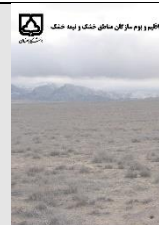




Semnan University

Climate and Ecosystem of Arid and Semi-arid Regions

<https://ceasr.semnan.ac.ir>



Research Article

Application of Normalized Difference Drought Index Based on MODIS for Monitoring Vegetation Drought in Karkheh Basin

Mahshid Karimi^{a,*}, Navid Dehghani^b, Massoud Goodarzi^c, Mosayeb Heshmati^d

^a Researcher, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Kermanshah Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Kermanshah, Iran,

^b Assistant Prof., Watershed Management Department, Soil Conservation & Watershed Management Research Institute (SCWMRI), AREEO, Tehran, Iran.

^c Associate Professor, Department of Drought and Climate Change, Soil Conservation & Watershed Management Research Institute (SCWMRI), AREEO, Tehran, Iran.

^d Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Kermanshah Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Kermanshah, Iran.

ARTICLE INFO

Article type:

Research Full Paper

Article history:

Received: 23 Desember 2025

Revised: 4 January 2026

Accepted: 4 April 2026

Keywords:

Agricultural drought,
Normalized difference
drought index (NDDI),
MODIS sensor,
Remote sensing,
Accuracy evaluation criteria.

EXTENDED ABSTRACT

Background and Objectives: Drought is one of the most significant climatic hazards affecting water resources, vegetation cover, and agricultural production, particularly in arid and semi-arid regions. The Karkheh River Basin, as one of Iran's most important agricultural basins, plays a crucial role in food security and regional socio-economic stability. Due to its large area and pronounced climatic variability, this basin is highly vulnerable to drought events. Conventional drought monitoring methods based on ground observations are often limited by sparse station networks and insufficient spatial coverage. Therefore, remote sensing-based approaches and composite vegetation indices provide an effective alternative for spatiotemporal drought monitoring. The main objective of this research is to monitor spatial and temporal drought in the Karkheh basin using the NDDI composite index and evaluate its capability as a diagnostic tool for agricultural drought monitoring and providing early warnings. This approach, by providing a quantitative framework for analyzing drought processes, can contribute to improved water resources management and development of climate change adaptation strategies in the country.

Materials and Methods: MODIS sensor images with a spatial resolution of 500 m acquired in May (peak vegetation growth period) were used to calculate NDVI, NDWI, and subsequently the NDDI. Drought conditions were classified into five categories: no drought, mild, moderate, severe, and extreme drought. Ground-based precipitation data from 11 selected meteorological stations were quality-controlled and homogenized prior to analysis. SPI values were calculated at different time scales to validate the satellite-derived NDDI. The accuracy of NDDI was assessed using statistical error metrics, including Root Mean Square Error (RMSE) and Mean Absolute Error (MAE).

Results: The results demonstrated that NDDI effectively captured the spatial and temporal patterns of agricultural drought in the Karkheh River Basin. Approximately 85.3%, 89.9%, and 74.8% of the basin area experienced varying degrees of drought in 2007, 2008, and 2014, respectively. The most severe drought conditions were observed in 2008, when more than 78% of the

* Corresponding author: karimi.mahshid88@gmail.com

basin was classified as moderate to extreme drought. Validation results indicated a strong agreement between NDDI and SPI, particularly at the one-month time scale, with minimum RMSE and MAE values of 0.11 and 0.12, respectively.

Conclusion: Given the importance of Karkheh watershed in terms of climatic, social, and economic conditions, accurate monitoring and assessment of drought in this basin is very important. In this regard, the present study used the NDDI composite index to monitor the spatial and temporal extent of agricultural drought during the 2001-2021 statistical period. The results showed that about 85.3%, 89.9% and 74.8% of the basin area were affected by drought in 2007, 2008 and 2014, respectively. Also, the results of the accuracy assessment criteria including RMSE and MAE indicate the high efficiency of these indicators in the region. Beyond drought mapping, this study emphasizes the role of NDDI index as a diagnostic and early warning tool to investigate the interaction of vegetation and water and its impact on agricultural resilience. The combined use of NDVI and NDWI indices and creation of NDDI allow tracking ecosystem responses to moisture deficiency at different temporal and spatial scales. However, limitations such as land use changes, vegetation density, and seasonal conditions can affect the accuracy of the index. Therefore, combining NDDI with ground data and climate indicators can increase the accuracy of drought monitoring and help in better decision-making.

Cite this article: Karimi, M., Dehghani, N., Goodarzi, M. and Heshmati, M. (2026). Application of normalized difference drought index based on MODIS for monitoring vegetation drought in Karkheh Basin. *Climate and Ecosystem of Arid and Semi-arid Regions*, 3(1), 33-48.

© 2026 Published by Semnan University Press.
DOI: <https://doi.org/10.22075/ceasr.2026.40142.1064>

مقاله پژوهشی

کاربرد شاخص خشکسالی تفاضلی نرمال شده مبتنی بر MODIS برای پایش خشکسالی پوشش گیاهی در حوضه کرخه

مهشید کریمی^{۱*}، نوید دهقانی^۲، مسعود گودرزی^۳، مسیب حشمتی^۴

- ۱- دانش آموخته دکتری، علوم و مهندسی آبخیزداری، بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمانشاه، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرمانشاه، ایران.
 - ۲- استادیار، گروه مدیریت حوضه‌های آبخیز، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.
 - ۳- دانشیار، گروه خشکسالی و تغییرات اقلیم، پژوهشکده حفاظت خاک و آبخیزداری، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، تهران، ایران.
 - ۴- استاد، بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان کرمانشاه، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، کرمانشاه، ایران.
- *: نویسنده مسئول، karimi.mahshid88@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله کامل علمی- پژوهشی	سابقه و هدف: خشکسالی به عنوان یکی از مهم ترین مخاطرات اقلیمی، تأثیرات گسترده‌ای بر منابع آب، پوشش گیاهی و تولیدات کشاورزی برجای می‌گذارد و پایش دقیق آن به ویژه در حوضه‌های آبخیز مهم کشور، نقش اساسی در مدیریت منابع طبیعی دارد. حوضه آبخیز کرخه به دلیل وسعت زیاد، تنوع اقلیمی و جایگاه راهبردی در کشاورزی و تأمین امنیت غذایی غرب کشور، همواره در معرض اثرات شدید خشکسالی قرار داشته است. روش‌های متداول مبتنی بر داده‌های زمینی به دلیل پراکنش محدود ایستگاه‌ها، توانایی کافی برای پایش مکانی خشکسالی را ندارند. در این راستا، استفاده از داده‌های سنجش از دور و شاخص‌های ترکیبی می‌تواند ابزار کارآمدی برای پایش خشکسالی کشاورزی باشد. هدف اصلی این پژوهش، پایش مکانی و زمانی خشکسالی در حوضه آبخیز کرخه با استفاده از شاخص ترکیبی NDDI و ارزیابی قابلیت آن به عنوان یک ابزار تشخیصی برای پایش خشکسالی کشاورزی و ارائه هشدارهای زودهنگام است. این رویکرد با ارائه یک چارچوب کمی برای تحلیل فرآیندهای خشکسالی، به بهبود مدیریت منابع آب و توسعه استراتژی‌های سازگاری با تغییرات اقلیمی در کشور کمک خواهد کرد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۰۲	مواد و روش‌ها: در این پژوهش از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده MODIS با تفکیک مکانی ۵۰۰ متر مربوط به ماه اردیبهشت (دوره اوج رشد پوشش گیاهی) استفاده شد. شاخص NDDI از ترکیب شاخص‌های NDVI و NDWI محاسبه و وضعیت خشکسالی در پنج طبقه بدون خشکسالی، خفیف، متوسط، شدید و خیلی شدید طبقه‌بندی گردید. به منظور صحت‌سنجی نتایج، داده‌های بارندگی ۱۱ ایستگاه منتخب در حوضه آبخیز کرخه پس از کنترل کیفی و همگن‌سازی مورد استفاده قرار گرفت و شاخص SPI در مقیاس‌های زمانی مختلف محاسبه شد. ارزیابی عملکرد شاخص NDDI با استفاده از معیارهای آماری ریشه دوم میانگین مربعات خطا (RMSE) و درصد میانگین خطای مطلق (MAE) انجام گرفت.
تاریخ ویرایش: ۱۴۰۴/۱۰/۱۴	یافته‌ها: نتایج نشان داد که شاخص NDDI توانایی بالایی در شناسایی شدت و توزیع مکانی خشکسالی
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۱/۱۵	
واژه‌های کلیدی: خشکسالی کشاورزی، شاخص خشکسالی تفاضلی نرمال شده، سنجنده مودیس، سنجش از دور، معیارهای ارزیابی صحت.	

کشاورزی در حوضه آبخیز کرخه دارد. بر اساس نتایج، در سال ۱۳۸۶ حدود ۸۵/۳ درصد، در سال ۱۳۸۷ حدود ۸۹/۹ درصد و در سال ۱۳۹۳ حدود ۷۴/۸ درصد از مساحت حوضه تحت تأثیر درجات مختلف خشکسالی قرار داشته است. بیشترین شدت و گستره خشکسالی مربوط به سال ۱۳۸۷ بود که بیش از ۷۸ درصد از سطح حوضه در طبقات خشکسالی متوسط تا خیلی شدید قرار گرفت. نتایج ارزیابی آماری نشان داد که شاخص NDDI بیشترین همخوانی را با شاخص SPI در مقیاس یک‌ماهه دارد، به‌طوری که کمترین مقادیر RMSE و MAE به ترتیب برابر با ۰/۱۱ و ۰/۱۲ به‌دست آمد.

نتیجه‌گیری: با توجه به اهمیت حوضه آبخیز کرخه از نظر شرایط اقلیمی، اجتماعی و اقتصادی، پایش و ارزیابی دقیق خشکسالی در این حوضه بسیار حائز اهمیت است. در این راستا، تحقیق حاضر با استفاده از شاخص ترکیبی NDDI به پایش مکانی و زمانی خشکسالی کشاورزی طی دوره آماری ۲۰۰۱-۲۰۲۱ پرداخته است. نتایج نشان داد که به‌ترتیب در سال‌های ۱۳۸۶، ۱۳۸۷ و ۱۳۹۳، حدود ۸۵/۳٪، ۸۹/۹٪ و ۷۴/۸٪ از مساحت حوضه درگیر خشکسالی بوده‌اند. همچنین، نتایج معیارهای ارزیابی صحت شامل RMSE و MAE نشان‌دهنده کارایی بالای این شاخص در منطقه است. این مطالعه فراتر از نقشه‌برداری خشکسالی، بر نقش شاخص NDDI به‌عنوان یک ابزار تشخیصی و هشدار اولیه برای بررسی تعامل پوشش گیاهی و آب و تأثیر آن بر تاب‌آوری کشاورزی تأکید دارد. استفاده ترکیبی از شاخص‌های NDVI و NDWI و ایجاد NDDI امکان ردیابی واکنش‌های اکوسیستم به کمبود رطوبت در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف را فراهم می‌کند. با این حال، محدودیت‌هایی مانند تغییرات کاربری اراضی، تراکم پوشش گیاهی و شرایط فصلی می‌تواند بر دقت شاخص تأثیرگذار باشد. بنابراین، ترکیب NDDI با داده‌های زمینی و شاخص‌های اقلیمی می‌تواند دقت پایش خشکسالی را افزایش دهد و به تصمیم‌گیری بهتر کمک کند.

استناد: کریمی، م.، دهقانی، ن.، گودرزی، م. و حشمتی، م. (۱۴۰۵). کاربرد شاخص خشکسالی تفاضلی نرمال شده مبتنی بر MODIS برای پایش خشکسالی پوشش گیاهی در حوضه کرخه. *اقلیم و بوم‌سازگان مناطق خشک و نیمه‌خشک*، ۳(۱)، ۳۳-۴۸.

DOI: <https://doi.org/10.22075/ceasr.2026.40142.1064>

ناشر: دانشگاه سمنان

۱- مقدمه

خشکسالی یکی از پدیده‌های طبیعی اقلیمی است که زمانی رخ می‌دهد که میزان منابع در دسترس آب طی یک بازه زمانی نسبتاً طولانی به‌طور محسوسی کمتر از شرایط نرمال باشد (Vicente-Serrano و همکاران، ۲۰۱۳). بروز خشکسالی موجب ایجاد تنش آبی در گیاهان می‌شود؛ به‌طوری که گیاهان برای کاهش اتلاف آب، روزنه‌های خود را می‌بندند و این واکنش فیزیولوژیک به‌طور مستقیم منجر به کاهش جذب دی‌اکسید کربن و در نتیجه افت فرایند فتوسنتز می‌گردد (Aasamaa و Söber، ۲۰۱۱). تداوم این شرایط سبب محدود شدن رشد پوشش گیاهی و کاهش عملکرد محصولات کشاورزی شده و از این رو، خشکسالی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل محدودکننده تولید در بخش کشاورزی شناخته می‌شود (Salas-Martínez و همکاران، ۲۰۲۱). با توجه به اثرات گسترده و مخرب خشکسالی بر کشاورزی که در مطالعات متعددی اثبات شده است (Irawan و همکاران، ۲۰۲۳؛ Affandy و همکاران، ۲۰۲۴a؛ Tete و همکاران، ۲۰۲۴؛ Handayani و Setiadi، ۲۰۲۳؛ Muhammad و همکاران، ۲۰۲۴؛ Viet و Thuy، ۲۰۲۴؛ Dahhane و همکاران، ۲۰۲۵). توسعه و به‌کارگیری روش‌های دقیق و کارآمد برای ارزیابی و پایش خشکسالی کشاورزی از اهمیت بالایی برخوردار است. در دهه‌های اخیر، پیشرفت فناوری‌های سنجش از راه دور، امکان پایش مکانی و زمانی خشکسالی را در مقیاس‌های وسیع فراهم کرده و این روش‌ها می‌توانند به‌عنوان مکمل مناسبی برای داده‌های نقطه‌ای ایستگاه‌های زمینی مورد استفاده قرار گیرند (Salas-

Martínez و همکاران، ۲۰۲۱). در این راستا، شاخص‌های پوشش گیاهی استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای، از جمله شاخص پوشش گیاهی نرمال شده و شاخص پوشش گیاهی بهبود یافته به‌طور گسترده در مطالعات مرتبط با خشکسالی به کار گرفته شده‌اند. با این حال، نتایج مطالعات مختلف نشان می‌دهد که اگرچه شاخص‌های تک‌متغیره برای مناطق خاص و اهداف مشخص کاربرد دارند، اما قادر به ارائه تصویری جامع و دقیق از وضعیت خشکسالی نیستند و در برخی موارد می‌توانند با عدم قطعیت همراه باشند (Asadi Aghbalaghi و همکاران، ۲۰۲۲). از این رو، ترکیب چندین شاخص و در نظر گرفتن پارامترهای مؤثرتر در وقوع خشکسالی می‌تواند منجر به توسعه شاخص‌هایی جامع‌تر و قابل‌اعتمادتر شود که توانایی بهتری در تحلیل شدت، گستره و الگوی توزیع خشکسالی دارند (Gu و همکاران، ۲۰۰۷؛ Karimi و همکاران، ۲۰۲۴). در این میان، شاخص خشکسالی تفاضل نرمال شده (NDDI) به عنوان یکی از شاخص‌های ترکیبی، در مطالعات متعددی در سطح جهانی مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که شاخص NDDI در مقایسه با بسیاری از شاخص‌های پوشش گیاهی، از کارایی بالاتری در شناسایی و ارزیابی شرایط خشکسالی برخوردار بوده و توانسته است وضعیت تنش آبی را با دقت بیشتری نشان دهد (Dobri و همکاران، ۲۰۲۱؛ Aksoy و Sertel، ۲۰۲۱؛ Mirzapour و همکاران، ۲۰۲۲؛ Artikanur و Setiwan، ۲۰۲۲؛ Salas-Martínez و همکاران، ۲۰۲۳؛ Herawati و همکاران، ۲۰۲۴؛ Ejaz و همکاران، ۲۰۲۳؛ Nguyen و همکاران، ۲۰۲۴؛ Affandy و همکاران، ۲۰۲۴b؛ Patti و همکاران، ۲۰۲۴؛ Stamou و همکاران، ۲۰۲۵؛ Irsyad و همکاران، ۲۰۲۵).

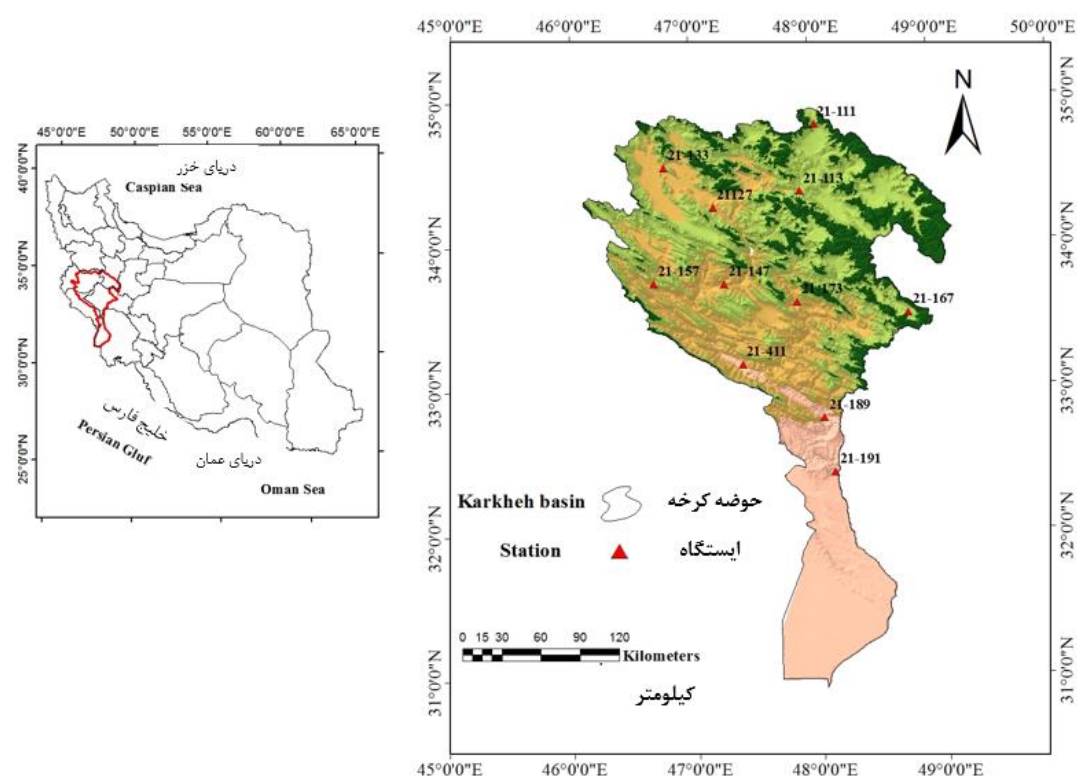
حوضه آبخیز کرخه به دلیل برخورداری از منابع غنی آب و خاک، یکی از قطب‌های اصلی کشاورزی کشور به‌شمار می‌آید و از جایگاه اقتصادی ویژه‌ای در غرب ایران برخوردار است. وجود دشت‌های حاصلخیز در کنار ارتفاعات کوهستانی، شرایط مناسبی را برای توسعه فعالیت‌های کشاورزی، دامداری و بهره‌برداری از منابع طبیعی در این حوضه فراهم کرده است. الگوی بارش در حوضه کرخه عمدتاً تحت تأثیر سامانه‌های مدیترانه‌ای قرار دارد و میانگین بارندگی سالانه آن از حدود ۱۵۰ میلی‌متر در بخش‌های جنوبی و کم‌ارتفاع تا بیش از ۱۰۰۰ میلی‌متر در ارتفاعات شمالی و نواحی شرقی متغیر است که نشان‌دهنده ناهمگنی شدید مکانی بارش در منطقه می‌باشد. رژیم دمايي این حوضه نیز به‌شدت تحت تأثیر تغییرات ارتفاعی و ورود توده‌های هوایی مختلف قرار دارد؛ به‌گونه‌ای که میانگین سالانه دمای هوا از کمتر از ۵ درجه سلسیوس در مناطق کوهستانی مرتفع تا بیش از ۲۵ درجه سلسیوس در بخش‌های جنوبی متغیر است. این تنوع بارشی و دمايي، شرایط اقلیمی پیچیده‌ای را در حوضه کرخه ایجاد کرده که نقش مهمی در توزیع پوشش گیاهی و الگوهای وقوع خشکسالی ایفا می‌کند. بر این اساس، هدف اصلی این پژوهش، پایش مکانی و زمانی خشکسالی در حوضه آبخیز کرخه با استفاده از شاخص ترکیبی NDDI و ارزیابی قابلیت آن به‌عنوان یک ابزار تشخیصی برای پایش خشکسالی کشاورزی و ارائه هشدارهای زودهنگام است. این رویکرد با ارائه یک چارچوب کمی برای تحلیل فرآیندهای خشکسالی، به بهبود مدیریت منابع آب و توسعه استراتژی‌های سازگاری با تغییرات اقلیمی در کشور کمک خواهد کرد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه پژوهش

حوضه آبخیز کرخه یکی از مهم‌ترین حوضه‌های آبریز کشور است که در بخش غربی ایران قرار دارد و با وسعتی در حدود ۵۱۶۴۳ کیلومتر مربع، بیش از نیمی از مساحت استان‌های لرستان و کرمانشاه و همچنین بخش‌هایی از استان‌های کردستان، همدان، ایلام و خوزستان را در بر می‌گیرد. این حوضه از نظر موقعیت جغرافیایی در محدوده ۳۰°۴۶' تا ۳۰°۴۹' طول شرقی و ۳۰°۳۵' تا ۳۰°۳۸' عرض شمالی واقع شده است و از تنوع قابل توجهی از نظر شرایط توپوگرافی و اقلیمی برخوردار است.

(Karimi و همکاران، ۲۰۲۴). در شکل ۱، موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز کرخه به همراه پراکنش ایستگاه‌های مورد استفاده در این مطالعه نمایش داده شده است.



شکل ۱. موقعیت منطقه و ایستگاه‌های مورد مطالعه در حوضه آبخیز کرخه

Fig. 1. Location of the study area and stations in the Karkheh river basin

۲-۲- داده‌ها

۲-۲-۱- داده‌های زمینی

پس از بررسی منطقه مورد مطالعه، ایستگاه‌های موجود در منطقه تحقیق مورد ارزیابی قرار گرفت. با بررسی‌های صورت گرفته تعداد ۱۱ ایستگاه واقع شده در شاخه‌های اصلی انتخاب شدند. پس از حذف داده‌های پرت و کنترل کیفی و اصلاح و بازسازی داده‌ها با انجام آزمون‌های آماری (همگنی من-وینتی، ران تست و رگرسیون)، سال‌های آماری ۱۳۸۰-۱۴۰۰ به عنوان دوره آماری در این تحقیق در نظر گرفته شد. در جدول ۱، مشخصات ایستگاه‌های منتخب در حوضه کرخه نشان داده شده است.

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های منتخب در حوضه آبخیز کرخه

(Iran's water resources management, 2024)

Table 1. Characteristics of the selected stations in the Karkheh River Basin (Iran's water resources management, 2024)

ردیف No.	کد Code	ایستگاه Station	طول جغرافیایی Longitude	عرض جغرافیایی Latitude	نوع ایستگاه Station Type
1	21-111	آغاجان‌بلاغی Aghajanblaghi	48° 04'	34° 50'	باران‌سنجی Rain gauge

2	21-113	آران Aran	47°33'	34°24'	باران‌سنجی و هیدرومتری Rain gauge and hydrometry
3	21-127	پل چهر Pole Chehr	47°26'	34°21'	باران‌سنجی و هیدرومتری Rain gauge and hydrometry
4	21-133	دوآب مرک Doab Merek	46°47'	34°33'	باران‌سنجی و هیدرومتری Rain gauge and hydrometry
5	21-147	هلبیلان - سیمره Halilan-Seimareh	46°39'	33°44'	باران‌سنجی و هیدرومتری Rain gauge and hydrometry
6	21-157	دارتوت Dartoot	46°39'	33°44'	باران‌سنجی و هیدرومتری Rain gauge and hydrometry
7	21-167	دهنو Dehno	48°47'	33°31'	باران‌سنجی و هیدرومتری Rain gauge and hydrometry
8	21-173	دوآب ویسیان Doab Veisian	48°47'	32°48'	باران‌سنجی Rain gauge
9	21-189	پل زال Pole Zal	48°05'	32°48'	باران‌سنجی و هیدرومتری Rain gauge and hydrometry
10	21-191	پای پل Pay Pol	48°09'	32°25'	باران‌سنجی و هیدرومتری Rain gauge and hydrometry
11	21-411	نظرآباد Nazar Abad	47°25'	33°10'	باران‌سنجی و هیدرومتری Rain gauge and hydrometry

۲-۲-۲- داده‌های ماهواره‌ای

در این پژوهش، تصاویر سنجنده MODIS با تفکیک مکانی ۵۰۰ متر در ماه مه (اوج پوشش گیاهی در اکثر نقاط حوضه) (Karimi و همکاران، ۲۰۲۴) از پایگاه USGS^a طی سال‌های ۲۰۰۱-۲۰۲۱ دریافت شد (جدول ۲).

جدول ۲. محصولات‌های سنجنده مادیس در این مطالعه

Table 2. MODIS sensor products in this study

شاخص Index	قدرت تفکیک مکانی Spatial and temporal resolution	محصول Product	سنجنده Sensor	ماهواره Satellite
NDDI	500 m/8 day	MOD09A1	MODIS	Terra

۲-۳- روش کار

۲-۳-۱- محاسبه شاخص ترکیبی NDDI

شاخص NDDI با استفاده از معادلات زیر از NDVI و NDWI استخراج شد. طبقه‌بندی وضعیت خشکسالی بر اساس شاخص NDDI در جدول ۳ نشان داده شده است (۱۴).

1- <http://lpdaac.usgs.gov/>

$$NDDI = \frac{(NDVI)-(NDWI)}{(NDVI)+(NDWI)} \quad (۱)$$

$$NDVI = \frac{(\rho_{857})-(\rho_{645})}{(\rho_{857})+(\rho_{645})} \quad (۲)$$

$$NDWI = \frac{(\rho_{857})-(\rho_{2130})}{(\rho_{857})+(\rho_{2130})} \quad (۳)$$

جدول ۳. طبقه‌بندی وضعیت خشکسالی بر اساس شاخص NDDI (Artikanur و Setiwan, ۲۰۲۲)

Table 3. Classification of drought conditions based on the NDDI index (Artikanur & Setiwan, 2022)

وضعیت خشکسالی	NDDI
Drought situation	
بدون خشکسالی	NDDI < -2
No drought	
خفیف	-2 < NDDI < 0.7
Mild	
متوسط	0.7 < NDDI < 1.25
Medium	
شدید	1.25 < NDDI < 3
Severe	
خیلی شدید	NDDI > 3
Very intense	

۲-۳-۲- ارزیابی عملکرد شاخص NDDI با شاخص SPI

برای صحت‌سنجی نتایج شاخص ماهواره‌ای، شاخص SPI با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های باران‌سنجی محاسبه شد و در این پژوهش، برای ارزیابی شاخص NDDI از معیارهای خطا مانند درصد میانگین خطای مطلق و ریشه دوم میانگین مربعات خطا استفاده شد.

شاخص بارش استاندارد (SPI)

این شاخص توسط McKee و همکاران (۱۹۹۳) ارائه شد. تنها عامل مؤثر در محاسبه این شاخص عنصر بارندگی است و ابزاری کارآمد در تحلیل داده‌های بارندگی است. این شاخص وضعیت خشکسالی یا کاهش بارندگی را در بازه‌های زمانی ۱، ۳، ۶، ۱۲، ۲۴، ۴۸ ماهه نشان می‌دهد. براساس این شاخص، برای پایش خشکسالی‌های کشاورزی سری-های زمانی کوتاه‌مدت یک، سه و شش ماهه و برای بررسی منطقه از نظر خشکسالی‌های هیدرولوژیک سری‌های بلندمدت ۱۲، ۲۴، ۴۸ ماهه به کار گرفته می‌شود (McKee و همکاران، ۱۹۹۳). برای محاسبه این شاخص ابتدا باید بهترین توزیع آماری از طریق برازش داده‌های ایستگاه‌های باران‌سنجی با توزیع‌های آماری مختلف داده انتخاب شود. طبق تحقیقات صورت گرفته (McKee و همکاران، ۱۹۹۳) توزیع گاما مناسب‌ترین برازش را با داده‌های بارش دارد. این تابع به صورت معادله (۴) محاسبه می‌شود.

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} \quad (۴)$$

اینجا $\beta > 0$ پارامتر مقیاس، $x > 0$ مقدار بارندگی، $\alpha > 0$ پارامتر شکل و $\Gamma > 0$ تابع گاما است.

درصد میانگین خطای مطلق

بیانگر خطای برآورد است. نشان دهنده دقت روش و مقدار متوسط خطا است. دامنه آن بین $0, +\infty$ هر چه قدر کوچکتر باشد بهتر است (رابطه ۵).

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |o_i - p_i|}{n} \quad (5)$$

ریشه دوم میانگین مربعات خطا

بیانگر توانایی مدل در برآورد متغیر وابسته است و دامنه آن بین $0, +\infty$ و هر چه قدر کوچکتر باشد بهتر است (رابطه ۶).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (o_i - p_i)^2}{n}} \quad (6)$$

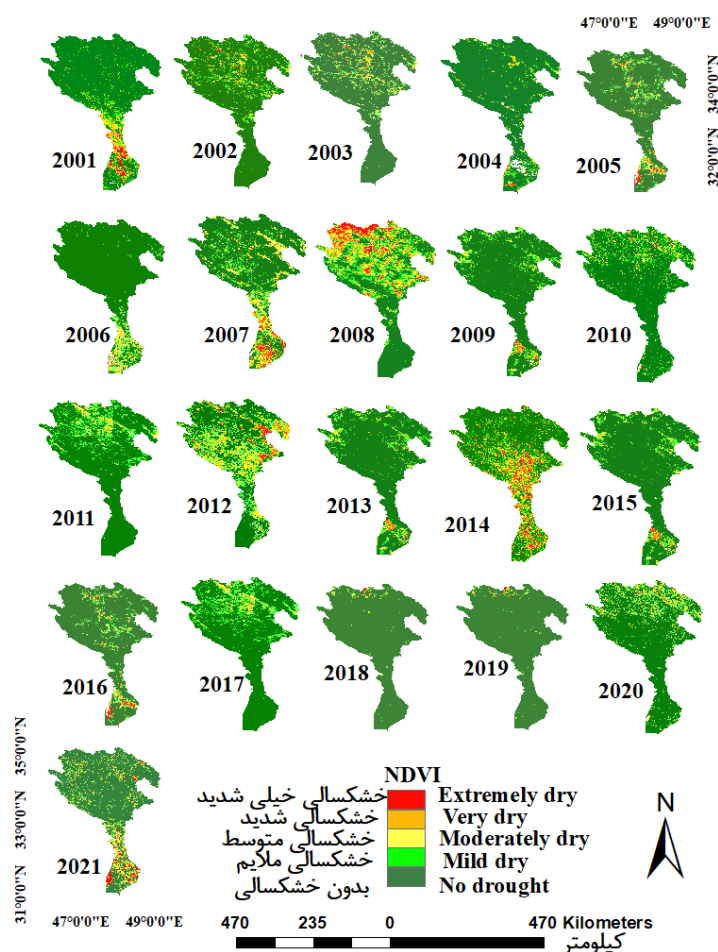
۳- نتایج و بحث

با توجه به اینکه اوج پوشش گیاهی در حوضه آبخیز کرخه مربوط به اردیبهشت ماه می باشد، به همین دلیل تصاویر ماه مه طی سالهای ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۱ دریافت شد و برای محاسبه شاخصهای NDVI، NDWI و NDDI انتخاب شد. بعد از محاسبه شاخصها، وضعیت خشکسالی در پنج طبقه خیلی شدید، شدید، متوسط، خفیف و بدون خشکسالی طبقه بندی و مورد بررسی قرار گرفت.

۳-۱- تحلیل شاخص NDVI

نتایج به دست آمده از شاخص NDVI نشان داد که شدیدترین خشکسالی در سالهای ۱۳۸۶، ۱۳۸۷ و ۱۳۹۳ رخ داده است. به طوری که در سال ۱۳۸۶، ۱۳/۱ درصد از سطح حوضه مورد مطالعه در طبقه خشکسالی خیلی شدید، ۸/۷ درصد در خشکسالی شدید، ۹/۱ درصد در خشکسالی متوسط، ۲۰/۱ درصد در خشکسالی خفیف و در نهایت ۴۹ درصد در طبقه بدون خشکسالی واقع شده است. در سال ۱۳۸۷، ۱۸/۲ درصد از سطح حوضه مورد مطالعه در طبقه خشکسالی خیلی شدید، ۹/۴ درصد در خشکسالی شدید، ۱۵/۵ درصد در خشکسالی متوسط، ۲۷/۴ درصد در خشکسالی خفیف و در نهایت ۲۹/۵ درصد در طبقه بدون خشکسالی واقع شده است.

طبق نتایج به دست آمده از این شاخص در سال ۱۳۹۳، ۱۷/۸ درصد از سطح حوضه مورد مطالعه در طبقه خشکسالی خیلی شدید، ۷/۴ درصد در خشکسالی شدید، ۸/۶ درصد در خشکسالی متوسط، ۱۲/۸ درصد در خشکسالی خفیف و در نهایت ۵۳/۴ درصد در طبقه بدون خشکسالی واقع شده است (شکل ۲).



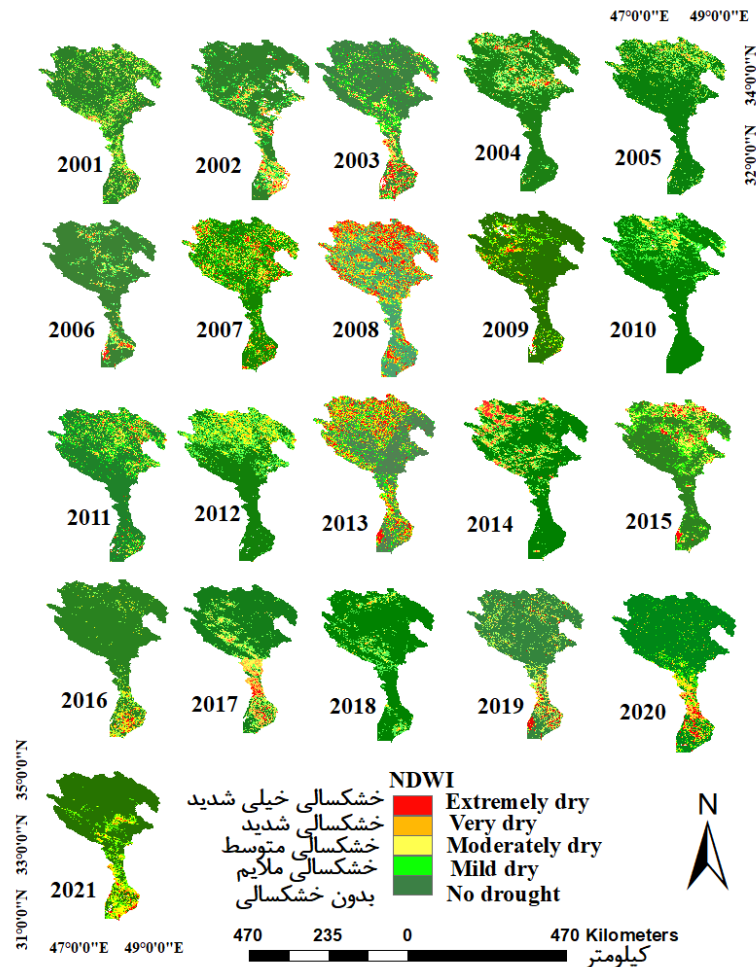
شکل ۲. وضعیت خشکسالی بر اساس شاخص NDVI در اردیبهشت ماه طی دوره آماری ۱۳۸۰-۱۴۰۰

Fig. 2. Drought situation based on NDVI index in May during the period 2001-2021

۲-۳- تحلیل شاخص NDWI

نتایج به دست آمده از شاخص NDWI نشان داد که شدیدترین خشکسالی در سال‌های ۱۳۸۷ و ۱۳۹۲ رخ داده است. به طوری که در سال ۱۳۸۷، ۲۳/۲ درصد از سطح حوضه مورد مطالعه در طبقه خشکسالی خیلی شدید، ۱۰/۴ درصد در خشکسالی شدید، ۱۱/۶ درصد در خشکسالی متوسط، ۲۲/۴ درصد در خشکسالی خفیف و در نهایت ۳۲/۴ درصد در طبقه بدون خشکسالی واقع شده است.

طبق نتایج به دست آمده از این شاخص در سال ۱۳۹۲، ۱۴/۲ درصد از سطح حوضه مورد مطالعه در طبقه خشکسالی خیلی شدید، ۷/۴ درصد در خشکسالی شدید، ۸/۶ درصد در خشکسالی متوسط، ۱۳/۹ درصد در خشکسالی خفیف و در نهایت ۵۵/۹ درصد در طبقه بدون خشکسالی واقع شده است (شکل ۳).

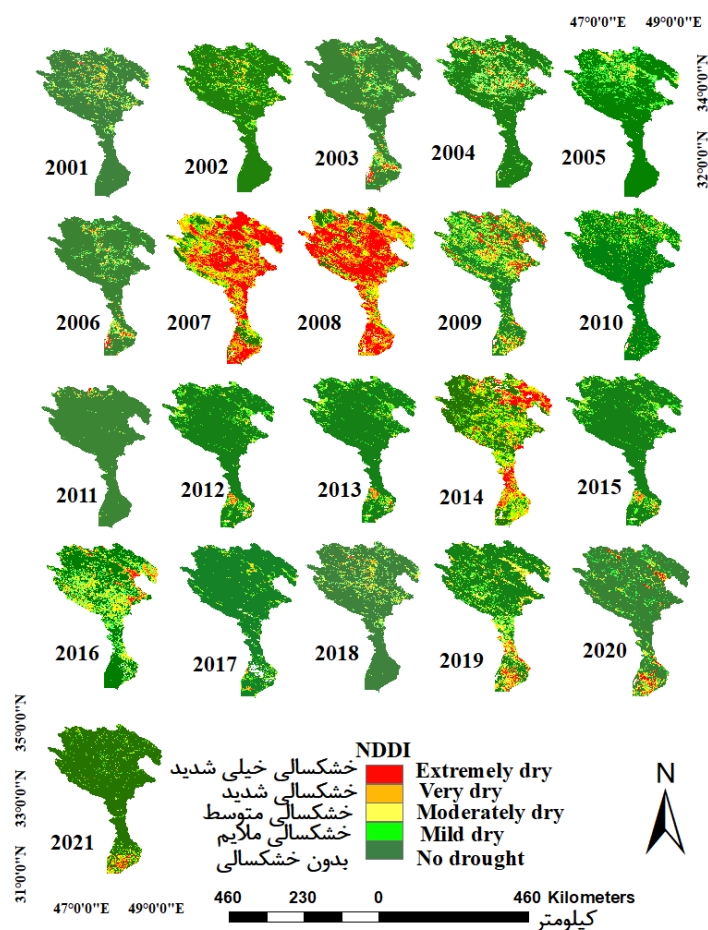


شکل ۳. وضعیت خشکسالی بر اساس شاخص NDWI در اردیبهشت ماه طی دوره آماری ۱۳۸۰-۱۴۰۰

Fig. 3. Drought situation based on NDWI index in May during the period 2001-2021

۳-۳- تحلیل شاخص NDDI

نتایج به دست آمده از شاخص NDDI نشان داد که شدیدترین خشکسالی‌ها در سال‌های ۱۳۸۶، ۱۳۸۷ و ۱۳۹۳ رخ داده است. به طوری که در سال ۱۳۸۶، ۳۱/۴ درصد از سطح حوضه مورد مطالعه در طبقه خشکسالی خیلی شدید، ۲۰/۲ درصد در خشکسالی شدید، ۱۷/۶ درصد در خشکسالی متوسط، ۱۶/۱ درصد در خشکسالی خفیف و در نهایت ۱۴/۷ درصد در طبقه بدون خشکسالی واقع شده است. در سال ۱۳۸۷، ۴۵/۴ درصد از سطح حوضه مورد مطالعه در طبقه خشکسالی خیلی شدید، ۲۱/۳ درصد در خشکسالی شدید، ۱۲/۱ درصد در خشکسالی متوسط، ۱۱/۱ درصد در خشکسالی خفیف و در نهایت ۱۰/۱ درصد در طبقه بدون خشکسالی واقع شده است. طبق نتایج به دست آمده از این شاخص در سال ۱۳۹۳، ۲۱/۲ درصد از سطح حوضه مورد مطالعه در طبقه خشکسالی خیلی شدید، ۱۹/۲ درصد در خشکسالی شدید، ۱۴/۱ درصد در خشکسالی متوسط، ۲۰/۳ درصد در خشکسالی خفیف و در نهایت ۲۵/۲ درصد در طبقه بدون خشکسالی واقع شده است (شکل ۴).



شکل ۴. وضعیت خشکسالی بر اساس شاخص NDDI در اردیبهشت ماه طی دوره آماری ۱۳۸۰-۱۴۰۰

Fig. 4. Drought situation based on NDDI index in May during the period 2001-2021

بر اساس مطالعات پیشین (Rezaei Moghadam و همکاران، ۲۰۱۲؛ Mirmousavi و Karimi، ۲۰۱۳؛ Rezaei و Banafsheh و همکاران، ۲۰۱۵؛ Mirahsani و همکاران، ۲۰۱۷) و همچنین اخبار و گزارش‌های منتشرشده در وبسایت‌های خبری کشور، سال‌های ۱۳۸۶، ۱۳۸۷ و ۱۳۹۳ به‌عنوان سال‌هایی که کشور با خشکسالی شدید مواجهه بوده است، شناسایی شده‌اند.

تحلیل‌های به‌دست‌آمده از شاخص NDDI نیز نشان‌دهنده توانمندی این شاخص در پایش و ارزیابی شدت خشکسالی کشاورزی در حوضه آبخیز کرخه طی این سال‌ها است. بر اساس تحلیل داده‌های ماهواره‌ای ماه اردیبهشت، بیشترین مساحت تحت تأثیر خشکسالی شدید و خیلی شدید در سال ۱۳۸۷ مشاهده شد، به‌گونه‌ای که حدود ۷۸/۸٪ از سطح حوضه درگیر خشکسالی متوسط تا خیلی شدید بوده است.

مقایسه نتایج این مطالعه با پژوهش‌های مشابه توسط Artikanur و Setiwan (۲۰۲۲)، Herawati و همکاران (۲۰۲۴) و Irsyad و همکاران (۲۰۲۵) در مناطق مختلف جهان، نشان می‌دهد که شاخص NDDI به‌طور مؤثر توانایی پایش شدت و پراکنش مکانی خشکسالی را در اکوسیستم‌های کشاورزی دارد. این یافته‌ها اهمیت استفاده از شاخص‌های ترکیبی مبتنی بر داده‌های ماهواره‌ای برای تدوین راهبردهای مدیریتی و سیاست‌گذاری در مواجهه با خشکسالی و تغییرات اقلیمی را برجسته می‌سازد و نشان می‌دهد که پایش دقیق خشکسالی می‌تواند به بهینه‌سازی برنامه‌های آب‌رسانی، توسعه استراتژی‌های کشاورزی مقاوم به خشکسالی و کاهش آسیب‌های اقتصادی و زیست‌محیطی کمک کند.

۳-۴- بررسی کارایی شاخص NDDI

نتایج معیارهای ارزیابی صحت، شامل RMSE و MAE، در جدول ۴ نشان‌دهنده عملکرد قابل قبول شاخص ترکیبی NDDI است. کمترین مقادیر RMSE و MAE به ترتیب برابر با ۰/۱۱ و ۰/۱۲ بوده که مربوط به شاخص SPI-1 می‌باشد (جدول ۴). بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که شاخص NDDI توانایی بالایی در پایش خشکسالی دارد، که این یافته با نتایج تحقیقات Lee و همکاران (۲۰۱۶) و Mirzapour و همکاران (۲۰۲۲) نیز همخوانی دارد که نشان داد ترکیب شاخص‌های پوشش گیاهی و رطوبت سطح زمین در محاسبه NDDI، دقت پایش خشکسالی را بهبود می‌بخشد.

جدول ۴. مقادیر RMSE و MAE برای بررسی ارتباط بین NDDI و SPI

Table 4. RMSE and MAE values to examine the relationship between NDDI and SPI

شاخص سنجش از دوری Remote sensing index	SPI-6		SPI-3		SPI-1	
NDDI	RMSE	MAE	RMSE	MAE	RMSE	MAE
	0.22	0.22	0.19	0.18	0.12	0.11

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به اهمیت حوضه آبخیز کرخه از نظر شرایط اقلیمی، اجتماعی و اقتصادی، پایش و ارزیابی دقیق خشکسالی در این حوضه بسیار حائز اهمیت است. در این راستا، تحقیق حاضر با استفاده از شاخص ترکیبی NDDI به پایش مکانی و زمانی خشکسالی کشاورزی طی دوره آماری ۲۰۰۱-۲۰۲۱ پرداخته است. نتایج نشان داد که به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۶، ۱۳۸۷ و ۱۳۹۳، حدود ۰/۸۵/۳، ۰/۸۹/۹ و ۰/۷۴/۸ از مساحت حوضه درگیر خشکسالی بوده‌اند. همچنین، نتایج معیارهای ارزیابی صحت شامل RMSE و MAE نشان‌دهنده کارایی بالای این شاخص در منطقه است. این مطالعه فراتر از نقشه‌برداری خشکسالی، بر نقش شاخص NDDI به عنوان یک ابزار تشخیصی و هشدار اولیه برای بررسی تعامل پوشش گیاهی و آب و تأثیر آن بر تاب‌آوری کشاورزی تأکید دارد. استفاده ترکیبی از شاخص‌های NDVI و NDWI و ایجاد NDDI امکان ردیابی واکنش‌های اکوسیستم به کمبود رطوبت در مقیاس‌های زمانی و مکانی مختلف را فراهم می‌کند.

نتایج این مطالعه می‌تواند به مدیران و مسئولان اجرایی منطقه‌ای در اولویت‌بندی مناطق کشاورزی آسیب‌پذیر و برنامه‌ریزی برای اقدامات آینده کمک کند و کشاورزان را قادر سازد تا شیوه‌های تطبیقی مانند تغییر زمان کاشت یا صرفه‌جویی در مصرف آب را به کار گیرند. این یافته‌ها همچنین راهنمایی مبتنی بر شواهد برای تدوین سیاست‌های عمومی، از جمله مقابله با خشکسالی، سرمایه‌گذاری در زیرساخت‌های آبیاری و توسعه استراتژی‌های سازگاری با تغییرات اقلیمی در مناطق پرخطر ارائه می‌دهد. با این حال، محدودیت‌هایی مانند تغییرات کاربری اراضی، تراکم پوشش گیاهی و شرایط فصلی می‌تواند بر دقت شاخص تأثیرگذار باشد. بنابراین، ترکیب NDDI با داده‌های زمینی و شاخص‌های اقلیمی می‌تواند دقت پایش خشکسالی را افزایش دهد و به تصمیم‌گیری بهتر کمک کند.

۵- داده‌ها و اطلاعات

مبنای داده‌ها و اطلاعات مقاله حاضر، پروژه تحقیقاتی است.

۶- تعارض منافع

در این مقاله، تعارض منافی وجود ندارد و این مسأله مورد تأیید همه نویسندگان است.

۷- مشارکت نویسندگان

مشارکت نویسندگان در این مقاله به شرح زیر است:

مشارکت نویسنده اول، تفسیر و تحلیل داده‌های مقاله و نگارش متن مقاله می‌باشد.

مشارکت نویسنده دوم، بررسی و کنترل نتایج و ویرایش متن مقاله می‌باشد.

مشارکت نویسنده سوم، آماده‌سازی تصاویر ماهواره‌ای می‌باشد.

مشارکت نویسنده چهارم، آماده‌سازی داده‌های بارندگی می‌باشد.

۸- اصول اخلاقی

نویسندگان، اصول اخلاقی را در انجام و انتشار این اثر علمی رعایت نموده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنها می‌باشد.

۹- مراجع

1. Aasamaa, K., & Söber, A. (2011). Stomatal sensitivities to changes in leaf water potential, air humidity, CO₂ concentration and light intensity, and the effect of abscisic acid on the sensitivities in six temperate deciduous tree species. *Environmental and Experimental Botany*, 71(1), 72–78. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2010.10.013>
2. Affandy, N. A., Iranata, D., Anwar, N., Maulana, M. A., Prasetyo, D. D., Wardoyo, W., & Sukojo, B. M. (2024a). Assessment of agricultural drought using the normalized difference drought index (NDDI) to predict drought at Corong River Basin. *International Journal of Integrated Engineering*, 16(1), 378–393.
3. Affandy, N. A., Iranata, D., Anwar, N., Maulana, M. A., Wardoyo, W., Prastyo, D. D., & Sukojo, B. M. (2024b). The relationship between hydro-agricultural drought in the Corong River Basin: A causal time series regression model. *Civil Engineering Dimensions*, 26, 173–190. [https://doi.org/\[CrossRef\]](https://doi.org/[CrossRef])
4. Aksoy, S., & Sertel, E. (2021). Comparison of drought monitoring indices derived from MODIS and CHIRPS data using Google Earth Engine. In *9th Global Conference on Global Warming (GCGW-2021)*, Croatia, August 1–4, 2021. f
5. Artikanur, S. D., & Setiawan, Y. (2022). Normalized difference drought index (NDDI) computation for mapping drought severity in Bojonegoro Regency, East Java, Indonesia. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1109(1), 012027. IOP Publishing.
6. Asadi Aghbalaghi, F., Mirabbasi Najafabadi, R., Nasr Esfahani, M. A., & Ghasemi Dastgerdi, A. R. (2022). Development of a new composite drought index (CDI) for multivariate assessment of drought in Shahrekord Plain. *Geographical Studies of Arid Regions*, 8(29), 87–102. [In Persian]
7. Dahhane, Y., Ongoma, V., Hadri, A., Kharrou, M. H., Hakam, O., & Chehbouni, A. (2025). Probabilistic linkages of propagation from meteorological to agricultural drought in the North African semi-arid region. *Frontiers in Water*, 7, 1559046. [https://doi.org/\[CrossRef\]](https://doi.org/[CrossRef])
8. Dobri, R. V., Sfîcă, L., Amihăse, V. A., Apostol, L., & Țîmpu, S. (2021). Drought extent and severity on arable lands in Romania derived from normalized difference drought index (2001–2020). *Remote Sensing*, 13(8), 1478. <https://doi.org/10.3390/rs13081478>
9. Ejaz, N., Bahrawi, J., Alghamdi, K. M., Rahman, K. U., & Shang, S. (2023). Drought monitoring using Landsat-derived indices and the Google Earth Engine platform: A case study from Al-Lith Watershed, Kingdom of Saudi Arabia. *Remote Sensing*, 15, 984.
10. Gu, Y., Brown, J. F., Verdin, J. P., & Wardlow, B. (2007). A five-year analysis of MODIS NDVI and NDWI for grassland drought assessment over the Central Great Plains of the United States. *Geophysical Research Letters*, 34(6), L06407. <https://doi.org/10.1029/2006GL029127>
11. Handayani, A., & Setiadi, H. (2023). Distribution of drought on agricultural land in Palabuhanratu District Sukabumi Regency. *Journal of Geographic Media Information Development and Geographic Profession*, 20, 31–36. [https://doi.org/\[CrossRef\]](https://doi.org/[CrossRef])
12. Herawati, A., Mujiyo, M., Nugroho, B. D. E. P., Istiqomah, N. M., Irmawati, V., Hasanah, K., ... & Anggita, A. (2024). Drought potential index using normalized difference drought index (NDDI)

- method based on geographical information system (GIS) in Slogohimo, Wonogiri, Indonesia. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1314(1), 012040. IOP Publishing.
13. Irawan, A., Komori, D., & Hendrawan, V. S. A. (2023). Correlation analysis of agricultural drought risk on wet farming crop and meteorological drought index in the tropical-humid region. *Theoretical and Applied Climatology*, 153, 227–240. <https://doi.org/> [CrossRef]
 14. Irsyad, F., Sari, N., Putri, A. E., & Filipović, V. (2025). Application of the normalized difference drought index (NDDI) for monitoring agricultural drought in tropical environments. *Land*, 14(12), 2431.
 15. Karimi, M., Dehghani, N., Jalilian, N., & Shahedi, K. (2024). Investigating the effectiveness of univariate and integrated multivariate indices in monitoring agricultural drought (Case study: Karkheh Basin). *Desert Management*, 12(3), 99–122. [In Persian]
 16. Lee, S. J., Cho, J., Hong, S., Ha, K. J., Lee, H., & Lee, Y. W. (2016). On the relationships between satellite-based drought index and gross primary production in the North Korean croplands, 2000–2012. *Remote Sensing Letters*, 7(8), 790–799.
 17. McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*, 17(22), 179–183.
 18. Mirahsani, M. S., Mahini, A. R., Safanian, A. R., Modares, R., Jafari, R., & Mohamadi, J. (2017). Regional drought monitoring of Zayandeh-Rud basin based on index time series changes: VCI index MODIS sensors and SPI index. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 24(1), 1–22. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/geo.v6i4.62601>.
 19. Mirmousavi, S. H., & Karimi, H. (2013). Effect of drought on vegetation cover using MODIS sensing images: Case study—Kurdistan Province. *Geography and Development*, 11(31), 57–76. [In Persian] <https://doi.org/10.22111/gdij.2013.794>.
 20. Mirzapour, S., Kheirkhah Zarkash, M. M., & Azizi, Z. (2022). Spatial pattern analysis of drought situation in Central and South Zagros using remote sensing indicators. *Desert Ecosystem Engineering*, 11(35), 1–14. <https://doi.org/10.22052/deej.2022.113659> [In Persian]
 21. Muhammad, F., Yang, J., Wu, T., Wang, S., Zhao, X., & Tariq, A. (2024). Impact assessment of agricultural droughts on water use efficiency in different climatic regions of Punjab Province Pakistan using MODIS time series imagery. *Hydrological Processes*, 38, e15232. <https://doi.org/>[CrossRef]
 22. Nguyen, M. H., Dao, D. T., Le, M. S., & Le, T. H. (2024). A modification of normalized difference drought index to enhance drought assessment using remotely sensed imagery. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(10), 883.
 23. Patti, P. P., Jagtap, M. P., Khatri, N., Madan, H., Vadduri, A. A., & Patodia, T. (2024). Exploration and advancement of NDDI leveraging NDVI and NDWI in Indian semi-arid regions: A remote sensing-based study. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 9, 100573.
 24. Rezaei Banafsheh, M., Rezaei, A., & Faridpor, M. (2015). Analyzing agricultural drought in East Azarbaijan province. *Geography and Environmental Sustainability*, 2(5), 37–52. [In Persian]
 25. Rezaei Moghadam, M. H., Valizadeh Kamran, K. H., Rostamzadeh, H., & Rezaei, A. (2012). Evaluating the adequacy of MODIS in the assessment of drought (case study: Urmia Lake Basin). *Geography and Environmental Sustainability*, 2(5), 37–52. [In Persian]
 26. Salas-Martínez, F., Valdés-Rodríguez, O. A., Palacios-Wassenaar, O. M., & Márquez-Grajales, A. (2021). Analysis of the evolution of drought through SPI and its relationship with the agricultural sector in the central zone of the state of Veracruz, Mexico. *Agronomy*, 11(11), 2099. <https://doi.org/10.3390/agronomy11112099>.
 27. Salas-Martínez, F., Valdés-Rodríguez, O. A., Palacios-Wassenaar, O. M., Márquez-Grajales, A., & Rodríguez-Hernández, L. D. (2023). Methodological estimation to quantify drought intensity based on the NDDI index with Landsat 8 multispectral images in the central zone of the Gulf of Mexico. *Frontiers in Earth Science*, 11, 1027483.
 28. Stamou, A., Bakousi, A., Dosiou, A., Tsifodimou, Z. E., Karachaliou, E., Tavantzis, I., & Stylianidis, E. (2025). Mapping drought incidents in the Mediterranean region with remote sensing: A step toward climate adaptation. *Land*, 14(8), 1564.

29. Tete, J. N., Makokha, G. O., Ngesa, O., Muthami, J. N., & Odhiambo, B. W. (2024). Spatio-temporal agricultural drought quantification in a rainfed agriculture, Athi-Galana-Sabaki River Basin. *Journal of Geographic Information System*, 16, 201–226. <https://doi.org/> [CrossRef]
30. Vicente-Serrano, S. M., Gouveia, C., Camarero, J. J., Beguería, S., Trigo, R., López-Moreno, J. I., Azorín, C., & Molina, A. (2013). Response of vegetation to drought time-scales across global land biomes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(1), 52–57. <https://doi.org/10.1073/pnas.1207068110>.
31. Viet, L. V., & Thủy, T. T. T. (2024). Drought sensitivity analysis of meteorological and vegetation indices in Dak Nong, Vietnam. *Journal of Water and Climate Change*, 15, 4968–4988. <https://doi.org/> [CrossRef]