

Ecological Sensitivity Modeling of Environment to Desertification Using Tasseled Cap Components and Fuzzy Logic in Wasit Province, Iraq

Maryam Bayati Khatibi¹✉, Hala Abdulkarim², Bachtiar Fezizhadeh³

1. (Corresponding Author) Department of Remote Sensing and Geographic Information Systems, Faculty of Planning and Science of Environment, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Email: m_bayati@tabrizu.ac.ir

2. Department of Remote Sensing and Geographic Information Systems, Faculty of Planning and Science of Environment, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Email: halakarrem4@gmail.com

3. Department of Remote Sensing and Geographic Information Systems, Faculty of Planning and Science of Environment, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Email: bakhtiar.fezizadeh@gmail.com

Article Info

Article type:

Research Article

Article History:

Received:

26 February 2026

Revised:

30 April 2026

Accepted:

4 June 2026

Available online:

20 July 2026

Keywords:

Desertification,
Tasseled Cap Model,
Ecological Sensitivity,
Fuzzy Overlay,
Wasit Province,
Iraq.

ABSTRACT

Reduction in vegetation cover (greenness parameter) and soil moisture (wetness parameter) accompanied by increased reflectance (Brightness parameter) constitute the main signs of ecosystem damage and desertification. Wasit Province in Iraq is particularly vulnerable due to its dry climate, geographic location, and increasing human pressures. Wasit Province is located in the southeast of Iraq and on the border with Iran. This study assesses ecological sensitivity to desertification using Tasseled Cap components—derived from MODIS satellite imagery for 2010 and 2022. MOD09A1 surface reflectance data (500m resolution) were selected for the green season (March–June). Tasseled Cap components were normalized via triangular fuzzy functions and overlaid to create ecological sensitivity maps. Sensitivity was classified into five levels: very stable, stable, semi-stable, sensitive, and highly sensitive. The results exhibit that in 2010, 12.7% of the province was categorized as stable to semi-stable, while 65.7% was highly sensitive. By 2022, stable areas fell to 11.2% and high-sensitivity zones grew to 73.2%, signaling worsening desertification. Stable zones clustered along the Tigris River - highlighting water's role in resilience - while peripheral areas showed critical (warm-colored) conditions. Fuzzy change detection between the two years indicated gradual, widespread ecological shifts rather than abrupt changes, likely driven by climate variability, land-use changes, and sustained anthropogenic pressure. The fuzzy overlay method effectively captured transitional zones and spatial heterogeneity, outperforming traditional classification techniques. Overall, MODIS data, Tasseled Cap indices, and fuzzy logic together form a robust framework for desertification monitoring, hotspot identification, and ecological management in vulnerable regions like Wasit Province.

Cite this article: Bayati Khatibi, M., Abdulkarim, H., & Fezizhadeh, B. (2026). Ecological Sensitivity Modeling of Environment to Desertification Using Tasseled Cap Components and Fuzzy Logic in Wasit Province, Iraq. *Physical Geography Research Quarterly*, 58 (2), 79-9. <http://doi.org/10.22059/jphgr.2026.400590.1007900>

Extended Abstract

Introduction

Desertification is a creeping and multifactorial environmental phenomenon that severely affects arid and semi-arid regions, leading to ecological degradation, natural resource depletion, and socio-economic instability. Wasit Province in southeastern Iraq is particularly vulnerable due to its dry climate, fragile ecosystems, and increasing anthropogenic pressures such as unsustainable land use, groundwater extraction, and vegetation loss. The urgency of addressing desertification in Wasit stems from its accelerating pace and spatial extent, which threaten agricultural productivity, water security, and ecological resilience. Despite the availability of remote sensing technologies, many existing models for desertification assessment remain either qualitative, temporally limited, or spatially coarse, lacking the precision needed for pixel-level ecological sensitivity mapping. This study aims to develop an integrated analytical framework for modeling ecological sensitivity to desertification using satellite-derived indicators and fuzzy logic. Specifically, it utilized Tasseled Cap components—Brightness, Greenness, and Wetness—extracted from MODIS imagery, and applies fuzzy normalization and overlay techniques to generate spatially explicit sensitivity maps for the years 2010 and 2022. The primary research question is: How can Tasseled Cap components and fuzzy logic be employed to develop a quantitative and spatially explicit model of ecological sensitivity to desertification in Wasit Province over a multi-year period?

The selection of the greening season (March to June) was intended to more accurately capture vegetation dynamics and minimize seasonal noise. Key innovative aspects of this study include the simultaneous use of three Tasseled Cap ecological components via fuzzy aggregation; the utilization of Google Earth Engine for scalable, reproducible cloud-based data processing; the generation of pixel-level ecological sensitivity maps suitable for temporal comparison; and the development of a generalizable framework applicable to similar arid regions across the Middle East, North Africa, and Central

Asia. This approach can serve as a model for monitoring desertification in other vulnerable areas.

Methodology

This study utilized MODIS surface reflectance data (MOD09A1, 500m resolution) for the green season (March to June) in 2010 and 2022. Tasseled Cap transformation was applied to derive three ecological indicators: Brightness (soil exposure), Greenness (vegetation density), and Wetness (surface moisture). Each component was normalized using triangular fuzzy membership functions and integrated through fuzzy overlay to produce ecological sensitivity maps. The final outputs were classified into five sensitivity levels: very stable, stable, semi-stable, sensitive, and highly sensitive. Validation was performed using the membership function assigned to the input values. The final output for each year consisted of three GeoTIFF files corresponding to the Tasseled Cap components:

Brightness_YYYY.tif,
Greenness_YYYY.tif, and
Wetness_YYYY.tif

These files were saved in a Google Drive folder named "Wasit_TasseledCap." The outputs have a spatial resolution of 500 meters and were clipped to the boundaries of Wasit Province.

Results and discussion

In 2010, approximately 12.7% of the Wasit province was classified as stable to semi-stable, while 65.7% fell into the highly sensitive category. By 2022, stable areas declined to 11.2%, and highly sensitive zones expanded to 73.2%, indicating intensified desertification and ecological fragility. Spatial maps revealed that stable zones were concentrated along the Tigris River, highlighting the critical role of hydrological features in maintaining ecological resilience. Peripheral regions exhibited warmer colors - ranging from orange to red - reflecting critical conditions. Fuzzy change detection analysis showed that ecological changes were predominantly gradual, uniform, and widespread rather than abrupt or localized.

The integration of Tasseled Cap components with fuzzy logic enabled a more nuanced representation of transitional zones and spatial heterogeneity compared to conventional crisp classification methods. The Tigris River emerged as a key stabilizing factor, with surrounding areas demonstrating less ecological degradation. The expansion of highly sensitive zones over the decade suggests escalating land degradation driven by climatic variability, land-use changes, and sustained human pressure. The Tigris River, flowing through the center of the province, serves as a key hydrological element and plays a significant role in the pattern of changes. More pronounced ecological changes are observed along the riverbanks—particularly in downstream areas—likely resulting from water level fluctuations, land-use changes, or anthropogenic pressures. This spatial pattern indicates that ecological changes in Wasit Province have been heterogeneous in terms of both intensity and spatial distribution; central areas adjacent to the Tigris River have been more susceptible to severe changes, whereas peripheral areas distant from water sources have experienced less alteration. It demonstrates consistency. The range of phase changes extends from approximately 0.51 to 0.65, indicating that a significant portion of the study area experiences changes of moderate to high intensity. The absence of negative values in the generated and analyzed histogram reveals that the change function is defined in a normalized manner using positive values; consequently, higher values signify greater change intensity, without specifying the direction of the change (positive or negative). The normal distribution of phase changes indicates that ecological processes in the region have occurred gradually and extensively, rather than locally or abruptly. This pattern may stem from uniform climatic factors, gradual changes in land use, or homogeneous management practices across the region. Given these results, it is recommended that supplementary spatial analyses be conducted on the change map to characterize the spatial patterns of change and identify areas experiencing more

intense changes or those that are particularly sensitive.

Conclusion

This study demonstrates that the combination of MODIS data, Tasseled Cap indicators, and fuzzy logic provides a robust framework for monitoring desertification and assessing ecological sensitivity. The approach offers precise spatial insights, supports temporal comparisons, and facilitates the identification of critical zones for targeted intervention. Future research studies should consider integrating additional datasets such as soil properties, precipitation, and land use to enhance model accuracy and applicability. The framework is scalable and transferable to other vulnerable regions across the Middle East, North Africa, and Central Asia, contributing to land degradation neutrality and sustainable development goals.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

Authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work declaration of competing interest none.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to all the scientific consultants of this paper.

مدل‌سازی حساسیت اکولوژیکی محیط به بیابان‌زایی با استفاده از مؤلفه‌های تسلدکپ و منطق فازی در استان واسط عراق

مریم بیاتی خطیبی^۱ , هاله عبدالکریم^۲، بختیار فیضی زاده^۳

- ۱- نویسنده مسئول، گروه سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی دانشگاه، تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: m_bayati@tabrizu.ac.ir
- ۲- گروه سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی دانشگاه، تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: alakarrem4@gmail.com
- ۳- گروه سنجش‌ازدور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشکده برنامه‌ریزی و علوم محیطی دانشگاه، تبریز، تبریز، ایران. رایانامه: bakhtiar.fezizadeh@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	کاهش پوشش گیاهی (پارامتر سبزیگی) و رطوبت خاک (پارامتر تری) که با افزایش بازتاب همراه هست (پارامتر روشنایی) از نشانه‌های اصلی آغاز آسیب اکوسیستم و ظهور بیابان‌زایی است. پارامترهای تری، سبزیگی و روشنایی، که نمایانگر وضعیت برهنگی خاک، هستند، به‌عنوان شاخص‌های اکولوژیکی در مدل‌سازی حساسیت بیابان‌زایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. استان واسط در جنوب شرقی کشور عراق و در مرز ایران قرار گرفته است (۳۲°۴۰' تا ۳۲°۶۰' شمالی/۳۲°۴۰' تا ۳۶°۴۶' شرقی). این استان به دلیل اقلیم خشک، موقعیت جغرافیایی خاص و فشارهای انسانی، به‌شدت آسیب‌پذیر است. این پژوهش باهدف ارزیابی حساسیت اکولوژیکی به بیابان‌زایی، از مؤلفه‌های مدل تسلدکپ شامل روشنایی، سبزیگی و رطوبت سطحی استفاده کرده که از داده‌های MODIS در سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲ استخراج شده‌اند. داده‌های MOD09A1 با قدرت تفکیک ۵۰۰ متر برای فصل سبزیگی انتخاب و پس از تبدیل تسلدکپ، مؤلفه‌ها با توابع عضویت فازی نرمال‌سازی و از طریق هم‌گذاری فازی تلفیق شدند. نقشه‌های حساسیت اکولوژیکی در پنج کلاس از کاملاً پایدار تا بسیار حساس طبقه‌بندی گردیدند. نتایج نشان داد که در سال ۲۰۱۰، ۱۲٪، ۷٪ از منطقه پایدار تا نیمه پایدار و ۶۵٪، ۷٪ بسیار حساس بود. در سال ۲۰۲۲، مناطق پایدار به ۱۱٪، ۲٪ کاهش و مناطق بسیار حساس به ۷۳٪، ۲٪ افزایش یافتند. مناطق پایدار عمدتاً در امتداد رودخانه دجله قرار داشتند. تحلیل تغییرات فازی نشان داد که تغییرات اکولوژیکی تدریجی و گسترده بوده‌اند.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۰۷ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۴ تاریخ چاپ: ۱۴۰۵/۰۴/۲۹	
واژگان کلیدی: بیابان‌زایی، مدل تسلدکپ، حساسیت اکولوژیکی، روی هم‌گذاری فازی، استان واسط، عراق.	

استاد: بیاتی خطیبی، مریم؛ عبدالکریم، هاله و فیضی زاده بختیار. (۱۴۰۵). مدل‌سازی حساسیت اکولوژیکی محیط به بیابان‌زایی با استفاده از مؤلفه‌های تسلدکپ و منطق فازی در استان واسط عراق. مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۵۸ (۲)، ۷۹-۹۰.
<http://doi.org/10.22059/jphgr.2026.400590.1007900>

مقدمه

بیابان‌زایی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی قرن بیست و یکم، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک، موجب کاهش توان اکولوژیکی، تخریب منابع طبیعی و ناپایداری اجتماعی و اقتصادی می‌شود (Jiang et al., 2014; Gutiérrez et al., 2014). این پدیده خزنه و چندعاملی، نه‌تنها حاصل فرآیندهای طبیعی مانند خشک‌سالی، شوری خاک و فرسایش بادی است، بلکه تحت تأثیر مستقیم فعالیت‌های انسانی نظیر چرای بی‌رویه، تبدیل اراضی مرتعی به کشاورزی، برداشت بی‌رویه منابع آب زیرزمینی و مدیریت نادرست زمین نیز قرار دارد (Li et al., 2009; Liu et al., 2015; Mihi et al., 2024). در سطح جهانی، سالانه بیش از ۱۲ میلیون هکتار از اراضی حاصلخیز در اثر بیابان‌زایی از دست می‌رود (Guterres, 2019). این روند نه‌تنها امنیت غذایی و منابع آب را تهدید می‌کند، بلکه موجب مهاجرت‌های زیست‌محیطی، تنش‌های اجتماعی و کاهش تاب‌آوری اکوسیستم‌ها می‌شود (Rivera-Marin et al., 2022). در این میان، کشورهایی مانند عراق که در کمربند خشک جهانی قرار دارند، با شدت بیشتری تحت تأثیر این پدیده قرار گرفته‌اند. استان واسط عراق، به دلیل موقعیت جغرافیایی خاص، اقلیم خشک، و فشارهای انسانی فزاینده، در معرض خطر جدی بیابان‌زایی قرار دارد (Zwain et al., 2021; Yousuf & Al-Khakani, 2021). پایش و ارزیابی بیابان‌زایی نیازمند ابزارهایی دقیق، مقیاس‌پذیر و قابل تکرار است. شاخص‌های اکولوژیکی مبتنی بر سنجش‌ازدور، از جمله NDVI، EVI، MSAVI، TGSi و BSI، به‌طور گسترده برای ارزیابی پوشش گیاهی، خاک برهنه و رطوبت سطحی استفاده شده‌اند (Zhu, 2017; Yue, et al., 2017). این شاخص‌ها در ترکیب با مدل‌های یادگیری ماشین مانند SVM، Random Forest، U-Net و دقت بالایی در طبقه‌بندی و پیش‌بینی مناطق بیابانی فراهم کرده‌اند (Xu et al., 2015; Xiao et al., 2006; Wu, et al., 2019). یکی از روش‌های مؤثر در استخراج اطلاعات اکولوژیکی از داده‌های MODIS، تبدیل تسلاکپ است که با ترکیب خطی باندهای بازتابی، سه مؤلفه کلیدی شامل روشنایی (Brightness)، سبزیگی (Greenness) و تری یا رطوبت سطحی (Wetness) را تولید می‌کند (Crist & Ciccone, 1984b). این مؤلفه‌ها به ترتیب نمایانگر وضعیت برهنگی خاک، تراکم پوشش گیاهی و رطوبت سطحی بوده و می‌توانند به‌عنوان شاخص‌های اکولوژیکی در مدل‌سازی حساسیت بیابان‌زایی مورد استفاده قرار گیرند (Roeder & Hill, 2009; Jin & Sader, 2005). مطالعات اخیر نشان داده‌اند که مؤلفه‌های Tasseled Cap در مناطق خشک، به‌ویژه در فصل سبزیگی، همبستگی بالایی با وضعیت اکولوژیکی سرزمین دارند و می‌توانند در شناسایی مناطق بحرانی و تحلیل روند تخریب مؤثر باشند (Qi, et al., 2019; Qu, et al., 2014; Xu, et al., 2015). مطالعات منطقه‌ای، (Zwain et al., 2021) و (Yousuf & Al-Khakani, 2021) در عراق، از تبدیل Tasseled Cap و شاخص‌های طیفی برای ارزیابی حساسیت اکولوژیکی استفاده کردند. در چین، (Feng et al., 2022) با ترکیب شاخص‌های NDVI، TGSi و LST و استفاده از الگوریتم‌های ماشین بردار پشتیبان، دقت بالایی در طبقه‌بندی مناطق بیابانی به دست آوردند. همچنین، (Zanchetta et al., 2016) از تبدیل Tasseled Cap برای پایش بلندمدت بیابان‌زایی در مناطق خشک استفاده کردند. با وجود پیشرفت‌های قابل‌توجه در مدل‌سازی بیابان‌زایی، هنوز خلأهایی در تلفیق شاخص‌های اکولوژیکی با داده‌های سری زمانی، تحلیل روند و ارزیابی حساسیت فضایی-زمانی وجود دارد. بسیاری از مدل‌ها به‌صورت مقطعی یا کیفی عمل می‌کنند و از لحاظ عملیاتی و مدیریتی قابل‌تعمیم نیستند (Liu et al., 2015; Rivera-Marin et al., 2022). در ایران نیز مطالعات متعددی با استفاده از مدل‌های مختلف مانند مدل‌های تاسکسومی عددی، FAO-UNEP و شبکه‌های عصبی مصنوعی انجام شده‌اند که هر یک به‌نوبه خود در ارزیابی شدت و حساسیت بیابان‌زایی نقش داشته‌اند (احمدی و همکاران، ۱۳۸۵؛ پاهنگ و همکاران، ۱۴۰۳). با این حال، بسیاری از این مدل‌ها یا

به‌صورت مقطعی عمل می‌کنند یا فاقد دقت مکانی کافی برای تحلیل در سطح پیکسل هستند (رحیمی و همکاران، ۱۳۹۲). همچنین، در اغلب مطالعات منطقه‌ای، تلفیق شاخص‌های اکولوژیکی با منطق فازی و پردازش ابری کمتر موردتوجه قرار گرفته است. در این راستا، پژوهش حاضر باهدف توسعه یک چارچوب تحلیلی یکپارچه برای مدل‌سازی حساسیت اکولوژیکی به بیابان‌زایی در استان واسط عراق طراحی شده است. تمرکز پژوهش بر استفاده از مؤلفه‌های تسلدکپ شامل روشنایی، سبزی‌گی و تری، استخراج شده از داده‌های MODIS و ترکیب آن‌ها با استفاده از منطق فازی مثلثاتی است. این مؤلفه‌ها پس از نرمال‌سازی فازی، در قالب جمع فازی هم‌گذاری شده‌اند تا نقشه‌های حساسیت اکولوژیکی در سطح پیکسل تولید شوند. انتخاب فصل سبزی‌گی (مارس تا ژوئن) نیز به‌منظور ثبت دقیق‌تر پویایی پوشش گیاهی و کاهش نویز فصلی صورت گرفته است. استفاده هم‌زمان از سه مؤلفه اکولوژیکی تسلدکپ در قالب جمع فازی، بهره‌گیری از Google Earth Engine برای پردازش ابری، مقیاس‌پذیر و تکرارپذیر داده‌ها، تولید نقشه‌های حساسیت اکولوژیکی در سطح پیکسل با قابلیت مقایسه زمانی؛ و ارائه چارچوبی قابل‌تعمیم برای مناطق خشک مشابه در خاورمیانه، شمال آفریقا و آسیای مرکزی از جنبه‌های نوآورانه این مقاله محسوب می‌شود. این رویکرد می‌تواند به‌عنوان الگویی برای پایش بیابان‌زایی در سایر مناطق آسیب‌پذیر مورد استفاده قرار گیرد.

روش پژوهش

برای ارزیابی وضعیت اکولوژیکی، از داده‌های بازتاب سطحی سنجنده MODIS، محصول MOD09A1 نسخه ۶ استفاده شد. این محصول داده‌های ترکیبی ۸ روزه با قدرت تفکیک مکانی ۵۰۰ متر ارائه می‌دهد (Feng et al., 2022)؛ Rivera-Mihi et al., 2024). بررسی‌ها با استفاده از داده‌های درازمدت صورت گرفته است اما برای بارز سازی و درک بهتر تغییرات رخ داده، تحلیل حاضر بر دو سال کلیدی ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲ متمرکز بوده (به علت داده‌های مورد دسترس) و به فصل سبزی‌گی (مارس تا ژوئن) محدود شده است تا بیشینه فعالیت پوشش گیاهی ثبت شود و اثرات فصلی کاهش یابد (Wu et al., 2019)؛ هاشم گلوگردی و همکاران، ۱۴۰۳). در این مطالعه برای حذف ابرها از اعمال ماسک ابر (Cloud Masking) استفاده شد و پیکسل‌های ابری با مقدار NaN مشخص شد تا مراحل در مراحل بعدی قابل تشخیص باشد. اعتبارسنجی نتایج حذف ابر با استفاده از $RMSE = Np \cdot \sqrt{\text{man-squared-error}}$ و با استفاده پایتون صورت گرفت. برای استخراج مؤلفه‌های اکولوژیکی از داده‌های MODIS، تبدیل تسلدکپ با استفاده از ضرایب پیشنهادی Crist و Cicone (1984b) اعمال شد. این تبدیل سه شاخص اصلی را تولید می‌کند:

-روشنایی (Brightness): بازتاب کلی سطح و میزان برهنگی خاک؛ سبزی‌گی (Greenness): شدت و تراکم پوشش گیاهی، تری یا رطوبت (Wetness): رطوبت سطحی و محتوای آبی پوشش گیاهان. این مؤلفه‌ها در مطالعات بیابان‌زایی و تخریب سرزمین در مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌عنوان شاخص‌های کلیدی شناخته شده‌اند (Zanchetta et al., 2016; Roeder & Hill, 2009; Jin & Sader, 2005; Pei et al., 2019). دلیل این امر به این برمی‌گردد که با کاهش سبزی‌گی و رطوبت، چسبندگی در خاک کاهش یافته و حساسیت خاک به انواع فرسایش افزایش می‌یابد و در این شرایط هست که میزان جذب در خاک کاهش و بازتاب از آن افزایش می‌یابد.

فرمول‌های تبدیل به شرح روابط ۱، ۲ و ۳ هستند (شاخص‌های تسلدکپ در سنجنده مادیس):

$$\text{Brightness} = 0.4395B1 + 0.5945B2 + 0.2460B3 + 0.3918B4 + 0.3506B5 + 0.2136B6 + 0.2678B7$$

$$\text{Greenness} = -0.4064B1 - 0.5129B2 - 0.2744B3 + 0.2893B4 + 0.4882B5 + 0.5468B6 + 0.5886B7$$

$$\text{Wetness} = 0.1147B1 + 0.2489B2 + 0.2408B3 + 0.3132B4 - 0.3122B5 - 0.6416B6 - 0.5087B7$$

که در آن B1 تا B7 نمایانگر باندهای بازتاب سطحی MODIS هستند.

تمام مراحل پردازش در محیط Google Earth Engine (GEE) انجام شد. برای هر سال:

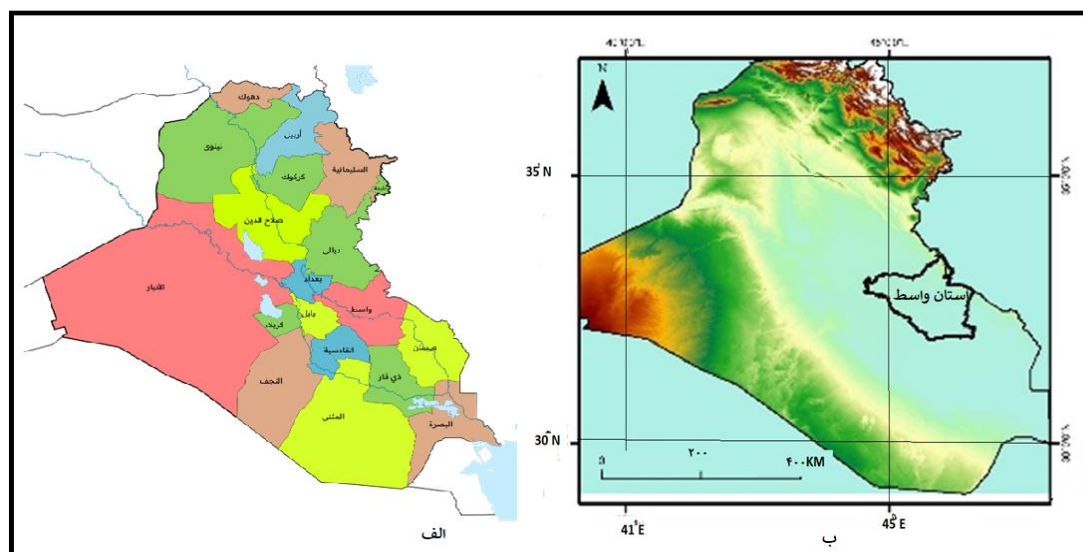
تصاویر MOD09A1 بر اساس تاریخ (مارس تا ژوئن) و محدوده مکانی (استان واسط) فیلتر شدند، تبدیل تسلدکپ با ضرایب فوق بر روی تصاویر اعمال شد، ترکیب میانه (median composite) برای کاهش نویز و حذف اثر ابرها تولید گردید، هر یک از مؤلفه‌های روشنایی، سبزیگی و تری به صورت جداگانه استخراج و برای تحلیل‌های بعدی ذخیره شدند. برای ترکیب شاخص‌ها و تولید نقشه حساسیت اکولوژیکی، از روش فازی سازی مثلثاتی (خطی) استفاده شد. هر مؤلفه به صورت جداگانه نرمال سازی فازی گردید و سپس با استفاده از جمع فازی (Fuzzy Overlay) ترکیب شدند. این روش امکان تلفیق تدریجی و پیوسته شاخص‌ها را فراهم می‌سازد و به جای طبقه بندی قطعی، درجه عضویت هر پیکسل در وضعیت شکننده اکولوژیکی را نمایش می‌دهد (Liu et al., 2015; Azzouzi et al., 2017). اعتبارسنجی با استفاده از تابع عضویت تخصیص داده شده به مقادیر ورودی انجام شد. خروجی نهایی برای هر سال شامل سه فایل GeoTIFF مربوط به مؤلفه‌های تسلدکپ بود:

Brightness_YYYY.tif, Greenness_YYYY.tif, Wetness_YYYY.tif

این فایل‌ها در پوشه‌ای با نام Wasit_TasseledCap در فضای Google Drive ذخیره شدند. قدرت تفکیک مکانی خروجی‌ها ۵۰۰ متر بوده و به محدوده استان واسط برش داده شده‌اند.

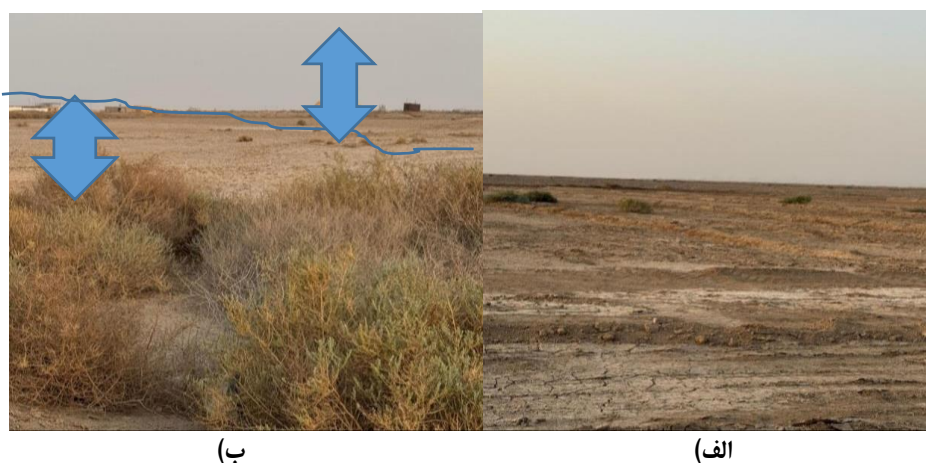
محدوده مورد مطالعه

مطالعه حاضر در استان واسط عراق، واقع در جنوب شرقی کشور، انجام شد (شکل ۱). این استان به دلیل موقعیت جغرافیایی خاص، اقلیم خشک، و فشارهای انسانی، یکی از مناطق مستعد بیابان‌زایی در عراق محسوب می‌شود (Zwain et al., 2021; Yousuf & Al-Khakani, 2021). محدوده مکانی پژوهش با استفاده از مختصات جغرافیایی زیر تعریف گردید: °۳۳،۵۱۰۸۵۸ شمالی °۳۱،۹۳۳۷۰۱ جنوبی °۴۴،۵۳۰۶۷۴ غربی °۴۶،۶۱۰۲۳۴۰ شرقی. این محدوده مستطیلی برای برش داده‌های ماهواره‌ای و محدودسازی تحلیل‌ها به شرایط اکولوژیکی داخل استان واسط مورد استفاده قرار گرفت. بر اساس آخرین سرشماری عراق در سال ۱۹۹۷، جمعیت استان واسط ۶۸۷۳۵۴ نفر گزارش شده است اما در حال حاضر و بر اساس آمار اعلام شده از سوی وزارت بازرگانی عراق (کوپن‌های صادر شده در استان) جمعیت فعلی استان واسط ۱۱۴۱۰۰۰ نفر برآورد می‌شود.



شکل ۱. محدوده مورد مطالعه، الف) جایگاه استان واسط در میان سایر استان‌ها و ب) محدوده ارتفاعی و مختصات استان

با توجه به گستره زیاد خاک ریزبافت و فاقد رطوبت، که بخش عمده نیز عاری از پوشش گیاهی (شکل ۲، الف) هست، به هنگام وزش باد این محدوده، به محل خیزش ریزگرد تبدیل می‌شود. ریزش‌های جوی زیر ۱۰۰ میلی‌متر در سال و قرارگیری محدوده مورد مطالعه در قسمت کم ارتفاع، ریزگردهای بر خواسته از این محدوده، شرایط سختی را برای خود منطقه و کشور همسایه، مانند ایران پدید آورده است. با عنایت به ریز بودن بافت خاک، جولان باد به‌سادگی ذرات را از سطح جدا کرده و هوای تنفسی در سطح منطقه و محدوده‌های اطراف را با گردوخاک آلوده می‌کند (شکل ۲، ب). با وزش باد، آلودگی هوای چندمتری بالای خاک از لایه هوای بالاتر مشخص می‌گردد (شکل ۲).



شکل ۲. بیابان الواسط عراق، الف) وضعیت خاک و پوشش گیاهی محدوده مورد مطالعه و ب) بر خواستن ریز گردها از سطح خاک

یافته‌ها

در این مطالعه ابتدا با بررسی‌های میدانی، سعی شد اطلاعاتی در مورد ویژگی‌های جغرافیای محلی از قبیل تراکم و نوع پوشش گیاهی، در رابطه با ناهمواری‌های موجود، قشربندی و دانه‌بندی خاک و جمع‌آوری شود و پهنه‌های مختلف مورد مقایسه قرار گیرد (شکل ۳ الف وب).

این بخش به توصیف شاخص‌های اکولوژیکی استخراج‌شده از مؤلفه‌های تسلدکپ شامل روشنایی، سبزی‌نگی و تری در سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲ می‌پردازد. شاخص‌ها پس از نرمال‌سازی فازی و با توجه به تفاوت در پهنه‌ها و شاخص‌ها، در پنج طبقه حساسیت اکولوژیکی دسته‌بندی شدند و با طیف رنگی از سبز تیره (پایدار) تا قرمز تند (بسیار حساس) نمایش داده شدند (جداول ۱، ۲، ۳). نقشه‌های حاصل، با استفاده از طیف رنگی از سبز تیره تا قرمز، درجه عضویت فازی هر پیکسل را در وضعیت شکننده اکولوژیکی نشان می‌دهند.



شکل ۳. الف) وب) بازدید میدانی از بخش‌های مختلف محدوده مورد مطالعه

در این طیف، رنگ سبز تیره تا بنفش بیانگر کمترین درجه عضویت و شرایط نسبتاً مساعد اکولوژیکی است، درحالی‌که رنگ قرمز نشان‌دهنده بالاترین درجه عضویت و شرایط شکننده، ناپایدار و اغلب خشک و فاقد پوشش گیاهی است (شکل ۴). تغییرات شاخص‌ها بین ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲ به‌صورت زیر بوده است:

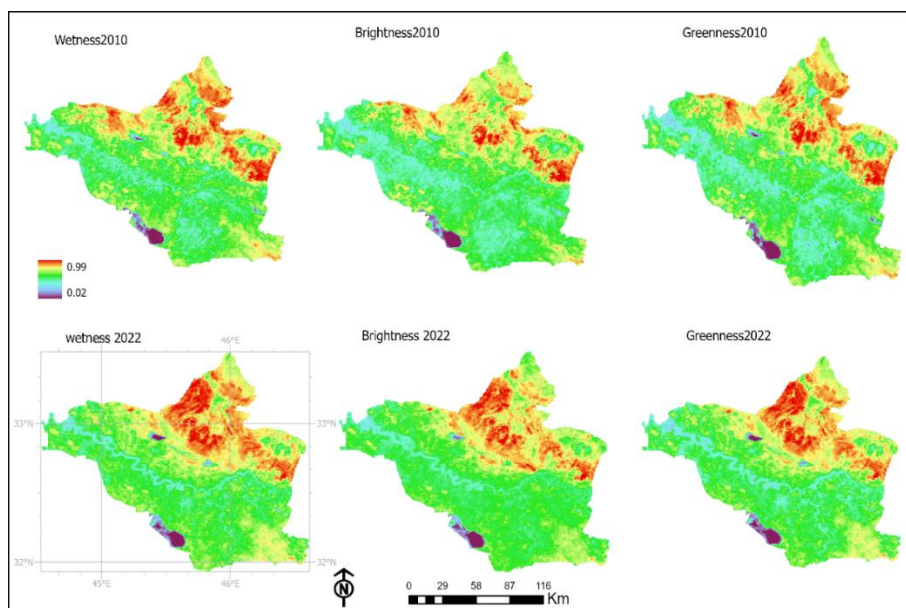
- شاخص تری (Wetness) در سال ۲۰۱۰، بخش‌هایی از استان به‌ویژه در مجاورت رودخانه دجله دارای درجه عضویت پایین‌تر (بنفش تا آبی) بودند که نشان‌دهنده رطوبت نسبی و شرایط اکولوژیکی مساعدتر است. در سال ۲۰۲۲، گسترش رنگ‌های نارنجی و قرمز در این شاخص نشان‌دهنده کاهش رطوبت و افزایش خشکی در بخش‌های وسیع‌تری از منطقه است.

- شاخص روشنایی (Brightness) افزایش رنگ‌های گرم‌تر در سال ۲۰۲۲ نسبت به ۲۰۱۰ نشان‌دهنده افزایش بازتاب سطحی، که معمولاً با کاهش پوشش گیاهی و افزایش خاک‌های برهنه همراه است. این تغییر می‌تواند نشانه‌ای از تخریب سطح زمین و بیابان‌زایی باشد.

- شاخص سبزی (Greenness) در سال ۲۰۱۰، پراکندگی رنگ‌های سردتر نشان‌دهنده پوشش گیاهی نسبی در بخش‌هایی از استان است. در سال ۲۰۲۲، کاهش رنگ‌های بنفش و افزایش رنگ‌های نارنجی و قرمز بیانگر کاهش سبزی‌نگی و افت کیفیت اکولوژیکی در بسیاری از مناطق است. نقشه‌های فازی شده شاخص‌های تسلدکپ نشان می‌دهند که استان واسط عراق طی بازه زمانی ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲ با روندی از کاهش رطوبت، افزایش روشنایی سطحی و افت سبزی‌نگی مواجه بوده است. این تغییرات، به‌ویژه در مناطق دور از رودخانه دجله، بیانگر افزایش شکنندگی اکولوژیکی و گسترش شرایط بیابانی هستند.

جدول ۱. طبقه بندی شاخص روشنایی، شاخص سبزیگی و شاخص تری (رطوبت سطحی)

رنگ پیشنهادی	درجه حساسیت	مقدار روشنایی	مقدار سبزیگی	شاخص تری (رطوبت سطحی)
● قرمز تند	بسیار حساس	۵۸۱۱۱۹، ۱۱، ۲۸۲۸۴۴-۸	۲۴۷۲-۱۳۸۹	(-۳۷۳۲)-(-۴۹۴۶/۷۵۹)
□ نارنجی	حساس	۷۸-۳۰۹۷۱۸، ۵۸۱۱۱۸	۳۰۹۰-۲۴۷۳	(-۳۷۳۱)-(-۳۰۵۱)
□ زرد	نیمه حساس	۶۰۷-۱۹۷۳۴۳، ۳۰۹۷۱۷	۳۷۹۰-۳۰۹۱	(-۳۰۵۰)-(-۲۴۵۴)
□ سبز	کم حساس	۴۶-۶۰۲۰۷۵، ۱۹۷۳۴۲	۵۱۳۰-۳۷۹۱	(-۲۴۵۳)-(-۱۳۴۷)
● سبز تیره تا بنفش	پایدار	۱۶۰۲۰۷۴-۱۵۱۳۷۲	۱۷۴۹-۵۱۳۱	(-۱۳۴۶)-(-۴۸۴، ۲۵۸)



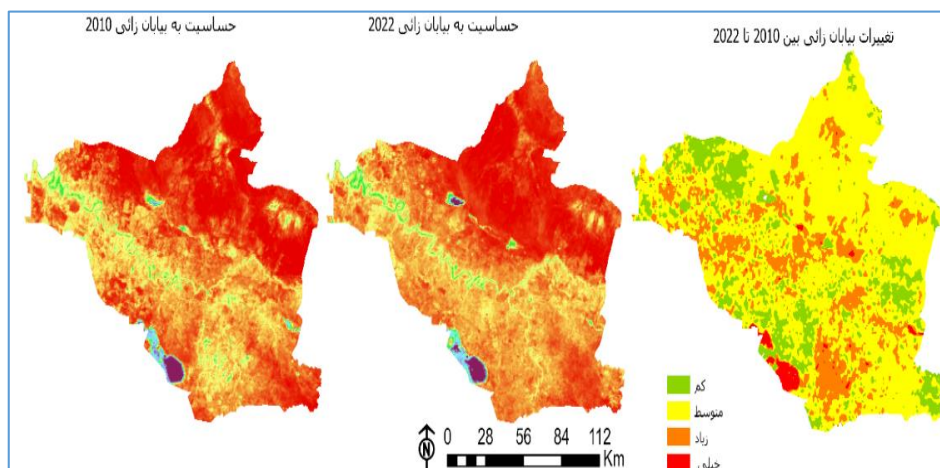
شکل ۴. شاخص های فازی شده Tasseled cap

در این بخش به تحلیل عددی و فضایی طبقات حساسیت اکولوژیکی (جدول ۲)، مقایسه سال های ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲، و بررسی روند تغییرات اکولوژیکی در استان واسط عراق پرداخته شده است. مطابق با جدول ۲ ملاحظه می شود که سهم کلاس های پایدار (۱ تا ۳) از ۱۲،۷٪ در سال ۲۰۱۰ به ۱۱،۲٪ در سال ۲۰۲۲ کاهش یافته است و همچنین سهم کلاس ۵ (بسیار حساس) از ۶۵،۷٪ به ۷۳،۸٪ افزایش یافته است و نیز سهم کلاس ۴ (حساس) از ۲۲،۶٪ به ۱۵،۰٪ کاهش یافته، که احتمالاً ناشی از انتقال بخشی از این مناطق به کلاس ۵ بوده است. پراکندگی نقاط قرمز در سال ۲۰۲۲ نشان دهنده گسترش بیابان زایی در مناطق پیرامونی و دور از رودخانه دجله است. نقشه توزیع فضایی تغییرات، با استفاده از طیف رنگی از سبز پررنگ تا قرمز، شدت تغییرات را در سطح استان واسط نمایش می دهد (شکل ۵). رنگ قرمز نشان دهنده مناطق با تغییرات بسیار زیاد، نارنجی تغییرات زیاد، زرد تغییرات متوسط، سبز تغییرات کم، و سبز پررنگ تغییرات بسیار کم است. رودخانه دجله که در مرکز استان جریان دارد، به عنوان یک عنصر هیدرولوژیکی کلیدی، نقش مهمی در الگوی تغییرات دارد. مشاهده می شود که در حاشیه رودخانه، به ویژه در نواحی پایین دست، تغییرات اکولوژیکی شدیدتری رخ داده اند که می تواند ناشی از نوسانات سطح آب، تغییرات کاربری زمین، یا فشارهای انسانی باشد. این الگوی فضایی نشان می دهد که تغییرات اکولوژیکی در استان واسط نه تنها از نظر شدت، بلکه از نظر توزیع مکانی نیز ناهمگن بوده اند. مناطق مرکزی و مجاور رودخانه دجله بیشتر در معرض تغییرات شدید قرار داشته اند، در حالی که نواحی پیرامونی و دور از منابع آبی تغییرات کمتری را تجربه کرده اند. این یافته ها می توانند مبنایی برای تدوین راهبردهای مدیریتی منطقه ای، به ویژه در حوزه احیای اکوسیستم های حساس و مدیریت منابع آب باشند. بیشترین تعداد پیکسل ها در بازه ۰، ۵۷ تا ۰، ۶۲

قرار دارند، که بیانگر آن است که بخش عمده‌ای از منطقه مورد مطالعه تغییراتی با شدت متوسط را تجربه کرده‌اند. عدم وجود مقادیر منفی در هیستوگرام نشان می‌دهد که تابع تغییرات به صورت نرمال شده و در قالب مقادیر مثبت تعریف شده است، به طوری که مقادیر بالاتر نشان‌دهنده شدت بیشتر تغییرات هستند، بدون آن که جهت تغییر (مثبت یا منفی) مشخص باشد. توزیع نرمال تغییرات فازی حاکی از آن است که فرآیندهای اکولوژیکی در منطقه به صورت تدریجی و گسترده رخ داده‌اند، نه به صورت موضعی یا ناگهانی. این الگو می‌تواند ناشی از عوامل اقلیمی یکنواخت، تغییرات تدریجی در کاربری زمین، یا اقدامات مدیریتی همگن در سطح منطقه باشد. با توجه به این نتایج، پیشنهاد می‌شود تحلیل‌های فضایی تکمیلی بر روی نقشه تغییرات انجام گیرد تا الگوهای مکانی تغییرات مشخص شده و مناطق با تغییرات شدیدتر یا حساس‌تر شناسایی شوند.

جدول ۲. طبقات حساسیت اکولوژیکی مربوط به سال ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲

کلاس	درجه حساسیت	تعداد پیکسل		مساحت (مترمربع)		درصد از کل مساحت	
		۲۰۲۲	۲۰۱۰	۲۰۲۲	۲۰۱۰	۲۰۲۲	۲۰۱۰
۱	کاملاً پایدار	۲۴۰	۴۸۱	۵۱/۰۷۴۹۹۳	۱۰۲/۳۶۲۷۹۸	۱،۲	۴،۳
۲	پایدار	۵۱۹	۴۴۴	۱۱۰/۴۴۹۶۷۲	۹۴/۴۸۸۱۷۳۷	۴،۵	۴
۳	نیمه پایدار	۵۲۶	۳۸۲	۱۱۱/۹۳۹۳۵۹	۸۱/۲۹۴۳۶۳	۶،۴	۴،۳
۴	حساس	۱،۷۴۴	۲/۵۲۳	۳۷۱/۱۴۴۹۴۷	۵۳۶/۹۲۵۸۶۱	۱۵،۶	۲۲،۶
۵	بسیار حساس	۸۱،۶۸۴	۸۰/۸۸۳	۱/۷۳۷۰۰۰۰۰	۱/۵۵۸۵۳۷۲۴۱	۷۳،۲	۶۵،۷۷



شکل ۵. حساسیت به بیابان زائی و تغییرات آن طی دوره مورد مطالعه

بحث

بررسی توزیع فضایی طبقات حساسیت مشخص می‌کند که مناطق با حساسیت بسیار بالا (کلاس ۵) در سال ۲۰۲۲ بیش از ۷۳٪ از سطح استان را در بر گرفته‌اند که نسبت به سال‌های گذشته گسترش قابل ملاحظه‌ای را نشان می‌دهد. این گسترش نشان‌دهنده فشار بیش از حد بر محیط و استفاده از خارج از توان آن می‌باشد که در سایر مناطق نیز به عنوان یکی از اولین و مهم‌ترین عامل گسترش بیابان‌زایی معرفی می‌شود (دستورانی، ۲۰۲۲). یافته‌های این پژوهش با استفاده از مؤلفه‌های تسلدکپ شامل روشنایی، سبزی‌نگی و تری مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای MODIS و نقشه‌ای ترکیبی از حساسیت اکولوژیکی تولید شده نشان می‌دهد که الگوهای فضایی زیست‌محیطی را در سطح منطقه تا چه حد شکننده است. این ناپایداری شرایط به تغییرات در ویژگی‌های خاک برمی‌گردد که با تغییرات در میزان رطوبت خاک، توان آن در برابر انواع فرسایش کاهش می‌یابد (این امر با یافته‌های Dave & Sar, 2018 مطابقت می‌کند) این مناطق عمدتاً در

نواحی شمالی، جنوبی و پیرامونی استان واقع شده‌اند و با ویژگی‌هایی نظیر پوشش گیاهی ضعیف، بازتاب سطحی بالا و کاهش رطوبت مشخص می‌شوند. در مقابل، مناطق نسبتاً پایدار (کلاس‌های ۱ و ۲) عمدتاً در امتداد رودخانه دجله متمرکز هستند، که نقش حیاتی عناصر هیدرولوژیکی در حفظ تاب‌آوری اکولوژیکی را برجسته می‌سازد. این امر مشخص می‌کند که نقش رطوبت در افزایش تاب‌آوری محیط برای تحمل خشک‌سالی‌ها تا چه حد اهمیت دارد. مقایسه یافته‌های سال آخر با داده‌های سال ۲۰۱۰ نیز نشان‌دهنده گسترش قابل توجه مناطق شکننده طی یک دهه گذشته است، که احتمالاً ناشی از تشدید فرآیندهای تخریب سرزمین، نوسانات اقلیمی، فشارهای انسانی، و کاهش دسترسی به منابع آبی بوده است. این نتایج با یافته‌های Roder and Hill (2009) و Li and El-Askary (2020) مطابقت نشان می‌دهد. بازه تغییرات فازی را از حدود ۰.۵۱ تا ۰.۶۵ نشان می‌دهد که بخش عمده‌ای از منطقه مورد مطالعه تغییراتی با شدت متوسط تا زیاد را تجربه می‌کند. عدم وجود مقادیر منفی در هیستوگرامی که تهیه و بررسی شد، نشان می‌دهد که تابع تغییرات به صورت نرمال شده و در قالب مقادیر مثبت تعریف شده است، به طوری که مقادیر بالاتر نشان‌دهنده شدت بیشتر تغییرات هستند، بدون آن که جهت تغییر (مثبت یا منفی) مشخص باشد. توزیع نرمال تغییرات فازی حاکی از آن است که فرآیندهای اکولوژیکی در منطقه به صورت تدریجی و گسترده رخ داده‌اند، نه به صورت موضعی یا ناگهانی. این الگو می‌تواند ناشی از عوامل اقلیمی یکنواخت، تغییرات تدریجی در کاربری زمین، یا اقدامات مدیریتی همگن در سطح منطقه باشد که قابل مقایسه با نتایج به دست آمده از یافته‌های Azzouzi et al., 2017 می‌باشد.

نتیجه گیری

استان واسط عراق، به عنوان یکی از مناطق در معرض خطر شدید بیابان‌زایی، است که شدت تغییرات به صورت نموده‌های مختلف خودنمایی می‌کند. کاهش رطوبت خاک، کاهش پوشش گیاهی و به دنبال آن افزایش بازتاب اکوسیستم محدوده مورد مطالعه را به طور کلی تغییر داده است. یکی از پیامدهای مهم آن افزایش ریزگردهای ناشی از بی‌حفاظ شدن زمین و انتقال آن به کشورهای هم‌جوار است. بررسی‌هایی که با استفاده از مؤلفه‌های تسلدکپ شامل روشنایی، سبزیگی و تری، و همچنین با بهره‌گیری از نرمال سازی فازی و هم‌گذاری تدریجی شاخص‌ها، و تهیه نقشه‌های حساسیت اکولوژیکی برای سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۲۲ نشان داد که در سال ۲۰۱۰، حدود ۶۵.۷٪ از سطح استان در کلاس بسیار حساس قرار داشت، در حالی که در سال ۲۰۲۲ این مقدار به ۷۳.۲٪ افزایش یافته است که با ادامه بی‌توجهی به شرایط اکولوژیکی و تداوم خشکی وضعیت به مراتب بدتر خواهد شد. محدوده‌هایی که در سال ۲۰۱۰ به لحاظ وجود رطوبت از مناطق پایدار محسوب می‌شدند (به‌ویژه در مجاورت رودخانه دجله) در سال ۲۰۲۲ به صورت پراکنده و محدود باقی مانده‌اند که با ادامه سدسازی‌ها در بخش‌های بالادست این محدوده‌ها، رطوبت خاک به تدریج از بین رفته و خاک بیشتر در معرض فرسایش بادی قرار خواهد گرفت. تغییرات فازی در محدوده مورد مطالعه نشان داد که تغییرات اکولوژیکی عمدتاً تدریجی، یکنواخت و گسترده بوده‌اند، نه موضعی یا ناگهانی. این یافته‌ها نشان‌دهنده تشدید روند تخریب اکولوژیکی، کاهش پوشش گیاهی و رطوبت سطحی و همچنین افزایش بازتاب خاک‌های برهنه در سطح استان هستند. از منظر مدیریتی، نقشه‌های تولید شده می‌تواند به عنوان ابزار تصمیم‌گیری برای اولویت‌بندی مناطق بحرانی، تدوین راهبردهای احیایی و برنامه‌ریزی کاربری زمین مورد استفاده قرار گیرند. در مجموع، این پژوهش علاوه از نمایش تغییرات در وضعیت اکوسیستم در بیشتر از یک دهه گذشته، نشان داد که تلفیق داده‌های MODIS، مؤلفه‌های تسلدکپ و منطق فازی می‌تواند چارچوبی قدرتمند برای پایش بیابان‌زایی و ارزیابی حساسیت اکولوژیکی فراهم کند. این رویکرد

نه تنها وضعیت فعلی را به صورت دقیق نمایش می‌دهد، بلکه امکان تحلیل روند، شناسایی مناطق بحرانی، و پشتیبانی از تصمیم‌گیری مدیریتی را نیز فراهم می‌سازد. روش هم‌گذاری فازی در این مطالعه امکان نمایش گذارهای تدریجی و ناهمگونی فضایی را فراهم کرد و تصویری دقیق‌تر از حساسیت اکولوژیکی نسبت به روش‌های طبقه‌بندی قطعی ارائه داد. از منظر مدیریتی، نقشه‌های تولیدشده می‌توانند به عنوان ابزاری کاربردی برای اولویت‌بندی مناطق بحرانی، هدایت اقدامات احیایی، و پشتیبانی از برنامه‌ریزی کاربری زمین مورد استفاده قرار گیرند. تلفیق سنجش‌ازدور و منطق فازی، ارزیابی‌هایی مقیاس‌پذیر و قابل تکرار را فراهم می‌سازد که می‌تواند در سایر مناطق خشک و نیمه‌خشک با چالش‌های مشابه نیز به کار گرفته شود. در مجموع، این پژوهش نشان داد که مدل‌سازی مبتنی بر مؤلفه‌های تسلسلک می‌تواند در مطالعات بیابان‌زایی بسیار مؤثر باشد و ضرورت تدوین راهبردهای پیشگیرانه و فضایی‌محور برای مقابله با تخریب اکولوژیکی در چشم‌اندازهای آسیب‌پذیر را تقویت می‌کند. در نهایت می‌توان اضافه نمود که اکوسیستم‌های مناطق خشک و نیمه‌خشک از حساسیت زیادی برخوردارند عدم توجه به این حساسیت‌ها می‌تواند محیط را به مسیر بی‌بازگشت سوق دهد که به هیچ تدبیری دیگر نتوان اکوسیستم را احیا نمود.

حامی ملی

این اثر حامی مالی ندارد.

سهم نویسندگان در پژوهش

تمامی نویسندگان اثر سهم برابر دارند

تضاد منافع

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

تقدیر و تشکر

نویسندگان از همه کسانی که در انجام این پژوهش یاور بوده‌اند، تقدیر و تشکر می‌نمایند.

منابع

- احمدی، حسن؛ اختصاصی، محمدرضا؛ گلکاریان، علی و ابریشم، الهام. (۱۳۸۵). ارزیابی و تهیه نقشه بیابان‌زایی با استفاده از مدل مدالوس در منطقه فخرآباد - مهریز (یزد). *نشریه دانشکده منابع طبیعی*، ۵۹ (۳)، ۵۱۹-۵۳۹.
- پاهنگ، آسیه؛ چوقی، بایرام، ذولفقاری، فرهاد؛ عسگری، حمیدرضا و نظرنژاد، حبیب. (۱۴۰۳). ارزیابی بیابان‌زایی و ارزشیابی مکانی بیابان‌زایی با مدل مدالوس در شهرستان سراوان. *مهندسی اکوسیستم بیابان*، ۱۳ (۴۳)، ۴۳-۴۶. doi:10.22052/deej.2025.255707.1082۶۰
- رحیمی، محمد؛ دماوندی، علی‌اکبر و جعفریان، وحید. (۱۳۹۲). بررسی کاربرد سنجش‌ازدور در ارزیابی و پایش تخریب سرزمین و بیابان‌زایی. *نشریه سپهر*، ۲۶ (۸۸)، ۱۱۵-۱۲۸.
- ذاکری، رضا؛ جعفری، غلامحسین و رضاپوریان قهفرخی، الهه. (۱۴۰۴). ارزیابی روند بیابان‌زایی با استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی و تغییرات ضریب آلودگی در دوره زمانی، ۲۰۲۳-۲۰۰۰، مطالعه موردی: حوضه آبریز مند در جنوب غرب ایران، فصلنامه پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۵۷ (۲)، ۵۷-۷۶. doi:10.22059/jphgr.2025.391710.1007876
- هاشم گلوگردی، ساره؛ ولی، عباسعلی و شریفی، محمدرضا. (۱۴۰۰). بررسی روند بیابان‌زایی در مرکز استان خوزستان با استفاده از داده‌های سری‌های زمانی سنجش‌ازدور، *مجله تحقیقات آب‌و‌خاک*، ۵۲ (۱۱)، ۲۸۴۳-۲۸۵۷. DOI:10.22059/ijswr.2021.331741.669092

قره چلو، سعید؛ اختصاصی، محمدرضا؛ زارعیان، جهرمی، مجتبی و صمدی، محمدباقر. (۱۳۸۹). ارزیابی وضعیت فعلی بیابان‌زایی با استفاده از مدل I. C. D مطالعه موردی: منطقه خضرآباد- همت‌آباد یزد، *تحقیقات مرتع و بیابان ایران*، ۱۷ (۳)، ۴۰۲-۴۲۰.

مقصودی، مهران؛ گورابی، گورابی، ابوالقاسم؛ یمانی، مجتبی و قلیزاده، آیلا. (۱۴۰۴). تحلیل منابع ماسه‌های بادی بر اساس تلفیق تحلیل باد و مورفومتری ذرات ماسه مطالعه موردی: دشت بورالان آذربایجان. *فصلنامه پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی*، ۵۷ (۳)، ۸۵-۶۳. <http://doi.org/10.22059/jphgr.2025.395829.1007885>

References

- Ahmadi, H., Ekhtesasi, M., Golkarian, A., & Abrisham, E. (2006). Assessment and mapping of desertification using modification MEDALUS model in Fakharabad-Mehriz (Yazd). *Journal of the Iranian Natural Resources*, 59(3), 519-532. [in Persian]
- Azzouzi, S. A., Vidal-Pantaleoni, A., & Bentounes, H. A. (2017). Desertification monitoring in Biskra, Algeria, with Landsat imagery by means of supervised classification and change detection methods. *IEEE Access*, 5, 9065-9072. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2706263>
- Crist, E. P., & Cicone, R. C. (1984). A physically-based transformation of Thematic Mapper data—The TM Tasseled Cap. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 22(3), 256-263. <https://doi.org/10.1109/TGRS.1984.350619>
- Dastorani, M. (2022). Investigating the status of desertification vulnerability in Joghatay County, Iran. *Desert Ecosystem Engineering Journal*, 11(7), 1-12. <https://doi.org/10.22052/jdee.2021.243122.1077>
- Dave, V., & Sur, K. (2018). Fuzzy integrated desertification vulnerability model. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-5, 395-401. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-5-395-2018>
- Feng, K., Wang, T., Liu, S., Kang, W., Chen, X., Guo, Z., & Zhi, Y. (2022). Monitoring desertification using machine-learning techniques with multiple indicators derived from MODIS images in Mu Us Sandy Land, China. *Remote Sensing*, 14(11), 2663. <https://doi.org/10.3390/rs14112663>
- Gharachelo, S., Ekhtesasi, M., Zareian, M., Jahromi, M., & Samadi, B. (2015). Evaluation of current condition of desertification using I.C.D model (Case study: Khezh Abad, Yazd). *Iranian Journal of Ranges and Desert*. [in Persian]
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Gutiérrez, F., Parise, M., De Waele, J., & Jourde, H. (2014). A review on natural and human-induced geohazards and impacts in karst. *Earth-Science Reviews*, 138, 61-88. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.08.002>
- Hashem Geloogardi, S., Vali, A., & Sharifi, M. (2022). Investigation of desertification trend in the center of Khuzestan Province using remote sensing time series data. *Journal of Water and Soil Research*, 52(11), 2843-2857. <https://doi.org/10.22059/IJSWR.2021.331741.669092> [in Persian]
- Jiang, Z., Lian, Y., & Qin, X. (2014). Rocky desertification in Southwest China: Impacts, causes, and restoration. *Earth-Science Reviews*, 132, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.01.005>
- Jin, S., & Sader, S. A. (2005). Comparison of time series Tasseled Cap wetness and the normalized difference moisture index in detecting forest disturbances. *Remote Sensing of Environment*, 94(3), 364-372. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.10.012>
- Li, Y. B., Shao, J. A., Yang, H., & Bai, X. Y. (2009). The relations between land use and karst rocky desertification in a typical karst area, China. *Environmental Geology*, 57(3), 621-627. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1331-z>
- Liu, S., Wang, T., Kang, W., & David, M. (2015). Several challenges in monitoring and assessing desertification. *Environmental Earth Sciences*, 73(2), 1019-1030. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3475-3>
- Maghsoudi, M., Goorabi, A., Yamani, M., & Gholizadeh, A. (2025). Investigating aeolian sand sources through integrated wind analysis and grain morphometry: A case study of Boralan

- Plain, West Azerbaijan Province, Iran. *Physical Geography Research Quarterly*, 57(3), 63-85. <https://doi.org/10.22059/jphgr.2025.395829.1007885> [in Persian]
- Mihi, A., Zerroug, K., Kouachi, M. E., & Benarfa, N. (2024). Spatiotemporal changes of desertification degree in the Algerian green barrier over the last four decades (1984-2020). *Arid Land Research and Management*. <https://doi.org/10.1080/15324982.2024.2303468>
- Pahang, A., Chooghi, B., Zolfaghari, F., Asgari, H., & Nazarnejad, H. (2024). Desertification evaluation and its site assessment: A case study of Saravan City, Sistan and Baluchestan Province, Iran. *Desert Ecosystem Engineering*, 13(43), 43-60. <https://doi.org/10.22052/DEEJ.2025.255707.1082> [in Persian]
- Pei, J., Wang, L., Wang, X., Niu, Z., Kelly, M., Song, X. P., & Geng, J. (2019). Time series of Landsat imagery shows vegetation recovery in two fragile karst watersheds in southwest China from 1988 to 2016. *Remote Sensing*, 11(17), 2044. <https://doi.org/10.3390/rs11172044>
- Qi, X., Zhang, C., & Wang, K. (2019). Comparing remote sensing methods for monitoring karst rocky desertification at sub-pixel scales in a highly heterogeneous karst region. *Scientific Reports*, 9, 49730. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-49730-9>
- Qu, L., Han, W., Lin, H., Zhu, Y., & Zhang, L. (2014). Estimating vegetation fraction using hyperspectral pixel unmixing method: A case study of a karst area in China. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(11), 4559-4565. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2014.2361253>
- Rivera-Marin, D., Dash, J., & Ogutu, B. (2022). The use of remote sensing for desertification studies: A review. *Journal of Arid Environments*, 206, 104829. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2022.104829>
- Roeder, A., & Hill, J. (2009). Ecological indicators derived from MODIS Tasseled Cap transformation. *Ecological Modelling*, 220(9-10), 1192-1203. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2009.01.011>
- Wu, Z., Lei, S., Bian, Z., & Zhang, Y. (2019). Study of the desertification index based on the albedo-MSAVI feature space for semi-arid steppe region. *Environmental Earth Sciences*, 78, 1-13. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8503-z>
- Xiao, J., Shen, Y., Tateishi, R., & Bayaer, W. (2006). Development of topsoil grain size index for monitoring desertification in arid land using remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 27(12), 2411-2422. <https://doi.org/10.1080/01431160500486740>
- Xu, E. Q., Zhang, H. Q., & Li, M. X. (2015). Object-based mapping of karst rocky desertification using a support vector machine. *Land Degradation & Development*, 26(2), 158-167. <https://doi.org/10.1002/ldr.2193>
- Yousuf, R. T., & Al-Khakani, E. T. (2021). Assessing degree of desertification using Tasseled Cap transformation and spectral indicators techniques: Iraq. *Scientific Journal of King Faisal University*, 22(1), 45-58. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4567890>
- Zakerinejad, R., Jafari, G., & Rezapourian Ghahfarokhi, E. (2025). Analysis of desertification trends using vegetation indices and albedo coefficient over 2000-2023: A case study of Mond Basin in Southwest of Iran. *Physical Geography Research Quarterly*, 57(2), 57-76. <https://doi.org/10.22059/jphgr.2025.391710.1007876> [in Persian]
- Zanchetta, A., Bitelli, G., & Karnieli, A. (2016). Monitoring desertification by remote sensing using the Tasseled Cap transform for long-term change detection. *Natural Hazards*, 83(1), 223-237. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2329-5>
- Zhu, Z. (2017). Change detection using Landsat time series: A review of frequencies, preprocessing, algorithms, and applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 130, 370-384. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.06.013>
- Zwain, F. A., Al-Samarrai, T. T., & Al-Saady, Y. I. (2021). A study of desertification using remote sensing techniques in Basra Governorate, South Iraq. *Iraqi Journal of Science*, 62(1), 1-12. <https://doi.org/10.24996/ijss.2021.62.1.1>