

Temporal Analysis of the Effects of Dust Events on Vegetation Health Using Remote Sensing in Khuzestan Province

S. Pourhashemi^{ID 1*}, M. Firouzyazdi¹, M. Boroughani¹

1- Research Center for Geoscience and Social Studies, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran
(*- Corresponding Author Email: s.pourhashemi@hsu.ac.ir)

Received: 20 June 2026	How to cite this article:
Revised: 29 July 2026	Pourhashemi, S., Firouzyazdi, M., & Boroughani, M. (2026). Temporal analysis of the effects of dust events on vegetation health using remote sensing in Khuzestan province. <i>Journal of Soil and Water</i> , 40(3), 325-345. (In Persian).
Accepted: 08 September 2026	https://doi.org/10.22067/jsw.2026.99458.1558
Available Online: 08 September 2026	

Introduction

Dust is one of the most important environmental hazards in arid and semi-arid regions and can affect vegetation health through reducing incoming radiation, depositing particles on leaf surfaces, disrupting photosynthesis, and intensifying environmental stresses. Khuzestan Province is considered one of the major dust-affected regions in Iran due to its geographical location, proximity to domestic and transboundary dust sources, sensitive wetlands, extensive agricultural lands, recurrent droughts, and land-use changes. The reduction of wetland water levels, decline in soil moisture, improper water resource management, and human activities have also increased the vulnerability of this region. Since vegetation plays an important role in soil stabilization and the reduction of wind erosion, investigating the effects of dust events on vegetation conditions is of great importance for environmental and agricultural management. The aim of this study is to analyze the temporal effects of dust events on vegetation health in Khuzestan Province during the period 2001–2023 using remote sensing and atmospheric reanalysis data.

Materials and Methods

In this study, monthly data for the period 2001–2023 were used. To monitor dust intensity, dust aerosol optical depth at 550 nm obtained from the Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2) dataset was employed. In addition, total AOD and the ratio of dust AOD to total AOD were calculated to examine the contribution of dust to the total aerosol burden over the region. Vegetation health was evaluated using two indices, Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and EVI, derived from the Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) MOD13A2 product, version 6.1. NDVI was used as an indicator of vegetation greenness and density, while EVI was applied because of its lower sensitivity to atmospheric effects and vegetation saturation.

The 16-day NDVI and EVI data were converted to a monthly scale and synchronized with the AOD data. Then, monthly anomalies of AOD, NDVI, and Enhanced Vegetation Index (EVI) were calculated to remove the effect of the seasonal cycle. Severe dust events were identified using percentile-based statistical thresholds; the 75th percentile was calculated as 0.296, and the 90th percentile as 0.360. Months with AOD values equal to or greater than the 90th percentile were selected as severe dust events. Subsequently, the relationship between dust and vegetation indices was examined using Pearson correlation, linear regression, seasonal analysis, month-by-month analysis, lag-correlation analysis, and event-based analysis.

Results and Discussion

The results showed that dust AOD in Khuzestan Province experienced considerable temporal fluctuations during the study period. In total, 70 months were above the 75th percentile and 29 months were above the 90th percentile, indicating the occurrence of relatively severe and severe dust events. The relative synchronization between variations in dust AOD and total AOD showed that dust constitutes an important part of the aerosol burden



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

<https://doi.org/10.22067/jsw.2026.99458.1558>

over the region.

The analysis of NDVI and EVI anomalies indicated that vegetation health changed noticeably during the study period, and both indices showed similar behavior in many periods. In the first step, the relationship between raw AOD and vegetation index anomalies was negative but weak; the correlation coefficient between raw AOD and NDVI anomaly was -0.144, while that between raw AOD and EVI anomaly was -0.132. This weak relationship is probably due to strong seasonal cycles and the simultaneous influence of climatic and agricultural factors.

After removing seasonal effects, the strength of the relationship increased. The correlation coefficients between AOD anomaly and NDVI and EVI anomalies were -0.307 and -0.281, respectively, and both relationships were statistically significant. This result indicates that abnormal increases in dust are generally associated with a relative decline in vegetation health. Seasonal analysis also showed that this relationship was stronger in spring; the correlations between AOD anomaly and NDVI and EVI during this season were -0.388 and -0.346, respectively. This may be related to active plant growth and the greater sensitivity of agricultural crops during this period.

Lag analysis showed that the effect of dust was not limited to the month of occurrence and continued for several months afterward. The strongest negative correlation was observed in the same month as the dust event; however, negative relationships remained at one-month, two-month, and three-month lags. In addition, event-based analysis showed that after severe dust events, the mean anomalies of NDVI and EVI decreased further in the following months. This may indicate the cumulative effect of dust, reduced photosynthetic capacity, decreased surface moisture, or the coincidence of dust events with climatic stresses.

Conclusion

The results of this study showed that there is a negative, significant, and complex relationship between dust events and vegetation health in Khuzestan Province. The use of AOD anomalies provided a more accurate representation of the effect of dust on vegetation compared with raw AOD values. The findings indicate that abnormal increases in dust, particularly in spring and in some sensitive months, are associated with relative decreases in NDVI and EVI. However, vegetation health is not affected by dust alone, and factors such as precipitation, temperature, soil moisture, irrigation, crop type, planting time, and agricultural management also play important roles. Therefore, for a more accurate interpretation of this relationship, the integration of remote sensing data with climatic, hydrological, and field data is recommended.

Keywords: Aerosol optical depth (AOD), Dust, Vegetation health

تحلیل زمانی تأثیر رویدادهای گرد و غبار بر سلامت پوشش گیاهی با استفاده از سنجش از دور در استان خوزستان

سیما پورهاشمی ^{id}*^۱ - مینا فیروزیزدی^۱ - مهدی بروغنی^۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۰۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۱۷

چکیده

گردوغبار یکی از مهم‌ترین مخاطرات محیطی در مناطق خشک و نیمه‌خشک است که می‌تواند از طریق کاهش تابش ورودی، رسوب ذرات بر سطح برگ‌ها، اختلال در فرآیند فتوسنتز و تشدید تنش‌های محیطی، سلامت پوشش گیاهی را تحت تأثیر قرار دهد. در این پژوهش، اثر رخدادهای گرد و غبار بر سلامت پوشش گیاهی استان خوزستان طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۳ با استفاده از داده‌های سنجش از دور بررسی شد. برای پایش شدت گردوغبار از عمق نوری آئروسول (Aerosol Optical Depth; AOD) و برای ارزیابی وضعیت پوشش گیاهی از شاخص نرمال‌شده تفاضلی پوشش گیاهی (Enhanced Vegetation Index; EVI) و شاخص بهبودیافته پوشش گیاهی (Normalized Difference Vegetation Index; NDVI) استفاده شد. پس از همگام‌سازی داده‌های ماهانه، ناهنجاری‌های NDVI، EVI و AOD محاسبه شد و رخدادهای شدید گرد و غبار بر اساس صدک‌های ۷۵ و ۹۰ شناسایی شدند. نتایج نشان داد که رابطه بین AOD خام و ناهنجاری‌های NDVI و EVI منفی اما ضعیف بود، در حالی که پس از حذف اثرات فصلی، شدت این رابطه افزایش یافت. به‌طوری‌که ضریب همبستگی ناهنجاری AOD با ناهنجاری NDVI و EVI به‌ترتیب برابر ۰,۳۰۷- و ۰,۲۸۱- به‌دست آمد. تحلیل فصلی نیز نشان داد که این رابطه در فصل بهار قوی‌تر است. همچنین نتایج تحلیل تأخیری و رخدادمحور بیانگر آن بود که پس از رخدادهای شدید گرد و غبار، افت شاخص‌های پوشش گیاهی می‌تواند در ماه‌های بعد نیز ادامه یابد. به‌طور کلی، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که افزایش غیرعادی گرد و غبار با کاهش نسبی سلامت پوشش گیاهی در خوزستان همراه است، اما تفسیر این رابطه باید با توجه به نقش سایر عوامل اقلیمی و زراعی مانند بارش، دما، رطوبت خاک، آبیاری و نوع کشت انجام شود.

واژه‌های کلیدی: خوزستان، شاخص‌های پوشش گیاهی، سنجش‌ازدور، عمق نوری آئروسول، MERRA-2

مقدمه

آئروسول‌ها ذرات جامد یا مایع معلق در جو هستند که از منابع طبیعی (مانند گرد و غبار، آتش‌سوزی‌ها و فوران‌های آتشفشانی) و انسانی (مانند احتراق سوخت‌های فسیلی و فعالیت‌های صنعتی) منشأ می‌گیرند (Ban-Weiss & Collins., 2015; Nabat et al., 2014; Tariq et al., 2021). این ذرات با تأثیر بر انتقال تابش، تشکیل ابر و بارش، کیفیت هوا و توازن انرژی زمین، نقش مهمی در سامانه اقلیم دارند

(Haywood & Boucher, 2000; Tao et al., 2012; Wilson &)

(Suh, 1997). به‌دلیل تغییرپذیری مکانی و زمانی بالا، پایش آئروسول‌ها نیازمند داده‌های سنجش‌ازدور است (Tariq et al., 2022). یکی از شاخص‌های کلیدی در این زمینه، عمق نوری آئروسول (AOD^۲) است که به ارزیابی مقدار ذرات معلق در ستون جو می‌پردازد و همچنین میزان تضعیف تابش خورشیدی توسط ذرات را نشان می‌دهد؛ افزایش آن بیانگر کدورت جو و بار آئرسولی بیشتر است (Kaufman et al., 1997; Gupta et al., 2013; Alam et al., 2010; Tariq et al., 2022).

^۱ - مرکز پژوهشی مطالعات جغرافیایی و علوم اجتماعی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران
(*) - نویسنده مسئول: (Email: s.pourhashemi@hsu.ac.ir)

گرد و غبار تبدیل شده‌اند یوسفی کبریا و همکاران (Yousefi Kebria et al., 2021) کاهش و سعت این تالاب را با افزایش انتشار گرد و غبار مرتبط دانستند. درگهیان و همکاران (Dargahian et al., 2023) نیز با استفاده از سنجش‌ازدوری و مدل HYSPLIT، منابع گرد و غبار اثرگذار بر جنوب‌غرب ایران را شناسایی کردند.

در ایران نیز مطالعات متعددی ارتباط بین تغییرات پوشش گیاهی، شرایط سطح زمین و رخدادهای گردوغبار را بررسی کرده‌اند. بهرامی و همکاران (Behrami et al., 2013) با مدل‌سازی مکانی-زمانی وقوع طوفان‌های گردوغبار در استان خوزستان، نقش عوامل اقلیمی و پوشش گیاهی را در شکل‌گیری این پدیده بررسی کردند. آن‌ها با استفاده از داده‌های اقلیمی و شاخص NDVI استخراج‌شده از تصاویر MODIS نشان دادند که تغییرات پوشش گیاهی، به‌ویژه تخریب آن، می‌تواند فراوانی طوفان‌های گردوغبار با منشأ داخلی را تحت تأثیر قرار دهد. همچنین مناطق دارای خاک‌های شور و قلیا به‌دلیل استعداد بالاتر در رهاسازی ذرات، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین کانون‌های تولید گردوغبار در جنوب استان خوزستان شناسایی شدند. بیات و همکاران (Bayat et al., 2016) با استفاده از شاخص پوشش گیاهی NDVI حاصل از تصاویر MODIS، تغییرات زمانی و مکانی پوشش گیاهی تالاب شادگان در استان خوزستان را ارزیابی کرده و نشان دادند که افزایش رخدادهای گردوغبار و تغییرات شرایط محیطی می‌تواند با کاهش وضعیت پوشش گیاهی این منطقه همراه باشد. جعفری (Jafari, 2020) نیز نقش تغییرات هیدرولوژیکی و کاهش منابع آب سطحی را در تغییر شرایط محیطی دشت خوزستان و افزایش زمینه‌های مساعد برای وقوع گردوغبار بررسی کرد. این مطالعات نشان می‌دهند که در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران، تغییرات پوشش گیاهی و شرایط رطوبتی سطح زمین، علاوه بر تأثیر مستقیم بر سلامت اکوسیستم‌ها، می‌توانند بر استعداد مناطق برای تولید و انتشار گردوغبار اثرگذار باشند. علاوه بر اثر مستقیم گردوغبار، تغییرات شرایط هیدرولوژیکی و تنش‌های رطوبتی نیز از عوامل مهم کنترل‌کننده وضعیت پوشش گیاهی در این مناطق هستند. فیض‌اله‌پور (Feizollahpour, 2025) با استفاده از شاخص‌های طیفی سنجش‌ازدوری، تغییرات تنش رطوبتی و خشکسالی در محدوده تالاب شادگان را بررسی کرد و نشان داد که شاخص‌های مبتنی بر رطوبت و دما می‌توانند تغییرات شرایط محیطی این منطقه را آشکار کنند.

با وجود مطالعات انجام‌شده، بررسی همزمان تغییرات زمانی گرد و غبار و پاسخ سلامت پوشش گیاهی با استفاده از شاخص‌های NDVI^۱، EVI^۲ (از مهم‌ترین شاخص‌های سنجش‌ازدوری برای ارزیابی سبزی‌نگی، تراکم و سلامت پوشش گیاهی) و AOD نیازمند توجه بیشتر است. آئروسل‌ها می‌توانند از طریق تغییر در تابش ورودی و فرآیندهای

همچنین ضریب انگستروم برای تشخیص اندازه ذرات به کار می‌رود که مقادیر پایین‌تر نشان‌دهنده غلبه ذرات درشت‌تر مانند گرد و غبار معدنی است (Bibi et al., 2017; Tariq & ul-Haq, 2020; Tiwari et al., 2016). طوفان‌های گرد و غبار از مهم‌ترین رخدادهای آئرسلی در مناطق خشک و نیمه‌خشک هستند که بر اثر جابه‌جایی ذرات خاک از اراضی بایر، تالاب‌های خشک و فعالیت‌های عمرانی ایجاد می‌شوند (Boroughani et al., 2025). این رخدادهای پیامدهای گسترده‌ای بر سلامت انسان، اکوسیستم‌ها، کشاورزی و حمل‌ونقل دارند (Filonchyk & Hurynovich, 2020; Omar et al., 2022; Boroughani et al., 2021, 2022; Middleton & Kang, 2017). در خاورمیانه، تشدید گرد و غبار تحت تأثیر شرایط اقلیمی خشک، کاهش بارش، خشکسالی، مدیریت نامناسب آب و تغییر کاربری اراضی است (Rezazadeh et al., 2013; Boroughani et al., 2025).

پوشش گیاهی با تثبیت خاک و کاهش سرعت باد، نقش بازدارنده در تولید گرد و غبار دارد؛ بنابراین تخریب آن ظرفیت تولید گرد و غبار را افزایش می‌دهد (Engelstaedter et al., 2003; pourhashemi et al., 2025; Fan et al., 2014). پژوهش‌های متعددی رابطه میان گرد و غبار و عوامل محیطی را بررسی کرده‌اند. ژو و ژای (Zou & Zhai, 2004) کاهش پوشش گیاهی را در افزایش طوفان‌های گرد و غبار مؤثر دانستند. تان (Tan, 2016) اثر پوشش گیاهی را در مناطق خشک تا نیمه‌مرطوب متفاوت ارزیابی کرد. پارولاری و همکاران (Parolari et al., 2016) نشان دادند که خشکی غیرمعمول و الگوهای سینوپتیکی خاص تولید گرد و غبار را در خاورمیانه تشدید می‌کنند. لی و همکاران (Li et al., 2020) رابطه مثبت سرعت باد و رابطه منفی پوشش گیاهی با غلظت گرد و غبار را تأیید کردند. همچنین محققین دیگر (Wu et al., 2022; Kim et al., 2017; Bao et al., 2021) اهمیت رطوبت خاک، بارش و باد را در کنترل گرد و غبار مورد تأکید قرار دادند. استان خوزستان در جنوب‌غرب ایران به‌دلیل همجواری با دشت‌های خشک، وجود تالاب‌های وسیع و فعالیت‌های کشاورزی و صنعتی، منطقه‌ای حساس نسبت به گرد و غبار است (Daniali & Karimi, 2019; Dargahian et al., 2023; Pourhashemi et al., 2023; Masoumi & Moradhaseli, 2023). کاهش سطح آب تالاب‌ها، خشکسالی، طرح‌های انتقال آب و احداث سدها موجب تشدید تخریب محیطی و افزایش پتانسیل تولید گرد و غبار در این منطقه شده است (Adib, 2022; Beyranvand et al., 2023). تالاب‌های شادگان و هورالعظیم که نقش مهمی در تثبیت رسوبات و کاهش گرد و غبار دارند، تحت تأثیر خشکسالی و آلودگی دچار تخریب اکولوژیک شده‌اند (Adib, 2022; Yousefi Kebria et al., 2025; Khanfari et al., 2024). نشان دادند که بخش‌های خشک شده تالاب شادگان به منابع فعال

از نظر اقلیمی، استان خوزستان دارای اقلیم گرم و خشک تا نیمه‌خشک است. شرایط اقلیمی این استان تحت تأثیر موقعیت جغرافیایی، مجاورت با مناطق خشک و بیابانی، و تغییرات فصلی سامانه‌های جوی قرار دارد. میانگین بلندمدت پارامترهای اقلیمی استان شامل دما، بارش، سرعت باد و رطوبت نسبی در **جدول ۱** ارائه شده است.

داده‌های مورد استفاده

در این پژوهش برای بررسی رابطه میان رخداد‌های گرد و غبار و سلامت پوشش گیاهی استان خوزستان، از داده‌های سنجش‌ازدوری و بازتحلیل جوی در مقیاس ماهانه و بازه زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۳ (شامل ۲۷۶ مشاهده) استفاده شد. پس از استخراج، داده‌ها از نظر بازه زمانی، مقیاس و مقادیر غیرعادی بررسی و همگام‌سازی گردیدند. برای پایش گرد و غبار، از مجموعه داده‌های **MERRA-2 Aerosol Reanalysis (Randles et al., 2017; Buchard et al., 2017)** بهره گرفته شد. شاخص اصلی شدت گرد و غبار، عمق نوری آئروسول در طول موج ۵۵۰ نانومتر (AOD 550 nm) بود که میزان تضعیف تابش خورشیدی توسط ذرات را نشان می‌دهد. همچنین AOD Total 550 nm برای برآورد بار کلی آئروسول‌ها و نسبت AOD به AOD Total برای تعیین سهم گرد و غبار از کل بار آئرسولی منطقه مورد استفاده قرار گرفت. ارزیابی سلامت پوشش گیاهی با استفاده از شاخص‌های NDVI و EVI از محصول MODIS MOD13A2 نسخه ۶٫۱ انجام شد. این محصول با تفکیک مکانی یک کیلومتر و زمانی ۱۶ روزه، وضعیت سبزیگی و تراکم گیاهی را پوشش می‌دهد. NDVI به‌عنوان شاخص اصلی سبزیگی و EVI به‌دلیل حساسیت کمتر به اشیاء پوشش گیاهی و اثرات جوی، به‌عنوان شاخص مکمل مورد استفاده قرار گرفتند. داده‌های NDVI و EVI برای همگونی با داده‌های AOD، به مقیاس ماهانه تبدیل شدند. پس از تهیه سری‌های زمانی ماهانه برای متغیرهای AOD 550 nm، AOD Total 550 nm، نسبت AOD به AOD Total، NDVI و EVI، ناهنجاری‌های ماهانه این شاخص‌ها محاسبه گردید. هدف از این کار، حذف اثر چرخه فصلی و تمرکز بر تغییرات غیرعادی گرد و غبار و پوشش گیاهی بود. این رویکرد امکان بررسی دقیق‌تر ارتباط بین افزایش غیرعادی گرد و غبار و افت غیرعادی سلامت پوشش گیاهی در استان خوزستان را فراهم آورد.

عمق نوری آئروسول (Aerosol Optical Depth; AOD) یکی از مهم‌ترین شاخص‌های سنجش‌ازدوری برای ارزیابی مقدار ذرات معلق آئروسول در ستون جو است. این شاخص بیانگر میزان تضعیف تابش خورشیدی عبوری از جو در اثر جذب و پراکندگی توسط ذرات آئروسول است؛ بنابراین افزایش مقدار AOD نشان‌دهنده افزایش بار آئروسولی و کاهش شفافیت جو است. از آنجاکه رخداد‌های گردوغبار موجب افزایش

فتوسنتزی بر رشد گیاهی اثر بگذارند (Chakraborty et al., 2021). بنابراین، تحلیل ارتباط بین AOD گرد و غبار و شاخص‌های سلامت پوشش گیاهی برای درک سازوکارهای اثرگذاری رخداد‌های گرد و غبار بر اکوسیستم‌های کشاورزی ضروری است. پژوهش حاضر با هدف تحلیل زمانی تأثیر رخداد‌های گرد و غبار بر سلامت پوشش گیاهی استان خوزستان انجام شده است. در این مطالعه، از داده‌های سنجش‌ازدوری و بازتحلیل جوی برای استخراج سری زمانی Dust AOD در طول موج ۵۵۰ نانومتر و شاخص‌های NDVI و EVI طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۳ استفاده شد. با محاسبه ناهنجاری‌های پوشش گیاهی، تعیین آستانه‌های رخداد گرد و غبار و بررسی پاسخ تأخیری شاخص‌های گیاهی، رابطه بین شدت گرد و غبار و تغییرات سلامت پوشش گیاهی در استان خوزستان ارزیابی شد. نتایج این پژوهش می‌تواند به درک بهتر اثرات گرد و غبار بر اکوسیستم‌های کشاورزی و مدیریت پایدار منابع آب، تالاب‌ها و اراضی زراعی در مناطق خشک و نیمه‌خشک کمک کند.

مواد و روش‌ها

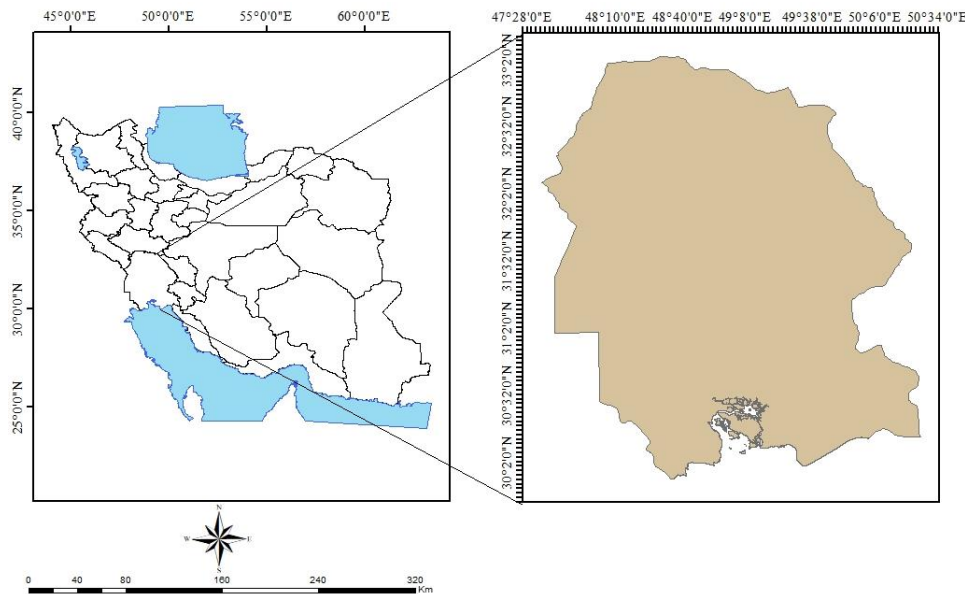
منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، استان خوزستان، در جنوب‌غرب ایران، است. این استان به‌دلیل موقعیت جغرافیایی (عرض جغرافیایی ۲۹٫۵ تا ۳۲٫۵ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۴۷٫۵ تا ۵۰٫۵ درجه شرقی)، همجواری با عراق و خلیج فارس، اقلیم گرم و خشک تا نیمه‌خشک، و قرارگیری در مسیر انتقال توده‌های گرد و غبار داخلی و فرامرزی، یکی از مناطق حساس ایران نسبت به رخداد‌های گرد و غبار محسوب می‌شود (Daniali & Karimi, 2019; Dargahian et al., 2023; Masoumi & Moradhaseli, 2023). خوزستان از نظر کشاورزی و منابع آبی اهمیت زیادی دارد و بخش قابل‌توجهی از اراضی آن تحت کشت محصولات زراعی قرار دارد. تغییرات منابع آب، خشکسالی‌های متوالی، کاهش رطوبت خاک و افت پوشش گیاهی می‌توانند پایداری اراضی کشاورزی را کاهش داده و زمینه افزایش فرسایش بادی و تولید گرد و غبار را فراهم کنند (Mohammadi et al., 2024; Beyranvand et al., 2023). همچنین تالاب‌های شادگان و هورالعظیم از مهم‌ترین اکوسیستم‌های آبی استان هستند که نقش مهمی در تثبیت رسوبات، تعدیل شرایط اقلیمی و کاهش گرد و غبار دارند. با این حال، کاهش ورودی آب، خشکسالی، احداث سدها، فعالیت‌های نفتی و تغییر کاربری اراضی موجب خشک‌شدن بخش‌هایی از این تالاب‌ها و افزایش پتانسیل تولید گرد و غبار شده است (Adib, 2022; Khanfari et al., 2024; Yousefi Kebria et al., 2025). بنابراین، خوزستان به‌عنوان یک منطقه مناسب برای بررسی اثر رخداد‌های گرد و غبار بر سلامت پوشش گیاهی انتخاب شد.

پس از تهیه داده‌های AOD، NDVI و EVI، ابتدا سازگاری زمانی و مکانی آن‌ها برای دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۳ بررسی و داده‌های ۱۶ روزه NDVI و EVI به مقیاس ماهانه تبدیل شدند تا با داده‌های AOD قابل مقایسه باشند. با توجه به تفاوت تفکیک مکانی داده‌های مورد استفاده، فرآیند یکسان‌سازی مکانی پیش از تحلیل انجام شد. داده‌های AOD حاصل از پایگاه MERRA-2 دارای ساختار شبکه‌ای با تفکیک مکانی درشت‌تر بوده و پس از استخراج محدوده استان خوزستان، سلول‌های شبکه‌ای واقع در محدوده مطالعه انتخاب و میانگین ماهانه آن‌ها به عنوان مقدار نماینده AOD استان محاسبه شد.

غلظت ذرات معدنی معلق در جو می‌شوند، تغییرات AOD می‌تواند به عنوان نمایه‌ای مناسب برای شناسایی شدت و پراکنش زمانی-مکانی طوفان‌های گردوغبار مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به غالب بودن ذرات درشت معدنی در رخدادهای گردوغبار مناطق خشک و نیمه‌خشک، افزایش AOD در این مناطق معمولاً با افزایش غلظت ذرات گردوغبار و کاهش کیفیت هوا همراه است.

پیش‌پردازش و روش تحلیل داده‌ها



شکل ۱- موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران و محدوده استان خوزستان
Figure 1- Location of the study area in Iran and the Khuzestan province

جدول ۱- میانگین بلندمدت پارامترهای اقلیمی استان خوزستان

Table 1- Long-term average of climatic parameters for Khuzestan Province

میانگین سالانه	پارامتر اقلیمی
Average	Parameter
25	دمای متوسط هوا (°C) Average air temperature
220	بارش سالانه (mm) Annual precipitation
3	سرعت متوسط باد (m/s) Average wind speed
45	رطوبت نسبی (%) Relative humidity

منبع: داده‌های اقلیمی بلندمدت ایستگاه‌های هواشناسی استان خوزستان (اداره کل هواشناسی استان خوزستان).

جدول ۲- مشخصات داده‌های مورد استفاده در پژوهش
Table 2- Specifications of the data used in the study

داده / Data	منبع / Source	متغیر مورد استفاده / Variable used	تفکیک مکانی / Spatial resolution	تفکیک زمانی / Temporal resolution	دوره زمانی / Time period	لینک دسترسی / Access link
عمق نوری آئروسول Optical Aerosol (AOD) Depth	MERRA-2 (NASA)	عمق نوری آئروسول Aerosol Optical Depth	$0.5^\circ \times 0.625^\circ$	ماهانه Monthly	۲۰۰۱-۲۰۲۳ 2001-2023	https://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/
شاخص نرمال شده پوشش گیاهی Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)	MODIS MOD13A2 V6.1	شاخص نرمال شده پوشش گیاهی NDVI	۱ کیلومتر 1 km	۱۶ روزه (تبدیل به ماهانه) 16 day-converted (monthly to 16 روز (تبدیل به ماهانه)	۲۰۰۱-۲۰۲۳ 2001-2023	https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13a2v061/
شاخص بهبودیافته پوشش گیاهی Enhanced Vegetation Index (EVI)	MODIS MOD13A2 V6.1	شاخص بهبودیافته پوشش گیاهی EVI	۱ کیلومتر 1 km	۱۶ روزه (تبدیل به ماهانه) 16 day-converted (monthly to 16 روز (تبدیل به ماهانه)	۲۰۰۱-۲۰۲۳ 2001-2023	https://lpdaac.usgs.gov/products/mod13a2v061/

ناهنجاری AOD و ناهنجاری‌های گیاهی برای سنجش رابطه پس از حذف اثرات فصلی بررسی گردید و سطح معناداری آن گزارش شد. رگرسیون خطی برای تعیین جهت و شدت رابطه و ترسیم نمودارهای پراکنش به کار رفت. با توجه به تفاوت حساسیت گیاهان در فصل‌های مختلف، تحلیل فصلی و ماه به ماه نیز انجام شد. همبستگی ناهنجاری AOD با شاخص‌های گیاهی برای کل سال، فصل بهار، دوره آوریل تا سپتامبر و مه تا سپتامبر محاسبه گردید تا تفاوت حساسیت در دوره‌های مختلف مشخص شود. تحلیل ماه به ماه به عنوان تحلیل تکمیلی و به دلیل محدودیت نمونه در هر ماه، برای شناسایی ماه‌های با رابطه قوی‌تر انجام شد. از آنجا که اثر گرد و غبار ممکن است تأخیری باشد، تحلیل همبستگی تأخیری برای فواصل صفر تا سه ماه پس از رخداد انجام شد تا ماندگاری اثر و زمان پاسخ گیاهان ارزیابی گردد. در نهایت، تحلیل رخدادمحور شامل محاسبه میانگین ناهنجاری NDVI و EVI در ماه وقوع رخداد و سه ماه پس از آن برای ماه‌های با AOD بالاتر از صدک ۹۰ انجام شد تا مشخص شود آیا کاهش پوشش گیاهی پس از طوفان‌های شدید ادامه دارد یا خیر. این چارچوب چندمرحله‌ای شامل همگام‌سازی داده‌ها، محاسبه ناهنجاری‌ها، تعیین آستانه‌ها، تحلیل‌های همبستگی (خام و مبتنی بر ناهنجاری)، رگرسیون، تحلیل فصلی، ماهانه و تأخیری، امکان بررسی دقیق‌تر رابطه پیچیده میان گرد و غبار و سلامت پوشش گیاهی استان خوزستان را فراهم آورد.

در مقابل، داده‌های NDVI و EVI حاصل از MODIS دارای تفکیک مکانی ۱ کیلومتر بوده و پس از برش محدوده استان، میانگین مقادیر پیکسل‌های واقع در محدوده مطالعه برای هر ماه استخراج گردید. بنابراین، اگرچه تفکیک مکانی اولیه داده‌های جوی و پوشش گیاهی یکسان نبود، تمامی متغیرها پس از میانگین‌گیری مکانی به سری‌های زمانی ماهانه در مقیاس استان تبدیل شدند و سپس روابط بین تغییرات AOD و شاخص‌های پوشش گیاهی بررسی شد. پس از یکسان‌سازی زمانی و مکانی، میانگین مقادیر هر متغیر در محدوده استان خوزستان برای ایجاد سری‌های زمانی ماهانه استخراج گردید. برای حذف اثر چرخه فصلی و تمرکز بر تغییرات غیرعادی، ناهنجاری ماهانه شاخص‌های NDVI، EVI و AOD محاسبه شد. ناهنجاری از اختلاف مقدار هر ماه با میانگین بلندمدت همان ماه به دست آمد؛ مقادیر منفی نشان‌دهنده افت پوشش گیاهی و مقادیر مثبت نشان‌دهنده بهبود آن است. همچنین ناهنجاری AOD برای نشان دادن انحراف شدت گرد و غبار از وضعیت معمول ماهانه محاسبه شد. برای شناسایی رخدادهای شدید گرد و غبار، از آستانه‌های آماری مبتنی بر صدک‌های AOD استفاده شد. صدک ۷۵ و ۹۰ به ترتیب آستانه رخدادهای نسبتاً شدید و شدید در نظر گرفته شدند و ماه‌های دارای AOD بالاتر از صدک ۹۰ به عنوان ماه‌های رخداد شدید انتخاب گردیدند. سپس پاسخ شاخص‌های گیاهی در ماه وقوع و ماه‌های پس از آن بررسی شد. تحلیل‌های آماری در چند سطح انجام گرفت. ابتدا همبستگی پیرسون بین مقادیر خام AOD و ناهنجاری‌های NDVI و EVI برای ارزیابی رابطه اولیه محاسبه شد. سپس همبستگی بین

شاخص‌ها و معادلات مورد استفاده

در این پژوهش برای ارزیابی وضعیت پوشش گیاهی از دو شاخص NDVI و EVI استفاده شد. شاخص NDVI یکی از رایج‌ترین شاخص‌های سنجش‌ازدوری برای بررسی سبزیگی، تراکم و سلامت عمومی پوشش گیاهی است و بر اساس اختلاف بازتاب طیفی در باند مادون قرمز نزدیک و قرمز محاسبه می‌شود. این شاخص به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود (Rouse et al., 1974):

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (1)$$

که در آن NIR بازتاب باند مادون قرمز نزدیک و Red بازتاب باند قرمز است. مقادیر بالاتر NDVI معمولاً نشان‌دهنده پوشش گیاهی سالم‌تر و متراکم‌تر است، در حالی که مقادیر پایین‌تر بیانگر کاهش سبزیگی، تنش گیاهی یا اراضی فاقد پوشش گیاهی است (Xue & Su, 2017; Zhang et al., 2017).

شاخص EVI نیز به منظور کاهش اثرات پس‌زمینه خاک و برخی اثرات جوی و همچنین بهبود حساسیت نسبت به تغییرات پوشش گیاهی استفاده شد. این شاخص نسبت به NDVI در برخی شرایط، به‌ویژه در مناطق دارای پوشش گیاهی متراکم یا شرایط جوی متغیر، عملکرد پایدارتری دارد. شاخص پوشش گیاهی بهبودیافته (EVI) علاوه بر NDVI در این پژوهش استفاده شد، زیرا در مناطق خشک و نیمه‌خشک که پوشش گیاهی پراکنده بوده و بازتاب پس‌زمینه خاک می‌تواند بر پاسخ طیفی گیاه اثرگذار باشد، حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات جزئی پوشش گیاهی دارد. برخلاف NDVI که در شرایط تراکم بالای پوشش گیاهی و یا در مناطقی با تأثیر قابل توجه بازتاب خاک ممکن است دچار اشباع یا کاهش حساسیت شود، EVI با اعمال ضرایب اصلاح‌کننده اثرات پس‌زمینه خاک و شرایط جوی، توانایی بهتری در آشکارسازی تغییرات پوشش گیاهی در اکوسیستم‌های کم‌تراکم دارد (Huete et al., 2002). این ویژگی برای استان خوزستان اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا بخش زیادی از منطقه مورد مطالعه شامل اراضی خشک، دشت‌های کم‌پوشش، اراضی کشاورزی تحت تنش آبی و مناطق تحت تأثیر کانون‌های گردوغبار است که در آن‌ها تغییرات جزئی وضعیت پوشش گیاهی می‌تواند تحت تأثیر شرایط خاک و رطوبت سطحی قرار گیرد. مطالعات انجام‌شده در مناطق خشک و نیمه‌خشک ایران نیز نشان داده‌اند که شاخص‌های MODIS از جمله EVI و NDVI قابلیت مناسبی برای پایش تغییرات پوشش گیاهی و شرایط خشکسالی دارند و عملکرد آن‌ها به نوع پوشش، شرایط اقلیمی و ویژگی‌های منطقه وابسته است (Jafari et al., 2017; Shahabfar & Eitzinger, 2011).

EVI به صورت رابطه (۲) محاسبه می‌شود (Huete et al., 2002):

$$EVI = G \times \frac{NIR - Red}{NIR + C_1 \times Red - C_2 \times Blue + L} \quad (2)$$

در این رابطه، NIR، Red و Blue به ترتیب بازتاب باند‌های مادون قرمز نزدیک، قرمز و آبی هستند. ضرایب G، C1، C2 و L ضرایب تصحیحی هستند که در محاسبه استاندارد EVI معمولاً به ترتیب برابر ۲،۵، ۶،۷،۵ و ۱ در نظر گرفته می‌شوند (Huete et al., 2002).

برای بررسی تغییرات غیرعادی سلامت پوشش گیاهی، ناهنجاری‌های ماهانه NDVI و EVI محاسبه شد. ناهنجاری هر شاخص از اختلاف مقدار ماهانه آن با میانگین بلندمدت همان ماه به دست آمد. این روش باعث حذف اثر چرخه فصلی و تمرکز بر تغییرات غیرعادی پوشش گیاهی می‌شود. رابطه (۳) کلی ناهنجاری به صورت زیر است (Vicente-Serrano et al., 2010):

$$Anomaly_{X(i,m)} = X_{i,m} - \bar{X}_m \quad (3)$$

که در آن $X_{i,m}$ مقدار شاخص پوشش گیاهی در سال i و ماه m ، و $\bar{X}_m$ میانگین بلندمدت همان ماه در کل دوره مطالعه است. مقدار منفی ناهنجاری نشان‌دهنده افت نسبی سلامت پوشش گیاهی نسبت به شرایط معمول همان ماه، و مقدار مثبت آن نشان‌دهنده بهبود نسبی پوشش گیاهی است.

برای پایش گردوغبار، از مؤلفه عمق نوری آئروسول گردوغبار (Dust Aerosol Optical Depth; Dust AOD) در طول موج ۵۵۰ نانومتر استفاده شد. این متغیر یکی از محصولات بازتحلیل MERRA-2 است که سهم آئروسول‌های گردوغباری از بار کل آئروسول جو را نشان می‌دهد (Randles et al., 2017). AOD یا عمق نوری آئروسول، میزان تضعیف تابش خورشیدی توسط ذرات معلق در ستون جو را نشان می‌دهد و شاخصی بدون واحد است. در این مطالعه، Dust AOD در طول موج ۵۵۰ نانومتر به عنوان شاخص اصلی شدت گرد و غبار استفاده شد. همچنین Total AOD 550 nm برای بررسی بار کلی آئروسول‌ها و نسبت Dust AOD به Total AOD برای تعیین سهم گرد و غبار از کل بار آئروسولی به کار رفت (Levy et al., 2007).

برای شناسایی رخداد‌های شدید گرد و غبار، از آستانه‌های آماری مبتنی بر توزیع Dust AOD استفاده شد. در این پژوهش، صدک ۷۵ به عنوان آستانه رخداد‌های نسبتاً شدید و صدک ۹۰ به عنوان آستانه رخداد‌های شدید گرد و غبار در نظر گرفته شد. مقدار صدک ۷۵ برابر ۰،۲۹۶ و مقدار صدک ۹۰ برابر ۰،۳۶۰ محاسبه شد. بنابراین، ماه‌هایی که مقدار Dust AOD آن‌ها برابر یا بیشتر از صدک ۹۰ بود، به عنوان رخداد‌های شدید گرد و غبار در تحلیل پاسخ تأخیری پوشش گیاهی استفاده شدند.

برای بررسی ارتباط بین گرد و غبار و پوشش گیاهی، ضریب همبستگی پیرسون بین Dust AOD و ناهنجاری‌های EVI و DVI محاسبه شد. این ضریب جهت و شدت رابطه خطی بین دو متغیر را نشان می‌دهد و مقدار آن بین -۱ تا +۱ قرار دارد. مقدار منفی نشان‌دهنده رابطه معکوس و مقدار مثبت نشان‌دهنده رابطه مستقیم بین

۲۰۲۳ نشان داد که شدت گرد و غبار در استان خوزستان دارای نوسانات زمانی قابل توجهی است. مقادیر AOD گرد و غبار در طول دوره مطالعه الگوی یکنواختی نداشت و در برخی ماه‌ها افزایش‌های آشکاری در بار گرد و غبار مشاهده شد. این نوسانات می‌تواند ناشی از تغییرات شرایط اقلیمی، خشکسالی، کاهش رطوبت سطحی، تغییرات پوشش گیاهی، فعالیت منابع داخلی و انتقال توده‌های گرد و غبار از منابع فرامرزی باشد. برای جداسازی ماه‌های دارای گرد و غبار شدید، آستانه‌های آماری بر اساس توزیع AOD محاسبه شد. مقدار صدک ۷۵ برابر ۰,۲۹۶ و مقدار صدک ۹۰ برابر ۰,۳۶۰ به‌دست آمد. بر این اساس، ماه‌هایی با مقدار AOD برابر یا بیشتر از ۰,۲۹۶ به‌عنوان ماه‌های دارای گرد و غبار نسبتاً شدید و ماه‌هایی با مقدار برابر یا بیشتر از ۰,۳۶۰ به‌عنوان رخدادهای شدید گرد و غبار در نظر گرفته شدند. در مجموع، ۷۰ ماه بالاتر از صدک ۷۵ و ۲۹ ماه بالاتر از صدک ۹۰ قرار گرفتند. همان‌گونه که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، در بسیاری از دوره‌ها تغییرات AOD با تغییرات AOD Total همراستا بوده است. این موضوع نشان می‌دهد که گرد و غبار سهم مهمی از تغییرات بار آتروسلی منطقه را تشکیل می‌دهد. با این حال، از آنجاکه AOD Total شامل سایر انواع آتروسول‌ها مانند ذرات ناشی از آلودگی، احتراق و منابع انسانی نیز می‌شود، در تحلیل‌های اصلی از AOD به‌عنوان شاخص اختصاصی‌تر برای شدت گرد و غبار استفاده شد.

دو متغیر است. رابطه ضریب همبستگی پیرسون (معادله ۴) به‌صورت زیر تعریف می‌شود (Pearson ET ALO., 1895; Zar et al., 2010):

$$r = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2 \times \sum (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (4)$$

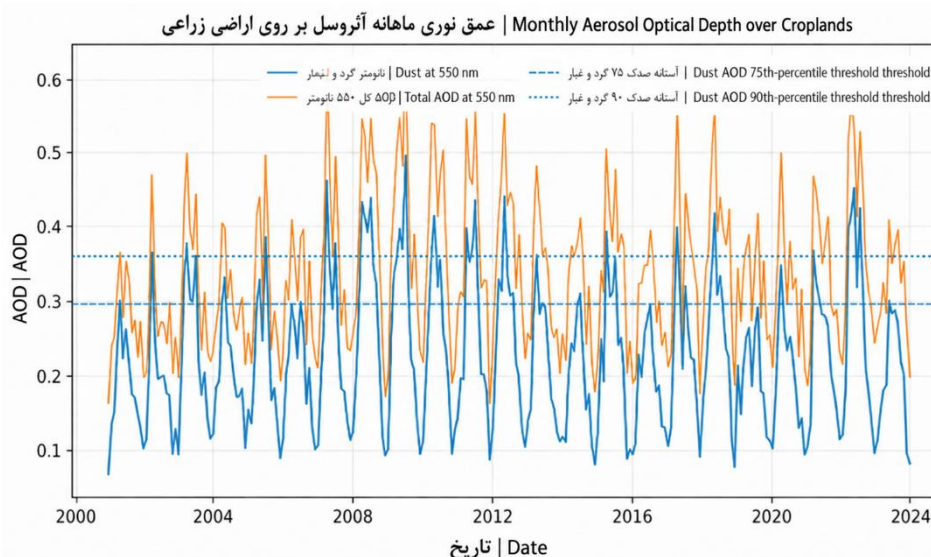
در این رابطه، X_i مقادیر Dust AOD، Y_i مقادیر ناهنجاری شاخص پوشش گیاهی، $\bar{X}$ میانگین Dust AOD و $\bar{Y}$ میانگین ناهنجاری پوشش گیاهی است. علاوه بر همبستگی، از رگرسیون خطی نیز برای بررسی روند کلی رابطه بین Dust AOD و ناهنجاری NDVI استفاده شد (Su et al., 2012; Gong et al., 2024).

در نهایت، برای ارزیابی اثر تأخیری رخدادهای شدید گرد و غبار بر سلامت پوشش گیاهی، میانگین ناهنجاری‌های NDVI و EVI در ماه وقوع رخداد شدید، یک ماه پس از رخداد و دو ماه پس از رخداد محاسبه شد. این تحلیل امکان بررسی این موضوع را فراهم کرد که آیا اثر گرد و غبار بر پوشش گیاهی بلافاصله ظاهر می‌شود یا در ماه‌های بعدی شدت بیشتری پیدا می‌کند.

نتایج

تغییرات زمانی AOD گرد و غبار

بررسی سری زمانی ماهانه AOD 550 nm طی دوره ۲۰۰۱ تا



شکل ۲- تغییرات ماهانه AOD گرد و غبار و AOD کل در استان خوزستان طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۳

Figure 2- Monthly changes in dust AOD and total AOD in Khuzestan Province during the period 2001 to 2023

شدید گرد و غبار در نظر گرفته شد و مبنای تحلیل پاسخ تأخیری پوشش گیاهی قرار گرفت. هم‌زمانی نسبی تغییرات AOD گرد و غبار و AOD کل نیز نشان می‌دهد که گرد و غبار سهم مهمی از بار آتروسلی منطقه

مطابق شکل ۲، مقدار AOD گرد و غبار در طول دوره مطالعه نوسانات ماهانه قابل توجهی دارد و در برخی دوره‌ها از آستانه‌های صدک ۷۵ و ۹۰ عبور کرده است. عبور از صدک ۹۰ به‌عنوان رخداد

را تشکیل می‌دهد.

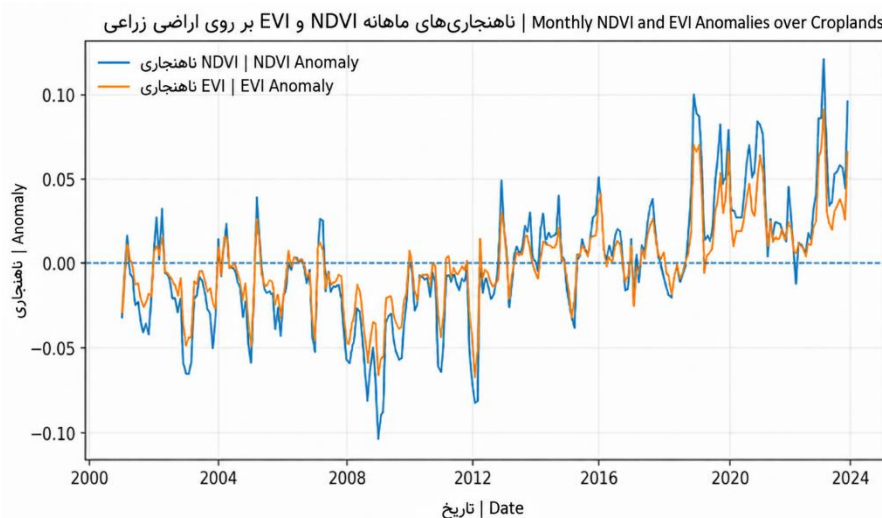
۱ کیلومتر $\times$ ۱ کیلومتر نیز پس از اعمال محدوده استان، به صورت مشابه میانگین‌گیری فضایی شدند. بنابراین، اگرچه تفکیک مکانی اولیه داده‌های AOD و شاخص‌های پوشش گیاهی یکسان نبود، با تبدیل هر دو مجموعه داده به مقادیر میانگین منطقه‌ای، امکان مقایسه زمانی و تحلیل ارتباط بین گردوغبار و وضعیت پوشش گیاهی در مقیاس استان فراهم شد.

رابطه بین AOD خام و ناهنجاری‌های پوشش گیاهی

در مرحله نخست، رابطه بین مقادیر خام AOD و ناهنجاری‌های NDVI و EVI در مقیاس ماهانه بررسی شد. نتایج حاکی از وجود رابطه‌ای منفی اما ضعیف بود (ضریب همبستگی -0.144 ، برای NDVI و -0.132 ، برای EVI) که با وجود معناداری آماری (به ترتیب 0.0169 و 0.0287)، شدت پایینی داشت. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، اگرچه خط برازش شیب منفی دارد، اما پراکندگی زیاد نقاط نشان‌دهنده عدم ثبات رابطه است. این ضعف در همبستگی را می‌توان به وجود چرخه‌های فصلی قوی در داده‌های AOD و تفاوت زمانی میان دوره‌های افزایش گرد و غبار و مراحل رشد فعال پوشش گیاهی نسبت داد. بنابراین، در گام بعدی، با محاسبه ناهنجاری AOD، رابطه آن با شاخص‌های پوشش گیاهی مورد بررسی قرار گرفت.

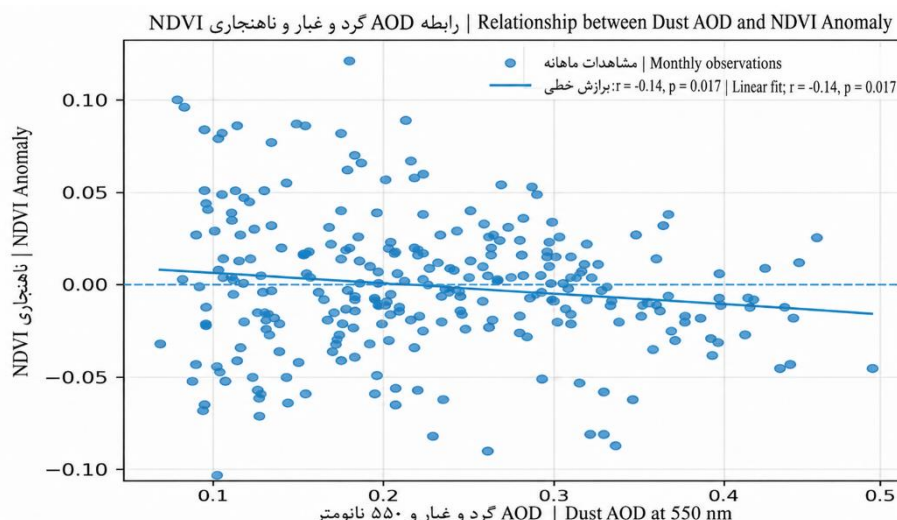
تغییرات ناهنجاری‌های NDVI و EVI

بررسی ناهنجاری‌های ماهانه NDVI و EVI در دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۳ نشان داد که سلامت پوشش گیاهی خوزستان دارای تغییرات زمانی مشخصی است؛ به‌طوری‌که مقادیر مثبت و منفی ناهنجاری به ترتیب بیانگر بهبود و افت نسبی وضعیت گیاهی هستند. مطابق شکل ۳، هر دو شاخص در بسیاری از دوره‌ها رفتار هم‌جهت نشان دادند که گواهی بر توانایی آن‌ها در بازتاب تغییرات عمومی پوشش گیاهی است. با این حال، تفاوت در حساسیت آن‌ها به تراکم گیاهی، پس‌زمینه خاک و شرایط جوی موجب شد شدت نوسانات این دو شاخص کاملاً یکسان نباشد. ناهنجاری‌های منفی قابل توجه نیز نشان‌دهنده تأثیر عواملی نظیر تنش خشکی، افت رطوبت خاک و رخداد‌های گرد و غبار بر سلامت پوشش گیاهی بود. از نظر تفکیک مکانی، داده‌های مورد استفاده دارای مقیاس‌های مکانی متفاوتی بودند. داده‌های AOD به‌صورت شبکه‌ای تهیه شده و پس از استخراج محدوده استان خوزستان، مقادیر سلول‌های واقع در محدوده مورد مطالعه برای هر ماه میانگین‌گیری شد تا یک سری زمانی ماهانه نماینده کل استان ایجاد شود. داده‌های NDVI و EVI حاصل از محصول MODIS MOD13A2 با تفکیک مکانی



شکل ۳- تغییرات ماهانه ناهنجاری NDVI و EVI در استان خوزستان طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۳

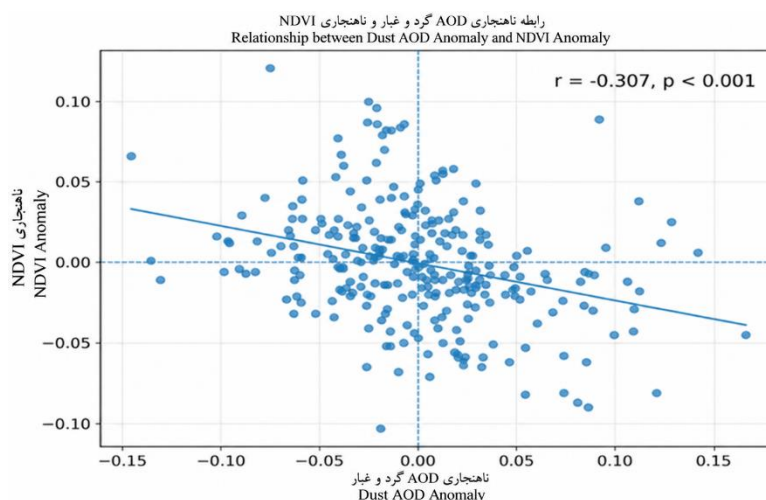
Figure 3- Monthly changes in NDVI and EVI anomalies in Khuzestan Province during the period 2001 to 2023



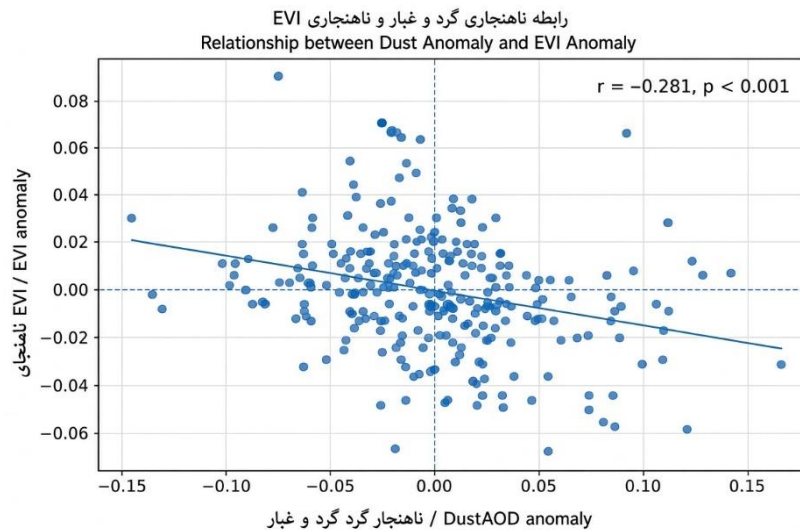
شکل ۴- رابطه بین AOD گرد و غبار در طول موج ۵۵۰ نانومتر و ناهنجاری NDVI در مقیاس ماهانه
Figure 4- Relationship between dust AOD at 550 nm and NDVI anomaly on a monthly scale

با افزایش غیرعادی گرد و غبار است. این یافته تأیید می‌کند که ناهنجاری AOD شاخص مناسب‌تری نسبت به مقادیر خام برای ارزیابی اثرات گرد و غبار بر پوشش گیاهی در مقیاس ماهانه است. همچنین، نسبت AOD به AOD Total نیز رابطه منفی معناداری با ناهنجاری‌های پوشش گیاهی نشان داد (همبستگی -0.173 ، برای NDVI و -0.149 ، برای EVI با مقادیر احتمال 0.0039 و 0.0133). اگرچه این نتیجه نشان می‌دهد افزایش سهم گرد و غبار در کل بار آرسلی با افت سلامت گیاهی همراه است، اما شدت این رابطه کمتر از ناهنجاری مطلق AOD بود.

رابطه بین ناهنجاری AOD و ناهنجاری‌های پوشش گیاهی
پس از محاسبه ناهنجاری ماهانه AOD، بررسی رابطه بین افزایش غیرعادی گرد و غبار و افت غیرعادی شاخص‌های پوشش گیاهی نشان داد که حذف اثرات فصلی موجب افزایش قابل توجه شدت همبستگی می‌شود. ضریب همبستگی ناهنجاری AOD با ناهنجاری NDVI و EVI به ترتیب برابر -0.307 و -0.281 بود که هر دو از نظر آماری در سطح کمتر از 0.001 معنادار بودند (شکل‌های ۵ و ۶). شیب منفی خطوط برازش در این شکل‌ها بیانگر کاهش نسبی شاخص‌های گیاهی



شکل ۵- رابطه بین ناهنجاری AOD گرد و غبار و ناهنجاری NDVI در مقیاس ماهانه
Figure 5- Relationship between dust AOD anomaly and NDVI anomaly on a monthly scale



شکل ۶- رابطه بین ناهنجاری AOD گرد و غبار و ناهنجاری EVI در مقیاس ماهانه
Figure 6- Relationship between dust AOD anomaly and EVI anomaly on a monthly scale

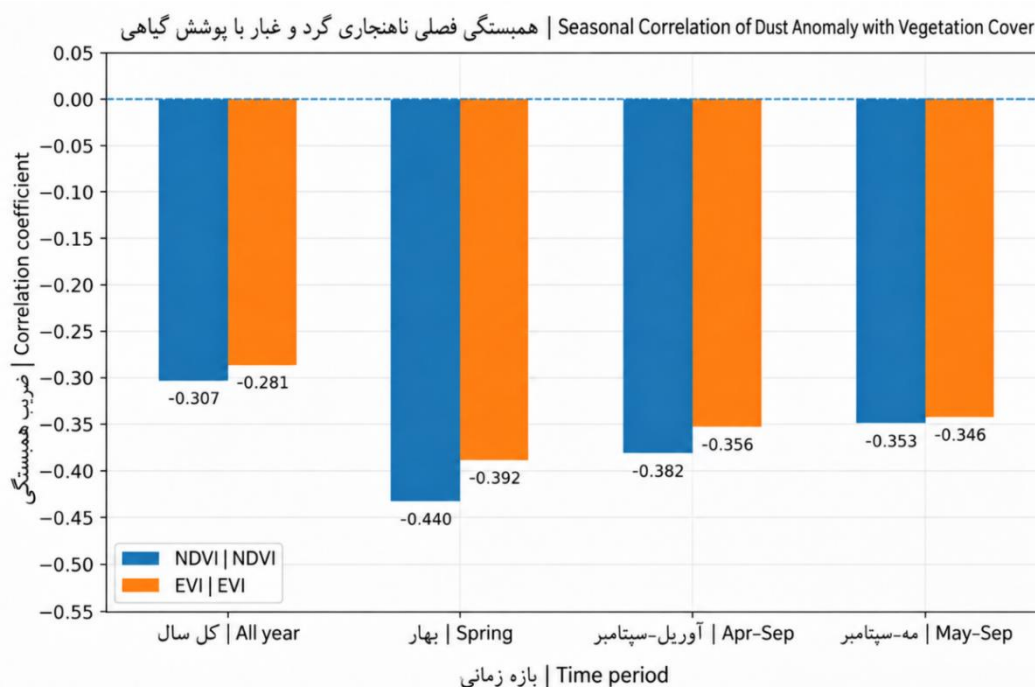
محاسبه شد. نتایج نشان داد که شدت رابطه بین گردوغبار و پوشش گیاهی در طول سال ثابت نبوده و در برخی ماه‌ها، همبستگی منفی قوی‌تری نسبت به میانگین کل دوره مشاهده شده است. مطابق شکل ۸، در ماه فوریه ضریب همبستگی ناهنجاری AOD با ناهنجاری NDVI برابر ۰٫۶۱۵- و با ناهنجاری EVI برابر ۰٫۵۵۳- بود. در ماه مارس، این ضرایب به ترتیب برابر ۰٫۴۵۵- و ۰٫۴۴۵- محاسبه شدند. در ماه آوریل نیز همبستگی ناهنجاری AOD با NDVI برابر ۰٫۵۰۶- و با EVI برابر ۰٫۴۱۹- بود. در ماه مه، ضرایب همبستگی برای NDVI و EVI به ترتیب برابر ۰٫۵۰۱- و ۰٫۴۳۳- به دست آمدند. همچنین در ماه جولای، همبستگی با NDVI برابر ۰٫۵۲۶- و با EVI برابر ۰٫۵۳۹- بود. این نتایج نشان می‌دهد که اثر گرد و غبار بر پوشش گیاهی در تمام ماه‌ها یکسان نیست و در برخی ماه‌های خاص، به‌ویژه ماه‌هایی که با رشد فعال گیاه یا افزایش شدت گرد و غبار همزمان هستند، رابطه منفی آشکارتری مشاهده می‌شود. با این حال، از آنجاکه در تحلیل ماه به ماه تعداد مشاهدات برای هر ماه محدودتر است، نتایج این بخش باید به عنوان تحلیل تکمیلی تفسیر شوند. علاوه بر تحلیل ماه به ماه، بررسی همبستگی‌های تأخیری نیز نکات قابل توجهی درباره زمان پاسخ پوشش گیاهی به رخداد های گردوغبار نشان داد. یکی از یافته‌های قابل توجه این پژوهش، مشاهده همبستگی مثبت بین ناهنجاری گردوغبار و شاخص‌های پوشش گیاهی در ماه اول (ژانویه) است. این رفتار ظاهراً برخلاف انتظار اولیه است، زیرا افزایش گردوغبار معمولاً با کاهش سلامت پوشش گیاهی همراه می‌شود. با این حال، این همبستگی مثبت می‌تواند ناشی از اثر هم‌زمانی برخی عوامل محیطی باشد.

تحلیل زمانی در مقیاس‌های مختلف رابطه گرد و غبار و پوشش گیاهی

برای بررسی اثر تغییرات فصلی، رابطه بین ناهنجاری AOD و ناهنجاری‌های NDVI و EVI در بازه‌های زمانی مختلف محاسبه شد. نتایج نشان داد که شدت رابطه بین گرد و غبار و پوشش گیاهی در تمام ماه‌های سال یکسان نیست و در برخی فصل‌ها رابطه منفی آشکارتری مشاهده می‌شود. مطابق شکل ۷، در فصل بهار، یعنی ماه‌های مارس تا مه، ضریب همبستگی ناهنجاری AOD با ناهنجاری NDVI برابر ۰٫۳۸۸- و با ناهنجاری EVI برابر ۰٫۳۴۶- به دست آمد. مقدار احتمال این روابط به ترتیب برابر ۰٫۰۰۱۰ و ۰٫۰۰۳۶ بود. این نتیجه نشان داد که در فصل بهار، افزایش غیرعادی گرد و غبار ارتباط قوی‌تری با افت شاخص‌های پوشش گیاهی دارد. این موضوع می‌تواند به فعال بودن پوشش گیاهی و حساسیت بیشتر محصولات کشاورزی در این بازه زمانی مربوط باشد. در بازه آوریل تا سپتامبر نیز ضریب همبستگی ناهنجاری AOD با ناهنجاری NDVI برابر ۰٫۲۹۶- و با ناهنجاری EVI برابر ۰٫۲۷۵- محاسبه شد. مقدار احتمال این روابط به ترتیب برابر ۰٫۰۰۰۴ و ۰٫۰۰۱۱ بود. همچنین در بازه مه تا سپتامبر، ضرایب همبستگی برای NDVI و EVI به ترتیب برابر ۰٫۲۶۷- و ۰٫۲۶۱- به دست آمدند. نتایج دادند که در دوره‌های گرم‌تر و گردوغبارخیزتر سال نیز رابطه منفی بین گرد و غبار و سلامت پوشش گیاهی حفظ می‌شود، اما شدت آن نسبت به فصل بهار کمتر است.

تحلیل ماه به ماه رابطه گرد و غبار و پوشش گیاهی

برای بررسی دقیق‌تر تغییرات درون سالانه، همبستگی بین ناهنجاری AOD و ناهنجاری‌های NDVI و EVI به صورت ماه به ماه



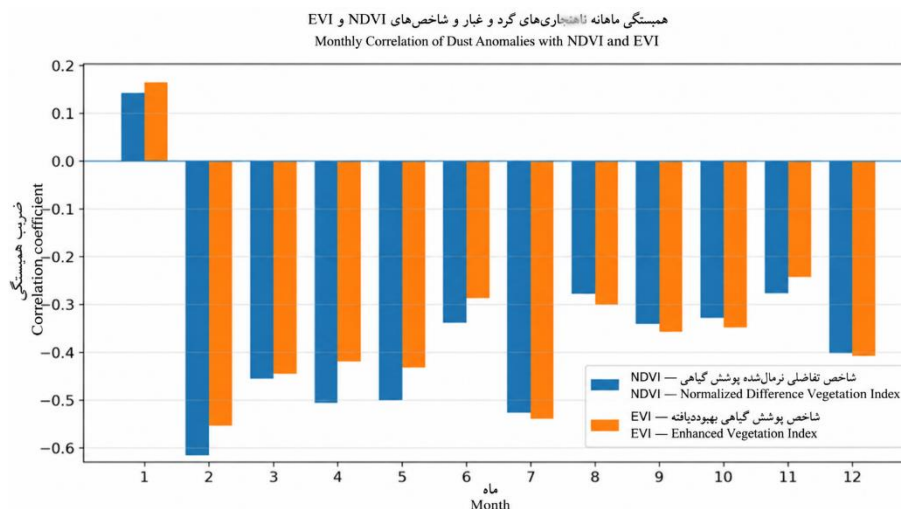
شکل ۷- مقایسه ضریب همبستگی ناهنجاری AOD گرد و غبار با ناهنجاری‌های NDVI و EVI در بازه‌های زمانی مختلف
Figure 7- Comparison of the correlation coefficient of dust AOD anomaly with NDVI and EVI anomalies in different time intervals

جزئی پوشش گیاهی باشد.

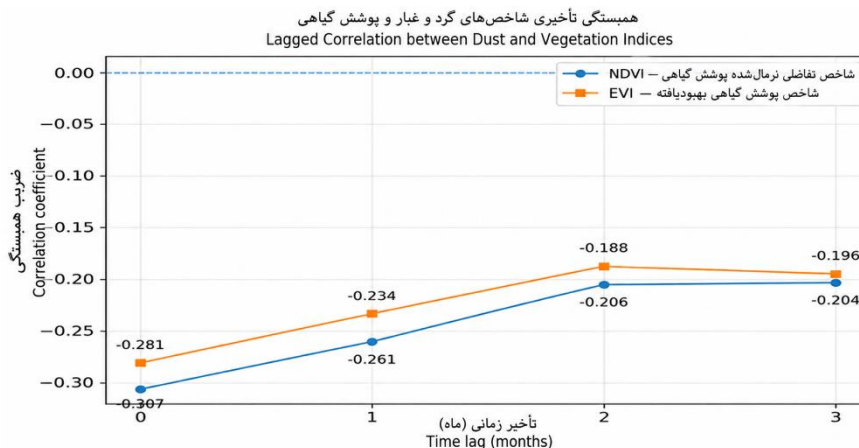
تحلیل همبستگی تأخیری

برای بررسی ماندگاری اثر گرد و غبار بر پوشش گیاهی، رابطه بین ناهنجاری AOD و ناهنجاری‌های NDVI و EVI در تأخیرهای زمانی صفر تا سه ماه بررسی شد. نتایج نشان داد که رابطه منفی بین گردوغبار و پوشش گیاهی تنها محدود به ماه وقوع افزایش گردوغبار نیست و در ماه‌های بعد نیز ادامه دارد. این تداوم اثر می‌تواند ناشی از ماندگاری پیامدهای فیزیولوژیک رسوب ذرات گردوغبار بر سطح برگ، کاهش فتوسنتز، محدود شدن تبادل گازی و همچنین تشدید هم‌زمان تنش آبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک باشد. در شرایط اقلیمی خوزستان، به دلیل محدودیت منابع آب و حساسیت بالای اکوسیستم‌های منطقه، بازیابی پوشش گیاهی پس از رخدادهای شدید گردوغبار ممکن است با تأخیر زمانی همراه شود (Engelstaedter et al., 2003; Middleton & Kang, 2017). مطابق شکل ۹، بیشترین شدت رابطه در همان ماه مشاهده شد؛ به‌طوری‌که ضریب همبستگی ناهنجاری AOD با ناهنجاری NDVI برابر ۰٫۳۰۷- و با ناهنجاری EVI برابر ۰٫۲۸۱- بود. در تأخیر یک‌ماهه، این ضرایب به ترتیب به ۰٫۲۶۱- و ۰٫۲۳۴- کاهش یافتند.

در مناطق خشک و نیمه‌خشک، رخدادهای گردوغبار اغلب در دوره‌هایی با شرایط جوی ناپایدار، افزایش رطوبت نسبی یا تغییرات فصلی همراه هستند که ممکن است به‌طور موقت شرایط رشد گیاه را بهبود دهند. همچنین، گردوغبار تنها عامل کنترل‌کننده تغییرات پوشش گیاهی نیست و عواملی مانند بارش، رطوبت خاک، دمای هوا و چرخه رشد گیاهان می‌توانند بر پاسخ کوتاه‌مدت شاخص‌های پوشش گیاهی اثرگذار باشند. بنابراین، همبستگی مثبت در تأخیر یک‌ماهه می‌تواند نشان‌دهنده اثر غالب عوامل محیطی همراه با رخداد گردوغبار در برخی دوره‌ها باشد، نه لزوماً اثر تقویت‌کننده گردوغبار بر پوشش گیاهی. تفاوت در شدت پاسخ NDVI و EVI نیز از دیگر نتایج قابل توجه پژوهش است. در برخی ماه‌ها، مقدار همبستگی EVI با ناهنجاری AOD بیشتر از NDVI بود. این موضوع می‌تواند به حساسیت متفاوت این دو شاخص نسبت به ساختار پوشش گیاهی مرتبط باشد. EVI به دلیل استفاده از ضرایب اصلاح‌کننده اثرات پس‌زمینه خاک و شرایط جوی، در مناطق دارای پوشش گیاهی پراکنده و مناطق خشک می‌تواند حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات جزئی پوشش گیاهی داشته باشد. در مقابل، NDVI در مناطق کم‌پوشش ممکن است تحت تأثیر بیشتر بازتاب خاک قرار گیرد و تغییرات جزئی پوشش گیاهی را با حساسیت کمتری نشان دهد. بنابراین، پاسخ قوی‌تر EVI در برخی دوره‌ها می‌تواند ناشی از قابلیت بالاتر این شاخص در ثبت تغییرات کوتاه‌مدت و



شکل ۸- تغییرات ماهانه ضریب همبستگی بین ناهنجاری AOD گرد و غبار و ناهنجاری‌های NDVI و EVI
Figure 8- Monthly changes in the correlation coefficient between dust AOD anomaly and NDVI and EVI anomalies



شکل ۹- همبستگی تأخیری بین ناهنجاری AOD گرد و غبار و ناهنجاری‌های NDVI و EVI در تأخیرهای صفر تا سه ماهه
Figure 9- Lag correlation between dust AOD anomaly and NDVI and EVI anomalies at lags of zero to three months

شدید گرد و غبار انتخاب شدند. مقدار صدک ۹۰ برابر ۰٫۳۶۰ بود و بر این اساس، ۲۹ ماه از کل دوره مطالعه به‌عنوان ماه‌های دارای رخداد شدید گرد و غبار شناسایی شدند. نتایج نشان داد که میانگین ناهنجاری NDVI در ماه وقوع رخداد شدید برابر ۰٫۰۱۱۷- بود. این مقدار در یک ماه پس از رخداد به ۰٫۰۱۳۷- و در دو ماه پس از رخداد به ۰٫۰۱۴۶- رسید. همچنین میانگین ناهنجاری EVI در ماه وقوع رخداد شدید برابر ۰٫۰۰۶۷- بود و در تأخیرهای یک‌ماهه و دوماه به‌ترتیب به ۰٫۰۰۸۱- و ۰٫۰۰۹۲- کاهش یافت. این الگو در شکل ۱۰ نشان داده شده است. نتایج تحلیل رخدادمحور نشان می‌دهد که پس از رخداد‌های شدید گرد و غبار، افت شاخص‌های پوشش گیاهی نه‌تنها در همان ماه مشاهده می‌شود، بلکه در ماه‌های بعد نیز ادامه می‌یابد. این رفتار می‌تواند بیانگر اثر تجمعی گرد و غبار، کاهش تدریجی توان فتوسنتزی گیاه، کاهش

در تأخیر دوماهه، همبستگی با NDVI برابر ۰٫۲۰۶- و با EVI برابر ۰٫۱۸۸- محاسبه شد. همچنین در تأخیر سه‌ماهه، ضرایب همبستگی برای NDVI و EVI به‌ترتیب برابر ۰٫۲۰۴- و ۰٫۱۹۶- بودند. این الگو نشان داد که اثر منفی گرد و غبار بر پوشش گیاهی در همان ماه آشکارتر است، اما بخشی از این رابطه تا چند ماه بعد نیز باقی می‌ماند. کاهش تدریجی ضرایب همبستگی در تأخیرهای زمانی بعدی می‌تواند نشان‌دهنده کاهش اثر مستقیم گرد و غبار و افزایش نقش سایر عوامل محیطی و زراعی در کنترل تغییرات پوشش گیاهی باشد.

پاسخ پوشش گیاهی به رخداد‌های شدید گرد و غبار

برای بررسی رفتار پوشش گیاهی پس از رخداد‌های شدید، ماه‌هایی که مقدار AOD آنها برابر یا بیشتر از صدک ۹۰ بود به‌عنوان رخداد‌های

اکوسیستم گیاهی ممکن است باعث شود تغییرات پوشش گیاهی همزمان با تغییرات AOD رخ ندهد. عدم تطابق کامل بین تغییرات سالانه AOD و ناهنجاری‌های پوشش گیاهی نشان می‌دهد که تغییرات بلندمدت پوشش گیاهی حاصل برهم‌کنش چندین عامل محیطی و انسانی است. در مقیاس سالانه، عواملی مانند بارش، رطوبت خاک، دسترسی به منابع آب، الگوی کشت، زمان کاشت و برداشت و مدیریت زراعی می‌توانند بر پاسخ پوشش گیاهی اثرگذار باشند. بنابراین، اگرچه افزایش AOD در برخی سال‌ها با کاهش شاخص‌های گیاهی همراه بوده است، تفسیر اثر گردوغبار بر پوشش گیاهی باید با در نظر گرفتن همزمان عوامل اقلیمی، هیدرولوژیک و مدیریتی انجام شود.

مقایسه استاندارد شده تغییرات گرد و غبار و پوشش گیاهی

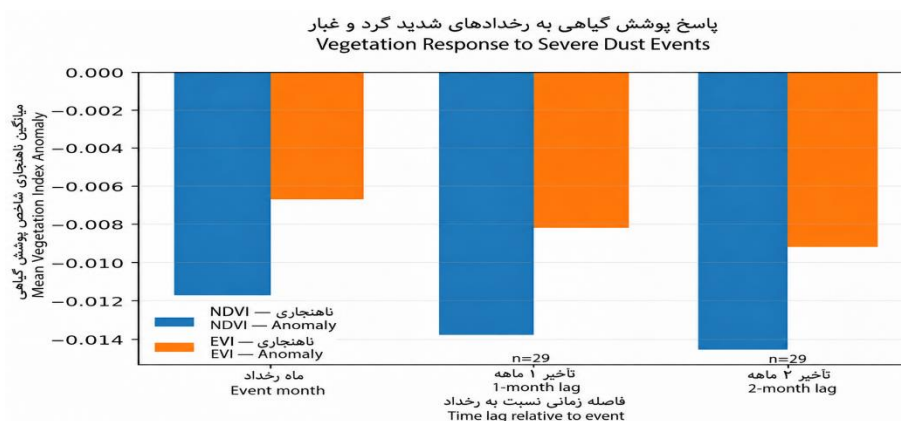
برای مقایسه بهتر نوسانات AOD، NDVI و EVI در یک مقیاس مشترک، سری‌های زمانی این متغیرها استانداردسازی شدند. شکل ۱۲ تغییرات استاندارد شده AOD و ناهنجاری‌های استاندارد شده NDVI و EVI را نشان می‌دهد. این مقایسه کمک می‌کند دوره‌هایی که افزایش نسبی گرد و غبار با کاهش نسبی شاخص‌های پوشش گیاهی همراه بوده است، بهتر شناسایی شوند.

نتایج این بخش نشان داد که در برخی دوره‌ها، افزایش استاندارد شده AOD با افت همزمان با تأخیری شاخص‌های NDVI و EVI همراه بوده است. با این حال، در تمام دوره‌ها چنین الگوی ثابتی مشاهده نمی‌شود. این موضوع بار دیگر نشان می‌دهد که گرد و غبار یکی از عوامل مؤثر بر سلامت پوشش گیاهی است، اما تنها عامل کنترل‌کننده تغییرات آن نیست.

رطوبت سطحی یا همزمانی رخدادهای گرد و غبار با شرایط تنش‌زای اقلیمی باشد.

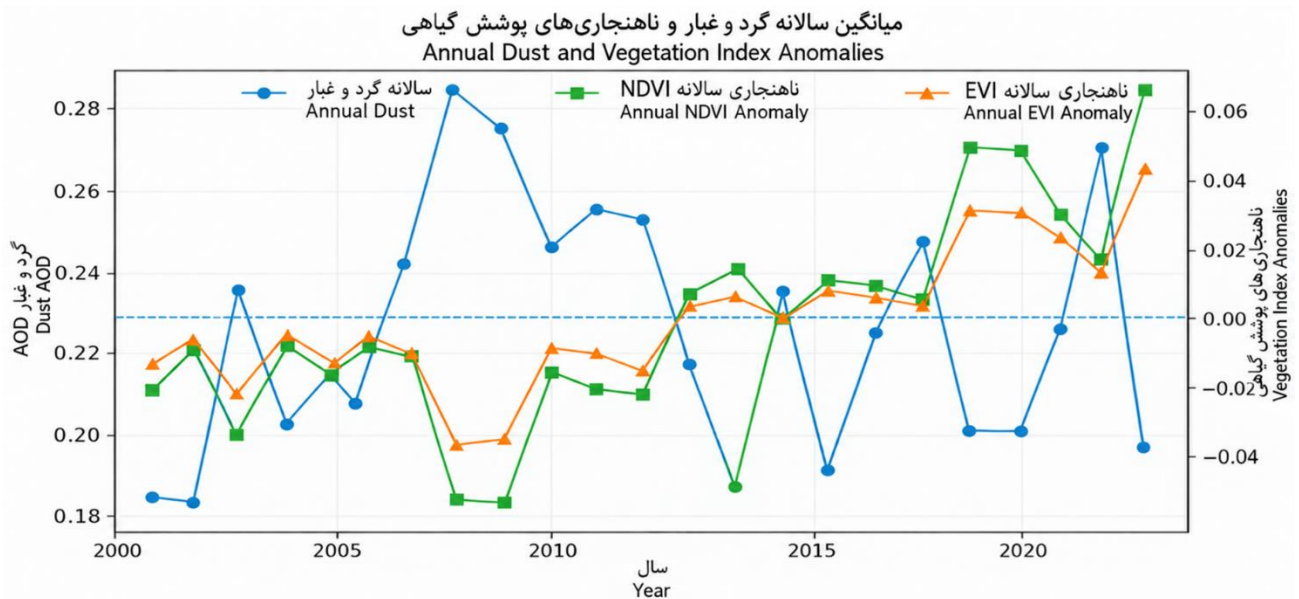
تغییرات سالانه AOD و ناهنجاری‌های پوشش گیاهی

برای بررسی الگوی بلندمدت تغییرات گرد و غبار و سلامت پوشش گیاهی، میانگین سالانه AOD و ناهنجاری‌های سالانه NDVI و EVI محاسبه شد. نتایج نشان داد که شدت گرد و غبار و وضعیت پوشش گیاهی در مقیاس سالانه دارای نوسانات قابل توجهی بوده و در برخی سال‌ها افزایش AOD با کاهش ناهنجاری‌های پوشش گیاهی همراه شده است. مطابق شکل ۱۱، تغییرات سالانه AOD و ناهنجاری‌های NDVI و EVI کاملاً یکنواخت نیستند. در برخی سال‌ها افزایش بار گرد و غبار با افت نسبی پوشش گیاهی همزمان شده است، اما در برخی سال‌های دیگر، تغییرات پوشش گیاهی مستقل از تغییرات AOD ظاهر شده است. در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۵، کاهش همزمان AOD و ناهنجاری‌های منفی پوشش گیاهی نشان می‌دهد که تغییرات سلامت پوشش گیاهی در این دوره تنها تحت کنترل گردوغبار نبوده است. کاهش بار گردوغبار الزاماً به معنای بهبود فوری شرایط پوشش گیاهی نیست، زیرا پاسخ پوشش گیاهی به تغییرات محیطی می‌تواند تحت تأثیر عوامل محدودکننده دیگری مانند کمبود بارش، کاهش رطوبت خاک، تنش آبی، تغییرات منابع آب و شرایط مدیریتی اراضی قرار گیرد. در مناطق خشک و نیمه‌خشک مانند خوزستان، محدودیت منابع آب و شرایط خشکی سطح زمین می‌تواند یکی از عوامل مؤثر در کاهش شاخص‌های پوشش گیاهی حتی در دوره‌هایی با کاهش شدت گردوغبار باشد. همچنین، اثرات تأخیری تنش‌های محیطی و زمان پاسخ



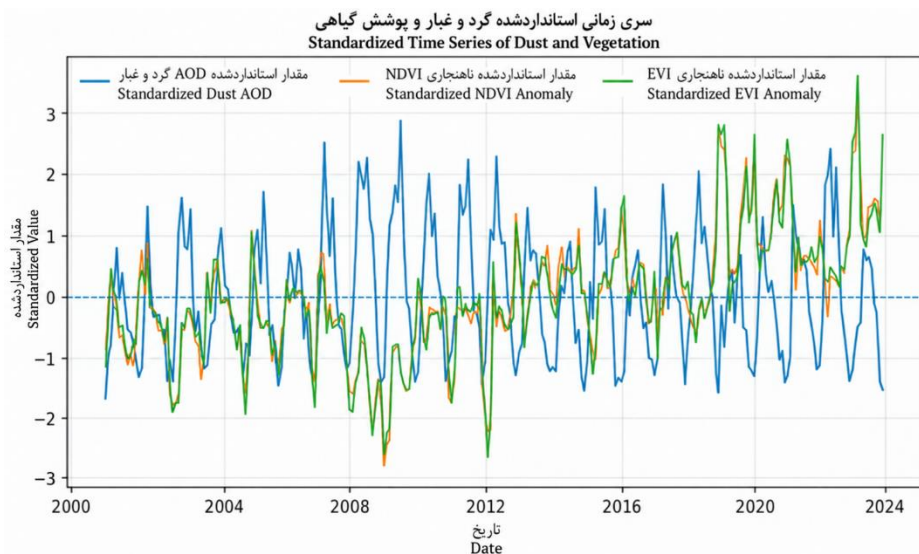
شکل ۱۰- میانگین ناهنجاری NDVI و EVI در ماه وقوع رخدادهای شدید گرد و غبار و در تأخیرهای یک‌ماهه و دوماهه پس از رخداد

Figure 10- Average NDVI and EVI anomalies in the month of occurrence of severe dust events and at one-month and two-month lags after the event



شکل ۱۱- تغییرات سالانه AOD و ناهنجاری‌های سالانه NDVI و EVI در استان خوزستان طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۳

Figure 11- Annual changes in AOD and annual anomalies in NDVI and EVI in Khuzestan Province during the period 2001 to 2023



شکل ۱۲- سری زمانی استاندارد شده AOD و ناهنجاری‌های استاندارد شده NDVI و EVI برای مقایسه تغییرات نسبی سه متغیر در یک مقیاس مشترک

Figure 12- Standardized AOD time series and standardized NDVI and EVI anomalies to compare relative changes of three variables on a common scale

ضعیفی را نشان داد (-0.144 و -0.132) که این ضعف را می‌توان به وجود چرخه‌های فصلی قوی در هر دو متغیر و تأثیر همزمان عوامل محیطی متعدد (مانند بارش، دما و مدیریت آبیاری) نسبت داد. با این حال، پس از حذف اثرات فصلی از طریق محاسبه ناهنجاری‌های ماهانه، شدت همبستگی به‌طور چشمگیری افزایش یافت. ضریب همبستگی ناهنجاری AOD با ناهنجاری NDVI و EVI به‌ترتیب برابر 0.307 ،

نتایج و بحث

یافته‌های این پژوهش نشان داد که رابطه میان رخداد های گرد و غبار و سلامت پوشش گیاهی در استان خوزستان، رابطه‌ای منفی، معنادار و پیچیده است. تحلیل اولیه مبتنی بر مقادیر خام AOD و ناهنجاری‌های شاخص‌های گیاهی (NDVI و EVI) همبستگی

و ۲۸۱-۰ به‌دست آمد که هر دو از نظر آماری معنادار بودند. این نتیجه تأیید می‌کند که انحراف شدت گرد و غبار از شرایط نرمال ماهانه، عامل تعیین‌کننده‌تری در کاهش سلامت گیاه است تا مقادیر مطلق آئروسول‌ها و با مطالعات پیشین که بر اهمیت تمایز قائل شدن بین تغییرات فصلی و شوک‌های محیطی تأکید دارند، همسو است. افزایش شدت رابطه پس از حذف چرخه‌های فصلی نشان می‌دهد که اثر گردوغبار بیشتر به صورت یک تنش غیرعادی و ناگهانی بر پوشش گیاهی ظاهر می‌شود تا یک عامل ثابت محیطی. این یافته با مطالعاتی که نشان داده‌اند شاخص‌های گیاهی در مناطق خشک، تحت تأثیر هم‌زمان شرایط اقلیمی و رخدادهای حدی مانند طوفان‌های گردوغبار قرار می‌گیرند، همخوانی دارد (Fan et al., 2014; Kim et al., 2017; Wu et al., 2022). در چنین شرایطی، مقادیر خام شاخص‌های پوشش گیاهی و آئروسول‌ها ممکن است تحت تأثیر چرخه‌های طبیعی سالانه قرار گرفته و شدت واقعی ارتباط میان گردوغبار و سلامت گیاه را پنهان کنند. همچنین، تحلیل نسبت AOD به AOD Total نشان داد که افزایش سهم گرد و غبار در کل بار آئرسولی با افت شاخص‌های گیاهی همراه است، اگرچه شدت این رابطه کمتر از ناهنجاری مطلق AOD بود که بیانگر تأثیر مستقیم‌تر «شدت غیرعادی» گرد و غبار بر گیاهان در منطقه مورد مطالعه است. تحلیل‌های زمانی نشان داد که اثر گرد و غبار بر پوشش گیاهی یکنواخت نیست و به زمان وقوع رخداد بستگی دارد. بیشترین همبستگی منفی در فصل بهار مشاهده شد (همبستگی ناهنجاری AOD با NDVI برابر ۰,۳۸-) که این یافته با شرایط اقلیمی خوزستان همخوانی دارد، زیرا بهار هم‌زمان با دوره رشد فعال محصولات زراعی و حساسیت بالای گیاهان به تنش‌های محیطی است. در این دوره، پوشش گیاهی به‌دلیل فعالیت متابولیک بالا، آسیب‌پذیری بیشتری در برابر رسوب ذرات و کاهش تابش خورشیدی نشان می‌دهد. این الگو با نتایج مطالعات انجام‌شده در مناطق خشک و نیمه‌خشک که نشان داده‌اند حساسیت پوشش گیاهی به تنش‌های محیطی در دوره رشد فعال افزایش می‌یابد، مطابقت دارد (Tan, 2016; Fan et al., 2014). تحلیل ماه‌به‌ماه نیز تأیید کرد که ماه‌های فوریه، آوریل، مه و جولای دارای همبستگی‌های منفی قابل‌توجهی هستند که گویای تشدید اثرات گرد و غبار در زمان‌هایی است که با کاهش رطوبت خاک یا افزایش دما هم‌زمان می‌شوند. یکی از جنبه‌های مهم این پژوهش، بررسی اثرات تأخیری گرد و غبار بود. نتایج تحلیل‌های همبستگی تأخیری و رخدادمحور نشان داد که کاهش سلامت پوشش گیاهی تنها محدود به ماه وقوع طوفان گرد و غبار نیست و تا سه ماه پس از رخداد نیز ادامه می‌یابد. در ماه‌های دارای رخدادهای شدید ($AOD > 90$ ، میانگین ناهنجاری NDVI و EVI منفی شد و این روند کاهشی در ماه‌های بعد نیز تداوم یافت. این تأخیر می‌تواند ناشی از مکانیسم‌های فیزیولوژیک مانند مسدود شدن روزه‌های برگ، کاهش فتوسنتز، تغییر در تعادل آب و خاک و همچنین تأثیرات تجمعی

تنش‌های محیطی باشد. با این حال، کاهش تدریجی ضریب همبستگی در تأخیرهای طولانی‌تر نشان می‌دهد که با گذشت زمان، عوامل مدیریتی (مانند آبیاری) و اقلیمی دیگر (مانند بارش) بر وضعیت گیاه غلبه می‌یابند و همچنین تأثیرات تجمعی تنش‌های محیطی باشد (Engelstaedter et al., 2003; Middleton & Kang, 2017). مشابه این رفتار در مطالعات مربوط به اثر تنش‌های محیطی بر پوشش گیاهی نیز گزارش شده است؛ به‌طوری‌که پاسخ اکوسیستم‌ها به تنش‌های جوی معمولاً فوری نبوده و می‌تواند با تأخیر زمانی ظاهر شود (Kim et al., 2017; Wu et al., 2022). ماندگاری اثر گردوغبار پس از رخداد، احتمالاً به تجمع ذرات روی سطح برگ، کاهش ظرفیت فتوسنتزی و استمرار شرایط نامساعد محیطی وابسته است. با این حال، کاهش اثر در ماه‌های بعد نشان می‌دهد که اکوسیستم‌ها توان بازیابی نسبی داشته و عوامل محدودکننده دیگری مانند بارش و مدیریت منابع آب در ادامه دوره رشد نقش تعیین‌کننده پیدا می‌کنند. یافته‌های این مطالعه در چارچوب شرایط خاص اکولوژیک خوزستان قابل تفسیر است. خوزستان به‌دلیل همجواری با منابع گرد و غبار داخلی و فرامرزی، خشکسالی‌های متوالی و تخریب تالاب‌های شادگان و هورالعظیم، مستعد تشدید این پدیده است. کاهش پوشش گیاهی و رطوبت خاک نه‌تنها ظرفیت تولید گرد و غبار را افزایش می‌دهد، بلکه آسیب‌پذیری اکوسیستم‌های زراعی را نیز بیشتر می‌کند. این نتایج با پژوهش‌های پیشین که بر نقش تالاب‌های خشک‌شده به‌عنوان منابع گرد و غبار و تأثیر منفی آن بر محیط زیست تأکید داشته‌اند، همسو است (Dargahian et al., 2023; Khanfari et al., 2024; Yousefi, 2025). همچنین، رابطه منفی مشاهده‌شده بین آئروسول‌ها و شاخص‌های گیاهی، با یافته‌های سایر مناطق خشک جهان مطابقت دارد. با وجود معنادار بودن روابط آماری، باید توجه داشت که همبستگی به‌تنهایی دلیلی بر علیت قطعی نیست، زیرا سلامت پوشش گیاهی تابعی از عوامل پیچیده‌ای از جمله مدیریت زراعی، نوع محصول و وضعیت آبیاری است. عدم دسترسی به داده‌های دقیق زمینی با تفکیک بالا و مدل‌سازی هم‌زمان تمام متغیرهای اثرگذار، از محدودیت‌های این پژوهش بود. برای پژوهش‌های آتی پیشنهاد می‌شود متغیرهای اقلیمی و زراعی (بارش، دما، رطوبت خاک، نوع کشت و مدیریت آبیاری) در مدل‌های رگرسیون چندمتغیره گنجانده شوند تا سهم مستقل گرد و غبار تفکیک گردد و از داده‌های سنجش‌ازدوری با تفکیک مکانی بالاتر برای ارزیابی محصولات خاص استفاده شود. نتایج این پژوهش با مطالعات انجام‌شده در سایر مناطق خشک جهان که رابطه منفی بین افزایش بار آئروسول و کاهش شاخص‌های پوشش گیاهی را گزارش کرده‌اند، هم‌راستا است (Fan et al., 2014; Kim, 2021; et al., 2017; Bao et al., 2021). با این حال، شدت این ارتباط به شرایط منطقه‌ای وابسته است و عواملی مانند نوع پوشش گیاهی، میزان خشکی منطقه، منابع تولید گردوغبار و مدیریت آب می‌توانند بر میزان

است که بیانگر اثر منفی رخدادهای غیرعادی گردوغبار بر وضعیت پوشش گیاهی منطقه است. همچنین، شدت این رابطه در دوره‌های زمانی مختلف یکسان نبود و بیشترین اثر منفی در فصل بهار، همزمان با دوره رشد فعال پوشش گیاهی، مشاهده شد.

تحلیل‌های تأخیری نشان داد که اثر گردوغبار تنها محدود به زمان وقوع رخداد نیست و می‌تواند تا چند ماه پس از آن بر وضعیت پوشش گیاهی باقی بماند. نتایج رخدادمحور نیز تأیید کرد که رخدادهای شدید گردوغبار موجب کاهش شاخص‌های گیاهی در ماه‌های پس از وقوع می‌شوند. مقایسه NDVI و EVI نشان داد که هر دو شاخص توانایی آشکارسازی اثرات گردوغبار را دارند، اگرچه در برخی دوره‌ها EVI حساسیت بیشتری نسبت به تغییرات پوشش گیاهی نشان داد.

در مجموع، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که گردوغبار به‌عنوان یکی از تنش‌های محیطی مهم در استان خوزستان، در کنار عوامل اقلیمی و مدیریتی، نقش مؤثری در تغییر وضعیت پوشش گیاهی دارد. توجه به مدیریت منابع آب، احیای تالاب‌های آسیب‌دیده و کنترل کانون‌های تولید گردوغبار می‌تواند در کاهش پیامدهای این پدیده و حفظ پایداری اکوسیستم‌های منطقه مؤثر باشد.

آسیب‌پذیری اکوسیستم اثرگذار باشند. بنابراین، نتایج خوزستان باید در چارچوب شرایط خاص این منطقه، شامل وجود تالاب‌های آسیب‌دیده، منابع داخلی گردوغبار و وابستگی بالای کشاورزی به منابع آبی تفسیر شود. در مجموع، این پژوهش نشان داد که رخدادهای شدید گرد و غبار، به‌ویژه در فصل بهار و با اثرات تأخیری، منجر به افت معنادار سلامت پوشش گیاهی در استان خوزستان می‌شوند. اگرچه گرد و غبار تنها عامل تغییرات پوشش گیاهی نیست، اما به‌عنوان یک تنش محیطی مهم، نقش قابل‌توجهی در کاهش عملکرد اکوسیستم‌های کشاورزی ایفا می‌کند. بنابراین، مدیریت پایدار منابع آب، احیای تالاب‌ها و کنترل منابع گرد و غبار، نه‌تنها برای بهبود کیفیت هوا، بلکه برای حفظ امنیت غذایی و پایداری اکوسیستم‌های استان خوزستان ضروری است.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با هدف بررسی رابطه بین رخدادهای گردوغبار و تغییرات سلامت پوشش گیاهی در استان خوزستان طی دوره ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۳ انجام شد. نتایج نشان داد که پس از حذف اثرات فصلی، افزایش ناهنجاری AOD با کاهش معنادار شاخص‌های NDVI و EVI همراه

References

- Bayat, R., Jafari, S., Ghermecheshmeh, B., & Charkhabi, A. (2016). Studying the effect of dust on vegetation changes: Case study of Shadegan Wetland, Khuzestan. *Remote Sensing and Geographic Information System in Natural Resources*, 7(2), 17–32. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-96935-2>
- Behrami, H.-A., Jalali, M., & Darvishi Bolurani, A. (2013). Spatiotemporal modeling of dust storm occurrence in Khuzestan Province. *Iranian Journal of Remote Sensing and GIS*, 5(2), 95–114.
- Jafari, S. (2020). Investigating the effects of dam construction and changes in the hydrological regime of the Karun River on soil salinity and dust occurrence in the Khuzestan Plain. *Iranian Journal of Irrigation and Water Engineering*, 43(1), 157–172.
- Feizollahpour, M. (2025). Monitoring moisture stress and drought based on correlation analysis between moisture-, vegetation-, and temperature-based spectral indices in Shadegan Wetland. *Hydrogeomorphology*, 12(45), 1–19.
- Adib, A. (2022). Effects of the Karkheh Dam construction on haze generation due to geomorphological changes in the Khuzestan Province, Southwest Iran. *Water Supply*, 22(2), 2338–2350. <https://doi.org/10.2166.ws.2021.376>
- Alam, K., Iqbal, M.J., Blaschke, T., Qureshi, S., & Khan, G. (2010). Monitoring spatio-temporal variations in aerosols and aerosol-cloud interactions over Pakistan using MODIS data. *Advances in Space Research*, 46, 1162–1176. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2010.06.025>
- Ban-Weiss, G.A., & Collins, W.D. (2015). Aerosols: Role in radiative transfer. In G. R. North, J. Pyle, & F. Zhang (Eds.), *Encyclopedia of Atmospheric Sciences* (2nd ed.). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382225-3.00053-0>
- Bao, C., Yong, M., Bi, L., Gao, H., Li, J., Bao, Y., & Gomboludev, P. (2021). Impacts of underlying surface on the dusty weather in central Inner Mongolian Steppe, China. *Earth and Space Science*, 8, e2021EA001672. <https://doi.org/10.1029.2021EA001672>
- Beyranvand, A., Azizi, G., Alizadeh, O., & Darvishi Boloorani, A. (2023). Dust in Western Iran: The emergence of new sources in response to shrinking water bodies. *Scientific Reports*, 13, 16158. <https://doi.org/10.1038.s41598-023-2173-3>
- Bibi, S., Alam, K., Chishtie, F., & Bibi, H. (2017). Characterization of absorbing aerosol types using ground and satellite-based observations over an urban environment. *Atmospheric Environment*, 150, 126–135. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.11.052>
- Boroughani, M., Naemi, M., Pourhashemi, S., Asadi, M.A.Z., Al-Hemoud, A., & Al-Qadeeri, G. (2025). Linking dust source susceptibility mapping and land use change in middle East. *Atmospheric Pollution Research*, 102774. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2025.102774>
- Boroughani, M., Zandi, R., Pourhashemi, S., Gholami, H., & Kaskaoutis, D.G. (2025). Linking sand dust storms

- hotspots and land use over Iran. *Atmospheric Pollution Research*, 16(2), 102380. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2024.102380>
13. Boroughani, M., Pourhashemi, S., Gholami, H., & Kaskaoutis, D.G. (2021). Predicting of dust storm source by combining remote sensing, statistic-based predictive models and game theory in the Sistan watershed, southwestern Asia. *Journal of Arid Land*, 13(11), 1103-1121. <https://doi.org/10.1007/s40333-021-0023-3>
14. Buchard, V., Randles, C.A., da Silva, A.M., Darmenov, A., Colarco, P.R., Govindaraju, R., Ferrare, R., Hair, J., Beyersdorf, A.J., Ziemba, L.D., & Yu, H. (2017). The MERRA-2 aerosol reanalysis, 1980 onward. Part II: Evaluation and case studies. *Journal of Climate*, 30(17), 6851-6872. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0613.1>
15. Chakraborty, T.C., Lee, X., Lawrence, D.M., & Bisht, G. (2021). Strong local evaporative cooling over land due to atmospheric aerosols. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 13, e2021MS002491. <https://doi.org/10.1029.2021MS002491>
16. Daniali, M., & Karimi, N. (2019). Spatiotemporal analysis of dust patterns over Mesopotamia and their impact on Khuzestan province, Iran. *Natural Hazards*, 97, 27-48. <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03641-0>
17. Dargahian, F., Mousivand, Y., Razavizadeh, S., & Lotfinasabasl, S. (2023). Identifying dust sources affecting southwestern Iran (Khuzestan Province) using remote sensing techniques and the HYSPLIT model. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 51(5), 565-583. <https://doi.org/10.1007/s12524-022-01648-y>
18. Engelstaedter, S., Kohfeld, K.E., Tegen, I., & Harrison, S.P. (2003). Controls of dust emissions by vegetation and topographic depressions: An evaluation using dust storm frequency data. *Geophysical Research Letters*, 30(6), 1294. <https://doi.org/10.1029.2002GL016471>
19. Fan, B., Guo, L., Li, N., Chen, J., Lin, H., Zhang, X., Shen, M., Rao, Y., Wang, C., & Ma, L. (2014). Earlier vegetation green-up has reduced spring dust storms. *Scientific Reports*, 4, 6749. <https://doi.org/10.1038.srep06749>
20. Filonchyk, M., & Hurynovich, V. (2020). Spatial distribution and temporal variation of atmospheric pollution in the South Gobi Desert, China, during 2016-2019. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 26579-26593. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-09000-y>
21. Gong, H., Li, Y., Zhang, J., Zhang, B., & Wang, X. (2024). A new filter feature selection algorithm for classification task by ensembling Pearson correlation coefficient and mutual information. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 131, 107865. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.107865>
22. Gupta, P., Khan, M.N., da Silva, A., & Patadia, F. (2013). MODIS aerosol optical depth observations over urban areas in Pakistan: Quantity and quality of the data for air quality monitoring. *Atmospheric Pollution Research*, 4, 43-52. <https://doi.org/10.5094/APR.2013.005>
23. Haywood, J., & Boucher, O. (2000). Estimates of the direct and indirect radiative forcing due to tropospheric aerosols: A review. *Reviews of Geophysics*, 38, 513-543. <https://doi.org/10.1029.1999RG000078>
24. Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E.P., Gao, X., & Ferreira, L.G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 83, 195-213. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)
25. Jafari, R., Bashari, H., & Tarkesh, M. (2017). Discriminating and monitoring rangeland condition classes with MODIS NDVI and EVI indices in Iranian arid and semi-arid lands. *Arid Land Research and Management*, 31(1), 94-110. <https://doi.org/10.1080/15324982.2016.1224955>
26. Kaufman, Y.J., Tanré, D., Remer, L.A., Vermote, E.F., Chu, A., & Holben, B.N. (1997). Operational remote sensing of tropospheric aerosol over land from EOS Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102, 17051-17067. <https://doi.org/10.1029.96JD03988>
27. Khan, R., Kumar, K.R., Zhao, T., Ullah, W., & de Leeuw, G. (2021). Interdecadal changes in aerosol optical depth over Pakistan based on the MERRA-2 reanalysis data during 1980-2018. *Remote Sensing*, 13(4), 822. <https://doi.org/10.3390.rs13040822>
28. Khanfari, V., Mohammad Asgari, H., & Dadollahi-Sohrab, A. (2024). Forecasting wetland transformation to dust source by employing CA-Markov model and remote sensing: A case study of Shadegan International Wetland. *Wetlands*, 44, 96. <https://doi.org/10.1007/s13157-024-01856-x>
29. Kim, D., Chin, M., Remer, L.A., Diehl, T., Bian, H., Yu, H., Brown, M.E., & Stockwell, W.R. (2017). Role of surface wind and vegetation cover in multi-decadal variations of dust emission in the Sahara and Sahel. *Atmospheric Environment*, 148, 282-296. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.10.051>
30. Levy, R.C., Remer, L.A., Mattoo, S., Vermote, E.F., & Kaufman, Y.J. (2007). Second-generation operational algorithm: Retrieval of aerosol properties over land from inversion of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer spectral reflectance. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 112, D13211. <https://doi.org/10.1029/2006JD007811>
31. Li, J., Okin, G.S., Alvarez, L.J., & Epstein, H.E. (2020). Impacts of meteorology and vegetation on surface dust concentrations in Middle Eastern countries. *Science of the Total Environment*, 712, 136597. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136597>
32. Masoumi, A., & Moradhaseli, R. (2023). Spatio-temporal classification of dust source activities affecting the Khuzestan region, based on CALIPSO-CALIOP data and atmospheric models. *Atmospheric Research*, 287, 106702.

- <https://doi.org/10.1016.j.atmosres.2023.106702>
33. Middleton, N., & Kang, U. (2017). Sand and dust storms: Impact mitigation. *Sustainability*, 9(6), 1053. <https://doi.org/10.3390.su9061053>
34. Mohammadi, Z., Rahimi, D., Najafi, M., & Zakerinejad, R. (2024). The effect of environmental degradation and climate on dust in Khuzestan Province, Iran. *Research Square* [Preprint]. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3345799/v1>
35. Nabat, P., Somot, S., Mallet, M., Sanchez-Lorenzo, A., & Wild, M. (2014). Contribution of anthropogenic sulfate aerosols to the changing Euro-Mediterranean climate since 1980. *Geophysical Research Letters*, 41, 5605–5611. <https://doi.org/10.1002.2014GL060798>
36. Omar, A.H., Tackett, J., & Al-Dousari, A. (2022). CALIPSO observations of sand and dust storms and comparisons of source types near Kuwait City. *Atmosphere*, 13, 1946. <https://doi.org/10.3390.atmos13121946>
37. Parolari, A.J., Li, D., Bou-Zeid, E., Katul, G.G., & Assouline, S. (2016). Climate, not conflict, explains extreme Middle East dust storm. *Environmental Research Letters*, 11, 114013. <https://doi.org/10.1088.1748-9326.11.11.114013>
38. Pearson, K. (1895). Notes on regression and inheritance in the case of two parents. *Proceedings of the Royal Society of London*, 58, 240–242. <https://doi.org/10.1098/rspl.1895.0041>
39. Pourhashemi, S., Asadi, M.A.Z., & Boroughani, M. (2025). Multi-hazard susceptibility mapping in the Salt Lake watershed. *Environmental Challenges*, 18, 101079. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.101079>
40. Pourhashemi, S., Asadi, M.A.Z., Boroughani, M., & Azadi, H. (2023). Mapping of dust source susceptibility by remote sensing and machine learning techniques (case study: Iran-Iraq border). *Environmental Science and Pollution Research*, 30(10), 27965–27979. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23982-x>
41. Randles, C.A., da Silva, A.M., Buchard, V., Darmenov, A., Colarco, P.R., Aquila, V., Bian, H., Nowottnick, E.P., Pan, X., Smirnov, A., Yu, H., & Govindaraju, R. (2017). The MERRA-2 aerosol reanalysis, 1980 onward. Part I: System description and data assimilation evaluation. *Journal of Climate*, 30(17), 6823–6850. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0609.1>
42. Rezazadeh, M., Irannejad, P., & Shao, Y. (2013). Climatology of the middle east dust events. *Aeolian Research*, 10, 103–109. <https://doi.org/10.1016.j.aeolia.2013.04.001>
43. Shahabfar, A., & Eitzinger, J. (2011). Agricultural drought monitoring in semi-arid and arid areas using MODIS data. *Journal of Agricultural Science*, 149, 403–414. <https://doi.org/10.1017/S0021859610001309>
44. Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., & Deering, D.W. (1974). Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. *Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*, NASA SP-351, 309–317. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19740022614/downloads/19740022614.pdf>
45. Su, X., Yan, X., & Tsai, C.-L. (2012). Linear regression. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 4, 275–294. <https://doi.org/10.1002.wics.1198>
46. Tan, M. (2016). Exploring the relationship between vegetation and dust-storm intensity (DSI) in China. *Journal of Geographical Sciences*, 26(4), 387–396. <https://doi.org/10.1007/s11442-016-1275-2>
47. Tao, W.-K., Chen, J.-P., Li, Z., Wang, C., & Zhang, C. (2012). Impact of aerosols on convective clouds and precipitation. *Reviews of Geophysics*, 50, RG2001. <https://doi.org/10.1029.2011RG000369>
48. Tariq, S., & Ul-Haq, Z. (2020). Investigating the aerosol optical depth and Ångström exponent and their relationships with meteorological parameters over Lahore in Pakistan. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section A: Physical Sciences*, 90, 861–867. <https://doi.org/10.1007/s40010-018-0575-6>
49. Tariq, S., Nawaz, H., Ul-Haq, Z., & Mehmood, U. (2021). Investigating the relationship of aerosols with enhanced vegetation index and meteorological parameters over Pakistan. *Atmospheric Pollution Research*, 12, 101080. <https://doi.org/10.1016.j.apr.2021.101080>
50. Tariq, S., Qayyum, F., Ul-Haq, Z., & Mehmood, U. (2022). Long-term spatiotemporal trends in aerosol optical depth and its relationship with enhanced vegetation index and meteorological parameters over South Asia. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 30638–30655. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17887-4>
51. Tiwari, S., Tiwari, S., Hopke, P.K., Attri, S.D., Soni, V.K., & Singh, A.K. (2016). Variability in optical properties of atmospheric aerosols and their frequency distribution over a mega city 'New Delhi', India. *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 8781–8793. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6060-3>
52. Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S., & López-Moreno, J.I. (2010). A multiscalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index. *Journal of Climate*, 23(7), 1696–1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
53. Wilson, W.E., & Suh, H.H. (1997). Fine particles and coarse particles: Concentration relationships relevant to epidemiologic studies. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 47, 1238–1249. <https://doi.org/10.1080.10473289.1997.10464074>
54. Wu, C., Lin, Z., Shao, Y., Liu, X., & Li, Y. (2022). Drivers of recent decline in dust activity over East Asia. *Nature Communications*, 13, 7105. <https://doi.org/10.1038.s41467-022-34823-3>
55. Xue, J., & Su, B. (2017). Significant remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications.

- Journal of Sensors*, 2017, 1353691. <https://doi.org/10.1155.2017.1353691>
56. Yousefi Kebria, A., Nadi, M., Afaridegan, E., & Sun, Z. (2025). Wetland shrinking and dust pollution in Khuzestan Iran: Insights from Sentinel-5 and MODIS satellites. *Scientific Reports*, 15, 13886. <https://doi.org/10.1038.s41598-025-96935-2>
57. Zar, J.H. (2010). *Biostatistical Analysis*. 5th Edition, Prentice-Hall/Pearson, Upper Saddle River, xiii, 944 p.
58. Zeydan, Ö., Tariq, S., Qayyum, F., Mehmood, U., & Ul-Haq, Z. (2023). Investigating the long-term trends in aerosol optical depth and its association with meteorological parameters and enhanced vegetation index over Turkey. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 20337–20356. <https://doi.org/10.1007.s11356-022-23553-0>
59. Zhang, Y., Song, C., Band, L.E., Sun, G., & Li, J. (2017). Reanalysis of global terrestrial vegetation trends from MODIS products: Browning or greening? *Remote Sensing of Environment*, 191, 145–155. <https://doi.org/10.1016.j.rse.2016.12.018>
60. Zou, X.K., & Zhai, P.M. (2004). Relationship between vegetation coverage and spring dust storms over northern China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109, D03104. <https://doi.org/10.1029.2003JD003913>