

Remote sensing analysis of changes in vegetation destruction and dust generation in Khuzestan Province

Mahdi Shojaei¹ 

1. Corresponding Author, PhD in climatology, Department of Climatology and Geomorphology, Faculty of Geography and Environmental Sciences, Hakim Sabzevari University, Sabzevar, Iran.
mahdi_shojaei@modares.ac.ir

Extended Abstract

Introduction

Dust storms are recognized as one of the most pervasive environmental hazards globally, particularly in arid and semi-arid regions. The Middle East, situated within the global dust belt, is severely affected by this phenomenon, experiencing widespread socio-economic and public health consequences. Khuzestan Province, located in southwestern Iran, is exceptionally vulnerable to dust storms due to its geographical proximity to highly active external dust sources in Iraq, Syria, and Saudi Arabia. Furthermore, in recent decades, successive droughts, unsustainable water management, and the desiccation of wetlands have led to the formation and intensification of internal dust hotspots within the province. While numerous studies have employed ground station data or aerosol tracking models to monitor dust events, there is a significant research gap regarding the long-term, pixel-based statistical analysis of dust frequency trends and their spatial correlation with vegetation health dynamics. Therefore, this study aims to conduct a comprehensive 25-year (2001–2025) spatio-temporal analysis of dusty days and their linkage with the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) across Khuzestan Province, utilizing advanced statistical trend analyses within a cloud-computing environment to provide a scientific basis for prioritizing environmental restoration efforts.

Materials and Methods

This spatio-temporal analytical study was conducted using long-term remote sensing data spanning from 2001 to 2025. All data retrieval, preprocessing, and spatial analyses were executed within the Google Earth Engine (GEE) platform. The research relied on two primary datasets from the MODIS sensor: the MAIAC Multi-Angle Implementation of Atmospheric Correction product (MCD19A2) for retrieving Aerosol Optical Depth (AOD) at 550 nm, and the MOD13A2 product for the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). To identify the frequency of dusty days, rigorous quality control was applied, and a thresholding approach was utilized wherein pixels with an AOD value greater than 0.5 were classified as dust events. For vegetation, the mean NDVI was calculated exclusively for the growing season (April to October). The statistical trend analysis was performed at the pixel level using two complementary methods: a simple linear regression to estimate the overall rate of change, and the non-parametric Mann-Kendall test accompanied by Sen's slope estimator to verify the statistical significance of the trends ($p < 0.05$). Furthermore, to quantitatively evaluate the relationship between the annual mean NDVI and the number of dusty days, a Generalized Least Squares (GLS) regression model with a first-order autoregressive (AR(1)) structure was applied using the R language, comparing both linear and quadratic models to account for time-series autocorrelation.

Results and Discussion

The time-series analysis revealed a significant inverse relationship between the frequency of dusty days and growing-season NDVI. The peak of dust events occurred during the severe drought of 2008 (69 days on average), which perfectly coincided with the lowest recorded NDVI value (0.123). Conversely, the unusually wet year of 2019 witnessed a drastic reduction in dusty days (6 days) alongside a surge in NDVI (0.169), highlighting the strong dependency of dust generation on climatic fluctuations and subsequent vegetation cover.

Spatially, the trend analysis demonstrated a distinct divide within the province. While linear regression suggested widespread changes, the Mann-Kendall test confirmed that only 5,993 km² of the province experienced a statistically significant increasing trend in dust frequency. This area is predominantly concentrated in a southern and western belt stretching from Susangerd to Behbahan. Concurrently, a significant degrading trend in vegetation (NDVI) was observed over approximately 4,058 km², heavily clustered around the Hoor-al-Azim and Shadegan wetlands, as well as abandoned agricultural lands south of Ahvaz. The striking spatial overlap of significant dust increase and vegetation degradation in this specific ~4,058 km² zone corroborates the activation of internal dust sources driven by wetland desiccation and land-use changes. In contrast, the northern and eastern parts of the province experienced a statistically significant decreasing trend in dust frequency.

Moreover, the GLS model (AR(1)) revealed a non-linear, saturation-type relationship between vegetation and dust. The quadratic model ($AIC = 203.96$, $R^2 = 0.59$) outperformed the linear approach, demonstrating that the most substantial reduction in dust events per unit increase in vegetation occurs at very low NDVI values (< 0.14). In highly degraded soils, even minor improvements in vegetation act as critical windbreaks. However, at NDVI values above 0.16, the dust-reduction efficacy reaches a saturation threshold, and the curve flattens significantly.

Conclusion

This 25-year remote sensing assessment demonstrates that while climatic variations heavily influence inter-annual dust dynamics, persistent vegetation degradation has sustainably lowered the wind erosion threshold in the southern and western regions of Khuzestan Province. By employing strict statistical significance tests, this study differentiated persistent environmental degradation from short-term anomalies, pinpointing a critical overlapping hotspot of roughly 4,058 km². The identified non-linear saturation relationship emphasizes that ecological restoration yields the highest returns in severely degraded zones ($NDVI < 0.14$). Consequently, management and crisis mitigation strategies should prioritize these highly sensitive southern areas. Securing environmental water rights for the Hoor-al-Azim and Shadegan wetlands, alongside biological soil fixation in abandoned agricultural lands near Ahvaz, are vital and immediate steps required to curb the escalating generation of local dust storms.

Keywords: Dust Storm, NDVI, Trend Analysis, Remote Sensing, Khuzestan Province.

تحلیل سنجش از دوری روند تغییرات تخریب پوشش گیاهی و خیزش گرد و غبار در استان خوزستان

مهدی شجاعی^۱ 

۱- دانش‌آموخته دکترا تخصصی آب و هواشناسی، گروه آب و هواشناسی و ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا و علوم محیطی، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران. mahdi_shojaei@modares.ac.ir

چکیده

استان خوزستان یکی از کانون‌های بحرانی گرد و غبار در خاورمیانه به‌شمار می‌رود. هدف این مطالعه، واکاوی فضایی-زمانی روند ۲۵ ساله (۲۰۰۱-۲۰۲۵) روزهای غبارآلود و ارتباط آن با سلامت پوشش گیاهی در استان خوزستان است. داده‌های عمق نوری هواویز (AOD) و شاخص پوشش گیاهی (NDVI) از فرآورده‌های MODIS استخراج و با دو رویکرد مکمل رگرسیون خطی و آزمون من-کندال همراه با شیب سن تحلیل شدند. رابطه کمی میان دو متغیر نیز با مدل حداقل مربعات تعمیم‌یافته (GLS) دارای خودهمبستگی مرتبه اول (AR(1))، بررسی گردید. یافته‌ها نشان داد که اوج روزهای غبارآلود (۶۹ روز در ۲۰۰۸) با کمینه NDVI (۰/۱۲۳) هم‌زمان بوده است. به‌لحاظ فضایی، نوار جنوبی و غربی استان (از سوسنگرد تا بهبهان) روند افزایشی معنادار گرد و غبار را هم‌راستا با تخریب پوشش گیاهی تجربه کرده است. مساحت کانون بحرانی، جایی که افزایش گرد و غبار و کاهش پوشش گیاهی با یکدیگر هم‌مکان هستند، نزدیک به ۴۰۵۸ کیلومتر مربع برآورد شد؛ حال آن‌که بخش‌های شمالی فاقد روند معنادار بودند. این هم‌پوشانی، نقش کانون‌های داخلی ناشی از خشکی تالاب‌ها و اراضی کشاورزی رهاشده را تأیید می‌کند. همچنین رابطه‌ای غیرخطی از نوع اثر اشباع میان NDVI و روزهای غبارآلود آشکار شد که بر اساس آن، بیشترین کاهش گرد و غبار به‌زای افزایش پوشش گیاهی در NDVI‌های کمتر از ۰/۱۴ رخ می‌دهد. از این‌رو، اقدامات مدیریتی باید با اولویت‌دهی به نواحی جنوبی، به‌ویژه تالاب‌های هورالعظیم و شادگان و زمین‌های جنوب اهواز، متمرکز شود.

واژگان کلیدی: ریزگرد، شاخص NDVI، تحلیل روند، سنجش از دور، استان خوزستان.

مقدمه

پدیده گرد و غبار به عنوان یکی از فراگیرترین مخاطرات محیطی، به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان، چالش‌های گسترده‌ای در حوزه‌های سلامت عمومی، کشاورزی، اقتصاد و تغییرات اقلیمی ایجاد کرده است (Geravandi et al., 2018; Goudie, 2014). این ذرات معلق که از کانون‌های طبیعی یا مناطق تخریب شده به دست فعالیت‌های انسانی منشأ می‌گیرند، قابلیت طی مسافت‌های هزاران کیلومتری در جو را داشته و طیف وسیعی از اثرات مخرب اقتصادی-اجتماعی از قبیل کاهش صادرات نفت، اختلال در حمل و نقل هوایی و زمینی، خسارت به محصولات کشاورزی، تعطیلی مدارس و آسیب به زیرساخت‌های شهری و صنعتی را به دنبال دارند (Faridi et al., 2021). منطقه خاورمیانه که بخشی از کمربند جهانی گرد و غبار را تشکیل می‌دهد، به عنوان یکی از فعال‌ترین مناطق کره زمین در این زمینه شناخته شده و کشورهای واقع در این محدوده، از جمله ایران، به‌طور مداوم با پیامدهای منفی این پدیده مواجه هستند (Shahsavandi et al., 2020; Zarasvandi et al., 2011).

استان خوزستان، واقع در جنوب غربی ایران، به دلیل موقعیت جغرافیایی و شرایط اقلیمی خاص خود، یکی از آسیب‌پذیرترین مناطق کشور در برابر توفان‌های گرد و غبار محسوب می‌شود. این استان در مجاورت مستقیم کانون‌های گرد و غبار خارجی بسیار فعال در کشورهای عراق، سوریه و عربستان سعودی قرار داشته (Daniali et al., 2019; Dargahian et al., 2023) و در دهه‌های اخیر، به دلیل خشکسالی‌های پیاپی، مدیریت ناپایدار منابع آب، و تغییرات کاربری اراضی ناشی از خشک شدن تالاب‌ها، شاهد شکل‌گیری و تشدید کانون‌های گرد و غبار داخلی نیز بوده است (Alizadeh et al., 2025; Dinarvand et al., 2018; Heidarian et al., 2018).

نتایج پایش‌های آماری بلندمدت نشان داده است که رخداد‌های گرد و غبار در استان خوزستان با روندی افزایشی و معنادار، به‌ویژه در ساعات میانی روز و در ماه‌های گرم (ژوئن، ژوئیه و می) همراه بوده و بیشترین فراوانی در نیمه غربی استان ثبت شده است (Ahadi et al., 2021). این شرایط پیچیده، خوزستان را به نقطه‌ای بحرانی برای مطالعه تعامل میان منابع گرد و غبار داخلی و خارجی تبدیل کرده است. اهمیت این موضوع زمانی دوچندان می‌شود که ارتباط مستقیم میان افزایش رخداد‌های گرد و غبار و تشدید بیماری‌های قلبی-ریوی، افزایش غلظت ذرات معلق تا حدود ۱۶ برابر حد مجاز در روزهای غبارآلود، و تحمیل هزینه‌های اقتصادی سنگین بر بخش‌های کشاورزی و سلامت در این استان به اثبات رسیده است (Ahadi et al., 2020; Danesh Jafari et al., 2015; Shahsavani A et al., 2012; Yazdani et al., 2024).

پژوهش‌های متعددی با بهره‌گیری از رویکردهای گوناگون به بررسی پدیده گرد و غبار در خوزستان پرداخته‌اند. بخش مهمی از این مطالعات با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های زمینی و مدل‌های ردیابی مسیر نظیر HYSPLIT، بر شناسایی کانون‌های گرد و غبار و تحلیل همدیدی رویدادهای کوتاه‌مدت متمرکز بوده‌اند (Dargahian et al., 2023; Nabavi et al., 2019). در این میان، بهره‌گیری از تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مناسب، امکان پایش محلی و منطقه‌ای گرد و غبار را فراهم آورده است. در پژوهشی که توسط (Ghaffarian Malmiri et al., 2023) انجام شد، همبستگی مثبت بالایی میان داده‌های ماهواره‌ای MODIS و سنتینل-۵ در برآورد میزان گرد و غبار در خوزستان گزارش گردید و مقادیر قابل توجه عمق نوری هواویز (AOD) در شهرستان‌های اهواز، آبادان، خرمشهر و ماهشهر مشاهده شد. همچنین، تلاش‌هایی برای شناسایی مناطق مستعد تولید گرد و غبار داخلی با تلفیق داده‌های ماهواره‌ای و فیزیوگرافی صورت گرفته است؛ نتایج این دسته از مطالعات نشان می‌دهد که نیمه غربی و جنوبی استان، به دلیل کاهش سطح پوشش گیاهی، وجود خاک‌های شور و باتلاقی و فرسایش‌پذیری بالای سازندها، بیشترین پتانسیل تولید گرد و غبار را دارند (Noroozi & Shoaee, 2018). از سوی دیگر، اهمیت پوشش گیاهی در کنترل فرسایش بادی و کاهش گرد و غبار در پژوهش‌های بوم‌شناختی نیز تأیید شده است؛ به‌گونه‌ای که احیای پوشش گیاهی بومی در کانون‌های بحرانی، به افزایش تنوع گونه‌ای و کاهش چشمگیر تولید گرد و غبار محلی منجر شده است (Dinarvand et al., 2021). افزون بر این، در پژوهش‌هایی که با استفاده از شاخص‌های اختصاصی گرد و غبار

نظیر NDDI بر روی تصاویر MODIS انجام شده‌اند، مشخص گردیده است که دقت این شاخص‌ها در برآورد شدت توفان، تحت تأثیر ویژگی‌های سطح زمین و خصوصیات کانی‌شناسی منطقه ممکن است کاهش یابد (Mehrabi et al., 2015). با وجود پیشرفت‌های حاصل‌شده، تحلیل روند آماری بلندمدت (بیش از دو دهه) در فراوانی وقوع گرد و غبار و مهم‌تر از آن، تحلیل هم‌زمان فضایی این روند با تغییرات سلامت پوشش گیاهی (NDVI) به‌عنوان عاملی کلیدی در کنترل فرسایش بادی، با روش‌های آماری پیشرفته و در مقیاس پیکسلی، کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است. بیشتر مطالعات پیشین یا صرفاً به تحلیل روند AOD با استفاده از داده‌های ایستگاهی پرداخته‌اند (Ahadi et al., 2021)، یا همبستگی ساده میان این دو متغیر را بدون در نظر گرفتن معناداری آماری روندهای فضایی بررسی کرده‌اند. این در حالی است که تعیین دقیق مساحت کانون‌هایی که به‌طور هم‌زمان با تخریب معنادار پوشش گیاهی و افزایش معنادار روزهای غبارآلود مواجه‌اند، برای هدف‌گذاری مداخلات مدیریتی و احیایی ضرورتی انکارناپذیر دارد. شکاف تحقیقاتی موجود زمانی برجسته‌تر می‌شود که ملاحظه گردد حتی در مطالعاتی که با رویکردهای منشأیابی (نظیر ردیابی مسیر یا تطابق بیواثرسل‌ها^۱) به شناسایی کانون‌های داخلی پرداخته‌اند، تحلیل هم‌مکانی روندهای بلندمدت پوشش گیاهی و فراوانی گرد و غبار برای تأیید کمی این ارتباط به کار گرفته نشده است (Tajiki et al., 2021).

بنابراین، هدف اصلی این پژوهش، پر کردن این شکاف تحقیقاتی با استفاده از تحلیل آماری روند تغییرات فضایی-زمانی در فراوانی وقوع گرد و غبار و ارتباط آن با روند سلامت پوشش گیاهی (NDVI) در استان خوزستان است. نوآوری این مطالعه در تلفیق سه عنصر کلیدی نهفته است: (۱) استفاده از یک دوره زمانی طولانی ۲۵ ساله (۲۰۰۱-۲۰۲۵) که نوسانات اقلیمی متعددی را پوشش می‌دهد، (۲) به‌کارگیری هم‌زمان دو رویکرد مکمل تحلیل روند (رگرسیون خطی و آزمون ناپارامتری من-کندال^۲ با تخمین گر شیب سن^۳) برای تفکیک روندهای پایدار از نوسانات تصادفی در محیط پردازش ابری Google Earth Engine (GEE) و (۳) تحلیل انطباق فضایی کانون‌های معنادار تخریب پوشش گیاهی و افزایش گرد و غبار برای تأیید کمی نقش کانون‌های داخلی. انتظار می‌رود نتایج این پژوهش بتواند با ارائه نقشه‌های دقیق از مساحت مناطق بحرانی، مبنایی علمی برای اولویت‌بندی اقدامات مدیریتی و احیای زیست‌بوم در جنوب و غرب استان فراهم آورد.

مواد و روش‌ها

پژوهش حاضر تحلیلی فضایی-زمانی است که با هدف ارزیابی و مقایسه روندهای بلندمدت در فراوانی وقوع گرد و غبار و پویایی پوشش گیاهی در استان خوزستان طراحی و اجرا گردیده است. رویکرد این پژوهش مبتنی بر استفاده از داده‌های ماهواره‌ای سنجنش از دور در یک بازه زمانی ۲۵ ساله، از ابتدای سال ۲۰۰۱ تا سال ۲۰۲۵، می‌باشد. برای مدیریت و تحلیل حجم کلان داده‌های ماهواره‌ای، تمامی مراحل فراخوانی، پیش‌پردازش، تحلیل آماری و بصری‌سازی نتایج در محیط سکوی پردازش ابری GEE، که یک ابزار قدرتمند برای تحلیل‌های جغرافیایی در مقیاس سیاره‌ای است، پیاده‌سازی شده است.

منطقه مورد مطالعه

محدوده جغرافیایی مورد بررسی در این پژوهش، استان خوزستان، است که به صورت یک لایه بُرداری دقیق^۴ برای تعیین مرزهای رسمی منطقه مشخص شد، در محیط GEE تعریف گردید. این لایه بُرداری به عنوان یک نقاب^۵ فضایی عمل کرده و تضمین می‌کند که تمامی تحلیل‌ها و محاسبات منحصراً در داخل این مرزها انجام شوند. علاوه بر این، تمامی نقشه‌های خروجی نهایی نیز به طور دقیق به این مرز، برش^۶ داده شده‌اند تا از پردازش هرگونه داده اضافی پرهیز شود. لازم به ذکر است که در ابتدای فرآیند، مساحت کل این محدوده برحسب کیلومتر مربع ۹۶۶/۶۳ محاسبه شد تا یک معیار پایه برای کمی‌سازی و مقایسه مساحت مناطقی که روندهای مختلفی را تجربه کرده‌اند، فراهم آورد. لازم به ذکر است که می‌توان در شکل ۱، موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه را مشاهده نمود.

¹ Bioaerosols

² Mann-Kendall Test

³ Sen's Slope Estimator

⁴ Vector Polygon

⁵ Mask

⁶ Clip

۰/۰۰۱ به مقادیر فیزیکی واقعی تبدیل شده و سپس پیکسل‌هایی با مقدار AOD بیشتر از ۰/۵ به عنوان رخداد گرد و غبار (کد ۱) و سایر به عنوان فاقد رخداد (کد ۰) طبقه‌بندی شدند. این آستانه بر اساس مطالعات پیشین انتخاب گردید که در آن‌ها نشان داده شده است در محصول MCD19A2، مقادیر AOD فراتر از ۰/۵ با رویدادهای گرد و غبار ثبت‌شده در ایستگاه‌های هواشناسی مطابقت دارد (Karami & Etemadfar, 2025). رویکرد مشابهی نیز در سایر مطالعات منطقه‌ای خاورمیانه برای شناسایی روزهای با بار بالای گرد و غبار به کار رفته است (Al-Dabbagh, 2020; Namdari et al., 2026). این رویکرد، مشابه با مطالعات اخیر در ایران، این امکان را فراهم کرد تا به جای تحلیل شدت متوسط، بر روی تعداد وقوع رخداد‌های مهم تمرکز شود. در نهایت، تصاویر دودویی^۱ روزانه برای هر سال با یکدیگر جمع زده شدند تا تصویری یکتا از تعداد کل روزهای غبارآلود برای آن سال ایجاد شود. برای متغیر پوشش گیاهی، به منظور افزایش دقت علمی و حذف نوسانات فصلی نامرتبط، تحلیل به فصل رشد^۲ محدود گردید. برای هر سال، میانگین مقادیر NDVI فقط برای تصاویر مربوط به دوره زمانی آوریل تا اکتبر (ماه‌های ۴ تا ۱۰) محاسبه شد تا تصویر نهایی میانگین NDVI فصل رشد برای آن سال تولید گردد. این فرآیند منجر به ایجاد دو مجموعه تصویر سری زمانی (شامل ۲۵ تصویر سالانه برای هر متغیر) گردید که ورودی اصلی برای گام بعدی هستند.

۲- در گام دوم، تحلیل روند آماری^۳ بر روی هر دو سری زمانی سالانه به شکل پیکسلی^۴ و با استفاده از دو روش آماری مکمل اجرا شد. روش اول، رگرسیون خطی ساده که با استفاده از عملگر `ee.Reducer.linearFit()`، شیب^۵ خط رگرسیون، برای هر پیکسل در طول دوره ۲۵ ساله محاسبه شد. خروجی این روش، به یک نقشه پیوسته از نرخ تغییر سالانه منجر شد که می‌تواند دید کلی از جهت و شدت تغییرات ارائه دهد. روش دوم، که برای افزایش اعتبار آماری نتایج به کار گرفته شد، که ترکیبی از آزمون ناپارامتری من-کندال و تخمین گر شیب سن است. آزمون من-کندال برای ارزیابی معناداری روند در هر پیکسل استفاده شد و یک نقشه از مقادیر p-value تولید گردید. سپس، تخمین گر شیب سن، که روشی مقاوم به داده‌های پرت^۶ است، برای محاسبه دقیق‌تر مقدار و جهت روند به کار رفت. در نهایت، نقشه شیب سن با استفاده از نقشه p-value با شرط ($p < 0.05$) آستانه گذاری شد تا نقشه نهایی، فقط روندهای آماری معنادار را نمایش دهد.

۳- در گام سوم و نهایی، کمی‌سازی و بصری‌سازی نتایج^۷ انجام گرفت. برای هر دو متغیر و برای هر دو روش تحلیلی، مساحت کل مناطقی که دارای روند افزایشی (برای گرد و غبار) یا سبز شدن (برای NDVI) و روند کاهشی (برای گرد و غبار) یا تخریب (برای NDVI) بودند، بر حسب کیلومتر مربع محاسبه شد. این نتایج کمی در قالب نمودارهای ستونی ارائه شدند تا مقایسه میان روندها آسان‌تر گردد. علاوه بر این، میانگین مقادیر هر متغیر برای کل منطقه در هر سال محاسبه و در قالب نمودارهای سری زمانی ترسیم شد تا روند کلی تغییرات در سطح منطقه به نمایش گذاشته شود. در نهایت، نقشه‌های روند حاصل از هر دو روش تحلیلی، برای هر دو متغیر، به صورت لایه‌های مجزا در محیط GEE نمایش داده شده و همچنین برای تحلیل‌های بیشتر و تهیه نقشه‌های نهایی، به فرمت استاندارد GeoTIFF برای خروجی گرفتن و استفاده در نرم‌افزارهای مرتبط پردازش اطلاعات جغرافیایی آماده شدند.

تحلیل ارتباط بین پوشش گیاهی و گرد و غبار

به منظور بررسی کمی رابطه بین میانگین سالانه NDVI (به عنوان متغیر مستقل) و تعداد روزهای غباری (متغیر وابسته)، از رگرسیون حداقل مربعات تعمیم‌یافته^۸ (GLS) با ساختار خودهمبستگی مرتبه اول ($AR(1)$) استفاده شد. این ساختار برای حذف اثر همبستگی متوالی سال‌ها در داده‌های سری زمانی به کار رفت. ابتدا مدل خطی ($Dust \sim NDVI$) و سپس مدل درجه دوم ($Dust \sim NDVI + NDVI^2$) برازش شدند. انتخاب مدل نهایی بر اساس معیار آکائیک^۹ (AIC)، ضریب تعیین^{۱۰}

^۱ Binary

^۲ Growing Season

^۳ Statistical Trend Analysis

^۴ Pixel-wise

^۵ Slope

^۶ Outliers

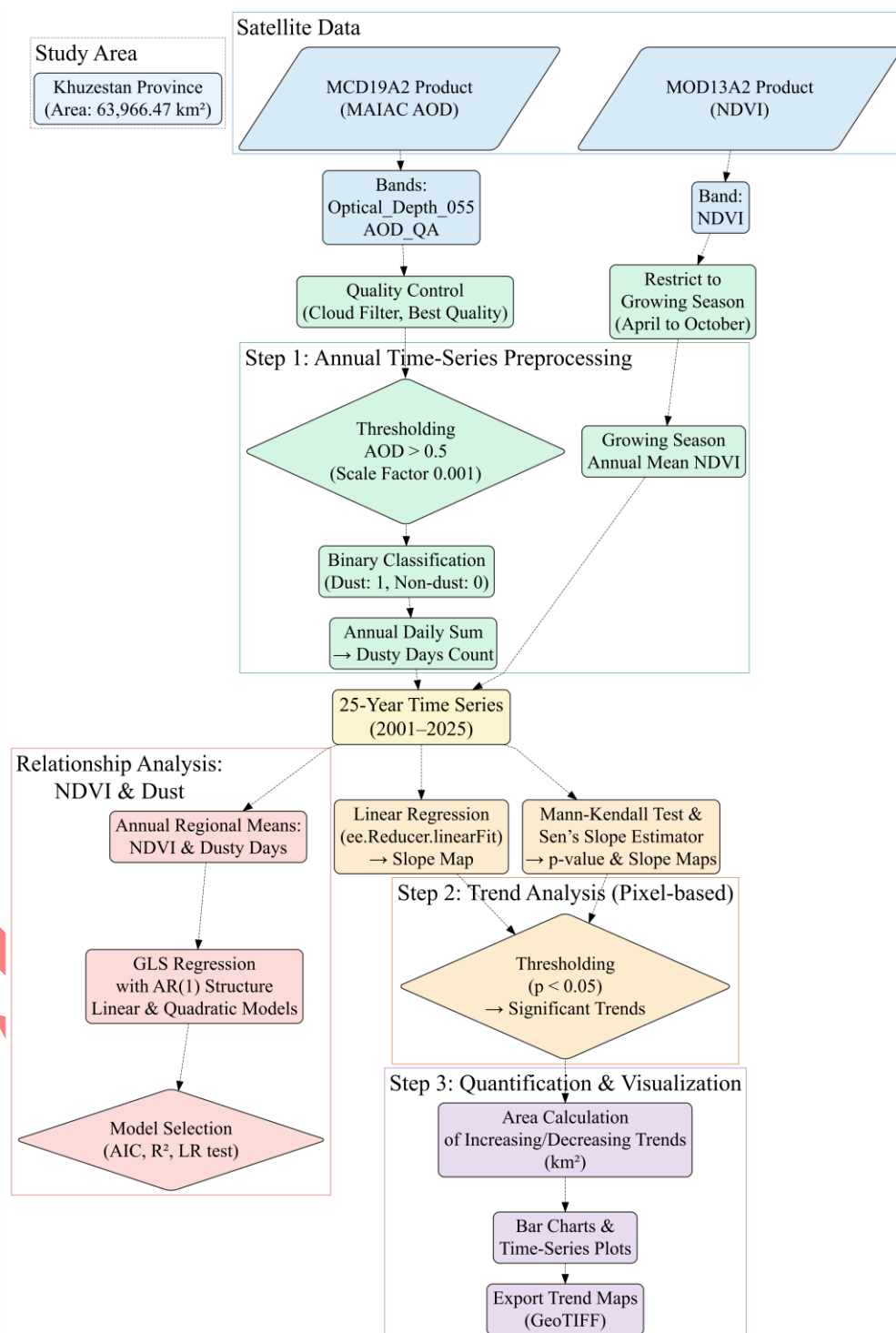
^۷ Quantification and Visualization

^۸ Generalized Least Squares - GLS

^۹ Akaike information criterion - AIC

^{۱۰} Coefficient of determination

(R^2) و آزمون نسبت درستنمایی^۱ (LR test) انجام گرفت. تمام تحلیل‌های آماری با استفاده از زبان برنامه‌نویسی R و بسته nlme انجام گرفت (Pinheiro et al., 2024). به منظور تفهیم بهتر روش تحقیق پژوهش حاضر طرح‌واره آن در شکل ۲، نیز قابل استناد است.



شکل ۲، طرح‌واره پژوهش حاضر
Fig 2. Diagram of the present study

^۱ Likelihood Ratio Test – LR test

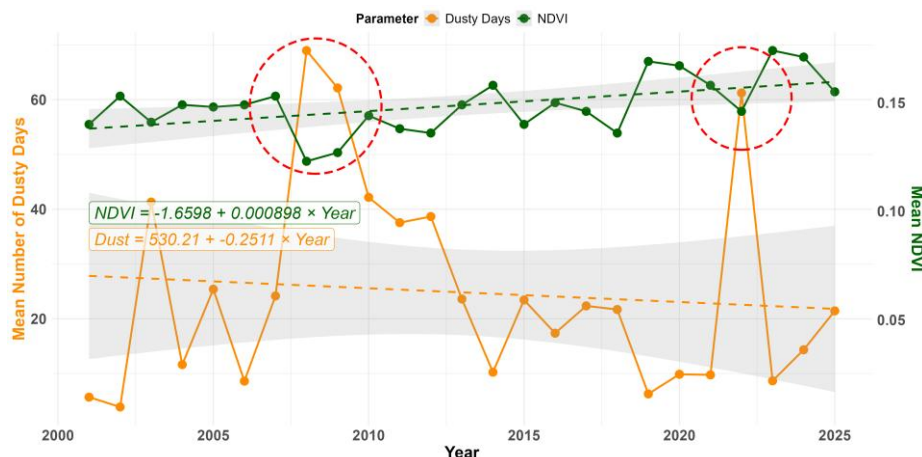
محدودیت‌های روش‌شناختی

روش مورد استفاده در این پژوهش با محدودیت‌هایی همراه است که لازم است در تفسیر نتایج مد نظر قرار گیرند. نخست، آستانه AOD بزرگ‌تر از ۰/۵ برای شناسایی روزهای غبارآلود، اگرچه در مطالعات منطقه‌ای به کار رفته، ممکن است قادر به تفکیک کامل گرد و غبار از سایر انواع هواویزها (همچون آلودگی‌های صنعتی) نباشد. استفاده از شاخص‌های تکمیلی مانند نمای آنگستروم می‌تواند این تفکیک را در مطالعات آتی بهبود بخشد. دوم، وضوح مکانی ۱ کیلومتری محصولات MODIS ممکن است ناهمگنی‌های درون‌پیکسلی را نادیده بگیرد. سوم، پوشش ابر و محدودیت‌های الگوریتم MAIAC در تشخیص ابرهای نازک می‌تواند بر دقت داده‌های AOD تأثیرگذار باشد، هرچند با اعمال فیلترهای کیفی سختگیرانه، این اثر تا حد امکان کاهش داده شد. در نهایت، تحلیل روند بر اساس داده‌های سالانه، جزئیات درون‌سالانه و تغییرات فصلی را منعکس نمی‌کند.

نتایج و بحث

تحلیل سری‌های زمانی فراوانی گرد و غبار و پوشش گیاهی

بررسی سری‌های زمانی میانگین سالانه تعداد روزهای غبارآلود و شاخص NDVI فصل رشد در استان خوزستان طی دوره ۲۵ ساله (۲۰۰۱-۲۰۲۵)، یک رابطه معکوس و معنادار را میان این دو متغیر آشکار می‌سازد (شکل ۳). در سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹ که میانگین روزهای غبارآلود در کل استان به ترتیب به اوج ۶۹ و ۶۲ روز رسیده، شاخص NDVI به کمترین مقادیر خود در طول دوره مطالعاتی (به ترتیب ۰/۱۲۳ و ۰/۱۲۷) تنزل یافته است. در مقابل، در سال ۲۰۱۹ که میانگین روزهای غبارآلود به حدود ۶ روز کاهش یافته، NDVI به حدود ۰/۱۶۹ جهش کرده است. این هم‌زمانی آشکار، نشان‌دهنده نقش تعیین‌کننده نوسانات اقلیمی، به‌ویژه دوره‌های خشکسالی و ترسالی، در کنترل هم‌زمان پوشش گیاهی و فراوانی گرد و غبار است. سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹ با یکی از شدیدترین خشکسالی‌های منطقه خاورمیانه مصادف بود که به کاهش چشمگیر رطوبت خاک، افت شدید پوشش گیاهی و در نتیجه فعال‌شدن گسترده کانون‌های داخلی و خارجی گرد و غبار انجامید. این یافته با نتایج گزارش‌شده در پژوهش‌های پیشین که سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹ را به‌عنوان اوج رخداد‌های گرد و غبار در خوزستان مستند کرده‌اند، کاملاً همسو است (Namdari et al., 2016; Noroozi & Shoaee, 2018). در مقابل، بارش‌های سیل‌آسای سال ۲۰۱۹ به آبیگری تالاب‌ها، احیای پوشش گیاهی مرتعی و تثبیت طبیعی خاک منجر شد و از برخاست ذرات گرد و غبار به‌طور محسوسی جلوگیری کرد. این الگوی نوسانی که در آن کاهش NDVI با افزایش گرد و غبار همبستگی دارد، با مکانیسم شناخته‌شده تأثیر پوشش گیاهی بر کاهش سرعت باد سطحی و افزایش چسبندگی خاک از طریق ریشه‌ها و مواد آلی مطابقت دارد (Goudie, 2014). شایان ذکر است که پس از سال ۲۰۱۹، روندی از نوسانات با دامنه کمتر در هر دو متغیر مشاهده می‌شود که ممکن است نشان‌دهنده تغییر تدریجی در رژیم بارشی یا اثرات مداخلات مدیریتی در برخی کانون‌ها باشد.



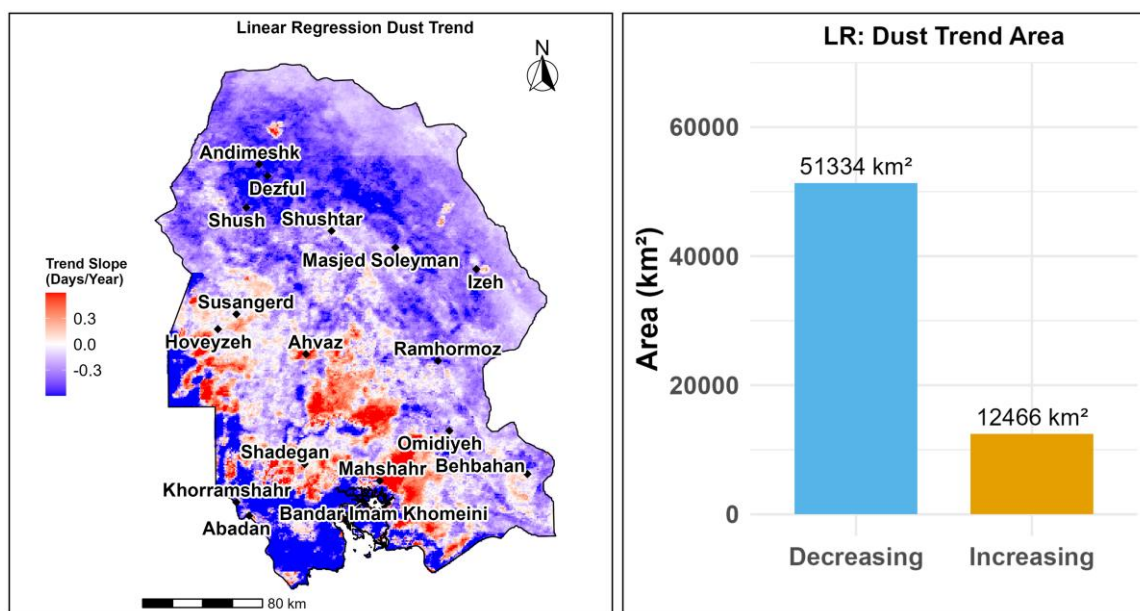
شکل ۳. نمودار سری‌های زمانی میانگین روزهای غبارآلود و شاخص NDVI استان خوزستان
 Fig 3. Time series plot of the average number of dusty days and the NDVI index in Khuzestan province

تحلیل فضایی روند فراوانی گرد و غبار

تحلیل فضایی روند ۲۵ ساله فراوانی گرد و غبار، استان خوزستان را به دو ناحیه متمایز شمالی و جنوبی تقسیم می‌کند. نقشه رگرسیون خطی (شکل ۴) یک نوار افزایشی گسترده در امتداد نوار جنوبی و غربی استان، از سوسنگرد تا بهبهان، و روندهای کاهشی را در بخش‌های وسیعی از نیمه شمالی آشکار می‌سازد. بر اساس این روش، مساحت دارای روند افزایشی ۱۲,۴۶۶ کیلومتر مربع و مساحت دارای روند کاهشی ۵۱,۳۳۴ کیلومتر مربع برآورد شد. با این حال، آزمون من-کندال (شکل ۵) که صرفاً روندهای پایدار و معنادار ($p < 0.05$) را حفظ می‌کند، تصویر متفاوت‌تری ارائه می‌دهد: از کل مساحت استان، ۵,۹۹۳ کیلومتر مربع روند افزایشی معنادار و ۱۶,۰۲۳ کیلومتر مربع روند کاهشی معنادار داشته‌اند و مابقی استان (حدود ۴۱,۹۵۰ کیلومتر مربع) فاقد روند معنادار بوده است. این اختلاف فاحش میان دو روش، نشان می‌دهد که بخش عمده‌ای از تغییرات نمایش داده‌شده در رگرسیون خطی، ناشی از نوسانات تصادفی و فاقد پایداری آماری است و برنامه‌ریزی مدیریتی صرفاً بر مبنای آن‌ها می‌تواند گمراه‌کننده باشد.

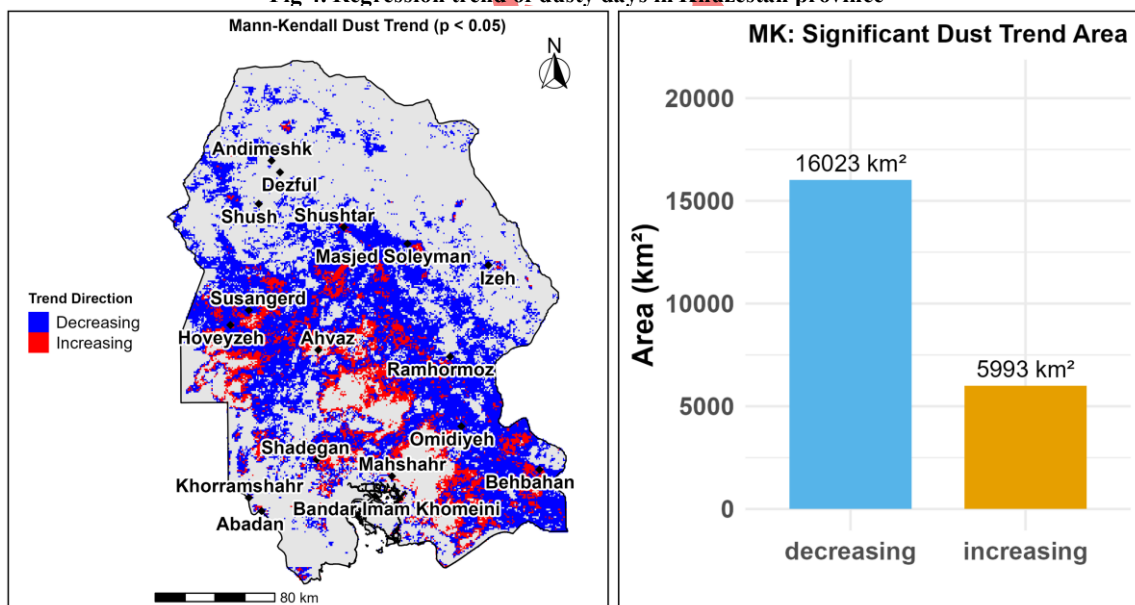
کانون اصلی افزایش معنادار گرد و غبار در آزمون من-کندال، همچنان در همان نوار جنوبی و غربی، از سوسنگرد تا بهبهان، متمرکز است. این الگوی فضایی بازتاب هم‌افزایی دو عامل اصلی است: نخست، این مناطق در مسیر مستقیم ورود توفان‌های گرد و غبار با منشأ خارجی (به‌ویژه از عراق و عربستان سعودی) قرار دارند (Daniali et al., 2019; Dargahian et al., 2023)؛ دوم، تحلیل روند NDVI آشکار می‌کند که حدود گستره تخمینی همین محدوده‌ها بیشترین نرخ تخریب پوشش گیاهی را تجربه کرده و این تخریب، آستانه فرسایش بادی را کاهش داده است. استمرار روند افزایشی در این نوار جنوبی طی ۲۵ سال، علیرغم نوسانات اقلیمی، نشان‌دهنده غلبه عوامل انسانی و مدیریتی (نظیر کاهش حق‌آبه تالاب‌ها، تغییر کاربری اراضی و چرای مفرط) بر عوامل اقلیمی در بلندمدت است. این تفسیر با یافته‌های پژوهش‌های پیشین که نشان داده‌اند روند افزایشی AOD در خوزستان معنادار بوده و با کاهش بارش و رطوبت خاک همبستگی بالایی دارد، همخوانی دارد (Ghomeshion et al., 2023).

در مقابل، روند کاهشی معنادار گرد و غبار در بخش‌هایی از نیمه شمالی و شرقی استان مشاهده می‌شود. این مناطق که در دامنه‌های زاگرس واقع شده‌اند، از پوشش گیاهی پایداری برخوردار بوده و توپوگرافی مرتفع آن‌ها به‌عنوان سدی در برابر نفوذ توفان‌های گرد و غبار از غرب و جنوب عمل می‌کند. این الگوی دوگانه شمالی-جنوبی در توزیع گرد و غبار، با نتایج پژوهش‌هایی که با استفاده از داده‌های ایستگاهی و تصاویر ماهواره‌ای بیشترین فراوانی را در نیمه غربی و جنوبی استان گزارش کرده‌اند، مطابقت دارد (Ahadi et al., 2021; Ghaffarian Malmiri et al., 2023).



شکل ۴، روند رگرسیون روزهای غبار آلود استان خوزستان

Fig 4. Regression trend of dusty days in Khuzestan province



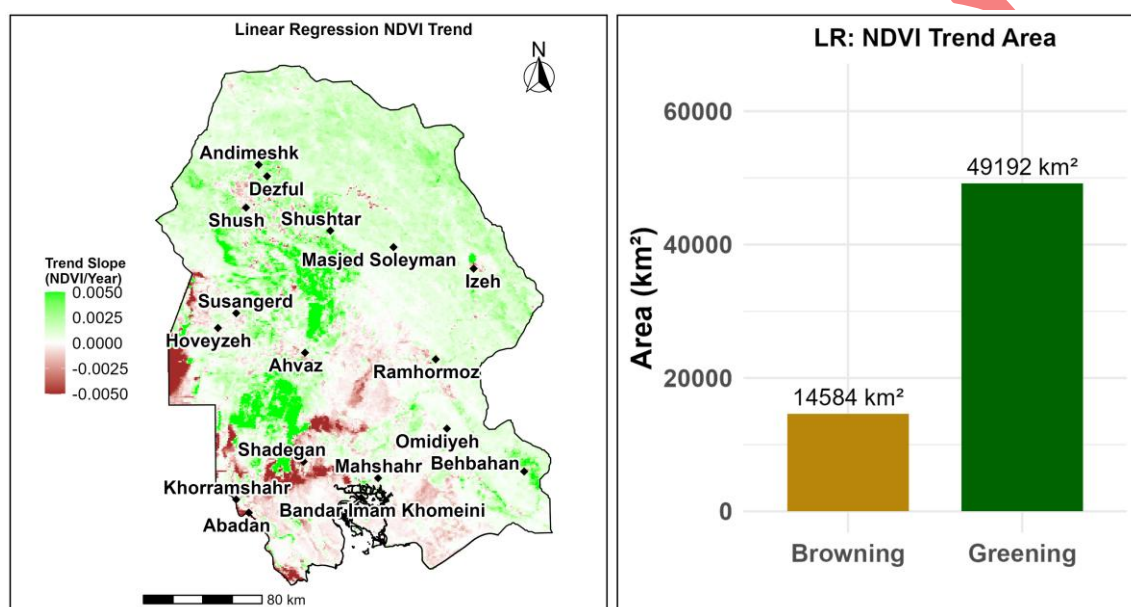
شکل ۵، روند من-کندال روزهای غبار آلود استان خوزستان

Fig 5. Mann-Kendall trend of dusty days in Khuzestan province

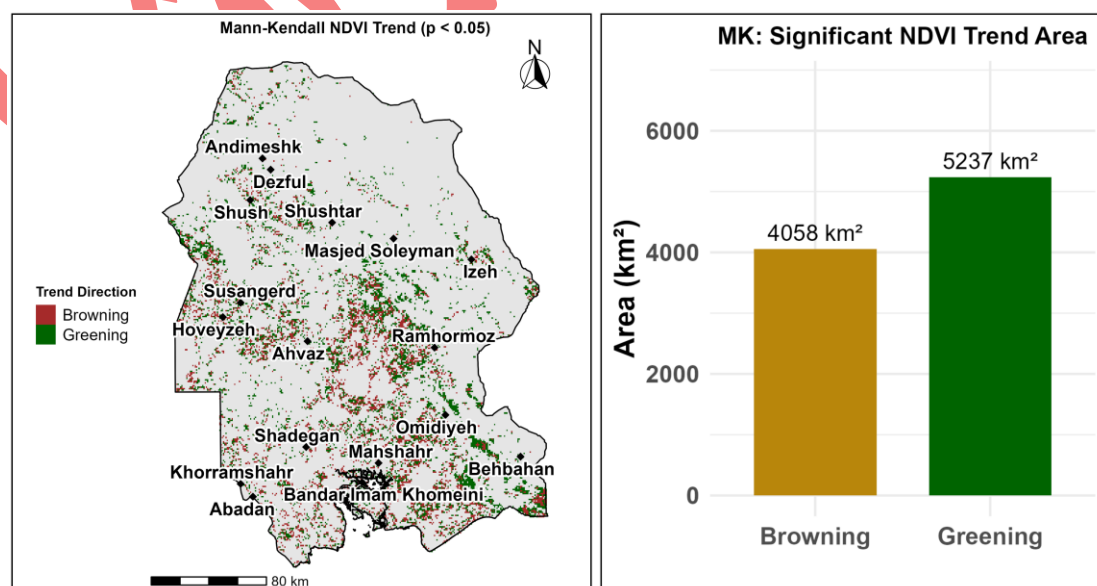
تحلیل فضایی روند پوشش گیاهی

نقشه رگرسیون خطی NDVI (شکل ۶) نواحی مرکزی، غربی، جنوبی و جنوب غربی استان را با روند تخریب (مساحت ۱۴,۵۸۴ کیلومتر مربع) و نواحی شمالی و شرقی را با روند سبز شدن (مساحت ۴۹,۱۹۲ کیلومتر مربع) نمایش می‌دهد. آزمون من-کندال (شکل ۷) اما نشان می‌دهد که تنها ۴,۰۵۸ کیلومتر مربع از این روندهای تخریب و ۵,۲۳۷ کیلومتر مربع از روندهای سبز شدن از نظر آماری معنادار هستند ($p < 0.05$)، و بخش عمده استان (حدود ۵۴,۶۷۱ کیلومتر مربع) فاقد روند معنادار در پوشش گیاهی است. این اختلاف میان مساحت‌های رگرسیون خطی و من-کندال، بار دیگر اهمیت استفاده از آزمون‌های معناداری آماری را برای تفکیک تغییرات واقعی از نوسانات کوتاه‌مدت تأکید می‌کند.

کانون‌های اصلی تخریب معنادار پوشش گیاهی در نواحی پیرامون تالاب‌های هورالعظیم (در غرب) و شادگان (در جنوب)، اراضی کشاورزی رها شده در جنوب و جنوب شرق اهواز، و محدوده شهرهای آبادان، خرمشهر و ماهشهر متمرکز شده‌اند. کاهش NDVI در این مناطق، که غالباً به کاهش ورودی آب به تالاب‌ها و تغییر کاربری اراضی نسبت داده می‌شود، سطح خاک را بدون محافظ رها کرده و شرایط را برای فرسایش بادی مساعد ساخته است (Dinarvand et al., 2018). این یافته‌ها با نتایج پژوهش‌هایی که کاهش ۳۰ درصدی سطح پوشش گیاهی و افزایش اراضی بایر در نیمه غربی خوزستان را طی سال‌های اخیر مستند کرده‌اند، همخوانی دارد (Noroozi & Shoaie, 2018). در مقابل، روند سبز شدن معنادار در بخش‌هایی از شمال و شمال شرق استان مشاهده می‌شود که می‌تواند به افزایش بارش‌ها در دهه اخیر، کاهش چرای دام در برخی مراتع، یا اجرای پروژه‌های آبخیزداری مرتبط باشد.



شکل ۶. روند رگرسیون شاخص NDVI، استان خوزستان
Fig 6. Regression trend of the NDVI index in Khuzestan province



شکل ۷. روند من-کندال شاخص NDVI، استان خوزستان
Fig 7. Mann-Kendall trend of the NDVI index in Khuzestan province

انطباق فضایی کانون‌های بحرانی و تأیید نقش کانون‌های داخلی

یکی از یافته‌های کلیدی این پژوهش، انطباق فضایی قابل توجه میان کانون‌های افزایش معنادار گرد و غبار و پهنه‌های تخریب معنادار پوشش گیاهی در جنوب و غرب استان است. هم‌مکانی این دو روند در محدوده‌ای به وسعت تقریبی ۴,۰۵۸ کیلومتر مربع (عمدتاً دربرگیرنده هویزه، شادگان، جنوب اهواز، بندر امام خمینی، ماهشهر، آبادان، خرمشهر و سوسنگرد)، این فرضیه را که خشک‌شدن تالاب‌ها و تخریب اراضی کشاورزی به فعال‌شدن کانون‌های داخلی گرد و غبار انجامیده است، قویاً تأیید می‌کند. این نتیجه از سه منظر با شواهد ارائه شده در ادبیات پژوهش همسو است: نخست، از منظر پایش آماری، پژوهش‌های پیشین نشان داده‌اند که روند افزایشی ریزگرد در نواحی جنوب‌شرقی، جنوب و مرکزی خوزستان شدیدتر از سایر مناطق بوده که بیانگر توسعه فعالیت کانون‌های داخلی در دهه‌های اخیر است (Ahadi et al., 2021). دوم، از منظر منشأیابی، مطالعاتی که با استفاده از مدل‌های عددی و تطابق بیواثر و سل‌ها انجام شده، تالاب هورالعظیم را به‌عنوان منشأ داخلی اصلی گرد و غبار شهرهای آبادان و خرمشهر شناسایی کرده‌اند (Tajiki et al., 2021). سوم، از منظر بوم‌شناختی، پژوهش‌های میدانی ثابت کرده‌اند که احیای پوشش گیاهی بومی در کانون‌های بحرانی (نظیر تالاب‌های منصوریه و شریفیه) پس از آب‌گیری، به افزایش تنوع گونه‌ای و کاهش تولید گرد و غبار محلی منجر می‌شود (Dinarvand et al., 2021).

نکته حائز اهمیت از منظر مدیریت بحران آن است که تراکم بالای جمعیت در کلان‌شهرهایی مانند اهواز و آبادان که درست در همین کانون بحرانی جای دارند، این محدوده به‌ظاهر کوچک (حدود ۴,۰۵۸ کیلومتر مربع، معادل کمتر از ۱۰ درصد مساحت استان) را به کانون پیامدهای سنگین بهداشتی، اقتصادی و اجتماعی تبدیل کرده است (Ahadi et al., 2020; Geravandi et al., 2018; Yazdani et al., 2024). از این رو، لزوم تمرکز راهکارهای مدیریتی به‌طور ویژه و اولویت‌دار بر این پهنه‌های بحرانی با اهمیت قلمداد می‌شود.

تحلیل رابطه غیرخطی NDVI و فراوانی گرد و غبار

نتایج برازش مدل رگرسیون حداقل مربعات تعمیم‌یافته (GLS) با ساختار خودهمبستگی (AR1) در جدول ۱، ارائه شده است. بر اساس این نتایج، ضریب NDVI برابر با $-۸۶۲۰/۵۲$ ($p = ۰/۰۲۹$) و ضریب $NDVI^2$ برابر با $۲۵۳۴۵/۳۹$ ($p = ۰/۰۵۱$) به دست آمد. معیار آکائیک (AIC) برای مدل خطی $۲۰۴/۲۲$ و برای مدل درجه دوم $۲۰۳/۹۶$ محاسبه شد که بیانگر برتری نسبی مدل درجه دوم است. ضریب تعیین (R^2) نیز از $۰/۵۰$ در مدل خطی به $۰/۵۹$ در مدل درجه دوم افزایش یافت که نشان می‌دهد مدل غیرخطی بخش بیشتری از واریانس را تبیین می‌کند.

جدول ۱. ضرایب مدل GLS درجه دوم با ساختار AR(1)

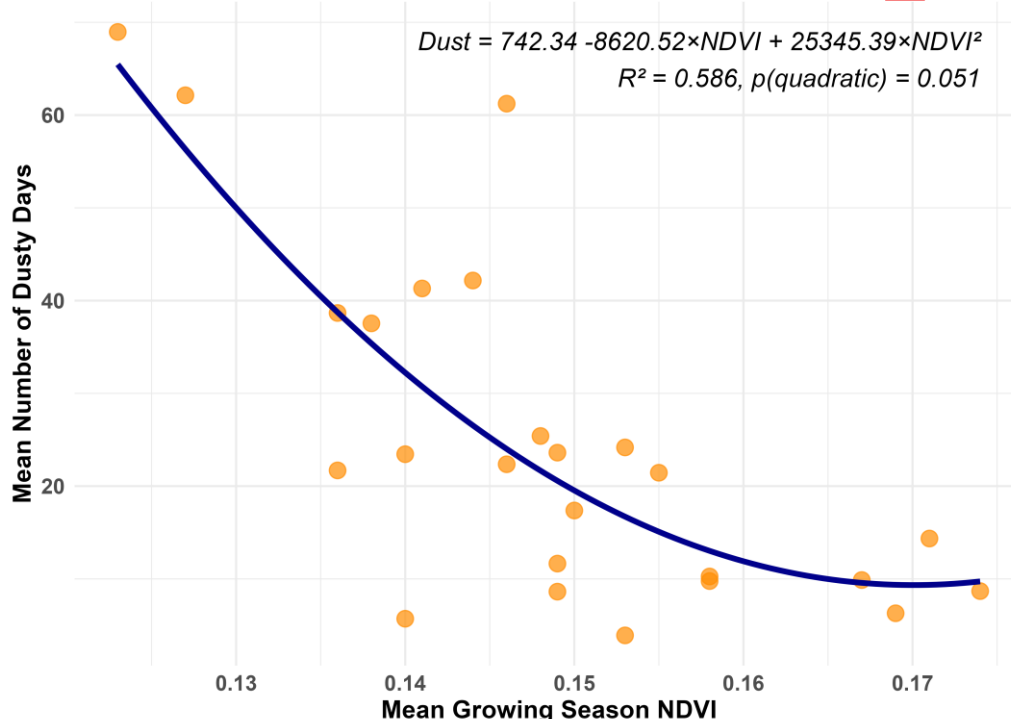
Table 1. Coefficients of the quadratic GLS model with AR(1) structure

p-value	t-value	Std. Error	Estimate	Variable
0.013	2.695	275.49	742.34	Intercept
0.029	-2.337611229	3687.75	-8620.51871	NDVI
0.051	2.062	12290.44	25345.39	NDVI ²

شکل ۸ این رابطه غیرخطی را به‌صورت بصری تأیید می‌کند: با افزایش NDVI از حدود $۰/۱۲$ به $۰/۱۴$ ، تعداد روزهای غبارآلود به شدت کاهش می‌یابد، اما در مقادیر شاخص NDVI بالاتر از $۰/۱۶$ ، شیب منحنی به تدریج کاهش یافته و به مقادیر نزدیک به صفر میل می‌کند. این الگو نشان‌دهنده یک اثر اشباع^۱ در رابطه پوشش گیاهی و گرد و غبار است. اثر اشباع بدین معناست که تأثیر مثبت پوشش گیاهی در کاهش فرسایش بادی، با افزایش تراکم آن، یک‌نواخت و خطی نیست، بلکه یک حد آستانه و یک سقف کارایی دارد. در مناطقی که پوشش گیاهی بسیار ضعیف است (مانند نواحی جنوبی خوزستان با NDVI پایین)، خاک تقریباً لخت و بی‌دفاع است. در این شرایط، حتی یک افزایش اندک در NDVI بطور مثال در اثر بارش فصلی یا یک پروژه نهال‌کاری کوچک می‌تواند مانند یک سپر محافظ عمل کرده، سرعت باد در سطح خاک را به‌طور محسوسی کاهش داده و از

^۱ Saturation Effect

برخاستن حجم عظیمی از ذرات گرد و غبار جلوگیری کند. این همان ناحیه‌ای است که بازدهی مداخلات احیایی در آن بسیار بالاست. با این حال، با افزایش بیشتر پوشش گیاهی و رسیدن به یک آستانه بهینه که در این پژوهش، $NDVI \approx 0.16$ است، سطح خاک تقریباً به‌طور کامل محافظت می‌شود و نقش پوشش گیاهی به حداکثر کارایی خود می‌رسد. از این نقطه به بعد، افزایش بیشتر تراکم پوشش گیاهی و در نتیجه $NDVI$ تأثیر قابل‌توجهی بر کاهش بیشتر گرد و غبار ندارد، چرا که عوامل محدودکننده دیگری مانند سرعت باد منطقه‌ای، رطوبت لایه‌های زیرین خاک، و ویژگی‌های فیزیکی خود رسوبات، به کنترل‌کننده‌های اصلی تبدیل می‌شوند. این مفهوم دقیقاً با یافته‌های پیشین، از جمله آستانه‌های ۱۰ و ۴۰ درصدی پوشش گیاهی برای کنترل فرسایش بادی (Jiang et al., 2019) هم‌خوانی دارد و به‌طور خاص نشان می‌دهد که چرا سرمایه‌گذاری برای احیای پوشش گیاهی در مناطق بحرانی جنوبی استان، بازدهی به‌مراتب بیشتری نسبت به مناطق شمالی دارد.



شکل ۸. رابطه درجه دوم GLS بین $NDVI$ و روزهای غباری. منحنی آبی پررنگ نشان‌دهنده مدل برازش شده است؛ معادله و آماره‌ها در گوشه بالا-راست درج شده‌اند

Fig 8. Quadratic GLS relationship between $NDVI$ and dusty days. The solid blue curve shows the fitted model; equation and statistics are given in the upper-right corner

وجود رابطه غیرخطی میان پوشش گیاهی و فرسایش بادی در مطالعات پیشین نیز مستند شده است. در پژوهش (Mao et al., 2013) در شمال شرق آسیا، مشاهده گردید که افزایش هر ۰/۱ واحد $NDVI$ در مناطق حساس به فرسایش، به‌طور میانگین به کاهش ۴ روزه توفان‌های گرد و غبار در فصل بهار منجر می‌شود. همچنین، در مطالعه (Jiang et al., 2019) در فلات لس‌چین با بهره‌گیری از تحلیل خطوط محدودیت، چنین نتیجه‌گیری شد که پوشش گیاهی کمتر از ۱۰ درصد تأثیر ناچیزی بر کاهش سرعت باد سطحی دارد و اثر حفاظتی آن در پوشش‌های بالاتر از ۴۰ درصد به حداکثر می‌رسد. این یافته‌ها با مفهوم اثر اشباع مشاهده‌شده در پژوهش حاضر هم‌خوانی داشته و نشان داده می‌شود که حساسیت فراوانی گرد و غبار به تغییرات پوشش گیاهی در بازه‌های مختلف $NDVI$ یکسان نیست. در مقیاس منطقه‌ای نیز در مطالعه (Ebrahimi-Khusfi et al., 2021) در غرب ایران با استفاده از الگوریتم‌های داده‌کاوی، آشکار گردید که اهمیت نسبی پوشش گیاهی در کنترل گرد و غبار در فصول گرم کاهش یافته و سرعت باد نقش غالب را ایفا می‌کند. این شواهد مجموعاً از این ایده حمایت می‌کنند که رابطه $NDVI$ و فراوانی گرد و غبار صرفاً خطی نبوده و تابعی از سایر عوامل محیطی و دامنه تغییرات پوشش گیاهی است.

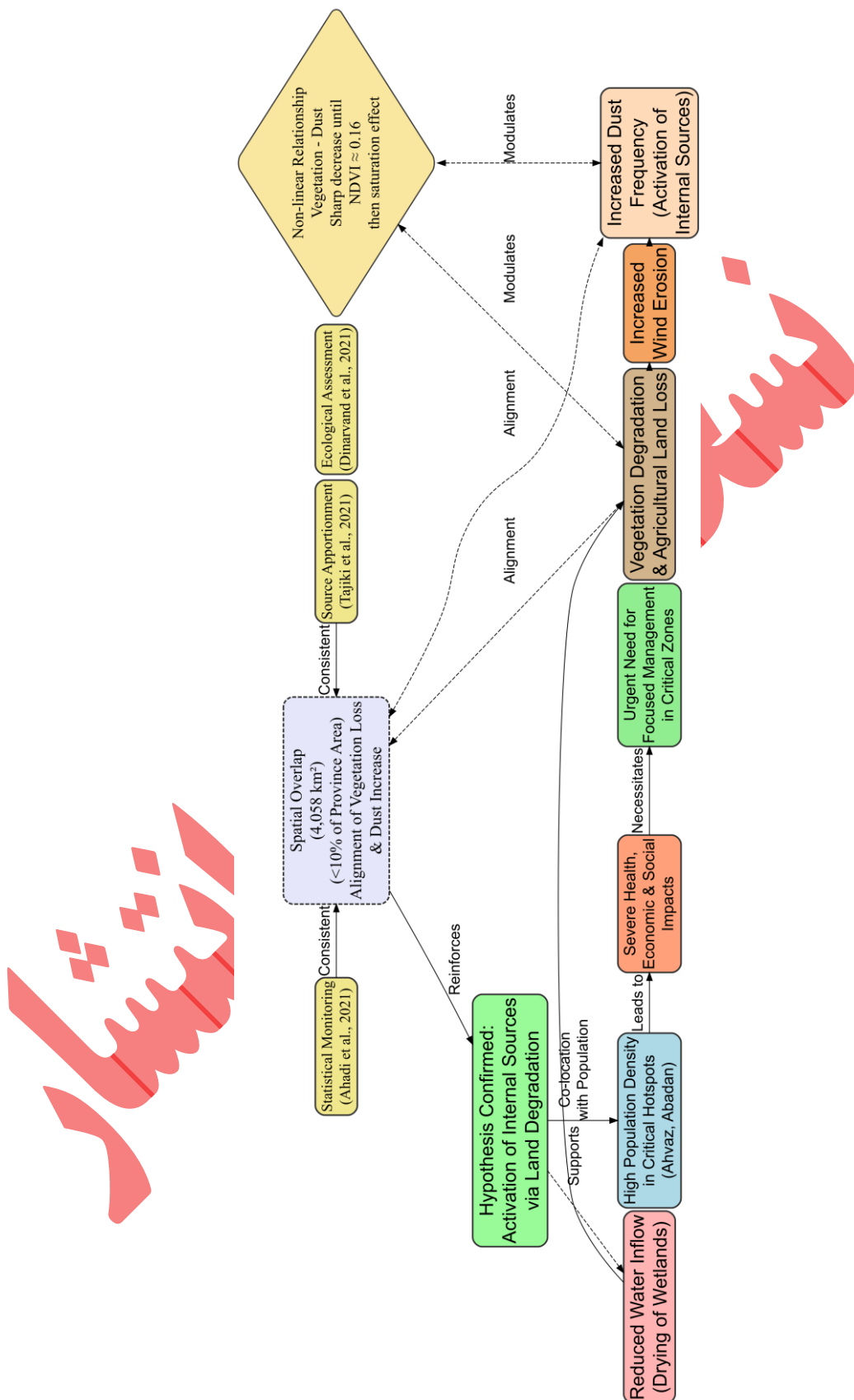
از منظر بوم‌شناختی نیز در بررسی جامع (Goudie, 2014) تأکید گردیده است که اگرچه پوشش گیاهی به‌عنوان مهم‌ترین عامل کنترل‌کننده فرسایش بادی شناخته می‌شود، اثربخشی آن به‌شدت به نوع، تراکم و توزیع فضایی پوشش گیاهی وابسته است. در همین راستا، در مطالعه‌ای که در دو کانون گرد و غبار خوزستان انجام شد، مشاهده گردید که احیای پوشش گیاهی بومی پس از آب‌گیری، ضمن افزایش تنوع گونه‌ای، به کاهش چشمگیر تولید گرد و غبار محلی منجر می‌شود (Dinarvand et al., 2021). این یافته با نتایج پژوهش حاضر همسو بوده و نشان می‌دهد که مناطق با وضعیت پوشش گیاهی ضعیف ($NDVI < 0.14$) از حساسیت بالاتری نسبت به مداخلات احیایی برخوردارند؛ به‌طوری‌که بهبود اندک پوشش گیاهی در این محدوده‌ها، بیشترین بازدهی را در کاهش رخدادهای گرد و غبار به همراه دارد.

اگرچه آزمون نسبت درستمایی (LR test) با آماره $2/26$ و سطح معنی‌داری $0/13$ ، تفاوت آماری معناداری را میان دو مدل خطی و درجه دوم تأیید نکرد، انتخاب مدل غیرخطی بر اساس دو ملاحظه صورت پذیرفت: نخست برتری AIC و R^2 مدل درجه دوم نسبت به مدل خطی که در جدول ۱، منعکس شده است و نکته دیگر سازگاری شکل منحنی ارائه‌شده در شکل ۸، با مبانی نظری و شواهد تجربی پیشین است. با این وجود، احتیاط در تعمیم این رابطه ضروری است؛ $NDVI$ در مناطق خشک ممکن است تحت تأثیر عواملی مانند رطوبت خاک، نوع گونه‌های گیاهی و تغییرات کاربری اراضی قرار گیرد که می‌توانند بر شکل رابطه با گرد و غبار اثر بگذارند (Dinarvand et al., 2018; Heidarian et al., 2018). پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی با حجم نمونه بزرگ‌تر، تفکیک فصلی و به‌کارگیری شاخص‌های مکمل پوشش گیاهی (از جمله EVI که حساسیت کمتری به اشیاع دارد)، این رابطه مورد آزمون مجدد قرار گیرد.

در مجموع، شواهد ارائه شده در این پژوهش تأکید می‌کنند که نوسانات اقلیمی (خشکسالی و ترسالی) محرک اصلی تغییرات سالانه گرد و غبار در خوزستان است؛ اما روند بلندمدت تخریب پوشش گیاهی در جنوب و غرب استان، تاب‌آوری این منطقه را در برابر فرسایش بادی به‌طور پایدار کاهش داده است. تحلیل‌های سری زمانی نشان داد که در اوج خشکسالی (2008 با 69 روز غبارآلود) $NDVI$ به $0/123$ سقوط کرده، درحالی‌که در ترسالی 2019 تنها 6 روز غبارآلود و $NDVI$ به $0/169$ جهش یافته است. این هم‌نوسانی آشکار، پیوند تنگاتنگ اقلیم-پوشش گیاهی-گرد و غبار را به‌روشنی نمایان می‌سازد.

تلفیق دو روش تحلیل روند (رگرسیون خطی و آزمون من-کندال) نشان داد که تنها $5,993$ کیلومتر مربع از استان روند افزایشی معنادار گرد و غبار و $4,058$ کیلومتر مربع روند تخریب معنادار پوشش گیاهی را تجربه کرده‌اند، درحالی‌که نزدیک به $42,000$ کیلومتر مربع از مساحت استان فاقد هرگونه روند معنادار است. این اختلاف، ضرورت به‌کارگیری آزمون‌های معناداری آماری را برای جلوگیری از برنامه‌ریزی‌های گمراه‌کننده بر اساس روندهای ظاهری برجسته می‌سازد. کانون‌های بحرانی شناسایی‌شده که هم‌زمان با افزایش معنادار گرد و غبار و تخریب معنادار پوشش گیاهی مواجه‌اند، عمدتاً بر مناطق اطراف تالاب‌های هورالعظیم و شادگان، اراضی جنوب و جنوب‌شرق اهواز، و نوار ساحلی از آبادان تا ماهشهر منطبق هستند. شکل ۹، زنجیره منطقی منتهی به تولید گرد و غبار محلی در این کانون‌ها را به‌صورت یک مدل مفهومی مصور می‌سازد: کاهش حق‌آبه و خشک‌شدن تالاب‌ها $\rightarrow$ تخریب پوشش گیاهی $\rightarrow$ افزایش فرسایش بادی $\rightarrow$ افزایش فراوانی گرد و غبار.

علاوه بر این، تحلیل رابطه $NDVI$ و فراوانی گرد و غبار با استفاده از مدل GLS درجه دوم، یک الگوی غیرخطی از نوع اثر اشیاع را آشکار ساخت. بر اساس این مدل ($AIC = 203.96$, $R^2 = 0.59$)، بیشترین حساسیت کاهش گرد و غبار به افزایش پوشش گیاهی در بازه $NDVI$ کمتر از $0/14$ مشاهده می‌شود و در $NDVI$ های بالاتر از $0/16$ ، شیب کاهشی به صفر نزدیک می‌شود. این یافته نشان می‌دهد که مداخلات احیایی در پهنه‌های با پوشش گیاهی ضعیف (که عمدتاً در جنوب و غرب استان متمرکزند) بازدهی بسیار بالاتری در کاهش گرد و غبار نسبت به مناطق با پوشش گیاهی مطلوب‌تر دارند. در مجموع، شناسایی پهنه‌های بحرانی با استناد به روندهای معنادار آماری و درک رابطه غیرخطی پوشش گیاهی و گرد و غبار، مبنایی علمی برای هدف‌گذاری دقیق و اولویت‌بندی اقدامات مدیریتی در مناطق جنوبی و غربی استان فراهم می‌شود.



شکل ۹. مدل مفهومی از زنجیره بروز گرد و غبار محلی در استان خوزستان

Fig 9. Conceptual model of the local dust generation chain in Khuzestan province

نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر با بهره‌گیری از پردازش ابری و تحلیل سری‌های زمانی ۲۵ ساله (۲۰۰۱-۲۰۲۵)، تصویری کمی از رابطه متقابل گرد و غبار و سلامت پوشش گیاهی در استان خوزستان ارائه شد. نتایج نشان داد که رابطه‌ای معکوس و معنادار میان NDVI فصل رشد و فراوانی روزهای غبارآلود برقرار است؛ چنان‌که در اوج خشکسالی‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹، میانگین روزهای غبارآلود به ترتیب به ۶۹ و ۶۲ روز رسید و NDVI به ۰/۱۲۳ و ۰/۱۲۷ کاهش یافت، درحالی‌که در سال پرباران ۲۰۱۹، تنها ۶ روز غبارآلود و NDVI برابر با ۰/۱۶۹ ثبت گردید.

تحلیل فضایی با به‌کارگیری هم‌زمان رگرسیون خطی و آزمون من-کندال ناهمگونی آشکاری را در سطح استان آشکار ساخت. بر اساس رگرسیون خطی، مساحتی بالغ بر ۱۲,۴۶۶ کیلومتر مربع روند افزایشی گرد و غبار نشان داد، اما آزمون من-کندال تأیید کرد که تنها ۵,۹۹۳ کیلومتر مربع از این روند از نظر آماری معنادار ($p < 0/05$) است و نزدیک به ۴۲,۰۰۰ کیلومتر مربع فاقد روند معنادار می‌باشد. این اختلاف، ناپایداری بخش بزرگی از تغییرات و ضرورت استفاده از آزمون‌های معناداری برای پرهیز از برنامه‌ریزی‌های گمراه‌کننده را برجسته ساخت.

کانون‌های افزایش معنادار گرد و غبار منطبق بر نوار جنوبی-غربی استان (سوسنگرد تا بهبهان) شناسایی شدند که هم‌زمان با بیشترین نرخ تخریب پوشش گیاهی همراه بوده‌اند. مساحت پهنه‌های دارای تخریب معنادار NDVI برابر با ۴,۰۵۸ کیلومتر مربع برآورد گردید که تقریباً در حدود همان نواحی متمرکز است. هم‌مکانی این دو روند، نقش کانون‌های داخلی ناشی از خشکی تالاب‌های هورالعظیم و شادگان و اراضی رهاشده کشاورزی را با استناد به شواهد پایش آماری، منشأیابی بیوآئروسول‌ها و پژوهش‌های میدانی احیای پوشش گیاهی تأیید کرد.

یکی از دستاوردهای برجسته این مطالعه، کشف رابطه غیرخطی از نوع اثر اشباع میان NDVI و فراوانی روزهای غبارآلود است. بر اساس مدل GLS درجه دوم، شیب کاهشی گرد و غبار در NDVI‌های پایین (کمتر از ۰/۱۴) بسیار تند است، اما در NDVI‌های بالاتر از ۰/۱۶ به تدریج به صفر میل می‌کند. این الگو نشان می‌دهد که مداخلات احیایی در مناطق با پوشش گیاهی بسیار ضعیف (عمدتاً در جنوب و غرب استان) می‌توانند بازدهی بسیار بالایی در کاهش گرد و غبار داشته باشند.

بر اساس نتایج این پژوهش، پیشنهاد می‌شود راهکارهای عملیاتی و احیایی شامل تأمین حق‌آبه زیست‌محیطی تالاب‌های هورالعظیم و شادگان، تثبیت بیولوژیکی خاک در اراضی رهاشده جنوب و جنوب‌شرق اهواز، و مدیریت پایدار کاربری اراضی، به‌طور ویژه و اولویت‌دار در کانون‌های بحرانی شناسایی شده (به‌ویژه پهنه‌ای به وسعت حدود ۴,۰۵۸ کیلومتر مربع در نوار جنوبی و غربی استان) متمرکز گردد. همچنین، پایش مستمر این مناطق با استفاده از سامانه‌های ماهواره‌ای و شاخص‌های ترکیبی NDVI و AOD، برای ارزیابی اثربخشی اقدامات مدیریت بحران و شناسایی زود هنگام تغییرات روندها ضروری است. مطالعات آتی می‌توانند با به‌کارگیری شاخص‌های تکمیلی، شناخت کامل‌تری از سازوکارهای حاکم بر پویایی گرد و غبار در این استان ارائه دهند. برای نمونه، تلفیق تحلیل‌های روند با مدل‌های ردیابی مسیر (همچون HYSPLIT) در مقیاس فصلی، امکان تفکیک منشأهای برون‌مرزی را از کانون‌های داخلی فراهم می‌آورد. همچنین، به‌کارگیری تصاویر راداری یا چندطیفی با قدرت تفکیک مکانی بالاتر (همچون Sentinel-2) برای پایش دقیق‌تر تغییرات سطح تالاب‌ها و تعیین آستانه‌های بحرانی خشکیدگی توصیه می‌شود. در نهایت، توسعه مدل‌های یادگیری ماشین برای پیش‌بینی فراوانی گرد و غبار بر اساس ترکیب متغیرهای پوشش گیاهی، رطوبت خاک و سرعت باد می‌تواند ابزاری کارآمد برای هشدار زود هنگام در اختیار مدیران منطقه‌ای قرار دهد.

- Ahadi, P., Khaledi, S., & Ahmadi, M. (2020). Investigating the long-term effect of dust on health to prevent its impacts in future planning: A case study of Khuzestan Province. *Journal of Regional Planning*, 10(39), 21–36. https://jzpm.marvdasht.iau.ir/article_3841.html [In Persian]
- Ahadi, P., Khaledi, S., & Ahmadi, M. (2021). Statistical monitoring of dust phenomenon in Khuzestan Province with an hourly approach. *Journal of Applied Research in Geographical Sciences*, 21(60), 259–277. <https://doi.org/10.52547/jgs.21.60.259> [In Persian]
- Al-Dabbagh, S. K. (2020). The use of aerosol optical properties in the identification of dust sources in Iraq. *Journal of Physics: Conference Series*, 1660(1), 012049. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1660/1/012049>
- Alizadeh, F., Falahatkar, S., Afzali, A., & Mousavi, S. M. (2025). Detection of internal dust storm centers and their transport and dispersion modelling in southwestern Iran. *Acta Geophysica*, 73(5), 4813–4829. <https://doi.org/10.1007/s11600-025-01557-x>
- Danesh Jafari, D., Amadeh, H., & Khonsiavashan, S. (2015). Estimated damage caused by the phenomenon of dust on people's health in Iran (Case Study: Provinces of Khuzestan, Kermanshah, and Kurdistan). *Journal of Environmental Studies*, 41(3). <https://doi.org/10.22059/jes.2015.55898>
- Daniali, M., & Karimi, N. (2019). Spatiotemporal analysis of dust patterns over Mesopotamia and their impact on Khuzestan Province, Iran. *Natural Hazards*, 97(1), 259–281. <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03641-0>
- 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(3), 565–583. <https://doi.org/10.1007/s12524-022-01648-y> [In Persian]
- Dinarvand, M., Fayaz, M., Behnamfar, K., Khaksarian, F., Yasrebi, B., & Arami, A. (2021). Assessment of species diversity and vegetation richness indices in two dust centers of Khuzestan Province. *Iranian Journal of Applied Ecology*, 9(4), 73–87. <https://sid.ir/paper/1059198/en> [In Persian]
- Dinarvand, M., Hashem, F., & Mohammad, K. (2018). Vegetation of dust sources in Khuzestan Province. *Journal of Iran Nature*, 3(3), 32–42. <https://doi.org/10.22092/irn.2018.116781> [In Persian]
- Ebrahimi-Khusfi, Z., Taghizadeh-Mehrjardi, R., Roustaei, F., Ebrahimi-Khusfi, M., Mosavi, A. H., Heung, B., Soleimani-Sardo, M., & Scholten, T. (2021). Determining the contribution of environmental factors in controlling dust pollution during cold and warm months of western Iran using different data mining algorithms and game theory. *Ecological Indicators*, 132, 108287. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108287>
- Faridi, S., Rahmani, S., Hashemi, N., Ghobadian, S., & Zokaei, M. S. (2021). The economic effects of dust storm. *Journal of Health and Hygiene*, 11(5), 699–713. <https://sid.ir/paper/412690/en> [In Persian]
- Geravandi, S., Yari, A. R., Jafari, M., Goudarzi, G., Vosoughi, M., Dastoorpoor, M., Farhadi, M., & Mohammadi, M. J. (2018). Effects of dust phenomenon and impacts with emphasis on dust problems and present solutions in Khuzestan (Iran). *Archives of Hygiene Sciences*, 7(2), 134. <https://doi.org/10.29252/ArchHygSci.7.2.134>
- Ghaffarian Malmiri, H., Kiani, A., & Arabi Ali Abad, F. (2023). Investigation of the potential of MODIS and Sentinel-5 sensors in estimating the amount of air aerosols (A case study: Khuzestan Province). *Journal of Physical Geography*, 16(62), 45–60. <https://sid.ir/paper/1504122/en> [In Persian]
- Ghomeshion, M., Vali, A., Ranjbar, A., & Mousavi, S. H. (2023). Investigation of spatio-temporal changes of dust storms and their relation to climatic factors in Khuzestan Province, Iran. *Desert*, 28(2), 205–215. <https://doi.org/10.22059/jdesert.2023.95505>
- Goudie, A. S. (2014). Desert dust and human health disorders. *Environment International*, 63, 101–113. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.10.011>
- Heidarian, P., Azhdari, A., Joudaki, M., Khatooni, J. D., & Firoozjaei, S. F. (2018). Integrating remote sensing, GIS, and sedimentology techniques for identifying dust storm sources: A case study in Khuzestan, Iran. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 46(7), 1113–1124. <https://doi.org/10.1007/s12524-018-0774-2>
- Jiang, C., Zhang, H., Zhang, Z., & Wang, D. (2019). Model-based assessment of soil loss by wind and water erosion in China's Loess Plateau: Dynamic change, conservation effectiveness, and strategies for sustainable restoration. *Global and Planetary Change*, 172, 396–413. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.11.002>
- Karami, R., & Etemadfard, H. (2025). Identification of dust sources using spatio-temporal tensor of aerosol optical depth in Ilam County. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(3), 1–17. <https://doi.org/10.22067/geoch.2023.82988.1383>
- Mao, R., Ho, C. H., Feng, S., Gong, D. Y., & Shao, Y. (2013). The influence of vegetation variation on Northeast Asian dust activity. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 49(1), 87–94. <https://doi.org/10.1007/s13143-013-0010-5>
- Mehrabi, S., Jafari, R., & Soltani, S. (2015). Investigating the performance of NDDI index for dust mapping of arid lands (Khuzestan Province). *Desert Ecosystem Engineering Journal*, 4(8), 1–10. <https://sid.ir/paper/254429/en> [In Persian]

- Nabavi, S. S., Moradi, H., & Sharifikia, M. (2019). Evaluation of dust storm temporal distribution and the relation of the effective factors with the frequency of occurrence in Khuzestan Province from 2000 to 2015. *Journal of Geographical Data (SEPEHR)*, 28(111), 191–203. <https://doi.org/10.22131/sepehr.2019.37518> [In Persian]
- Namdari, S., Valizade, K. K., Rasuly, A. A., & Sari Sarraf, B. (2016). Spatio-temporal analysis of MODIS AOD over the western part of Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(3), 191. <https://doi.org/10.1007/s12517-015-2029-7>
- Noroozi, A., & Shoaee, Z. (2018). Identifying areas with dust generation potential in the south west of Iran, case study: Khuzestan Province. *Watershed Engineering and Management*, 10(3), 398–409. <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2018.117329> [In Persian]
- Pinheiro, J., Bates, D., & R Core Team. (2025). *nlme: Linear and nonlinear mixed effects models* (R package version 3.1-168) [Computer software]. Comprehensive R Archive Network. <https://CRAN.R-project.org/package=nlme>
- Shahsavandi, M., Morshedi, J., Shakiba, A., & Zahoorian Pardel, M. (2020). Analysis of dust effects on electrical elements in Khuzestan Province. *Journal of Climate Research*(42), 125–135. https://clima.irimo.ir/article_125199_en.html [In Persian]
- Shahsavani, A., Yarahmadi, M., Mesdaghinia, A., Younesian, M., Jaafarzadeh Haghighifard, N., Naimabadi, A., Salesi, M., & Naddafi, K. (2012). Analysis of dust storms entering Iran with emphasis on Khuzestan Province. *Hakim Research Journal*, 15(3), 192–202. <http://hakim.tums.ac.ir/article-1-1040-en.html> [In Persian]
- Tajiki, F., Mohammad Asgari, H., Zamani, I., & Ghanbari, F. (2021). Investigation of fungi diversity in airborne dust and their sources identification in Khuzestan Province. *Iranian Journal of Health and Environment*, 14(1), 51–66. <http://ijhe.tums.ac.ir/article-1-6436-en.html> [In Persian]
- Yazdani, S., Khorrami, S., Salami, H. A., & Saleh, A. (2024). Economic evaluation of dust damage on agricultural crop yield in Khuzestan Province. *Iranian Journal of Agricultural Economics and Development Research*, 55(1), 149–167. <https://doi.org/10.22059/ijaedr.2022.283683.669103> [In Persian]
- Zarasvandi, A., Carranza, E. J. M., Moore, F., & Rastmanesh, F. (2011). Spatio-temporal occurrences and mineralogical–geochemical characteristics of airborne dusts in Khuzestan Province (southwestern Iran). *Journal of Geochemical Exploration*, 111(3), 138–151. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.04.004>