analysis in the southern part of Iran, *Natural Hazards*, 102, 1249–1267. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-03965-2>
- Jalayer, S., Sharifi, A., Abbasi-Moghadam, D., Tariq, A. & Qin, S. (2022). Modeling and predicting land use land cover spatiotemporal changes: A case study in chalus watershed, Iran, *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 15, 5496–5513. DOI: 10.1109/JSTARS.2022.3189528
- Ji, T., Li, G., Yang, H., Liu, R. & He, T. (2018). Com-

- Rahaman, S. A. & Venkatesh, R. (2020). Application of remote sensing and google earth engine for monitoring environmental degradation in the Nilgiri biosphere reserve and its ecosystem of Western Ghats, India, *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 43, 933–940. DOI:10.5194/isprs-archives-XLIII-B3-2020-933-2020
- Rahimi, J., Ebrahimpour, M. & Khalili, A. (2013). Spatial changes of extended De Martonne climatic zones affected by climate change in Iran, *Theoretical and Applied Climatology*, 112, 409–418. <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0741-8>
- Shahabfar, A. & Eitzinger, J. (2013). Spatio-temporal analysis of droughts in semi-arid regions by using meteorological drought indices, *Atmosphere*, 4(2), 94–112. <https://doi.org/10.3390/atmos4020094>
- Sharifi, A., Mahdipour, H., Moradi, E. & Tariq, A. (2022). Agricultural field extraction with deep learning algorithm and satellite imagery, *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 1–7. <https://doi.org/10.1007/s12524-021-01475-7>
- Silleos, N. G., Alexandridis, T. K., Gitas, I. Z. & Perakis, K. (2006). Vegetation indices: advances made in biomass estimation and vegetation monitoring in the last 30 years, *Geocarto International*, 21(4), 21–28. <https://doi.org/10.1080/10106040608542399>
- Sivakumar, M. (2021). Climate change, agriculture adaptation, and sustainability, *Climate Resilience and Environmental Sustainability Approaches: Global Lessons and Local Challenges*, 87–109. https://doi.org/10.1007/978-981-16-0902-2_6
- Souza, A. G. S. S., Neto, A. R. & de Souza, L. L. (2021). Soil moisture-based index for agricultural drought assessment: SMADI application in Pernambuco State-Brazil, *Remote Sensing of Environment and Brightness Temperature for Drought Detection*, *Advances in Space Research*, 15(11), 91–100.
- Liu, Q., Zhang, J., Zhang, H., Yao, F., Bai, Y., Zhang, S., Meng, X. & Liu, Q. (2021). Evaluating the performance of eight drought indices for capturing soil moisture dynamics in various vegetation regions over China, *Science of the Total Environment*, 789, 147803. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147803>
- Lloyd-Hughes, B. & Saunders, M. A. (2002). A drought climatology for Europe, *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 22(13), 1571–1592. DOI: 10.1002/joc.846
- McKee, T. B., Doesken, N. J. & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales, *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, 17(22), 179–183.
- Paredes-Trejo, F. J., Barbosa, H. A. & Kumar, T. V. L. (2017). Validating CHIRPS-based satellite precipitation estimates in Northeast Brazil, *Journal of Arid Environments*, 139, 26–40. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2016.12.009>
- Palmer, W. C. (1965). *Meteorological drought*. Vol. 30, US Department of Commerce, Weather Bureau.
- Prodhan, F. A., Zhang, J., Yao, F., Shi, L., Pangali Sharma, T. P., Zhang, D., Cao, D., Zheng, M., Ahmed, N., & Mohana, H. P. (2021). Deep learning for monitoring agricultural drought in South Asia using remote sensing data, *Remote Sensing*, 13(9), 1715. <https://doi.org/10.3390/rs13091715>
- Qin, Q., Wu, Z., Zhang, T., Sagan, V., Zhang, Z., Zhang, Y., Zhang, C., Ren, H., Sun, Y. & Xu, W. (2021). Optical and thermal remote sensing for monitoring agricultural drought, *Remote Sensing*, 13(24), 5092. <https://doi.org/10.3390/rs13245092>

ing at field scales using Sentinel-2 and MODIS imagery, *Computers and Electronics in Agriculture*, 168, 105144. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105144>

ronment, 252, 112124. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112124>

- Tucker, C. J. & Choudhury, B. J. (1987). Satellite remote sensing of drought conditions, *Remote Sensing of Environment*, 23(2), 243–251. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(87\)90040-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(87)90040-X)
- Wang, L., Chen, W., Fu, Q., Huang, G., Wang, Q., Chotamonsak, C. & Limsakul, A. (2022). Super droughts over East Asia since 1960 under the impacts of global warming and decadal variability, *International Journal of Climatology*, 42(9), 4508–4521. DOI: 10.1002/joc.7483
- Wassie, S. B., Mengistu, D. A. & Birlie, A. B. (2022). Agricultural drought assessment and monitoring using MODIS-based multiple indices: the case of North Wollo, Ethiopia, *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(11), 787. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10455-4>
- Won, J., Choi, J., Lee, O. & Kim, S. (2020). Copula-based Joint Drought Index using SPI and EDDI and its application to climate change, *Science of the Total Environment*, 744, 140701. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140701>
- Xu, H., Wang, X. & Zhao, C. (2021). Drought sensitivity of vegetation photosynthesis along the aridity gradient in northern China, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 102, 102418. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102418>
- Zhao, X., Xia, H., Liu, B. & 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(7), 1570. <https://doi.org/10.3390/rs14071570>
- Zhou, X., Wang, P., Tansey, K., Zhang, S., Li, H. & Wang, L. (2020). Developing a fused vegetation temperature condition index for drought monitor-

