

Spatiotemporal Trend and Correlation Analysis of Climatic and Environmental Indices Associated with Desertification in Khatam and Abarkooch Counties Using Satellite Data

Zahra Behzadi¹ , Mohamad Sharifi Paichoon²  

1. Department of Geography, Faculty of of Human science, University Yazd, Iran

Email: zhrabhzady495@gmail.com

2. (Corresponding Author) Department of Geography, Faculty of of Human science, University Yazd, Iran

Email: mscharifi@yazd.ac.ir

Article Info

Article type:
[Research Article](#)

Article History:

Received:

7 July 2025

Revised:

11 October 2025

Accepted:

20 November 2025

Available online:

24 December 2025

Keywords:

Desertification,
Mann-Kendall Test,
Southern Yazd
Province,
Dryland
Ecosystems.

ABSTRACT

Desertification in arid and semi-arid regions of Iran is accompanied by variations in climatic and environmental indicators. The aim of this study is to analyze the spatio-temporal trends and statistical relationships of climatic and environmental proxy indicators associated with desertification-related processes in Khatam and Abarkuh counties during the period 2000–2022. To this end, the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), as a proxy for vegetation cover conditions, was derived from MODIS data; soil moisture and actual evapotranspiration were obtained from TerraClimate; and precipitation and wind speed were extracted from the WorldClim dataset. Long-term trend analysis was performed using the non-parametric Mann–Kendall test and Sen's slope estimator, while pixel-based Pearson correlation analysis was employed to examine statistical relationships among the indicators. The results indicated that 63% of the pixels exhibited a significant decreasing trend in NDVI (mean Sen's slope of -0.002 per year), while precipitation showed a declining trend over 69% of the study area, with an average decrease of 1.5 mm per year. Simultaneously, soil moisture displayed a negative trend in 58% of the pixels, whereas actual evapotranspiration showed an increasing trend in 47% of low-lying and arid areas. Wind speed exhibited an increasing trend in 42% of the open eastern zones. Correlation analysis revealed significant positive relationships between NDVI and precipitation as well as soil moisture across large parts of the region, and notable negative correlations between NDVI and wind speed in dry plain areas. Overall, these findings indicate the spatio-temporal co-variation and statistical alignment of environmental indicator changes with conditions associated with desertification, rather than direct causal relationships.

Cite this article: Behzadi, Z., & Sharifi Paichoon, M. (2025). Spatiotemporal Trend and Correlation Analysis of Climatic and Environmental Indices Associated with Desertification in Khatam and Abarkooch Counties Using Satellite Data. *Physical Geography Research Quarterly*, 57 (4), 43–61.

<http://doi.org/10.22059/jphgr.2026.407281.1007912>



© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press

Extended Abstract

Introduction

Desertification is a complex and multi-dimensional process resulting from the interaction of climatic, environmental, and human factors, particularly in arid and semi-arid regions. Iran, due to its location within the global arid belt, pronounced climatic variability, and increasing pressure on natural resources, is highly vulnerable to desertification-related processes. The southern part of Yazd Province—especially Khatam and Abarkooh counties—because of extremely low precipitation, high evapotranspiration rates, wide bare surfaces, and frequent erosive winds, represents one of the most environmentally sensitive areas in central Iran. In the scientific literature, desertification is conceptually distinguished from short-term droughts and climatic fluctuations; however, it is not measured directly in most regional-scale studies. Instead, variations in environmental and climatic conditions are commonly assessed using proxy indicators. In this regard, vegetation cover (NDVI), soil moisture, precipitation, actual evapotranspiration, and wind speed are widely applied as proxy indicators for evaluating conditions associated with desertification-related processes. Due to the limited spatial coverage of meteorological stations, remote sensing data provide an indispensable means for capturing the spatio-temporal variability of these indicators at regional scales. Accordingly, the objective of this study is to analyze the spatio-temporal trends and statistical relationships among climatic and environmental proxy indicators associated with desertification-related processes in Khatam and Abarkooh counties over a 22-year period (2000–2022), with an emphasis on identifying dominant spatial patterns and statistically significant associations rather than causal relationships.

Methodology

This study was conducted in Khatam and Abarkooh counties, located in the southern part of Yazd Province. The conceptual framework and required datasets were compiled using scientific literature, digital databases, and satellite-based products.

NDVI data were obtained from the MODIS sensor as a proxy for vegetation cover conditions, while soil moisture and actual evapotranspiration were derived from the TerraClimate dataset. Precipitation and wind speed data were extracted from WorldClim. All datasets were processed within a pixel-based spatio-temporal framework to ensure consistency across spatial and temporal scales. Long-term trends were assessed using the non-parametric Mann–Kendall test and Sen's slope estimator, which are robust against non-normal distributions and missing values. To investigate statistical relationships among variables, pixel-wise Pearson correlation analysis was performed, with NDVI considered the reference indicator. Google Earth Engine was employed as the primary platform for managing large datasets and conducting time-series and pixel-based analyses, while ArcGIS and R were used for visualization and supplementary processing.

Results and discussion

The 22-year trend analysis revealed that 63% of the pixels exhibited a statistically significant decreasing trend in NDVI, with the most pronounced declines occurring in central Khatam and the plains of Abarkooh. Precipitation displayed a significant negative trend over 69% of the study area, with an average annual decrease of approximately 1.5 mm. Declining precipitation was statistically associated with reduced soil moisture, and 58% of the pixels showed a negative soil-moisture trend. In contrast, actual evapotranspiration exhibited an increasing trend in 47% of the low-lying and arid areas, while wind speed increased in 42% of the open eastern zones, indicating conditions conducive to enhanced wind erosion.

Correlation analysis demonstrated strong and statistically significant positive relationships between NDVI and both precipitation and soil moisture across large portions of the region, highlighting the importance of moisture availability for vegetation dynamics in dry environments. Conversely, negative correlations between NDVI and wind speed predominated in eastern and central plains, suggesting an

inverse association between vegetation cover and wind activity. The relationship between NDVI and actual evapotranspiration varied spatially, reflecting differences in moisture availability and surface conditions. Overall, these findings indicate a clear spatio-temporal co-variation and statistical alignment among environmental proxy indicators, which collectively reflect conditions associated with desertification-related processes, rather than direct causal mechanisms.

Conclusion

The results of this study demonstrate that the dryland ecosystems of southern Yazd Province are characterized by concurrent trends of declining vegetation cover, decreasing precipitation and soil moisture, increasing evapotranspiration, and rising wind speeds. The significant reduction in NDVI across more than half of the study area, accompanied by unfavorable trends in key climatic variables, indicates increasing environmental vulnerability and declining land stability. Statistical relationships suggest that precipitation and soil moisture exhibit the strongest positive associations with vegetation dynamics, while wind speed and evapotranspiration show inverse or spatially variable relationships with NDVI in arid and low-lying areas. Although these findings do not imply direct

causality, they highlight the potential reinforcement of desertification-related conditions if current trends persist. Therefore, continuous monitoring of climatic and environmental proxy indicators using satellite-based data, along with targeted land and water management strategies, vegetation restoration programs, and wind erosion control measures, is essential for supporting sustainable land management and mitigating environmental degradation in one of Iran's most sensitive dryland regions.

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.

تحلیل مکانی-زمانی روند و همبستگی شاخص‌های اقلیمی و زیست‌محیطی مرتبط با بیابان‌زایی در شهرستان‌های خاتم و ابرکوه با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای

زهرا بهزادی^۱ , محمد شریفی پیچون^۲  

۱- گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه یزد، یزد، ایران. رایانامه: zhrabhzady495@gmail.com

۲- نویسنده مسئول، گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه یزد، یزد، ایران. رایانامه: mscharifi@yazd.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
بیابان‌زایی در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران با تغییرات شاخص‌های اقلیمی و زیست‌محیطی همراه است. هدف این پژوهش، تحلیل مکانی-زمانی روند و روابط آماری شاخص‌های جانشین اقلیمی و زیست‌محیطی مرتبط با فرآیندهای بیابان‌زایی در شهرستان‌های خاتم و ابرکوه طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ است. بدین منظور، شاخص پوشش گیاهی NDVI به‌عنوان نماینده وضعیت پوشش گیاهی از MODIS، رطوبت خاک و تبخیر-تعرق واقعی از TerraClimate و بارندگی و سرعت باد از WorldClim استخراج شد. تحلیل روند بلندمدت با استفاده از آزمون ناپارامتری من-کندال و برآوردگر شیب سن انجام گرفت و روابط آماری بین شاخص‌ها با ضریب همبستگی پیرسون در مقیاس پیکسلی بررسی شد. نتایج نشان داد که ۶۳ درصد از پیکسل‌های منطقه روند کاهشی معنی‌دار در NDVI داشته‌اند (میانگین شیب سن $-۰/۰۰۲$ در سال) و بارندگی نیز در ۶۹ درصد از منطقه با کاهش متوسط $۱/۵$ میلی‌متر در سال همراه بوده است. هم‌زمان، رطوبت خاک در ۵۸ درصد از پیکسل‌ها روند منفی و تبخیر-تعرق واقعی در ۴۷ درصد از نواحی خشک و پست روند افزایشی نشان داد. سرعت باد نیز در ۴۲ درصد از مناطق باز شرقی روند افزایشی داشت. تحلیل همبستگی بیانگر وجود روابط مثبت و معنی‌دار بین NDVI و بارندگی و رطوبت خاک در بخش عمده منطقه و روابط منفی قابل توجه بین NDVI و سرعت باد در دشت‌های خشک است. این نتایج بیانگر هم‌زمانی و هم‌راستایی تغییر شاخص‌های محیطی با شرایط مرتبط با بیابان‌زایی بوده است.	نوع مقاله: مقاله پژوهشی
	تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۴/۱۶
	تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۷/۱۹
	تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۸/۲۹
	تاریخ چاپ: ۱۴۰۴/۱۰/۰۳
	واژگان کلیدی: بیابان‌زایی، آزمون من-کندال، جنوب استان یزد، اکوسیستم‌های خشک.

استناد: بهزادی، زهرا و شریفی پیچون، محمد. (۱۴۰۴). تحلیل مکانی-زمانی روند و همبستگی شاخص‌های اقلیمی و زیست‌محیطی مرتبط با بیابان‌زایی در شهرستان‌های خاتم و ابرکوه با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای. *مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۷ (۴)، ۴۳-۶۱.
<http://doi.org/10.22059/jphgr.2026.407281.1007912>

مقدمه

بر اساس گزارش‌های بین‌المللی، بیش از یک‌سوم سطح خشکی‌های زمین تحت تأثیر درجات مختلفی از بیابان‌زایی قرار گرفته و پیامدهای آن نه تنها در قالب تخریب سرزمین، بلکه در کاهش منابع آب شیرین، افت امنیت غذایی و افزایش مهاجرت‌های اجباری نمایان شده است (Burrell et al., 2020). ایران نیز به دلیل قرارگیری در کمربند خشک و نیمه‌خشک جهانی، نوسانات شدید اقلیمی و فشار فزاینده بر منابع طبیعی، از جمله کشورهایی است که بخش قابل‌توجهی از سرزمین آن در معرض فرآیندهای مرتبط با بیابان‌زایی قرار دارد (شعاعی و همکاران، ۱۴۰۲؛ شهبازی و همکاران، ۱۳۹۹). استان یزد و به‌ویژه شهرستان‌های خاتم و ابرکوه، به‌واسطه بارندگی اندک، تبخیر-تعرق بالا، سطوح باز گسترده و بادهای فرساینده، از مناطق حساس به این فرآیند محسوب می‌شوند. در ادبیات علمی، بیابان‌زایی به‌عنوان فرآیندی پیچیده و چندعاملی تعریف می‌شود که از برهم‌کنش عوامل اقلیمی، زیست‌محیطی و انسانی در مقیاس‌های مکانی-زمانی مختلف شکل می‌گیرد و نباید با مفاهیمی نظیر خشک‌سالی یا نوسانات کوتاه‌مدت اقلیمی یکسان انگاشته شود (Higginbottom & Symeonakis, 2014). خشک‌سالی عمده‌تأ پدیده‌ای اقلیمی و موقتی است، درحالی‌که بیابان‌زایی بیانگر تغییرات ساختاری و پایدار در عملکرد اکوسیستم‌هاست. تخریب سرزمین نیز مفهومی عام‌تر است که بیابان‌زایی می‌تواند یکی از جلوه‌های آن در مناطق خشک و نیمه‌خشک باشد. بر این اساس، در پژوهش حاضر بیابان‌زایی به‌طور مستقیم اندازه‌گیری نشده، بلکه از طریق شاخص‌های جانشین اقلیمی و زیست‌محیطی مورد پایش قرار گرفته است. در این چارچوب، شاخص‌هایی مانند پوشش گیاهی (NDVI)، بارندگی، رطوبت خاک، تبخیر-تعرق واقعی و سرعت باد به‌طور گسترده به‌عنوان نماگرهای کلیدی برای بررسی شرایط مرتبط با بیابان‌زایی در مطالعات جغرافیای طبیعی به‌کاررفته‌اند (Hu et al., 2023; Lamqadem et al., 2018; Zhao & Wu, 2018). NDVI بازتابی از وضعیت پوشش گیاهی و پایداری سطح زمین است و تغییرات آن به‌شدت تحت تأثیر رطوبت خاک و الگوی بارش قرار دارد. در مقابل، افزایش تبخیر-تعرق و سرعت باد می‌تواند با تشدید تنش رطوبتی و فرسایش بادی، ناپایداری اکوسیستم‌های خشک را افزایش دهد. اگرچه نقش عوامل انسانی در بیابان‌زایی انکارناپذیر است، تمرکز این پژوهش آگاهانه بر مؤلفه‌های اقلیمی و زیست‌محیطی بوده است، چراکه هدف، تحلیل الگوهای قابل‌استخراج از داده‌های ماهواره‌ای پیوسته و همگن در مقیاس منطقه‌ای است. مطالعات پیشین در ایران، به‌ویژه در استان یزد، به بررسی جداگانه مؤلفه‌هایی نظیر بارندگی (شیرغلامی و مسعودیان، ۱۴۰۲)، پوشش گیاهی (کیخسروی و محمدی، ۱۳۹۸) یا ارزیابی‌های ترکیبی مبتنی بر مدل‌هایی مانند IMDPA پرداخته‌اند (کرامت‌زاده و همکاران، ۱۴۰۱). در سطح بین‌المللی نیز پژوهش‌هایی روندهای اقلیمی و پاسخ پوشش گیاهی در مناطق خشک را بررسی کرده‌اند (Feng et al., 2025; Zhao & Wu, 2018). بااین‌حال، بخش عمده این مطالعات یا فاقد تحلیل پیکسلی هم‌زمان شاخص‌های چندگانه در بازه‌های بلندمدت بوده‌اند، یا روابط میان شاخص‌ها را بدون آماده‌سازی مناسب سطح مکانی-زمانی بررسی کرده‌اند. ازاین‌رو، شکاف اصلی پژوهشی در فقدان یک تحلیل منسجم، پیکسلی و بلندمدت از روند و همبستگی هم‌زمان شاخص‌های کلیدی اقلیمی و زیست‌محیطی مرتبط با بیابان‌زایی در جنوب استان یزد نهفته است.

بر این اساس، سؤال محوری پژوهش حاضر آن است که الگوهای مکانی-زمانی تغییر شاخص‌های NDVI، بارندگی، رطوبت خاک، تبخیر-تعرق واقعی و سرعت باد در شهرستان‌های خاتم و ابرکوه چگونه است و این شاخص‌ها چه روابط معناداری با یکدیگر در ارتباط با شرایط مرتبط با بیابان‌زایی نشان می‌دهند؟ در راستای پاسخ به این سؤال، در این پژوهش از داده‌های ماهواره‌ای بلندمدت و آزمون‌های ناپارامتریک Mann-Kendall، برآوردگر شیب Sen و تحلیل همبستگی پیکسلی استفاده شده است تا امکان تحلیل روندها و روابط آماری در مقیاس مکانی-زمانی مناسب فراهم شود.

هدف نهایی، تبیین روابط تقویتی یا تضعیفی میان شاخص‌ها، به‌عنوان مبنایی علمی برای پایش و مدیریت پایدار سرزمین در یکی از حساس‌ترین نواحی خشک ایران است.

روش پژوهش

منطقه مورد مطالعه این پژوهش، جنوب استان یزد شامل شهرستان‌های خاتم و ابرکوه است. گردآوری و تدوین مبنایی نظری و چارچوب پژوهش با استفاده از منابع کتابخانه‌ای، پایگاه‌های علمی معتبر و داده‌های سامانه‌های تصویربرداری ماهواره‌ای انجام شد. پردازش داده‌ها نیز با به‌کارگیری نرم‌افزارهای تخصصی (R و ArcGIS) و پلتفرم Google Earth Engine انجام گرفت. به‌منظور تحلیل روندهای زمانی بلندمدت و کاهش نوسانات کوتاه‌مدت، داده‌های ماهانه تمامی شاخص‌ها به مقیاس سالانه تجمیع شدند. در این پژوهش، تجمیع داده‌ها به‌صورت میانگین سالانه انجام گرفت؛ بدین معنا که مقدار هر شاخص در هر سال از میانگین مقادیر ماهانه همان سال محاسبه شد. هدف اصلی پژوهش، تحلیل روند تغییرات بیابان‌زایی و شاخص‌های مؤثر بر آن در این منطقه طی دوره آماری ۲۲ ساله (۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲) است، با این تأکید که بیابان‌زایی به‌صورت مستقیم سنجیده نمی‌شود، بلکه از طریق استنباط بر اساس متغیرهای جانشین (شاخص‌های کلیدی) ارزیابی می‌گردد. این بازه زمانی بر اساس دسترسی داده‌های ماهواره‌ای MODIS انتخاب‌شده که از سال ۲۰۰۰ به‌صورت مداوم و با رزولوشن مناسب موجود است. مزیت علمی این دوره نسبت به بازه‌های کوتاه‌تر (مانند ۱۰-۱۵ ساله) در امکان تشخیص روندهای بلندمدت بیابان‌زایی و کاهش تأثیر نوسانات کوتاه‌مدت (مانند خشک‌سالی‌های موقتی) است، که برای مطالعات جغرافیایی و محیطی حداقل ۲۰ سال توصیه می‌شود. شاخص‌ها و متغیرهای مورد مطالعه شامل پوشش گیاهی (NDVI)، بارندگی، تبخیر-تعرق واقعی، رطوبت خاک و سرعت باد بودند. این شاخص‌ها به این دلیل انتخاب شدند: NDVI برای پایش پایداری گیاهی، بارندگی/رطوبت خاک برای محدودیت‌های آبی، تبخیر-تعرق برای تعادل انرژی، و سرعت باد برای فرسایش بادی همه مستقیماً مرتبط با بیابان‌زایی هستند. به عبارتی این شاخص‌ها به‌عنوان نشانگرهای اصلی بیابان‌زایی انتخاب‌شده‌اند، زیرا تغییرات آن‌ها (مانند کاهش NDVI به‌عنوان نماینده تخریب پوشش گیاهی، افت بارندگی و رطوبت خاک، و افزایش تبخیر-تعرق و سرعت باد) مستقیماً با فرآیندهای تخریب سرزمین و گسترش بیابان هم‌خوانی دارند و امکان استنباط وضعیت بیابان‌زایی را فراهم می‌کنند. با توجه به تفاوت تفکیک مکانی داده‌های مورد استفاده، پیش از انجام تحلیل‌های پیکسلی و آماری، لایه‌ها از نظر مکانی هم‌تراز (Spatially aligned) شدند تا امکان مقایسه پیکسلی بین شاخص‌ها فراهم گردد. بدین منظور، داده‌های با تفکیک مکانی درشت‌تر نسبت به لایه NDVI به مقیاس مرجع تحلیل تبدیل شدند. برای بررسی روند این شاخص‌ها، از آزمون آماری من-کندال استفاده شد. پیش از به‌کارگیری آزمون ناپارامتری Mann-Kendall، فرض استقلال زمانی داده‌ها موردتوجه قرار گرفت. از آنجاکه وجود خودهمبستگی زمانی در سری‌های اقلیمی می‌تواند منجر به بیش برآورد معناداری روند شود، ساختار سری‌های زمانی شاخص‌ها به‌صورت سالانه و با هدف شناسایی خودهمبستگی مرتبه اول بررسی گردید. تمرکز پژوهش بر روندهای بلندمدت ۲۲ ساله و استفاده از داده‌های تجمیع شده سالانه، اثر خودهمبستگی کوتاه‌مدت را تا حد زیادی کاهش می‌دهد. بنابراین آزمون Mann-Kendall در چارچوب روندهای کلی مکانی-زمانی تفسیر شده و نتایج آن بیانگر الگوهای غالب تغییرات اقلیمی و محیطی منطقه است. داده‌های مورد نیاز از دو منبع اصلی تهیه گردید: داده‌های ماهواره‌ای شامل شاخص NDVI (با تفکیک مکانی ۲۵۰ متری از مجموعه MODIS در Google Earth Engine)، تبخیر-تعرق و رطوبت خاک (از پایگاه TerraClimate)، و بارش و سرعت باد (از پایگاه WorldClim). با توجه به قرارگیری منطقه مورد مطالعه در عرض‌های جغرافیایی میانی ایران (حدود ۳۱ تا ۳۳ درجه شمالی)، هر ۰/۰۵ درجه عرض

جغرافیایی معادل تقریبی ۵ تا ۵/۵ کیلومتر در نظر گرفته شد. بر این اساس، تفکیک مکانی داده‌های سرعت باد در این پژوهش معادل ۵ کیلومتر بیان می‌شود. به منظور یکنواخت سازی واحد تفکیک مکانی داده‌ها و افزایش شفافیت روش‌شناسی، کلیه تفکیک‌های مکانی در ادامه مقاله به واحد کیلومتر گزارش شده‌اند. سپس فایل‌های NetCDF حاصل به لایه‌های رستری در محیط ArcGIS تبدیل شدند. پس از گردآوری داده‌ها، پردازش‌ها و تحلیل‌های آماری در نرم‌افزار R انجام شد و مقادیر متغیرهای موردبررسی برای هر پیکسل در طول دوره آماری محاسبه گردید. در بخش تحلیل همبستگی پیرسون، شاخص NDVI به عنوان متغیر پایه در نظر گرفته شد؛ زیرا NDVI نمایانگر مستقیم وضعیت و پویایی پوشش گیاهی منطقه است و به عنوان یکی از مهم‌ترین شاخص‌های پاسخ اکوسیستم‌های خشکی به تغییرات اقلیمی شناخته می‌شود. تغییرات NDVI نتیجه برهم‌کنش عوامل اقلیمی مختلف از جمله بارش، دما، رطوبت خاک، تبخیر-تعرق و سرعت باد است. از این رو، در چارچوب مفهومی پژوهش، NDVI به عنوان متغیر وابسته و سایر متغیرهای اقلیمی به عنوان عوامل کنترل‌کننده و توضیح‌دهنده تغییرات پوشش گیاهی در نظر گرفته شدند و روابط همبستگی بر این اساس موردبررسی قرار گرفت. در این پژوهش، تمرکز اصلی بر شناسایی الگوهای کلی و پیوسته مکانی همبستگی بین متغیرها بوده است، نه تفسیر معناداری آماری تک پیکسل‌ها. از این رو، نتایج همبستگی پیکسلی در چارچوب الگوهای فضایی غالب و مناطق با رفتار همگن تفسیر شده‌اند و از نتیجه‌گیری بر اساس پیکسل‌های منفرد اجتناب شده است. پلتفرم Google Earth Engine (GEE) در این پژوهش به عنوان بستر اصلی دسترسی، پیش‌پردازش و استخراج داده‌های سنجش‌ازدور و اقلیمی مورد استفاده قرار گرفت. در مرحله نخست، داده‌های خام مورد نیاز (از جمله NDVI، رطوبت خاک و سایر متغیرهای اقلیمی) از پایگاه‌های معتبر موجود در GEE انتخاب شدند. در مرحله دوم، پیش‌پردازش‌های اولیه شامل انتخاب بازه زمانی، برش مکانی محدوده مورد مطالعه و تجمع زمانیه داده‌ها در محیط GEE انجام گرفت. در مرحله سوم، مقادیر نهایی شاخص‌ها به صورت پیکسلی از GEE استخراج و به محیط‌های GIS و R منتقل شدند. بدین منظور، ۱۲ لایه رستری سالانه NDVI با ۱۲ لایه رستری متناظر هر یک از شاخص‌های دیگر در محیط R ادغام و ضریب همبستگی برای هر پیکسل به صورت جداگانه محاسبه شد که مقادیر آن در بازه +۱ تا -۱ متغیر بود. استفاده از روش پیرسون بدون بررسی نرمال بودن داده‌ها بر پایه رایج بودن آن در مطالعات سنجش‌ازدور است، زیرا تمرکز بر روابط خطی توصیفی است و پیرسون حتی در داده‌های غیر نرمال robust است؛ روش‌های ناپارامتریک مانند Spearman برای روابط رتبه‌ای مناسب‌ترند اما اینجا خطی بودن اولویت دارد. همچنین، برای تحلیل سری زمانی سالانه شاخص‌ها در بازه ۲۲ ساله مذکور، از داده‌های آماده پایگاه آیداهو (Idaho) در پلتفرم Google Earth Engine استفاده شد. این روش‌شناسی جامع امکان بررسی هم‌زمان روندهای زمانی-مکانی و روابط متقابل شاخص‌های بیابان‌زایی را فراهم آورد و اجازه می‌دهد تا بیابان‌زایی از طریق روابط استنباطی میان این متغیرها (مانند همبستگی مثبت بارندگی با NDVI به عنوان عامل کاهش‌دهنده بیابان‌زایی) ارزیابی شود. داده‌های موردبررسی در جدول (۱) آمده است.

جدول ۱. اطلاعات مربوط به داده‌های موردبررسی در پژوهش

شاخص	منبع داده	تفکیک مکانی	دوره زمانی
پوشش گیاهی (NDVI)	محصول ماهواره MODIS	۲۵۰ متر	۲۰۰۰-۲۰۲۲ (ماهانه)
بارندگی (PR)	پایگاه World Clim	۱ کیلومتر	۲۰۰۰-۲۰۲۲ (ماهانه)
تبخیر و تعرق واقعی (ET)	پایگاه Terra Climate	۴ کیلومتر	۲۰۰۰-۲۰۲۲ (ماهانه)
رطوبت خاک (SMI)	پایگاه Terra Climate	۴ کیلومتر	۲۰۰۰-۲۰۲۲ (ماهانه)
سرعت باد (VS)	پایگاه World Clim	۵ کیلومتر	۲۰۰۰-۲۰۲۲ (ماهانه)

محاسبه شاخص NDVI

برای بررسی روند تغییرات پوشش گیاهی که در رابطه (۱) آمده است، از داده‌های شاخص تفاضلی نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) محصول ماهواره MODIS با قدرت تفکیک مکانی ۲۵۰ متر و بازه زمانی ماهانه استفاده شد. در مرحله بعد، داده‌های NDVI سالانه به محیط نرم‌افزار R منتقل شدند. برای هر پیکسل، آزمون ناپارامتری من-کندال (Mann-Kendall) به منظور تشخیص وجود روند یکنواخت و برآوردگر شیب سن (Sen's Slope) برای تعیین نرخ تغییرات اجرا گردید.

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

NIR بازتاب باند نزدیک به مادون قرمز / RED بازتاب باند قرمز

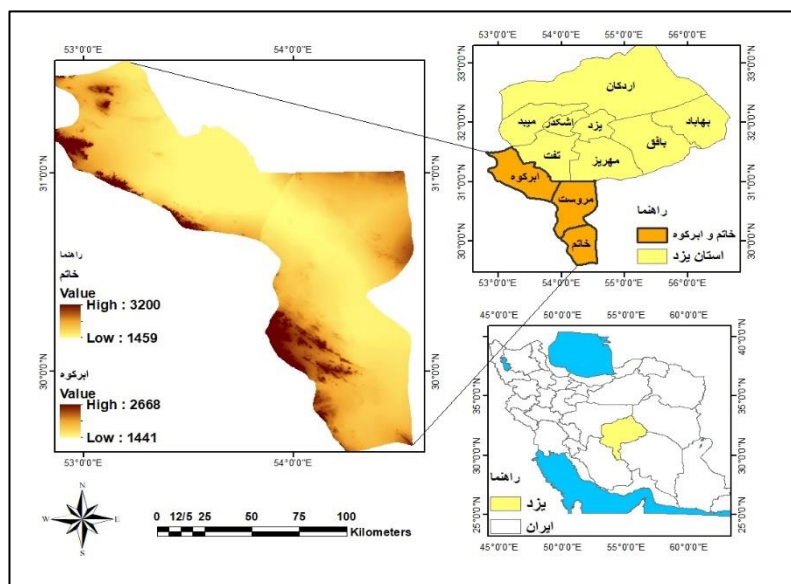
داده‌های شاخص تفاضلی نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) از محصول ماهواره‌ای MODIS با کد محصول MOD13Q1 (نسخه ۶.۱) استخراج شد. این محصول شامل داده‌های NDVI با تفکیک مکانی ۲۵۰ متر و تفکیک زمانی ۱۶ روزه است و برای پایش تغییرات پوشش گیاهی در مقیاس‌های منطقه‌ای به طور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این پژوهش، داده‌های ۱۶ روزه NDVI در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ دریافت و به منظور کاهش نوسانات کوتاه‌مدت و افزایش پایداری سری زمانی، به مقیاس سالانه تجمیع شدند. انتخاب محصول MOD13Q1 نسخه ۶.۱ به دلیل به روز بودن الگوریتم‌ها، بهبود کیفیت داده‌ها نسبت به نسخه‌های پیشین و کاربرد گسترده آن در مطالعات بیابان‌زایی و تغییرات پوشش گیاهی صورت گرفت.

محاسبه رطوبت خاک (SMI)

داده‌های رطوبت خاک از پایگاه TerraClimate استخراج شدند. این داده‌ها مبتنی بر تلفیق مشاهدات اقلیمی، مدل‌های تراز آبی و باز تحلیل‌های اقلیمی بوده و رطوبت خاک سطحی را به صورت ماهانه و در مقیاس شبکه‌ای ارائه می‌دهند. در این پژوهش، داده‌های رطوبت خاک بدون محاسبه فرمول تجربی و به صورت مستقیم از محصول استاندارد TerraClimate در محیط Google Earth Engine مورد استفاده قرار گرفتند و میانگین سالانه رطوبت خاک مورد تحلیل قرار گرفت.

محدوده مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه، شهرستان‌های خاتم و ابرکوه در جنوب استان یزد، شکل (۱) به دلیل موقعیت در گذرگاه اقلیمی فلات مرکزی ایران و مجاورت کویر مرکزی، دارای اقلیم خشک و نیمه‌خشک با بارش سالانه زیر ۱۰۰ میلی‌متر (با پراکنش نامنظم زمانی-مکانی) است. این منطقه از شمال به مهریز، شرق به بافق، جنوب به فارس و غرب به اصفهان محدود شده و دمای آن در تابستان به بیش از ۴۰ درجه و در زمستان با یخبندان همراه است. چنین نوسانات شدید دما همراه با کم‌آبی، رشد پوشش گیاهی را محدود کرده و توپوگرافی منطقه شامل دشت‌های گسترده، کوهپایه‌های پراکنده و اراضی شور با پوشش گیاهی تنک است که آن را به یکی از پهنه‌های حساس به بیابان‌زایی تبدیل نموده است.



شکل ۱. نقشه موقعیت جغرافیایی مناطق مورد مطالعه در سطح استان و کشور

یافته‌ها

تحلیل روند شاخص‌های اقلیمی و محیطی

پهنه‌بندی روند تغییرات شاخص پوشش گیاهی NDVI

نتایج حاصل از تحلیل روند ۲۲ ساله (۲۰۰۰-۲۰۲۲) در منطقه جنوب استان یزد که در شکل (۲) آمده است نشان می‌دهد که بخش عمده‌ای از منطقه، روند کاهشی معنی‌داری در شاخص NDVI را تجربه کرده است. بر اساس آزمون من-کندال، بیش از ۶۳ درصد از پیکسل‌های منطقه روند منفی و حدود ۲۵ درصد روند مثبت معنی‌دار داشتند، درحالی‌که سایر نقاط بدون روند معنی‌دار بودند. الگوی مکانی روندهای کاهشی نشان می‌دهد که بیشترین افت NDVI در نواحی مرکزی و شمال شرقی شهرستان خاتم و بخش‌هایی از دشت‌های ابرکوه رخ داده است. این مناطق عمدتاً دارای شرایط اقلیمی خشک‌تر و توپوگرافی مسطح بوده و دسترسی محدودی به منابع آبی پایدار دارند. به‌طور خاص، نواحی مرکزی و شمال شرقی شهرستان خاتم به‌عنوان بحرانی‌ترین نقاط از نظر کاهش پوشش گیاهی شناسایی شده‌اند و باید در اولویت برنامه‌های احیای اکولوژیک قرار گیرند.

پهنه‌بندی روند تغییرات بارندگی

نتایج تحلیل داده‌های بارندگی در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ در منطقه جنوب استان یزد که در شکل (۲) آمده است نشان می‌دهد که بر اساس آزمون من-کندال، حدود ۶۹ درصد از پیکسل‌های منطقه روند منفی معنی‌دار ($p \leq 0.05$) و تنها ۱۵ درصد روند مثبت معنی‌دار داشته‌اند. تحلیل مکانی این روندها بیانگر آن است که بیشترین کاهش بارندگی در دشت‌های شرقی ابرکوه و مناطق مرکزی خاتم رخ داده که این نواحی از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. کاهش تدریجی میانگین سالانه بارندگی همراه با توزیع نامتوازن بارش و وجود ماه‌های متعدد بدون بارندگی، شکنندگی منابع آبی منطقه را افزایش داده و وابستگی شدید آن به بارش‌های محدود زمستانی را تأکید می‌کند و منجر به کاهش چشمگیر ذخایر رطوبتی خاک شده که در نهایت می‌تواند به تشدید بیابان‌زایی منجر شود.

پهنه‌بندی روند تغییرات تبخیر و تعرق

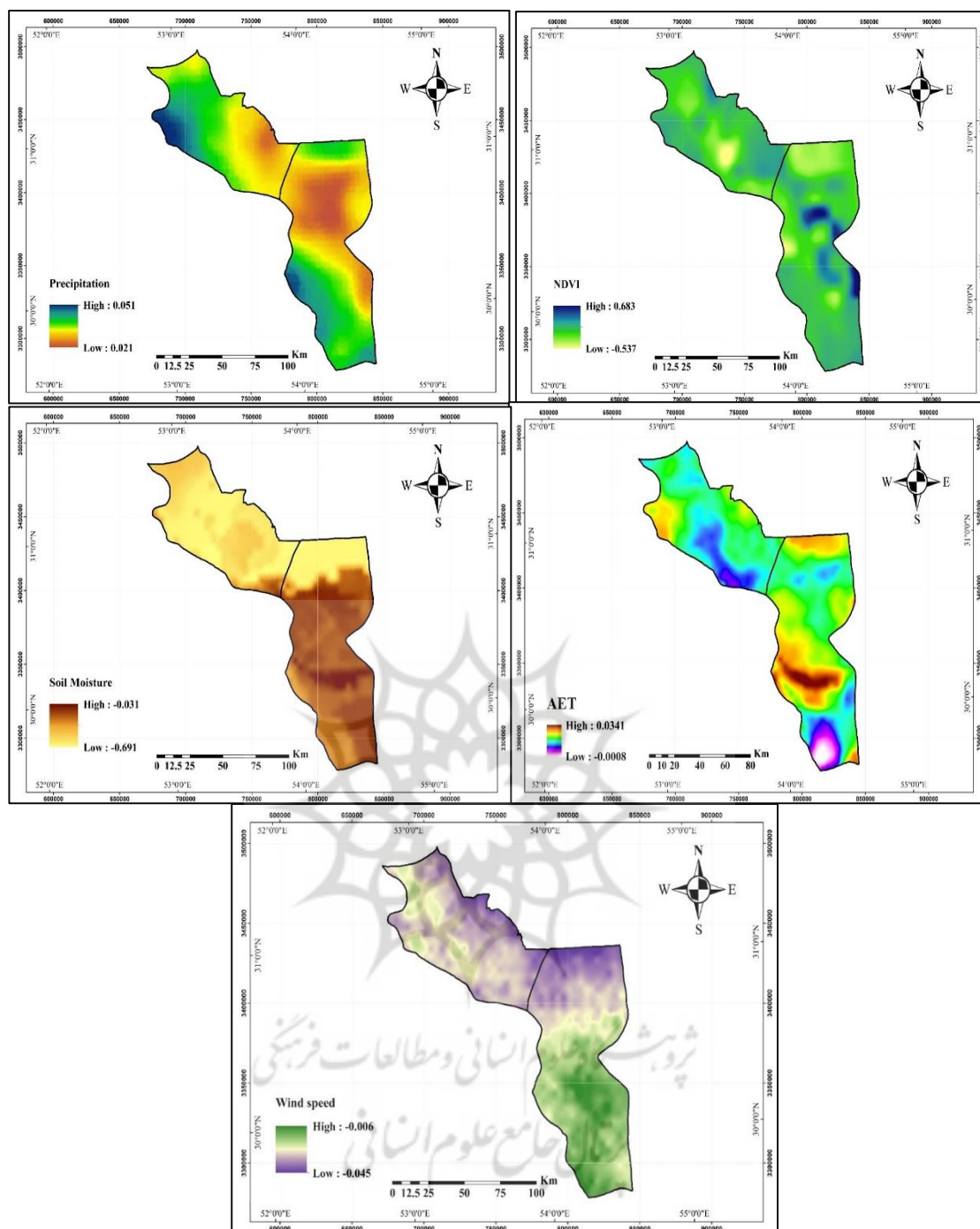
نتایج تحلیل روند تبخیر و تعرق واقعی (ET) در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ که در شکل (۲) آمده است نشان می‌دهد که این شاخص در جنوب استان یزد الگوی ناهمگن و به‌شدت وابسته به ویژگی‌های طبیعی منطقه از جمله توپوگرافی و رژیم رطوبتی داشته است. در کوهپایه‌های غربی و ارتفاعات میانی، که از میکروکلیمای خنک‌تر و دریافت نسبی بارش بیشتری برخوردارند، روند افزایشی ملایمی در ET مشاهده شده است. در مقابل، در دشت‌های پست مرکزی و شرقی که با تنش رطوبتی شدیدتر و پوشش گیاهی تنک‌تری مواجه هستند، روند ET بیشتر بدون معنی آماری یا حتی کاهش‌ی خفیف است که نشان‌دهنده محدودیت‌های شدید آبی در این مناطق است.

پهنه‌بندی روند تغییرات رطوبت خاک

پهنه‌بندی روند تغییرات رطوبت خاک در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ که در شکل (۲) آمده است نشان می‌دهد که جنوب استان یزد با الگوی فضایی ناهمگنی روبه‌رو است که به‌طور قابل‌توجهی با ویژگی‌های طبیعی و اقلیمی منطقه همبستگی دارد. نتایج آزمون من-کندال بیانگر آن است که دشت‌های پست مرکزی و شرقی روندی عمدتاً کاهش‌ی یا بدون تغییر معنادار نشان دادند که این وضعیت به‌خوبی بازتاب محدودیت‌های شدید بارش و تبخیر بالا در این مناطق است و بر تشدید فرآیند بیابان‌زایی دلالت دارد. همچنین، ارتباط قوی بین کاهش رطوبت خاک و کاهش شاخص NDVI در مناطق دشتی پست، نشان‌دهنده وابستگی شدید پوشش گیاهی به تأمین آب خاک در این منطقه است. به‌طور کلی، تحلیل نقشه‌ها حاکی از آن است که بخش عمده‌ای از منطقه مطالعه تحت فشار خشک‌سالی و کاهش ذخایر رطوبتی قرار دارد.

پهنه‌بندی روند تغییرات سرعت باد

تحلیل پهنه‌بندی روند تغییرات سرعت باد در دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ که در شکل (۲) آمده است نشان می‌دهد که الگوهای فضایی این پارامتر در جنوب استان یزد به‌شدت ناهمگون بوده و وابسته به موقعیت جغرافیایی و ویژگی‌های توپوگرافی منطقه است. بر اساس نتایج آزمون من-کندال، بخش‌های شرقی و جنوب شرقی منطقه مطالعه بیشترین روند افزایشی معنادار را در سرعت باد تجربه کرده‌اند که این امر احتمالاً به دلیل نبود موانع طبیعی مؤثر بوده است. این افزایش سرعت باد در مناطق خشک و باز دشت‌های جنوب یزد اثرات تشدیدکننده‌ای بر فرآیند بیابان‌زایی داشته است، زیرا باد به‌عنوان عاملی مهم در تشدید تبخیر و افزایش فرسایش بادی، نقش مضاعفی در کاهش رطوبت خاک و پراکندن ذرات خاک ایفا می‌کند. در مقابل، ارتفاعات غربی و نواحی کوهپایه‌ای روندی کاهش‌ی یا بدون تغییر معنادار داشته‌اند. این الگوی فضایی سرعت باد به‌طور قابل‌توجهی با یافته‌های همبستگی بین باد و NDVI همخوانی دارد، زیرا در مناطقی که روند افزایشی سرعت باد مشاهده شد، افت معنادار پوشش گیاهی نیز گزارش شد.



شکل ۲. پهنه‌بندی روند تغییرات شاخص‌های NDVI، بارندگی، تبخیر و تعرق، رطوبت خاک و سرعت باد

تحلیل آماری روند شاخص‌ها با استفاده از آزمون Mann-Kendall

نتایج آزمون Mann-Kendall، به‌عنوان یک روش غیر پارامتریک معتبر برای تشخیص روندهای آماری در سری‌های زمانی، بیانگر الگوهای تغییرات شاخص‌های کلیدی زیست‌محیطی و اقلیمی در دوره مطالعاتی (۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲) است. این آزمون، که بر پایه رتبه‌بندی داده‌ها و محاسبه آماره Z و مقدار p -value استوار است، امکان ارزیابی وجود روندهای افزایشی، کاهشی یا عدم وجود روند معنی‌دار را فراهم می‌آورد و از آنجایی که فرض توزیع نرمال داده‌ها را نیاز ندارد، برای داده‌های اقلیمی که اغلب دارای نوسانات غیرخطی هستند، بسیار مناسب است. جدول (۲) خلاصه نتایج آزمون Mann-

Kendall را نشان می‌دهد و میانگین شیب Sen و آماره‌های کلی را برای هر شاخص ارائه می‌کند:

جدول ۲. نتایج آزمون Mann-Kendall

شاخص	p-value	Z-statistic	Sen's slope	Trend
NDVI	۰/۰۰۱۱	-۳/۱۴۷۱	-۰.۸۳۷۱ واحد	decreasing
PR	۰/۶۳۸۲	-۰/۴۷۵۴	mm -۰.۰۵۳۷	decreasing
AET	۰/۶۷۶۰	-۰/۴۲۲۶	mm -۰.۰۳۴۵	no trend
Soil	۰/۰۰۷۲	-۲/۶۴۱۰	-۰.۰۷۶۰ واحد	decreasing
Wind	۰/۶۳۸۲	-۰/۴۷۵۴	m/s - ۰.۰۰۲۱	no trend

تفسیر نتایج جدول نشان می‌دهد که شاخص‌های NDVI، PR و Soil روند کاهشی معنی‌دار دارند، با مقادیر p-value کمتر از ۰.۰۵ و آماره Z منفی، که این امر بر کاهش پوشش گیاهی (با شیب متوسط -۰/۸۳۷۱ واحد در ماه برای NDVI)، افت بارندگی (شیب mm -۰.۰۵۳۷ برای PR) و افت رطوبت خاک (شیب -۰/۰۷۶۰ واحد در ماه برای Soil) دلالت می‌کند. این روندها مستقیماً با افزایش بیابان‌زایی هم‌راستا هستند، زیرا کاهش NDVI حساسیت خاک به فرسایش را افزایش می‌دهد و افت PR و Soil دسترسی به رطوبت را محدود می‌کند. در مقابل، شاخص‌های AET و Wind فاقد روند آماری معنی‌دار هستند ($p\text{-value} > 0.05$)، که می‌تواند ناشی از نوسانات فصلی باشد، اما همچنان در تعامل با عوامل دیگر (مانند کاهش بارندگی با شیب منفی -۰/۰۵۳۷ میلی‌متر در ماه برای PR) به تشدید بیابان‌زایی منجر می‌شوند.

نتایج همبستگی شاخص‌های اقلیمی و محیطی با NDVI

نتایج همبستگی بارندگی و NDVI

نتایج همبستگی پیرسون بین بارندگی و NDVI که در شکل (۳ نقشه ۱) آمده است نشان می‌دهد که در ۷۵ درصد از پیکسل‌های منطقه مطالعه رابطه مثبت و معنادار ($r \geq 0.5$, $p \leq 0.05$) وجود دارد که این همبستگی قوی به‌ویژه در مناطق کوهپایه‌ای و دشت‌های با بارش نسبتاً بالاتر برجسته‌تر است. این یافته‌ها حاکی از آن است که در بیشتر مناطق خشک و نیمه‌خشک جنوب استان یزد، تغییرات پوشش گیاهی به‌طور مستقیم وابسته به تغییرات بارندگی است، به‌گونه‌ای که کاهش بارش‌ها منجر به کاهش شاخص NDVI و در نتیجه افت پوشش گیاهی شده است. در مقابل، حدود ۸ درصد از پیکسل‌ها همبستگی منفی داشتند. این نتیجه نشان می‌دهد که در این مناطق، تغییرات پوشش گیاهی الزاماً تابع تغییرات بارندگی نیست و مدیریت منابع آب می‌تواند به‌عنوان یک عامل تعدیل‌کننده در مقابل کاهش طبیعی بارش‌ها عمل کند.

نتایج همبستگی تبخیر و تعرق و NDVI

تحلیل همبستگی بین تبخیر و تعرق (ET) و پوشش گیاهی (NDVI) در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ که در شکل (۳ نقشه ۲) آمده است نشان می‌دهد که رابطه این دو شاخص در جنوب استان یزد به‌شدت وابسته به شرایط رطوبتی منطقه است. در مناطق کوهپایه‌ای و ارتفاعات غربی که از رطوبت خاک نسبتاً بیشتری برخوردارند، همبستگی مثبت و معناداری بین ET و NDVI مشاهده شده که نشان‌دهنده این است که افزایش تبخیر و تعرق در این مناطق همراه با افزایش پوشش گیاهی بوده است. در مقابل، در دشت‌های پست مرکزی و شرقی که با تنش رطوبتی شدیدتر مواجه هستند، رابطه بین این دو شاخص غالباً ضعیف یا حتی منفی است؛ به‌گونه‌ای که افزایش تبخیر و تعرق همراه با کاهش پوشش گیاهی

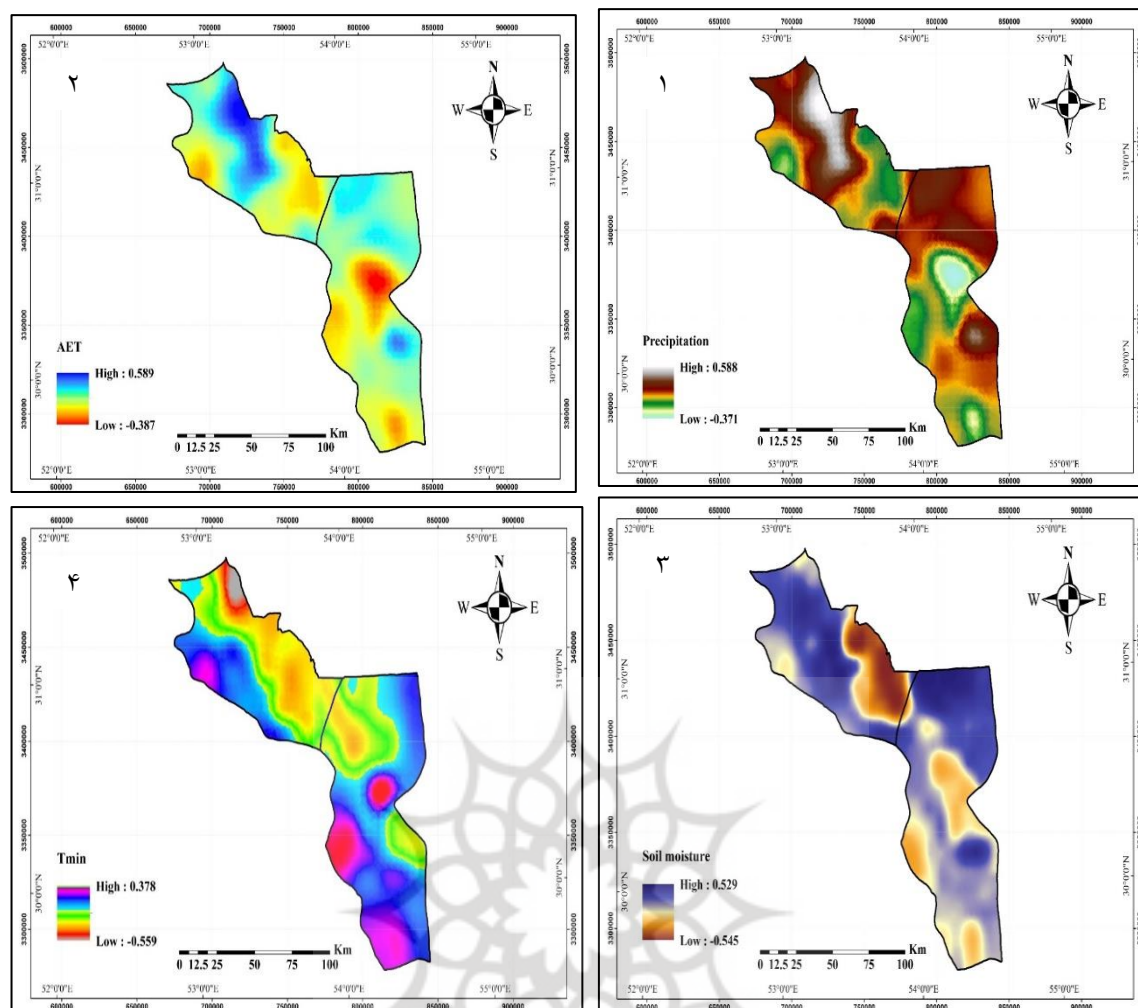
مشاهده شده است. این تحلیل حاکی از آن است که اکوسیستم‌های خشک جنوب استان یزد به شدت به محدودیت‌های آبی حساس هستند و رابطه بین تبخیر-تعرق و پوشش گیاهی بستگی مستقیمی به دسترسی به رطوبت خاک دارد.

نتایج همبستگی رطوبت خاک و NDVI

بررسی همبستگی بین رطوبت خاک (SMI) و شاخص پوشش گیاهی (NDVI) طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ که در شکل (۳ نقشه ۳) آمده است نشان می‌دهد که این دو شاخص در بیشتر مناطق جنوب استان یزد رابطه مثبت و معناداری با یکدیگر دارند که این امر حاکی از وابستگی شدید پوشش گیاهی به وضعیت رطوبتی خاک در این منطقه خشک است. در دشت‌های خشک مرکزی و شرقی که بیشترین افت NDVI را تجربه کرده‌اند، رابطه بین SMI و NDVI عمدتاً ضعیف یا ناپایدار است. این امر را می‌توان در چارچوب شرایط اقلیمی منطقه توضیح داد: دشت‌های پست و مرکزی با نوسانات شدید بارش‌های رگباری، تبخیر بالا و خاک‌های با توان نگهداری رطوبت پایین‌تر مواجه هستند که باعث می‌شود افزایش اندک رطوبت خاک منجر به بهبود مداوم پوشش گیاهی نشود. در این مناطق، حتی در صورت وقوع بارش‌های محدود، رطوبت خاک به سرعت توسط تبخیر و تعرق در فصل‌های گرم از بین می‌رود و امکان رشد گیاهان را محدود می‌کند. همچنین، کمبود پوشش گیاهی در این مناطق خود باعث افزایش تبخیر و کاهش توان خاک برای حفظ رطوبت می‌شود.

نتایج همبستگی سرعت باد و NDVI

تحلیل همبستگی بین سرعت باد و شاخص پوشش گیاهی (NDVI) طی بازه ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ که در شکل (نقشه ۴) آمده است نشان می‌دهد که رابطه این دو شاخص در جنوب استان یزد به شدت وابسته به ویژگی‌های طبیعی منطقه است. در بخش‌های وسیعی از منطقه، به‌ویژه در دشت‌های مرکزی و شرقی که بادهای شدید و مداوم جریان دارند، رابطه منفی قابل توجهی بین افزایش سرعت باد و کاهش مقادیر NDVI مشاهده شد که این امر نشان‌دهنده نقش تخریب‌کننده باد در تشدید فرآیند بیابان‌زایی است. این رابطه منفی می‌تواند به دلیل تأثیرات چندگانه باد بر اکوسیستم‌های خشک توضیح داده شود: از یک سو، افزایش سرعت باد باعث تشدید تبخیر و کاهش رطوبت خاک می‌شود که خود منجر به کاهش توان رشد گیاهان می‌گردد، و از سوی دیگر، بادهای شدید مستقیماً باعث فرسایش خاک و کاهش پوشش گیاهی می‌شوند. این الگوی فضایی رابطه بین سرعت باد و پوشش گیاهی نشان می‌دهد که باد به‌عنوان یک عامل تنش‌زای محیطی، در مناطق خشک و باز دشت‌های جنوب یزد اثر مستقیمی بر کاهش تراکم پوشش گیاهی داشته و می‌تواند در کنار کاهش بارش به‌عنوان یکی از محرک‌های اصلی بیابان‌زایی در منطقه شناخته شود.



شکل ۳. همبستگی شاخص بارندگی (نقشه ۱)، تبخیر و تعرق (نقشه ۲)، رطوبت خاک (نقشه ۳) و سرعت باد (نقشه ۴) با NDVI

بررسی میانگین شاخص‌های اقلیمی و محیطی در مقیاس سالانه

نتایج میانگین سالانه شاخص پوشش گیاهی

نتایج سری زمانی NDVI طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ که در شکل (۴ نمودار ۱) آمده است نشان می‌دهد که روند کلی پوشش گیاهی در جنوب استان یزد کاهشی بوده است. در اوایل دوره، پیک‌های فصلی NDVI به بیش از ۵۰ کیلومتر مربع می‌رسید اما پس از ۲۰۱۰ عمده‌تاً کمتر از ۳۰ کیلومتر مربع بوده است. بیشترین مقدار NDVI در آوریل ۲۰۲۰ با ۶۶/۴۰ کیلومتر مربع ثبت شد که ناشی از بارش‌های بالاتر از حد نرمال بود. کمترین مقادیر در ماه‌های زمستانی (ژانویه، فوریه و دسامبر) تقریباً صفر بوده و بیانگر نبود پوشش سبز است. کاهش دامنه نوسانات فصلی نیز نشان‌دهنده افت تدریجی توان تجدید پوشش گیاهی تحت تأثیر خشک‌سالی و فشار انسانی است.

نتایج میانگین سالانه شاخص بارندگی

تحلیل سری زمانی بارندگی طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ که در شکل (۴ نمودار ۲) آمده است نشان می‌دهد که بارش‌ها در جنوب استان یزد از الگوی فصلی مشخصی تبعیت می‌کنند و عمده‌تاً در ماه‌های زمستان و اوایل بهار رخ می‌دهند. بیشترین مقدار بارندگی در دسامبر ۲۰۰۴ با ۸/۹۰ میلی‌متر و دسامبر ۲۰۰۴ با ۸/۸۸ میلی‌متر ثبت شده است.

کمترین مقدار، برابر با صفر، در ماه‌های خشک ژوئیه، اکتبر و سپتامبر مشاهده شد. توزیع نامتوازن بارش و وجود ماه‌های متعدد بدون بارندگی، همراه با کاهش تدریجی میانگین سالانه، نشان‌دهنده شکنندگی منابع آبی و وابستگی شدید منطقه به بارش‌های محدود زمستانه است.

نتایج میانگین سالانه تبخیر و تعرق

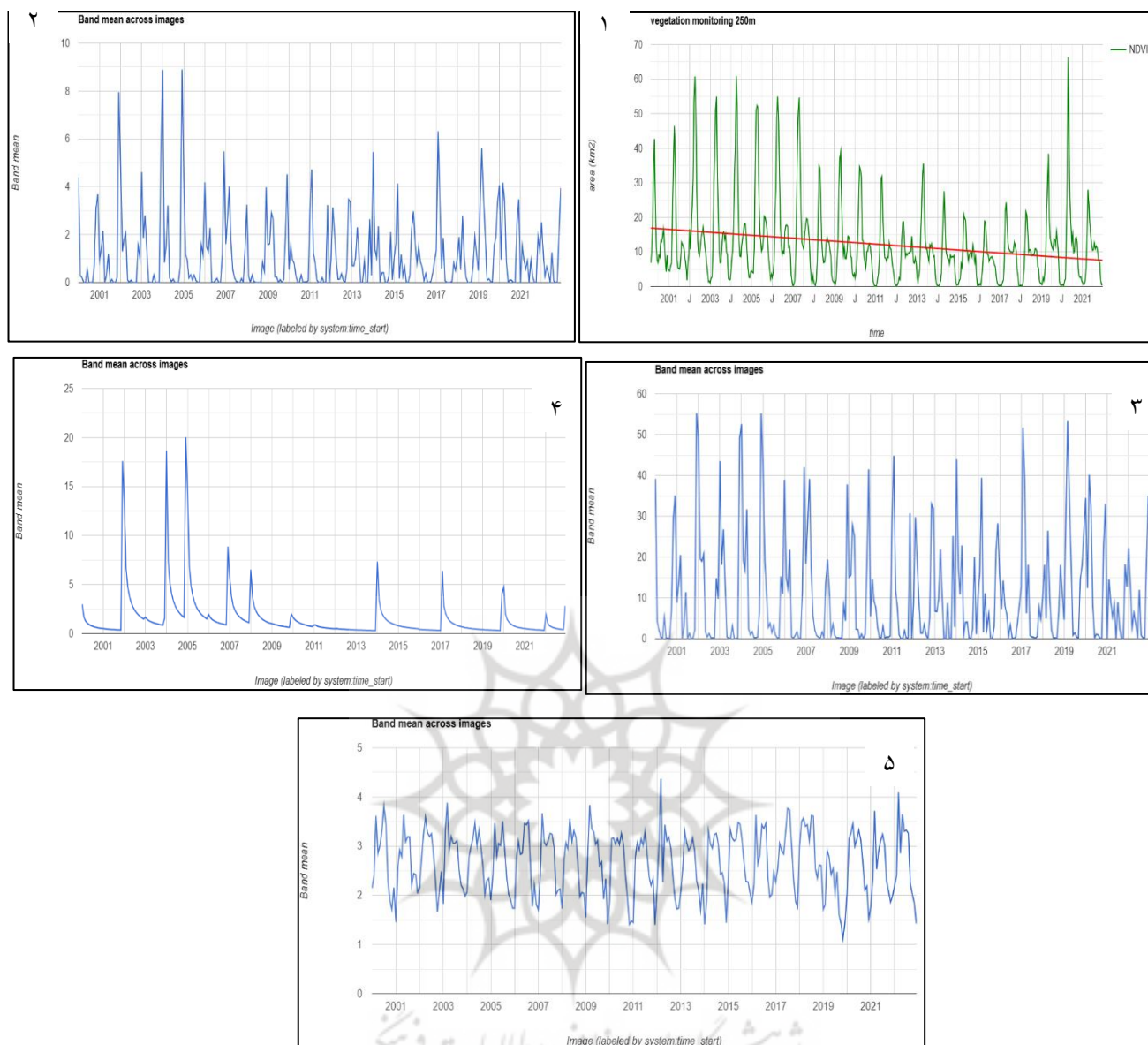
بررسی سری زمانی تبخیر و تعرق (ET) در دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ که در شکل (۴ نمودار ۳) آمده است نشان داد که این شاخص در منطقه مورد مطالعه نوسانات چشمگیری داشته است. در طول این بازه، بیشترین میزان تبخیر و تعرق در ماه‌های دسامبر سال‌های ۲۰۰۰ و ۲۰۰۴ با مقدار حدود ۵۵.۱ میلی‌متر ثبت شد. از سوی دیگر، کمترین مقادیر ET در برخی ماه‌ها تقریباً به صفر رسید که این امر نشان‌دهنده خشکی شدید، کاهش بارش و نبود پوشش گیاهی فعال در دوره‌های کم‌بارش سالانه است. این روند به‌ویژه در ماه‌های تابستانی در مناطق مرکزی و شرقی استان آشکارتر بوده است. به‌طور کلی، نتایج نشان داد که تبخیر و تعرق در منطقه تحت تأثیر مستقیم بارش‌های فصلی و تغییرات دما قرار داشته و افت شدید آن در برخی سال‌ها می‌تواند بیانگر تشدید خشک‌سالی در جنوب یزد باشد.

نتایج میانگین سالانه رطوبت خاک

بررسی سری زمانی رطوبت خاک (SMI) در بازه ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ که در شکل (۴ نمودار ۴) آمده است نشان داد که این شاخص دچار نوسانات قابل‌توجهی بوده است. در این دوره، بیشترین مقدار رطوبت خاک در دسامبر ۲۰۰۴ با حدود ۲۰.۲ مشاهده شد که این افزایش با بارش‌های همان سال همخوانی دارد. در مقابل، کمترین میزان رطوبت خاک در اکتبر ۲۰۱۹ با مقدار حدود ۰.۳۱ ثبت شد. این افت شدید به دلیل کاهش بارش‌های سالانه و تشدید تبخیر-تعرق رخ داده و بازتاب‌دهنده شرایط خشک‌سالی شدید در منطقه است. به‌طور کلی، نتایج نشان داد که رطوبت خاک در منطقه مورد مطالعه همبستگی بالایی با الگوی بارش دارد و کاهش آن به‌ویژه در سال‌های خشک می‌تواند به تشدید فرآیند بیابان‌زایی منجر شود.

نتایج میانگین سالانه سرعت باد

بررسی تغییرات سرعت باد در بازه ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ که در شکل (نمودار ۵) آمده است نشان داد که این شاخص در منطقه نوسانات قابل‌توجهی داشته است. بیشترین سرعت باد مربوط به مارس ۲۰۱۲ با مقدار حدود ۴.۳۷ متر بر ثانیه بوده است. در مقابل، کمترین میزان سرعت باد در نوامبر ۲۰۱۹ با حدود ۱.۱۱ متر بر ثانیه ثبت شده است. به‌طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که نوسانات سرعت باد، در کنار سایر شاخص‌های اقلیمی مانند بارش و رطوبت خاک، به‌عنوان عاملی مهم در پویایی بیابان‌زایی منطقه عمل می‌کند.



شکل ۴. سری زمانی ۲۲ ساله شاخص NDVI (نمودار ۱)، بارندگی (نمودار ۲)، تبخیر و تعرق (نمودار ۳)، رطوبت خاک (نمودار ۴)، سرعت باد (نمودار ۵)

نتایج تحلیل روند، همبستگی و سری زمانی سالانه شاخص‌های اقلیمی و محیطی طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ در شهرستان‌های خاتم و ابرکوه نشان داد که منطقه با الگوی پیچیده‌ای از تغییرات محیطی روبه‌رو است. شاخص‌های بارندگی و پوشش گیاهی عمدتاً روند کاهشی معنادار را تجربه کرده‌اند، درحالی‌که تبخیر و تعرق و سرعت باد در برخی نواحی به‌ویژه دشت‌های پست و مناطق شرقی، الگوهای افزایشی یا نوسانی نشان داده‌اند. رطوبت خاک نیز به‌شدت وابسته به تغییرات بارش بوده و افت آن در سال‌های خشک نقش مهمی در کاهش NDVI ایفا کرده است. بررسی همبستگی‌ها بیانگر آن است که در مناطق با دسترسی بیشتر به رطوبت، رابطه مثبت میان NDVI و شاخص‌هایی مانند بارش و رطوبت خاک غالب است؛ درحالی‌که در پهنه‌های خشک و کم‌پوشش، افزایش تبخیر و سرعت باد همراه با کاهش پوشش گیاهی مشاهده می‌شود. تحلیل سری زمانی سالانه نیز نشان داد که نوسانات شدید شاخص‌ها، به‌ویژه در سال‌های خشک‌سالی، پایداری اکوسیستم منطقه را تهدید کرده است. در مجموع، یافته‌ها تأکید می‌کنند که بیابان‌زایی در

جنوب یزد نتیجه تعامل چندعاملی میان کاهش بارش، افت رطوبت خاک، افزایش تبخیر و تعرق و شدت باد است و تداوم این روند می‌تواند شکنندگی محیطی منطقه را بیش‌ازپیش تشدید کند.

بحث

در این پژوهش، تغییرات زمانی-مکانی NDVI و روابط آن با عوامل اقلیمی (بارش، دما، رطوبت خاک، تبخیر-تعرق و باد) در بازه ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۲ موردبررسی قرار گرفت. NDVI به‌عنوان شاخص تغییرات پوشش گیاهی انتخاب شد زیرا شاخصی تثبیت‌شده در مطالعات اکولوژیک و سنجش‌ازدور برای شناسایی الگوهای رشد و تنش گیاهی در پاسخ به تغییرات محیطی است و در مطالعات بیابان‌زایی و نظارت اکوسیستم به‌طور گسترده استفاده می‌شود. یافته‌های همبستگی بین NDVI و متغیرهای اقلیمی نشان داد که NDVI با بارش سالانه همبستگی مثبت دارد، اما با دما و سایر متغیرها رابطه پیچیده‌تری نشان می‌دهد. این نتایج با یافته‌های پژوهش شی و همکاران (۲۰۲۳) در بیابان Mu Us در چین همخوانی دارد. پژوهش آن‌ها نشان داد که NDVI نسبت به بارش همبستگی قابل‌توجهی داشته و نسبت به دما همبستگی ضعیف‌تری نشان داده است. همچنین مشخص شد NDVI تحت تأثیر چندین عامل طبیعی و انسانی قرار دارد و همبستگی به‌تنهایی مؤید رابطه علی نیست (Shi et al., 2023). مطالعات مروری ریورا و همکاران (۲۰۲۲) نشان داد که ارتباط بین NDVI و متغیرهای اقلیمی در مناطق مختلف متفاوت است و بارش معمولاً تأثیر غالب بر NDVI در مناطق خشک-نیمه‌خشک دارد، درحالی‌که دما در برخی مناطق دیگر نقش مهمی ایفا می‌کند. بنابراین اختلافات مشاهده‌شده میان همبستگی‌های به‌دست‌آمده در این پژوهش و مطالعات دیگر را باید در چارچوب تفاوت شرایط اقلیمی منطقه مورد مطالعه، دوره زمانی و تفکیک داده‌ها در نظر گرفت (Rivera et al., 2022). کرامت‌زاده و همکاران (۱۴۰۱) در مطالعه خود در جنوب شرق اهواز، کاهش پوشش گیاهی را در ارتباط مستقیم با کاهش بارندگی‌های مؤثر و افزایش نوسانات دمایی گزارش کردند که با یافته‌های این پژوهش در جنوب یزد کاملاً همخوانی دارد. همچنین شیرغلامی و مسعودیان (۱۴۰۲) در بررسی روند بارندگی در استان یزد، کاهش بارش مؤثر و افزایش پراکنش زمانی بارش‌ها را تأیید کردند که این نتایج با یافته‌های حاضر در مورد کاهش ۶۹ درصدی روند بارندگی همسو است. در سطح بین‌المللی، مطالعه هو و همکاران (۲۰۲۳) در مناطق نیمه‌خشک شمال چین نشان داد که افزایش دما و کاهش بارش باعث افزایش تقاضای تبخیر و تعرق محیطی شده و خشک‌سالی‌ها را طولانی‌تر و شدیدتر کرده است؛ الگویی که به‌وضوح در نتایج این پژوهش برای جنوب یزد مشاهده می‌شود. همچنین ژائو و وو (۲۰۱۸) در مطالعه خود در مناطق خشک نینگشیا چین، با وجود اجرای برنامه‌های حفاظتی، روند کلی کاهش بیابان‌زایی را در منطقه گزارش کردند که با یافته‌های ما در مورد عدم بازگشت پایدار اکوسیستم به وضعیت اولیه حتی پس از بارش‌های موقتی همخوانی دارد.

نوآوری این پژوهش در ترکیب هم‌زمان شاخص و پارامترهای چندگانه (NDVI، بارندگی، تبخیر-تعرق، رطوبت خاک و سرعت باد) در مقیاس پیکسلی ۲۲ ساله با استفاده از Google Earth Engine، GIS و R برای جنوب استان یزد است، که نسبت به مطالعات پیشین مانند (Hosseini Kheyr Abad et al., 2024) که اغلب بر یک یا دو شاخص تمرکز دارند، تحلیل جامع‌تری از روابط متقابل فراهم می‌کند. با این حال، محدودیت‌های پژوهش نیز باید در نظر گرفته شود تا اعتبار استنباط‌ها حفظ گردد. شاخص NDVI، هرچند برای پایش پوشش گیاهی مفید است ولی محدودیت‌هایی مانند حساسیت به ابر، تغییرات فصلی و نیاز به کاهش ۳۰-۴۰ درصدی برای تشخیص روندهای معنادار دارد، که ممکن است روندهای خفیف بیابان‌زایی را کمتر نشان دهد. لازم به ذکر است، نقش عوامل انسانی (مانند بهره‌برداری بیش از حد از منابع آب و کشاورزی ناپایدار) بدون بررسی مستقیم در این پژوهش کنار گذاشته شد، زیرا تمرکز بر عوامل اقلیمی

طبیعی بلندمدت بود؛ اما ادبیات اخیر مانند پژوهش (Sadeghi, & Hazbavi., 2022) نشان می‌دهد که این عوامل می‌توانند با روندهای اقلیمی تعامل کرده و بیابان‌زایی را تشدید کنند، بنابراین پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده برای استان یزد از ترکیب عوامل اقلیمی و انسانی استفاده شود.

در نهایت، یافته‌های این پژوهش نشان‌دهنده تعامل عوامل اقلیمی (کاهش بارندگی و رطوبت خاک)، فیزیکی (افزایش سرعت باد در شرق) و زیست‌محیطی (کاهش پوشش گیاهی) در جنوب استان یزد است، که تفسیر آن بر شکندگی اکوسیستم‌های خشک تأکید دارد. پیشنهادهای مدیریتی مستقیماً با نتایج کمی و مکانی پیوند خورده‌اند: برای مثال، در مناطق مرکزی خاتم با کاهش ۶۳ درصدی NDVI، اولویت‌بندی برنامه‌های احیای گیاهی و مدیریت آب (مانند سدهای کوچک برای حفظ رطوبت خاک) ضروری است؛ در دشت‌های شرقی ابرکوه با افزایش ۴۲ درصدی سرعت باد، استراتژی‌های کنترل فرسایش بادی (مانند بادشکن‌ها) پیشنهاد می‌شود؛ و در کل منطقه، پایش مداوم با داده‌های ماهواره‌ای برای تشخیص زودهنگام روندها توصیه می‌گردد تا از تشدید بیابان‌زایی جلوگیری شود.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف بررسی الگوهای زمانی-مکانی تغییرات شاخص NDVI و ارتباط آن با متغیرهای اقلیمی منتخب در چارچوب پدیده بیابان‌زایی انجام شد. نتایج نشان داد که NDVI در بازه زمانی مورد مطالعه تغییرات معنادار مکانی و زمانی داشته و این تغییرات در بخش‌هایی از منطقه با روندهای اقلیمی نظیر کاهش بارش، تغییرات رطوبت خاک و افزایش تبخیر-تعرق هم‌زمان بوده است. این یافته‌ها در مجموع بیانگر آن است که شاخص‌های محیطی مرتبط با وضعیت پوشش گیاهی و شرایط اقلیمی در منطقه دچار تغییر شده‌اند.

با این حال، لازم است به‌طور صریح تأکید شود که روابط به‌دست‌آمده در این پژوهش از نوع همبستگی آماری هستند و نباید به‌عنوان روابط علی مستقیم بین عوامل اقلیمی، NDVI و تشدید بیابان‌زایی تفسیر شوند. نتایج این مطالعه نشان‌دهنده الگوهای هم‌زمانی و همراهی تغییرات متغیرها هستند و صرفاً می‌توانند به‌عنوان شواهدی از تغییر شرایط محیطی مرتبط با بیابان‌زایی مورد استفاده قرار گیرند، نه اندازه‌گیری مستقیم یا اثبات قطعی خود پدیده بیابان‌زایی.

یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که NDVI به‌عنوان شاخصی غیرمستقیم از وضعیت پوشش گیاهی، قابلیت مناسبی برای پایش تغییرات محیطی در مناطق خشک و نیمه‌خشک دارد، اما تفسیر آن همواره باید در چارچوب محدودیت‌های ذاتی این شاخص انجام شود. NDVI قادر به بازنمایی کامل فرایندهای بیابان‌زایی نیست و تغییرات آن می‌تواند تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله نوع پوشش گیاهی، شرایط خاک، مدیریت اراضی و فعالیت‌های انسانی قرار گیرد. علاوه بر این، ناهمگنی تفکیک مکانی داده‌های مورداستفاده و فرآیند هم مقیاس سازی لایه‌ها از دیگر محدودیت‌های روش‌شناختی پژوهش است که می‌تواند بر دقت تفسیرهای مکانی تأثیر بگذارد.

از منظر کاربردی، نتایج مکانی پژوهش نشان می‌دهد که برخی بخش‌های منطقه مورد مطالعه به‌طور هم‌زمان دارای NDVI پایین‌تر و شرایط اقلیمی نامساعدتر بوده‌اند و می‌توان آن‌ها را به‌عنوان مناطق دارای حساسیت بالاتر نسبت به فرآیندهای بیابان‌زایی در نظر گرفت. بر این اساس، پیشنهاد می‌شود برنامه‌های مدیریتی و حفاظتی در این مناطق بحرانی با اولویت بیشتری بر مدیریت منابع آب، تقویت پوشش گیاهی و کنترل بهره‌برداری از اراضی متمرکز شوند. این پیشنهادها مستقیماً بر پایه الگوهای مکانی استخراج‌شده از نتایج کمی پژوهش ارائه شده‌اند و می‌توانند به‌عنوان مبنایی برای مطالعات تکمیلی و برنامه‌ریزی منطقه‌ای مورداستفاده قرار گیرند.

در نهایت، این پژوهش نشان می‌دهد که ترکیب تحلیل‌های زمانی-مکانی NDVI با متغیرهای اقلیمی می‌تواند ابزاری

مفید برای پایش تغییرات محیطی مرتبط با بیابان‌زایی باشد، مشروط بر آن‌که نتایج با احتیاط تفسیری، آگاهی از محدودیت‌ها و پرهیز از نتیجه‌گیری‌های علی‌مورد استفاده قرار گیرند. برای دستیابی به درک جامع‌تر از فرآیند بیابان‌زایی، پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده داده‌های مرتبط با عوامل انسانی، کاربری اراضی و شاخص‌های مستقیم‌تر تخریب سرزمین نیز به تحلیل‌ها افزوده شوند.

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

- اخوان قلیباف، محمد؛ شاکری، فاضل؛ باقری فهرجی، رضا و ملکشاهی، محمد. (۱۳۹۱). ارزیابی استعدادهای بیابان‌زایی با شاخص‌های اقلیمی با روش GIS و مدل ایرانی IMDPA مطالعه موردی: دشت بهاباد یزد. *سومین همایش ملی مقابله با بیابان‌زایی و توسعه پایدار تالاب‌های کویری ایران*.
- حلبیان، امیرحسین و جمشیدیان، زهره. (۱۳۹۷). واکاوی تغییرات بیابان‌زایی با تأکید بر اقلیم بارش در استان قم. *نشریه مدیریت بحران*، ۷(۲)، ۱۰۵-۱۱۹.
- خسرو شهبازی، مسیب؛ حشمتی، زهرا و سعیدی‌فر، زهرا. (۱۳۹۹). بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر خشک‌سالی و خطر بیابان‌زایی در استان کرمانشاه. *مدیریت بیابان*، ۸(۱۶)، ۱۸۳-۲۰۰.
- رایگانی، بهزاد؛ براتی‌قهفرخی، سوسن و خوش‌نوا، احمد. (۱۳۹۸). شناسایی کانون‌های تولید گرد و غبار به کمک داده‌های دورسنجی: یک رویکرد جامع. *نشریه علمی-پژوهشی مرتع و آبخیزداری*، ۷۲(۱)، ۸۳-۱۰۵.
- سلیمانی‌ساردو، مجتبی؛ روستایی، فاطمه؛ رنجبرفردویی، ابوالفضل و قضاوی، رضا. (۱۳۹۴). ارزیابی و تهیه نقشه حساسیت مناطق به بیابان‌زایی با استفاده از روش ESAs (پژوهش موردی: دشت یزد-اردکان). *پژوهش‌های حفاظت آب‌وخاک*، ۲۲(۲).
- شیرغلامی، محمد و مسعودیان، سید ابوالفضل. (۱۴۰۲). واکاوی تغییرات و روند مکانی-زمانی بارش در استان یزد با استفاده از پایگاه داده اسفزاری طی سال‌های ۱۳۴۹ تا ۱۳۹۴. *نشریه مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۲(۳۵)، ۹۵-۱۱۴.
- صادقی‌روش، محمدحسن. (۱۳۹۹). تحلیل سطوح توسعه‌یافتگی عملکردهای بیابان‌زدایی شهرستان‌های استان یزد با کاربرد مدل اسکالوگرام. *فصلنامه پایداری، توسعه و محیط‌زیست*، ۱(۱)، ۱-۱۴.
- ضیاءالدین‌شعاعی، رحیم؛ کاظمی، رحیم؛ پرهت، جهانگیر؛ نوروزی، علی‌اکبر؛ پیروان، حمیدرضا؛ شادفر، صمد و زارعی، مجید. (۱۴۰۲). امکان‌سنجی توسعه مناطق بیابانی با استفاده از روش بیابان‌زدایی اقتصادی و رویکرد مدیریت جامع حوزه آبخیز (طرح پایلوت رضاآباد، شاهرود). *فصلنامه ترویج و توسعه آبخیزداری*، ۱۱(۴۱)، ۱۳-۳۱.

فیض‌الهی‌پور، مهدی. (۱۴۰۲). ارزیابی بیابان‌زایی در محدوده دشت قزوین با استفاده از تصاویر سنتینل-۲، شاخص‌های طیفی و درجه بیابان‌زایی (DDI). *کاوش‌های جغرافیایی مناطق بیابانی*، ۱۱(۲)، ۴۱-۵۶.

کرامت‌زاده، مؤده؛ فتحی، احمد و معاضد، هادی. (۱۴۰۱). بررسی روند بیابان‌زایی منطقه جنوب شرق اهواز به روش IMDPA و تأکید بر دو معیار اقلیمی و پوشش گیاهی. *علوم و مهندسی آبیاری*، ۴۵(۱).

کیخسروی، قاسم و محمدی، زینب. (۱۳۹۸). آشکارسازی تغییرات پوشش سطح زمین ناحیه شمال غرب ایران به‌عنوان نمایه‌ای از بیابان‌زایی. *فصلنامه جغرافیای طبیعی*، ۱۲(۴۳).

گرگانی، فرزانه؛ امیرنژاد، حمید و تسلیمی، مهسا. (۱۳۹۹). بررسی اثرات رشد اقتصادی بخش کشاورزی بر بیابان‌زایی در ایران. *مجله تحقیقات اقتصاد کشاورزی*، ۱۲(۴۶).

محمودآبادی، مجید و زمانی، سمیرا. (۱۳۹۱). بررسی تأثیر سرعت باد و توزیع اندازه ذرات خاک بر فرآیندهای حمل رسوب ناشی از فرسایش بادی. *فصلنامه مهندسی و مدیریت آبخیز*، ۴(۳)، ۱۴۱-۱۵۱.

References

- Akhavan Ghalibaf, M., Shakouri, F., Bagheri-Fahroji, R., & Malekshahi, M. (2012). Evaluation of desertification potentials using climatic indices with GIS method and Iranian model IMDPA: Case study of Behabad Plain, Yazd. *Proceedings of the 3rd National Conference on Combating Desertification and Sustainable Development of Iran's Wetlands*. [In Persian].
- Almalki, R., Khaki, M., Saco, P. M., & Rodriguez, J. F. (2022). Monitoring and Mapping Vegetation Cover Changes in Arid and Semi-Arid Areas Using Remote Sensing Technology: A Review. *Remote Sensing*, 14(20), 5143.
- 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.
- Burrell, A. L., Evans, J. P., & De Kauwe, M. G. (2020). Anthropogenic climate change has driven over 5 million km² of drylands towards desertification. *Nature communications*, 11(1), 3853.
- Dorigo, W. A., et al. (2017). ESA CCI Soil Moisture for improved Earth system understanding: State-of-the art and future directions. *Remote Sensing of Environment*, 203, 185-215.
- Faizolahpour, M. (2023). Desertification assessment in Qazvin Plain using Sentinel-2 images, spectral indices, and Desertification Degree Index (DDI). *Geographical Explorations of Arid Regions*, 11(2), 41-56. [In Persian].
- Feng, Y., Wang, L., Liu, C., Zhang, B., Wang, J., Zhang, P., & Wang, R. (2025). Modeling and Spatiotemporal Analysis of Actual Evapotranspiration in a Desert Steppe Based on SEBS. *Hydrology*, 12(8), 205.
- Gorgan, F., Amirenejad, H., & Taslimi, M. (2020). Investigating the effects of agricultural sector economic growth on desertification in Iran. *Journal of Agricultural Economics Research*, 12(46). [In Persian].
- Halabian, A. H., & Jamshidian, Z. (2018). Analysis of desertification changes with emphasis on rainfall climate in Qom Province. *Crisis Management Journal*, 7(2), 105-119. [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.
- Hoover, D. L., Pfennigwerth, A. A., & Duniway, M. C. (2021). Drought resistance and resilience: The role of soil moisture-plant interactions and legacies in a dryland ecosystem. *Journal of Ecology*, 109(9), 3280-3294.
- Hosseini Khezr Abad, A. S., Vali, A., Halabian, A., Mokhtari, M. H., & Mousavi, S. A. (2024). Investigating the Impact of Climate Change on the Effective Indicators in Desertification and Predicting its Spatial Changes. *Desert*, 29(2), 194-215.
- Hu, H., Liu, X., He, Y., Zhang, T., Xu, Y., & Wang, L. (2023). Higher atmospheric

- evapotranspiration demand intensified drought in semi-arid sandy lands, northern China. *International Journal of Climatology*, 43(7), 3298-3311.
- Karamatzadeh, M., Fathi, A., & Moazez, H. (2022). Analysis of desertification trends in southeastern Ahvaz using the IMDPA method with emphasis on climatic and vegetation cover criteria. *Irrigation Sciences and Engineering*, 45(1). [In Persian].
- Keykhsrovi, G., & Mohammadi, Z. (2019). Detection of land surface cover changes in northwest Iran as an indicator of desertification. *Physical Geography Quarterly*, 12(43). [In Persian].
- Khesro Shahbazi, M., Hashemti, Z., & Saeidifar, Z. (2020). Investigating the impact of climate change on drought and desertification risk in Kermanshah Province. *Desert Management*, 8(16), 183-200. [In Persian].
- Khosravi, H., Zehtabian, G. R., Abolhasani, A., & Eskandari Damaneh, H. (2019). Assessment, Monitoring and Early Warning System for Desertification Based on Water Criterion (case Tudy: Kashan, Iran). *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 629-637.
- Lamqadem, A. A., Saber, H., & Pradhan, B. (2018). Quantitative assessment of desertification in an arid oasis using remote sensing data and spectral index techniques. *Remote Sensing*, 10(12), 1862.
- Mahmoudabadi, M., & Zamani, S. (2012). The effect of wind speed and soil particle size distribution on sediment transport processes due to wind erosion. *Watershed Engineering and Management Quarterly*, 4(3), 141-151. [In Persian].
- Morales, N. S., Fernández, I. C., Durán, L. P., & Pérez-Martínez, W. A. (2023). RePlant Alfa: Integrating Google Earth Engine and R Coding to Support the Identification of Priority Areas for Ecological Restoration. *Land*, 12(2), 303.
- Raigani, B., Barati-Ghafarqi, S., & Khoshnava, A. (2019). Identifying dust production hotspots using remote sensing data: A comprehensive approach. *Rangeland and Watershed Management Journal*, 72(1), 83-105. [In Persian].
- Rivera-Marin, D., Dash, J., & Ogutu, B. (2022). The use of remote sensing for desertification studies: A review. *Journal of Arid Environments*, 206, 104829.
- Sadeghi, S. H., & Hazbavi, Z. (2022). *Land degradation in Iran. In Global degradation of soil and water resources: regional assessment and strategies* (pp. 287-314). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Sadeghi-Rosh, M. H. (2020). Analysis of development levels of desertification control functions in Yazd Province counties using the scalogram model. *Sustainability, Development and Environment Quarterly*, 1(1), 1-14. [In Persian].
- Seifu, T. K., & Demessie Eshetu, K. (2024). Characterizing the aridity indices and potential evapotranspiration using CMIP6-GCMs in two distinct regions of Ethiopia. *Journal of Water and Climate Change*, 15(4), 1507-1531.
- Shi, L., Fan, H., Yang, L., Jiang, Y., Sun, Z., & Zhang, Y. (2023). NDVI-based spatial and temporal vegetation trends and their response to precipitation and temperature changes in the Mu Us Desert from 2000 to 2019. *Water Science & Technology*, 88(2), 430-442.
- Shighalami, M., & Masoudian, S. A. (2023). Analysis of spatio-temporal precipitation trends in Yazd Province using the Asfzari database (1970-2015). *Journal of Natural Environmental Hazards*, 12(35), 95-114. [In Persian].
- Soleymani Sardo, M., Roustaei, F., Ranjbar Fardoi, A., & Ghadavi, R. (2015). Assessment and mapping of regional sensitivity to desertification using the ESAs method: Case study of Yazd-Ardakan Plain. *Water and Soil Conservation Research*, 22(2). [In Persian].
- Zhao, Z., & Wu, Q. (2018). Study on desertification monitoring from 2000 to 2014 and its driving factors through remote sensing in Ningxia, China. *The International Archives of the Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 42, 2439-2447.
- Zheng, H., Sun, Y., Bao, H., Niu, P., Jin, Z., & Niu, Z. (2024). Drought effects on evapotranspiration and energy exchange over a rain-fed maize cropland in the Chinese Loess Plateau. *Agricultural Water Management*, 293, 108711.

Ziaeddin Shoaee, R., Kazemi, R., Porhemmat, J., Norouzi, A., Pirouzan, H., Shadfar, S., & Zarei, M. (2023). Feasibility study of developing desert areas using economic desertification control and integrated watershed management approach: Rezaabad Pilot Project, Shahrud. *Watershed Management Promotion and Development Quarterly*, 11(41), 13–31. [In Persian].

