



Research Paper

Assessing the Performance of Vegetation Indices in Drought Analysis Using Remote Sensing Techniques (Case Study: Kurdistan Province)

Ehsan Soureh^a, Farshad Safarpour^{*b}

^a MA, Department of Climatology, Faculty of Natural Resources, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

^b PhD, Department of Natural Geography, Faculty of Geographical Sciences and Planning, University of Isfahan, Isfahan, Iran (Secretary of Geography, Education and Training of Sanandaj District 2)

ARTICLE INFO

Received: 2025/05/06

Accepted: 2025/08/08

PP: 73-84

Use your device to scan and
read the article online



Keywords: Drought,
Vegetation Cover, Remote
Sensing Indices, MODIS,
Kurdistan Province.

n

Abstract

Drought is a natural phenomenon that can have detrimental effects on vegetation cover and agricultural activities. This study investigates the impact of drought on vegetation cover in Kurdistan Province, Iran, from 2000 to 2022, employing the remote sensing indices NDVI, EVI, and VCI. Vegetation cover data was extracted from MODIS satellite imagery and analyzed using the Google Earth Engine platform. The findings reveal significant changes in the distribution of vegetation cover classes (dense, moderate, weak, and no cover) over the study period. In 2020, the largest area was covered by the dense vegetation class (45.43%), while the smallest area was covered by weak vegetation cover (0.2%). In contrast, in 2004, the smallest area was covered by dense vegetation cover (3.25%), and the largest area was covered by weak vegetation cover (19.19%). In terms of drought, the study period experienced droughts of varying intensities. The years 2020 and 2012 had the least drought (with 95.43% and 67.75% of the area without drought, respectively), while the years 2004 and 2022 had the most drought (with 18.09% and 47.60% of the area without drought, respectively). A significant correlation was observed between dense vegetation cover and decreased drought severity. Years with the largest dense vegetation cover area (such as 2020) experienced the least drought, while years with an increase in weak vegetation cover area (such as 2004) witnessed an increase in drought severity.

Citation: Soureh, E., & Safarpour, F. (2025). Assessing the Performance of Vegetation Indices in Drought Analysis Using Remote Sensing Techniques (Case Study: Kurdistan Province). *Journal of Environmental Research in Mountainous Regions*, 1(4), 73-84.

DOI: <https://doi.org/10.22034/ermr.2025.63417>



© The Author(s).

Publisher: University of Kurdistan

* **Corresponding author:** Farshad Safarpour, **Email:** farshadclima2008@gmail.com

Extended Abstract

Introduction

Drought is a complex and slow-onset natural phenomenon that negatively affects human activities, ecosystems, and economic development, impacting various societies across the globe. It manifests in different forms, including meteorological, agricultural, hydrological, and socio-economic droughts, each reflecting a distinct aspect of water scarcity. Population growth, economic development, and land-use changes intensify the impacts of drought and make water resource management increasingly challenging. The wide geographical extent of drought and its influence on diverse regions highlight the necessity of accurate and continuous monitoring. Traditional drought monitoring methods, which mainly rely on precipitation data, face limitations such as inadequate spatial and temporal coverage and low accuracy. In this context, remote sensing technology has emerged as an innovative approach, enabling the collection of extensive and simultaneous data while overcoming many of the shortcomings of conventional methods. This technology serves as a valuable tool for managing natural resources, particularly water resources, under conditions of stress and scarcity.

Methodology

This study aimed to monitor drought and analyze vegetation cover changes in Kurdistan Province during 2000–2022 using NDVI, EVI, and VCI indices derived from MOD09GA data of the MODIS sensor. Calculations were performed in the Google Earth Engine environment, and the results were classified into four vegetation cover categories (dense, moderate, sparse, and bare). Vegetation distribution and drought severity maps were generated in ArcGIS Pro, and temporal trends were analyzed. Finally, the relationship between dense vegetation changes and drought severity was statistically evaluated, revealing significant correlations between these variables.

Results and Discussion

In this study, in order to examine vegetation changes and drought conditions in Kurdistan

Province, May images from 2000 to 2022 were analyzed using NDVI, EVI, and VCI indices. Due to minimal changes in some years, only 2004, 2008, 2012, 2016, 2020, and 2022, which showed the most significant variations, were selected for detailed analysis. Results from NDVI and EVI indicated notable fluctuations in vegetation cover over the study period, with varying proportions of dense, moderate, sparse, and non-vegetated areas; for instance, in 2004 the dense vegetation class had relatively high coverage, whereas in 2022 it experienced a significant decline. Drought assessment using VCI revealed that the region experienced varying degrees of moderate to severe drought, with certain years, such as 2007, showing no severe drought, while in more recent years drought distribution increased. Correlation analysis between NDVI and EVI with VCI showed a positive and significant relationship between vegetation changes and drought intensity (0.515 and 0.460, respectively). These findings suggest that vegetation dynamics can serve as an effective indicator for monitoring and assessing drought conditions in Kurdistan Province.

Conclusion

The results of the vegetation indices indicated that, over the study period, significant changes occurred in the distribution of vegetation classes (dense, moderate, sparse, and non-vegetated). In 2020, the largest area was covered by dense vegetation (45.43%) and the smallest by sparse vegetation (0.2%). In contrast, in 2004, the smallest area was under dense vegetation (3.25%) and the largest under sparse vegetation (19.19%). From a drought perspective, varying intensities of drought occurred throughout the study period. The years 2020 and 2012 experienced the lowest drought levels (with 95.43% and 67.75% of the area without drought, respectively), whereas 2004 and 2022 had the highest drought levels (with 18.09% and 47.60% of the area without drought, respectively). A significant correlation was observed between dense vegetation and reduced drought intensity; years with the highest dense vegetation coverage (such as 2020) experienced the lowest drought, while years with increased sparse vegetation (such as 2004) corresponded with higher drought intensity.

Financial sponsor

According to the responsible author, this article has no financial sponsor.

Contribution of the authors to the research

The first author: Data collection, calculation and analysis of vegetation indices, drafting the manuscript.

Second author: Scientific supervision of the research process, final manuscript editing.

Conflict of interest

The authors declare that they have no conflict of interest in writing or publishing this article.

Appreciation and thanks

The authors sincerely thank and appreciate all those who collaborated with them in the collection of field data.





مقاله پژوهشی

بررسی کارایی شاخص های پوشش گیاهی در مطالعات خشکسالی با استفاده از تکنیک سنجش از دور (مطالعه موردی: استان کردستان)

احسان سوره: کارشناس ارشد، گروه آب و هواشناسی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران
فرشاد صفرپور* ^{id}: دکترا، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران (دبیر جغرافیا، آموزش و پرورش ناحیه دو، سنندج)

چکیده	اطلاعات مقاله
خشکسالی یکی از پدیده های طبیعی مخرب است که اثرات جدی بر پوشش گیاهی و فعالیت های کشاورزی می گذارد. هدف این پژوهش، بررسی تأثیر خشکسالی بر پوشش گیاهی استان کردستان در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ با استفاده از شاخص های پوشش گیاهی به دست آمده از تکنیک های سنجش از دور است. برای این منظور، شاخص های NDVI، EVI و VCI که از تصاویر سنجنده MODIS استخراج شده اند، به کار گرفته شدند. تحلیل داده ها با استفاده از سامانه گوگل ارث انجین انجام شده و به بررسی تغییرات زمانی و مکانی پوشش گیاهی در طول دوره مطالعه پرداخته شد. به طور مشخص، تغییرات در طبقات پوشش گیاهی (متراکم، متوسط، ضعیف و بدون پوشش) و ارتباط آن با شدت خشکسالی بررسی گردید. مدل های استفاده شده در این پژوهش برای تحلیل روندها و همبستگی بین شاخص های پوشش گیاهی و شدت خشکسالی در سطح منطقه ای طراحی شده اند. نتایج نشان می دهد که طی دوره مورد مطالعه، نوسانات قابل توجهی در توزیع طبقات پوشش گیاهی مشاهده شده است. همچنین، همبستگی معناداری بین کاهش شدت خشکسالی و افزایش مساحت پوشش گیاهی متراکم شناسایی شد. این یافته ها اهمیت استفاده از شاخص های سنجش از دور در پایش و ارزیابی خشکسالی و تغییرات پوشش گیاهی را در مناطق حساس به خشکسالی مانند استان کردستان تأیید می کنند. پژوهش حاضر با ارائه بینش هایی در مورد رفتار پوشش گیاهی در مواجهه با خشکسالی، به بهبود مدیریت منابع طبیعی و کشاورزی در مناطق خشک و نیمه خشک کمک می کند.	تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۷ شماره صفحات: ۷۳-۸۴ از دستگاه خود برای اسکن و خواندن مقاله به صورت آنلاین استفاده کنید  واژه های کلیدی: خشکسالی، پوشش گیاهی، شاخص های سنجش از دور، MODIS، استان کردستان

استناد: سوره، احسان و صفرپور، فرشاد (۱۴۰۴). بررسی کارایی شاخص های پوشش گیاهی در مطالعات خشکسالی با استفاده از تکنیک سنجش از دور (مطالعه موردی: استان کردستان). نشریه علمی پژوهش های محیطی در قلمروهای کوهستانی، ۱ (۴)، ۷۳-۸۴.

DOI: <https://doi.org/10.22034/ermr.2025.63417>

ناشر: دانشگاه کردستان



© نویسندگان

مقدمه

خشکسالی به عنوان یک پدیده طبیعی پیچیده، با تبعات منفی بر فعالیت‌های انسانی، گروه‌های اجتماعی و اکوسیستم‌ها، به طور فزاینده‌ای جوامع مختلف را در سراسر جهان تحت تأثیر قرار می‌دهد (میشرا و سینگ^۱، ۲۰۱۰). ماهیت تدریجی و خزنده خشکسالی، آن را از سایر بلایای طبیعی متمایز می‌کند و چالش‌های مضاعفی را برای پایش و مدیریت آن به وجود می‌آورد (شکیا و یاماگوچی^۲، ۲۰۰۶). در مقیاس جهانی خشکسالی به‌طور میانگین هر ساله حدود شش بیلیون دلار به بخش‌های مختلف خسارت وارد می‌نماید و در مقایسه به سایر مخاطرات طبیعی تعداد افراد بیشتری را تحت تأثیرات منفی خود قرار می‌دهد (محیط اصفهانی و همکاران، ۱۳۹۹). به دلیل تهدید امنیت غذایی انسان و به طبع آن مشکلات اجتماعی و اقتصادی در اثر خشکسالی (سلیمانی و همکاران، ۱۳۹۸)، خشکسالی از لحاظ زمانی یکی از مزمن‌ترین و از لحاظ اقتصادی جزو زیانبارترین بلایای طبیعی به‌شمار می‌رود (معدنچی و همکاران، ۱۳۹۸). بر اساس گزارش فائو در سال ۲۰۱۵ در بازه زمانی حدود ۱۰۰ ساله، بیش از یازده میلیون نفر در نتیجه خشکسالی از بین رفته‌اند و حدود ۲ میلیارد نفر تحت تأثیر خشکسالی قرار گرفته‌اند (سلطانی و همکاران، ۱۳۹۸). علاوه بر موارد فوق، به‌طور کلی پیامدهای خشکسالی در قالب کاهش دبی رودخانه‌ها، کمبود آب آشامیدنی در مناطق مسکونی، پایین رفتن سطح آب‌های زیرزمینی، کاهش تولید در سطح مراتع و جنگل‌ها، افزایش فرسایش خاک، کاهش تولیدات زراعی، دامی و باغی، عدم پایداری قیمت‌ها در بازار و نامساعد شدن اوضاع اقتصادی نمایان می‌شود و در حالت بحرانی موجب به هم خوردن تعادل اقتصادی اجتماعی جامعه شده و می‌تواند ناپایداری‌های اقتصادی و تزلزل بنیان‌های اجتماعی و سیاسی را فراهم سازد. همچنین از دیگر پیامدهای خشکسالی می‌توان به فشارهای روحی و بیماری‌های روانی، کاهش فرصت‌های شغلی، کاهش توان بازپرداخت وام‌های کشاورزی، افزایش بهای مواد غذایی اصلی مردم، افزایش نرخ تورم در جامعه، خشک شدن تدریجی منابع آب، رقابت برای دستیابی به آب و هزینه‌های اجتماعی ناشی از مهاجرت، از همپاشیدگی اجتماعی و خانوادگی اشاره کرد (سواری و همکاران، ۱۳۹۸).

با توجه به تنوع تعاریف خشکسالی، انجمن هواشناسی آمریکا این پدیده را در چهار دسته کلی طبقه‌بندی می‌کند: هواشناسی، کشاورزی، هیدرولوژیکی و اجتماعی - اقتصادی (دو^۳ و همکاران، ۲۰۱۳). پدیده خشکسالی ابتدا با کمبود بارش آغاز شده (خشکسالی هواشناسی) سپس، این کمبود رطوبت موجود در خاک را تحت تأثیر قرار می‌دهد که تداوم این کمبود بر رشد و عملکرد گیاهان اثر می‌گذارد (خشکسالی کشاورزی). اثرات کمبود در درازمدت بر روی منابع آب‌های سطحی و زیرزمینی دیده می‌شود (خشکسالی هیدرولوژیکی). در نهایت بسته به منابع آبی مورد استفاده اثرات اقتصادی - اجتماعی متفاوت خواهد بود (خشکسالی اجتماعی - اقتصادی) (رهنا و همکاران، ۱۴۰۱). هر یک از این دسته‌ها، جنبه‌های متفاوتی از کمبود آب را در سطوح مختلف بررسی می‌کنند. رشد فزاینده جمعیت، توسعه اقتصادی و تغییر کاربری اراضی، فشار فزاینده‌ای را بر منابع آب وارد می‌کنند. در شرایط کمبود آب، خشکسالی به عنوان یک عامل تشدید کننده، چالش‌های مدیریتی را دوچندان می‌کند (هاگمن^۴، ۱۹۸۴). خشکسالی به عنوان یکی از مخاطرات طبیعی فراگیر، طیف وسیعی از مناطق آب و هوایی را تحت تأثیر قرار می‌دهد (ویتالیت^۵، ۲۰۰۰). مطالعات نشان می‌دهد که بیش از نیمی از کره زمین هر ساله در معرض پدیده خشکسالی قرار می‌گیرد (کogan^۶، ۱۹۹۷). پایش دقیق و مستمر خشکسالی در سطوح مکانی و زمانی، برای اتخاذ تصمیمات مدیریتی کارآمد در زمینه منابع آب، به ویژه در شرایط کمبود و تنش آبی، امری ضروری است. روش‌های سنتی پایش خشکسالی که عمدتاً بر پایه داده‌های بارش استوار هستند، با محدودیت‌هایی نظیر محدودیت شبکه ایستگاه‌های باران‌سنجی، ناقص و اغلب غیر دقیق بودن داده‌ها، خطای انسانی و عدم پوشش مکانی و زمانی مناسب، مواجه هستند. فناوری سنجش از دور به عنوان ابزاری نوین، انقلابی در پایش و مدیریت منابع طبیعی، به ویژه در حوزه منابع آب، ایجاد کرده است. این فناوری با ارائه امکان جمع‌آوری داده‌ها در مقیاس‌های جهانی، منطقه‌ای و محلی در بازه‌های زمانی کوتاه و به صورت همزمان، بر محدودیت‌های روش‌های سنتی پایش خشکسالی غلبه می‌کند (هیمانشو و همکاران^۷، ۲۰۱۵).

با بررسی‌های به عمل آمده، در دنیا ۱۹ شاخص جهت سنجش خشکسالی مورد استفاده قرار گرفته است که در میان آن‌ها، شاخص خشکسالی مبتنی بر داده‌های سنجش از دور یکی از پرکاربردترین شاخص‌ها است. در این شاخص به کمک تصاویر ماهواره‌ای سنجده شاخص‌های شاخص پوشش گیاهی (VCI) و شاخص تفرق پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) و ... محاسبه می‌گردند (سعیدیان، ۱۴۰۱). با این اوصاف بررسی وضعیت شاخص پوشش گیاهی از مهم‌ترین روش‌های بررسی وضعیت خشکسالی است (سلطانی و همکاران، ۱۳۹۸) (سلیمانی و همکاران، ۱۳۹۸).

1. Mishra & Singh
2. Shakya & Yamaguchi
3. Du
4. Hagman
5. Withite
6. Kogan
7. Himanshu

کشور ایران در جنوب غرب آسیا یکی از مناطقی است که در دهه‌های اخیر با مخاطره‌های طبیعی مانند خشکسالی درگیر بوده است که به دنبال وقوع آن مسائل و مشکلات متعددی در بخش‌های مختلف کشاورزی، اقتصاد، حوضه آبریز و ... به وجود می‌آید (سبحانی و همکاران، ۱۳۹۸). پیشبینی‌های در خصوص خشکسالی در ایران طی سی سال آینده نشانگر این است که شرایط خشکسالی در کشور رو به افزایش خواهد بود، به گونه‌ای که طی این ۳۰ سال، در سال‌های ۲۰۲۵، ۲۰۳۲، ۲۰۳۵ و ۲۰۳۹، اکثر نقاط کشور با خشکسالی‌های شدید و بسیار شدید روبرو خواهند (سواری و همکاران، ۱۳۹۸).

استان کردستان نیز طی چند دهه اخیر با تغییر و تحولات اقلیمی زیادی مواجه شده است به گونه‌ای که خشکسالی‌های متعددی در این استان گزارش شده است. با توجه به وابستگی بیش از جامعه ساکنان این استان به بخش کشاورزی، وقوع خشکسالی می‌تواند آسیب‌های جبران‌ناپذیری را بر پیکره اقتصادی و اجتماعی و حتی زیست‌محیطی استان کردستان وارد نماید. با توجه به اهمیت شاخص‌های پوشش گیاهی در برآورد خشکسالی و ارتباط آن‌ها با یکدیگر، محققان در مطالعه حاضر سعی دارند با استفاده از فرایند مذکور، اقدام به بررسی پدیده خشکسالی در استان کردستان نمایند.

مرور ادبیات و سوابق پژوهش

خشکسالی‌هواشناسی

هواشناسان خشکسالی را به عنوان بارش کمتر از حد معمول که منجر به تغییر الگوی آب و هوایی می‌شود، تعریف کرده‌اند. بنابراین، خشکسالی از نظر هواشناسی اساساً به حالتی از خشکی ناشی از کمبود بارندگی اطلاق می‌شود. به همین دلیل، از این دیدگاه، استفاده یا تعریف خشکسالی که در بخشی از جهان متداول است، ممکن است برای مناطق دیگر مناسب نباشد. علاوه بر این، اهمیت دیدگاه هواشناسی در این است که اندازه‌گیری‌های هواشناسی اولین نشانه بارز خشکسالی هستند. برای ارزیابی و پایش خشکسالی هواشناسی، شاخص‌های مختلفی ارائه شده است که عوامل مورد استفاده در هر کدام و مقیاس زمانی که شاخص محاسبه می‌کند، نیز متفاوت می‌باشد (طالبی و موسوی، ۱۳۸۹).

خشکسالی هیدرولوژیکی

در صورتی که در یک سال، میزان دبی آب جریانات سطحی یا حجم آب زیرزمینی در مقایسه با سال‌های گذشته کاهش یابد، به آن خشکسالی هیدرولوژیکی گفته می‌شود. خشکسالی هیدرولوژیکی به دلیل کاهش بارش، افزایش دما و افزایش تبخیر و ترقق رخ می‌دهد. این نوع خشکسالی نه تنها بر ذخایر آبی، بلکه بر سیستم‌های منابع آب نیز تأثیر می‌گذارد (برنت^۱، ۱۹۹۳).

خشکسالی کشاورزی

خشکسالی کشاورزی زمانی رخ می‌دهد که میزان رطوبت خاک در یک سال نسبت به سال‌های گذشته کاهش یابد، که این امر منجر به افت تولید و عملکرد محصولات کشاورزی می‌شود. کاهش ریزش‌های جوی و افزایش تبخیر و ترقق منجر به کاهش رطوبت خاک می‌شود، زیرا گیاه قادر به جذب املاح محلول نخواهد بود و فرایند تبخیر و ترقق آن متوقف می‌شود. این وضعیت می‌تواند منجر به نابودی گیاه و در نتیجه ایجاد خسارت‌های اقتصادی گردد (خوش اخلاق، ۱۳۷۸).

خشکسالی اقتصادی - اجتماعی

در صورتی که خشکسالی هواشناسی و هیدرولوژیکی به طور طولانی‌مدت در یک منطقه رخ دهد، می‌تواند منجر به بروز خشکسالی اقتصادی و اجتماعی شود. از اثرات این نوع خشکسالی می‌توان به گرسنگی، قحطی، مرگ و میر انسان‌ها و مهاجرت دسته جمعی اشاره کرد. خشکسالی اقتصادی-اجتماعی زمانی رخ می‌دهد که تقاضا برای یک کالای اقتصادی وابسته به آب از میزان عرضه آن که به دلیل کاهش بارندگی کاهش یافته، فراتر رود. در واقع، این نوع خشکسالی نتیجه تعامل بین فعالیت‌های کشاورزی (تقاضا) و رویدادهای طبیعی (عرضه) است و با کاهش حجم آب با کیفیت مورد نیاز گیاهان و حیوانات همراه می‌باشد (ویلایت و گلنتر^۲، ۱۹۸۵).

کاظم‌پور چورسی و همکاران (۱۳۹۸) در پژوهشی داده‌های ماهواره‌ای را برای پایش خشکسالی حوضه آبریز دریاچه ارومیه مورد ارزیابی قرار دادند. در این مطالعه، از تصاویر سنجنده MODIS و داده‌های بارندگی ماهواره‌ای TRMM برای پایش خشکسالی استفاده شد. این تحقیق با بهره‌گیری از شاخص‌های NDVI، LST، VCI، TCI، PCI و VHI و SPI انجام شد و نتایج نشان داد که شاخص VCI مطلوب‌ترین شاخص ماهواره‌ای برای پایش خشکسالی کشاورزی در این حوضه است. شاخص SPI نیز در مقیاس‌های زمانی ۳، ۶ و ۹ ماهه با شاخص‌های ماهواره‌ای همبستگی معناداری داشت. سلیمی‌فرد و همکاران (۱۳۹۷) به بررسی احتمال وقوع خشکسالی‌های شدید در استان خراسان رضوی با استفاده از شاخص‌های ماهواره‌ای پرداختند. این پژوهش در بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۰ و با استفاده از شاخص‌های SDI، TCI، VCI، PCI

1. Burnet

2. Wilhite & Glantz

و SPI انجام شد. نتایج نشان داد که خشکسالی در سال‌های ۲۰۰۱، ۲۰۰۲، ۲۰۰۶ و ۲۰۰۸ در این استان رخ داده است. همچنین، همبستگی بالایی بین شاخص‌های SDI و SPI وجود دارد و شاخص SDI علاوه بر پایش همه‌جانبه خشکسالی هواشناسی، قادر به شناسایی خشکسالی کشاورزی نیز می‌باشد. فاضل‌دهکردی و همکاران (۱۳۹۴) به پایش خشکسالی مراتع استان اصفهان با استفاده از تصاویر سنجنده MODIS و شاخص‌های LST، NMDI، EVI، NDVI، TCI و SPI در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۲ پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد خشکسالی شدید در سال ۲۰۰۰ و ترسالی در سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۰۹ در مراتع این استان رخ داده است. همچنین، نوسانات خشکسالی در بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت بیشتر از بازه‌های زمانی بلندمدت بود و شاخص SPI در بازه‌های زمانی ۳ و ۹ ماهه با مقادیر بارندگی همبستگی معناداری داشت. شاخص‌های حرارتی و NMDI نیز در بازه کوتاه‌مدت بیشترین همبستگی را با شاخص SPI نشان دادند.

قالب^۱ و همکاران (۲۰۱۵) خشکسالی کشور لبنان را با استفاده از داده‌های لندست از سال ۱۹۸۲ تا ۲۰۱۸ پایش کردند. این پژوهش با استفاده از شاخص‌های VCI، TCI و NDVI انجام شد. نتایج نشان داد در سال ۲۰۱۴ خشکسالی شدید در مناطق گیاهی لبنان وجود نداشته است. خشکسالی متوسط تا شدید عمدتاً در شمال لبنان (منطقه عمیون و دشت عکار) رخ داده و منطقه صور و دره بقاع سطح پایینی از خشکسالی (خشکسالی خفیف) را تجربه کرده‌اند. این مطالعه می‌تواند به تصمیم‌گیرندگان در زمینه پایش و حل مؤثرتر شرایط خشکسالی کمک کند. سربکش^۲ و همکاران (۲۰۱۹) به تحلیل خشکسالی کشاورزی و رطوبت خاک با استفاده از شاخص‌های مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای در زیرحوضه مالاپرابها هندوستان پرداختند. در این پژوهش از شاخص‌های NDVI، TCI، VCI و VHI استفاده شد. نتایج نشان داد که خشکسالی فصلی و سالانه در این منطقه مکرراً رخ می‌دهد و سال‌های خشکسالی و شدت آن‌ها از نظر مکانی و زمانی متغیر است. شاخص‌های مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای به‌طور واضح تغییرات مکانی در خشکسالی‌های کشاورزی و شدت آن‌ها را نشان می‌دهند و شاخص سلامت پوشش گیاهی (VHI) رای تعیین خشکسالی کشاورزی و ویژگی‌های آن مناسب‌تر است.

علی‌بیگ^۳ و همکاران (۲۰۲۰) خشکسالی هواشناسی و کشاورزی در حوضه آبریز رودخانه کابل چترال را با استفاده از شاخص‌های ترکیبی خشکسالی در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸ ارزیابی کردند. در این پژوهش، از شاخص‌های PCI، TCI، VCI، SMCI، SDCI، MIDI و NMIDI استفاده شد. نتایج نشان داد سال ۲۰۰۰ خشک‌ترین سال در فصل موسمی بوده و سال ۲۰۰۴ هر دو نوع خشکسالی هواشناسی و کشاورزی را تجربه کرده است. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که ارزیابی مناسب خشکسالی با ادغام منابع داده‌ای مختلف امکان‌پذیر است و این روش می‌تواند برای مدیریت ریسک خشکسالی و انعقاد معاهدات جدید آب مفید باشد.

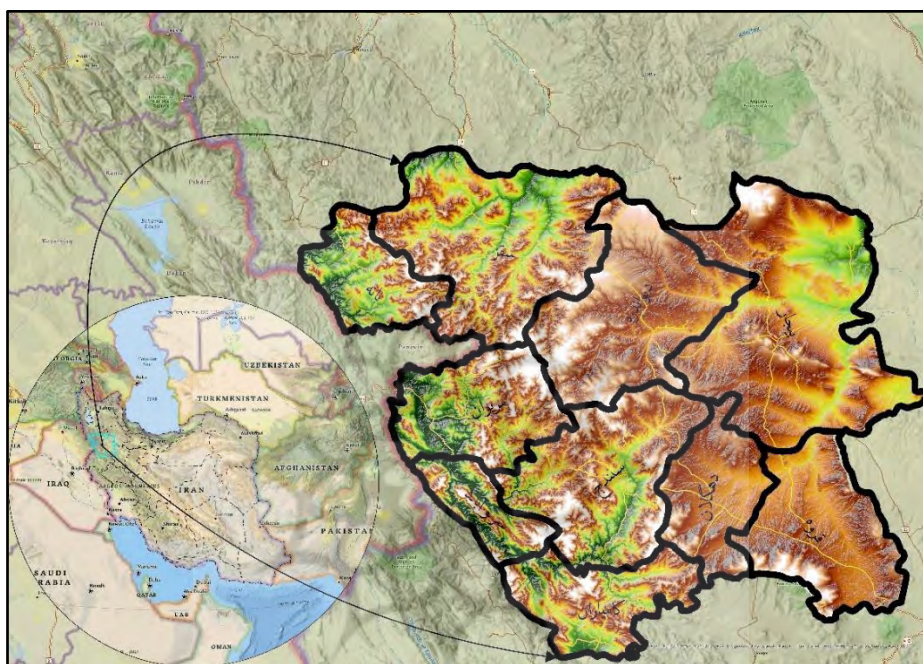
بررسی پیشینه پژوهش‌های مرتبط با تحلیل خشکسالی نشان می‌دهد که تاکنون مطالعات متعددی در زمینه استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی و تکنیک‌های سنجش از دور برای پایش خشکسالی در مناطق مختلف جهان و ایران انجام شده است. هرچند این تحقیقات اطلاعات ارزشمندی ارائه داده‌اند، اما شکاف‌های مهمی همچنان باقی مانده‌اند که پژوهش حاضر به دنبال پر کردن آن‌هاست. بسیاری از پژوهش‌ها به بررسی خشکسالی در مناطق خاصی از ایران مانند استان اصفهان، خراسان رضوی و حوضه آبریز دریاچه ارومیه پرداخته‌اند، اما تاکنون مطالعات جامع و کاملی برای بررسی خشکسالی در استان کردستان با استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور و شاخص‌های پوشش گیاهی انجام نشده است. پژوهش‌های قبلی عمدتاً دوره‌های زمانی محدودی را مورد بررسی قرار داده‌اند، در حالی که مطالعه طولانی‌مدت تغییرات خشکسالی می‌تواند به درک بهتر روندهای بلندمدت و تأثیرات آن‌ها بر منابع آب و کشاورزی کمک کند. پژوهش حاضر با پوشش بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ به دنبال ارائه تحلیل‌های جامع‌تری است. اگرچه شاخص‌های متعددی برای پایش خشکسالی استفاده شده‌اند، برخی شاخص‌ها مانند EVI کمتر در مطالعات داخلی مورد توجه قرار گرفته‌اند. این پژوهش با استفاده همزمان از شاخص‌های VCI، EVI و NDVI به دنبال ارائه تحلیل جامع‌تری از وضعیت خشکسالی است. بسیاری از مطالعات به استفاده از شاخص‌های منفرد پرداخته‌اند، در حالی که ترکیب شاخص‌ها می‌تواند به بهبود دقت و صحت نتایج منجر شود. پژوهش حاضر با بهره‌گیری از ترکیب شاخص‌های مختلف، رویکردی نوین در تحلیل خشکسالی ارائه می‌کند.

روش‌شناسی پژوهش

محدوده مورد مطالعه

استان کردستان در قسمت غربی کشور و طول شرقی ۴۵ درجه و ۳۴ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۱۴ دقیقه و عرض شمالی ۳۴ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۲۸ دقیقه قرار گرفته و از لحاظ مشخصات طبیعی و تقسیمات کشوری، استان کردستان با وسعت ۲۹۱۳۷ کیلومتر مربع بعد از

استان آذربایجان غربی سیزدهمین استان از لحاظ وسعت می باشد (شکل ۱). براساس آخرین سرشماری عمومی نفوس و مسکن در آبان ۱۳۹۵ جمعیت استان برابر با ۱۶۰۳۰۱۱ نفر بوده که ۵۰/۷ درصد مرد و ۴۹/۳ درصد زن بوده است. شهرستان‌های مریوان با ۶۸۷/۵ کیلومتر و قروه با ۲۱۱/۷ کیلومتر به ترتیب بیشترین و کمترین بارندگی سالانه را در بین نقاط دارای ایستگاه هواشناسی داشته‌اند. بر اساس اطلاعات ارائه شده توسط اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری، در سال ۱۴۰۱ مساحت جنگل‌های استان حدود ۳۷۲۳۰۷ هکتار و مراتع ۱۲۹۴۳۹۷ هکتار بوده است که از این میزان ۳۳/۸ درصد پوشش مراتع استان خوب، ۳۸/۲ درصد پوشش متوسط و ۲۸ درصد با پوشش فقیر است ضمن اینکه استان کردستان فاقد اراضی بیابانی است. بر اساس نتایج سرشماری عمومی کشاورزی در سال ۱۳۹۳ تعداد بهره‌برداران حدود ۱۱۴ هزار نفر بوده که ۹۹/۶ درصد آن‌ها حداقل به یکی از فعالیت‌های زراعت، باغداری، تولید گلخانه‌ای، پرورش دام و پرورش ماکیان مشغول بوده‌اند. همچنین بر اساس این نتایج، مساحت اراضی کشاورزی در سال ۱۳۹۳ حدود ۱۰۵۲ هزار هکتار بوده است که ۹۷/۳ درصد اراضی زراعی و مابقی معادل ۲/۷ درصد به باغ و قلمستان تعلق داشته است (سالنامه آماری استان کردستان، ۱۴۰۱).



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی استان کردستان

منبع: سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی استان کردستان، ۱۴۰۰

روش تحقیق

در این پژوهش، به منظور پایش خشکسالی و تحلیل تغییرات پوشش گیاهی در استان کردستان، از شاخص‌های پوشش گیاهی EVI، NDVI و VCI استفاده شد. این شاخص‌ها به دلیل حساسیت بالا به تغییرات پوشش گیاهی و توانایی در ارزیابی شرایط خشکسالی انتخاب شدند. داده‌های مورد استفاده در این پژوهش از محصول MOD09GA که توسط سنجنده MODIS تولید می‌شود، استخراج گردید. این محصول یکی از محصولات سطح ۲ سنجنده MODIS است که بازتاب سطحی را با تفکیک مکانی ۱ کیلومتر و تفکیک زمانی روزانه برای باندهای طیفی مختلف فراهم می‌کند. این داده‌ها پیش از انتشار توسط تیم‌های گردآورنده تحت تصحیحات رادیومتریک، اتمسفری و هندسی قرار گرفته‌اند تا بازتاب سطحی دقیق و معتبر از سطح زمین ارائه دهند. برای بررسی وضعیت پوشش گیاهی در طول دوره مطالعه، داده‌های MOD09GA مربوط به ماه اردیبهشت طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ از سامانه Google Earth Engine استخراج شد. این ماه به دلیل نمایانگر بودن فصل رشد گیاهان در منطقه مورد مطالعه انتخاب شده است. پس از دریافت داده‌های خام، شاخص‌های EVI، NDVI و VCI محاسبه شدند. این محاسبات در محیط Google Earth Engine با بهره‌گیری از زبان برنامه‌نویسی جاوااسکریپت انجام شده و نتایج به صورت لایه‌های اطلاعاتی برای تحلیل‌های بعدی ذخیره شدند. پس از محاسبه شاخص‌های پوشش گیاهی، داده‌ها به منظور طبقه‌بندی پوشش گیاهی به چهار کلاس (متراکم، متوسط، ضعیف و بدون پوشش) تقسیم‌بندی شدند. این طبقه‌بندی بر اساس آستانه‌های مشخصی از مقادیر شاخص‌ها انجام گرفت. سپس، نقشه‌های مربوط به توزیع طبقات پوشش گیاهی و شدت خشکسالی در هر سال با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS Pro ترسیم شدند. برای تحلیل تغییرات زمانی پوشش گیاهی و خشکسالی، روند تغییرات در مساحت هر طبقه پوشش گیاهی و

شدت خشکسالی در طول دوره مطالعه بررسی شد. همچنین، همبستگی بین تغییرات پوشش گیاهی متراکم و شدت خشکسالی با استفاده از روش‌های آماری در نرم‌افزار ArcGIS Pro محاسبه گردید تا ارتباطات معناداری بین این متغیرها شناسایی شود.

جدول ۱. خصوصیات محصول MOD09GA

ماهواره	نوع سنجنده	نوع محصول	قدرت تفکیک مکانی	قدرت تفکیک زمانی	کاربرد
Terra	MODIS	MOD09GA	۱ کیلومتر	۱ روزه	NDVI
Terra	MODIS	MOD09GA	۱ کیلومتر	۱ روزه	EVI
Terra	MODIS	MOD09GA	۱ کیلومتر	۱ روزه	VCI

منبع: مرور ادبیات و سوابق پژوهش، ۱۴۰۴

شاخص نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI)

این نمایه، برای اولین بار توسط تاکر^۱ (۱۹۷۹) به عنوان شاخصی برای سلامت پوشش گیاهی مطرح شد. در این شاخص، مقدار عددی هر پیکسل بین ۱+ و ۱- متغیر است. مقدار این شاخص برای مناطق دارای پوشش گیاهی تنک (۱/۰) تا متراکم (۸/۰) تغییر می‌کند (تنکابایل و همکاران، ۲۰۰۲؛ رضایی بنفشه و همکاران، ۱۳۹۴). مقدار این شاخص، طبق رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$\text{NDVI} = (\rho\text{NIR} - \rho\text{RED}) / (\rho\text{NIR} + \rho\text{RED}) \quad \text{رابطه (۱)}$$

در رابطه (۱) NIR، انعکاس نور در باند مادون قرمز و RED انعکاس نور در باند قرمز است.

شاخص بارز شده پوشش گیاهی (EVI)

شاخص گیاهی بارز شده، به منظور بهبود NDVI توسعه یافته است. این شاخص، علاوه بر باندهای مادون قرمز و قرمز، با بکارگیری باند آبی، موجب کاهش اثر اتمسفر شامل پراکنش ذرات معلق و تصحیح سیگنال خاک پس زمینه می‌شود. این شاخص از رابطه (۲) به‌دست می‌آید (هوت^۲، ۱۹۹۷). جدول (۲) طبقه‌بندی وضعیت خشکسالی بر اساس NDVI و EVI را نشان می‌دهد.

$$\text{EVI} = G \frac{(\rho\text{NIR} - \rho\text{RED})}{(L + \rho\text{NIR} + C_1\rho\text{RED} - C_2\rho\text{Blue})} \quad \text{رابطه (۲)}$$

در رابطه بالا $G=2.5$ ، $C_1=6$ ، $C_2=6$ ، $L=1$ است.

جدول ۲. طبقه‌بندی خشکسالی براساس شاخص NDVI و EVI

وضعیت خشکسالی	EVI و NDVI
بدون پوشش گیاهی	۰ تا ۰/۰۵
پوشش گیاهی ضعیف	۰/۰۵ تا ۰/۱
پوشش گیاهی متوسط	۰/۱ تا ۰/۶
پوشش گیاهی متراکم	۰/۶ تا ۱

منبع: مرور ادبیات و سوابق پژوهش، ۱۴۰۴

شاخص وضعیت پوشش گیاهی (VCI)

این شاخص، به وسیله دامنه‌های از مقادیر NDVI بلندمدت برآورد شده و نرمال می‌شود. دامنه این شاخص، از ۰ تا ۱۰۰ متغیر است. مقادیر کم، شرایط تنش گیاهی، مقادیر میانه شرایط متوسط و مقادیر بالا شرایط بهینه را نشان می‌دهد (دماوندی و همکاران، ۱۳۹۵). این شاخص، طبق رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

$$\text{VCI} = 100 = \frac{\text{NDVI}_i - \text{NDVI}_{\min}}{\text{NDVI}_{\max} - \text{NDVI}_{\min}} \quad \text{رابطه (۳)}$$

$\text{NDVI}_{\min}$ و $\text{NDVI}_{\max}$ ، به ترتیب میانگین حداکثر بلندمدت و میانگین حداقل بلندمدت، مقدار NDVI_i مقدار NDVI در گام زمانی i برای هر پیکسل است. جدول (۳) طبقه‌بندی وضعیت خشکسالی براساس شاخص VCI را نشان می‌دهد.

جدول ۳. طبقه‌بندی خشکسالی براساس شاخص VCI

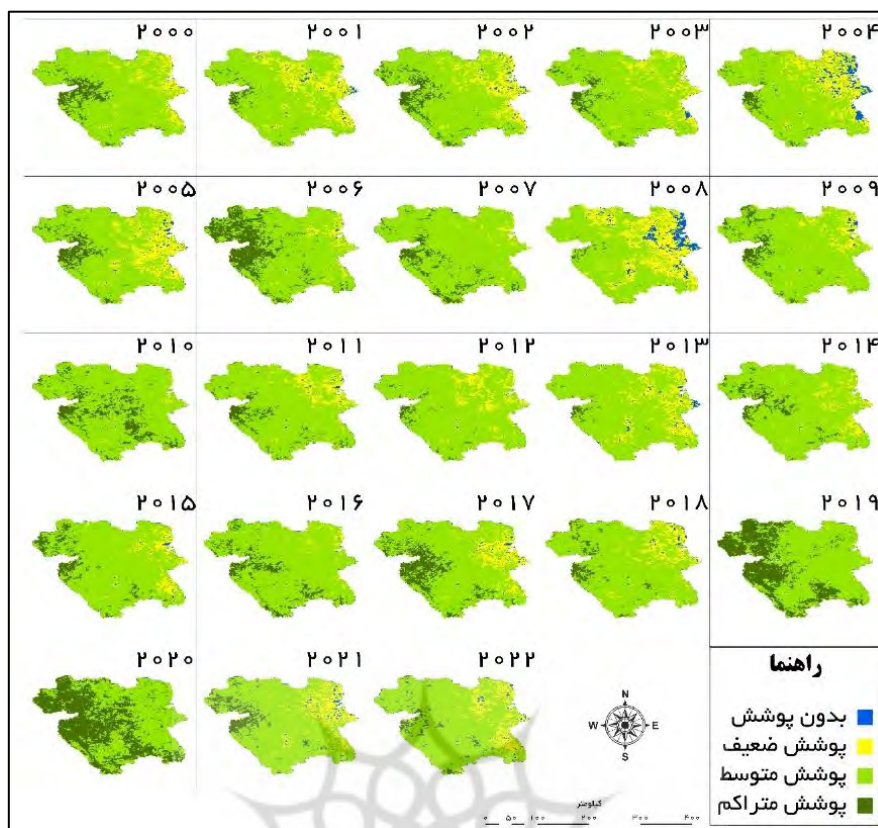
VCI	وضعیت خشکسالی
کمتر از ۱۰	خشکسالی بسیار شدید
۱۰ تا ۲۰	خشکسالی شدید
۲۰ تا ۳۰	خشکسالی متوسط
۳۰ تا ۴۰	خشکسالی نرمال
بیشتر از ۴۰	بدون خشکسالی

منبع: مرور ادبیات و سوابق پژوهش، ۱۴۰۴

یافته‌ها و بحث

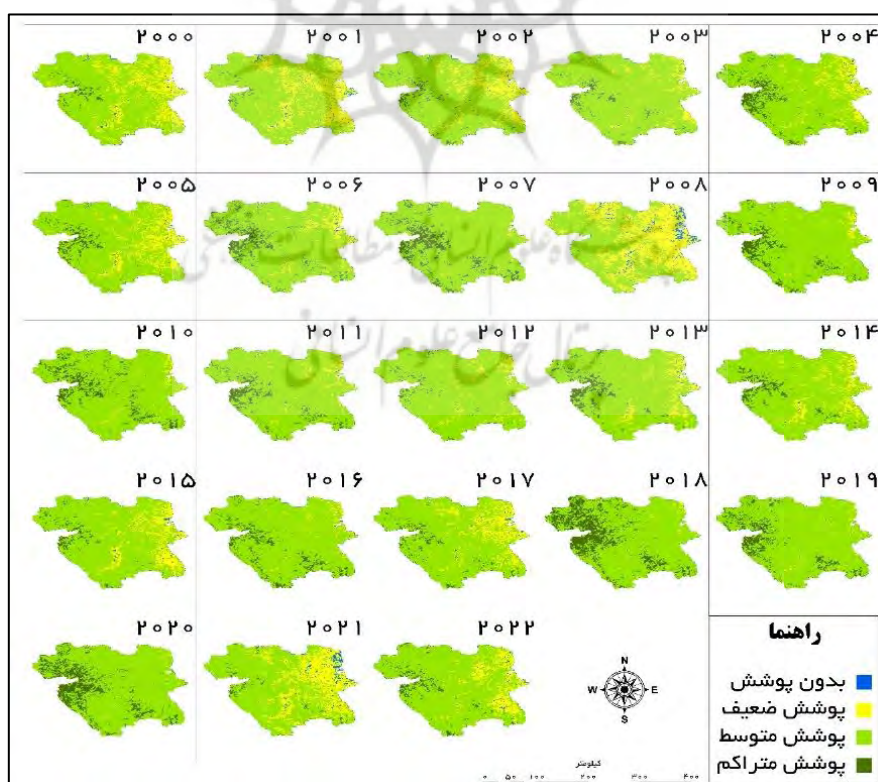
با توجه به اینکه اوج پوشش گیاهی سبز مربوط به اواخر اردیبهشت ماه است، تصاویر ماه می از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ جهت محاسبه شاخص‌های VCI، EVI و NDVI انتخاب شدند. بعد از محاسبه شاخص‌های مذکور برای کل دوره آماری، به دلیل تغییرات نامحسوس پوشش گیاهی در سال‌های مختلف، از بین سال‌های آماری مورد مطالعه تنها سال‌های ۲۰۰۴، ۲۰۰۸، ۲۰۱۲، ۲۰۱۶، ۲۰۲۰ و ۲۰۲۲ که بیشترین تغییرات را نشان دادند، در قسمت نتایج، مورد بررسی و تفسیر قرار گرفت. بعد از محاسبه شاخص NDVI و EVI، تغییرات پوشش گیاهی در چهار کلاس پوشش گیاهی متراکم، متوسط، ضعیف و بدون پوشش گیاهی دسته‌بندی و مورد بررسی قرار گرفت. بررسی نقشه طبقات پوشش گیاهی براساس NDVI و EVI نشان داد در طی دوره آماری مورد مطالعه، در کلاس‌های مختلف پوشش گیاهی تغییرات زیادی رخ داده است. در سال ۲۰۰۴، کلاس پوشش گیاهی متراکم براساس شاخص NDVI و EVI به ترتیب ۳/۲۵ و ۶/۸۶ درصد، کلاس پوشش گیاهی متوسط ۸۷/۲۵ و ۸۱/۷۴ درصد و مساحت کلاس پوشش گیاهی ضعیف ۱۹/۱۹ و ۱۱/۰۱ درصد را به خود اختصاص داده است. در سال ۲۰۰۷، براساس هر دو شاخص، سطح کلاس پوشش گیاهی متراکم به ترتیب ۸/۲۰ و ۱۱/۱۱ درصد و سطح کلاس پوشش گیاهی متوسط به ترتیب ۸۸/۸۷ و ۸۷/۲۵ درصد و مساحت کلاس پوشش گیاهی ضعیف ۲/۹۵ و ۱/۶۸ درصد بوده است. در سال ۲۰۱۲، براساس دو شاخص NDVI و EVI کلاس پوشش گیاهی متراکم به ترتیب ۲/۲۷ و ۱/۷۵ درصد، کلاس پوشش گیاهی متوسط به ترتیب ۸۸/۳۵ و ۹۱/۵۴ درصد و کلاس پوشش گیاهی ضعیف ۹/۲۸ و ۶/۶۷ درصد از کل حوضه را دربر گرفته است. در سال ۲۰۱۶، براساس هر دو شاخص، سطح کلاس پوشش گیاهی متراکم به ترتیب ۹/۹۰ و ۶/۶۲ درصد، کلاس پوشش گیاهی متوسط ۸۷/۲ و ۸۹/۶۹ درصد و کلاس پوشش گیاهی ضعیف ۲/۸۵ و ۳/۶۴ درصد بوده است. در سال ۲۰۲۰، کلاس پوشش گیاهی متراکم براساس دو شاخص NDVI و EVI، به ترتیب ۴۵/۴۳ و ۱۵/۰۳ درصد، کلاس پوشش گیاهی متوسط به ترتیب ۸۴/۴ و ۸۳/۵ درصد و کلاس پوشش گیاهی ضعیف ۰/۲ و ۱/۱۲ درصد را به خود اختصاص داده است. در نهایت در سال ۲۰۲۲ براساس دو شاخص، به ترتیب کلاس پوشش گیاهی متراکم ۴/۷ و ۳/۸۶ درصد، کلاس پوشش گیاهی متوسط ۸۳ و ۸۲/۲۳ درصد و کلاس پوشش گیاهی ضعیف ۱۱/۳۲ و ۱۳/۰۷ درصد از مساحت کل حوضه را در بر گرفته است.

بعد از اعمال شاخص VCI جهت ارزیابی، نقشه‌ها به طبقات خشکسالی بسیار شدید، خشکسالی شدید، خشکسالی متوسط، خشکسالی نرمال و بدون خشکسالی تقسیم شدند. در سال ۲۰۰۴، کلاس خشکسالی شدید، متوسط، نرمال و بدون خشکسالی به ترتیب، ۰/۰۰۵، ۱/۰۱، ۸۰/۹۳ و ۱۸/۰۹ درصد از مساحت کل حوضه را به خود اختصاص داده است. در سال ۲۰۰۷، خشکسالی شدیدی تجربه نشده است و مساحت کلاس خشکسالی متوسط، نرمال و بدون خشکسالی به ترتیب ۰/۲۶، ۴۷/۴۶، ۵۲/۳۱ درصد بوده است. در سال ۲۰۱۲، کلاس خشکسالی متوسط، نرمال و بدون خشکسالی به ترتیب ۱/۱۷، ۳۲/۱، ۶۷/۷۵ درصد از مساحت کل حوضه را در بر گرفته است. در سال ۲۰۱۶، کلاس خشکسالی متوسط، نرمال و بدون خشکسالی به ترتیب، ۰/۱۴، ۴۲/۷، ۵۷/۱۸ درصد بوده است. در سال ۲۰۲۰، کلاس خشکسالی متوسط، نرمال و بدون خشکسالی به ترتیب، ۰/۰۶، ۴/۴۴، ۹۵/۴۳ درصد از کل مساحت حوضه را به خود اختصاص داده است. در نهایت در سال ۲۰۲۲، مساحت چهار کلاس خشکسالی شدید، متوسط، نرمال و بدون خشکسالی به ترتیب، ۰/۰۰۲، ۱/۰۴، ۵۱/۴ و ۴۷/۶ درصد بوده است (شکل ۲، ۳، ۴ و ۵).



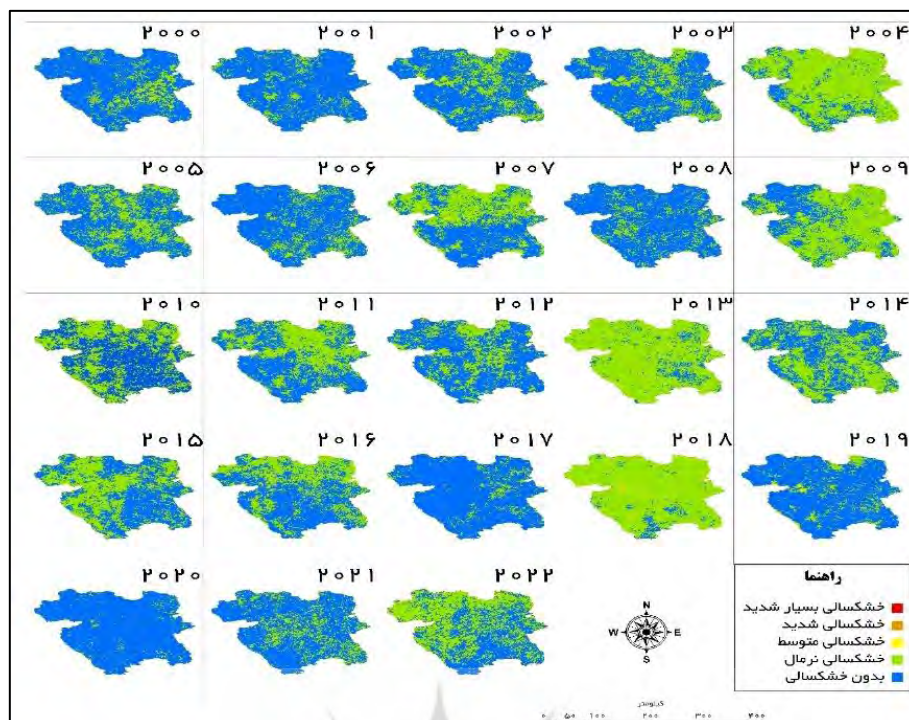
شکل ۲. طبقات پوشش گیاهی براساس شاخص NDVI در دوره آماری ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲

منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴



شکل ۳. طبقات پوشش گیاهی براساس شاخص EVI در دوره آماری ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲

منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴



شکل ۴. طبقات خشکسالی براساس شاخص VCI در دوره آماری ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲

منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴

جدول ۴. مساحت طبقات پوشش گیاهی براساس شاخص NDVI در استان کردستان

سال / طبقه	پوشش گیاهی متراکم (%)	پوشش گیاهی متوسط (%)	پوشش گیاهی ضعیف (%)	بدون پوشش گیاهی (%)
۲۰۰۴	۳/۲۵	۷۲/۲۵	۱۹/۱۹	۵/۴۲
۲۰۰۷	۸/۲۰	۸۸/۸۷	۲/۹۵	۰/۱۲
۲۰۱۲	۲/۲۷	۸۸/۳۵	۹/۲۸	۰/۲۲
۲۰۱۶	۹/۹۰	۸۷/۲۰	۲/۸۵	۰/۱۸
۲۰۲۰	۴۵/۴۳	۵۴/۴	۰/۲	۰/۰۴
۲۰۲۲	۴/۷	۸۳/۰۰	۱۱/۳۳	۱/۱۰

منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴

جدول ۵. مساحت طبقات پوشش گیاهی براساس شاخص EVI در استان کردستان

سال / طبقه	پوشش گیاهی متراکم (%)	پوشش گیاهی متوسط (%)	پوشش گیاهی ضعیف (%)	بدون پوشش گیاهی (%)
۲۰۰۴	۶/۸۶	۸۱/۷۴	۱۱/۰۱	۰/۵
۲۰۰۷	۱۱/۱۱	۸۷/۲۵	۱/۶۸	۰/۱۱
۲۰۱۲	۱/۷۵	۹۱/۵۴	۶/۶۷	۰/۱۸
۲۰۱۶	۶/۶۲	۸۹/۶۹	۳/۶۴	۰/۱۸
۲۰۲۰	۱۵/۰۳	۸۳/۵۰	۱/۱۲	۰/۱۵
۲۰۲۲	۳/۸۶	۸۲/۲۳	۱۳/۰۷	۰/۶۵

منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴

جدول ۶. مساحت طبقات خشکسالی براساس شاخص VCI در استان کردستان

سال / طبقه	خشکسالی بسیار شدید (%)	خشکسالی شدید (%)	خشکسالی متوسط (%)	خشکسالی نرمال (%)	بدون خشکسالی (%)
۲۰۰۴	-	۰/۰۰۵	۱/۰۱	۸۰/۹۳	۱۸/۰۹
۲۰۰۷	-	-	۰/۲۶	۴۷/۴۶	۵۲/۳۱
۲۰۱۲	-	-	۱/۱۷	۳۲/۱۰	۶۷/۷۵
۲۰۱۶	-	-	۰/۱۴	۴۲/۷	۵۷/۱۸
۲۰۲۰	-	-	۰/۰۶	۴/۴۴	۹۵/۴۳
۲۰۲۲	-	۰/۰۰۲	۱/۰۴	۵۱/۴۰	۴۷/۶۰

منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴

بررسی رابطه بین شاخص‌های NDVI و EVI با شاخص VCI

رابطه همبستگی پیرسون، بین میانگین شاخص پوشش گیاهی NDVI و EVI با میانگین شاخص خشکسالی VCI به ترتیب ۰/۵۱۵ و ۰/۴۶۰ است که هر دو شاخص پوشش گیاهی با شاخص VCI در سطح یک درصد، معنی‌دار هستند (جدول ۷).

جدول ۷. نتایج حاصل از همبستگی پیرسون بین شاخص‌ها

متغیرها	ضریب همبستگی (R)
VCI و NDVI	۰/۵۱۵
VCI و EVI	۰/۴۶۰

منبع: یافته‌های پژوهش، ۱۴۰۴

نتیجه‌گیری

در این تحقیق، وضعیت خشکسالی براساس شاخص‌های VCI، EVI و NDVI طی دوره آماری ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲، در استان کردستان بررسی و تجزیه و تحلیل شد. نتایج حاصل از شاخص‌های پوشش گیاهی نشان داد که در طول بازه زمانی مورد مطالعه، تغییرات قابل توجهی در توزیع طبقات پوشش گیاهی (متراکم، متوسط، ضعیف و بدون پوشش گیاهی) مشاهده شده است. در سال ۲۰۲۰، بیشترین مساحت تحت پوشش کلاس پوشش گیاهی متراکم (۴۵/۴۳ درصد) و کمترین مساحت تحت پوشش پوشش گیاهی ضعیف (۰/۲ درصد) مشاهده شده است. در مقابل، در سال ۲۰۰۴، کمترین مساحت تحت پوشش پوشش گیاهی متراکم (۳/۲۵ درصد) و بیشترین مساحت تحت پوشش پوشش گیاهی ضعیف (۱۹/۱۹ درصد) بوده است. همچنین از دید خشکسالی، در طول دوره‌ی مورد بررسی، خشکسالی با شدت‌های مختلف رخ داده است. سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۱۲ با کمترین میزان خشکسالی (به ترتیب ۹۵/۴۳ و ۶۷/۷۵ درصد مساحت بدون خشکسالی) و سال‌های ۲۰۰۴ و ۲۰۲۲ با بیشترین میزان خشکسالی (به ترتیب ۱۸/۰۹ و ۴۷/۶۰ درصد مساحت بدون خشکسالی) مواجه بوده‌اند. همبستگی معنی‌داری بین پوشش گیاهی متراکم و کاهش شدت خشکسالی مشاهده شده است به‌طوری‌که، سال‌هایی که بیشترین مساحت پوشش گیاهی متراکم را داشته‌اند (مانند سال ۲۰۲۰)، کمترین میزان خشکسالی را نیز تجربه کرده‌اند و در سال‌هایی که مساحت پوشش گیاهی ضعیف افزایش یافته است (مانند ۲۰۰۴)، شاهد افزایش شدت خشکسالی نیز بوده‌ایم.

نتایج این تحقیق با نتایج پژوهش میرموسوی و کریمی (۱۳۹۲) در مورد همبستگی بین پوشش گیاهی و خشکسالی و همچنین تأثیر خشکسالی بر پوشش گیاهی در استان کردستان، با یکدیگر هم‌سو هستند. هر دو مطالعه شواهدی را ارائه می‌دهند که نشان می‌دهد پوشش گیاهی سالم می‌تواند به عنوان یک مانع در برابر خشکسالی عمل کند و خشکسالی می‌تواند منجر به تخریب پوشش گیاهی شود. با توجه به نتایج حاصل شده می‌توان چنین پیشنهاد داد که تلفیق داده‌های سنجش از دور با داده‌های میدانی مانند آمار برداشت محصولات کشاورزی، می‌تواند دقت تحلیل خشکسالی را افزایش دهد. همچنین می‌توان با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین و هوش مصنوعی، مدل‌های پیش‌بینی خشکسالی با دقت بالا برای استان کردستان توسعه داد. علاوه بر موارد مذکور با استفاده از نتایج این پژوهش، می‌توان سامانه‌های هشدار خشکسالی برای استان کردستان را توسعه داد تا کشاورزان و متولیان امر از وقوع خشکسالی و شدت آن آگاه شوند. در نهایت می‌توان از نتایج این پژوهش برای برنامه‌ریزی و مدیریت بهینه منابع آب در بخش کشاورزی، به ویژه در سال‌های خشکسالی استفاده کرد. همچنین در ادامه، چندین موضوع پژوهشی برای آینده نیز پیشنهاد شده است: تأثیر تغییرات اقلیمی بر پوشش گیاهی و فعالیت‌های کشاورزی در استان کردستان با استفاده از شاخص‌های سنجش از دور؛ استفاده از تکنیک‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی خشکسالی در

استان کردستان؛ ارزیابی تأثیرات اقتصادی خشکسالی بر کشاورزی و معیشت جوامع روستایی در استان کردستان؛ بررسی کارایی روش‌های مختلف مدیریت منابع آب در کاهش اثرات خشکسالی در استان کردستان؛ و بررسی عوامل اجتماعی و اقتصادی مؤثر بر آسیب‌پذیری جوامع روستایی در برابر خشکسالی در استان کردستان.

حامی مالی

بنا به اظهار نویسنده مسئول، این مقاله حامی مالی نداشته است.

سهم نویسندگان در پژوهش

نویسنده اول: گردآوری داده‌ها، محاسبه و تحلیل شاخص‌های پوشش گیاهی، نگارش پیش‌نویس مقاله
نویسنده دوم: نظارت علمی بر فرآیند پژوهش، ویرایش نهایی مقاله

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از تمامی افرادی که در گردآوری داده‌های مورد نیاز با آن‌ها همکاری کرده‌اند، صمیمانه تشکر و قدردانی می‌نمایند.

منابع

۱. خوش اخلاق، فرامرز (۱۳۸۷). تحقیق در خشکسالی‌های فراگیر ایران با استفاده از تحلیل سینوپتیکی، رساله دوره دکتری، جغرافیای طبیعی دانشگاه تبریز.
۲. رهنما، سمیرا؛ شهیدی، علی؛ یعقوب‌زاده، مصطفی و مهران، علی اکبر (۱۴۰۱). تعیین وضعیت خشکسالی با استفاده از شاخص‌های سنجش از دور و خشکسالی هواشناسی و کشاورزی در مناطق با اقلیم مختلف. تحقیقات آب و خاک ایران، ۵۳(۱۰)، ۲۳۸۳-۲۳۹۸.
<https://doi.org/10.22059/ijswr.2022.348275.669352>
۳. سالنامه آماری استان کردستان (۱۴۰۱). سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی کردستان، معاونت آمار و اطلاعات.
۴. سبحانی، بهروز؛ جعفرزاده علی آباد، لیلا و صفریان زنگیر، وحید (۱۳۹۸). مدل‌سازی، تحلیل و پیش‌بینی پدیده‌ی خشکسالی در ایران. هیدروژئومورفولوژی، ۶(۲۱)، ۱۸۱-۲۰۲.
<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23833254.1398.6.21.9.4>
۵. سعیدیان، حمزه (۱۴۰۱). مروری جامع بر شاخص‌های کاربردی خشکسالی. مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز، ۲(۳)، ۳۰-۱.
<https://doi.org/10.22034/iwm.2022.559192.1039>
۶. سلطانی، میلاد؛ سلطانی، عادل؛ کله‌هوئی، مهین و سلیمانی، کریم (۱۳۹۸). پایش خشکسالی منطقه‌ای با استفاده از تصاویر لندست - منطقه مورد مطالعه: شهرستان کرمانشاه. فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی «سپهر»، ۲۸(۱۰۹)، ۱۳۷-۱۴۶.
<https://doi.org/10.22131/sepehr.2019.35643>
۷. سلیمانی، کریم؛ درویشی، شادمان و شکران، فاطمه (۱۳۹۸). تحلیل خشکسالی کشاورزی با استفاده از شاخص‌های سنجش از دور (مطالعه موردی: شهرستان مریوان). سنجش از دور و سامانه اطلاعات جغرافیایی در منابع طبیعی، ۲(۱۰)، ۳۳-۱۵.
<https://dorl.net/dor/http://dorl.net/dor/20.1001.1.26767082.1398.10.2.2.1>
۸. سلیمی‌فرد، مژده؛ ثنایی نژاد، سیدحسین؛ سپهر، عادل و ثابت دیزاوندی، لیلا (۱۳۹۷). پایش خشکسالی بر اساس شاخص ماهواره‌ای (SDI) و داده‌های سنجنده TRMM (مطالعه موردی: استان خراسان رضوی)، نشریه نیوار، ۴۲(۱۰۲)، ۱۹-۳۰.
<https://doi.org/10.30467/nivar.2018.125918.1085>
۹. سواری، مسلم؛ فمی حسین، شعبانعلی؛ ایروانی، هوشنگ و اسدی، علی (۱۳۹۸). مدل‌سازی اثرات خشکسالی بر معیشت پایدار کشاورزان کوچک مقیاس در سکونتگاه‌های روستایی استان کردستان. تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۶(۲)، ۱۱۱-۱۲۸.
<http://dx.doi.org/10.29252/jsaeh.6.2.111>
۱۰. طالبی، محمدصادق و موسوی بفرویی، مهناز (۱۳۸۹). ارزیابی پهنه‌بندی و پایش خشکسالی با استفاده از شاخص‌های معتبر مطالعه موردی استان کرمان، اولین کنفرانس بین‌المللی مدل‌سازی گیاه، آب، خاک و هوا، کرمان.
<https://civilica.com/doc/97456>
۱۱. فاضل دهکردی، لیلا؛ سهرابی، طیبه السادات؛ قنایزباف، محمد حسین و قضاوی، رضا (۱۳۹۵). پایش خشکسالی با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس (MODIS) در مناطق خشک مطالعه موردی مراتع استان اصفهان. جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، ۲۷(۳)، ۱۷۷-۱۹۰.
<https://doi.org/10.22108/gep.2017.98067>

۱۲. کاظم پور چورسی، سیما؛ عرفانیان، مهدی، و عبادی نهاری، زهرا (۱۳۹۸). ارزیابی داده های ماهواره‌ای MODIS و TRMM در پایش خشکسالی حوضه آبریز دریاچه ارومیه. *جغرافیا و برنامه ریزی محیطی*، ۳۰(۷۴)، ۱۷-۳۳.
<https://doi.org/10.22108/gep.2019.115381.1115>
۱۳. محیط اصفهانی، پوریا؛ سلطانی، سعید؛ مدرس، رضا و پورمنافی، سعید (۱۳۹۹). ارزیابی شاخص خشکسالی چندمتغیره MSDI و پایش خشکسالی هواشناسی - کشاورزی در استان چهارمحال و بختیاری. *علوم آب و خاک*، ۲۴ (۳)، ۳۳-۴۷.
<http://dx.doi.org/10.47176/jwss.24.3.42111>
۱۴. معدنچی، پیمان؛ شاهی، کاکا؛ حبیب نژاد، محمود؛ سلیمانی، کریم و فاتحی مرج، احمد (۱۳۹۸). پهنه‌بندی خشکسالی‌های اقلیمی و بزرگی خشکسالی با استفاده از شاخص SPI و روش زمین آمار کریجینگ (مطالعه موردی: استان کرمان). *مهندسی آبیاری و آب/ایران*، ۱۰(۲)، ۲۰۵-۲۲۸.
<https://doi.org/10.22125/iwe.2019.100753>
۱۵. میرموسوی، سیدحسین و کریمی، حمیده (۱۳۹۲). مطالعه‌ی اثر خشکسالی بر روی پوشش گیاهی با استفاده از تصاویر سنجنده‌ی MODIS مورد: استان کردستان. *جغرافیا و توسعه*، ۱۱(۳۱)، ۵۷-۷۶.
<https://doi.org/10.22111/gdij.2013.794>
16. Burnet, A. W. (1993). Size variations and long wave circulation within the January Northern Hemisphere circumpolar vortex 1946–80. *Journal of Climate*, 6(10), 1914-1920. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1993\)006%3C1914:SVALWC%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1993)006%3C1914:SVALWC%3E2.0.CO;2)
17. Du, L., Tian, Q., Yu, T., Meng, Q., Jancso, T., Udvardy, P., & Huang, Y. (2013). A comprehensive drought monitoring method integrating MODIS and TRMM data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 23, 245–253. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.09.010>
18. Hagman, G. (1984). *Prevention better than cure: Report on human and natural disasters in the Third World*. Swedish Red Cross, Stockholm, Sweden. <https://kohahq.searo.who.int/bib/1479>
19. Himanshu, S. K., Singh, G., & Kharola, N. (2015). Monitoring of drought using satellite data. *International Research Journal of Earth Sciences*, 3(1), 66–72.
https://www.researchgate.net/publication/281208345_Monitoring_of_Drought_using_Satellite_Data
20. Huete, A. R., Liu, H., Batchily, Q. K., & Van Leeuwen, W. J. D. A. (1997). A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 59, 440–451.
[https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(96\)00112-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00112-5)
21. Kogan, F. N. (1997). Global drought watch from space. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78, 621–636. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078<0621:GDWFS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<0621:GDWFS>2.0.CO;2)
22. Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391, 202–216.
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.012>
23. Shakya, N., & Yamaguchi, Y. (2006). Drought monitoring using vegetation and LST in Nepal and Northeastern India. *Proceedings of the Conference of the Remote Sensing Society of Japan*, 203–204.
<https://doi.org/10.1080/01431160902902617>
24. Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127–1500. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0)
25. Wilhite, D. A. (2000). *Drought: A global assessment* (Vol. 2). Routledge.
26. Wilhite, D. A., & Glantz, M. H. (1985). Understanding the drought phenomenon: The role of definitions. *Water International*, 10(3), 111–120. <https://doi.org/10.1080/02508068508686328>