



Analysis of Desertification Trends using Vegetation Indices and Albedo Coefficient over 2000-2023: A case study of Mond Basin in Southwest of Iran

Reza Zakerinejad¹ , Gholam Hassan Jafari², Elaheh Rezapourian Ghahfarokhi³

1. (Corresponding Author) Department of Physical Geography, Faculty of Geographical Sciences and Planning, University of Isfahan, Isfahan, Iran

Email: r.zakerinejad@geo.ui.ac.ir

2. Department of Geography, Faculty of Human Sciences, University of Zanjan, Zanjan, Iran

Email: jafarihas@znu.ac.ir

3. Department of Physical Geography, Faculty of Geographical Sciences and Planning, University of Isfahan, Isfahan, Iran

Email: e.rezapour71@geo.ui.ac.ir

Article Info

Article type:

Research Article

Article History:

Received:

27 April 2024

Received in revised form:

2 July 2025

Accepted:

10 August 2025

Available online:

15 September 2025

Keywords:

Desertification,
Albedo,
Mond Basin,
Environmental Changes,
Google Earth Engine.

ABSTRACT

Desertification is one of the most significant land degradation processes in arid and semi-arid regions, driven by both natural and anthropogenic factors. This study aims to assess desertification trends and environmental changes in the Mond basin using remote sensing techniques and spatiotemporal analyses over three time periods as 2000, 2013, and 2023. Satellite-derived vegetation indices, including NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), EVI (Enhanced Vegetation Index), SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index), LAI (Leaf Area Index), VCI (Vegetation Condition Index), LST (Land Surface Temperature), and albedo, were employed to monitor ecological shifts. LAI and SAVI also demonstrated decreasing tendencies, reflecting vegetation loss and soil exposure. In contrast, the EVI slightly increased during the same period, possibly due to changes in land management practices or vegetation types. Albedo values revealed a fluctuating but meaningful trend; in 2000 (mean = 0.2378, SD = 0.0461), in 2013 (mean = 0.2343, SD = 0.0647), and in 2023 (mean = 0.2271, SD = 0.0389). Despite a temporary increase in 2013 (up to 0.4345), the overall decrease in albedo suggests progressive soil degradation and expansion of bare surfaces, reinforcing the desertification process. Regional analysis revealed that central and southern parts of the basin experienced the most severe degradation, with increasing bare soil surfaces and declining vegetation cover. Based on albedo thresholds, the basin was classified into three desertification risk zones: low risk (20%); albedo > 0.4, moderate risk (50%); albedo 0.2–0.4, and high risk (30%); albedo < 0.2. Statistical correlation analysis confirmed a strong positive relationship between NDVI and LAI ($r=0.85$, $p < 0.01$), while a robust negative correlation between albedo and vegetation indices supported the hypothesis of ongoing desertification. Findings highlight the need for sustainable land management policies, vegetation restoration programs, and continuous monitoring using remote sensing technologies to mitigate further desertification and ensure long-term ecological stability.

Cite this article: Zakerinejad, R., Jafari, G. H., & 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.

<http://doi.org/10.22059/jphgr.2025.391710.1007876>



Extended Abstract

Introduction

Desertification is one of the most important land degradation processes in arid and semi-arid regions of the world, which occurs under the influence of natural and human factors. This phenomenon means the reduction or loss of the biological capacity of soil and vegetation, which can lead to significant changes in ecosystem functioning, a decrease in biodiversity, and an increase in environmental poverty. Desertification has significant impacts on natural resources, water security, soil health, and ecosystem resilience. Driven by land mismanagement, human activities, climate change, and frequent droughts, desertification accelerates ecosystem degradation. Advanced remote sensing technologies offer powerful tools for continuous environmental monitoring, enabling a thorough understanding of desertification processes. Soil indices such as albedo, LAI, and VCI also play an important role in detecting soil surface changes and desertification trends. Zhu et al. (2020) investigated desertification in Minqing County, northeast China, using Landsat images from 1978 to 2017 and the EVI index. The results of this study showed that vegetation cover and greenness increased over 31 years. Although several studies on desertification have been conducted using remote sensing technologies, there is still a need for comprehensive and area-based assessments in sensitive areas with high land use changes. This study aims to identify the desertification trend in the period 2000-2023 in the Mand basin in southwestern Iran using vegetation indices (NDVI, EVI, SAVI), soil indices (albedo, LAI, VCI). This study, using remote sensing data, multiple environmental indicators, and spatiotemporal analyses, has a special place in the existing literature. The main goal of this research is to accurately assess the desertification process, identify the relationships between the effective variables, and provide the necessary context for sustainable management of vulnerable areas.

Methodology

This research employs a regional and temporal analysis approach based on satellite data for three key periods as 2000, 2013, and 2023. After preprocessing and geometric correction, the images were analyzed using GIS and remote sensing software. Vegetation indices such as NDVI, EVI, and SAVI were employed to evaluate vegetation health, while soil and environmental condition indicators like albedo, LAI, and VCI provided insights into soil dryness and overall ecosystem vitality. Correlation and regression analyses elucidated relationships among these variables across time. Spatial maps were generated to illustrate desertification development and land degradation patterns within the region. In this study, all spatial indices were extracted based on Landsat 5 and 8 satellite data, after loading them into Google Earth Engine (GEE). After loading the images, cloud and noise filtering, cropping based on the study area, and data purification were performed to obtain high-quality and reliable data.

Results and discussion

The results demonstrate that the area has experienced a substantial expansion of degraded and decertified zones, with approximately 35% of the region affected by desertification indicators by 2023. Key vegetation indices have declined significantly, and the correlation analysis confirms the intensification of land degradation over time. Recurring droughts, water resource depletion, and human activities such as overgrazing and improper agricultural practices primarily drive these patterns. The strong relationships between soil and vegetation degradation emphasize the urgency of adopting integrated land management strategies, soil stabilization, reforestation, and water conservation measures to halt and reverse desertification trends. This authoritative and comprehensive study, using multi-attribute analyses and intertemporal data, showed that the study area has been facing a significant trend of vegetation degradation and desertification in recent decades. The continuous decrease in NDVI, EVI, and SAVI indices and the simultaneous increase

in albedo index, as desertification indices, confirm the intensification of desertification processes and the degradation of ecological structures and soil. This trend, along with the strong and significant negative relationships between vegetation indices and dryland and desert soil indices, further highlights the importance of continuous monitoring and management interventions.

Conclusion

This study confirms that satellite-based remote sensing provides critical insights into desertification dynamics, offering valuable tools for early detection and policy formulation. The findings highlight the importance of sustained environmental monitoring, community engagement, and policy interventions to combat land degradation. By integrating technological approaches with sustainable land use policies, it is possible to restore ecological balance, enhance resilience to climate variability, and secure natural resources for

future generations. The insights gained here contribute meaningfully to regional efforts for desertification control and sustainable environmental stewardship.

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.



ارزیابی روند بیابان‌زایی با استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی و تغییرات ضریب آلوده در دوره زمانی ۲۰۰۰-۲۰۲۳، مطالعه موردی: حوضه آبریز مند در جنوب غرب ایران

رضا ذاکری‌نژاد^۱✉، غلامحسن جعفری^۲، الهه رضاپوریان قهفرخی^۳

۱- نویسنده مسئول، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: r.zakerinejad@geo.ui.ac.ir

۲- گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران. رایانامه: jafarihas@znu.ac.ir

۳- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران. رایانامه: e.rezapour71@geo.ui.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۰۲/۰۷

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۴/۰۴/۱۱

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۵/۱۹

تاریخ چاپ:

۱۴۰۴/۰۶/۲۴

واژگان کلیدی:

بیابان‌زایی،

آلوده،

حوضه مند،

تغییرات محیطی،

Google Earth

Engine

بیابان‌زایی یکی از مهم‌ترین فرآیندهای تخریب اراضی در مناطق خشک و نیمه‌خشک است که تحت تأثیر عوامل طبیعی و انسانی رخ می‌دهد. این مطالعه با هدف ارزیابی روندهای بیابان‌زایی و تغییرات زیست‌محیطی در حوضه مند، با استفاده از شاخص‌های سنجش‌ازدور شامل NDVI، EVI، SAVI، LAI، VCI و LST و آلوده در سه بازه زمانی ۲۰۰۰، ۲۰۱۳ و ۲۰۲۳ انجام شد. در این مطالعه مشخص شد که، منطقه دارای روند معناداری از بیابان‌زایی است. شاخص‌های پوشش گیاهی شامل NDVI، EVI و SAVI روند کاهشی معناداری را نشان دادند. همچنین شاخص‌های خاکی مانند آلوده و LAI نیز تغییرات قابل‌توجهی را آشکار کردند. میانگین آلوده در سال ۲۰۰۰ برابر با ۰/۲۳۷۸ بود، که در سال ۲۰۱۳ به ۰/۲۳۴۳ افزایش یافت و در سال ۲۰۲۳ به ۰/۲۲۷۱ کاهش یافت. این روند نوسانی نشان‌دهنده گسترش خاک‌های خشک و بیابانی در منطقه است. همبستگی منفی قوی بین آلوده و شاخص‌های پوشش گیاهی ($r \approx -0.78$ ، $NDVI$: $p < 0.01$) نیز وجود رابطه مستقیم بین کاهش پوشش گیاهی و افزایش خاک‌های بدون پوشش را تأیید می‌کند. تحلیل‌های منطقه‌ای نشان داد که توسعه بیابان‌زایی بیشتر در مناطق مرکزی و جنوبی حوضه مورد مطالعه رخ داده است. طبقه‌بندی بیابان‌زایی بر اساس آلوده نشان داد، که حدود ۳۰٪ از حوضه در طبقه "خطر زیاد"، ۵۰٪ در طبقه "خطر متوسط" و تنها ۲۰٪ در طبقه "خطر کم" قرار دارد. این الگوها با کاهش منابع آب، افزایش دما و فعالیت‌های انسانی مانند چرای بی‌رویه و تغییر کاربری اراضی همراهی می‌کنند. پیشنهاد می‌شود سیاست‌گذاری‌های منطقه‌ای بر اساس داده‌های فضایی-زمانی تقویت شوند تا از گسترش بیابان‌زایی در حوضه مند جلوگیری شود.

استناد: ذاکری‌نژاد، رضا؛ جعفری، غلامحسن و رضاپوریان قهفرخی، الهه. (۱۴۰۴). ارزیابی روند بیابان‌زایی با استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی و تغییرات ضریب آلوده در دوره زمانی ۲۰۰۰-۲۰۲۳، مطالعه موردی: حوضه آبریز مند در جنوب غرب ایران. *مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۷ (۲)، ۵۷-۷۶.

<http://doi.org/10.22059/jphgr.2025.391710.1007876>

مقدمه

بیابان‌زایی یکی از مهم‌ترین فرآیندهای تخریب اراضی در نواحی خشک و نیمه‌خشک جهان است، که تحت تأثیر عوامل طبیعی و انسانی رخ می‌دهد. این پدیده به معنی کاهش یا از دست رفتن ظرفیت زیستی خاک و پوشش گیاهی است که می‌تواند به تغییرات عمده در عملکرد اکوسیستم‌ها، کاهش تنوع زیستی و افزایش فقر محیط‌زیستی منجر شود (AbdelRahman, 2023; AbdelRahman et al., 2020; Zakerinejad et al., 2019; Masoudi & Zakerinejad, 2011). با توجه به شدت گرفتن تغییرات اقلیمی و فشارهای انسانی بر منابع طبیعی، شناسایی، پایش و مدیریت فرآیندهای بیابان‌زایی خصوصاً تهیه نقشه‌های ریسک خطر امری ضروری شده است (Zakerinejad & Masoudi, 2020). تعیین خطر بیابان‌زایی راهکار مناسبی جهت اولویت‌بندی مناطق برای مدیریت و کنترل شدت بیابان‌زایی است. یک عامل تعیین‌کننده خطر بیابان‌زایی، استفاده از شاخص احتمال آسیب‌پذیری پوشش گیاهی می‌باشد. در سال‌های اخیر، استفاده از فناوری‌های سنجش‌ازدور به‌عنوان ابزاری کارآمد و مؤثر در شناسایی و پایش بیابان‌زایی مطرح شده است. شاخص‌های مختلفی از جمله NDVI، EVI، SAVI، آلبدو، LAI، VCI و LST به‌عنوان متغیرهای کلیدی در تحلیل تغییرات پوشش گیاهی، وضعیت خاک و روند بیابان‌زایی به کار گرفته شده‌اند (Berdyayev et al., 2022; Guo et al., 2023; Bai Zongfan et al., 2024). این شاخص‌ها قابلیت تلفیق با الگوریتم‌های پردازش تصویر، آمار فضایی و مدل‌های یادگیری ماشین را دارند و بنابراین امکان ارزیابی دقیق و منطقه محور از وضعیت اکوسیستم‌های آسیب‌پذیر را فراهم می‌کنند. در ادامه به پیشینه موضوعی تحقیق پرداخته شده است. یکی از عوامل مهم در بررسی روند و شدت بیابان‌زایی در سال‌های اخیر استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای می‌باشد. تخریب سرزمین و کاهش پوشش گیاهی موجب تشدید روند فرسایش خاک و بیابان‌زایی در مناطق وسیعی از ایران شده است (ذاکری نژاد ۱۴۰۲). مطالعات فراوانی در سال‌های اخیر با استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی مانند NDVI، EVI و SAVI و همچنین میزان آلبدو (سپیدایی) جهت بررسی روند بیابان‌زایی پرداخته‌اند. سطوح مختلف پوشش گیاهی آلبدوی متفاوتی دارند. از طرفی آلبدوی سطحی یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های تعادل تابش سطحی است که با بررسی رفتار آن می‌توان به شدت تخریب و بیابان‌زایی پی برد. گسترش بیابان‌زایی و تغییر در میزان پوشش گیاهی به‌نوبه خود از جمله عوامل تغییر در آلبدو به شمار می‌روند. به‌عنوان مثال، موتی^۱ و همکاران (۲۰۲۰) در منطقه نیمه‌خشک برزیل با استفاده از داده‌های MODIS و شاخص NDVI نشان دادند که سری‌های زمانی این شاخص در مناطق خشک بهترین عملکرد را در شناسایی تخریب اراضی دارد. موتی^۲ و همکاران (۲۰۲۰) به مدل‌سازی سری‌های زمانی شاخص NDVI^۳ در شش نقطه بحرانی بیابان‌زایی در منطقه نیمه‌خشک برزیل با استفاده از سنجنده مودیس در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸ پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که سری‌های زمانی میانگین NDVI بهترین عملکرد در نمایش پوشش گیاهی خشک و تخریب‌شده در مقایسه با پوشش گیاهی متراکم و ناهمگن در دوره‌های مرطوب دارد. ژانگ^۴ و همکاران (۲۰۲۲) در پژوهشی، واحد بیابانی هوتان را با استفاده از شاخص پوشش گیاهی NDVI موردبررسی قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که ۳۹۰۰ کیلومترمربع از این منطقه تحت تأثیر پدیده بیابان‌زایی قرار دارد که عمدتاً در حاشیه منطقه مورد مطالعه توزیع شده است. داوری و همکاران (۱۳۹۲) به بررسی تأثیر پوشش گیاهی بر روند بیابان‌زایی در منطقه بیابانی دشت قاسم‌آباد بجنستان با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۵ و مدل ایرانی IMDPA پرداختند. نتایج این

1. Motiee

2. Mutti

3. Normalized Difference Vegetation Index

4. Zhang

پژوهش نشان می‌دهد که معیار پوشش گیاهی با ارزش ۳/۵۵ در کلاس بیابان‌زایی شدید قرار دارد و شاخص وضعیت پوشش گیاهی با ارزش (IV) ۴ بیشترین تأثیر را در روند بیابان‌زایی دارد. کیخسروی (۱۳۹۴) به بررسی تطبیقی شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی و ماهواره‌ای در روند بیابان‌زایی با استفاده از شاخص پوشش گیاهی NDVI و مقدار SPT^1 در فصل بهار استان سمنان طی بازه زمانی ۲۰۰۶ تا ۲۰۱۵ پرداخت. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که رابطه بین SPT، NDVI و بارش در طبقات مختلف پوشش گیاهی (تنگ و نیمه متراکم) یک رابطه معکوس است؛ به این معنا که با افزایش مقدار بارش و SPT، وسعت پوشش گیاهی تنگ کاهش یافته و در مقابل، پوشش گیاهی نیمه متراکم گسترش می‌یابد. برعکس، با کاهش بارش و SPT، وسعت پوشش گیاهی نیمه متراکم کاهش یافته و در عوض، پوشش گیاهی تنگ افزایش می‌یابد. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که خشک‌سالی می‌تواند صدمات جبران‌ناپذیری به منطقه وارد کند. حلبیان و سلطانین (۱۳۹۵) نیز به ارزیابی تغییرات بیابان‌زایی در اصفهان با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۵ و ۸، شاخص پوشش گیاهی NDVI و شوری خاک در بازه زمانی ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۵ پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که طی این دوره ۲۹ ساله، بخش‌های شرقی و جنوب شرقی شهر اصفهان بیشترین کاهش پوشش گیاهی را تجربه کرده‌اند، به‌طوری‌که میزان پوشش گیاهی در این مناطق حدود ۶۰ درصد نسبت به سال نخست مطالعه کاهش یافته است. روستایی و همکاران (۱۳۹۹) به بررسی خطر وقوع بیابان‌زایی در محدوده پیرامونی دریاچه ارومیه با استفاده از تصاویر سنتینل ۲ و شاخص‌های طیفی NDVI، آلبدوی سطح، میزان نمناکی، ضریب روشنایی و میزان سبزی‌نگی پرداختند. نتایج این پژوهش نشان داد که ۹/۸۹ درصد از مساحت مورد مطالعه در کلاس خطر شدید، ۳۰/۶۰ درصد در کلاس خطر نسبتاً شدید، ۳۷/۴۸ درصد در کلاس خطر متوسط، ۱۲/۴۲ درصد در کلاس خطر ضعیف و ۹/۶۱ درصد در کلاس بدون بیابان‌زایی قرار دارد. میجانی و همکاران (۱۳۹۹) نیز در حوضه آبخیز یزدان‌آباد کرمان از شاخص SAVI و تصاویر لندست برای ارزیابی پتانسیل بیابان‌زایی استفاده کردند و گزارش کردند که بیش از ۸۸٪ از این منطقه در طبقه بیابان‌زایی شدید و بسیار شدید قرار دارد.

شاخص‌های خاکی مانند آلبدو، LAI و VCI نیز نقش مهمی در تشخیص تغییرات سطح خاک و روند بیابان‌زایی ایفا می‌کنند. زو^۲ و همکاران (۲۰۲۰) بیابان‌زایی در شهرستان مین‌کین واقع در شمال شرق چین را با استفاده از تصاویر لندست در بازه زمانی ۱۹۷۸ تا ۲۰۱۷ و شاخص EVI^3 مورد بررسی قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که پوشش گیاهی و سبزی‌نگی طی ۳۱ سال افزایش یافته است. همچنین، مشخص شد که پوشش گیاهی منطقه مین‌کین به‌شدت تحت تأثیر کشاورزی وابسته به آب‌های زیرزمینی قرار دارد، نه عوامل اقلیمی. بنابراین، برای کاهش بیابان‌زایی، مدیریت صحیح کشاورزی ضروری است. بزرا^۴ و همکاران (۲۰۲۰) در منطقه نیمه‌خشک برزیل نشان دادند که روند افزایشی آلبدو در مناطق بدون پوشش گیاهی نشانه گسترش بیابان‌زایی است. در همین راستا، فنک^۵ و همکاران (۲۰۲۲) در منطقه موآوس چین از تلفیق آلبدو، NDVI و LST در کنار الگوریتم‌های یادگیری ماشین استفاده کردند و نشان دادند که مدل جنگل تصادفی عملکرد بهتری در شناسایی مناطق مستعد بیابان‌زایی دارد.

بردیف^۶ و همکاران (۲۰۲۴) در تحقیقی در ترکمنستان از تلفیق شاخص‌های مختلف (NDMI^۷، SAVI، NDVI)، EVI و مدل‌های یادگیری ماشین (KNN ، NB^{10} ، $XBoos^{11}$ ، RF^{9}) استفاده کردند و نشان دادند که مناطق

1. Standard Penetration Test

2. Zhu

3. Enhanced Vegetation Index

4. Bezerra

5. Feng

6. Berdyev

مرکزی، شمالی و شرقی کشور در حال تجربه بیابان‌زایی شدید هستند. همچنین، کومار^۱ و همکاران (۲۰۲۲) به بررسی رابطه بین دمای سطح زمین (LST) و شاخص پوشش گیاهی نرمال‌شده (NDVI) برای ارزیابی بیابان‌زایی در فلات دکن با استفاده از تصاویر لندست ۸ پرداختند. نتایج این مطالعه نشان داد که اراضی بیابانی حدود ۱۳/۶۲ درصد از منطقه را اشغال کرده است. وانگ^۲ و همکاران (۲۰۲۴) در حوضه دریاچه چینگهای در تبت، با استفاده از داده‌های مودیس و شاخص‌های EVI و آلبدو، گسترش بیابان‌زایی را در مناطق مرزی و شنی شناسایی کردند. نادری و همکاران (۱۴۰۱) به ارزیابی وضعیت بیابان‌زایی در شهر طیس بر اساس شاخص‌های بیابان‌زایی تکتونیک با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۴، ۵ و ۸ در بازه زمانی ۱۹۸۶ تا ۲۰۱۷ پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که شدت بیابان‌زایی در منطقه، که در سال ۱۹۸۶ مقدار ۱/۸۹ را در طبقه‌بندی بیابان‌زایی متوسط داشته است، تا سال ۲۰۱۷ به ۷/۱۳ افزایش یافته و در طبقه‌بندی بیابان‌زایی بسیار شدید قرار گرفته است. حیدری عمدارلو و همکاران (۱۴۰۳) به تعیین خطر بیابان‌زایی در استان یزد با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای مودیس و شاخص‌های EVI و LST در بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۹ پرداختند. نتایج تحقیق نشان داد که به‌طور کلی، احتمال تخریب پوشش گیاهی در نتیجه بیابان‌زایی در مناطق غربی، شرقی و بخش‌های جنوبی استان یزد بیشتر از سایر مناطق است. اگرچه مطالعات متعددی درباره بیابان‌زایی با استفاده از فناوری‌های سنجش‌ازدور صورت گرفته است، اما نیاز به ارزیابی جامع و منطقه محور در مناطق حساس و دارای تغییرات کاربری زمین زیاد، همچنان وجود دارد. این مطالعه با هدف شناسایی روند بیابان‌زایی در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ در حوضه آبریز مند در جنوب غرب کشور ایران با استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی (NDVI، EVI، SAVI)، شاخص‌های خاکی (آلبدو، VCI، LAI) می‌باشد. این مطالعه با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور، شاخص‌های چندگانه زیست‌محیطی و تحلیل‌های فضایی-زمانی، جایگاه خاصی در ادبیات موجود دارد. هدف اصلی این تحقیق این است که ضمن ارزیابی دقیق روند بیابان‌زایی، روابط بین متغیرهای مؤثر را شناسایی کرده و زمینه لازم برای مدیریت پایدار مناطق آسیب‌پذیر را فراهم کند.

روش پژوهش

در این مطالعه، داده‌های ماهواره‌ای سری لندست ۸ OLI/TIRS و لندست ۵ MSS/TM از مجموعه داده‌های موجود در پلتفرم Google Earth Engine (GEE) استفاده شده است. این داده‌ها از قبل تصحیحات هندسی و رادیومتریک لازم را دارا می‌باشند و با بررسی مجدد باندهای این سنجنده‌ها نیاز به تصحیحات اولیه نداشتند. برای اطمینان از کاهش نویزهای مربوط به ابرها و سایر خطاها، از توابع فیلتر ابر موجود در GEE بهره گرفته شد و داده‌ها بر اساس منطقه مطالعه برش داده شدند. شایان‌ذکر هست که این تصاویر طوری انتخاب گردیدند که دارای حداقل ابرناکی باشند (جدول ۱). پس از انجام این مراحل، شاخص‌های موردنظر مانند NDVI و NDWI از داده‌های تصفیه‌شده استخراج شد. تمامی فرآیندهای پیش‌پردازش، شامل فیلترینگ ابر، برش بر اساس منطقه مورد مطالعه و محاسبه شاخص‌ها، در محیط GEE انجام گرفت که این پلتفرم امکانات لازم را برای انجام سریع و کارآمد این اقدامات فراهم می‌آورد. در انتخاب سال‌های مورد مطالعه (۲۰۰۰، ۲۰۱۳ و ۲۰۲۳)، تلاش شد تا زمان‌هایی با کمترین تغییر در میزان بارش در حوزه موردبررسی انتخاب شوند، زیرا شاخص‌های پوشش گیاهی از جمله NDVI به‌شدت به میزان بارش حساس است. بر اساس مطالعات

7. Normalized Difference Moisture Index

8. Bare Soil Index

9. Random Forest

10. Naïve Bayes

1. Kumar

2. Wang

پیشین و تحلیل‌های منطقه‌ای، این سال‌ها به‌عنوان نمونه‌هایی با تغییرات کم در بارش شناخته‌شده‌اند، که امکان جدا کردن اثرات عوامل دیگر مانند تغییر کاربری یا مدیریت منابع را بر شاخص‌های پوشش گیاهی و ضریب تغییرات آلوده فراهم می‌آورد. بنابراین، انتخاب این سال‌ها بر اساس مبانی علمی و پژوهشی صورت گرفته است که به کاهش اثر متغیرهای اقلیمی خاص و تمرکز بر سایر عوامل تغییر در پوشش گیاهی کمک می‌کند.

جدول ۱. مشخصات ماهواره‌های مورد استفاده در پژوهش

ماهواره	سنجنده	قدرت تفکیک مکانی	قدرت تفکیک زمانی	تاریخ تصویربرداری
Landsat5	TM/MSS	۳۰ متری	۱۴ روز	میانگین سالانه
Landsat8	OLI/TIRS	۳۰ متری	۱۶ روز	میانگین سالانه

در این مطالعه، تمامی شاخص‌های فضایی بر اساس داده‌های ماهواره‌ای سری لندست ۵ و ۸، پس از بارگذاری در محیط Google Earth Engine (GEE)، استخراج شده‌اند. پس از بارگذاری تصاویر، اقدام به فیلترینگ ابر و نویز، برش بر اساس محدوده منطقه مورد مطالعه و تصفیه داده‌ها شد تا داده‌های با کیفیت و قابل اعتماد به دست آید. فرآیند استخراج هر شاخص به صورت زیر انجام شده است:

شاخص NDVI: یکی از شناخته‌شده‌ترین، ساده‌ترین و کاربردی‌ترین شاخص‌ها در مطالعات پوشش گیاهی محسوب می‌شود. این شاخص بیشترین حساسیت را نسبت به تغییرات پوشش گیاهی داشته و در مقابل اثرات جوی و تأثیرات زمینه‌ای خاک، به‌ویژه در مناطقی با پوشش گیاهی متراکم، حساسیت کمتری نشان می‌دهد. شاخص NDVI بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌شود (باعقیده و همکاران، ۱۳۹۰: ۵). در محیط GEE با استفاده از عبارات ریاضی و توابع داخلی محاسبه شد (رابطه ۱).

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

این شاخص بر اساس تفاوت شدت بازتابش در باندهای قرمز و نزدیک به مادون قرمز محاسبه می‌شود. مقادیر مثبت NDVI بیانگر پوشش گیاهی سالم هستند؛ درحالی‌که مقادیر نزدیک به صفر یا منفی نشان‌دهنده کمبود یا عدم وجود پوشش گیاهی است. مقدار NDVI هر پیکسل در تصویر نهایی بر اساس مقادیر باندهای NIR و قرمز محاسبه گردید. شاخص EVI: برای نخستین بار توسط هیوت و لیو در سال ۱۹۹۴ معرفی شد. این شاخص با کاهش اثرات جوی و تفاوت‌های بازتابی در باندهای آبی و قرمز، دقت ارزیابی پوشش گیاهی را بهبود می‌بخشد. فرمول این شاخص به صورت زیر تعریف می‌شود (فیروزی و همکاران، ۱۳۹۸: ۱۶۸). این شاخص برای هر پیکسل از تصویر با استفاده از مقادیر مربوط به باندهای NIR، قرمز و آبی از طریق رابطه (۲) محاسبه شده است.

$$EVI = 2.5 \times \frac{(NIR - RED)}{(NIR + 6 \times RED - 7.5 \times BLUE + 1)} \quad \text{رابطه ۲}$$

شاخص SAVI: هیوت در سال ۱۹۸۸ شاخص SAVI را ارائه نمود (Huete, 1998: 302). یک شاخص پیشرفته شبیه به NDVI است که برای کاهش تأثیر بازتاب خاک، به‌ویژه در مناطقی با پوشش گیاهی کم و خاک نمایان، طراحی شده است. مقدار SAVI برای هر پیکسل در تصویر به کمک رابطه (۳) تعیین گردید.

$$SAVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED + 0.5)} \times (1 + 0.5) \quad \text{رابطه ۳}$$

شاخص LAI^1 : شاخص LAI توسط واتسون (۱۹۴۷) به عنوان مساحت کل یک طرفه بافت برگ به ازای هر واحد سطح زمین تعریف شد (Watson, 1947:45). مقدار EVI از مرحله قبل محاسبه شده بود، محاسبه شد و در نهایت تصویر LAI از طریق رابطه (۴) تولید شد.

$$LAI = 3.618 \times EVI - 0.118 \quad \text{(رابطه ۴)}$$

شاخص VCI: این شاخص برای نخستین بار به وسیله کوگان در سال ۱۹۹۵ پیشنهاد شده است (مجردی و همکاران، ۱۳۹۹). این شاخص به وسیله دامنه‌ای 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 (کریمی و همکاران، ۱۳۹۸: ۳۵). ابتدا مقدار NDVI بلندمدت در طی سال‌های مختلف محاسبه و حداقل و حداکثر NDVI برای دوره‌های زمانی مشخص تعیین شد. سپس، شاخص VCI بر پایه رابطه (۵) برای هر پیکسل در نرم‌افزارهای تحلیل داده‌ها محاسبه و تولید شد.

$$VCI = \frac{(ndvi - min)}{(max - min)} \quad \text{(رابطه ۵)}$$

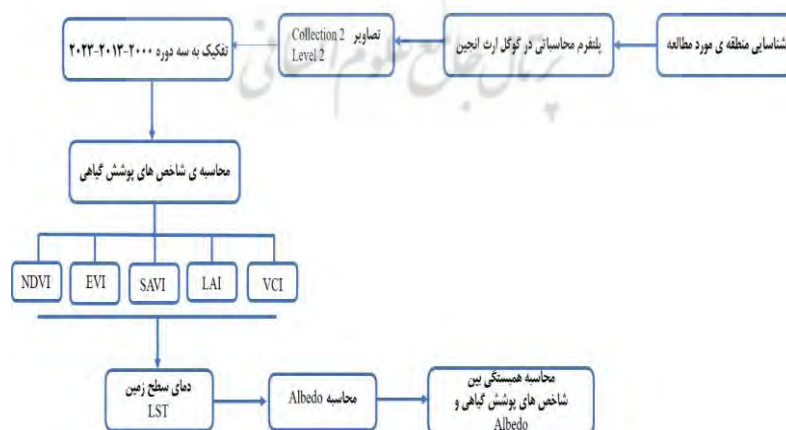
دمای سطح زمین LST: هر جسمی که دمای بالاتر از صفر درجه کلون داشته باشد از خود تابش حرارتی ساطع می‌کند و این انرژی از اجسام یا سطح زمین ساطع می‌شود و توسط سنجنده حرارتی ثبت شده که ما با استفاده از این انرژی ثبت شده دمای سطح زمین را اندازه‌گیری می‌کنیم (عیسی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۹: ۱۷). داده‌های دمای سطح زمین با استفاده از تصاویر سنجنده‌های حرارتی، در محیط GEE به صورت مستقیم استخراج و به عنوان ورودی فرآیندهای تحلیل قرار گرفتند.

Albedo: ضریب آلبیدو یکی از مهم‌ترین متغیرهای کنترل‌کننده در مطالعات بیلان انرژی سطح است. مطالعات بسیاری از پژوهشگران نشان داده است. که شاخص سپیدایی می‌تواند به عنوان شاخص فیزیکی مهم برای نشان دادن بیابان‌زایی باشد (گلوگردی و همکاران، ۱۴۰۰: ۵۵). مقادیر باندهای مربوطه از تصاویر استخراج و در نرم‌افزارهای تحلیل مورد استفاده قرار گرفتند (رابطه ۶).

$$Albedo = 0.356 \times BLUE + 0.130 \times RED + 0.373 \times NIR + 0.085 \times SWIR2 - 0.0018 \quad \text{(رابطه ۶)}$$

BLUE: باندهای آبی، RED: باندهای قرمز، NIR: باندهای نزدیک مادون قرمز، SWIR2: باندهای مادون قرمز میانی، (Liang,

2001; Sobrino et al., 2009)

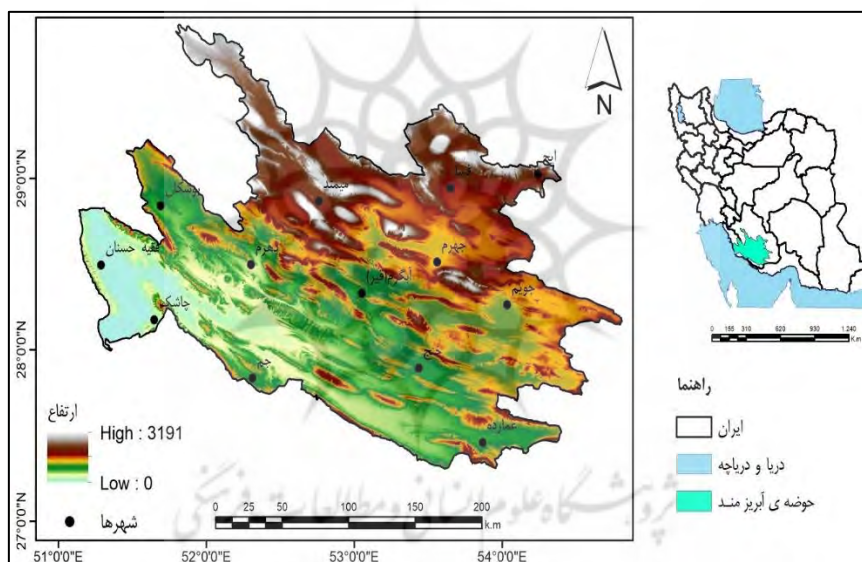


شکل ۱. روند نمای مراحل انجام پژوهش

1. Leaf Area Index (LAI)

محدوده مورد مطالعه

حوضه مورد مطالعه، آبریز مند در جنوب ایران و در نزدیکی سواحل خلیج فارس قرار دارد و مساحتی معادل ۴, ۷۶۳, ۵۸۹ کیلومتر مربع را در برمی‌گیرد. این حوضه در مختصات طول جغرافیایی $51^{\circ}08'13''$ تا $54^{\circ}48'30''$ شرقی و عرض جغرافیایی $27^{\circ}17'44''$ تا $29^{\circ}52'19''$ شمالی واقع شده است (شکل ۱). حدود ۸۳٪ از مساحت این حوضه در استان فارس و ۱۷٪ باقی‌مانده در استان بوشهر واقع شده است. این منطقه دارای اقلیم گرم و خشک است که با تابستان‌های طولانی و گرم و زمستان‌های سرد و خشک مشخص می‌شود. متوسط دمای سالانه در این منطقه حدود ۲۹ درجه سانتی‌گراد بوده و بارش سالانه متوسط تنها ۳۲۰ میلی‌متر است که بیشترین آن در فصول پاییز رخ می‌دهد. ارتفاعات منطقه از سطح دریا (در مناطق ساحلی خلیج فارس) تا ۳۱۹۱ متر در کوه‌های مرکزی متغیر است. این تنوع ارتفاعی، باعث ایجاد تنوع اقلیمی محلی شده است؛ باین‌حال، بیشتر منطقه تحت شرایط خشکی شدید قرار دارد. خشک‌سالی‌های مکرر، کاهش منابع آبی، فرسایش خاک و تغییرات کاربری اراضی در دهه‌های اخیر، این حوضه را به یکی از مناطق مستعد و حساس در برابر بیابان‌زایی تبدیل کرده است. وضعیت اقلیمی، تخریب پوشش گیاهی و فشارهای انسانی بالا، خطر توسعه فرآیندهای بیابان‌زایی در این حوضه را افزایش داده و لزوم پایش و مدیریت پایدار منابع طبیعی را برجسته می‌کند.



شکل ۲. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

یافته‌ها

برای بررسی بیابان‌زایی حوضه مند در طی سه بازه زمانی مختلف، از شاخص‌های NDVI (شاخص پوشش گیاهی)، EVI (شاخص پوشش گیاهی تقویت‌شده)، SAVI (شاخص آب وزن خاک)، LAI (شاخص سطح برگ)، VCI (شاخص وضعیت گیاهی)، LST (دماهای سطح زمین) و آلبُدو (ضریب انعکاس سطح زمین) استفاده شده است. بر اساس داده‌های آماری، شاخص آلبُدو در منطقه طی ۲۳ سال نشان‌دهنده یک روند کلی تغییرپذیر اما قابل توجه است. نرخ میانگین آلبُدو در سال ۲۰۰۰ برابر با ۰/۲۳۷۸، با انحراف استاندارد حدود ۰/۰۴۶۱ است. در سال ۲۰۱۳، این شاخص به میزان قابل‌ملاحظه‌ای افزایش یافته و به میانگین ۰/۳۲۴۲ رسیده است که نشان‌دهنده تغییر در سطح خاک و نوع پوشش سطحی بر اثر کاهش پوشش گیاهی و افزایش میزان خاک خشک و بیابان‌زایی است.

در سال ۲۰۲۳، میانگین آلوده مجدداً کاهش یافته و به مقدار تقریبی ۰/۲۲۷۱ کاهش یافته است، که احتمالاً نشان‌دهنده شدت یافتن فرآیند بیابان‌زایی و کاهش نسبی سطح خاک سالم و پوشش گیاهی است. این کاهش می‌تواند در نتیجه، عوامل اقلیمی چون کاهش بارش، افزایش دما یا فعالیت‌های انسانی باشد. تحلیل‌های آماری نشان می‌دهد، که تغییرات در آلوده در دوره‌های مختلف، حتی در صورت ثبت حداقل‌ها و حداکثرهای متفاوت، قابل تبیین با فرآیندهای اکولوژیک و بیولوژیکی منطقه است.

تفسیر شاخص‌های پوشش گیاهی و وضعیت خاک

شاخص NDVI به‌عنوان نشانگر قوی سلامت، تراکم و سطح پوشش گیاهی، در سال ۲۰۰۰ و ۲۰۱۳، میانگین‌های تقریبی برابر با ۰/۵۵۶۲ و ۰/۵۵۶۲ داشته است، اما در ۲۰۲۳ کاهش یافته و به ۰/۵۱۲۹ رسیده است. این کاهش معنادار، نشان‌دهنده کاهش سطح و تراکم پوشش گیاهی است که با روند بیابان‌زایی هم‌راستا است.

شاخص LAI، که نمایانگر سطح برگ و میزان فعالیت فتوسنتزی گیاهان است، در سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۱۳ کاهش یافته است، اما در سال ۲۰۲۳، کمی بالاتر رفته است. این نوسان ممکن است ناشی از تغییرات مدیریت کشاورزی، بازسازی گیاهی یا عوامل اقلیمی باشد. در هر صورت، کاهش مداوم در شاخص LAI، نشانه‌ای از کاهش زیست‌پذیری سطح و ضعف اکوسیستم گیاهی است. شاخص SAVI، که در مناطقی با پوشش گیاهی کم کاربرد دارد، کاهش جزئی دارد، که این امر، نشان‌دهنده افزایش خاک‌های لخت و در معرض فرسایش، و در نتیجه گسترش بیابان است.

شاخص EVI، که نسبت به NDVI حساس‌تر است، حالتی افزایشی داشته است؛ میانگین سال ۲۰۲۳ نسبت به ۲۰۰۰، کمی بیشتر شده است، که می‌تواند به عوامل متعددی از جمله تغییر در نوع گونه‌های گیاهی جدید و یا روش‌های مدیریتی اصلاحی مربوط باشد. روند کلی منطقه، در مجموع دال بر توسعه زنجیره‌ای بیابان است. کاهش پوشش گیاهی، کاهش سطح برگ و افزایش ضریب انعکاس سطح زمین همگی به‌صورت هم‌زمان، فرآیند عامل بیابان‌زایی در منطقه را مورد تأیید قرار می‌دهد. این روند، در کنار کاهش معنادار شاخص NDVI و LAI و تغییرات آلوده، نشان‌دهنده تأثیر مستقیم فعالیت‌های انسانی، تغییرات اقلیمی و کاهش منابع آب است که منجر به تخریب زیست‌بوم و کاهش قابلیت بهره‌برداری زمین‌های کشاورزی و مراتع شده است (جدول ۲).

جدول ۲. آمار توصیفی شاخص‌های مختلف در سه دوره زمانی

شاخص	سال	میانگین	انحراف معیار	حداقل	حداکثر
آلوده	۲۰۰۰	۰/۲۳۷۸	۰/۰۴۶۱	۰/۱۳۳۳	۰/۳۶۹۴
	۲۰۱۳	۰/۳۳۴۳	۰/۰۶۴۷	۰/۲۳۷۸	۰/۴۳۴۵
	۲۰۲۳	۰/۲۲۷۱	۰/۰۳۸۹	۰/۱۴۶۹	۰/۳۴۱۱
NDVI	۲۰۰۰	۰/۵۵۶۲	۰/۱۳۶۳	-۰/۴۶۴۳	۰/۵۵۶۲
	۲۰۱۳	۰/۵۵۶۲	۰/۱۶۵۷	۰/۰۳۲۴	۰/۷۳۴۲
	۲۰۲۳	۰/۵۱۲۹	۰/۱۴۵۵	۰/۰۵۲۸	۰/۵۱۲۹
LAI	۲۰۰۰	۱/۲۹۸۹	۰/۳۵۳۹	-۱/۰۹۱۵	۱/۲۹۸۹
	۲۰۱۳	۱/۱۶۸۶	۱/۱۶۵۷	۰/۰۳۲۴	۱/۱۶۸۶
	۲۰۲۳	۱/۱۹۲۲	۰/۱۸۲۷	۰/۰۵۲۸	۱/۱۹۲۲
SAVI	۲۰۰۰	۰/۳۷۸۲	۰/۱۲۵۲	-۰/۴۶۴۳	۰/۴۶۴۳
	۲۰۱۳	۰/۳۵۶۹	۰/۰۶۳۵	۰/۰۴۱۶	۰/۷۳۴۲
	۲۰۲۳	۰/۳۵۶۹	۰/۰۶۹۳	۰/۰۴۳۶	۰/۵۱۲۹
EVI	۲۰۰۰	۰/۰۳۹۱	۰/۰۳۸۸	-	۰/۱۴۶۹

۰/۲۶۱۸	۰/۰۵۵۹	۰/۰۶۹۳	۰/۰۹۸۹	۲۰۱۳
۰/۳۱۶۹	۰/۰۴۷۲	۰/۰۴۹۴	۰/۱۱۹۹	۲۰۲۳

تحلیل و تفسیر روندهای زمانی

روند تغییرات شاخص آلبدو: میانگین آلبدو در ۲۰۱۳-۲۰۰۰ در حال افزایش بوده است (سال ۲۰۱۳)، که ممکن است به دلیل کاهش پوشش گیاهی و افزایش خاک‌های بایر، سطح خاک خشک و تغییر در نوع زمین‌های سطحی باشد. اما پس از ۲۰۱۳، مجدداً کاهش یافته و به سطح نزدیک به مقدار پایه در سال ۲۰۰۰ رسیده است، که نشان‌دهنده توسعه فرآیند بیابان‌زایی و تخریب اکوسیستم‌های گیاهی است. در سال ۲۰۱۳، نیز منطقه به‌شدت درگیر تغییرات سطح خاک و بیابان‌زایی شده است، که هم‌راستا با افزایش شاخص آلبدو است، یعنی سطح خاک، خاک‌های خشک و بی‌گیاهی افزایش یافته است. پس‌از آن، کاهش مقدار شاخص در سال ۲۰۲۳، نشان‌دهنده تشدید فرآیند تخریب و بیابان‌زدایی است، که در تحلیل‌های دیگر نیز تأیید می‌شود.

روند تغییرات شاخص‌های پوشش گیاهی: تغییرات شاخص NDVI و LAI در طول زمان نشان‌دهنده: کاهش تراکم و سلامت پوشش گیاهی و همچنین افزایش فعالیت‌های اصلاحی و مدیریت بهره‌برداری مجدد گیاهی، بخصوص در بخش کشاورزی است.

روابط هم‌زمان و هم‌گرایی شاخص‌ها

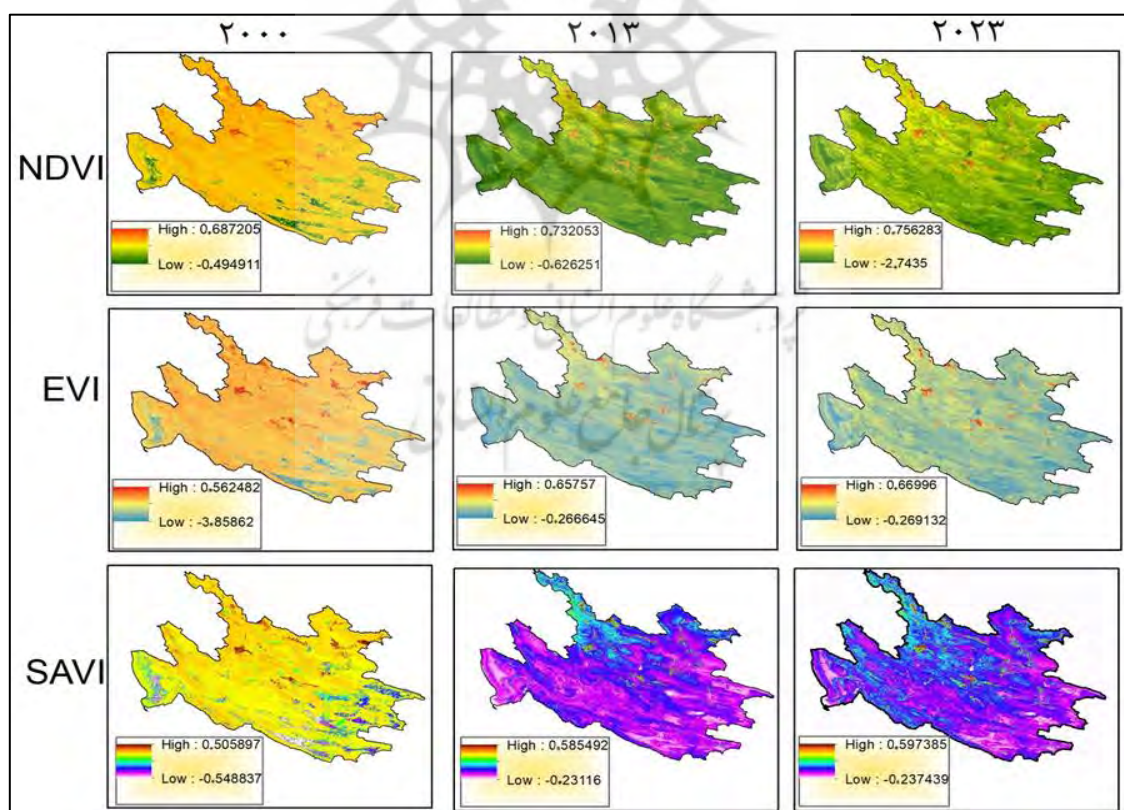
تحلیل همبستگی پیرسون نشان می‌دهد که، رابطه مثبت قوی بین شاخص NDVI و LAI ($p < 0.01$ $r \approx 0.85$)، تأکید بر هم‌گرایی این دو شاخص در نشان دادن وضعیت پوشش گیاهی است. همچنین، رابطه منفی قوی بین شاخص آلبدو و NDVI ($p < 0.01$ $r \approx -0.78$)، نشان‌دهنده این است که با کاهش پوشش گیاهی و شاخص NDVI، سطح خاک و خاک‌های خشک با افزایش شاخص آلبدو همراه است. این روابط، میزان صحت و هم‌گرایی نتایج را تقویت می‌کند و نشان می‌دهد شاخص آلبدو در ارزیابی بیابان‌زایی مؤثر بوده است.

تفسیر منطقه‌ای شاخص‌های NDVI، EVI و SAVI

تحلیل‌های منطقه‌ای نشان می‌دهد که روندهای مشاهده‌شده در مناطق مختلف حوضه منطبق بر روندهای کلی است، اما شدت فرآیندهای بیابان‌زدایی در برخی قسمت‌ها بیشتر و در برخی کمتر است، که می‌تواند ناشی از تفاوت در کاربری اراضی، فعالیت‌های انسانی، میزان بارش و نوع خاک باشد. شاخص آلبدو، به‌عنوان یکی از شاخص‌های حساس و قابل‌اعتماد، روند افزایشی نشان می‌دهد که با کاهش شاخص‌های پوشش گیاهی و سطح برگ همراه است. این روند، نیازمند سیاست‌های کارآمد مدیریت منابع آب‌و‌خاک، برنامه‌های اصلاح مراتع، و پایش مستمر است. بر اساس شکل ۳ و مقایسه میانگین‌های نقشه‌های شاخص NDVI، EVI و SAVI در سه دوره زمانی سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۱۳ و ۲۰۲۳، می‌توان روندهای تغییرات پوشش گیاهی در منطقه مورد مطالعه را به‌صورت علمی و منطقه‌ای تحلیل و تفسیر کرد. به‌طوری‌که نقشه‌های NDVI نشان‌دهنده پراکنش و تراکم گیاهان در حوضه آبریز مند است. در سال ۲۰۰۰، مناطق بیشتری شامل بخش‌های وسیعی با شاخص NDVI بالا (رنگ زرد تا نارنجی تیره) بودند که نشان‌دهنده وجود پوشش گیاهی نسبتاً خوب در منطقه است. اما در سال ۲۰۱۳، اندازه مناطق با شاخص NDVI بالا کاهش یافته، و بخش‌های زیادی به سمت رنگ‌های زرد و سبز کم‌تراکم‌تر تغییر یافته است. این کاهش نشان‌دهنده کاهش غنای پوشش گیاهی و احتمالاً، شروع روند بیابان‌زایی است. در سال ۲۰۲۳، مجدداً، مناطق با شاخص NDVI بالا کاهش یافته و شیف‌ت به سمت

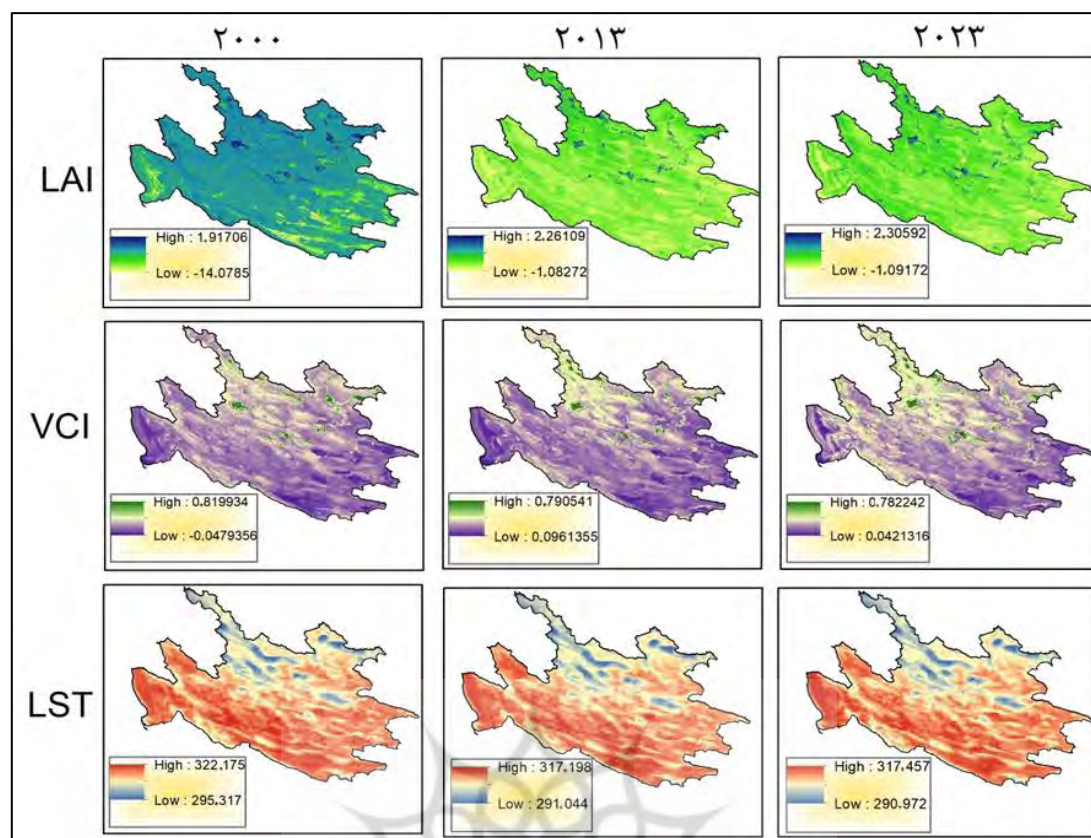
نواحی با شاخص پایین‌تر (رنگ سبز کم تراکم) دیده می‌شود. این روند، نشان‌دهنده روند منفی در توسعه پوشش گیاهی و تشدید فرآیند بیابان‌زایی در دهه‌های اخیر است. نقشه‌های EVI نیز در سه دوره، کاهش تدریجی در مناطق با تراکم نسبی شاخص بالا را نشان می‌دهند. در سال ۲۰۰۰، بخش‌های وسیعی با شاخص EVI بالای ۰/۶۵ داشتیم که نشان‌دهنده اکوسیستم سبز و کارآمد است. در ۲۰۱۳، اندازه این نواحی کاهش قابل‌توجهی داشته، و در سال ۲۰۲۳، میزان نواحی با شاخص بالا کاهش یافته و ضریب گستره مناطق با شاخص‌های پایین‌تر، به‌ویژه در مرکز و بخش‌های جنوبی، افزایش یافته است. این الگو نشانگر کاهش سلامت و تراکم پوشش گیاهی است که می‌تواند نتیجه فعالیت‌های انسانی، کاهش منابع آب، خشک‌سالی یا فرسایش خاک باشد. نقشه‌های SAVI هم نشان‌دهنده کاهش قدرت پوشش گیاهی است؛ در حالی که در سال ۲۰۰۰، بخش‌های متعددی با شاخص SAVI بالا (رنگ زرد و زرد روشن) فراگیر بودند، این نواحی در ۲۰۱۳ و به‌ویژه در ۲۰۲۳، به سمت رنگ‌های سبز کم‌تراکم و خاکستری میل کرده‌اند. کاهش شاخص SAVI، نشان‌دهنده کاهش هم‌زمان در تراکم و وضعیت سلامت گیاهان است، که می‌تواند نشان‌دهنده شروع یا تشدید پدیده بیابان‌زایی در منطقه باشد.

بر اساس نقشه‌های شاخص‌های NDVI، EVI و SAVI می‌توان نتیجه‌گیری کرد که روند تغییرات منطقه‌ای در طی دو دهه اخیر، حکایت از کاهش مداوم و معنادار پوشش گیاهی دارد. این روند هم‌راستا با افزایش شاخص آلودگی (بیابان‌زایی و کاهش پوشش گیاهی) است و نشان می‌دهد که منطقه در مسیر تشدید فرایندهای بیابان‌زایی قرار گرفته است. کاهش مناطق سبز و تراکم گیاهی، به‌ویژه در مرکز و شمال، حاکی از تخریب اکوسیستم، کاهش منابع آب‌و خاک است که نیازمند اقدامات اصلاحی و پایش مستمر است.



شکل ۳. ردیف اول شاخص پوشش گیاهی NDVI، ردیف دوم شاخص پوشش گیاهی EVI، ردیف سوم شاخص پوشش گیاهی SAVI در سه بازه زمانی ۲۰۲۳، ۲۰۱۳، ۲۰۰۰

نتایج حاصل از تحلیل تصاویر شاخص سطح برگ (LAI) در سه بازه زمانی ۲۰۰۰، ۲۰۱۳ و ۲۰۲۳ نشان‌دهنده تغییرات چشمگیری در پوشش گیاهی منطقه مورد مطالعه است. در سال ۲۰۰۰، بخش‌های گسترده‌ای از منطقه، به‌ویژه در قسمت‌های مرکزی و جنوبی، دارای مقادیر نسبتاً متوسط LAI بودند که نشان‌دهنده پوشش گیاهی نسبی در این نواحی بود. اما در سال ۲۰۱۳، کاهش محسوسی در مقادیر LAI مشاهده شد، به‌گونه‌ای که بیشتر مناطق مرکزی و جنوبی دچار کاهش تراکم پوشش گیاهی شدند و تنها بخش‌های محدودی در نواحی شمالی دارای پوشش متراکم باقی ماندند. این روند در سال ۲۰۲۳ ادامه یافته و کاهش شدید LAI در بخش‌های جنوبی و مرکزی نشان‌دهنده افزایش فرایند بیابان‌زایی است. در مقابل، مناطق شمالی همچنان دارای مقادیر بالاتر LAI بوده و پوشش گیاهی متراکم‌تری نسبت به سایر بخش‌ها دارند. مقادیر شاخص VCI در سه بازه زمانی مختلف (۲۰۰۰، ۲۰۱۳ و ۲۰۲۳) نشان‌دهنده کاهش قابل‌توجه وضعیت پوشش گیاهی در نواحی مرکزی و جنوبی است. در سال ۲۰۰۰، وضعیت گیاهی در مناطق شمالی مناسب و در نواحی مرکزی و جنوبی ضعیف بود، اما در سال ۲۰۱۳، کاهش وضعیت گیاهی در بخش‌هایی از منطقه به‌وضوح مشاهده شد. در سال ۲۰۲۳، این کاهش شدت یافته و نواحی مرکزی و جنوبی بیشتر تحت تأثیر خشک‌سالی و بیابان‌زایی قرار گرفتند. به‌طورکلی، مناطق شمالی همچنان وضعیت بهتری دارند، درحالی‌که مناطق مرکزی و جنوبی با کاهش شدید پوشش گیاهی و گسترش بحران‌های زیست‌محیطی مواجه هستند. تحلیل تغییرات دمای سطح زمین (LST) در سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۱۳ و ۲۰۲۳ نشان‌دهنده روند افزایشی دما در بخش‌های مرکزی و جنوبی منطقه مورد مطالعه است. بیشترین افزایش دما در این نواحی می‌تواند ناشی از کاهش پوشش گیاهی و تغییر کاربری اراضی باشد، که خود منجر به کاهش تعرق گیاهان، افزایش بازتاب سطحی (آلبدو) و کاهش ظرفیت نگهداشت رطوبت خاک شده است. در مقابل، مناطق شمالی با مقادیر LST پایین‌تر احتمالاً دارای پوشش گیاهی متراکم‌تر و رطوبت بیشتر خاک هستند که به تعادل دمایی کمک کرده است. افزایش دمای سطحی در مناطق گرم‌تر، علاوه بر تشدید تبخیر و کاهش رطوبت خاک، می‌تواند موجب تشدید فرایند بیابان‌زایی و کاهش کیفیت اکوسیستم شود (شکل ۴).



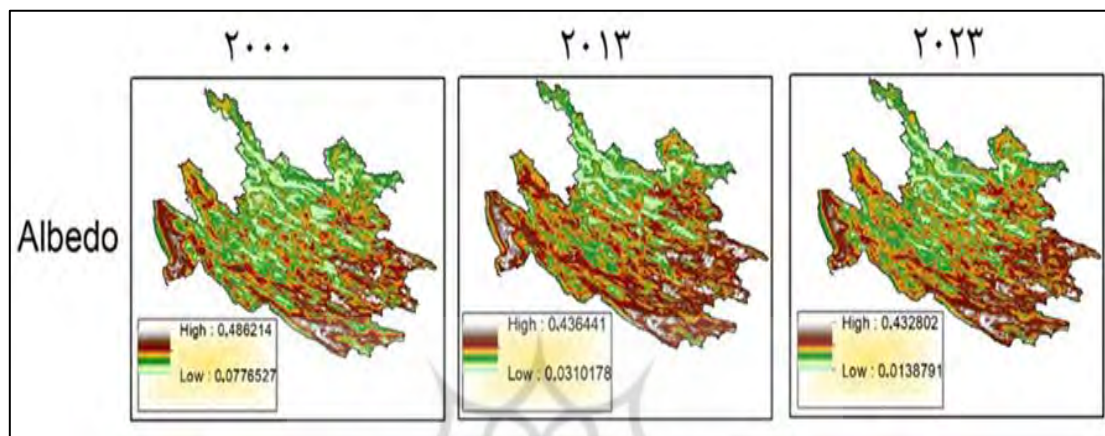
شکل ۴. ردیف اول شاخص پوشش گیاهی LAI، ردیف دوم شاخص پوشش گیاهی VCI، ردیف سوم دمای سطح زمین LST در سه بازه زمانی ۲۰۰۰، ۲۰۱۳، ۲۰۲۳

تحلیل شاخص آلوده به عنوان شاخص بیابان‌زایی و توسعه بیابان

بر اساس شکل ۵ و مقایسه نقشه‌های شاخص آلوده در سه دوره زمانی سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۱۳ و ۲۰۲۳، می‌توان روندهای تغییرات سطح خاک و فرآیندهای بیابان‌زایی منطقه را به صورت علمی و منطقه‌ای تحلیل کرد. به طوری که در این نقشه‌ها، رنگ‌های سبز نشان‌دهنده مناطق با سطح خاک کم و تراکم کمتر خاک‌های خشک و بی‌گیاهی است، در حالی که رنگ‌های نارنجی و قرمز نشان‌دهنده سطوح بالای آلوده، یعنی مناطق با خاک‌های خشک، بی‌گیاهی و بیابانی است. در ابتدا، در سال ۲۰۰۰، نقشه آلوده نشان می‌دهد که مناطق عمدتاً در وضعیت سبز و زرد قرار دارند، که نشان‌دهنده سطح خاک پایین و فراوانی پوشش گیاهی نسبی در مناطق مرکزی و شمالی است. بخش‌های محدودی در بعضی نواحی جنوبی و شرقی، رنگ نارنجی و قرمز دارند که نشان‌دهنده سطح خاک بالا و احتمال توسعه بیابان است ولی در کل، منطقه وضع نسبتاً پایدار و کم‌تر تحت تأثیر بیابان‌زایی قرار گرفته است.

در این دوره، نقشه نشان می‌دهد که تراکم خاک و سطوح بیابانی تا حدی افزایش یافته است، به خصوص در نواحی جنوبی و مرکزی، که رنگ‌های نارنجی و قرمز در افق‌های گسترده‌تری ظاهر شده‌اند. این تغییرات گویای آغاز روند توسعه بیابان‌زایی است، و احتمالاً ناشی از خشک‌سالی، کاهش منابع آب و فعالیت‌های انسانی است. در سال ۲۰۲۳، منطقه نشانگر توسعه قابل توجه بیابان‌ها و افزایش سطح خاک خشک و بی‌گیاهی است، با گسترش نواحی با رنگ‌های قرمز و نارنجی در سراسر منطقه، به ویژه در بخش‌هایی که پیش‌تر در وضعیت نسبتاً پایدار بودند. این تغییرات، بیانگر تشدید فرآیندهای بیابان‌زایی و تخریب زیرساخت‌های گیاهی و خاکی در منطقه است. طی دوره‌های زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳، شاخص آلوده نشان‌دهنده روند افزایشی در میزان خاک‌های خشک، بی‌گیاهی و بیابانی است. توسعه نواحی با شاخص

سطح خاک بالا، به‌ویژه در مناطق مرکزی و جنوبی، خبر از تشدید فرآیند بیابان‌زایی دارد که ممکن است اثرات منفی بر اکوسیستم، منابع آب و کشاورزی منطقه داشته باشد. این منطقه نیازمند راهکارهای مدیریت خاک و کنترل فعالیت‌های انسانی است، تا از گسترش بیابان جلوگیری و وضعیت پایدارتری برای زیست‌بوم منطقه تأمین گردد. در نتیجه، مشاهده نقشه‌های آلبدو در طول دوره‌های مختلف، حکایت از تشدید فرآیندهای بیابان‌زایی، تخریب پوشش خاک و کاهش سطح خاک مرطوب و حاصلخیز در منطقه دارد. این روند، نشانگر نیاز به مداخلات حفاظتی و اصلاح بهره‌برداری است، تا از توسعه بیابان‌های جدید و ادامه بحران‌های زیست‌محیطی جلوگیری شود.



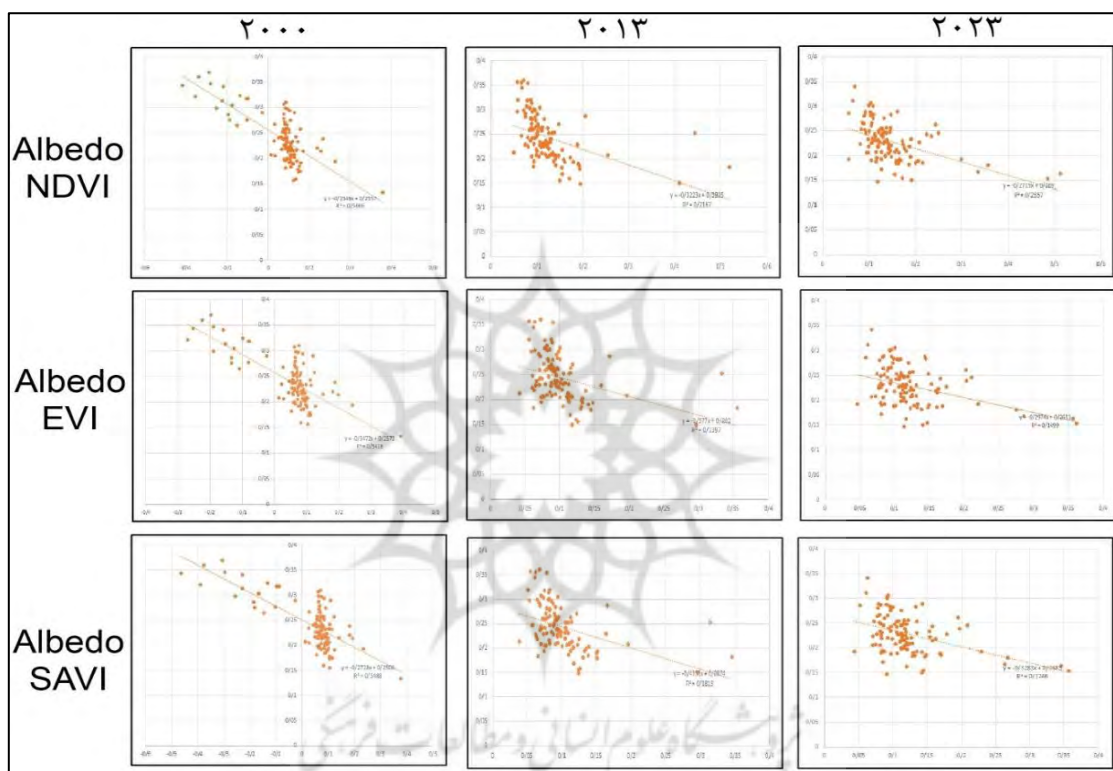
شکل ۵. آلبدو در سه بازه زمانی ۲۰۲۳، ۲۰۱۳، ۲۰۰۰

تحلیل روابط بین آلبدو و شاخص‌های پوشش گیاهی در سه دوره زمانی

بر اساس شکل ۷ که نتایج تحلیل روابط همبستگی بین شاخص آلبدو و شاخص‌های NDVI، EVI و SAVI را در سه دوره زمانی ۲۰۲۳، ۲۰۱۳، ۲۰۰۰ نشان می‌دهد. در نمودارهای مربوط به آلبدو و NDVI، مشاهده می‌شود که در هر سه دوره، رابطه منفی معناداری وجود دارد. به‌طوری‌که در سال ۲۰۰۰، شاخص NDVI حدود -0.78 و آلبدو در حدود 0.486 بوده، که نشان‌دهنده کاهش پوشش گیاهی منطبق با افزایش سطح خاک‌های خشک و بیابانی است. در سال ۲۰۱۳، این روند تثبیت یافته و رابطه منفی همچنان قوی است، اما شدت رابطه کمی کاهش یافته است. در ۲۰۲۳، با افزایش آلبدو و کاهش NDVI، این رابطه منفی همچنان حفظ شده است، اما میزان شیب کاهش‌پذیری آن کمی ملایم‌تر شده است. این الگوهای همبستگی نشان می‌دهد که با افزایش سطح خاک خشک و بیابان‌زایی (آلبدو بالا)، پوشش گیاهی کاهش می‌یابد، که تأییدی بر فرآیندهای بیابان‌زایی و تخریب اکوسیستم است. رابطه بین آلبدو و شاخص EVI در سه دوره، مشابه رابطه با NDVI است، به‌صورتی که در تمامی سال‌ها، همبستگی منفی قوی مشاهده می‌شود. در سال ۲۰۰۰، مقدار رابطه منفی نشان‌دهنده کاهش سلامت و تراکم پوشش گیاهی است، و با گذر زمان، این رابطه در سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۲۳، تثبیت شده و شدت آن باقی‌مانده است. این داده‌ها، نشان می‌دهد که افزایش شاخص سطح خاک خشک، هم‌زمان با کاهش هم‌زمان شاخص‌های پوشش گیاهی، در سراسر منطقه اتفاق افتاده است، که حاکی از شدت یافتن روند بیابان‌زایی است. رابطه بین آلبدو و شاخص SAVI در هر سه دوره، تقریباً مشابه روابط دیگر شاخص‌ها است، و نشان‌دهنده رابطه منفی معنادار است. در سال ۲۰۰۰، شاخص SAVI حدود 0.585 و آلبدو حدود 0.482 بوده، که نشان‌دهنده نسبت مستقیم کاهش پوشش گیاهی و توسعه خاک‌های خشک است. در سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۲۳، این رابطه با شدت مشابه و یا کمی کاهش‌یافته حفظ شده است، که نشان می‌دهد روند تخریب پوشش گیاهی و توسعه بیابان،

همچنان مستمر است. به‌طور کلی رابطه منفی قوی و معنی‌داری بین آلبدو و شاخص‌های گیاهی در تمامی دوره‌ها برقرار است. با افزایش آلبدو (سطح خاک خشک)، شاخص‌های NDVI، EVI و SAVI کاهش یافته‌اند. این نتایج، نشان‌دهنده فرآیند منفی هم‌زمان توسعه بیابان و کاهش سلامت اکوسیستم منطقه است. همه این روابط، تأییدی بر تشدید پدیده بیابان‌زایی، تحلیل رفتن سطح خاک و کاهش پوشش گیاهی را در طول زمان نشان می‌دهند.

در نتیجه، تحلیل همبستگی‌های این سه شاخص، به‌طور واضح بیانگر آن است که پدیده بیابان‌زایی در منطقه در حال شدت گرفتن است، و افزایش شاخص آلبدو هم‌زمان با کاهش شاخص‌های پوشش گیاهی، روند عکس‌العمل اثبات‌کننده‌ای از توسعه بیابان و تخریب بوم‌سازگان را نشان می‌دهد. این یافته‌ها، اهمیت پایش مستمر و اجرای برنامه‌های مدیریتی، حفاظتی و اصلاحی در منطقه را بیشتر می‌سازد.

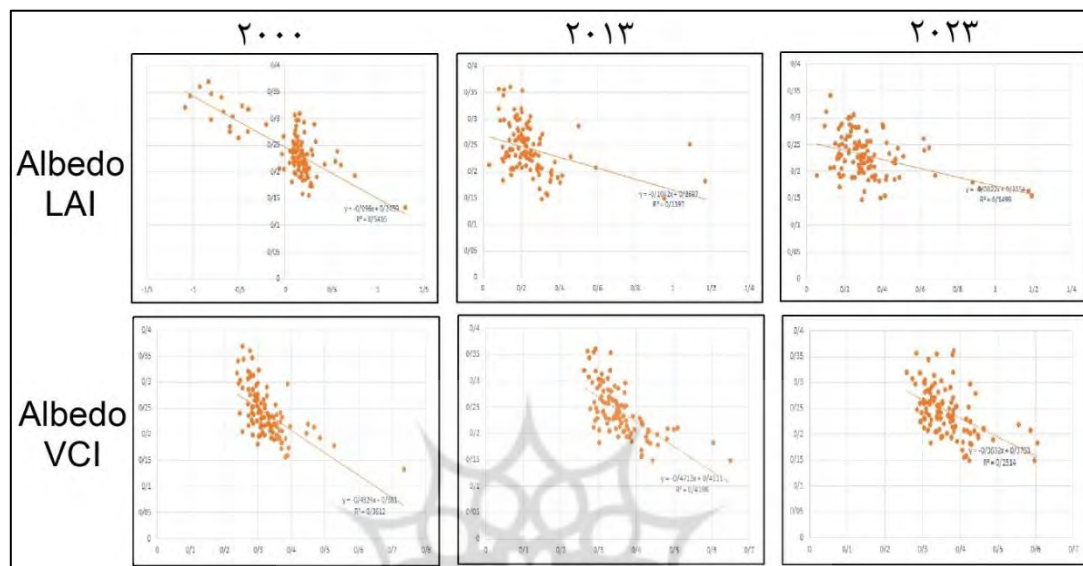


شکل ۷. نتایج حاصل از بررسی رابطه بین Albedo و شاخص‌های NDVI، EVI، SAVI

تحلیل روابط بین آلبدو و شاخص‌های LAI و VCI در دوره‌های زمانی مختلف

شکل ۸، نتایج تحلیل روابط همبستگی بین شاخص آلبدو و شاخص‌های LAI و VCI در سه سال ۲۰۰۰، ۲۰۱۳ و ۲۰۲۳ را نشان می‌دهد. بر این اساس می‌توان بیان کرد، در تمامی سه دوره، رابطه منفی قوی و معنی‌داری بین شاخص آلبدو و LAI برقرار است. در سال ۲۰۰۰، مقدار رابطه منفی نشان می‌دهد که کاهش تراکم و غالب بودن پوشش گیاهی (LAI نزدیک به ۱/۲) در مناطق با سطح خاک پایین‌تر (آلبدو پایین) اتفاق می‌افتد. در سال ۲۰۱۳، این همبستگی تثبیت شده و شدت آن همچنان حفظ شده است. در سال ۲۰۲۳ هم، این رابطه همچنان وجود دارد و گویای آن است که هر اندازه سطح خاک خشک‌تر و بی‌گیاه‌تر شود، شاخص LAI کاهش یافته و سلامت و تراکم پوشش گیاهی کم‌تر شده است. این الگو نشان‌دهنده نقش مستقیم شاخص LAI در ارزیابی وضعیت بیابان‌زایی و تخریب پوشش گیاهی است، و کاهش آن در طول زمان، تأییدی بر توسعه پدیده بیابان است.

رابطه بین آلبدو و شاخص VCI نیز در سه دوره، همگام با رابطه با LAI، منفی و قوی است. شاخص VCI، که نشانگر وضعیت کمی و کیفیت وضعیت گیاهی در منطقه است، در سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۱۳ و ۲۰۲۳، در بخش‌هایی که آلبدو بالا است، کم‌ارزش‌تر شده است. این یعنی، افزایش خاک‌های خشک و بی‌گیاهی، ارزیابی وضعیت زراعی و زیستی را کاهش می‌دهد، و این رابطه در تمامی سال‌ها قابل‌مشاهده است. این الگو، نشان می‌دهد که با شدت گرفتن بیابان‌زایی، شاخص VCI هم کاهش‌یافته و نشان‌دهنده کاهش سلامت و تراکم گیاهان است، که با روند توسعه بیابان سازگاری دارد.



شکل ۸. نتایج حاصل از بررسی رابطه بین Albedo و شاخص‌های LAI، VCI

رابطه منفی قوی و معنادار بین آلبدو و هر دو شاخص LAI و VCI در دوره‌های مختلف حفظ‌شده است. افزایش سطح خاک‌های خشک و بی‌گیاهی (آلبدو بالا) به‌طور هم‌زمان با کاهش شاخص‌های ارزیابی وضعیت پوشش گیاهی (LAI و VCI) همراه است. این روابط، شاخص‌های مهم و قابل‌اعتماد برای ارزیابی و پایش روند بیابان‌زایی و تخریب بوم‌سازگان در منطقه هستند.

این تحلیل همبستگی، نشان می‌دهد که روند تخریب و توسعه بیابان در منطقه شدت یافته و ضعف‌های قابل‌ملاحظه‌ای در سلامت زیست‌محیطی و وضعیت پوشش گیاهی وجود دارد. مداخلات مدیریتی، اصلاح بهره‌برداری، و سیاست‌گذاری‌های حفاظتی بر اساس این شاخص‌ها ضروری است تا روند توسعه بیابان کنترل و منطقه بازسازی شود. با توجه به داده‌های آلبدو و تحلیل‌های انجام‌شده، می‌توان حوضه مند را به سه پهنه اصلی از نظر بیابان‌زایی تقسیم کرد: ۱- پهنه با خطر بیابان‌زایی کم حدود ۲۰٪ از حوضه مند، با مقادیر آلبدو بالا (بیشتر از ۰/۴) که نشان‌دهنده بازتابش زیاد و جذب کم انرژی خورشیدی است. این مناطق معمولاً دارای پوشش گیاهی نسبتاً خوب و رطوبت خاک مناسب هستند. ۲- پهنه با خطر بیابان‌زایی متوسط (حدود ۵۰٪ از حوضه مند، با مقادیر آلبدو متوسط (بین ۰/۲ تا ۰/۴) که نشان‌دهنده تعادل نسبی بین بازتابش و جذب انرژی خورشیدی است. این مناطق ممکن است در معرض کاهش پوشش گیاهی و افزایش فرسایش خاک باشند. ۳- پهنه با خطر بیابان‌زایی زیاد (حدود ۳۰٪ از حوضه مند، با مقادیر آلبدو پایین (کمتر از ۰/۲) که نشان‌دهنده جذب زیاد انرژی خورشیدی و بازتابش کم است. این مناطق معمولاً دارای پوشش گیاهی ضعیف، خاک خشک و مستعد بیابان‌زایی هستند.

جدول ۳. طبقه‌بندی بیابان‌زایی منطقه مورد مطالعه

پهنه‌بندی بیابان‌زایی	درصد حوضه مند	مقدار آلبدو
کم	۲۰٪	بیشتر از ۰/۴
متوسط	۵۰٪	بین ۰/۲ تا ۰/۴
زیاد	۳۰٪	کمتر از ۰/۲

بحث

در این پژوهش، با بهره‌گیری از تحلیل‌های چند شاخصه و داده‌های میان زمانی، نشان داد که منطقه مورد مطالعه در دهه‌های اخیر با روند قابل‌توجهی از تخریب پوشش گیاهی و توسعه بیابان مواجه است. کاهش مداوم در شاخص‌های NDVI، EVI و SAVI و هم‌زمان افزایش شاخص آلبدو، به‌عنوان شاخص‌های بیابان‌زایی، مؤید شدت یافتن فرآیندهای بیابان‌زایی و تخریب سازه‌های اکولوژیکی و خاک است. این روند، در کنار روابط منفی قوی و معنادار بین شاخص‌های گیاهی و شاخص‌های خاک خشک و بیابان، اهمیت پایش مستمر و مداخلات مدیریتی را بیش‌ازپیش آشکار می‌سازد (Masoudi & Zakerinejad 2010; Song et al., 2023; AbdelRahman & Aff, 2022; Higginbottom et al., 2014). در دهه‌های اخیر فرسایش خاک و تخریب پوشش گیاهی در نواحی بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک کشور موجب تشدید بیابان‌زایی و تخریب سرزمین شده است (ذاکری نژاد و فلاح ۱۴۰۲؛ ذاکری نژاد و معاوی ۱۴۰۳). تحلیل منطقه‌ای نشان می‌دهد که توسعه بیابان در نواحی مرکزی، جنوبی و شرقی منطقه، با روندهای متفاوتی صورت گرفته است، اما روند کلی حاکی از تشدید این پدیده است، که می‌تواند بر پایداری منابع آب، خاک، کشاورزی و امنیت غذایی در منطقه اثر منفی جدی بگذارد. بررسی جامع شاخص‌های پیوسته سطح خاک، تراکم پوشش گیاهی و وضعیت زراعی، نشان می‌دهد که تغییرات زمانی و منطقه‌ای در فرآیند بیابان‌زایی، نیازمند سیاست‌گذاری‌های یکپارچه، بهبود فناوری‌های مدیریت منابع طبیعی و تقویت ظرفیت‌های پایش و رصد در سطح منطقه است. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهد، که ابزارهای سنجش‌ازدور، به‌خصوص شاخص‌های SAVI، EVI، NDVI و آلبدو، توانایی بالایی در ارزیابی وضعیت بیابان‌زایی و پیش‌بینی روندهای آتی دارند که در مطالعات فراوانی نیز به اثربخشی این شاخص‌ها اشاره شده است (Shao et al., 2023; Zakerinejad et al., 2021; Zhang et al., 2019).

نتیجه‌گیری

امروزه استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی و همچنین شاخص آلبیدو با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای می‌توانند به‌عنوان ابزار مفید و کارآمدی جهت بررسی وضعیت بیابان‌زایی و تخریب اراضی خصوصاً در مناطق با وسعت زیاد مورد استفاده قرار گیرند. شاخص آلبیدو سطح زمین یکی از مهم‌ترین متغیرهای ژئوفیزیک کنترل‌کننده در مطالعات بیلان انرژی سطح زمین می‌باشد. اجرای برنامه‌های منظم برای پایش مناطق، به‌ویژه در مناطق حساس و در معرض توسعه بیابان، ضروری است. در نتیجه، این پژوهش نه‌تنها ابزاری کارا در ارزیابی بحران بیابان‌زایی است، بلکه راهکارهای مؤثری برای سیاست‌گذاری، مدیریت جامع منابع و اصلاح مسیر توسعه منطقه ارائه می‌دهد. اتخاذ راهبردهای مبتنی بر شواهد علمی و فناوری، از جمله ترویج کشاورزی پایدار، مدیریت کارآمد منابع آب، اصلاح ساختارهای بهره‌برداری و اجرای برنامه‌های احیا و تثبیت خاک، برای مقابله با فرایندهای بیابان‌زایی در اولویت قرار گیرد. با توجه به یافته‌ها و تحلیل‌های جامع این مطالعه، می‌توان نتیجه گرفت که فرآیند بیابان‌زایی در منطقه در حال گسترش است و نیازمند واکنش فوری و برنامه‌ریزی بلندمدت است. بهره‌گیری از فناوری‌های نوین سنجش‌ازدور، توسعه نظام‌های پایش و

مانیتورینگ و اجرای سیاست‌های کنترل‌کننده، کلید حفظ پایداری زیست‌بوم و تضمین توسعه پایدار در منطقه است. این کار، در نهایت، به حفظ تنوع زیستی، بهبود امنیت غذایی و ارتقاء کیفیت زندگی ساکنان منطقه منجر خواهد شد.

حامی مالی

این اثر حامی مالی نداشته است.

سهم نویسندگان در پژوهش

نویسندگان در تمام مراحل و بخش‌های انجام پژوهش سهم برابر داشتند.

تضاد و 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 به ما یاری رساندند، به‌ویژه کسانی که کار ارزیابی کیفیت مقالات را انجام دادند، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

منابع

- باغعیده، محمد، علیجانی، بهلول و ضیائیان، پرویز. (۱۳۹۰). بررسی امکان استفاده از شاخص پوشش گیاهی NDVI در تحلیل خشک‌سالی استان اصفهان. *مطالعات جغرافیایی مناطق خشک*، ۴، ۱۶-۱.
- حلبیان، امیرحسین و سلطانیان، محمود. (۱۳۹۵). ارزیابی تغییرات بیابان‌زایی در اصفهان با استفاده از فناوری سنجش‌ازدور و شبکه عصبی مصنوعی. *مخاطرات محیط طبیعی*، ۵(۹)، ۳۹-۴۵. <https://doi.org/10.22111/jneh.2018.18479.1165>
- حیدری‌عبدالو، اسماعیل، دهقان‌رحیم‌آبادی، پویان، خسروی، حسن، رفیع‌شریف‌آباد، جواد، و برآبادی، حسن. (۱۴۰۳). شاخص احتمال آسیب‌پذیری پوشش گیاهی: روشی جهت تعیین خطر بیابان‌زایی. *سنجش‌ازدور و سامانه اطلاعات جغرافیایی منابع طبیعی*، ۱(۱۵)، ۱-۱۹. <https://doi.org/10.30495/girs.2022.692984>
- داوری، سرور، راشکی، علیرضا، اکبری، مرتضی، و طالبانفرد، علی اصغر. (۱۳۹۲). بررسی وضعیت پوشش گیاهی بر روند بیابان‌زایی منطقه بیابانی دشت قاسم‌آباد بجنستان. *ششمین همایش سراسری کشاورزی و منابع طبیعی پایدار*.
- روستایی، شهرام، مختاری، داود و خدائی قشلاق، فاطمه. (۱۳۹۹). بررسی خطر وقوع بیابان‌زایی با استفاده از شاخص‌های طیفی در محدوده پیرامونی دریاچه ارومیه، *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، ۹(۳)، ۱۷-۱. <https://doi.org/10.22034/gmpj.2020.122206>
- ذاکری نژاد، رضا. (۱۴۰۲). تهیه نقشه میزان فرسایش و رسوب حوضه آبخیز خسویه با استفاده از مدل USPED و سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) و مقایسه آن با رخساره‌های فرسایش آبی. *پژوهش‌های فرسایش محیطی*، ۳(۱۳)، ۲۵۶-۲۳۹. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22517812.1402.13.3.12.8>
- ذاکری نژاد، رضا و فلاح، سلمان. (۱۴۰۲). ارزیابی خطر فرسایش آبی با استفاده از ترکیب مدل تجدیدنظر شده جهانی فرسایش خاک (RUSLE) و نقشه تراکم آب‌کندی در حوضه آبخیز علا مرودشت استان فارس. *پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی*، ۱۱(۴)، ۲۰۹-۱۸۹. <https://doi.org/10.22034/gmpj.2022.360905.1375>
- ذاکری نژاد، رضا و معاوی، مهشید. (۱۴۰۳). بررسی اثرات تغییرات کاربری اراضی در پوشش گیاهی (مطالعه موردی: حوضه میان آب شوشتر در بازه زمانی ۲۰۲۰-۲۰۰۰). *مطالعات جغرافیایی مناطق خشک*، ۵(۵۵)، ۱۴۷-۱۳۲. <https://doi.org/10.22034/jargs.2023.407397.1049>
- عیسی زاده، وحید، آسیایی، شکوفه و عیسی زاده، اسماعیل. (۱۳۹۹). بررسی پایش دمای سطح زمین با استفاده تصاویر لندست ۸ و الگوریتم‌های تک کاناله و پنجره مجزا (منطقه مورد مطالعه: شهرستان دزفول). *جغرافیا و روابط انسانی*، ۳(۳)، ۸-۲۵.

<https://doi.org/10.22034/gahr.2020.259461.1480>

فیروزی، فاطمه، طاووسی، تقی، و محمودی، پیمان. (۱۳۹۸). بررسی حساسیت دو شاخص پوشش گیاهی NDVI و EVI به خشک‌سالی‌ها و ترسالی‌ها در مناطق خشک و نیمه‌خشک؛ مطالعه موردی: دشت سیستان ایران. *اطلاعات جغرافیایی*،

۲۸ (۱۱۰)، ۱۶۳-۱۷۹. <https://www.doi.org/10.22131/sepehr.2019.36621>

کریمی، مهشید، شاهدی، کاکا، رضائی، طیب، و میریعقوب زاده، میرحسین. (۱۳۹۸). بررسی کارایی شاخص‌های پوشش گیاهی در تحلیل خشک‌سالی کشاورزی با استفاده از تکنیک سنجش‌ازدور در حوزه آبخیز کرخه. *سنجش‌ازدور و GIS ایران*، ۱۱ (۴)،

۲۹-۴۶. <https://doi.org/10.52547/gisj.11.4.29.46>

کیخسروی، قاسم. (۱۳۹۴). بررسی تطبیقی شاخص‌های خشک‌سالی هواشناسی و ماهواره‌ای در روند بیان‌زایی طبقات پوشش گیاهی در فصل بهار. *کاوش جغرافیایی مناطق بیابان*، ۲، ۱۸۹-۲۳۱. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.2345332.1394.3.2.9.1.231-189>

مجردی، برات، میرمیری، جواد و علیزاده، حسین. (۱۳۹۹). ارزیابی شاخص وضعیت پوشش گیاهی VCI با استفاده از شاخص بارش استاندارد اصلاح‌شده MSPI به‌منظور پایش و پهنه‌بندی خشک‌سالی. *مهندسی و مدیریت آبخیز*، ۱۲ (۳)،

1402. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2019.116643.1402>

نادی، محمد، کلاتتری، سعیده، خوانین‌زاده، علیرضا و تازه، مهدی. (۱۴۰۱). ارزیابی وضعیت بیان‌زایی شهر طبرس بر اساس شاخص‌های بیان‌زایی تکنوژنیک با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، *مدیریت اکوسیستم‌های طبیعی*، ۲ (۲)، ۳۴-۴۵.

<https://doi.org/10.22034/emj.2022.254751>

هاشم گلوگردی، ساره، ولی، عباسعلی، و شریفی، محمدرضا. (۱۴۰۰). کاربرد مدل فضایی ویژگی آلبو TGSi-در بررسی وضعیت بیابانی شدن مرکز استان خوزستان. *انجمن علمی مدیریت و کنترل مناطق بیابانی ایران*، ۳، ۴۹-۶۶.

<https://doi.org/10.22034/jdml.2021.534364.1341>

References

- AbdelRahman, M. A. (2023). An overview of land degradation, desertification and sustainable land management using GIS and remote sensing applications. *Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali*, 34(3), 767-808. <https://doi.org/10.1007/s12210-023-01155-3>
- AbdelRahman, M. A. E., Afifi, A. A., & Scopa, A. (2022). A Time Series Investigation to Assess Climate Change and Anthropogenic Impacts on Quantitative Land Degradation in the North Delta, Egypt. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 11(1), 30. <https://doi.org/10.3390/ijgi11010030>
- AbdelRahman, M. A., & Arafat, S. M. (2020). An approach of agricultural courses for soil conservation based on crop soil suitability using geomatics. *Earth Systems and Environment*, 4(1), 273-285. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2016.02.001>
- Baqeideh, M., Alijani, B., & Ziaian, P (2011). Evaluating the possibility of using the NDVI index to analyze and monitor droughts in Esfahan Province. *Journal of Arid Regions Geographic Studies*, 2(4), 1-16. [In Persian]
- Berdyayev, A., Al-Masnay, Y. A., Juliev, M., & Abuduwalli, J. (2024). Desertification Monitoring Using Machine Learning Techniques with Multiple Indicators Derived from Sentinel-2 in Turkmenistan. *Remote Sensing*, 16(23), 4525. <https://doi.org/10.3390/rs16234525>
- Bezerra, F. G. S., Aguiar, A. P. D. D., Alvalá, R. C. D. S., Giarolla, A., Bezerra, K. R. A., Lima, P. V. P. S., ... & Arai, E. (2020). Analysis of areas undergoing desertification, using EVI2 multi-temporal data based on MODIS imagery as indicator. *Ecological Indicators*, 117, 106579. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106579>
- Davari, S., Rashki, A., Akbari, M., & Talebanfard, A. A. (2013). Assessment of vegetation cover status on desertification trends in the Qasemabad Desert region, Bajestan. *The 6th National Conference on Sustainable Agriculture and Natural Resources*. [In Persian]
- Eskandari Dameneh, H., Gholami, H., Telfer, M. W., Comino, J. R., Collins, A. L., & Jansen, J. D. (2021). Desertification of Iran in the early twenty-first century: assessment using climate and vegetation indices. *Scientific Reports*, 11(1), 20548. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-99636-8>
- 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>
- Firouzi, F., Tavosi, T. & Mahmoudi, P. (2019). Investigating the sensitivity of NDVI and EVI vegetation indices to dry and wet years in arid and semi-arid regions (Case study: Sistan plain, Iran). *Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 28(110), 163-179. [In Persian]
- Guo, B., Zhang, R., Lu, M., Xu, M., Liu, P., & Wang, L. (2024). A New Large-Scale Monitoring Index of Desertification Based on Kernel Normalized Difference Vegetation Index and Feature Space Model. *Remote Sensing*, 16(10), 1771. <https://doi.org/10.3390/rs16101771>.
- Halabian, A. H., & Soltanian, M. (2016). Assessment of the Isfahan desertification changes using remote sensing and artificial neural network. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 5(9), 39-54. [In Persian]
- Hashem Geloogardi, S., Vali, A. & Sharifi, M. R. (2021). Application of TGSI - Albedo feature space model in assessing of desertification status in the center of Khuzestan province. *Desert Management*, 9(3), 49-66. [In Persian]
- Heydari-Omdarloo, E., Dehghan-Rahimabadi, P., Khosravi, H., Rafie-Sharifabad, J., & Barabadi, H. (2024). Vegetation vulnerability probability index: A method for determining desertification risk. *Remote Sensing and Geographic Information System of Natural Resources*, 1(15), 1-19. [In Persian]
- Higginbottom, T. P., & Symeonakis, E. (2014). Assessing land degradation and desertification using vegetation index data: Current frameworks and future directions. *Remote Sensing*, 6(10), 9552-9575. <https://doi.org/10.3390/rs6109552>
<https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.01.001>
<https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1309757>
- Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote sensing of environment*, 25(3), 295-309. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)
- Isazade, V., Aasiabi, S. & Isazadeh, E. (2021). Surface temperature monitoring using Landsat 8 images and single channel and separate window algorithms (Study area: Dezful city). *Geography and Human Relationships*, 3(3), 8-25. [In Persian]
- karimi, M., Shahedi, K., Raziei, T. & Miryaghoobzadeh, M. (2020). Analysis of Performance of vegetation indices on agricultural drought using remote sensing technique in Karkheh basin. *Iranian Journal of Remote Sensing and GIS*, 11(4), 29-46. [In Persian]
- Keykhosravi, G. (2015). A comparative study of satellite and meteorological drought indices of the desertification process in the spring vegetation of Semnan province. *The Journal of Geographical Research on Desert Areas*, 3(2), 189-213. [In Persian]
- Kumar, B. P., Babu, K. R., Anusha, B. N., & Rajasekhar, M. (2022). Geo-environmental monitoring and assessment of land degradation and desertification in the semi-arid regions using Landsat 8 OLI/TIRS, LST, and NDVI approach. *Environmental Challenges*, 8, 100578. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2022.100578>
- Masoudi, M., & Zakerinejad, R. (2010). Hazard assessment of desertification using MEDALUS model in Mazayjan plain, Fars province, Iran. *Ecol Environ Conserv*, 16(3), 425-430.
- Masoudi, M., & Zakerinejad, R. (2011). A new model for assessment of erosion using desertification model of IMDPA in Mazayjan plain, Fars province, Iran. *Ecol Environ Conserv*, 17(3), 489-594.
- Meng, X., Gao, X., Li, S., Li, S., & Lei, J. (2021). Monitoring desertification in Mongolia based on Landsat images and Google Earth Engine from 1990 to 2020. *Ecological indicators*, 129, 107908. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107908>
- Mijani, K., Mahdavi, R., Gholami, H., & Rezaei, M. (2022). Monitoring and Modeling of Desertification Intensity Using Landsat Satellite Images (Case Study of Yazdanabad-Zarand watershed). *Irrigation and Water Engineering*, 13(2), 446-462. <https://doi.org/10.22125/iwe.2022.162688>
- Mojaradi, B., mirmiri, J. & Hosein, A. (2020). Assessment of Vegetation Condition Index Using Modified Standard Precipitation Index to Monitor and zoning Drought. *Watershed Engineering and Management*, 12(3), 725-736. [In Persian]
- Mutti, P. R., Lúcio, P. S., Dubreuil, V., & Bezerra, B. G. (2020). NDVI time series stochastic

- models for the forecast of vegetation dynamics over desertification hotspots. *International Journal of Remote Sensing*, 41(7), 2759-2788. <https://doi.org/10.1080/01431161.2019.1697008>
- Nadi, M., Kalantari, S., Khavaninzadeh, A. & Tazeh, M. (2022). Evaluation of desertification situation in Tabas city based on technogenic desertification indicators using satellite images. *Management of Natural Ecosystems*, 2(2), 34-45. [In Persian]
- Rivera-Marín, 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>
- Rostaei, S., Mokhtari, D. & khodaei gheslagh, F. (2020). Evaluating the risk of desertification using the spectral indices in the surrounding area of Lake Urmia. *Quantitative Geomorphological Research*, 9(3), 1-17. [In Persian]
- Shao, W.Y., Wang, Z.Q., & Guan, Q.Y. (2023). Environmental sensitivity assessment of land desertification in the Hexi Corridor. *Catena*, 220, 106728. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106728>
- Song, Z., Lu, Y., Ding, Z., Sun, D., Jia, Y., & Sun, W. (2023). A New Remote Sensing Desert Vegetation Detection Index. *Remote Sens.* 15, 5742. <https://doi.org/10.3390/rs15245742>
- Wang, S., Ma, L., Yang, L., Long, X., Guan, C., Zhao, C., & Chen, N. (2024). Quantifying desertification in the Qinghai Lake Basin. *Frontiers in Environmental Science*, 12, 1309757.
- Watson, D. J. (1947). Comparative physiological studies on the growth of field crops: I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. *Annals of botany*, 11(41), 41-76.
- Zakerinejad, R., & Masoud, M. (2020). Quantitative mapping of desertification risk using modified MEDALUS model: a case study in the Mazayejan Plain, Southwest Iran. *AUC Geographica*, 54(2), 232–239. <https://doi.org/10.14712/23361980.2019.20>
- Zakerinejad, R. & Falah, S. (2023). Evaluation of Water Erosion Hazard Map Using the Combination of the RUSLE Model and Gully Erosion Density Map in Alamarvdasht Watershed of Fars Province, Iran. *Quantitative Geomorphological Research*, 11(4), 189-209.
- Zakerinejad, R. & Moavi, M. (2024). Investigating the effects of land use changes on vegetation (Case study: Mian-Ab watershed in the period 2000-2020). *Journal of Arid Regions Geographic Studies*, 15(55), 147-132. [In Persian]
- Zakerinejad, R. (2023). Mapping erosion and sediment rates in the Khosuyeh watershed using the USPED model and GIS, and its comparison with water erosion facies. *Environmental Erosion Research*, 13(3), 239–256. [In Persian]
- Zakerinejad, R., Christian, S., Volker, H., & Michael, M. (2021). Spatial Disterbution Of Water Erosion Using Stochastic Modeling In The Southern Isfahan Province, Iran, *Geogr FIS DIN QUAT*, 44 (2), 203–216. <https://doi.org/10.4461/GFDQ.2021.44.14>
- Zhang, L., Qu, J., Gui, D., Liu, Q., Ahmed, Z., Liu, Y., & Qi, Z. (2022). Analysis of desertification combating needs based on potential vegetation NDVI—A case in the Hotan Oasis. *Frontiers in Plant Science*, 13, 1036814. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1036814>
- Zhang, X.L., Zhang, F., Qi, Y.X., Deng, L.F., Wang, X.L., & Yang, S.T. (2019). New research methods for vegetation information extraction based on visible light remote sensing images from an unmanned aerial vehicle (UAV). *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 2019, 78, 215–226.
- Zhu, X., Leung, K. H., Li, W. S., & Cheung, L. K. (2020). Monitoring interannual dynamics of desertification in Minqin County, China, using dense Landsat time series. *International Journal of Digital Earth*, 13(8), 886-898. <https://doi.org/10.1080/17538947.2019.1585979>
- Zongfan, B., Ling, H., Xuhai, J., Ming, L., Liangzhi, L., Huiqun, L., & Jiaxin, L. (2022). Spatiotemporal evolution of desertification based on integrated remote sensing indices in Duolun County, Inner Mongolia. *Ecological Informatics*, 70, 101750. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101750>