



Analysis of Early Warning Signals of Desertification Risk Using Time-Series of Remote Sensing-Based Indices (Case Study: Mashhad County, Razavi Khorasan Province, Iran)

Abdolhossein Boali ¹, Morteza Akbari* ¹

¹ Department of Desert and Arid Zones Management, Faculty of Natural Resources and Environment, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 22 February 2025

Revised: 13 May 2026

Accepted: 14 May 2026

Available Online:

14 May 2026

Keywords:

Desertification Early
Warning Signals

Remote Sensing Time-Series
Analysis

Vegetation Dynamics
Monitoring

Ecosystem Resilience

BFAST Algorithm

ABSTRACT

Desertification is one of the major challenges in arid and semi-arid regions of the world, exerting profound impacts on ecological sustainability, agriculture, and local livelihoods. This study aims to analyze early-warning signals of desertification risk using time-series remote sensing indices and field data in Mashhad County, Iran. For this purpose, the NDVI, NDSI, and TGSI indices were employed over the period 2005–2024. Satellite images, after geometric and radiometric corrections, were used alongside field observations for the required calculations. Breakpoint detection in the time series was performed using the BFAST software package, and statistical indicators (lag-1 autocorrelation, skewness, and standard deviation) were evaluated in R. To examine the breakpoint behavior, trends were analyzed for 100 pixels, including 50 degraded and 50 non-degraded pixels identified during field surveys. The results indicated that the main breakpoint occurred in 2013, coinciding with a sharp decline in vegetation cover and an increase in soil salinity. The NDVI, NDSI, and TGSI indices showed the strength of changes based on the Kendall's tau test as 0.71, 0.58, and 0.53, respectively. These differences highlight the prominent role of vegetation cover and soil salinity in driving desertification in the region. The findings further revealed that NDVI and NDSI, together with lag-1 autocorrelation, exhibited the highest efficiency in the early detection of ecosystem changes. Overall, the results underscore the importance of integrating remote sensing indices with statistical approaches to develop early-warning systems and support sustainable natural resource management for desertification control.

* Corresponding author: Morteza Akbari

E-mail address: m-akbari@um.ac.ir

How to cite this article: Boali, A., & Akbari, M. (2026). Analysis of Early Warning Signals of Desertification Risk Using Time Series of Remote Sensing Based Indices (Case Study: Mashhad County, Razavi Khorasan Province, Iran). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 15(2), 44-62. <https://doi.org/10.22067/geoech.2026.97882.1652>



©2026 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Extended Abstract

Introduction

Desertification is widely recognized as one of the most severe environmental challenges affecting arid and semi-arid regions across the globe, with far-reaching consequences for ecological stability, agricultural productivity, and human livelihoods. Driven by a complex interplay of climatic pressures such as declining precipitation, rising temperatures, and increased evapotranspiration and human-induced factors including overgrazing, deforestation, groundwater depletion, and unsustainable land-use practices, desertification has intensified in recent decades, particularly in the Middle East and Iran where fragile ecosystems are highly vulnerable to disturbance. According to global assessments, hundreds of millions of people are directly affected by land degradation, and billions more live in regions at risk, underscoring the urgent need for effective monitoring and early-warning systems. Traditional assessment methods, which often rely on static indicators, are insufficient for capturing the dynamic and nonlinear nature of ecosystem degradation. Consequently, remote sensing time-series analysis has emerged as a powerful tool for detecting subtle environmental changes before they evolve into irreversible degradation. Indices such as the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Normalized Difference Salinity Index (NDSI), and the Terrain Gradient Stability Index (TGSI) provide valuable insights into vegetation dynamics, soil salinity, and land surface conditions. When combined with statistical early-warning indicators such as lag-1 autocorrelation, skewness, and standard deviation these datasets can reveal critical slowing down, reduced resilience, and approaching ecological thresholds. Mashhad County, located in northeastern Iran, has experienced increasing environmental stress due to prolonged droughts, declining groundwater levels, and expanding agricultural and urban activities. These pressures make the region an ideal case study for evaluating early-warning signals of desertification using long-term remote sensing data and advanced statistical techniques.

Material and Methods

This study utilized a comprehensive time-series dataset of three remote sensing indices NDVI, NDSI, and TGSI spanning the period from 2005 to 2024 to assess early-warning signals of desertification in Mashhad County. In this study, Satellite images were used for calculations after being validated with reference data. The Breaks for Additive Seasonal and Trend (BFAST) algorithm was employed to decompose each time series into trend, seasonal, and abrupt change components, enabling the detection of structural breakpoints associated with ecosystem shifts. To evaluate early-warning indicators of declining resilience, three statistical metrics lag-1 autocorrelation, skewness, and standard deviation were calculated using the R statistical environment. These indicators are widely used to detect critical slowing down, a hallmark of systems approaching tipping points. A total of 100 representative pixels were selected for detailed analysis, including 50 degraded and 50 non-degraded sites identified through extensive field surveys. This sampling strategy allowed for a robust comparison between stable and vulnerable areas. In addition to temporal analysis, spatial patterns of change were examined across the entire study area to map the distribution and intensity of degradation processes. The integration of remote sensing indices, statistical early-warning metrics, and field-based validation provided a comprehensive framework for assessing both temporal dynamics and spatial heterogeneity of desertification risk.

Results and Discussion

The time-series analysis revealed a distinct and consistent breakpoint in NDVI and NDSI during the period 2013–2014, marking a critical transition in ecosystem behavior. This abrupt change corresponded to a sharp decline in vegetation cover and a significant increase in soil salinity, indicating a shift toward reduced ecosystem productivity and heightened degradation pressure. In contrast, TGSI did not exhibit a clear structural breakpoint, suggesting that this index may be less sensitive to short-term environmental fluctuations. Following the breakpoint, NDVI displayed a pronounced downward trend in degraded areas, while NDSI increased steadily, reflecting intensified salinization and reduced vegetation health. Non-degraded areas, however, maintained relatively stable trends throughout the study period, highlighting the contrasting resilience levels across the landscape.

Statistical early-warning indicators further supported these findings: lag-1 autocorrelation showed a strong and persistent increasing trend across all indices, with high positive Kendall's tau values, indicating reduced system resilience and approaching instability. Although skewness and standard deviation also exhibited occasional increases, their sensitivity and discriminatory power were notably weaker than that of autocorrelation. Spatial analysis revealed that the western and southern regions of Mashhad experienced the most significant changes in NDVI, NDSI, and TGSI, corresponding to areas with intensive agricultural activity, groundwater depletion, and higher exposure to climatic stress. Kendall's tau values of 0.71 for NDVI, 0.58 for NDSI, and 0.53 for TGSI underscore the dominant role of vegetation dynamics and soil salinity in driving desertification processes. These results align with previous studies demonstrating that increasing salinity, declining vegetation cover, and reduced ecological resilience are key precursors to land degradation in arid environments.

Conclusion

This study demonstrates that integrating remote sensing time-series indices with statistical early-warning indicators provides a robust and effective framework for detecting emerging desertification risks in arid and semi-arid regions. The identification of a major breakpoint in 2013–2014 highlights a critical shift toward ecological instability in Mashhad County, driven primarily by vegetation decline and increasing soil salinity. Among the indices analyzed, NDVI and NDSI exhibited the highest sensitivity to environmental changes, while lag-1 autocorrelation emerged as the most reliable early-warning metric, effectively capturing reduced ecosystem resilience prior to major transitions. Spatial analysis further revealed that the western and southern parts of Mashhad are the most vulnerable to degradation, emphasizing the need for targeted land management interventions in these areas. Overall, the findings underscore the importance of remote sensing-based early-warning systems for sustainable land management, enabling policymakers and environmental managers to implement timely mitigation strategies and prevent the progression of desertification. By providing a scientifically grounded approach to monitoring ecosystem health, this study contributes to the development of proactive management frameworks aimed at preserving ecological stability and supporting long-term environmental sustainability in vulnerable regions.



تحلیل سیگنال‌های پیش هشدار خطر بیابان‌زایی با استفاده از سری‌های زمانی شاخص‌های مبتنی بر سنجش از دور (مطالعه موردی: شهرستان مشهد، استان خراسان رضوی)

عبدالحسین بوعلی^۱، مرتضی اکبری^{۱*}

^۱ گروه مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی، مشهد، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۲/۰۳ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۲/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۲/۲۴	بیابان‌زایی یکی از چالش‌های اساسی در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان است که بر پایداری اکولوژیکی، کشاورزی و معیشت جوامع تأثیر عمیق می‌گذارد. این پژوهش با هدف تحلیل سیگنال‌های پیش‌هشدار خطر بیابان‌زایی با استفاده از سری‌های زمانی شاخص‌های سنجش از دوری و داده‌های میدانی در شهرستان مشهد انجام شد. برای این منظور، از شاخص‌های سنجش از دور NDVI، NDSI و TGSi طی دوره زمانی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۴ میلادی استفاده گردید. در این پژوهش تصاویر ماهواره‌ای پس از صحت‌سنجی با داده‌های مرجع برای محاسبات مورد استفاده قرار گرفتند. تحلیل نقاط شکست سری‌های زمانی با استفاده از مدل BFAST و ارزیابی شاخص‌های آماری (خودهمبستگی lag-1، چولگی، انحراف معیار) در نرم افزار R انجام شد. در این پژوهش به منظور بررسی نقطه شکست، روند تغییرات در ۱۰۰ پیکسل شامل ۵۰ پیکسل مناطق تخریب یافته و ۵۰ پیکسل مناطق تخریب نیافته که در طی بازدید میدانی تعیین شده بود، انجام گرفت. نتایج نشان داد که نقطه شکست اصلی در سال ۲۰۱۳ رخ داد است، که با کاهش شدید پوشش گیاهی و افزایش شوری خاک همراه بود. به ترتیب شاخص‌های NDVI، NDSI و TGSi قدرت تغییرات را براساس آزمون آماری کندال تای ۰/۷۱، ۰/۵۸ و ۰/۵۳ نشان دادند. این اختلاف در مقادیر نشان داد که پوشش گیاهی و شوری خاک نقش برجسته‌ای در بیابان‌زایی منطقه ایفا می‌کنند. نتایج نشان داد که شاخص‌های NDVI و NDSI همراه با خودهمبستگی lag-1 بیشترین کارایی را در شناسایی زودهنگام تغییرات اکوسیستمی دارند. یافته‌ها اهمیت ترکیب شاخص‌های سنجش از دور با روش‌های آماری را در توسعه سیستم‌های هشدار سریع و مدیریت پایدار منابع طبیعی برای کنترل بیابان‌زایی نشان می‌دهد.
کلمات کلیدی: سیگنال‌های پیش‌هشدار بیابان‌زایی تحلیل سری‌های زمانی سنجش از دور پایش پویایی پوشش گیاهی تاب‌آوری اکوسیستم مدل BFAST	

مقدمه

بیابان‌زایی یکی از چالش‌های اصلی محیط زیست و توسعه پایدار در اکثر نقاط جهان است که اثرات عمیقی بر اقتصاد، اجتماع و محیط زیست دارد (Pravalie, 2021). این فرآیند در طی زمان باعث کاهش تنوع زیستی، کاهش تولید محصولات کشاورزی، فرسایش خاک و تخریب اکوسیستم می‌شود. طبق آمار منتشر شده از سوی سازمان ملل متحد بیابان‌زایی بالقوه خطرناک‌ترین تهدید برای محیط‌های طبیعی و انسانی است که سبب تغییر معیشت و تنزل سطح زندگی انسان‌های فقیر جهان می‌شود (UNCCD, 1994). گزارشات رسمی نشان می‌دهند که بیش از ۲۵۲ میلیون نفر در جهان، به طور مستقیم متأثر از خطر بیابان‌زایی بوده و چندین میلیارد نفر نیز در بیش از صدها کشور دنیا در معرض ریسک این پدیده قرار دارند (Elnashar, Zeng, Wu, Gebretsadkan Gebremicael, 2016; UNCCD, 1994; Marie, 2022). بیابان‌زایی یکی از چالش‌های مهم و جدی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، به ویژه در ایران و مناطق خاورمیانه، به شمار می‌رود که با توجه به شرایط آب و هوایی، به یک وضعیت نگران‌کننده تبدیل شده است (Liu et al., 2016a; Akbari, Ownegh, Asgari, Sadoddin & Khosravi, 2016; Akbari, 2018). این پدیده که به دلایل متعددی نظیر کاهش بارش، تخریب جنگل‌ها، بی‌توجهی به مدیریت منابع آب، فعالیت‌های کشاورزی نامناسب و افتراق آب‌های مشترک با کشورهای همسایه در این مناطق ایجاد می‌شود، تأثیرات جدی بر سلامت اکوسیستم‌ها و روند توسعه پایدار دارد (Liu et al., 2024; Akbari & Noughani, 2018).

بیابان‌زایی یک فرآیند پویا و پیچیده است که تحت تأثیر عوامل اقلیمی و فعالیت‌های انسانی و غیره قرار دارد. بنابراین ارزیابی بیابان‌زایی با استفاده از مدل‌های مرسوم ممکن است نتواند این پیچیدگی را به طور کامل در نظر بگیرد (Boali, Asgari, Behbahani, 2024a; Salmanmahiny & Naimi, 2024a). با توجه به اهمیت بحران بیابان‌زایی و نیاز مبرم به راه‌حل‌های کارآمد برای مدیریت این مسئله، استفاده از سیستم‌های پیش‌بینی و پیش‌هشدار با تکیه بر فناوری‌های پیشرفته می‌تواند به عنوان یک ابزار مؤثر در این زمینه مطرح گردد (Boali et al., 2025; Akbari, Sarbazi, Sibevei & Fadaie, 2024). در این راستا می‌توان به شاخص‌های مبتنی بر داده‌های سنجش از دور اشاره نمود، که به صورت مؤثری به تحلیل و پیش‌بینی فرآیند بیابان‌زایی کمک می‌نمایند (Meng, Xin, Sen, 2021; Shengyu & Jiaqiang, 2021). دستورانی و جعفری (Dostorani & Jafari-Shelamzari, 2022) در پژوهشی به کارایی دو روش فازی و شاخص تلفیقی بیابان‌زایی (IDI¹) در شهرستان تربت حیدریه پرداختند. نتایج نشان داد روش فازی شدت بیابان‌زایی را سخت‌گیرانه‌تر برآورد می‌کند، درحالی‌که شاخص تلفیقی تمایل به بیش‌برآورد دارد اما دقت بیشتری نشان داده است. ارزیابی میدانی نیز دقت بالاتر شاخص تلفیقی را تأیید کرده و این روش برای تحلیل بیابان‌زایی منطقه پیشنهاد می‌شود. داوری و همکاران (Davari, Rashki, 2018; Akbari & Talebanfard, 2018). نیز به بررسی شاخص‌های مکانی و زمانی بیابان‌زایی در جنوب خراسان رضوی با استفاده از مدل IMDPA² پرداختند. نتایج نشان می‌دهد که ۷۷ درصد منطقه با شدت بیابان‌زایی شدید مواجه است، که عمدتاً ناشی از شاخص‌های کمبود بارش، تغییرات کاربری اراضی (کاهش مراتع و افزایش کشاورزی)، برداشت بی‌رویه از آب‌های زیرزمینی و فرسایش بادی است. استفاده از داده‌های سنجش از دور امکاناتی را ارائه می‌دهند که با استفاده از آن می‌توان به طور دقیق‌تری الگوها و تغییرات مرتبط با روند بیابان‌زایی را شناسایی کرده و راهکارهای مؤثری برای مقابله با این پدیده ارائه نمود (Guo et al., 2020). مطالعات نشان داده است که با استفاده از تصاویر سنجش از دور می‌توان شاخص‌های مختلفی مانند تراکم پوشش گیاهی، شوری سطح خاک، فرسایش سطحی، مقدار بارش و دیگر شاخص‌های وضعیت اکوسیستم را ارزیابی کرد (Wei, Wang & Han, 2020). استفاده از سری زمانی شاخص‌های سنجش از دور می‌تواند به شناسایی مناطقی که در معرض خطر بیابان‌زایی قرار دارند، کمک کند. با بررسی تغییرات زمانی این شاخص‌ها، می‌توان الگوهایی را شناسایی کرد و به عنوان سیگنال‌های پیش هشدار بیابان‌زایی در نظر گرفت (Alibakhshi, 2018).

1- Integrated Desertification Index

2- Iranian Model for Desertification Potential Assessment

2023). با توجه به پیچیدگی و چند عاملی بودن بیابان‌زایی، تحلیل و تفسیر این سیگنال‌ها می‌تواند به یک چالش بزرگ تبدیل شود. عوامل محیط زیستی، اقلیمی، زمین‌شناسی و فعالیت‌های انسانی می‌توانند تأثیرگذار باشند و موجب ایجاد الگوهای پیچیده‌ای در سیگنال‌های مورد بررسی شوند. به علاوه، تفسیر این سیگنال‌ها نیازمند استفاده از روش‌های تحلیلی پیشرفته و مدل‌های ریاضی مناسب است (Boali et al., 2025).

با وجود مطالعات متعدد در زمینه پایش بیابان‌زایی با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور، بیشتر پژوهش‌های پیشین تنها بر یک شاخص یا یک بُعد از تغییرات اکوسیستم تمرکز داشته‌اند و از تحلیل تلفیقی سیگنال‌های آماری در ابعاد مکانی و زمانی غفلت شده است. روش‌های موجود عمدتاً ماهیتی ایستا داشته و قادر به شناسایی تغییرات تدریجی تاب‌آوری اکوسیستم یا آشفته‌گی‌های اولیه پیش از گذارهای بحرانی نیستند (Boali et al., 2024a). علاوه بر این، کاربرد رویکردهای پیش‌هشدار در مقیاس‌های محلی و مناطق حساس بسیار محدود بوده و هنوز چارچوبی عملیاتی برای شناسایی زودهنگام روندهای بیابان‌زایی در این مناطق ارائه نشده است (Akbari & Noughani, 2024). این خلأ نشان می‌دهد که نیاز به رویکردی پویا، چندشاخصه و زمان‌مند وجود دارد تا بتواند علائم اولیه کاهش تاب‌آوری و آغاز بیابان‌زایی را با دقت بالاتری شناسایی کند.

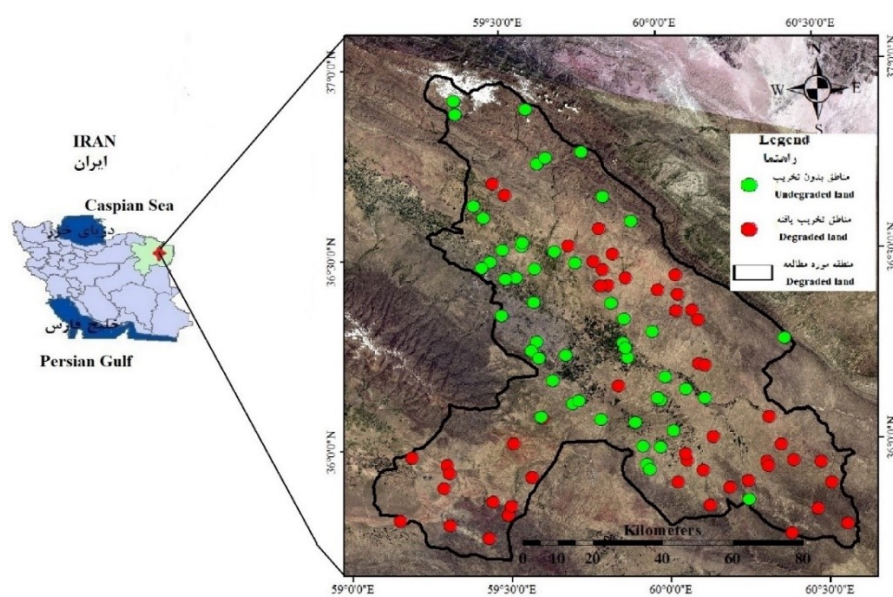
نتایج پژوهشگران بیانگر آن است که استفاده از شاخص‌های آماری برای تحلیل سیگنال‌های هشدار اولیه بسیار کاربردی بوده و این شاخص‌ها می‌توانند کاهش تاب‌آوری اکوسیستم را نشان دهند (Alibakhshi, Groen, Rautiainen & Naimi, 2017). در این راستا، کارسینبرگ و بیرکنز (Karsenberg & Bierkens, 2012)، به نتایج جالبی در مورد استفاده از واریانس مکانی و زمانی داده‌های سنجش از دوری در ارزیابی تغییرات محیط زیستی رسیدند. نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از این واریانس‌ها می‌تواند به عنوان سیگنال‌های هشدار اولیه در نظر گرفته شود. در مطالعه دیگر، نشان داده شد که استفاده از شاخص آماری ضریب تغییرات، می‌تواند به عنوان سیگنال هشدار اولیه تغییرات بحرانی در حوضه Ebro در کشور اسپانیا در نظر گرفته شود (Daas, 2018). همچنین برای ارزیابی تخریب سرزمین و بیابان‌زایی، از تغییرات مکانی داده‌های سنجش از دور به شکل شاخص انحراف استاندارد متحرک (MSDI) نیز نتایج موفقیت‌آمیزی در کشور چین به دست آمده است (Liu et al., 2018). در ایران نیز بوعلی و همکاران (Boali et al., 2025) به منظور ارزیابی سیگنال‌های هشدار اولیه برای فرسایش خاک در شمال شرق ایران از شاخص‌های آماری ضریب خود همبستگی، انحراف معیار و چولگی استفاده کردند.

نوآوری این پژوهش در ارائه یک چارچوب تحلیلی یکپارچه مبتنی بر سیگنال‌های پیش‌هشدار آماری است که نسبت به مطالعات پیشین چند وجه تمایز اصلی دارد. نخست، برخلاف پژوهش‌هایی که هر شاخص سنجش از دوری را به صورت مجزا بررسی کرده‌اند (Guo et al., 2020; Meng et al., 2021)، در این مطالعه تحلیل آماری مجموعه‌ای از شاخص‌های سنجش از دوری از نظر مکانی و زمانی در چارچوبی واحد به کار گرفته شده است. همچنین این پژوهش نخستین کاربرد عملی این چارچوب در مقیاس شهرستان مشهد است؛ منطقه‌ای که با وجود حساسیت بالا نسبت به بیابان‌زایی، تاکنون با رویکرد سیگنال‌های پیش‌هشدار مورد ارزیابی قرار نگرفته است. در این راستا، شهرستان مشهد به عنوان یکی از مناطق راهبردی شمال شرق ایران از نظر کشاورزی، منابع طبیعی و سکونتگاه‌های انسانی، طی دهه‌های اخیر با روند فزاینده بیابان‌زایی مواجه شده است (Akbari et al., 2024). این شهرستان در نواحی خشک و نیمه‌خشک قرار داشته و به دلیل ویژگی‌های خاص اقلیمی، از جمله کاهش بارندگی، افزایش دما و نوسانات شدید اقلیمی، از حساسیت بالایی نسبت به تخریب سرزمین برخوردار است. در این پژوهش، تحلیل سیگنال‌های پیش‌هشدار خطر بیابان‌زایی در شهرستان مشهد مورد بررسی قرار می‌گیرد. بدین منظور، از سری‌های زمانی شاخص‌های مبتنی بر سنجش از دور و داده‌های کمکی میدانی و مطالعات پیشین برای شناسایی الگوها و روندهای مرتبط با بیابان‌زایی استفاده می‌شود. نتایج این پژوهش ضمن کمک به درک بهتر پویایی بیابان‌زایی در منطقه، می‌تواند به عنوان ابزاری کارآمد در پشتیبانی از برنامه‌های مدیریتی، پایش زودهنگام و پیشگیری از گسترش بیابان‌زایی در شهرستان مشهد مورد استفاده قرار گیرد.

به طور کلی، این پژوهش با ارائه یک رویکرد تحلیلی جامع و نوآورانه مبتنی بر سیگنال‌های پیش‌هشدار، در پی ارتقای مدیریت پایدار سرزمین در مناطق حساس به تخریب اکوسیستم است.

منطقه مورد مطالعه

شهرستان مشهد با مساحتی معادل ۱۰۳۸۰ کیلومتر مربع یکی از شهرستان‌های استان خراسان رضوی در شمال شرق ایران می‌باشد که مرکز آن شهر مشهد است. این شهرستان در طول جغرافیایی $35^{\circ} 42'$ تا $36^{\circ} 00'$ و عرض جغرافیایی $59^{\circ} 30'$ تا $60^{\circ} 00'$ قرار گرفته است (شکل ۱). بخش‌های شمالی و جنوبی منطقه مورد مطالعه کوهستانی و بخش‌های شرقی و مرکزی آن به صورت دشت و هموار است. میزان بارش و دما در منطقه مورد مطالعه به ترتیب ۲۵۰ میلی‌متر و $15/7^{\circ}$ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. وضعیت اقلیمی و بارش کم این شهرستان موجب شده که اکوسیستم حاکم بر منطقه از یک شرایط حساس و شکننده برخوردار باشد. این شهرستان از لحاظ پوشش گیاهی جزء نواحی ایرانی-تورانی بوده و رژیم رطوبتی و حرارتی خاک به ترتیب اریدیک و مزیک گزارش شده است (Memarian & Akbari, 2021).



(الف) (A)



(ب) (B)

شکل ۱- الف- موقعیت جغرافیایی شهرستان مشهد در استان خراسان رضوی. ب- تصاویری از کاربری‌های منطقه مورد مطالعه
Fig.1. A- Geographic location of Mashhad County in Khorasan Razavi Province. B- study area land uses

مواد و روش‌ها

داده‌های مورد استفاده

در این پژوهش از شاخص‌های سنجش از دوری $NDVI^1$ ، $NDSI^2$ و $TGSI^3$ به منظور بررسی روند تغییرات تخریب سرزمین استفاده شد. ما از تصاویر بازتاب سطحی ردیف ۱ لندست (۷،۵ و ۸) را انتخاب کردیم که اصلاحات جوی و هندسی و همچنین کالیبراسیون متقابل بین حسگرهای مختلف آن انجام شده است (Dwyer et al., 2018; Boali et al., 2025). این شاخص‌ها از سامانه گوگل ارث انجین با وضوح مکانی ۳۰ متر و وضوح زمانی ماهانه بین سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۴ میلادی به دست آمد. در این پلتفرم، داده‌های این سه ماهواره به صورت پیش‌پردازش شده (شامل اصلاحات جوی و هندسی) و با قابلیت مقایسه بین حسگرها در دسترس هستند. ما از سنجنده‌های مرتبط با این ماهواره‌ها (TM برای لندست ۵، ETM+ برای لندست ۷، و OLI/TIRS برای لندست ۸) که در گوگل ارث انجین بارگذاری شده‌اند، بهره برده‌ایم. هدف از این ترکیب، استفاده از طولانی‌ترین سری زمانی ممکن برای تحلیل روند تغییرات در دوره ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۴ بوده است. روش انتخاب این تصاویر بر اساس میانگین هر ماه و حداقل پوشش ابری در منطقه مورد مطالعه بوده است. در رابطه با داده‌های میدانی و روش اعتبارسنجی، لازم به توضیح است که در این پژوهش، داده‌های ماهواره‌ای با داده‌های استخراج شده از منابع معتبر $Copernicus\ Global\ Land\ Cover^4$ و $Soil\ Grids^5$ به عنوان داده‌های مرجع مقایسه شده‌اند. این داده‌ها دارای قدرت تفکیک مکانی به ترتیب ۱۰۰ متر و ۲۵۰ متر می‌باشند و داده‌های این منابع به صورت سالانه به‌روزرسانی می‌شوند. این دو منبع به دلیل پوشش جهانی و دقت بالا، به عنوان مراجع اصلی برای سنجش صحت سنجی در مطالعات مشابه مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با توجه به تفاوت در قدرت تفکیک مکانی و زمانی بین داده‌های لندست (۳۰ متر، ماهانه) و داده‌های مرجع $SoilGrids$ و $Copernicus$ ، ابتدا فرآیند تطابق‌سنجی با دقت انجام شد تا مقایسه‌ای معتبر صورت گیرد. برای همسان‌سازی تفکیک مکانی، داده‌های لندست به تفکیک مکانی داده‌های مرجع تجمیع مکانی^۶ شدند تا هر پیکسل مرجع نمایانگر میانگین ارزش پیکسل‌های متناظر لندست باشد. علاوه بر این، برای همسان‌سازی تفکیک زمانی نیز از درون‌یابی زمانی^۷ استفاده شد تا نزدیک‌ترین بازه زمانی داده‌های مرجع با داده‌های ماهانه لندست تطبیق پیدا کند. این مراحل سبب شد که هر دو مجموعه داده در یک مقیاس زمانی- مکانی قابل مقایسه قرار گیرند و اعتبار همبستگی محاسبه شده تضمین شود. برای ارزیابی کمی میزان تطابق بین داده‌های ماهواره‌ای مورد استفاده در این تحقیق و داده‌های مرجع در ۵۰ پیکسل، از شاخص‌های آماری ضریب تعیین (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) استفاده شده است.

تمامی تحلیل‌ها و آماده‌سازی تصاویر در نرم‌افزار آماری R و Google Earth Engine انجام شد (Gorelick et al., 2017). مجموعه مورد استفاده در این پژوهش شامل، مجموعه رستر برای تحلیل نقشه‌های رستر پایه و مجموعه rts برای تحلیل سری‌زمانی (Naimi & Araújo, 2016) و مدل BFAST^۸ نیز برای بررسی شکست در سری زمانی استفاده شد (Verbesselt & Herold, 2012). مجموعه Early Warnings و Spatial Warnings نیز برای بررسی سیگنال‌های هشدار اولیه اکوسیستم توسعه یافته است (Dakos, Carpenter, Nes & Scheffer, 2015).

1- Normalized Difference Vegetation Index

2- Normalized Difference Salinity Index

3- Topsoil Grain Size Index

4- <https://land.copernicus.eu/en/products/global-dynamic-land-cover>5- <https://soilgrids.org>

6- Spatial Aggregation

7- Temporal Interpolation

8- Breaks for Additive Seasonal and Trend

محاسبه و تحلیل شاخص‌های سنجش از دوری

سه شاخص سنجش از دوری به منظور تحلیل سیگنال‌های پیش هشدار خطر بیابان‌زایی استفاده شد (جدول ۱). محاسبه شاخص‌های TGSi، NDSi و NDVI با استفاده از روابط بین باندهای ماهواره لندست (۸،۷ و ۵) انجام شد. شاخص TGSi بیانگر وضعیت زبری و ترکیب ذرات سطحی خاک است و افزایش مقدار آن معمولاً نشان‌دهنده غلبه مواد درشت‌دانه، کاهش پوشش گیاهی و برهنگی بیشتر سطح می‌باشد (Xiao, Shen, Tateishi & Bayaer, 2006). چنین شرایطی اغلب با فرآیندهای بیابان‌زایی و تخریب سرزمین همزمان است، زیرا سطوح خشن و کم‌پوشش، بازتاب طیفی ویژه‌ای ایجاد می‌کنند. بنابراین TGSi بیشتر وضعیت سطح زمین را منعکس می‌کند تا نوع مشخصی از فرسایش (آبی یا بادی). شاخص NDVI نشان‌دهنده تراکم پوشش گیاهی است. براساس منابع محدوده ۰ تا ۰/۳ محدوده هشدار بیابان‌زایی این شاخص می‌باشد (Akbari & Noughani, 2024; Tucker, 1979). شاخص NDSi نیز شوری خاک را نشان می‌دهد و هر چه مقدار این شاخص بیشتر باشد نشان‌دهنده اراضی شور و بیابانی در منطقه است (Khan et al., 2005). در نهایت همبستگی بین شاخص‌های سنجش از دوری در نظر گرفته شده و داده‌های زمینی محاسبه شد. همبستگی بین شاخص‌ها با استفاده از معیارهای ریشه میانگین مربع خطا و ضریب تشخیص تعیین شد تا با اثبات داشتن همبستگی بالا، جهت بررسی تغییرات بیابان‌زایی استفاده شوند. همبستگی بین شاخص‌های مختلف سنجش از دور (NDVI, NDSi, TGSi) و داده‌های اعتبارسنجی (Copernicus Global Land Cover و Soil Grids) مورد تحلیل قرار گرفت. برای هر شاخص، مقدار میانگین آن شاخص برای پیکسل‌های واقع در هر کلاس کاربری اراضی یا منطقه مشخص (بسته به نوع داده اعتبارسنجی) محاسبه گردید. این مقادیر میانگین به عنوان نماینده‌های کمی برای هر دسته کیفی (کاربری اراضی) یا ویژگی کمی (مانند خصوصیات خاک) عمل کردند.

جدول ۱- مشخصات شاخص‌های سنجش از دوری

Table 1- haracteristics of Remote Sensing Indices

منبع Reference	RMSE	R ²	داده‌های اعتبارسنجی Validation Data	دامنه تغییرات Range	فرمول / رابطه Equation	شاخص‌ها Indices
Xiao et al., (2006)	2.86	0.69	Soil Grids	-0.5 to 0.2	$R - B / R + B + G$	TGSi
Dehni & Lounis, (2012)	2.54	0.73		-1 to +1	$R - NIR / R + NIR$	NDSi
Lamchin et al., (2015)	1.74	0.81	Copernicus Global Land Cover	-1 to +1	$NIR + R / NIR - R$	NDVI

بررسی نقاط شکست در سری زمانی شاخص‌های سنجش از دوری

در این پژوهش از مدل BFAST برای شناسایی زمان وقوع تغییرات ناگهانی (نقطه شکست) هر یک از شاخص‌های سنجش از دوری تأثیرگذار بر بیابان‌زایی در منطقه مورد مطالعه استفاده شد. نقطه شکست، در اینجا، به بزرگترین تغییر ناگهانی در سری زمانی شاخص‌ها بین سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۲۴ میلادی اشاره دارد که می‌تواند نشان‌دهنده تخریب سرزمین باشد. به منظور بررسی وقوع نقطه شکست، در ابتدا، نقشه ماهانه هر یک از شاخص‌های مورد بررسی در محیط گوگل ارث انجین تهیه و سپس سری زمانی شاخص‌ها به دو صورت مؤلفه روند و فصلی تجزیه شد. مؤلفه روند، نشان‌دهنده تغییرات طولانی مدت و مؤلفه فصلی تغییرات دوره‌ای و کوتاه مدت در داده‌ها را بررسی می‌کند. سپس در هر پیکسل در سطح منطقه، روند تغییرات با استفاده از مدل BFAST محاسبه شد (Verbesselt & Herold, 2012). در این پژوهش، ۱۰۰ نقطه مورد استفاده برای تحلیل، به صورت کاملاً تصادفی در محدوده مناطق تخریب‌یافته (۵۰ پیکسل) و تخریب‌نیافته (۵۰ پیکسل) تعیین شدند. این نقاط با استفاده از ابزار Random Sampling در محیط Google Earth Engine ایجاد شده‌اند و توزیع آن‌ها نماینده کل محدوده است. در این روش، هر نقطه متناظر با یک پیکسل ۳۰ متری لندست در نظر گرفته شده و هیچ میانگین‌گیری از چند پیکسل انجام نشده است.

همچنین برای جلوگیری از تداخل کاربری‌های نامرتبط با فرایند تخریب، پیش از تحلیل شاخص‌ها از لایه کاربری/پوشش اراضی جهت ماسک کردن مناطق شهری، پهنه‌های آبی، ارتفاعات سنگی و نواحی کوهستانی استفاده شد. بدین ترتیب محاسبات تنها بر روی کاربری‌های مستعد بیابان‌زایی شامل اراضی بایر، مراتع و پهنه‌های رسوبی انجام گرفت. این رویکرد موجب افزایش دقت و تفسیرپذیری نتایج و جلوگیری از ورود تغییرات غیرمرتبط به تحلیل شد. بنابراین واحدکاری تحلیل، پیکسل‌ها در کاربری‌های انتخاب شده بوده است و مقادیر شاخص‌ها به صورت مستقیم از همان پیکسل استخراج شده‌اند.

روش‌های کشف سیگنال‌های هشدار اولیه زمانی - مکانی

برای بررسی سیگنال‌های هشدار از آزمون آماری کندال تای بین هر شاخص سنجش از دوری و سری زمانی آن استفاده شد. کندال تای یک آزمون ناپارامتریک برای اندازه‌گیری ارتباط بین دو کمیت اندازه‌گیری شده است که بین مثبت ۱ تا منفی ۱ متغیر است (Alibakhshi et al., 2017). ارزش‌های کندال بزرگ‌تر به روندهای قوی‌تر اشاره دارد. تجزیه و تحلیل ارزش‌های کندال تای داده‌ها با استفاده از ۳ شاخص آماری ضریب خود همبستگی، چولگی و انحراف معیار انجام شد. این شاخص‌ها در پکیج Early Warning در محیط نرم افزاری R محاسبه شد.

نتایج نشان داد که اگر سیستم به تدریج به نقطه اوج نزدیک‌تر شود، افزایش قابل توجهی در ضریب خود همبستگی به وجود می‌آید که مدت‌ها قبل از وقوع انتقال بحرانی ایجاد می‌شود (Kefi et al., 2014). افزایش خودهمبستگی نشان‌دهنده این است که وضعیت یک سیستم بین مشاهدات متوالی مشابه‌تر می‌شود (Dakos et al., 2015) و می‌تواند به عنوان ساده‌ترین روش برای اندازه‌گیری انتقال بحرانی اکوسیستم تلقی شود. خودهمبستگی می‌تواند با در نظر گرفتن تأخیر زمانی مشخص محاسبه شود. بیشتر مطالعات مربوط به نشانگرهای پیشرو تا کنون اغلب از تأخیرهای زمانی یک مرحله‌ای استفاده کرده‌اند. بنابراین می‌توان آن را با استفاده از رابطه (۱) محاسبه کرد:

$$P_1 = \frac{E[(Z_t - \mu)(Z_{t+1} - \mu)]}{\delta_z^2} \quad (1)$$

که در آن E مقدار مورد انتظار است، μ میانگین و δ_z واریانس یک متغیر Z_t است.

نرخ بازگشت آهسته به یک حالت پایدار نیز می‌تواند باعث شود که سیستم در اطراف آن حالت گسترده‌تر حرکت کند و باعث افزایش واریانس در نوسانات قبل از یک گذار شود (Alibakhshi et al., 2017). واریانس دومین لحظه نسبت به میانگین یک توزیع است و می‌تواند به صورت انحراف معیار به صورت رابطه (۲) بیان شود:

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{t=1}^n (Z_t - \mu)^2} \quad (2)$$

به علاوه، به جز ضریب خود همبستگی و واریانس، افزایش عدم تقارن در نوسانات ممکن است به عنوان نتیجه‌ای از یک تعادل ناپایدار در نزدیکی به یک نقطه اوج رخ دهد (Boali et al., 2024a). در چنین مواردی می‌توان افزایش چولگی را مشاهده کرد. چولگی نقطه سوم استاندارد شده حول میانگین توزیع است و می‌توان آن را با رابطه (۳) محاسبه کرد:

$$SK = \frac{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (Z_t - \mu)^3}{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (Z_t - \mu)^2}} \quad (3)$$

قبل از تجزیه و تحلیل سری‌های زمانی شاخص‌های سنجش از دوری، داده‌ها باید بی‌روند و هموار شوند تا اثر غیرثابت (غیر ساکن) در سری‌های زمانی حذف شود. روش‌های بی‌روند سازی داده‌ها که معمولاً مورد استفاده قرار می‌گیرند شامل فیلتر گاوسی، برازش لس، بی‌روند سازی خطی و تفاضل اول می‌باشند.

جهت بررسی تغییرات از پنجره متحرک که بین ۲۵٪ تا ۷۵٪ طول سری زمانی را در نظر می‌گیرد، استفاده شد. در این پژوهش سعی شد آن دسته از روش‌های بی‌روندسازی داده‌ها شناسایی شوند که به بهترین شکل، تغییرات شاخص‌ها را شناسایی می‌کنند؛ بنابراین، برای انتخاب بهترین اندازه پنجره متحرک، تجزیه و تحلیل حساسیت برای اندازه‌های مختلف پنجره‌های متحرک از ۲۵٪ تا ۷۵٪ طول سری زمانی استفاده شد. همچنین با استفاده از آزمون کندال تای قدرت تغییرات مکانی هر کی از شاخص‌های محیطی در نظر گرفته شده، در سطح منطقه بررسی شد. بر این اساس مناطقی که بیشترین تغییرات معنی‌دار پوشش گیاهی، شوری خاک و اندازه ذرات سطحی را داشته باشد، به عنوان مناطق تحت خطر تخریب شناسایی خواهد شد.

نتایج و بحث

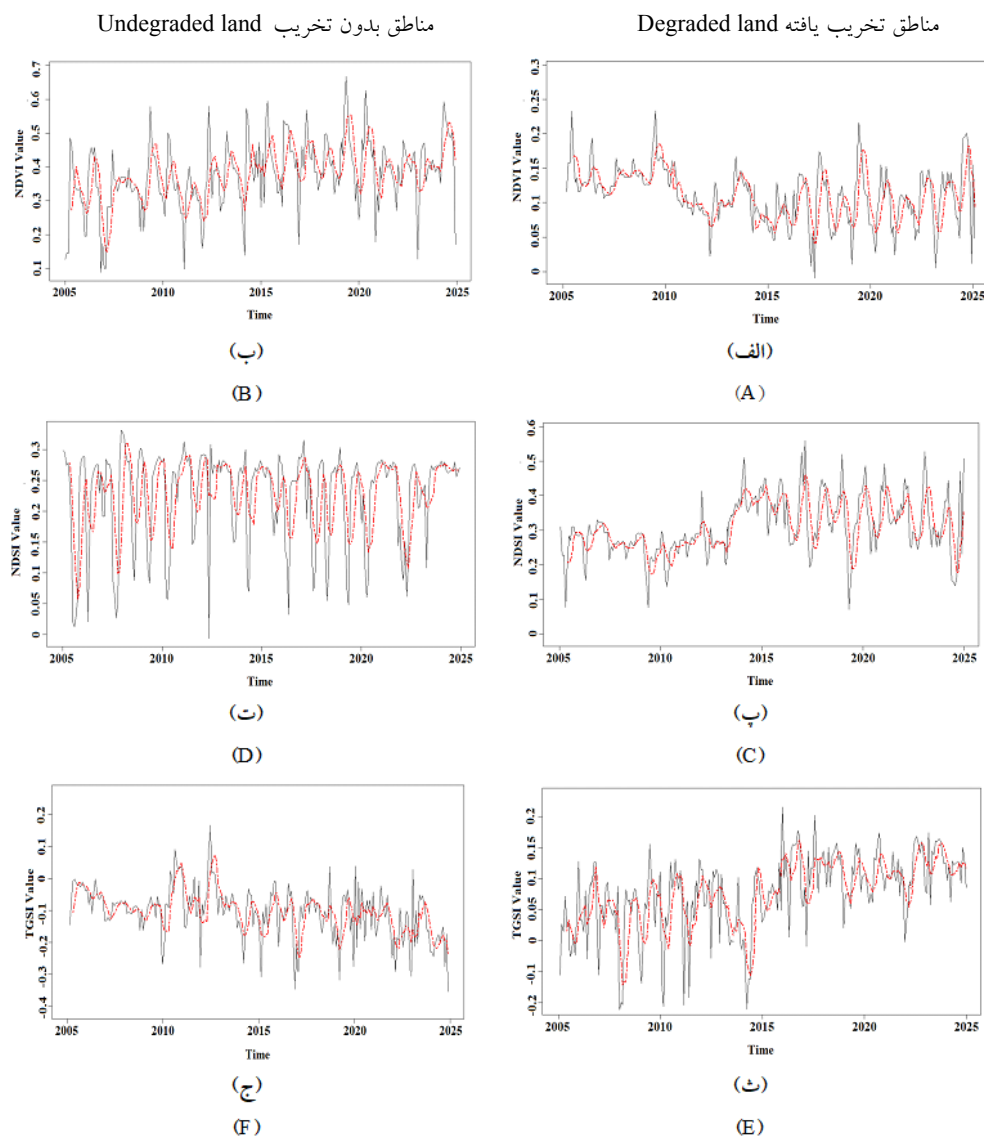
تحلیل زمانی سیستم هشدار اولیه بیابان‌زایی مبتنی بر شاخص‌های سنجش از دوری

روند تغییرات شاخص‌های محیطی در مناطق تخریب یافته و مناطق بدون تخریب در شکل ۲ نشان داده شده است. برجسته‌ترین نقطه شکست قابل توجه در شاخص‌های محیطی NDSI و NDVI در سال ۲۰۱۴ - ۲۰۱۳ نشان داده شد. در حالی که شاخص TGSi هیچ نقطه شکست قابل تشخیصی را نشان نداد (شکل ۲). سطح اطمینان نیز در مدل BFAST ۹۵٪ محاسبه شده است. پس از وقوع این نقطه شکست، در مناطق تخریب یافته تغییرات در شاخص‌های NDSI و NDVI به ترتیب افزایشی و کاهشی بود. در حالی که در مناطق بدون بیابان‌زایی روند تغییرات در کل دوره (۲۰۰۵ تا ۲۰۲۴) یکنواخت مشاهده شد (شکل ۲). پس از وقوع نقطه عطف افزایش شاخص NDSI نشان‌دهنده تشدید فرآیند شوری خاک پس از نقطه عطف است. این پدیده می‌تواند ناشی از عواملی چون تبخیر بالا، کاهش پوشش گیاهی و در نتیجه بالا آمدن آب‌های زیرزمینی شور به سطح، یا تشدید فرسایش و جابه‌جایی نمک‌ها در سطح خاک باشد (Boali, Bashari & Jafari, 2019; Dehni & Lounis, 2012). مشاهده روند کاهشی در شاخص NDVI نیز مؤید کاهش پوشش و سلامت گیاهان در این مناطق است. شوری خاک یکی از عوامل اصلی کاهش‌دهنده رشد و بقای گیاهان است، زیرا باعث اختلال در جذب آب و مواد مغذی و سمیت سلولی می‌شود (Akbari, Ownegh, Asgari, Sadoddin & Khosravi, 2016b; Lamchin et al., 2015).

با وجود توصیف روندهای مشاهده شده در شاخص‌های سنجش از دور، تحلیل عمیق‌تر ارتباط علی بین این تغییرات و فرآیندهای بیابان‌زایی ضروری است. نقاط شکست کلیدی شناسایی شده برای شاخص‌های NDSI و NDVI، صرفاً تغییرات زمانی نیستند، بلکه نشان‌دهنده یک نقطه عطف اکولوژیکی در منطقه هستند. افزایش شاخص شوری پس از این نقطه، به طور مستقیم با تشدید فرآیندهای بیابان‌زایی قابل تفسیر است. این افزایش عمدتاً ناشی از تنش‌های فزاینده بر اکوسیستم است: تبخیر بالا در اقلیم خشک، کاهش پوشش گیاهی (که خود پیامد تنش‌های محیطی و انسانی است)، و بالا آمدن آب‌های زیرزمینی شور. این پدیده‌ها به طور متقابل یکدیگر را تشدید کرده و منجر به تجمع نمک در سطح خاک، افزایش شوری و تشدید بیابان‌زایی می‌شوند. همزمان، کاهش معنی‌دار در شاخص NDVI در همین دوره، تأییدکننده اثرات شوری و سایر تنش‌های محیطی بر بقا و رشد گیاهان است. تمرکز بر این نقاط عطف و تحلیل علی تنش‌های محیطی و پاسخ اکولوژیکی پوشش گیاهی، به درک عمیق‌تری از دینامیک بیابان‌زایی کمک می‌کند و فراتر از توصیف روندها، به چرایی و چگونگی وقوع این فرآیندها می‌پردازد.

در مدل BFAST از پنجره‌های زمانی برای شناسایی تغییرات استفاده می‌کند. انتخاب اندازه این پنجره می‌تواند بر حساسیت و دقت تشخیص تغییرات تأثیر بگذارد. پنجره‌های کوچک‌تر ممکن است به تغییرات زود هنگام حساس‌تر باشند اما نویز بیشتری را نیز ثبت کنند، در حالی که پنجره‌های بزرگ‌تر تغییرات پایدارتر را شناسایی می‌کنند اما ممکن است تغییرات ناگهانی یا زود هنگام را نادیده بگیرند.

ما با آزمایش اندازه‌های مختلف پنجره و انتخاب اندازه‌ای که بهترین تعادل بین حساسیت به تغییرات معنی‌دار و مقاومت در برابر نویز را فراهم می‌کند، این حساسیت را تا حدی مدیریت کردیم. همچنین، استفاده از الگوریتم‌هایی که قادر به شناسایی چندین نقطه تغییر در طول زمان هستند (مانند BFAST Monitor) به کاهش تأثیر انتخاب یک اندازه پنجره ثابت کمک می‌کند. با این حال، اذعان داریم که بهینه‌سازی دقیق اندازه پنجره برای هر منطقه خاص می‌تواند نتایج را بهبود بخشد.



شکل ۲- سری زمانی سه شاخص سنجش از دور، شامل شاخص پوشش گیاهی نرمال شده (الف-ب)، شاخص شوری نرمال شده (پ-ت) و شاخص اندازه دانه‌های خاک سطحی (ث-ج). میانگین متحرک با گام زمانی ۳ در سری زمانی شاخص‌ها.

Fig. 2. Time series of three remote-sensing indices, including the Normalized Difference Vegetation Index (A–B), the Normalized Difference Salinity Index (C–D), and the Topsoil Grain Size Index (E–F). The 3-step moving average for each index is shown by the red line.

نتایج تحلیل سیگنال‌های پیش‌هشدار بیابان‌زایی در شکل ۳ نشان داده شده است. نتایج به دست آمده بیانگر آن است که شاخص آماری خودهمبستگی lag-1 در همه شاخص‌های سنجش از دور روند افزایشی بارز همراه با مقدار کندال تای مثبت و بالا دارد که نشان‌دهنده قدرت بالای این شاخص در نمایش سیگنال‌های زودهنگام تغییرات اکوسیستمی است. در سایر شاخص‌های آماری، چولگی و انحراف معیار اگر چه گاهی روندهای مثبت و مقادیر کندال تای متوسط را نشان می‌دهند، اما میزان تغییرات صعودی و قدرت تفکیک‌کنندگی آنها به وضوح کمتر از خودهمبستگی lag-1 است. شاخص آماری ضریب خودهمبستگی در اکثر پیکسل‌های بررسی شده روند تغییرات را به درستی نشان داد. زیرا این شاخص نه تنها به تغییرات متوسط و میانگین داده‌ها توجه می‌کند، بلکه الگوی زمانی تغییرات را نیز در نظر می‌گیرد (Alibakhshi et al., 2017)، بنابراین نسبت به دیگر شاخص‌های آماری به کار رفته (انحراف معیار و چولگی) عملکرد بهتری داشت.

در میان شاخص‌های سنجش از دوری، NDVI و NDSI روند صعودی مشهودی در شاخص‌های آماری خودهمبستگی lag-1 و انحراف معیار داشته‌اند. بنابراین، این شاخص‌ها به عنوان شاخص سنجش از دوری برتر در تحلیل سیگنال‌های هشداردهنده بیابان‌زایی شناخته شدند. معمولاً مشاهده می‌شود که بالا رفتن ضریب خودهمبستگی با افزایش تغییرپذیری (مانند انحراف معیار) و عدم تقارن (مانند چولگی) همراه است. اما این رابطه همیشه قطعی نیست، همان‌طور که در مقاله داکوس و همکاران (Dakos et al., 2015) بحث شده است، افزایش ضریب خودهمبستگی بدون افزایش تغییرپذیری و عدم تقارن ممکن است نشان‌دهنده بهبود احتمالی اکوسیستم باشد. به این معنا که سیستم علی‌رغم اختلالات گذشته، اکنون در حال تثبیت است. اما، افزایش هم‌زمان در تمام شاخص‌ها می‌تواند نشان‌دهنده کاهش تاب‌آوری و روندی به سمت ناپایداری یا فروپاشی یک اکوسیستم باشد. به طور کلی، عملکرد بهتر شاخص‌های NDVI و NDSI نسبت به دیگر شاخص‌ها می‌تواند به علل مختلفی از جمله حساسیت بیشتر به تغییرات محیطی و دقت و قابلیت تفسیر بالاتر آنها باشد (Carpenter, 2011).

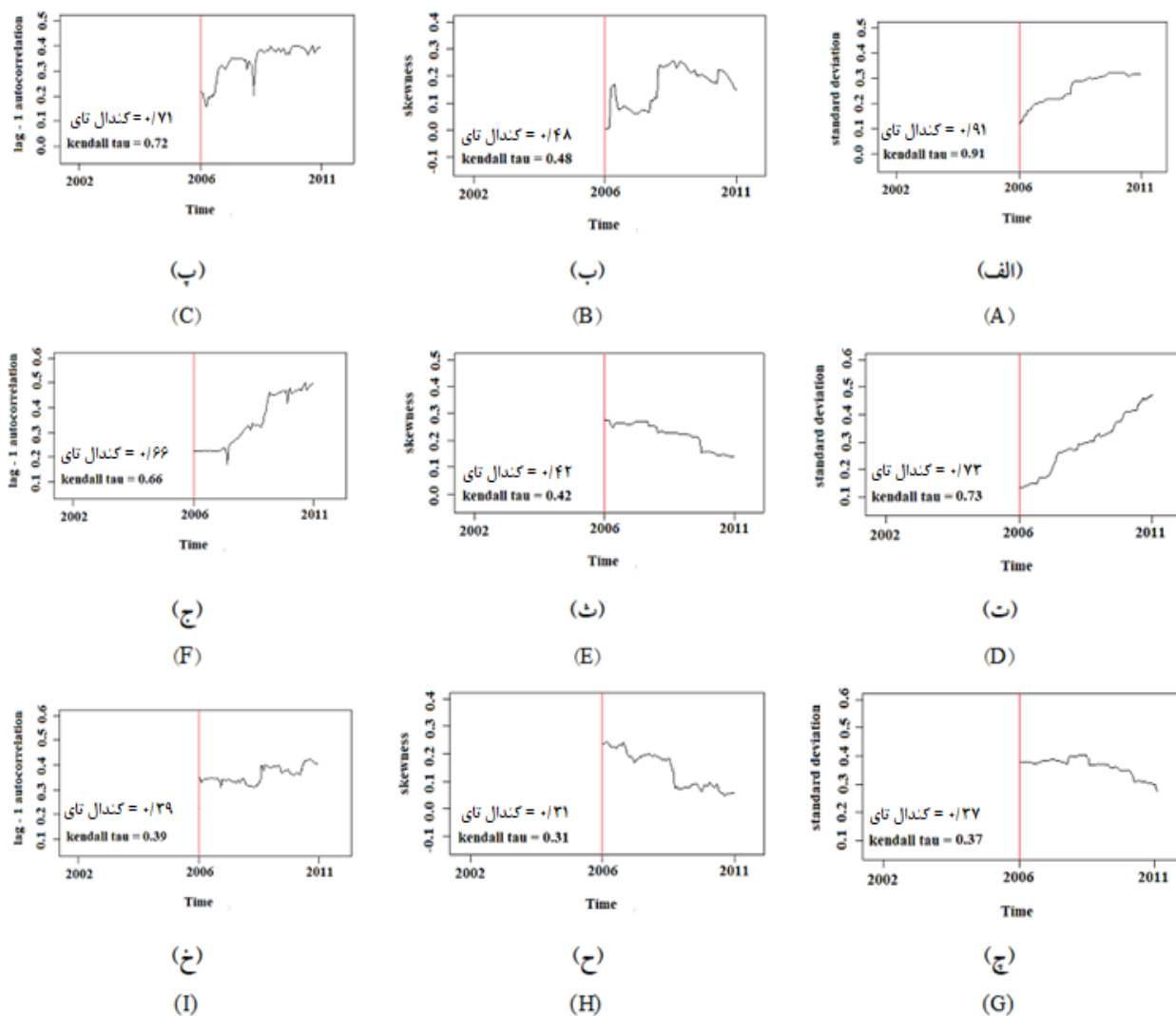
به طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که افزایش هم‌زمان خودهمبستگی، تغییرپذیری و چولگی می‌تواند به عنوان مجموعه‌ای قدرتمند از شاخص‌های هشدار زودهنگام برای کاهش تاب‌آوری اکوسیستم‌ها عمل کند (Boali et al., 2025). چنین الگوهایی معمولاً بیانگر نزدیک شدن سیستم به یک نقطه گذار بحرانی هستند که در آن سرعت بازایی از اختلالات کاهش می‌یابد. هم‌راستا با این یافته‌ها، سیگنال‌های قوی‌تر و منسجم‌تر مشاهده شده در NDVI و NDSI نشان داد که این شاخص‌ها حساسیت بیشتری به تغییرات تدریجی اکولوژیکی دارند. این ویژگی موجب می‌شود که کارایی آنها در شناسایی سیگنال‌های هشداردهنده بیابان‌زایی در مناطق خشک بیشتر باشد (Dakos et al., 2015).

تحلیل مکانی سیستم هشدار اولیه مبتنی بر شاخص‌های سنجش از دوری

با تحلیل روند تغییرات مکانی شاخص‌های سنجش از دور در منطقه مورد مطالعه، نتایج نشان داد که بیشترین تغییرات معنی‌دار در شاخص‌های NDVI، NDSI و TGSI عمدتاً در نواحی غربی و جنوبی منطقه رخ داده است. این بیانگر تغییرات قابل توجه در پوشش گیاهی و سطح شوری خاک در این مناطق است که می‌تواند ناشی از فرآیندهایی مانند بیابان‌زایی شدید باشد. به ترتیب شاخص‌های NDVI، NDSI و TGSI قدرت تغییرات را براساس آزمون آماری کندال تای ۰/۷۱، ۰/۵۸ و ۰/۵۳ نشان دادند (شکل ۴). این اختلاف در مقادیر نشان داد که پوشش گیاهی و شوری خاک نقش برجسته‌ای در بیابان‌زایی منطقه ایفا می‌کنند.

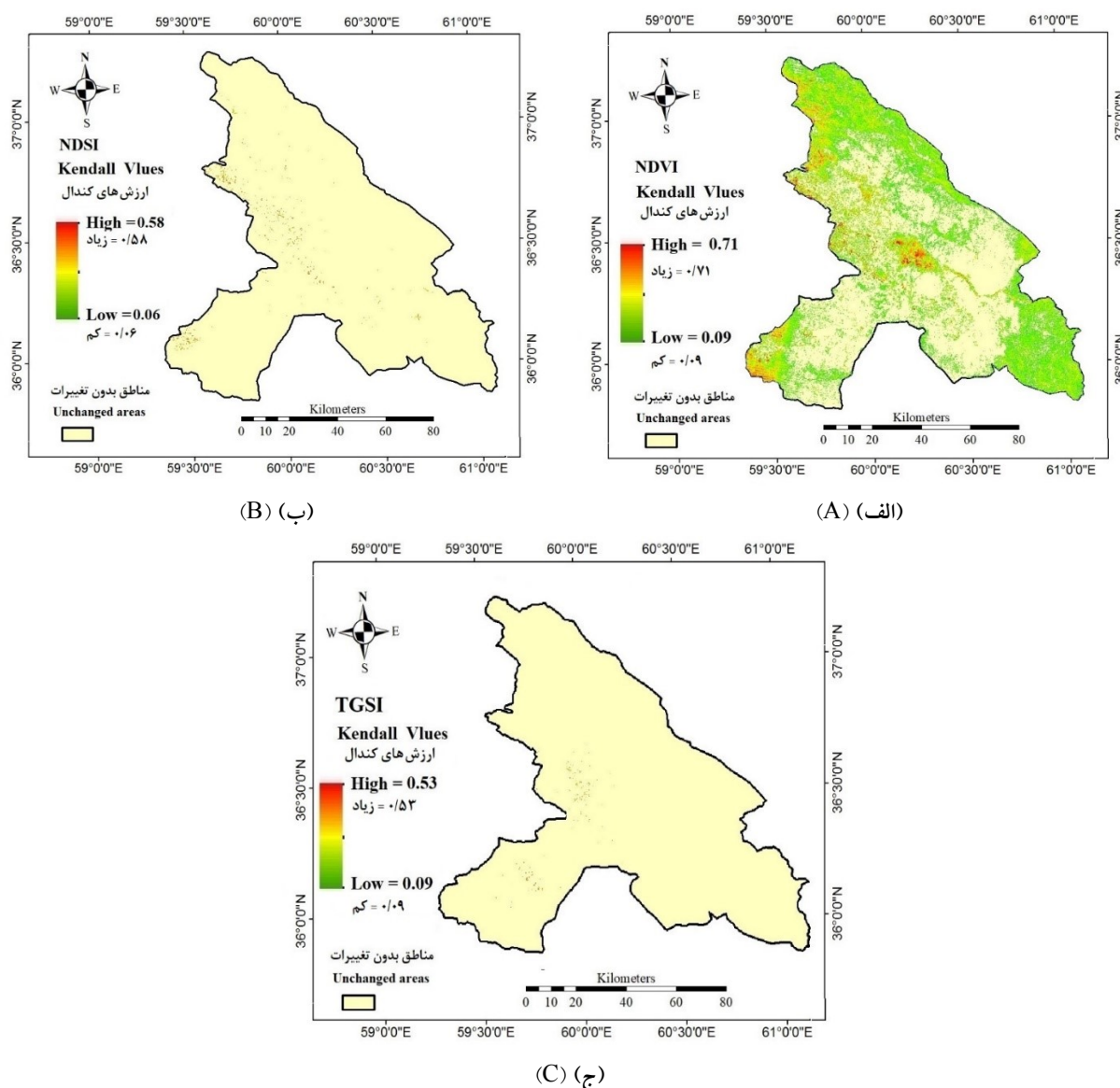
به طور کلی، تمرکز تغییرات در نواحی غربی و جنوبی مشهود با یافته‌های پژوهش‌های پیشین هم‌خوانی دارد؛ جایی که فشارهای انسانی و اقلیمی معمولاً شدت بیشتری داشته و مستعد بروز فرآیندهای بیابان‌زایی هستند (Akbari & Noughani, 2024). افزایش معنی‌دار شاخص‌های NDVI، NDSI و TGSI در این مناطق نشان می‌دهد که پوشش گیاهی و شوری خاک به عنوان مؤلفه‌های کلیدی، بیشترین حساسیت را نسبت به تغییرات اکولوژیکی از خود نشان داده‌اند. این الگوهای مکانی می‌تواند بیانگر کاهش تدریجی تاب‌آوری اکوسیستم و حرکت سیستم به سمت شرایط ناپایدار باشد (Boali et al., 2024b). در مجموع، این هم‌پوشانی مکانی بین

کاهش پوشش گیاهی، افزایش شوری و تغییرات در شاخص خاک در این مناطق، بیانگر تعامل پیچیده بین عوامل مختلف است. بنابراین، شناسایی این مناطق به عنوان کانون‌های اصلی تحول اکولوژیکی، راه را برای هدفمندسازی اقدامات حفاظتی و مدیریتی هموار می‌سازد. این تحلیل فضایی، بینش ارزشمندی در مورد توزیع مکانی ریسک بیابان‌زایی ارائه می‌دهد و بر اهمیت توجه ویژه به این نواحی تأکید می‌کند.



شکل ۳- ضریب خودهمبستگی، چولگی و انحراف معیار برای شاخص‌های محیطی. نمودارهای الف، ب و پ سری زمانی NDVI، نمودارهای ت، ث و ج سری زمانی NDSI و نمودارهای چ، ح و خ سری زمانی TGSi.

Fig. 3. Autocorrelation coefficient, skewness, and standard deviation for the environmental indices. Panels A–C correspond to the NDVI time series, panels D–F to the NDSI time series, and panels G–I to the TGSi time series.



شکل ۴- تغییرات مکانی شاخص‌های سنجش از دور بر اساس تغییرات کندال-تای. الف: NDVI، ب: NDSI، ج: TGSI.
Fig.4. Spatial changes of remote sensing indicators based on Kendall-Tau changes. A: NDVI, B: NDSI, and C: TGSI

مزایا و محدودیت‌های شناسایی سیگنال‌های هشدار اولیه

در زمینه شناسایی سیگنال هشدار اولیه، رویکردهای بررسی زمانی - مکانی داده‌ها دارای مزایا و محدودیت‌های هستند. بررسی زمانی داده‌ها گاهی اوقات می‌تواند هشدارهای کاذب ایجاد کند، به ویژه زمانی که با تجمع گسترده داده‌های زمانی مواجه می‌شویم. از سوی دیگر، بررسی مکانی داده‌ها، اگر چه اطلاعات دقیقی در مورد توزیع مکانی تغییرات فراهم می‌کند، اما به دلیل حساسیت به مراحل پیش پردازش کارایی آن می‌تواند محدود شود (Alibakhshi, 2023). تحقیقات نشان داده است که موفقیت در تشخیص سیگنال‌های هشدار اولیه به شدت به وضوح مکانی تصاویر ماهواره‌ای بستگی دارد (Nijp et al., 2019). اگر چه در تصاویر با دقت مکانی بالاتر، سیگنال‌ها را می‌توان بهتر دریافت کرد که ممکن است فرایند محاسباتی نیز افزایش یابد (Boali et al., 2024b). بنابراین،

داده‌های لندست با وضوح مکانی ۳۰ متر، برای تحلیل روندهای بیابان‌زایی در مقیاس منطقه‌ای می‌تواند مناسب باشد. با این حال، این وضوح ممکن است برای پدیده‌هایی که در مقیاس‌های بسیار کوچک‌تر رخ می‌دهند (مانند تغییرات دقیق در مرزهای پوشش گیاهی در مقیاس میکرو-اقلیمی) محدودیت‌هایی ایجاد کند. این امر می‌تواند منجر به اثر میانگین‌گیری در پیکسل‌هایی شود که شامل چندین نوع کاربری اراضی یا پوشش گیاهی هستند. ما این موضوع را با تمرکز بر تغییرات در مقیاس پدیده‌های بیابان‌زایی که در مقیاس ۳۰ متر قابل ردیابی هستند، مدیریت کرده‌ایم. برای تحلیل‌هایی با جزئیات بسیار بالا، استفاده از داده‌ها با وضوح مکانی بالاتر (مانند Sentinel-2) می‌تواند مفید باشد، که البته نیازمند پردازش حجم عظیمی از داده‌ها و در نظر گرفتن ملاحظات محاسباتی است.

مدل BFAST، علی‌رغم قدرت بالا در شناسایی تغییرات سری زمانی، با محدودیت‌های ذاتی خود روبه‌رو است. این خطاها عمدتاً از عدم تطابق کامل داده‌ها با فرض‌های مدل (مانند خطی بودن روند یا الگوی فصلی مشخص)، تأثیر نویز موجود در داده‌های سنجش از دور که می‌تواند منجر به شناسایی نقاط تغییر کاذب شود، و همچنین پیچیدگی ذاتی پدیده‌هایی مانند بیابان‌زایی ناشی می‌شوند که ممکن است فراتر از مدل‌سازی استاندارد BFAST باشند. برای کاهش این اثرات، در مطالعه حاضر، خروجی مدل BFAST با سایر روش‌های آماری (مانند آزمون کندال تای) و داده‌های مرجع اعتبارسنجی شده و تحلیل کیفی نقاط تغییر، به منظور تمایز میان تغییرات واقعی و نویزهای مدل، انجام گرفته است. با این حال، ادعان داریم که درک کامل محدودیت‌های این مدل، لزوم تحقیقات آتی با رویکردهای ترکیبی یا مدل‌های پیشرفته‌تر را برجسته می‌سازد.

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر با تحلیل هم‌زمان شاخص‌های سنجش از دور NDVI، NDSI و TGSi در کنار تحلیل نقاط شکست سری‌های زمانی و پارامترهای آماری، تصویری جامع از تشدید فرآیندهای بیابان‌زایی در مناطق غربی و جنوبی شهرستان مشهد ارائه می‌دهد. یافته‌های کلیدی حاکی از کاهش پایدار پوشش گیاهی (NDVI)، افزایش شوری (NDSI) و تغییرات اندازه ذرات سطح خاک (TGSi) است که از سال ۲۰۱۳ با وقوع نقاط شکست اکوسیستمی، سرعت گرفته است. این نتایج نه تنها تأییدکننده گزارش‌های پیشین مبنی بر آسیب‌پذیری مناطق خشک و نیمه‌خشک در برابر فشارهای انسانی و تغییرات اقلیمی است، بلکه با ارائه یک چارچوب نظری جدید، بر اهمیت «سیگنال‌های پیش‌هشدار چندوجهی» برای تشخیص زودهنگام ناپایداری اکوسیستمی تأکید می‌ورزد. رویکرد ترکیبی ما نشان می‌دهد که بیابان‌زایی تنها یک فرآیند تدریجی نیست، بلکه می‌تواند با وقوع نقاط شکست ناگهانی تسریع شود. این پدیده‌ها، که در این مطالعه با افزایش NDSI و کاهش NDVI و TGSi هم‌زمان شده‌اند، گویای کاهش ناگهانی تاب‌آوری اکوسیستم در مواجهه با تنش‌های فزاینده (احتمالاً ناشی از ترکیب فعالیت‌های انسانی و تغییرات اقلیمی) هستند. پیام نظری اصلی این پژوهش آن است که پایش اکوسیستم‌های در معرض خطر نیازمند فراتر رفتن از تحلیل روندهای تدریجی است و شناسایی و درک نقاط شکست اکوسیستمی، که توسط ترکیب شاخص‌های مختلف آشکار می‌شوند، برای پیش‌بینی و مدیریت بحران‌های محیطی حیاتی است. این یافته‌ها را می‌توان به سایر مناطق خشک و نیمه‌خشک با الگوهای مشابه کاربری اراضی و شرایط اقلیمی تعمیم داد، جایی که مدیریت پایدار منابع آب و خاک، کنترل فرسایش و حفظ پوشش گیاهی از اولویت بالایی برخوردار است. این پژوهش چارچوبی کارآمد برای پایش مستمر و تشخیص زودهنگام ناپایداری اکوسیستمی در مقیاس منطقه‌ای ارائه می‌دهد. پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی، با ادغام داده‌های میدانی دقیق‌تر و مدل‌های فرآیندی پیشرفته‌تر، به درک عمیق‌تری از سازوکارهای سببی پشت این تغییرات دست یافت. همچنین، بررسی اثرات متقابل عوامل انسانی (مانند تغییرات در کاربری اراضی و مدیریت آب) و عوامل اقلیمی (مانند الگوهای بارش و دما) بر نقاط شکست شناسایی شده، می‌تواند به طراحی راهکارهای مدیریتی مؤثرتر کمک کند. در نهایت، موفقیت در مقابله با روند بیابان‌زایی و تضمین بهره‌وری پایدار منابع طبیعی، نیازمند یک رویکرد جامع، همکاری بین‌بخشی، و توانمندسازی جوامع محلی برای اجرای راهکارهای علمی و مدیریتی است.

سپاسگزاری

پژوهش حاضر حاصل نتایج بخشی از دورهٔ پسادکتری در دانشگاه فردوسی مشهد بوده است. لذا، بدین وسیله از همه کسانی که به نتیجه رسیدن این پژوهش کمک رسانده‌اند، کمال قدردانی و سپاسگزاری خود را اعلام می‌داریم.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

References

- Akbari, M. R., Modarres, R., & Alizadeh Noughani, M. (2019). Assessing early warning for desertification hazard based on E-SMART indicators in arid regions of northeastern Iran. *Journal of Arid Environments*, 174, 104086. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2019.104086>
- Akbari, M., & Noughani, M. A. (2024). Early warning systems for desertification hazard: a review of integrated system models and risk management. *Modeling Earth Systems and Environment*, 10, 4611–4626. <https://doi.org/10.1007/s40808-024-02059-3>
- Akbari, M., Ownegh, M., Asgari, H. R., Sadoddin, A., & Khosravi, H. (2016a). Desertification Risk Assessment and Management Program. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 2(4), 365–80. <https://doi.org/10.22034/gjesm.2016.02.04.006>
- Akbari, M., Ownegh, M., Asgari, H. R., Sadoddin, A., & Khosravi, H. (2016b) Design and Development of Early Warning System for Desertification and Land Degradation. *Environmental Resources Research*, 4(2), 111–130. <https://doi.org/10.22069/ijerr.2017.11207.1152>
- Akbari, M., Sarbazi, M., Sibevei, A., & Fadaie, S. (2024). Desertification Risk Assessment and Providing Management Strategies using the DPSIR-M Model in Khorasan Razavi province. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 13(2), 210–239. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/geoe.2023.83917.1404>
- Alibakhshi, S. (2023). A robust approach and analytical tool for identifying early warning signals of forest mortality. *Ecological Indicators*, Elsevier Ltd, 155, 110983. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110983>
- Alibakhshi, S., Groen, T. A., Rautiainen, M., & Naimi, B. (2017). Remotely-sensed early warning signals of a critical transition in a wetland ecosystem. *Remote Sensing*, 9(4), 352. <https://doi.org/10.3390/rs9040352>
- Boali, A., Asgari, H. R., Behbahani, A. M., Salmanmahiny, A., & Naimi, B. (2024a). Remotely sensed desertification modeling using ensemble of machine learning algorithms. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 34, 101149.
- Boali, A., Bashari, H., & Jafari, R. (2019). Evaluating the Potential of Bayesian Networks for Desertification Assessment in Arid Areas of Iran. *Land Degradation and Development*, 30(4), 371–90. <https://doi.org/10.1002/ldr.3224>
- Boali, A., Hosseinalizadeh, M., Kariminejad, N., Asgari, H. R., Behbahani, A. M., Naimi, B., ... & Rad, M. (2025). Evaluation of early warning signals for soil erosion using remote sensing indices in northeastern Iran. *Scientific Reports*, 15(9742), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-94926-x>
- Boali, A., Kariminejad, N., Hosseinalizadeh, M., Shafaie, V., Movahedi Rad, M., & Pourghasemi, H. R. (2024b). Analysis of early warning signal of land degradation risk based on time series of remote sensing data. *BIO Web of Conferences*, 125, 01011. <https://doi.org/10.1051/bioconf/202412501011>
- Carpenter, S. R. (2011). Early warnings of regime shifts: A whole-ecosystem experiment. *Science*, 332(6033), 1079–1082. <https://doi.org/10.1126/science.1203672>

- Daas, J. H. (2018). *Remotely sensed and field surveyed early-warning signals of desertification in the Ebro basin, Spain*. Department of Physical Geography, Utrecht University.
- Dakos, V., Carpenter, S. R., Nes, E. H. V., & Scheffer, M. (2015). Resilience indicators : prospects and limitations for early warnings of regime shifts. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 370, 1659. <https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0263>
- Davari, S., Rashki, A., Akbari, M., & Talebanfard, A. (2018). Monitoring the spatiotemporal changes of effective desertification indices in arid regions of southern Khorasan Razavi. *Remote Sensing and GIS in Natural Resources*, 9(2), 17-32.
- Dehni, A., & Lounis, M. (2012). Remote sensing techniques for salt affected soil mapping: Application to the Oran region of Algeria. *Procedia Engineering*, 33, 188–198. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.1193>
- Dostorani, M., & Jafari-Shelamzari, M. (2022). Comparison of fuzzy and integrated desertification index (IDI) methods in assessing desertification severity in Torbat-Heydarieh County, Razavi Khorasan Province, with emphasis on vegetation indices. *Arid Biome Scientific Journal*, 21(2), 63–75. <https://doi.org/10.29252/ARIDBIOM.2023.18283.1887>
- Dwyer, J. L., Roy, D. P., Sauer, B., Jenkerson, C. B., Zhang, H. K., & Lymburner, L. (2018). Analysis ready data: Enabling analysis of the landsat archive. *Remote Sensing*, 10(9), 1363. <https://doi.org/10.3390/rs10091363>
- Elnashar, A., Zeng, H., Wu, B., Gebretsadkan Gebremicael, T., & Marie, K. (2022). Assessment of Environmentally Sensitive Areas to Desertification in the Blue Nile Basin Driven by the MEDALUS-GEE Framework. *Science of the Total Environment*, 815, 152925. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.152925>
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Remote Sensing of Environment Google Earth Engine : Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Guo, B., Wenqian, Z., Baomin, H., Fei, Y., Wei, L., Tianli, H., ... & Shuting, C. (2020). Dynamic Monitoring of Desertification in Naiman Banner Based on Feature Space Models with Typical Surface Parameters Derived from LANDSAT Images. *Land Degradation and Development*, 31(12), 1573–92. <https://doi.org/10.1002/ldr.3533>
- Karssenber, D., & Bierkens, M. (2012). Early-warning signals (potentially) reduce uncertainty in forecasted timing of critical shifts. *Geography Physical*, 3, 1–22. <http://dx.doi.org/10.1890/ES11-00293.1>
- Kefi, S., Guttal, V., Brock, W. A., Carpenter, S. R., Ellison, A. M., Livina, V. N., & Dakos, V. (2014). Early Warning Signals of Ecological Transitions: Methods for Spatial Patterns. *PLoS ONE*, 9(3), 10–13. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0092097>
- Khan, N. M., Rastokuev, V., Sato, Y., & Shiozawa, S. (2005). Assessment of hydrosaline land degradation by using a simple approach of remote sensing indicators. *Agricultural Water Management, Elsevier*, 77(1-3), 96-109.
- Lamchin, M., Lee, J. Y., Lee, W. K., Lee, E. J., Kim, M., Lim, C. H., & Kim, S. R. (2015). Assessment of land cover change and desertification using remote sensing technology in a local region of Mongolia. *Advances in Space Research*, 57(1), 64–77. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2015.10.006>
- Liu, Q., Zhao, Y., Zhang, X., Buyantuev, A., Niu, J., & Wang, X. (2018). Spatiotemporal patterns of desertification dynamics and desertification effects on ecosystem services in the Mu Us Desert in China. *Sustainability (Switzerland)*, 10(3), 589. <https://doi.org/10.3390/su10030589>
- Memarian, H., & Akbari, M. (2021). Prediction of Combined Effect of Climate and Land Use Changes on Soil Erosion in Iran Using GloSEM Data. *Iranian Journal of Ecohydrology*, 8(2), 513-534. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/ije.2021.320754.1482>
- Meng, X., Xin, G., Sen, L., Shengyu, L., & Jiaqiang, L. (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>
- Naimi, B., & Araújo, M. B. (2016). Sdm: A reproducible and extensible R platform for species distribution modelling.

- Ecography, 39(4), 368–375. <https://doi.org/10.1111/ecog.01881>
- Nijp, J. J., Temme, A. J., Van Voorn, G. A., Kooistra, L., Hengeveld, G. M., Soons, M. B., & Wallinga, J. (2019). Spatial early warning signals for impending regime shifts: A practical framework for application in real-world landscapes. *Global Change Biology*, 25(6), 1905–1921. <https://doi.org/doi/10.1111/gcb.14591>
- Pravalié, R. (2021). Exploring the multiple land degradation pathways across the planet. *Earth-Science Reviews*, 220, 103689. <http://dx.doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103689>
- Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2), 127–150.
- UNCCD. (1994). United Nations: Convention to Combat Desertification in Those Countries Experiencing Serious Drought and/or Desertification, Particularly in Africa. *International Legal Materials*, 33(5), 1328–82. <https://doi.org/10.1017/s0020782900026711>
- Verbesselt, J., Zeileis, A., & Herold, M. (2012). Near real-time disturbance detection using satellite image time series. *Remote Sensing of Environment*, 123, 98–108. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.02.022>
- Wei, H., Juanle, W., & Baomin, H. (2020). Desertification Information Extraction along the China-Mongolia Railway Supported by Multisource Feature Space and Geographical Zoning Modeling. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13, 392–402. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2019.2962830>
- Xiao, J., Shen, Y., Tateishi, R., & Bayaer, W. (2006). Development of topsoil grain size index for monitoring desertification in arid land using remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 27(12), 2411–2422. <https://doi.org/10.1080/01431160600554363>