

Monitoring and Analysis of Dust Storm Trajectories in Sistan and Baluchestan Province Using MODIS Satellite Products and the HYSPLIT Model

Alireza Yosefi Kebriya¹ , Ali Khalili^{2*} , Hasan Rezaei³ 

1. Ph.D. of Agrometeorology, Faculty of Agricultural Sciences, University of Agricultural Sciences and Natural Resources sari, Iran
2. Assistant Professor, Department of Computer and Cybersecurity, Faculty of Engineering and Aviation, Imam Ali (AS) Military University, Tehran, Iran
3. Ph.D. of Department of Geography, Climatology, Faculty of Basic Sciences, Imam Ali (AS) Military University, Tehran, Iran

* Corresponding Author: Khalili@IAMU.ac.ir

Abstract

Background and Objective: One of the environmental challenges in arid and semi-arid regions is dust pollution, which can lead to serious health problems, including respiratory diseases, reduced visibility, and disruptions in transportation. Additionally, dust storms have significant negative impacts on water resources and agriculture. Sistan and Baluchestan province is one of the areas that experiences high dust pollution levels annually, with many periods throughout the year showing elevated dust pollution levels.

Materials and Methods: This study utilizes MODIS satellite data and coding in Google Earth Engine to analyze the TDI, AOD-Sum, AOD-Max, and AOD indices from 2018 to 2023. The HYSPLIT model was employed to analyze the transport pathways of dust pollutants and identify their sources. Using particle trajectory modeling techniques, the frequency distribution of closed air paths was examined. To gain a better understanding of dust distribution and transport, true-color MODIS images were also used. For dust trajectory analysis, data from the Zabol and Zahedan stations for three dates in 2023 and 2024, with an AQI index of 500, were employed. The HYSPLIT model was applied in a backward mode with 24-hour trajectories for Zabol and 48-hour trajectories for Zahedan.

Results and Discussion: The analysis of the Thermal Dust Index (TDI) from 2018 to 2023 revealed that areas such as Zabol, Iranshahr, Khash, and Chabahar, due to their dry and loose soils, are the primary internal sources of dust in the province. The TDI increased from 0.0055 in 2018 and 2019 to 0.0058 in 2021, while in 2022 and 2023 it reached 0.0056 and 0.0057, respectively, with a minimum threshold of -0.018 . These findings indicate the persistent surface conditions favorable for dust emission and highlight the effectiveness of TDI in identifying high-risk internal dust source regions. The analysis of the AOD-Max index indicates that the eastern, southern, northeastern, southwestern, and, in some years, the central regions of the province experience the highest levels of dust pollution. Border regions, especially those bordering Afghanistan and Pakistan, have consistently exhibited the highest levels of dust pollution throughout the years. The years 2018 and 2022 recorded the highest values of AOD-Max, with a 0.3-unit increase in 2022 compared to previous years, reaching a value of 3.5, which falls into the "hazardous" category in air pollution classification. This value decreased to 3.1 in 2023 but remained in a "very hazardous" state. The AOD-Sum index analysis shows that the eastern, northeastern, and southern regions of Sistan and Baluchestan experience the highest intensity of dust pollution throughout the year. Particularly, the eastern and northeastern areas face dust pollution for more than 100 days a year, while the southern areas experience it for over 120 days. The highest number of pollution days were observed in 2018, 2020, and 2022. However, the average index value for 2023 decreased by 0.9 compared to 2022, with an average of 1.9, still within the hazardous range. The analysis of AOD indices reveals that the highest pollution is concentrated in the border regions of the province. Moreover, the strong spatial correlation between TDI and AOD values reinforces the validity of these findings and demonstrates that TDI serves as an effective tool for identifying, monitoring, and managing high-risk dust-prone areas. Backward trajectory modeling with the HYSPLIT model shows that, shortly before dust storms occur in Zabol and Zahedan, the air paths predominantly pass through the borders of Turkmenistan and Afghanistan, reaching Zabol and Zahedan. The backward trajectory modeling shows that dust storms originate from the deserts of Turkmenistan and Afghanistan and reach Zabol within 24 hours and Zahedan within 48 hours. The altitude changes of the dust transport pathways indicate that most of the airflows occur at elevations above 1500 meters along the Turkmenistan-Afghanistan border. After passing through the deserts of Afghanistan, the airflow reduces to below 500 meters, causing dust pollution in the province. The true-color

MODIS images also clearly show the expansion of pollution from the deserts of Afghanistan and eastern Iran to the borders of Pakistan.

Conclusion: The results show that the eastern and border regions of Sistan and Baluchestan province are most affected by dust storms. These storms, primarily originating from the deserts of neighboring countries Afghanistan, Turkmenistan, and Pakistan—enter the province and exacerbate air pollution. Given the severity of dust pollution in these areas, it is recommended to establish drought-resistant vegetation cover, optimize water resource management to prevent desertification, and develop air quality monitoring stations to mitigate the impacts of this environmental crisis.

Keywords: dust storms, TDI index, AOD index, MODIS satellite, HYSPLIT model

نسخه پیش انتشار

پایش و تحلیل مسیرهای گردوغبار در استان سیستان و بلوچستان با استفاده از محصولات ماهواره‌ای مودیس و

مدل HYSPLIT

علیرضایوسفی کبریا^۱، علی خلیلی^{۲*}، حسن رضائی^۳

۱. دکتری هواشناسی کشاورزی، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، ساری، ایران

۲. استادیار، گروه رایانه و سایبری، دانشکده مهندسی و پرواز، دانشگاه افسری امام علی (ع)، تهران، ایران

۳. دکتری، گروه جغرافیا، اقلیم‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه افسری امام علی (ع)، تهران، ایران، ایران

* نویسنده عهده دار مکاتبات: Khalili@IAMU.ac.ir

چکیده

سابقه و هدف: یکی از چالش‌های زیست‌محیطی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، آلودگی گردوغبار است. گردوغبار می‌تواند مشکلاتی جدی برای سلامت عمومی به وجود آورد، از جمله افزایش بیماری‌های تنفسی، کاهش دید و اختلالات در حمل‌ونقل، علاوه بر این، این طوفان‌ها تأثیرات منفی زیادی بر منابع آب و کشاورزی دارد. استان سیستان و بلوچستان یکی از مناطقی است که شاخص گردوغبار بالایی را در سال تجربه می‌کند و در اکثر مواقع سال دارای شاخص بالای گردوغباری می‌باشد.

مواد و روش: این پژوهش با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای مودیس و کد نویسی در سامانه گوگل ارث انجین، به بررسی شاخص‌های TDI، AOD-Sum، AOD-Max و AOD در بازه زمانی ۲۰۱۸-۲۰۲۳ پرداخته شد. به‌منظور تحلیل مسیر انتقال آلاینده‌های گردوغبار و شناسایی منابع انتشار آن‌ها، مدل HYSPLIT به‌کار گرفته شده و با استفاده از تکنیک‌های مدل‌سازی مسیر ذرات، توزیع فرکانس مسیرهای بسته هوایی مورد بررسی قرار گرفت، برای درک بهتر توزیع گردوغبار و مسیر انتقال گردوغبار از تصاویر واقعی مودیس استفاده شد. برای بررسی مسیر گردوغبار از دو ایستگاه زابل و زاهدان برای سه تاریخ مربوط به سال‌های ۲۰۲۳ و ۲۰۲۴ با شاخص AQI، ۵۰۰ استفاده شد. که مدل HYSPLIT به صورت عقبگرد ۲۴ ساعته برای زابل و ۴۸ ساعته برای زاهدان استفاده گردید.

نتایج و بحث: نتایج تحلیل شاخص TDI نشان داد که مناطق زابل، ایرانشهر، خاش و چابهار در استان سیستان و بلوچستان به دلیل خاک‌های خشک و سست، منابع اصلی گردوغبار داخلی هستند. شاخص TDI از ۰/۰۵۵ در سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ به ۰/۰۵۸ در سال ۲۰۲۱ افزایش یافت و در سال‌های ۲۰۲۲ و ۲۰۲۳ به ترتیب ۰/۰۵۶ و ۰/۰۵۷ بود و دارای آستانه حداقلی ۰/۰۱۸- بوده است. شاخص AOD-Max نشان می‌دهد که مناطق شرقی، جنوبی، شمال‌شرقی و جنوب‌غربی استان، به‌ویژه در برخی سال‌ها مناطق مرکزی، بیشترین آلودگی گردوغبار را تجربه کرده‌است. مناطق مرزی، خصوصاً نواحی هم‌مرز با افغانستان و پاکستان، در تمامی سال‌ها بیشترین میزان آلودگی را داشته‌است. سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۲۲ بالاترین مقادیر AOD-Max را نشان می‌دهند، به‌طوری‌که مقدار آن در سال ۲۰۲۲ نسبت به سال‌های قبل ۰/۳ واحد افزایش یافته و به ۳/۵ رسیده که در دسته‌بندی آلودگی هوا، خطرناک محسوب می‌شود. این مقدار در ۲۰۲۳ به ۳/۱ کاهش یافته اما همچنان در وضعیت بسیار خطرناک قرار دارد. تحلیل شاخص AOD-Sum نشان می‌دهد که مناطق شرقی، شمال‌شرقی و جنوب استان در طول سال بیشترین شدت آلودگی را داشته‌است. مناطق شرقی و شمال‌شرقی بیش از ۱۰۰ روز و مناطق جنوبی بیش از ۱۲۰ روز درگیر گردوغبار می‌باشد. بیشترین تعداد روزهای آلودگی در سال‌های ۲۰۱۸، ۲۰۲۰ و ۲۰۲۲ مشاهده شده است، اما میانگین این شاخص در ۲۰۲۳ نسبت به ۲۰۲۲ به میزان ۰/۹ واحد کاهش یافته و به ۱/۹ رسیده که همچنان در محدوده خطرناک قرار دارد. نتایج بررسی شاخص‌های AOD نشان می‌دهد که بیشترین آلودگی در مناطق مرزی استان متمرکز است، همچنین هم‌پوشانی بالای مقادیر TDI با شاخص AOD، اعتبار این نتایج را تقویت کرده و نشان می‌دهد TDI ابزار مؤثری در شناسایی، پایش و مدیریت مناطق پرخطر گردوغبار محسوب می‌شود. تحلیل مسیرهای جوی با مدل HYSPLIT نشان می‌دهد که ساعات پیش از وقوع گردوغبار در زابل و زاهدان، مسیرهای جوی عمدتاً از مرزهای ترکمنستان و افغانستان عبور کرده و به زابل و زاهدان می‌رسد. مدل‌سازی مسیرهای عقبگرد نشان می‌دهد که طوفان‌های گردوغبار از بیابان‌های ترکمنستان و افغانستان منشأ گرفته و طی ۲۴ ساعت به زابل و طی ۴۸ ساعت به زاهدان می‌رسد. بررسی تغییرات ارتفاعی جریان‌های جوی نشان می‌دهد که این مسیرها در مرز ترکمنستان و افغانستان در ارتفاع بالای ۱۵۰۰ متر شکل گرفته و

پس از عبور از بیابان‌های افغانستان، به کمتر از ۵۰۰ متر کاهش یافته و موجب ایجاد گردوغبار در استان می‌شود. تصاویر رنگ واقعی مودیس نیز بیانگر گسترش آلودگی از بیابان‌های افغانستان و شرق ایران تا مرزهای پاکستان است.

نتیجه‌گیری: نتایج نشان می‌دهد که مناطق شرقی و مرزی استان سیستان و بلوچستان بیشترین تأثیرپذیری را از طوفان‌های گردوغبار داشته‌است. این طوفان‌ها که عمدتاً از بیابان‌های مجاور کشورهای افغانستان، ترکمنستان و پاکستان منشأ می‌گیرد و به استان سیستان و بلوچستان نفوذ کرده و موجب تشدید آلودگی هوا می‌شود. با توجه به شدت آلودگی گردوغبار در مناطق شرقی و مرزی، ایجاد پوشش‌های گیاهی مقاوم در برابر خشکی، مدیریت بهینه منابع آبی برای جلوگیری از بیابان‌زایی، و توسعه ایستگاه‌های پایش آلودگی هوا می‌تواند در کنترل این بحران مؤثر باشد.

کلمات کلیدی: گردوغبار، شاخص TDI، شاخص AOD، ماهواره مودیس، مدل HYSPLIT.

مقدمه

آلودگی هوا یک مسئله مهم زیست محیطی است که تأثیرات زیادی بر سلامت انسان و تعادل اکوسیستم دارد. طوفان‌های گرد و غبار، یک نوع خطر شدید زیست محیطی، به عنوان یک چالش جهانی با پیامدهای گسترده برای اکوسیستم، سلامت انسان و سیستم‌های آب و هوایی ظاهر شده است (Yousefi Kebriya et al., 2025). در سال‌های اخیر، وقوع طوفان‌های گردوغبار به دلیل افزایش دمای جهانی تشدید یافته و پیامدهای آن فراتر از کانون‌های اولیه آن‌ها را تحت تأثیر قرار داده است (Darvishi et al., 2023). بر اساس تعریف ارائه‌شده توسط سازمان جهانی هواشناسی، این طوفان‌ها هنگامی رخ می‌دهد که بادهای شدید، حجم زیادی از ذرات ریز گردوغبار و شن را از سطح زمین جدا کرده و آن‌ها را تا فواصل بسیار دور در جو پراکنده می‌کند (WMO, 2023). نواحی خشک و نیمه‌خشک، از جمله آسیای مرکزی، شمال آفریقا، چین، شبه‌جزیره عربستان و برخی مناطق خاورمیانه از مهم‌ترین کانون‌های تولید گردوغبار محسوب می‌شود. افزایش فراوانی و شدت طوفان‌های گرد و غبار به مجموعه‌ای از عواملی چون خشکسالی، تخریب زمین، تغییرات کاربری زمین، کاهش پوشش گیاهی و فرسایش خاک نسبت داده می‌شود (Zucca et al., 2022). این موضوع به منبع‌های متنوع طوفان‌های گرد و غبار اشاره دارد که دیگر محدود به نواحی صحرایی دور از دسترس نبوده و در مناطق مختلفی از نواحی گرم، نیمه‌خشک و معتدل نیز مشاهده می‌شود (Hennen et al., 2022). موقعیت جغرافیایی و شرایط هواشناسی این مناطق نقش اساسی در شکل‌گیری و گسترش طوفان‌های گرد و غبار دارد و موجب بروز مسائل آلودگی فرامرزی می‌شود که نیاز به تحلیل جامع منابع و اثرات آن‌ها دارد (Chen et al., 2022). این طوفان‌ها نه تنها باعث تخریب زیست محیطی و کاهش حاصلخیزی خاک می‌شود، بلکه اثرات منفی قابل توجهی بر جوامع انسانی نیز دارد. به‌ویژه در مناطق شهری، گردوغبار می‌تواند مشکلاتی جدی برای سلامت عمومی به وجود آورد، از جمله افزایش بیماری‌های تنفسی، کاهش دید و اختلالات در حمل‌ونقل، علاوه بر این، این طوفان‌ها تأثیرات منفی زیادی بر منابع آب و کشاورزی دارد و می‌تواند باعث آلودگی آب‌ها، کاهش کیفیت محصولات کشاورزی و حتی تهدید امنیت غذایی شود (Yarmohamadi et al., 2023). ویژگی پیچیده طوفان‌های گرد و غبار، رویکردی چندجانبه برای بررسی عواملی که باعث بروز آن‌ها می‌شود و ارزیابی تأثیرات منطقه‌ای و جهانی آن‌ها را می‌طلبد (Broomandi et al., 2023). فناوری‌های سنجش از دور برای تحلیل طوفان‌های گردوغبار از لحاظ موقعیت و زمان با ارائه داده‌هایی با کیفیت بالا در زمینه‌های مختلف جوی، از جمله اندازه‌گیری عمق اپتیکی اتمسفر (AOD)، سرعت و جهت باد، و غلظت ذرات گردوغبار، اهمیت زیادی دارد. ابزارهای مبتنی بر ماهواره، سیستم‌های LiDAR¹ در سطح زمین و رادارها توانایی ارائه داده‌های با وضوح مکانی و زمانی بالا را دارد. برای برآورد AOD، معمولاً از سنجنده‌های ماهواره‌ای مانند MODIS که دقت مناسبی دارد، استفاده می‌شود (Smith et al., 2025). AOD میزان نوری که از عبور ذرات ریز گردوغبار از سطح زمین به جو جلوگیری می‌کند، اندازه‌گیری می‌کند. این اندازه‌گیری‌ها هم

¹ . Light Detection and Ranging

می‌توانند از طریق مشاهدات زمینی و هم با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای انجام شود (Afzalizadeh et al., 2024). علاوه بر تصاویر ماهواره‌ای، استفاده از مدل‌های عددی مانند HYSPLIT نیز می‌تواند به شناسایی مسیرهای گردوغبار و فرکانس وقوع آن‌ها کمک کند. مدل HYSPLIT به عنوان ابزاری کارآمد برای شناسایی و پیش‌بینی حرکت طوفان‌های گردوغبار شناخته شده است که به ارائه تحلیل‌های ارزشمندی در مورد مبدأ و مسیرهای این طوفان‌ها کمک می‌کند (Wang et al., 2023). این قابلیت‌ها به همراه فناوری‌های پیشرفته سنجش از دور، تحول چشمگیری در توانایی مطالعات این حوزه برای پایش و بررسی پارامترهای محیطی مؤثر در شکل‌گیری طوفان‌های گردوغبار ایجاد کرده است (Yousefi Kebriya et al., 2025). پژوهش‌های متعددی در این زمینه صورت گرفته از جمله، در مطالعه‌ای برای شناسایی مسیر جریان گرد و غبار ورودی به استان خوزستان، از شاخص AOD (عمق اپتیکی جو) در روزهای قبل از وقوع پدیده گرد و غبار استفاده شد و با مدل HYSPLIT، مسیر جریان در سطوح مختلف جو پیگیری گردید. این بررسی‌ها نشان داد که استان‌های آل‌انبار، مثنی و نجف در عراق و همچنین مناطق الحدود و الشرقیه در عربستان سعودی بیشترین نقش را در تولید گرد و غبار ورودی به جنوب‌غربی ایران ایفا می‌کند (Dargahian et al., 2023). راشکی و همکاران (۲۰۱۲) ویژگی‌های آئروسول، بارگذاری گرد و غبار و کیفیت هوا را در سیستم بررسی کرده، و نتیجه گرفتند که بادهای لوار در تابستان باعث خیزش گرد و غبار از حوضه هامون می‌شود. پس از خشکسالی اواخر دهه ۱۹۹۰ و تغییرات کاربری زمین، شدت طوفان‌های گرد و غباری افزایش یافته است. داده‌های گرد و غبار از طریق تله‌های نصب‌شده در دو ایستگاه طی اوت ۲۰۰۹ تا ژوئیه ۲۰۱۰ جمع‌آوری شد. نتایج نشان داد حجم گرد و غبار به مدت‌زمان طوفان‌ها و فاصله از منبع وابسته است و ذرات درشت‌تر در ایستگاه نزدیک‌تر به هامون مشاهده شده‌است. همچنین، اندازه‌گیری PM10 در زابل (سپتامبر ۲۰۱۰ - ژوئیه ۲۰۱۱) نشان داد که در روزهای طوفانی غلظت ذرات تا ۳۰۹۴ میکروگرم بر مترمکعب می‌رسد. بررسی شاخص کیفیت هوا (AQI) حاکی از آن است که ۶۱ درصد از روزها در شرایط پرخطر و ۳۰ درصد در وضعیت خطرناک قرار دارد. رامی و همکاران (۲۰۲۲) وقوع طوفان‌های گرد و غباری شدید در سیستم و حوضه دریاچه هامون را طی دو دهه گذشته بررسی کرده‌اند. تحلیل سینوپتیکی با داده‌های NCEP-NCAR نشان داد که تعامل سامانه‌های پرفشار دریای خزر و کم‌فشار شبه‌قاره هند باعث وزش بادهای شمالی، غربی و شمال‌غربی و انتقال گرد و غبار به شرق و جنوب‌شرق می‌شود. بیشترین بار گرد و غبار و مقادیر AOD در جنوب و جنوب‌غرب افغانستان و غرب پاکستان مشاهده شد. شدیدترین طوفان‌ها در تابستان رخ داده و در برخی موارد بار گرد و غبار به ۵ گرم بر مترمربع رسیده است. جدیدالاسلامی قلعه‌نو (۲۰۲۴) فرسایش بادی و رسوب‌گذاری در دشت سیستم، به‌ویژه در نیاتک و جزینک، را بررسی کرده است. نتایج نشان می‌دهد که بادهای ۱۲۰ روزه و جهت غالب شمال‌غربی-جنوب‌شرقی، همراه با خشکسالی و پوشش گیاهی ضعیف، نقش اساسی در جابه‌جایی ماسه‌ها و ورود آن‌ها به مخازن چاه‌نیمه دارد. مالکی و همکاران (۲۰۲۰)، با استفاده از روش ارزیابی چند معیاره (MCE)، مکان‌یابی و اولویت‌بندی کانون‌های گردوغبار در منطقه سیستم را برای تثبیت و مدیریت بهینه بررسی کرد. نتایج نشان داد که علاوه بر کانون‌های گردوغبار، عواملی مانند پوشش گیاهی، بافت خاک، نزدیکی به مناطق مسکونی و میزان خشکسالی هامون در انتخاب مکان‌های احیایی نقش مهمی دارد. وایت و همکاران (۲۰۲۳) از مدل سازی HYSPLIT برای تجزیه و تحلیل مسیرهای طوفان گرد و غبار در مرکز آریزونا استفاده کرد و نشان داد که طوفان‌های گرد و غبار اغلب از مناطق جنوبی با غلظت ذرات بالا از جنوب غربی سرچشمه می‌گیرد. جویباری و همکاران (۲۰۲۲) در مطالعه‌ای غلظت فلزات سنگین در گردوغبار منطقه هندجان را بررسی کردند. نتایج نشان داد که فلزات کروم، نیکل، روی، مس، آرسنیک، سرب و کادمیوم بیشترین غلظت را در گردوغبار دارند. همچنین، با استفاده از مدل HYSPLIT و روش بازگشتی، مشخص شد که منبع گردوغبار از عراق و جنوب شرقی سوریه است. استان سیستم و بلوچستان، واقع در جنوب‌شرقی ایران، یکی از مناطقی است که به‌طور مداوم با پدیده گردوغبار مواجه است. این وضعیت به‌ویژه در مناطق شمالی، شرقی و جنوب شرقی استان شدت بیشتری دارد. یکی از دلایل اصلی وقوع گردوغبار در این منطقه، وزش بادهای شدید موسمی است که از سمت شرق و شمال‌شرقی، گردوغبار را از کشورهای همجوار مانند افغانستان و پاکستان به این منطقه می‌آورد. علاوه بر این، خشک‌سالی‌های پی‌درپی و کاهش سطح آب در تالاب‌ها و دریاچه‌های منطقه،

از جمله دریاچه هامون، شرایط را برای تولید گردوغبار فراهم کرده است (Mir et al., 2016). با توجه به بررسی مطالعات صورت گرفته مشخص می‌شود، پژوهش‌های پیشین عمدتاً به تحلیل عوامل محیطی و پدیده‌های مربوط به گردوغبار محدود شده‌است، در حالی که پژوهشی جامع و دقیق در رابطه با شبیه‌سازی مسیرها و شناسایی منابع گردوغبار استان سیستان و بلوچستان، به‌ویژه در بازه زمانی ۲۰۱۸-۲۰۲۳، انجام نشده است. در این تحقیق، ابتدا با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای MODIS، نقاطی که بیشترین آلودگی گردوغبار را در استان تجربه کرده‌است، شناسایی شد. سپس، برای ردیابی دقیق‌تر مسیر و منابع گردوغبار، از مدل HYSPLIT استفاده گردید که علاوه بر شبیه‌سازی مسیر حرکت گردوغبار، فرکانس مسیر گردوغبار را در نواحی مختلف مشخص کرده است. این تحقیق با استفاده از سامانه گوگل ارث انجین^۲ و کدنویسی JavaScript برای تحلیل داده‌های، TDI^۳، AOD^۴، شاخص‌های AOD Max، AOD Sum و AOD را در سطح استان مورد بررسی قرار داده است. این رویکرد به‌ویژه در پر کردن شکاف‌های تحقیقاتی موجود در استان سیستان و بلوچستان و درک بهتر وضعیت گردوغبار منطقه مؤثر می‌باشد و به گام‌های جدیدی در شناخت منابع گردوغبار و پیش‌بینی الگوهای آینده آن کمک می‌کند. یافته‌های این تحقیق می‌تواند به‌عنوان مبنای علمی برای برنامه‌ریزی‌های بهتر در جهت کاهش اثرات گردوغبار و مدیریت بحران‌های ناشی از آن در این منطقه قرار گیرد.

مواد و روش

منطقه مورد مطالعه

استان سیستان و بلوچستان با وسعتی حدود ۵۰۲۱۸۷ کیلومتر مربع، دومین استان وسیع کشور هست که در جنوب‌شرقی ایران واقع شده است. این استان در مختصات جغرافیایی ۲۵ درجه و ۳ دقیقه تا ۳۱ درجه و ۲۸ دقیقه عرض شمالی و ۵۸ درجه و ۴۷ دقیقه تا ۶۳ درجه و ۱۹ دقیقه طول شرقی قرار دارد که در شکل ۱ مشخص است. این استان در سمت شرق با کشور پاکستان ۹۰۰ کیلومتر و با کشور افغانستان ۳۰۰ کیلومتر مرز مشترک دارد. در قسمت جنوب با دریای عمان به طول تقریبی ۲۷۰ کیلومتر مرز آبی دارد. منطقه سیستان در شمال استان قرار دارد و به دلیل موقعیت جغرافیایی خود در مجاورت مرزهای شرقی ایران، تحت تأثیر پدیده‌های بیابانی و گردوغبار قرار دارد. این منطقه به‌ویژه با تالاب هامون شناخته می‌شود که به‌عنوان یک منبع مهم آب و اکوسیستم طبیعی در این ناحیه اهمیت زیادی دارد. اما کاهش سطح آب در این تالاب، ناشی از تغییرات اقلیمی و بهره‌برداری‌های انسانی، مشکلات زیست‌محیطی و گردوغبار را تشدید کرده است. بلوچستان در جنوب استان قرار دارد و به دلیل نزدیکی به سواحل دریای عمان، ویژگی‌های جغرافیایی متفاوتی دارد. این بخش از استان با داشتن کوه‌های مرتفع، دشت‌های وسیع و خط ساحلی طولانی، شرایط اقلیمی خاصی را تجربه می‌کند که موجب تنوع زیستی و فرهنگی فراوان در این منطقه شده است. آب و هوای سیستان و بلوچستان به‌طور کلی خشک و بیابانی است و در فصل‌های تابستان دمای آن به شدت بالا می‌رود. همچنین، وزش بادهای موسمی شدید و طوفان‌های گردوغبار در این استان به‌ویژه در نواحی مرکزی و شمالی استان رایج است، که از سوی کشورهای همسایه به این منطقه منتقل می‌شود (Mir et al., 2016).

داده‌های مورد استفاده

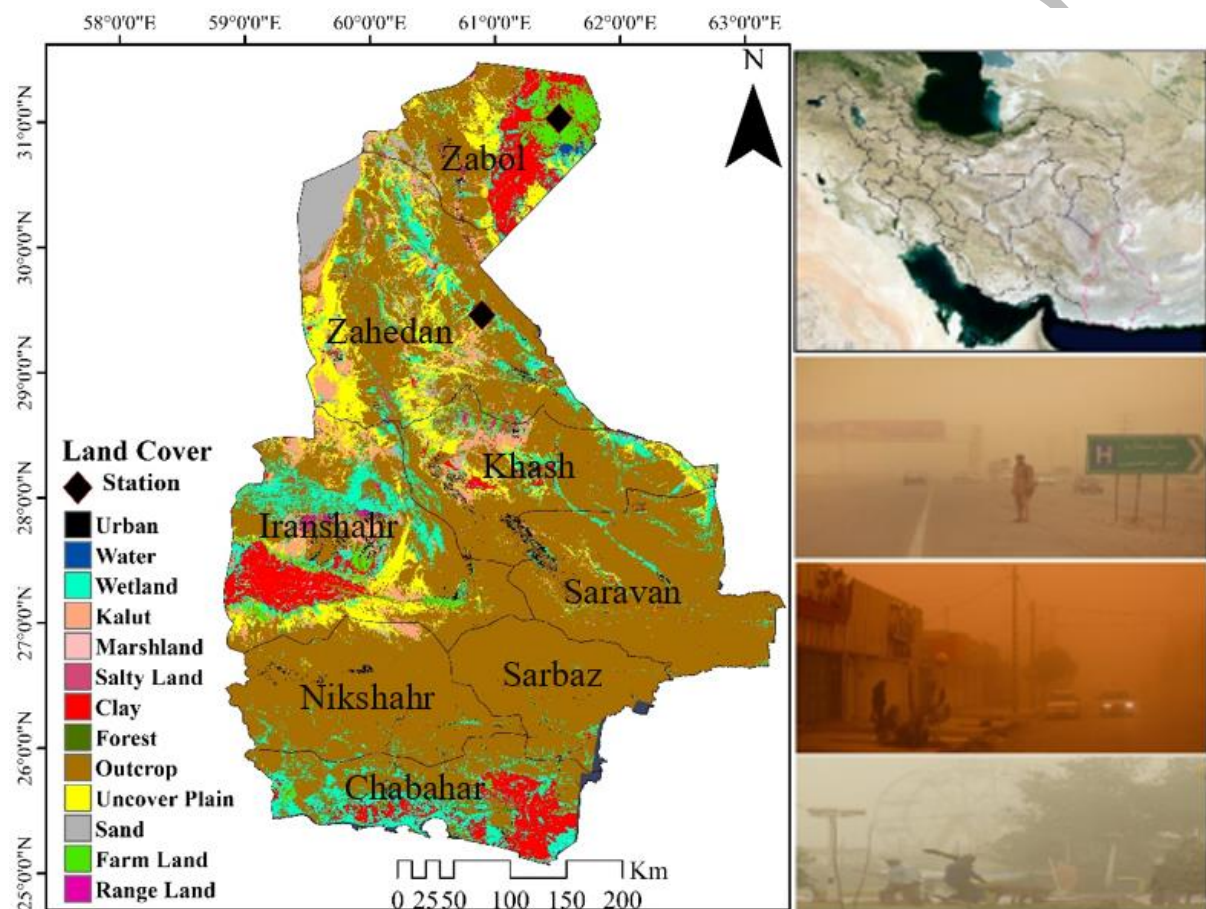
داده‌های واقعی و ماهواره‌ای

^۲ . Google Earth Engine

^۳ . Thermal Dust Index

^۴ . Aerosol Optical Index

در این پژوهش، داده‌های PM مربوط به سال‌های ۲۰۲۲ و ۲۰۲۳ از ایستگاه آلودگی‌سنجی زاهدان استفاده شد. علاوه بر این، داده‌های AOD (عمق نوری هواویز) و TDI ماهواره MODIS برای بازه زمانی هشت سال از ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳، برای استان سیستان و بلوچستان استخراج شد. فرآیند استخراج این داده‌ها با استفاده از کدنویسی پیشرفته در سامانه گوگل ارث انجین (Google Earth Engine) انجام شد. به منظور بررسی مسیر دقیق این جریان‌های گردوغبار، مدل HYSPLIT به کار گرفته شد، که در کنار آن از تصاویر ماهواره‌ای MODIS Corrected Reflectance (True Color) نیز استفاده گردید. در این تحلیل، سه ایستگاه شامل، زابل و زاهدان، برای بررسی مسیر آلودگی استفاده شد، که موقعیت ایستگاه‌ها را در شکل ۱ مشخص شده است. از اطلاعات دو ایستگاه با شاخص کیفیت هوای ۵۰۰ بهره گرفته شد که روزهای دارای آلودگی گرد و غبار را مشخص می‌شود. سپس با استفاده از مدل مسیر یابی جوی HYSPLIT و تحلیل مسیرهای عقبگرد، منشا و مسیر حرکت گرد و غبار به دقت شناسایی می‌شود.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی و نقشه پوشش اراضی استان سیستان و بلوچستان با ترکیب ماهواره لندست ۸ و مودیس

Figure 1. Geographical location and land cover map of Sistan and Baluchestan Province derived from the combination of Landsat 8 and MODIS satellite imagery

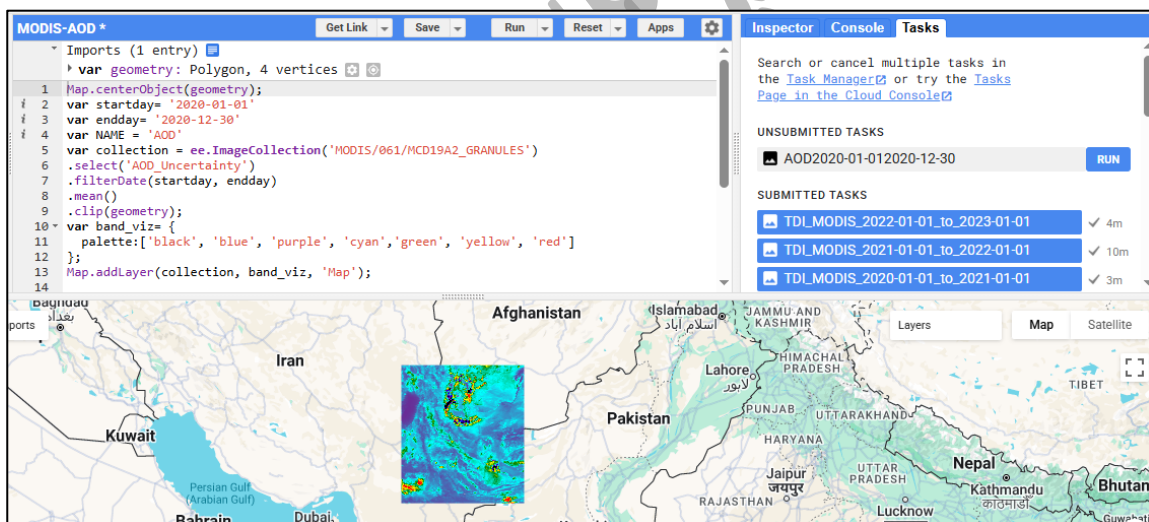
کاربردهای ماهواره MODIS

ماهواره‌ی MODIS برای پایش و مطالعات مختلف محیط زیستی و اقلیمی استفاده می‌شود. این ماهواره توسط سازمان ملی اقیانوسی و اتمسفری ایالات متحده آمریکا (NOAA) و ناسا (NASA) به منظور پایش زمین، اقلیم و محیط زیست طراحی شده

است. MODIS تصاویر با وضوح متوسط در طول موج‌های مختلف را به دست می‌آورد و اطلاعات جامعی درباره مساحت سطحی، دما، برف و یخ، پوشش گیاهی، گرد و غبار، اقیانوس‌ها و دیگر شاخص‌های محیطی فراهم می‌کند (NASA, 2015). در این پژوهش، از مجموع ۲۷ تصویر ماهواره‌ای MODIS استفاده شده است که شامل یک تصویر پوشش اراضی حاصل از ترکیب داده‌های MODIS و Landsat 8، ۲۳ تصویر شاخص‌های AOD و TDI با بازه زمانی سالانه و ۳ تصویر True Color با بازه زمانی روزانه می‌باشد. این تصاویر در بازه زمانی ۲۰۱۸-۲۰۲۳ به کار گرفته شد.

کدنویسی گوگل ارث انجین

گوگل ارث انجین یک سرویس ابری قدرتمند است که توسط گوگل توسعه یافته و برای تحلیل داده‌های مکانی، تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های جغرافیایی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این پلتفرم ابزارهای پیشرفته‌ای را در اختیار محققان و برنامه‌نویسان حوزه‌های محیط زیست، منابع طبیعی و اقلیم‌شناسی قرار می‌دهد و امکان پردازش و تحلیل داده‌های حجیم را به صورت کارآمد فراهم می‌سازد (NOAA, 2020). کدنویسی در گوگل ارث انجین با استفاده از زبان برنامه‌نویسی جاوا اسکریپت انجام شده و امکان پیاده‌سازی الگوریتم‌ها و فرآیندهای مختلف تحلیلی روی داده‌های این پلتفرم را فراهم می‌کند. در این مطالعه، برای بررسی تغییرات عمق نوری آئروسول (AOD) و رخدادهای گرد و غبار، از مجموعه داده‌های MODIS/006/MCD19A2_GRANULES استفاده شد. همچنین برای استخراج شاخص دمایی گرد و غبار (TDI)، از باندهای حرارتی محصولات MODIS (نظیر MOD11A1) بهره‌گیری شده است. شاخص TDI بر پایه اختلاف بین دمای روشنایی در باندهای حرارتی طراحی شده و برای تفکیک مناطق تحت تأثیر گردوغبار مؤثر است. این شاخص نیز در محیط Google Earth Engine محاسبه و تحلیل گردید، که در شکل ۲ سامانه گوگل ارث انجین قابل مشاهده است.



شکل ۲. فرآیند استخراج شاخص‌های سنجش از دور با استفاده از کدنویسی در محیط Google Earth Engine

Figure 2. Implementation of remote sensing index extraction algorithms in the Google Earth Engine platform

شاخص TDI

شاخص TDI یا Thermal Dust Index یک شاخص مبتنی بر دمای روشنایی (Brightness Temperature) در باندهای حرارتی تصاویر ماهواره‌ای است که برای شناسایی و تفکیک نواحی تحت تأثیر پدیده گرد و غبار از سایر پدیده‌های سطح زمین طراحی

شده است. شاخص TDI معمولاً با استفاده از اختلاف دمای روشنایی در دو باند حرارتی مختلف محاسبه می‌شود. برای داده‌های ماهواره‌ای MODIS، این شاخص به صورت رابطه‌ی ۱ تعریف می‌شود.

$$TDI = BT_{31} - BT_{32} \quad (1)$$

که در آن BT_{31} ، دمای روشنایی باند ۳۱ (با طول موج ۱۱ میکرومتر) و BT_{32} ، دمای روشنایی باند ۳۲ (با طول موج ۱۲ میکرومتر) می‌باشد (Al-Khudhairy et al., 2023). ذرات گرد و غبار موجود در جو باعث تغییر در میزان تابش حرارتی در طول موج‌های مختلف می‌شوند. این تغییرات در اختلاف دمای روشنایی بین دو باند حرارتی قابل اندازه‌گیری است. هنگامی که ذرات گردوغبار در جو وجود دارند، مقدار TDI کاهش می‌یابد؛ به همین دلیل، TDI می‌تواند به‌عنوان یک ابزار تشخیص سریع و نسبتاً دقیق برای مناطق غبارآلود استفاده شود، همچنین این شاخص کاربردهایی از جمله، شناسایی وقوع طوفان‌های گرد و غبار در تصاویر ماهواره‌ای روزانه، بررسی پراکندگی مکانی گرد و غبار در مقیاس منطقه‌ای و تحلیل سری‌های زمانی پدیده‌های غبارمحور در مطالعات اقلیمی و زیست‌محیطی دارد، در پژوهش‌هایی که از Google Earth Engine استفاده می‌کنند، شاخص TDI از داده‌های MOD11A1 (دمای سطح زمین روزانه) محاسبه می‌شود و برای تهیه نقشه‌های روزانه یا دوره‌ای از وقوع گردوغبار به کار می‌رود (Hao & Qu, 2007).

شاخص AOD

شاخص عمق نوری آئروسول (Aerosol Optical Depth - AOD) یکی از مهم‌ترین پارامترهای سنجش از دور برای ارزیابی میزان ذرات معلق در جو است که نمایانگر شدت پراکندگی یا جذب نور خورشید توسط ذرات آئروسول می‌باشد. در این تحقیق، سه شاخص اصلی AOD شامل AOD Max (بیشینه مقدار AOD در سال)، AOD Sum (تجمع سالانه AOD) و AOD (میانگین سالانه AOD) برای بررسی شدت، فراوانی و توزیع مکانی گردوغبار مورد استفاده قرار گرفت. شاخص AOD Max نشان‌دهنده شدیدترین رخداد گردوغبار در یک سال، AOD Sum نمایانگر مجموع کلی بار گردوغبار طی سال، و AOD بیانگر روند میانگین توزیع ذرات در منطقه است. برای استخراج این شاخص‌ها، داده‌های روزانه MODIS از محصول MODIS/006/MCD19A2_GRANULES در بستر Google Earth Engine مورد استفاده قرار گرفت. داده‌ها ابتدا با استفاده از تابع filterBounds (برای محدوده مکانی منطقه و با filterDate) برای بازه زمانی یک‌ساله فیلتر شدند. برای محاسبه شاخص AOD Sum، حدود ۳۶۵ تصویر روزانه مربوط به هر روز از سال انباشته شده و مجموع مقادیر پیکسل‌ها در کل سال محاسبه گردید، تا الگوی کلی تجمع سالانه گردوغبار مشخص شود. در مورد AOD Max، بیشینه مقدار هر پیکسل در بین این تصاویر به دست آمد که نمایانگر شدیدترین میزان آلودگی آئروسول در سال می‌باشد. همچنین، AOD نیز با محاسبه میانگین مقادیر پیکسل‌ها در بازه زمانی یک‌ساله، روند کلی و پراکندگی متوسط ذرات معلق در جو را نشان داد. نتایج این شاخص‌ها به صورت تصاویر تحلیلی در محیط گوگل ارث انجین تهیه و ذخیره شده است.

شاخص کیفیت هوا (AQI)

شاخص کیفیت هوا (AQI) به صورت روزانه و حتی ساعتی اندازه‌گیری می‌شود و غلظت هر آلاینده هوا را ارزیابی می‌کند. غلظت هر آلاینده اندازه‌گیری شده و با استفاده از مقیاس یا شاخص استاندارد، به یک عدد از صفر تا ۵۰۰ تبدیل می‌شود. شاخص کیفیت هوا یک اندازه‌گیری نسبی است، به این معنی که مقادیر پایین‌تر نشان‌دهنده‌ی کیفیت هوای بهتر و نگرانی کمتر برای

سلامتی است، در حالی که مقادیر بالاتر نشان‌دهنده‌ی کیفیت هوای ضعیف‌تر و افزایش خطرات سلامتی است (Yousefi, Kebriya and Nadi, 2023). شاخص کیفیت هوا با استفاده از شاخص عمق اپتیکی آئروسول (AOD) تعیین می‌شود که جذب و پراکندگی نور توسط ذرات معلق (آئروسول) در جو را اندازه‌گیری می‌کند. AOD یک شاخص کمی است که بر حسب تعداد مولکول ذرات معلق هوا در هر کیلومتر مکعب از جو اندازه‌گیری می‌شود. باتوجه به جدول ۱ مشخص می‌شود که شاخص AQI بالاتر از ۱۰۰ آلوده می‌باشد و شاخص AOD بالاتر از ۰/۵ ناسالم و خطرناک می‌باشد (NOAA, 2020).

جدول ۱- شاخص‌های مختلف کیفیت هوا (NOAA, 2020)

TABLE 1. Air quality index Basics Pollution

Levels of Concern	Values of Index AOD	Values of Index AQI
Good	<0.1	0-50
Moderate	0.1-0.3	51-100
Unhealthy	0.3-0.5	101-200
Very Unhealthy	0.5-1	201-300
Hazardous	1<	300<

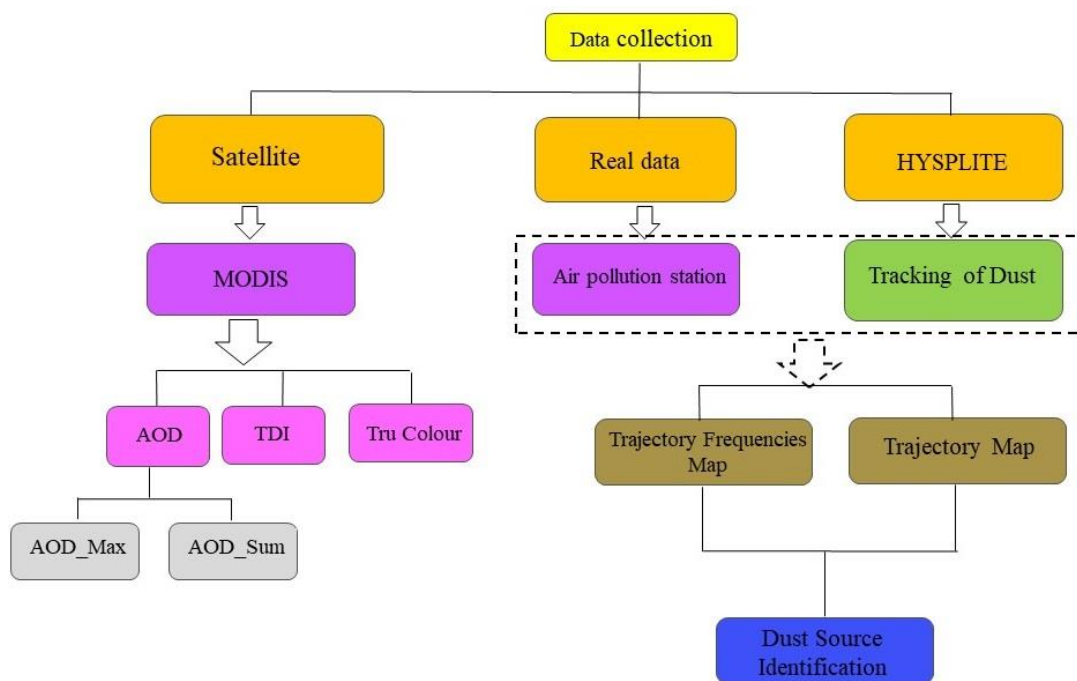
مدل HYSPLIT⁵

مدل HYSPLIT یکی از ابزارهای معتبر در مدل‌سازی پراکندگی ذرات معلق و آلاینده‌های هوا محسوب می‌شود که توسط اداره ملی اقیانوسی و جوی ایالات متحده (NOAA) توسعه یافته است. این مدل به پژوهشگران و متخصصان محیط‌زیست کمک می‌کند تا الگوی حرکت آلاینده‌ها و مسیر انتقال ذرات معلق را در جو تحلیل کنند. HYSPLIT از روش پراکندگی لاگرانژی برای مدل‌سازی توزیع گردوغبار استفاده می‌کند و با بهره‌گیری از معادلات لاگرانژی، حرکت هر ذره را در بعد مکانی و زمانی با دقت بالا شبیه‌سازی می‌نماید. در این مدل، داده‌های هواشناسی مانند سرعت و جهت باد، دما، فشار و رطوبت که از ایستگاه‌های زمینی و ماهواره‌ای جمع‌آوری می‌شوند، به‌عنوان ورودی استفاده شده و فرآیندهای جوی شامل پویش‌های باد، آشفتگی و پایداری جو نیز در محاسبات آن لحاظ می‌شود. مدل HYSPLIT کاربردهای گسترده‌ای در مطالعات آلودگی هوا، پایش گردوغبار، انتشار خاکستر آتشفشانی و ردیابی مواد رادیواکتیو دارد و به‌عنوان یک ابزار کلیدی در بررسی پراکندگی آلاینده‌ها در مقیاس‌های محلی و منطقه‌ای شناخته می‌شود (Rolph et al., 2017; Yousefi Kebriya et al., 2025).

در این پژوهش، از رویکردی جامع و ترکیبی برای شناسایی، تحلیل و ارزیابی الگوهای گردوغبار در استان سیستان و بلوچستان بهره گرفته شده است. در گام نخست، با استفاده از سامانه Google Earth Engine، شاخص TDI استخراج شد که به‌طور موثری می‌تواند مناطق با پتانسیل بالای تولید گردوغبار را در سطح منطقه شناسایی کند. سپس، نقشه‌های مربوط به شاخص‌های سنسجس از دوری آئروسول شامل AOD-Sum (تجمع سالانه آئروسول)، AOD-Max (بیشینه مقدار سالانه)، و نقشه‌های توزیع فضایی AOD در بازه زمانی ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳ تولید گردید. این نقشه‌ها با دقت بالا نشان دادند که بیشترین میزان آلودگی گردوغبار در کدام نواحی استان رخ داده و چگونه تغییرات سالانه در شدت و پراکندگی ذرات معلق جو اتفاق افتاده است. برای تحلیل منشأ و مسیر انتقال گردوغبار، از مدل‌سازی مسیر ذرات با بهره‌گیری از مدل HYSPLIT استفاده شد. این مدل از داده‌های جوی برای ترسیم مسیرهای بازگشت باد و حرکت ذرات معلق بهره می‌برد. تحلیل توزیع فراوانی مسیرهای هوایی به‌دست‌آمده، امکان شناسایی مسیرهای غالب ورود گردوغبار به استان و منابع برون‌مرزی یا داخلی انتشار ذرات را فراهم ساخت. این داده‌ها در تفسیر دینامیک جو، به‌ویژه در شناسایی تأثیر توده‌های هوایی بر وضعیت آلودگی استان، نقش کلیدی ایفا می‌کنند. به‌منظور ارزیابی صحت مسیرهای استخراج‌شده از مدل HYSPLIT و اعتبارسنجی نتایج، از داده‌های تصویری MODIS True Color بهره گرفته شد. این تصاویر امکان مشاهده مستقیم و عینی رخدادهای شدید گردوغبار را در بازه‌های زمانی خاص

⁵ . Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory

فراهم کردند و به عنوان مرجع بصری مهمی برای تطبیق نتایج مدل‌سازی‌ها عمل نمودند. در نهایت، فلوجارت گام‌های اجرایی پژوهش در شکل ۳ ارائه شده که مراحل مختلف شامل استخراج شاخص‌ها، پردازش تصاویر، مدل‌سازی مسیرها و تحلیل نتایج را به صورت یکپارچه نشان می‌دهد. نتایج این مطالعه با تبیین دقیق الگوهای فضایی و زمانی گردوغبار، نقشه جامعی از پراکنش، شدت و منابع آلاینده‌های ذرات معلق در استان سیستان و بلوچستان فراهم آورده است. این اطلاعات می‌تواند نقشی اساسی در تدوین برنامه‌های مدیریت محیط‌زیست، سیاست‌گذاری مقابله با پدیده گردوغبار، و تعیین اولویت‌های اجرایی در زمینه کاهش آلودگی ایفا کند. افزون بر آن، یافته‌های این تحقیق می‌تواند به عنوان مرجعی علمی برای مطالعات آتی در حوزه تغییرات اقلیمی، بیابان‌زایی و ارزیابی اثرات انسانی و طبیعی بر کیفیت هوا مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۳. فلوجارت مراحل اجرایی و چارچوب مفهومی روش‌شناسی پژوهش

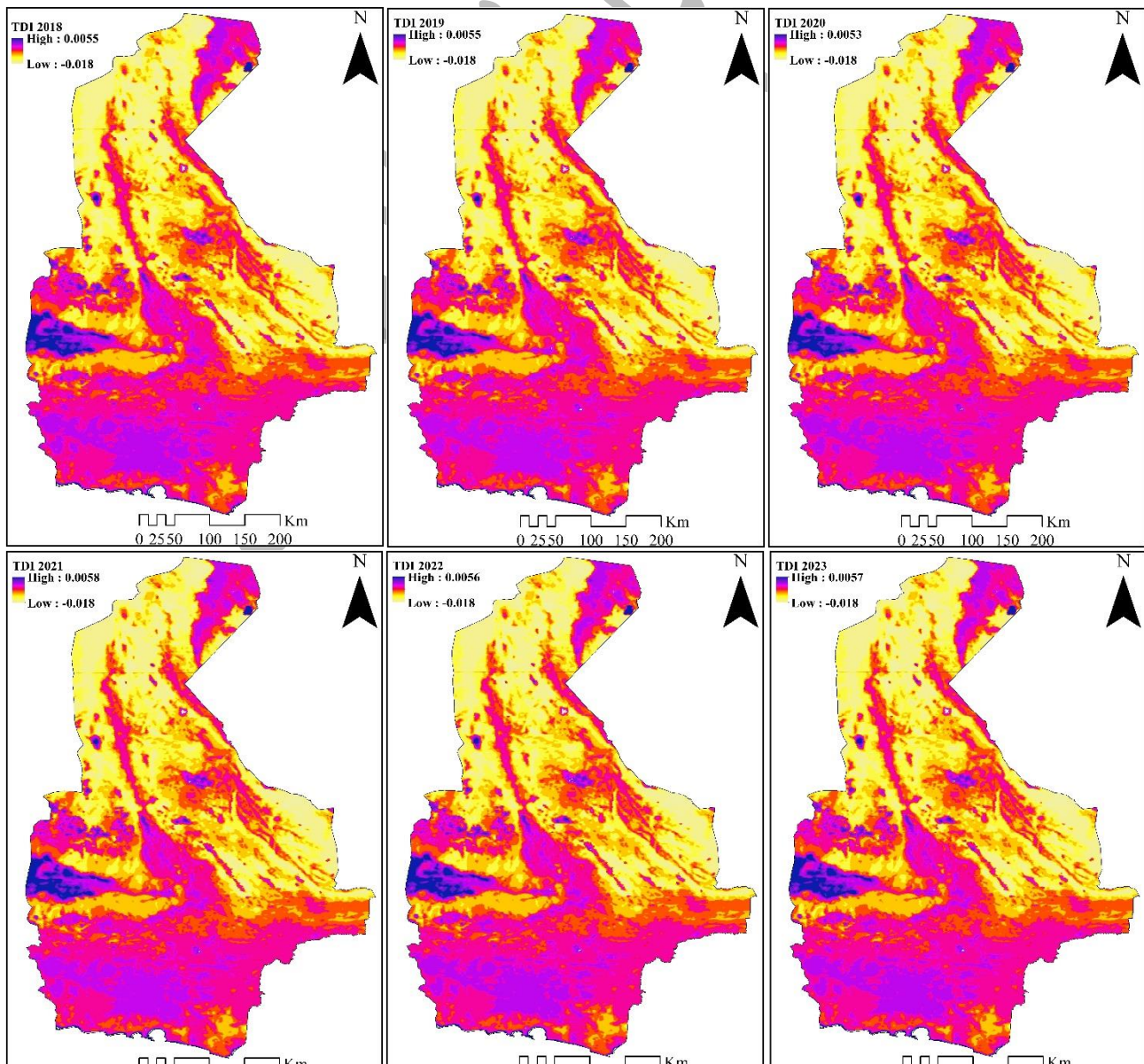
Figure 3. Flowchart of the research methodology and conceptual framework

نتایج و بحث

شاخص TDI

در این پژوهش، به منظور شناسایی و پایش مناطق مستعد شکل‌گیری و توسعه پدیده گردوغبار، از شاخص حرارتی گردوغبار (Thermal Dust Index – TDI) در بازه زمانی ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳ بهره‌برداری شد. این شاخص، که مبتنی بر اختلاف دمای تابشی میان باندهای حرارتی سنجنده MODIS تعریف می‌شود، با دقت مناسبی توان تفکیک نواحی خشک، داغ، و بدون پوشش گیاهی را از سایر مناطق دارا بوده و به عنوان یکی از شاخص‌های معتبر در سنجش‌ازدور برای ردیابی کانون‌های مستعد تولید گردوغبار شناخته می‌شود. استفاده از TDI امکان رصد تغییرات مکانی و زمانی شرایط سطحی مستعد گردوغبار را در مقیاس‌های منطقه‌ای و بین‌المللی فراهم می‌سازد. شاخص TDI با بهره‌گیری از ویژگی‌های حرارتی سطح زمین، امکان شناسایی مناطق با پتانسیل بالای تولید گردوغبار را فراهم می‌کند و به‌ویژه در مناطق خشک و نیمه‌خشک که پوشش گیاهی اندک و خاک‌های سست دارند،

کارایی بالایی دارد. بر اساس تحلیل نقشه‌های ارائه‌شده در شکل ۴، الگوی مکانی شاخص TDI در دوره مورد مطالعه نسبتاً پایدار باقی‌مانده و بخش‌های وسیعی از استان سیستان و بلوچستان، به‌ویژه شهرستان زابل (به دلیل گستره وسیع خاک‌های رسی خشک و بدون پوشش گیاهی)، نواحی بیابانی ایرانشهر، خاش، شهرهای مرزی سرباز، سراوان و مناطق ساحلی پیرامون چابهار، همچنین نواحی مرکزی استان (زاهدان و نیک شهر)، به طور مکرر دارای بیشترین مقادیر شاخص TDI بوده‌اند. این وضعیت نشان‌دهنده وجود شرایط سطحی مساعد برای خیزش گردوغبار در این مناطق است که به‌عنوان کانون‌های داخلی تولید گردوغبار شناسایی شده‌اند. هم‌پوشانی مکانی میان مقادیر بالای TDI و مقادیر بالای شاخص AOD در نقشه‌های تحلیل شده، اعتبار این نتایج را تقویت می‌کند و حاکی از هم‌گرایی بین شرایط سطحی و وقوع واقعی پدیده گردوغبار است. از نظر روند زمانی، مقادیر میانگین شاخص TDI در طی سال‌های مطالعه‌شده نوسانات اندکی داشته است. مقدار این شاخص در سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ در حدود ۰/۰۰۵۵ بوده است. در سال ۲۰۲۰، مقدار شاخص با اندکی کاهش به ۰/۰۰۵۳ رسیده و در سال ۲۰۲۱ با افزایش محسوس به ۰/۰۰۵۸، بالاترین مقدار ثبت‌شده طی شش سال گذشته را نشان می‌دهد. در سال‌های ۲۰۲۲ و ۲۰۲۳ نیز این شاخص به ترتیب به ۰/۰۰۵۶ و ۰/۰۰۵۷ رسیده است که نشان‌دهنده تداوم شرایط مستعد تولید گردوغبار در منطقه است. نکته قابل توجه این است که در تمام سال‌های مورد مطالعه، کمترین مقدار شاخص TDI برابر با ۰/۰۱۸- بوده است که بیانگر وجود یک آستانه حداقلی برای فعالیت گردوغبار در مناطق مورد بررسی است. این نتایج به‌وضوح نشان می‌دهد که شاخص TDI می‌تواند به‌عنوان یک شاخص مکمل و مؤثر در شناسایی مناطق پرخطر از نظر گردوغبار مورد استفاده قرار گیرد و اطلاعات ارزشمندی را برای سیاست‌گذاری‌های زیست‌محیطی و اقدامات پیشگیرانه در مدیریت بحران‌های ناشی از گردوغبار فراهم آورد.



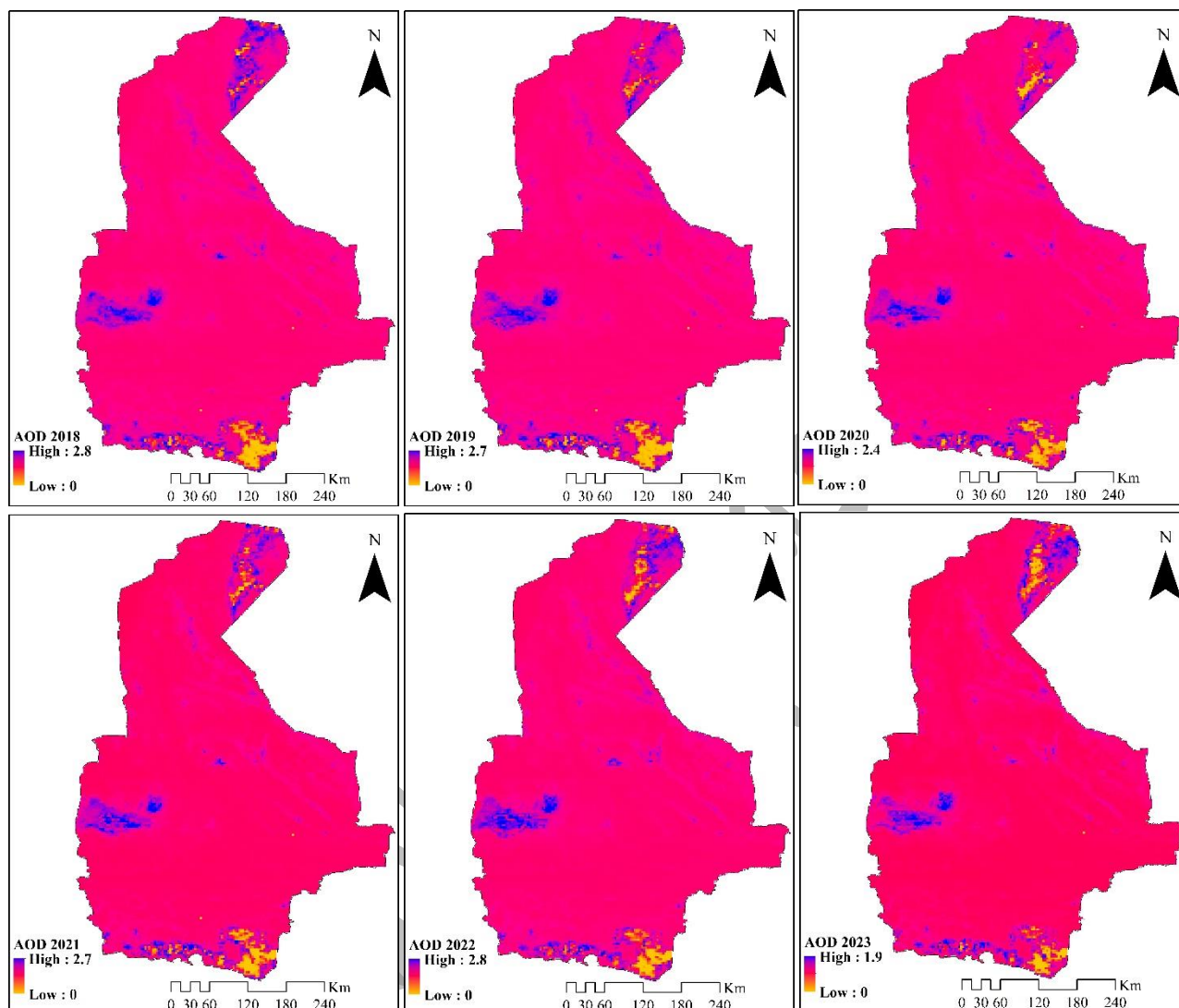
شکل ۴. توزیع فضایی شاخص حرارتی (TDI) در استان سیستان و بلوچستان با استفاده از داده‌های ماهواره MODIS (محصول حرارتی MOD11A1 و ترکیب باندهای حرارتی).

Figure 4. Spatial distribution of the Thermal Difference Index (TDI) in Sistan and Baluchestan Province using MODIS satellite data (derived from the thermal bands of the MOD11A1 product)

شاخص AOD

آلودگی گرد و غبار یکی از چالش‌های زیست‌محیطی جدی در استان سیستان و بلوچستان محسوب می‌شود که پیامدهای گسترده‌ای بر سلامت انسان، کشاورزی، صنعت و گردشگری دارد. این معضل زیست‌محیطی به‌ویژه در سال‌های اخیر شدت یافته و نیازمند اتخاذ راهکارهای جامع و پایدار در قالب برنامه‌های کنترلی و کاهش اثرات آن می‌باشد. به‌منظور بررسی دقیق الگوهای فضایی و زمانی آلودگی گرد و غبار در این استان، داده‌های شاخص AOD ماهواره MODIS برای دوره زمانی ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳ مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج حاصل از تحلیل نقشه‌های AOD، ارائه شده در شکل ۵، نشان می‌دهد که بیشترین میزان آلودگی گرد و غبار در استان سیستان و بلوچستان در نواحی شرقی، شمال شرقی، جنوب و بخش‌هایی از جنوب غربی استان متمرکز است. در مقابل، مناطق شمالی، غربی و برخی نواحی مرکزی دارای مقادیر کمتری از شاخص AOD نسبت به سایر نقاط استان است. این توزیع مکانی حاکی از آن است که الگوهای انتشار گرد و غبار در استان تحت تأثیر عوامل مختلفی از جمله موقعیت جغرافیایی، منابع انتشار داخلی و خارجی، و شرایط جوی قرار دارد. بررسی نقشه‌های AOD و تحلیل روند تغییرات این شاخص طی دوره مورد مطالعه نشان می‌دهد که میزان آلودگی در سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۲۲ به بالاترین مقدار خود رسیده است. در این دو سال، شاخص AOD در بخش‌های شمال شرقی، شرق و جنوب غربی استان شامل شهرستان‌های، زابل، ایرانشهر، بخش‌هایی از زاهدان، مناطق ساحلی چابهار، بخش‌هایی از مناطق مرزی شامل شهرستان‌های خاش، سراوان و سرباز به مقادیر بحرانی رسیده و در طبقه‌بندی خطرناک قرار گرفته است. این افزایش می‌تواند ناشی از ترکیبی از عوامل شامل تشدید خشکسالی‌های منطقه‌ای، افزایش فرسایش بادی، و انتقال گرد و غبار از کشورهای همسایه باشد. به‌طور خاص، موقعیت جغرافیایی استان در مجاورت با مناطق بیابانی افغانستان و پاکستان و وقوع بادهای ۱۲۰ روزه سیستان، از جمله عوامل کلیدی در انتقال و افزایش غلظت گرد و غبار در این منطقه محسوب می‌شود. علاوه بر این، بررسی مقادیر شاخص AOD در سال ۲۰۲۳ نشان می‌دهد که میانگین این شاخص نسبت به سال ۲۰۲۲ به میزان ۰/۹ واحد کاهش یافته و مقدار متوسط آن در سال ۲۰۲۳ به ۱/۹ رسیده است. با این حال، این مقدار همچنان در محدوده طبقه‌بندی خطرناک قرار دارد، که نشان‌دهنده استمرار شرایط بحرانی آلودگی گرد و غبار در استان می‌باشد. این کاهش نسبی ممکن است تحت تأثیر عوامل مختلفی نظیر تغییر در الگوهای باد، میزان بارندگی باشد. براساس نتایج حاصل از شاخص حرارتی گردوغبار (TDI) که در شکل ۴ نمایش داده شده است، می‌توان توزیع فضایی و شدت مقادیر شاخص AOD را به‌صورت معناداری توجیه نمود. مناطق با مقادیر بالای TDI، که معرف سطوح خشک، داغ و بدون پوشش گیاهی هستند، با نواحی دارای مقادیر بالای AOD هم‌پوشانی قابل توجهی دارند. این هم‌پوشانی نشان می‌دهد که بسیاری از کانون‌های انتشار گردوغبار که در نقشه‌های AOD شناسایی شده‌اند، به‌ویژه در نواحی شرقی، شمال شرقی و جنوب استان، دارای زمینه‌های سطحی مساعد برای خیزش گردوغبار بوده‌اند. بنابراین، شاخص TDI به‌عنوان شاخصی سطح‌محور، شواهد محکمی برای تبیین و تقویت یافته‌های حاصل از تحلیل شاخص AOD ارائه می‌دهد و بر وجود منابع داخلی

گردوغبار در این مناطق صحه می‌گذارد. به‌طور کلی، نتایج این مطالعه بر اهمیت پایش مستمر شاخص AOD در استان سیستان و بلوچستان تأکید دارد. اتخاذ سیاست‌های کارآمد برای مقابله با این پدیده، از جمله احیای منابع آبی، مدیریت پایدار اراضی، تثبیت بیابان‌ها، و همکاری‌های فرامرزی، می‌تواند گام مؤثری در کاهش تأثیرات مخرب آلودگی گرد و غبار در این منطقه باشد.



شکل ۵. توزیع AOD ماهواره MODIS در استان سیستان و بلوچستان (باند ۳، محصول AOD)

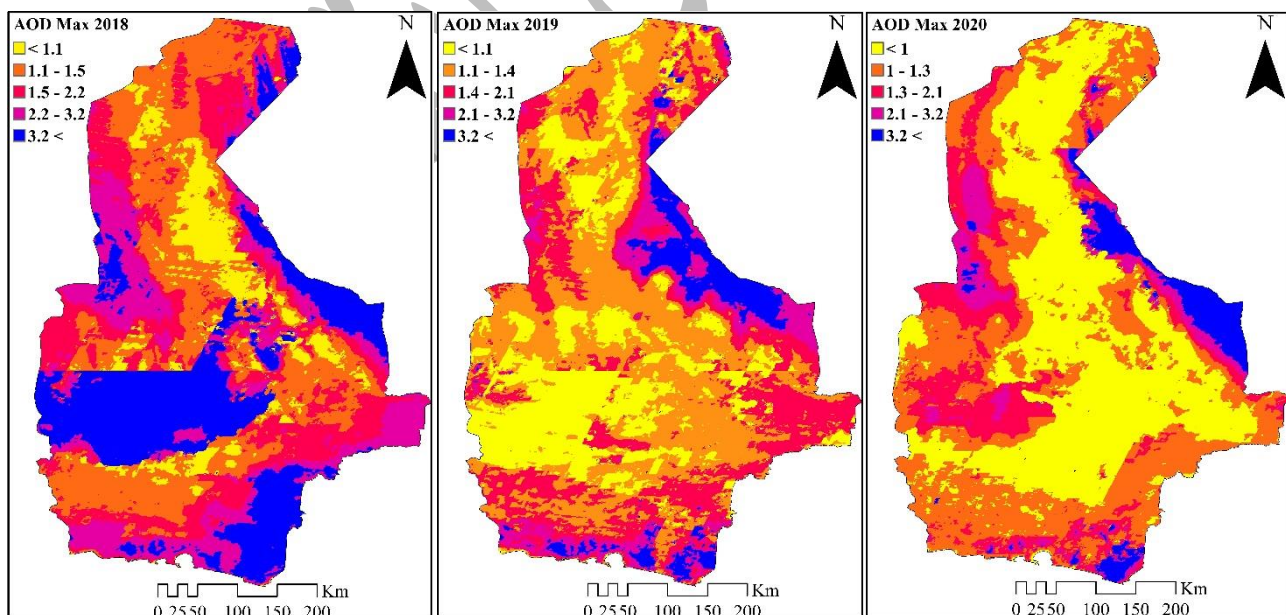
Figure 5. Distribution of AOD from MODIS Satellite in Sistan and Baluchestan Province (Band 3, AOD Product)

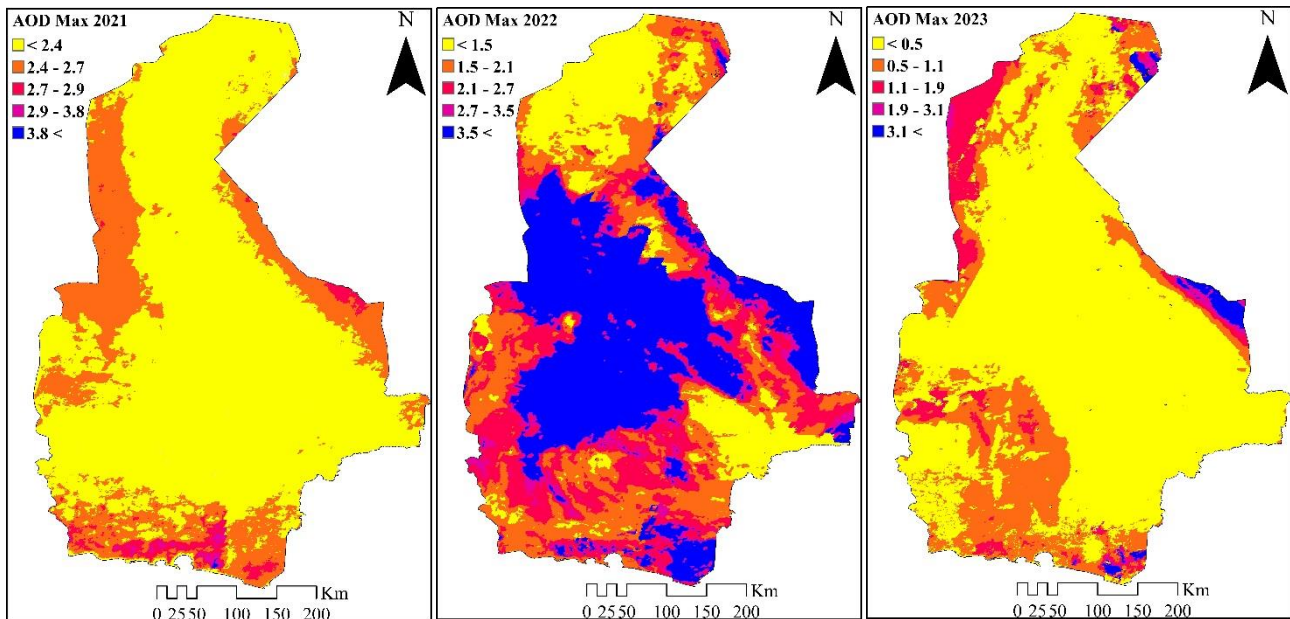
شاخص AOD-Max

برای بررسی سالانه شاخص AOD-Max از داده‌های ماهواره‌ای MODIS، ۳۶۰ تصویر روزانه تلفیق و یک تصویر ترکیبی سالانه استخراج شد که بالاترین مقادیر شاخص را در طول سال نشان می‌دهد. تحلیل نقشه‌های AOD-Max (شکل ۶) نشان می‌دهد که استان سیستان و بلوچستان به‌طور مداوم با سطوح بحرانی این شاخص مواجه بوده است، به‌طوری‌که روزهای بحرانی (بالاترین مقادیر شاخص) در تمامی سال‌های بررسی شده مشاهده می‌شود. این امر نشان‌دهنده شدت و گسترش همیشگی پدیده گردوغبار

در این استان است و بیانگر اهمیت ویژه‌ای در ارزیابی شرایط اقلیمی و آلودگی هوا در این منطقه می‌باشد. نتایج تحلیل نشان می‌دهد که مناطق شرقی، جنوبی، شمال شرقی، غربی و جنوب غربی استان شامل شهرستان‌های، ایرن شهر، سرپاز و مناطق غربی زاهدان و مناطق ساحلی چابهار به‌ویژه در برخی از سال‌ها، در معرض شدیدترین آلودگی گردوغبار قرار داشته‌است. علاوه بر این، مناطق مرزی استان، به‌ویژه نواحی هم‌مرز با افغانستان و پاکستان، شامل شهرستان‌های زابل، مناطق شرقی زاهدان، خاش و سرپاز بالاترین میزان آلودگی گرد و غبار را در تمامی سال‌ها تجربه کرده‌است. این تحلیل به‌وضوح نشان می‌دهد که این مناطق به دلیل موقعیت جغرافیایی و شرایط اقلیمی خاص خود، از نظر وقوع طوفان‌های گرد و غبار مستعدتر از سایر نواحی استان می‌باشد. مهم‌ترین عوامل در تشدید آلودگی گردوغبار در این مناطق عبارتند از: بیابان‌زایی و خشکسالی گسترده در مناطق مرزی ایران و افغانستان، وقوع بادهای ۱۲۰ روزه سیستان که نقش مهمی در جابه‌جایی ذرات گردوغبار دارند، خشک‌شدن رودخانه هیرمند که به کاهش سطح آب و افزایش فرسایش خاک منجر شده است، و نابودی تالاب هامون که تا پیش از خشکسالی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین منابع تنظیم رطوبت در منطقه عمل می‌کرد (Mir et al., 2016). این عواملی که موجب کاهش توان تحمل محیط زیست و تشدید فرایند بیابان‌زایی می‌شوند، نقشی حیاتی در افزایش گردوغبار در استان ایفا کرده‌است. مقادیر AOD-Max در سال‌های مختلف نشان می‌دهد که سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۲۲ بالاترین میزان این شاخص را داشته‌است. در سال ۲۰۲۲، وضعیت آلودگی گرد و غبار نسبت به سال‌های قبل تشدید شد. به‌گونه‌ای که تمامی مناطق مرزی استان، مناطق جنوبی و مرکزی آن در وضعیت بحرانی قرار گرفت. تحلیل روند تغییرات این شاخص نشان می‌دهد که AOD-Max در سال ۲۰۲۲ نسبت به سال‌های گذشته ۰/۳ واحد افزایش یافته و حداکثر مقدار آن به ۳/۵ رسیده است که این مقدار در دسته‌بندی آلودگی هوا به‌عنوان آلودگی خطرناک محسوب می‌شود. این افزایش قابل توجه، که در کنار سایر روندهای موجود در داده‌ها تأکید می‌کند، تأثیرات منفی آن را بر کیفیت هوای منطقه و سلامت ساکنان استان می‌سازد.

این یافته‌ها ضرورت اجرای برنامه‌های جامع کنترلی و پایش مستمر آلودگی گرد و غبار در منطقه را بیش از پیش برجسته می‌سازد.





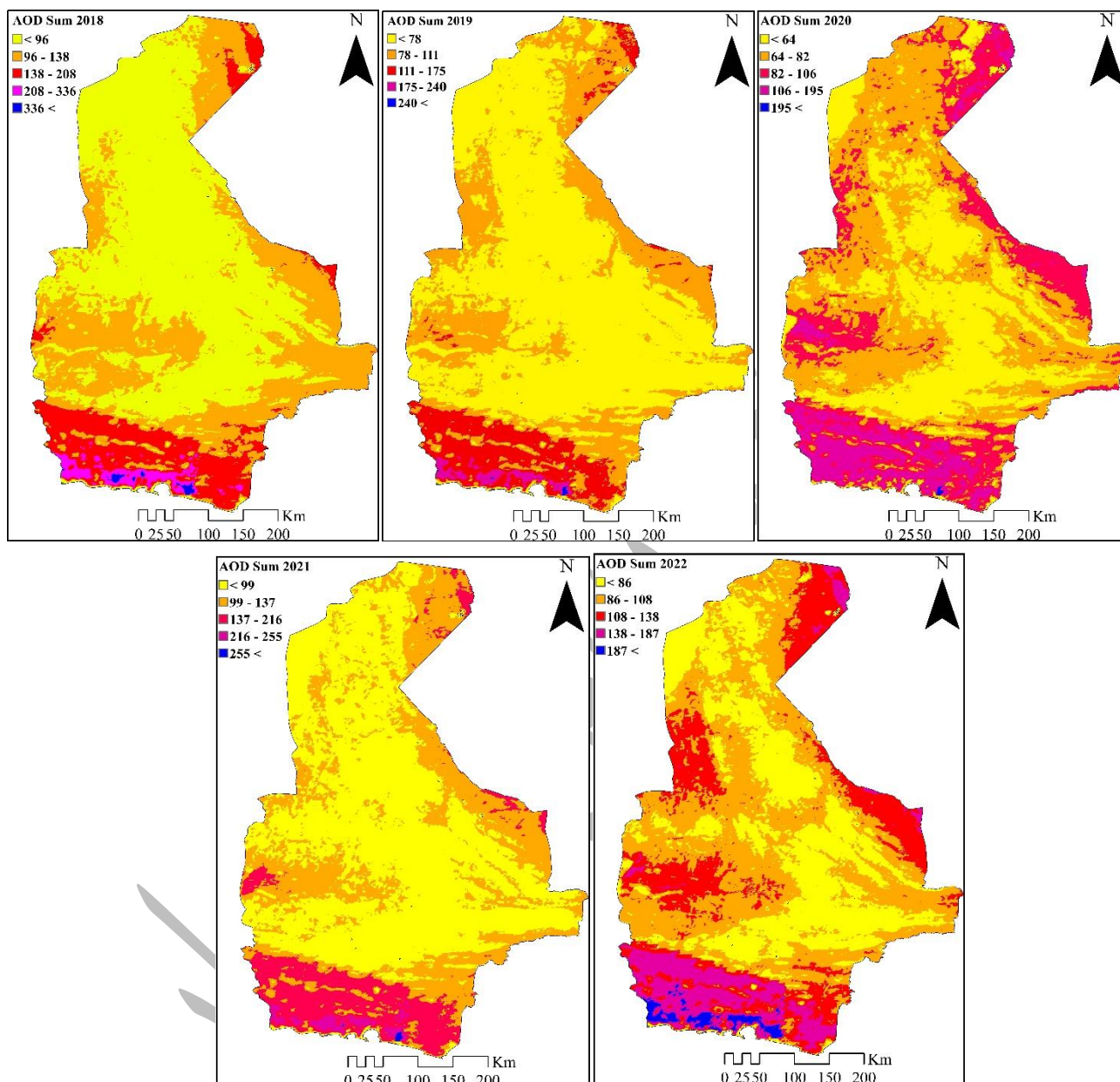
شکل ۶. توزیع فضایی AOD Max استان سیستان و بلوچستان با استفاده از داده‌های ماهواره MODIS، (باند ۳ و محصول AOD)

Figure 6. Spatial Distribution of AOD Max in Sistan and Baluchestan province using MODIS satellite data (Band 3 and AOD product)

شاخص AOD-Sum

در این پژوهش، به منظور تحلیل سالانه شدت و فراوانی رخداد‌های گردوغبار در استان سیستان و بلوچستان، از شاخص سالانه AOD-Sum بهره‌گیری شد. برای استخراج این شاخص، مجموع داده‌های ۳۶۰ روزه ماهواره MODIS در هر سال مورد استفاده قرار گرفت تا یک تصویر ترکیبی حاصل گردد که بیانگر تراکم تجمعی آلودگی ناشی از گردوغبار در طول سال باشد. برای سال ۲۰۲۳، شاخص AOD-Sum نتوانست خروجی تصویری ارائه دهد. شاخص AOD-Sum برخلاف مقادیر میانگین یا نقطه‌ای، نمایانگر تعداد دفعات و شدت تکرار پدیده گردوغبار در واحد زمان و مکان است و از این حیث، ابزاری قدرتمند برای پایش بارگرد و پیش‌بینی مناطق با فشار بالای زیست‌محیطی محسوب می‌شود. تحلیل نقشه‌های AOD-Sum (شکل ۷) نشان می‌دهد که بیشترین بار تجمعی آلودگی گردوغبار در سال‌های ۲۰۱۸، ۲۰۲۰ و به‌ویژه ۲۰۲۲ رخ داده است؛ به‌گونه‌ای که در این سال‌ها، وسعت و شدت مناطق تحت تأثیر به‌طور چشم‌گیری افزایش یافته است. بررسی الگوی مکانی این شاخص حاکی از آن است که نواحی شرقی، شمال‌شرقی، و جنوبی استان، از جمله شهرستان‌های زابل، زاهدان، خاش، ایرانشهر و چابهار، با مقادیر بالای AOD-Sum مواجه بوده‌اند. این نواحی در برخی از سال‌ها بیش از ۱۰۰ تا ۱۲۰ روز درگیر شرایط بحرانی گردوغبار بوده‌اند، که نه تنها نشان‌دهنده فراوانی وقوع این پدیده است، بلکه بر فشار مزمن زیست‌محیطی در این مناطق تأکید دارد. تمرکز بالای AOD-Sum در مناطق مرزی و نوار جنوبی استان، نشان‌دهنده اثرپذیری مستقیم این نواحی از منابع خارجی گردوغبار، به‌ویژه مناطق بیابانی افغانستان و پاکستان و همچنین نقش کلیدی بادهای موسمی و بادهای ۱۲۰ روزه سیستان در انتقال و تشدید این آلودگی‌هاست. افزون‌براین، وجود منابع داخلی مانند سطوح خشک و رس‌دار، در تشدید این وضعیت نقش مضاعفی ایفا می‌کند، به‌ویژه آنکه نتایج حاصل از شاخص TDI نیز هم‌پوشانی بالایی با این الگوهای مکانی دارد. به‌طور کلی، تحلیل دقیق شاخص AOD-Sum این امکان را فراهم می‌سازد تا الگوهای تکرارپذیر زمانی و تمرکز فضایی گردوغبار شناسایی شود و به تصمیم‌گیران در تدوین راهبردهای مدیریت بحران، ارزیابی مخاطرات زیست‌محیطی، و کاهش آثار بهداشتی، اقتصادی و اجتماعی

این پدیده یاری رساند. استمرار پایش این شاخص در بازه‌های زمانی طولانی مدت می‌تواند به‌عنوان پایه‌ای برای هشداردهی سریع و برنامه‌ریزی منطقه‌ای در مواجهه با طوفان‌های گردوغباری مورد استفاده قرار گیرد.



شکل ۷. توزیع فضایی AOD-Sum در استان سیستان و بلوچستان از داده‌های ماهواره MODIS (باند ۳ و محصول AOD).

Figure 7. Spatial Distribution of AOD-Sum over Sistan and Baluchestan Province from MODIS Satellite Data (Band 3 and AOD Product)

تحلیل نقشه‌های شاخص‌های مختلف AOD نشان می‌دهد که بیشترین آلودگی گرد و غبار در استان سیستان و بلوچستان مربوط به مناطق مرزی، جنوبی و بخش‌هایی از مرکز و غرب استان است. مناطق مرزی استان در تمامی طول سال درگیر گردوغبار و آلودگی هوا می‌باشد، که این امر بیانگر تأثیر قابل توجه منابع گردوغبار خارجی و کشورهای همسایه بر کیفیت هوای منطقه می‌باشد. به‌منظور بررسی مسیر حرکت گردوغبار و فرکانس جریان‌های گردوغبار، از داده‌های ایستگاه زابل، زاهدان و مدل HYSPLIT استفاده شد. علاوه بر بررسی‌های علمی و پایش مستمر، اجرای اقدامات عملی برای کاهش اثرات گردوغبار

ضروری است. تقویت پوشش گیاهی و مدیریت منابع آبی در مناطق خشک، به‌ویژه در نزدیکی مرزهای استان، از جمله راهکارهای کلیدی برای کاهش شدت طوفان‌های گردوغباری است. همچنین، باید گام‌های جدی‌تری در راستای جلوگیری از کاهش بیشتر رطوبت خاک، حفاظت از منابع آبی و احیای تالاب‌های مهم استان برداشته شود، چراکه این عوامل نقش مهمی در کاهش انتشار گردوغبار دارد. از سوی دیگر، اجرای سیاست‌های آموزشی و اطلاع‌رسانی، به‌ویژه در میان جوامع محلی که بیشترین تأثیر را از این پدیده می‌پذیرد، می‌تواند منجر به مدیریت بهتر و کاهش خطرات ناشی از آلودگی گردوغبار شود. بنابراین، مقابله با بحران گردوغبار در این استان نیازمند یک رویکرد میان‌رشته‌ای و جامع است که تلفیقی از مدیریت محیط‌زیستی، پایش داده‌های ماهواره‌ای، سیاست‌گذاری‌های کلان و همکاری‌های منطقه‌ای را شامل شود.

بررسی مسیر گردوغبار با مدل HYSPLIT

برای بررسی مسیر گردوغبار استان سیستان و بلوچستان از روزهایی با شاخص بالای گردوغباری استفاده شد (به طوری که شاخص AQI برابر ۵۰۰ بوده است) که در جدول ۲ قابل مشاهده است، و با استفاده از مدل HYSPLIT برگشت به عقب ۲۴ ساعته و تصاویر ماهواره‌ای (MODIS Corrected Reflectance (True Color)، منشاء گرد و غبار در استان سیستان و بلوچستان مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به اینکه نتایج مدل و مسیر گردوغبار برای همه روزها یکسان بوده است، به بررسی سه روز از سال ۲۰۲۳ و ۲۰۲۴ برای ایستگاه زابل و زاهدان که دارای داده واقعی و تصویر بدون ابر بوده است، پرداخته شده است،

جدول ۲. روزهای منتخب برای بررسی مسیر آلودگی در استان سیستان و بلوچستان

Table 2. Selected days for tracking pollution pathways in Sistan and Baluchestan Province

No.	Date	AQI
1	13/01/2023	500
2	07/08/2023	500
3	16/08/2024	500

گردوغبار شماره ۱. شکل ۸ فرآیند شکل‌گیری و گسترش طوفان گرد و غبار را از طریق مدل‌سازی مسیرهای جوی و تصاویر ماهواره‌ای مورد بررسی قرار می‌دهد. این شکل شامل دو بخش اصلی و چهار زیرمجموعه است که به ترتیب عبارت‌اند از: نقشه فراوانی مسیرهای جوی، نقشه مسیرهای جوی، نقشه رنگ واقعی MODIS، و نقشه ذرات گرد و غبار MODIS (رنگ واقعی). این تجزیه و تحلیل با هدف شناسایی مناطق کلیدی انتشار گرد و غبار، مسیر انتقال آن، و میزان تأثیرپذیری استان سیستان و بلوچستان از این پدیده انجام شده است.

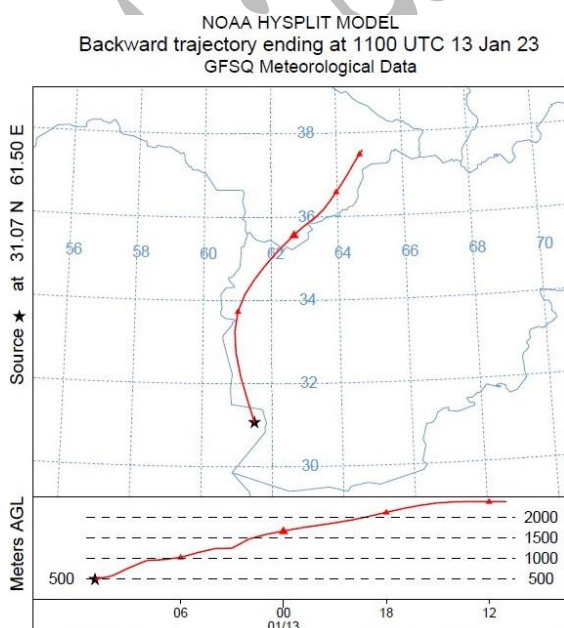
نقشه فراوانی مسیرهای جوی توزیع مسیرهای انتقال گرد و غبار را با استفاده از مدل‌سازی مسیر ذرات تحلیل می‌کند. این تحلیل مبتنی بر مدل‌های عددی پیش‌بینی وضعیت جو و داده‌های سنسور از دور بوده و با ارزیابی عوامل جوی از جمله الگوهای باد، فشار هوا، و ویژگی‌های ترمودینامیکی جو، مناطق با بیشترین احتمال انتشار گرد و غبار را شناسایی می‌کند. براساس نتایج ارائه‌شده در این نقشه، ۲۴ ساعت پیش از وقوع گردوغبار در زابل و زاهدان، بیشترین فراوانی مسیرهای جوی در نواحی مرزی بین ترکمنستان، افغانستان و ایران مشاهده شده است. این جریان‌های جوی پس از عبور از بیابان‌های افغانستان و نواحی مرزی

این کشور با ایران، وارد شهرستان زابل شده و در نهایت به زاهدان رسیده‌اند. به دلیل تمرکز بالای ذرات گرد و غبار در این مسیر، شاخص آلودگی هوا (AQI) به حداکثر مقدار خود، یعنی ۵۰۰، رسیده است که نشان‌دهنده شرایط بحرانی و بسیار خطرناک برای سلامت عمومی می‌باشد. در نقشه فراوانی مسیرهای جوی، طیف رنگی نشان‌دهنده میزان تراکم ذرات گرد و غبار است، به طوری که نواحی قرمز نشان‌دهنده مسیرهایی با بالاترین تراکم انتقال ذرات (بیش از ۹۰٪) می‌باشد.

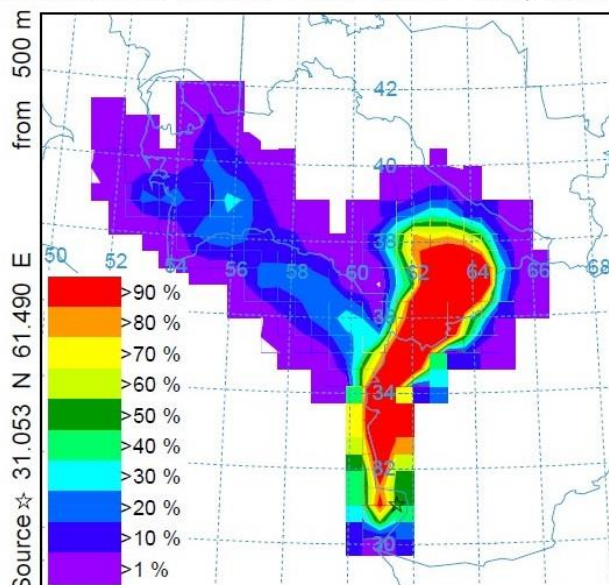
نقشه مسیرهای جوی با استفاده از مدل‌سازی مسیرهای عقبگرد (Backward Trajectory Model)، مسیر حرکت و منشأ گرد و غبار را بازسازی می‌کند. این روش که برای ردیابی منشأ آلاینده‌ها و ارزیابی انتقال فرامرزی آلودگی به کار می‌رود، نشان می‌دهد که طوفان گرد و غبار از نواحی بیابانی ترکمنستان و افغانستان منشأ گرفته و طی ۲۴ ساعت به زابل و طی ۴۸ ساعت به زاهدان رسیده است. بررسی تغییرات ارتفاعی مسیر حرکت گرد و غبار نشان می‌دهد که در لحظه آغاز این پدیده، جریان‌های جوی در ارتفاعی بیش از ۲۰۰۰ متر از سطح زمین قرار داشته‌است، اما با عبور از بیابان‌های افغانستان، ارتفاع جریان کاهش یافته و در برخی نقاط به کمتر از ۱۰۰۰ متر و حتی ۵۰۰ متر رسیده است. این کاهش ارتفاع، همراه با افزایش تراکم ذرات گرد و غبار، موجب شکل‌گیری شرایط حاد آلودگی در سیستان و بلوچستان شده است. این گردوغبار، علاوه بر تأثیرگذاری بر نواحی مرزی افغانستان، وارد مرزهای ایران شده و به‌طور گسترده استان سیستان و بلوچستان را تحت تأثیر قرار داده است.

نقشه رنگ واقعی MODIS گسترش کامل طوفان گرد و غبار را نمایش می‌دهد. این تصاویر پوشش وسیعی از بیابان‌های افغانستان، مناطق شرقی ایران، و بخش‌هایی از مرزهای پاکستان را که تحت تأثیر آلودگی شدید گرد و غبار قرار گرفته‌است، مشخص می‌کند. نقشه ذرات گرد و غبار MODIS رنگ واقعی، که به روز شماره ۱ در جدول ۲ مربوط است، وقوع طوفان گرد و غبار در استان سیستان و بلوچستان را به‌وضوح نشان داده و بیانگر گسترش آلودگی گرد و غبار به نواحی شرقی استان است. بررسی این تصاویر نشان می‌دهد که تمرکز آلاینده‌های جوی در نواحی مرزی سیستان و بلوچستان بسیار بالا بوده و با عبور جریان‌های جوی از مرزهای افغانستان، میزان ذرات گرد و غبار در منطقه به شدت افزایش یافته است. تحلیل مسیرهای جوی و داده‌های سنجش از دور ارائه‌شده در شکل ۸ نشان‌دهنده نقش کلیدی بیابان‌های افغانستان و ترکمنستان در شکل‌گیری و گسترش طوفان‌های گرد و غبار در سیستان و بلوچستان است. این نتایج اهمیت پایش مستمر شرایط جوی، استفاده از داده‌های ماهواره‌ای، و بهره‌گیری از مدل‌های عددی پیشرفته در تحلیل پدیده‌های گرد و غبار را برجسته می‌کند.

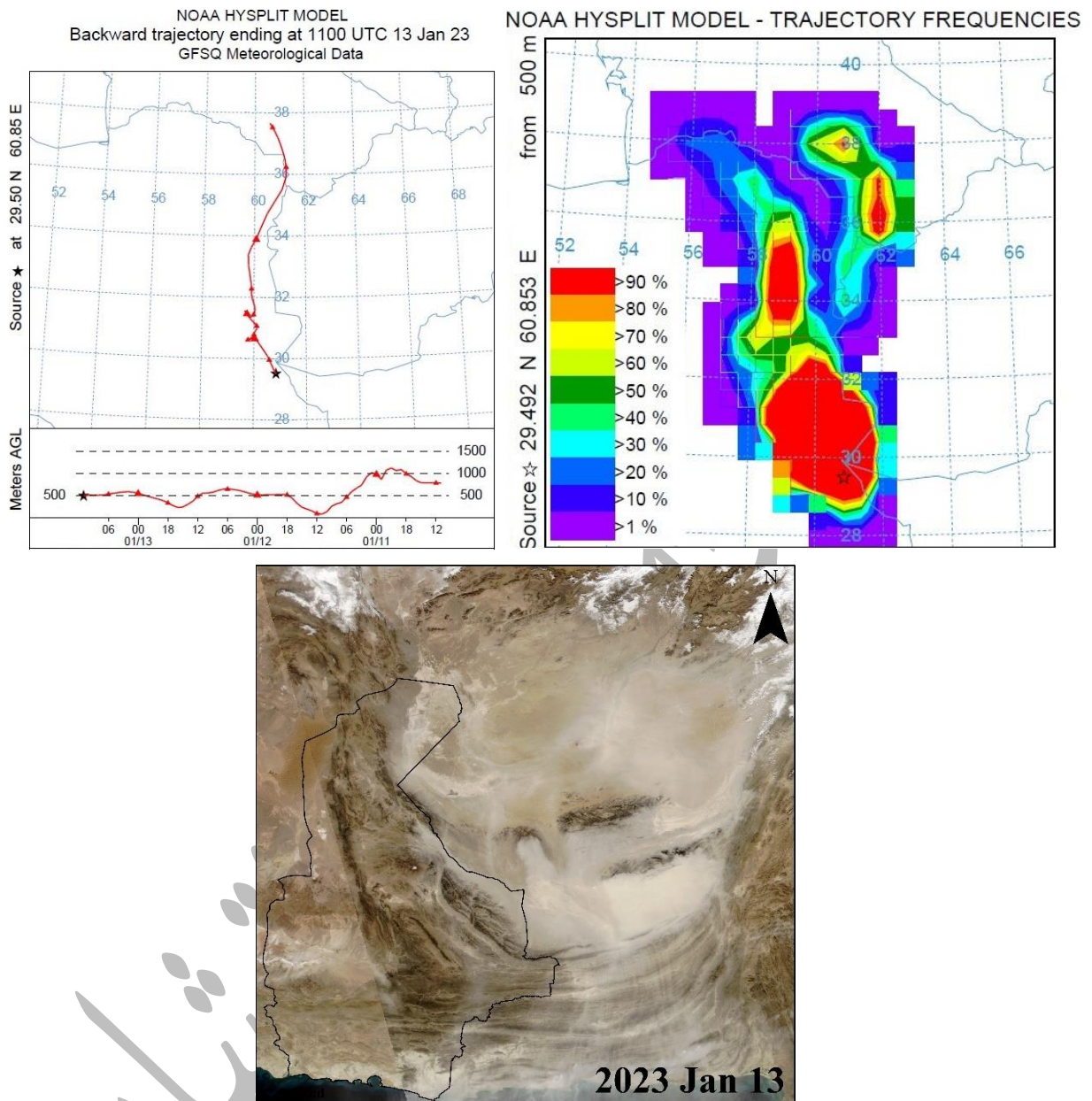
A) Zabol



NOAA HYSPLIT MODEL - TRAJECTORY FREQUENCIES



B) Zahedan



شکل ۸. ردیابی طوفان گرد و غبار شماره ۱ با استفاده از مدل HYSPLIT (مسیرهای عقبگرد)، نقشه فراوانی مسیرهای جوی، نقشه مسیرهای جوی، نقشه رنگ واقعی ذرات گرد و غبار MODIS

Figure 8. Tracking of Dust No. 1 using HYSPLIT Model (Backward), Trajectory Frequencies Map, Trajectory Map, MODIS True Color Dust Particle

گردوغبار شماره ۲. بر اساس تحلیل‌های ارائه‌شده در شکل ۹، مسیر جریان‌های جوی ابتدا از مناطق ترکمنستان در ارتفاع ۲۵۰۰ متری شکل گرفته و سپس با ورود به افغانستان دچار کاهش ارتفاع شده و در مناطقی به کمتر از ۱۰۰۰ متر و سپس ۵۰۰ متر می‌رسد. این کاهش ارتفاع، همراه با شرایط جوی حاکم، منجر به ایجاد و تشدید طوفان گردوغبار در نواحی بیابانی

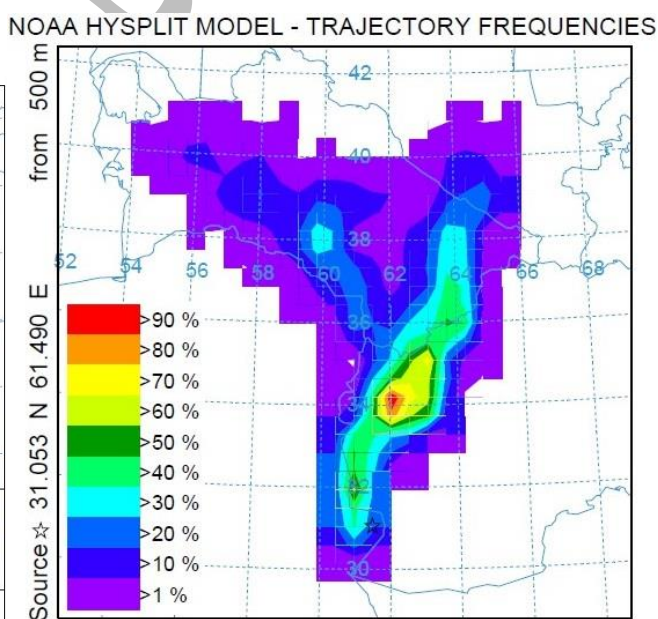
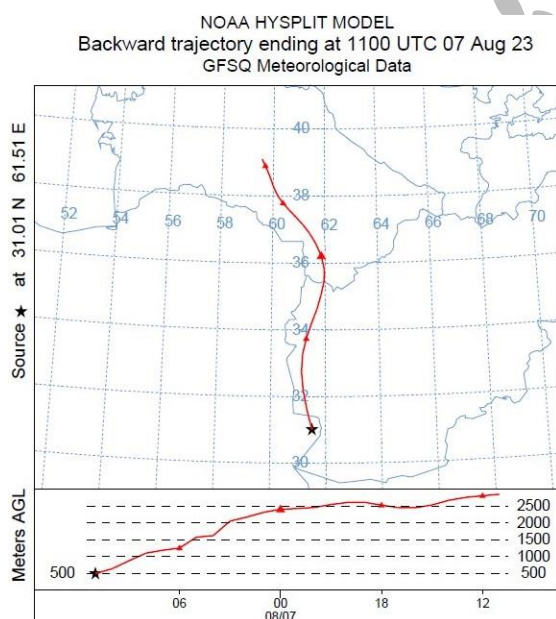
افغانستان می‌شود. با ادامه‌ی این جریان، توده‌های گردوغبار به سمت مرزهای شرقی ایران حرکت کرده و وارد استان سیستان و بلوچستان می‌شود.

نقشه فراوانی مسیره‌های جوی نشان می‌دهد که بیشترین فرکانس وقوع این جریان‌ها در بیابان‌های افغانستان رخ داده است. نکته حائز اهمیت در شکل B شماره ۹ مشخص می‌شود، که نشان می‌دهد پس از عبور جریان از زابل، ارتفاع آن به کمتر از ۵۰۰ متر کاهش یافته و فرکانس آن به بیشترین مقدار خود می‌رسد. این شرایط منجر به افزایش شدید تراکم ذرات گردوغبار در نزدیکی سطح زمین و در نهایت افزایش حداکثری آلودگی هوا در شهر زاهدان شده است. تمامی این تحولات جوی و انتشار گردوغبار در بازه زمانی کوتاه ۲۴ ساعته رخ داده‌اند، که نشان‌دهنده ماهیت سریع و پویای این پدیده در منطقه است.

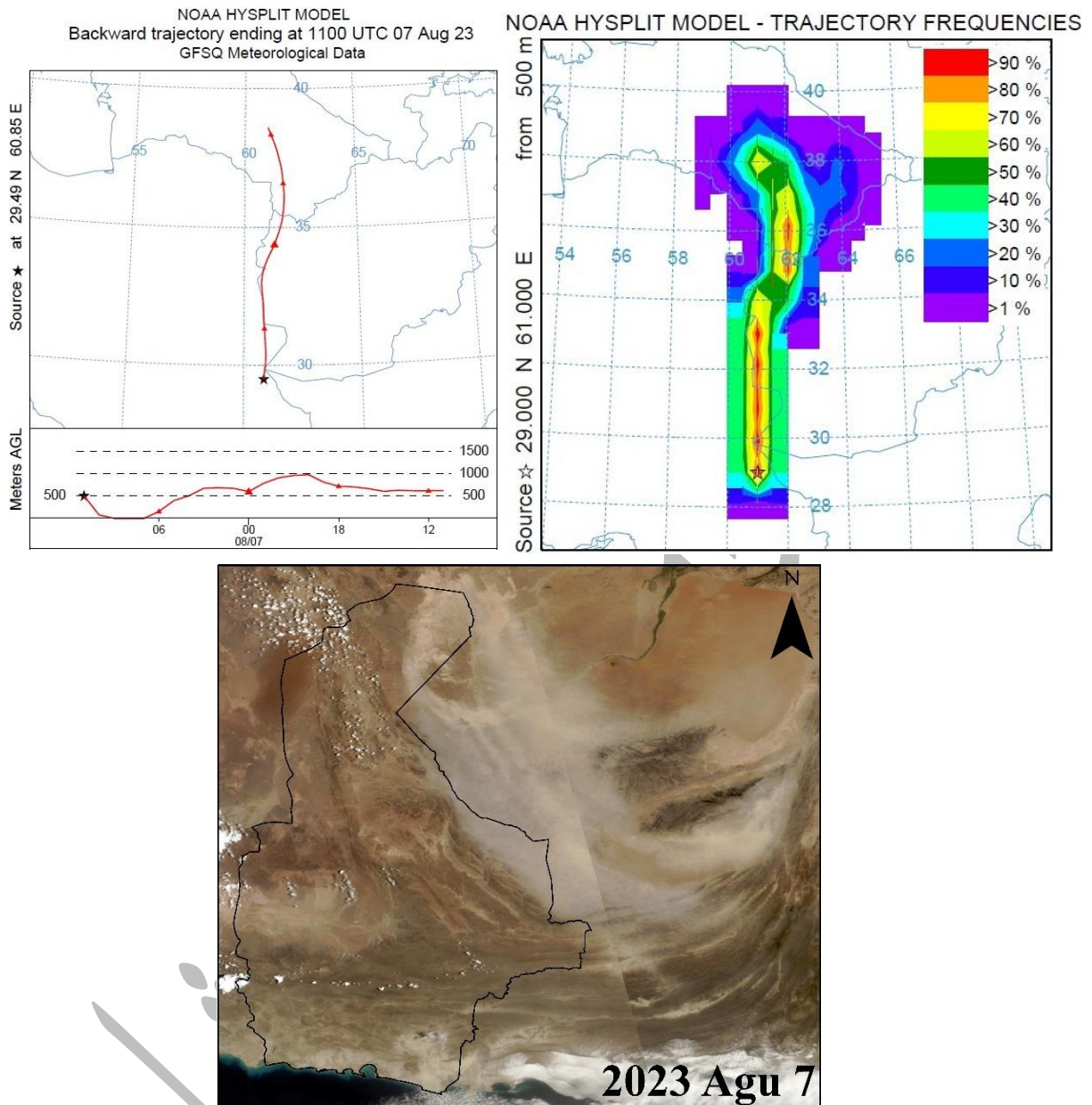
نقشه رنگ واقعی MODIS در تاریخ شماره ۲، توزیع و گسترش وسیع گردوغبار را در سطح منطقه نمایش می‌دهد. این نقشه تأیید می‌کند که توده‌های غلیظ گردوغبار بخش‌های وسیعی از افغانستان، پاکستان و شرق ایران را تحت تأثیر قرار داده‌اند. این رویداد منجر به افزایش شدید آلودگی در شهرستان‌های استان سیستان و بلوچستان شده و نشان‌دهنده تأثیرات گسترده و فرامرزی گردوغبار در منطقه جنوب‌غرب آسیا است.

تحلیل این داده‌ها اهمیت پایش مستمر جریان‌های جوی و پدیده‌های گردوغبار را نشان داده و بر لزوم تدوین راهبردهای کارآمد جهت کاهش اثرات مخرب این رخدادها بر سلامت عمومی و محیط‌زیست تأکید می‌کند.

A) Zabol



B) Zahedan



شکل ۹. ردیابی طوفان گرد و غبار شماره ۲ با استفاده از مدل HYSPLIT (مسیرهای عقبگرد)، نقشه فراوانی مسیرهای جوی، نقشه مسیرهای جوی، نقشه رنگ واقعی ذرات گرد و غبار MODIS

Figure 9. Tracking of Dust No. 2 using HYSPLIT Model (Backward), Trajectory Frequencies Map, Trajectory Map, MODIS True Color Dust Particle

گردوغبار شماره ۳. باتوجه به اینکه گردوغبار شماره ۳ سبب آلودگی در شهرستان زابل شده و شهر زاهدان را دچار آلودگی گردوغباری نکرده است، لذا نتایج برای شهرستان زابل آورده شده است.

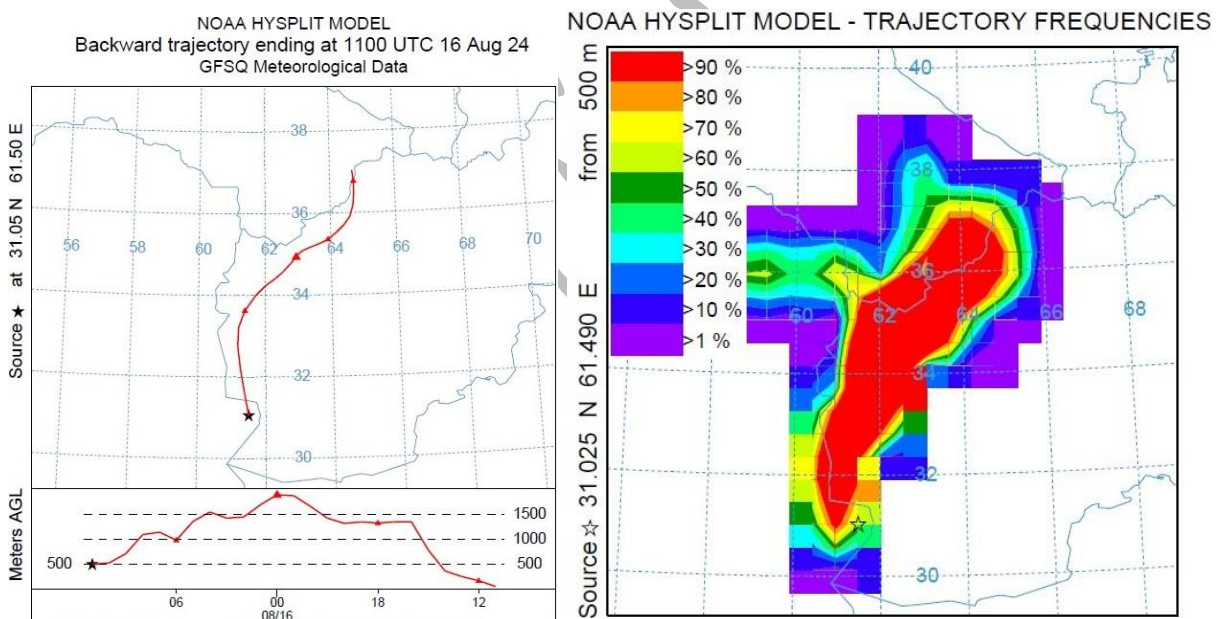
شکل ۱۰ مسیر جریان‌های جوی را نشان می‌دهد که از نواحی مرزی ترکمنستان و افغانستان منشأ گرفته و در ارتفاعی کمتر از ۵۰۰ متر شکل گرفته است. این جریان‌ها در ادامه مسیر خود، با حرکت به سمت مناطق پایین‌دست، به ارتفاع ۱۵۰۰ متری

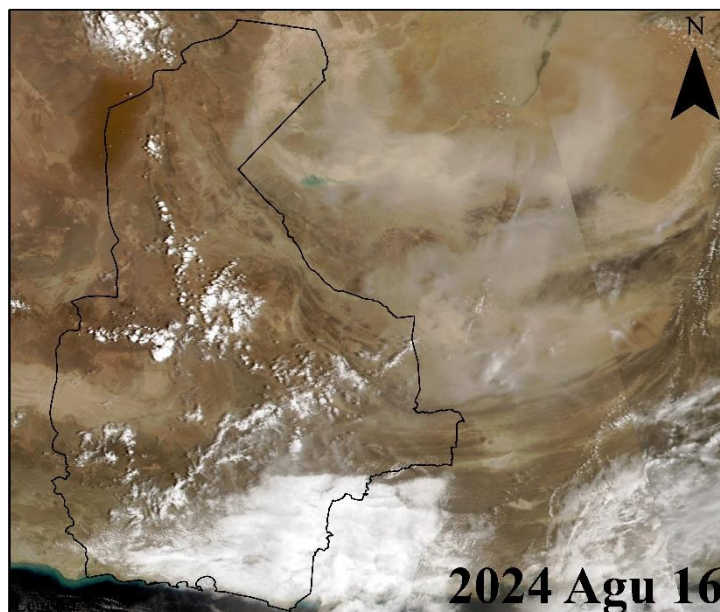
رسیده‌اند. پس از عبور از این مناطق، در مرز افغانستان و ایران مجدداً به ارتفاع کمتر از ۵۰۰ متر کاهش یافته‌است که این کاهش ارتفاع منجر به افزایش غلظت گردوغبار و آلودگی شدید در شهر زابل شده است.

نقشه فراوانی مسیرهای جوی نشان می‌دهد که بیشترین فرکانس مسیرهای جریان‌های جوی، مربوط به مناطق مرزی ترکمنستان و افغانستان و همچنین مرز افغانستان و ایران بوده است، به طوری که بیش از ۹۰٪ مسیرهای شناسایی شده از این نواحی عبور کرده‌اند. این موضوع نقش کلیدی نواحی مرزی ترکمنستان و افغانستان را در تشدید آلودگی گردوغبار شهر زابل تأیید می‌کند. نقشه رنگ واقعی MODIS نیز بر این یافته‌ها صحنه می‌گذارد و نشان می‌دهد که گردوغبار از مناطق مرزی افغانستان وارد ایران شده و شهر زابل و شرق استان سیستان و بلوچستان را تحت تأثیر قرار داده است.

بررسی دقیق تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های مربوط به مسیرهای جوی نشان می‌دهد که این جریان‌های جوی با انتقال گسترده ذرات گردوغبار، سهم بسزایی در آلودگی هوای زابل و تشدید بحران گردوغبار در شرق ایران داشته‌است. نتایج حاصل از این تحلیل‌ها بر ضرورت پایش مستمر جریان‌های جوی و تدوین راهکارهای منطقه‌ای برای کنترل و کاهش تأثیرات گردوغبار در مناطق آسیب‌پذیر تأکید دارند. مطالعات بیشتر بر روی الگوهای فصلی و تغییرات زمانی این جریان‌ها می‌تواند به درک بهتری از روندهای آینده و تدوین سیاست‌های کارآمدتر برای کاهش اثرات مخرب گردوغبار در منطقه منجر شود.

A) Zabol





شکل ۱۰. ردیابی طوفان گرد و غبار شماره ۳ با استفاده از مدل HYSPLIT (مسیرهای عقبگرد)، نقشه فراوانی مسیرهای جوی، نقشه مسیرهای جوی، نقشه رنگ واقعی ذرات گرد و غبار MODIS

Figure 10. Tracking of Dust No. 3 using HYSPLIT Model (Backward), Trajectory Frequencies Map, Trajectory Map, MODIS True Color Dust Particle

بررسی‌های انجام‌شده با استفاده از مدل HYSPLIT و تحلیل تصاویر واقعی MODIS به‌وضوح نشان داد که بیابان‌های واقع در نواحی مرزی افغانستان، ترکمنستان و پاکستان، نقش محوری در انتشار و انتقال گردوغبار به استان سیستان و بلوچستان دارند. این بیابان‌ها به‌عنوان منابع فعال گردوغبار، تحت تأثیر الگوهای جوی و فرآیندهای سینوپتیکی، حجم بالایی از ذرات معلق را به سمت شرق ایران هدایت می‌کنند. تحلیل مسیرهای انتقالی نشان می‌دهد که سامانه‌های جوی غالب در منطقه، موجب تسریع در جابه‌جایی توده‌های گردوغبار و افزایش شدت آلودگی در مناطق مسکونی استان سیستان و بلوچستان، به‌ویژه شهرهای زابل و زاهدان، می‌شود، همچنین بادهای ۱۲۰ روزه سیستان نیز نقش مهمی در ایجاد گردوغبار استان دارد. پژوهش‌های متعددی در رابطه با آلودگی گردوغبار استان سیستان و بلوچستان نیز صورت گرفته است، از جمله، قنبری و ترانه (۱۴۰۳) تغییرات مکانی طوفان گردوغبار در سیستان و بلوچستان را از دیدگاه پایداری شهری بررسی کرده‌اند. آن‌ها با استفاده از داده‌های سنجنده مادیس (۱۳۷۹-۱۴۰۰) و سنتینل-۵ (۱۳۹۸-۱۴۰۰) که از گوگل ارث انجین استخراج شده، میزان گردوغبار در شهرهای مختلف را تحلیل کردند. نتایج نشان داد زابل، میرجاوه و چابهار بیشترین و ایرانشهر و نیکشهر کمترین گردوغبار را داشته‌اند. تحلیل همبستگی داده‌های سنتینل-۵ با اطلاعات هواشناسی (۰.۲۷۲ در سال ۱۴۰۰، ۰.۲۷۹ در ۱۳۹۹ و ۰.۱۳۶ در ۱۳۹۸) ارتباط معنی‌داری را تأیید کرد. در مطالعه‌ای غلظت، منابع و ریسک سلامت انسانی عناصر بالقوه سمی (PTEs) را در گردوغبار جوی زاهدان بررسی شد. نتایج نشان داد که آرسنیک با سهم ۵۵ درصدی، بیشترین نقش را در ریسک اکولوژیکی دارد که احتمالاً ناشی از استفاده از آفت‌کش‌های حاوی آرسنیک در کشاورزی است. بالاترین غلظت روی و سرب در زمستان مشاهده شد که ممکن است به دلیل وارونگی دمایی باشد. تحلیل خوشه‌ای نشان داد که عناصر Ni-Cr-Fe-V-Mn-Al منشاء زمین‌شناختی دارند. شاخص مخاطره (HI) برای فلزات سنگین نشان داد که ریسک غیرسرطانی قابل توجهی وجود ندارد، اما سطوح کروم نزدیک به آستانه هشدار بوده و نیازمند پایش بیشتر است (Vaezi et al., 2023). واعظی و همکاران (۲۰۲۴) به بررسی آلودگی زیست‌محیطی و مخاطرات سلامت ناشی از گردوغبار جوی در زابل پرداخته‌اند. نتایج نشان داد که عناصر سمی مانند As و

Cd به شدت غنی شده‌اند و شاخص خطر زیست‌محیطی، آلودگی متوسطی را نشان می‌دهد که (68%) Cd و (25%) As بیشترین سهم را دارد. منبع اصلی As کودها و سموم کشاورزی و آلودگی‌های ترافیکی از منابع Pb، Cd و Mo شناسایی شد. صاحب‌زاده و همکاران (۲۰۱۹)، در مطالعه‌ای به بررسی شدت انتشار رسوبات بادی در مناطق مختلف سیستان و پیامدهای آن بر سلامت عمومی پرداخت. این پژوهش، که با استفاده از روش توصیفی-پیمایشی و تحلیل اسناد پزشکی انجام شده است، نشان می‌دهد که دشت سیستان به شدت تحت تأثیر بادهای شدید، به‌ویژه باد ۱۲۰ روزه قرار دارد. این باد که از اواخر بهار آغاز شده و تا اوایل پاییز ادامه دارد، میانگین سرعتی معادل ۱۰۰ کیلومتر بر ساعت دارد و منجر به گسترش رسوبات بادی در سطح منطقه می‌شود. یافته‌های مطالعه نشان می‌دهد که انتشار این رسوبات تهدیدی جدی برای سلامت عمومی محسوب می‌شود، به‌گونه‌ای که میزان مراجعه شهروندان به مراکز درمانی به دلیل مشکلات تنفسی و آسیب‌های چشمی ناشی از گردوغبار در تابستان ۲۰۱۷ افزایش یافته است. همچنین، نتایج نشان می‌دهد که اکوسیستم‌های انسانی در سیستان درجات مختلفی از تأثیرپذیری از گردوغبار را تجربه می‌کنند که بر سلامت سیستم تنفسی و بینایی ساکنان اثرگذار است. مطالعات پیشین در استان سیستان و بلوچستان عمدتاً بر پایش گردوغبار، ارزیابی ترکیب عناصر سمی و تحلیل رسوبات بادی متمرکز بوده‌اند، اما بررسی منشأ گردوغبار و مسیر انتقال آن کمتر مورد توجه قرار گرفته است. این پژوهش با بهره‌گیری از مدل پیشرفته HYSPLIT، به تحلیل دقیق مسیر و منشأ گردوغبار ورودی به این استان پرداخته و نقش کشورهای همسایه را در انتقال این آلاینده‌ها مورد بررسی قرار می‌دهد. در این راستا، از شاخص‌های پیشرفته، TDI و AOD برای ارزیابی شدت و گستره گردوغبار استفاده شده است. علاوه بر این، به‌کارگیری داده‌های واقعی ماهواره‌ای MODIS در این تحقیق، امکان ارائه تصویری جامع‌تر از پویایی و الگوی انتقال گردوغبار را فراهم می‌کند. چنین رویکردی، نه تنها شکاف موجود در مطالعات پیشین را برطرف می‌سازد، بلکه زمینه‌ساز ارائه راهکارهای مؤثرتر برای مدیریت و کاهش اثرات زیست‌محیطی و بهداشتی گردوغبار در منطقه خواهد بود.

نتیجه‌گیری

آلودگی گردوغبار در مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌ویژه در استان سیستان و بلوچستان یکی از تهدیدهای زیست‌محیطی است که اثرات آن به‌طور قابل توجهی بر سلامت عمومی، کشاورزی و منابع آبی دارد. این پژوهش با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای مودیس و کدنویسی در سامانه گوگل ارث انجین، به تحلیل شاخص‌های، TDI، AOD-Sum، AOD-Max و AOD در بازه زمانی ۲۰۱۸-۲۰۲۳ پرداخته است. در گام بعدی، برای بررسی مسیر انتقال آلاینده‌های گردوغبار و شناسایی منابع انتشار آن‌ها، مدل HYSPLIT به‌کار گرفته شد. از تکنیک‌های مدل‌سازی مسیر ذرات برای بررسی توزیع فرکانس مسیرهای بسته هوایی استفاده گردید. به‌منظور درک دقیق‌تر توزیع گردوغبار و مسیر انتقال آن، تصاویر واقعی ماهواره‌ای مودیس مورد تحلیل قرار گرفت. همچنین، برای بررسی مسیر گردوغبار، از داده‌های ایستگاه‌های زابل و زاهدان برای سه تاریخ از سال‌های ۲۰۲۳ و ۲۰۲۴ با شاخص AQI برابر ۵۰۰ استفاده شد. مدل HYSPLIT با استفاده از شبیه‌سازی عقبگرد به مدت ۲۴ ساعت برای زابل و ۴۸ ساعت برای زاهدان به‌کار گرفته شد. نتایج شاخص حرارتی گردوغبار (TDI) در دوره ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳ الگوی مکانی پایداری را نشان داد و مناطقی مانند زابل، ایرانشهر، خاش، سراوان، سرباز و سواحل چابهار را به‌عنوان کانون‌های مستعد گردوغبار مشخص کرد. بیشترین مقدار میانگین سالانه TDI در سال ۲۰۲۱ (۰/۰۵۸) ثبت شد و کمترین مقدار در تمام سال‌ها برابر با ۰/۱۸- بود. تحلیل نقشه‌های AOD نشان می‌دهد که در سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۲۲، مقادیر این شاخص در بخش‌های شمال‌شرقی، شرق و جنوب‌غربی استان به مقادیر بحرانی رسید که در طبقه‌بندی آلودگی به‌عنوان آلودگی خطرناک قرار گرفته است. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهند که میانگین شاخص AOD در سال ۲۰۲۳ نسبت به سال ۲۰۲۲ به میزان ۰/۹ واحد کاهش یافته و به ۱/۹ رسیده است، اما همچنان در محدوده طبقه‌بندی خطرناک باقی مانده است. هم‌پوشانی بالای مقادیر TDI با شاخص AOD، اعتبار این نتایج را تقویت کرده و نشان می‌دهد TDI ابزار مؤثری در شناسایی، پایش و مدیریت مناطق پرخطر گردوغبار محسوب

می‌شود. نتایج تحلیل شاخص AOD-Max نشان می‌دهد که مناطق شرقی، جنوبی، شمال شرقی، غربی و جنوب غربی استان، به‌ویژه در برخی از سال‌ها، به‌ویژه در سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۲۲، با شدیدترین آلودگی گردوغبار روبرو بوده‌اند. بیشترین مقدار AOD-Max در سال ۲۰۲۲ مشاهده شد که به ۳.۵ رسید، که در طبقه‌بندی آلودگی به‌عنوان آلودگی خطرناک محسوب می‌شود. همچنین در سال ۲۰۲۳، شاخص AOD-Max به ۳/۱ کاهش یافته است اما هنوز در وضعیت بسیار خطرناک قرار دارد. تحلیل روند تغییرات این شاخص نشان می‌دهد که در سال ۲۰۲۲ نسبت به سال‌های گذشته ۰/۳ واحد افزایش یافته است. در بررسی شاخص AOD-Sum، مشخص شد که مناطق شرقی، شمال شرقی و جنوب استان سیستان و بلوچستان بیشترین شدت آلودگی گردوغبار را در طول سال دارند. به‌ویژه، مناطق شرقی و شمال شرقی استان بیش از ۱۰۰ روز در سال تحت تأثیر گردوغبار قرار دارند و مناطق جنوبی بیش از ۱۲۰ روز با آلودگی گردوغبار مواجه می‌شوند. بالاترین مقادیر AOD-Sum در سال‌های ۲۰۲۲، ۲۰۱۸ و ۲۰۲۰ مشاهده شده است، که نشان‌دهنده افزایش تعداد روزهای آلودگی در این سال‌ها است. همچنین، نقشه‌های مدل‌سازی مسیره‌های جوی با استفاده از مدل HYSPLIT نشان می‌دهند که بیشترین فراوانی مسیره‌های جوی، ساعتی قبل از وقوع گردوغبار در زابل و زاهدان، در نواحی مرزی بین ترکمنستان، افغانستان و ایران مشاهده می‌شود. این مسیره‌های جوی پس از عبور از بیابان‌های افغانستان و نواحی مرزی این کشور با ایران، وارد شهرستان زابل شده و به زاهدان می‌رسند. در این مسیره‌ها، به دلیل تمرکز بالای ذرات گردوغبار، شاخص آلودگی هوا (AQI) به حداکثر مقدار خود، یعنی ۵۰۰، می‌رسد. نتایج مدل‌سازی مسیره‌های عقبگرد نیز نشان داد که طوفان‌های گردوغبار از نواحی بیابانی ترکمنستان و افغانستان منشأ می‌گیرند و طی ۲۴ ساعت به زابل و طی ۴۸ ساعت به زاهدان می‌رسند. بررسی تغییرات ارتفاعی مسیر گردوغبار نشان می‌دهد که اکثر جریان‌های جوی در مرز ترکمنستان و افغانستان در ارتفاعات بالا و بیش از ۱۵۰۰ متر رخ می‌دهد و با عبور از مناطق بیابانی افغانستان، ارتفاع جریان‌ها به کمتر از ۵۰۰ متر کاهش یافته و سبب ایجاد گردوغبار در استان سیستان و بلوچستان می‌شود. نقشه‌های رنگ واقعی MODIS نشان می‌دهند که مناطق وسیعی از بیابان‌های افغانستان، مناطق شرقی ایران و بخش‌هایی از مرزهای پاکستان به‌وضوح نشان‌دهنده گسترش آلودگی گردوغبار به نواحی شرقی استان است. این تصاویر نقش کلیدی بیابان‌های ترکمنستان، افغانستان و پاکستان در شکل‌گیری و گسترش طوفان‌های گردوغبار در سیستان و بلوچستان را نمایان می‌کنند. این یافته‌ها می‌توانند به بهبود برنامه‌ریزی‌های مقابله با اثرات مخرب گردوغبار و مدیریت زیست‌محیطی در این منطقه کمک کنند.

منابع

- Afzalizadeh, M. S., Ahmadi Nadoushan, M., Jalalian, A., & Chamani, A. (20 24). Dust source dynamics in arid Iran: Examining the relationship between MODIS AOD and land surface characteristics in a dried catchment. *Advances in Space Research*, In Press, Corrected Proof. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2024.11.077>
- Al-Khudhairy, A. A., Shaban, A. H., & Al-Timimi, Y. K. (2023). Modis satellite data evaluation for detecting the dust storm using remote sensing techniques over Iraq. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1223(1), 012024. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1223/1/012024>
- Broomandi, P., Mohammadpour, K., Kaskaoutis, D. G., Fathian, A., Abdullaev, S. F., Maslov, V. A., Nikfal, A., Jahanbakhshi, A., Aubakirova, B., Kim, J. R., Satyanaga, A., Rashki, A., & Middleton, N. (2023). A synoptic- and remote sensing-based analysis of a severe dust storm event over Central Asia. *Aerosol and Air Quality Research*. <https://doi.org/10.4209/aaqr.220309>
- Chen, Y., Fan, M., Li, M., Li, Z., Tao, J., Wang, Z., & Chen, L. (2022). Himawari-8/AHI Aerosol Optical Depth Detection Based on Machine Learning Algorithm. *Remote Sensing*, 14(13), 2967. <https://doi.org/10.3390/rs14132967>
- Dargahian, F., Mousivand, Y., Razavizadeh, S., & Lotfinasabasl, S. (2023). Identifying dust sources affecting southwestern Iran (Khuzestan Province) using remote sensing techniques and HYSPLIT model. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 51(1), 565-583. <https://doi.org/10.1007/s12524-022-01648-y>

- Darvishi Bolorani, A., Soleimani, Z., Teymouri, P., Neysani Samany, N., Soleimani, M., & Papi, R. (2023). Microbiology of sand and dust storms and the effects on human health in Iran and other Persian Gulf countries. In *Dust and health* (pp. 157–186). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-3-031-21209-3_9
- Ghanbari, A., & Taraneh, S. (2024). Investigating the spatial changes of dust in Sistan and Baluchistan province and its effect on urban sustainability. *Journal of Environmental Science Studies*, 9(3), 9102-9087. <https://doi.org/10.22034/jess.2023.407462.2084>
- Hao, X., & Qu, J. (2007). Saharan dust storm detection using Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer thermal infrared bands. *Journal of Applied Remote Sensing*, 1(1), 012001. <https://doi.org/10.1117/1.2740039>
- Hennen, M., Chappell, A., Edwards, B., Faist, A., Kandakji, T., Baddock, M., Wheeler, B., Tyree, G., Treminio, R., & Webb, N. (2022). A North American dust emission climatology (2001–2020) calibrated to dust point sources from satellite observations. *Aeolian Research*, 100766. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2021.100766>
- Jadidoleslami Ghaleno, M. (2024). Analysis of aeolian deposit processes and their hazards in Sistan Plain. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 13(42), 71-90. <https://doi.org/10.22111/jneh.2024.47555.2014>
- Jooybari, S. A., Peyrowan, H., Rezaee, P., & Gholami, H. (2022). Evaluation of pollution indices, health hazards and source identification of heavy metal in dust particles and storm trajectory simulation using HYSPLIT model (Case study: Hendijan center dust, southwest of Iran). *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(107). <https://doi.org/10.1007/s10661-022-09724-4>
- Maleki, S., Miri, A., Rahdari, V., & Dragovich, D. (2021). A method to select sites for sand and dust storm source mitigation: Case study in the Sistan region of southeast Iran. *Journal of Environmental Planning and Management*, 64(12), 2192-2213. <https://doi.org/10.1080/09640568.2020.1862770>
- Mir, A. R., Anvari, M. R., & Miri, G. R. (2016). An evaluation of educational development in Sistan and Baluchestan Province. *Advances in Applied Sociology*, 6(3), 152–157. <https://doi.org/10.4236/aasoci.2016.63013>
- NASA (National Aeronautics and Space Administration), 2015. GMS: NASA Images.
- NOAA Research. (2020). NOAA ESRL global monitoring laboratory: SURFRAD aerosol optical depth. <https://gml.noaa.gov/grad/surfrad/aod/>
- Rami, A., Hamidi, M., & Navayi Neya, B. (2022). Atmospheric analysis of dust storms in Sistan region. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 227, 105800. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105800>
- Rashki, A., Kaskaoutis, D. G., Rautenbach, C. J. de W., Eriksson, P. G., Qiang, M., & Gupta, P. (2012). Dust storms and their horizontal dust loading in the Sistan region, Iran. *Aeolian Research*, 5, 51–62. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2011.12.001>
- Rolph, G., Stein, A., & Stunder, B. (2017). Real-time environmental applications and display system: READY. *Environmental Modelling & Software*, 95, 210–228. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.025>
- Sahebzadeh, B., Shabani-Gorji, K., Shoaee, Z., & Afshari, M. (2019). Health risk of wind sediments distribution in human environment in Sistan region, east of Iran. *EQA–Environmental Quality*, 34, 35-45. <https://doi.org/10.6092/issn.2281-4485/8461>
- Smith, S., Wu, Y., Levy, R., & Ting, M. (2025). The solar zenith angle impacts MODIS versus CALIPSO AOD retrieval biases, with implications for Arctic aerosol seasonality. *EGU sphere [preprint]*. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-3596>
- Vaezi, A., Shahbazi, R., Lak, R., Ahmadi, N., Sheikh, M., & Mohammadi, A. R. (2023). Assessment of potentially toxic elements in atmospheric dust and associated health risks in Zahedan City, Iran. *Environmental Geochemistry and Health*, 45, 7759–7773. <https://doi.org/10.1007/s10653-023-01674-w>

Vaezi, A., Shahbazi, R., Sheikh, M., Lak, R., Ahmadi, N., Kaskaoutis, D. G., Dahmardeh Behrooz, R., Sotiropoulou, R.-E. P., & Tagaris, E. (2024). Environmental pollution and human health risks associated with atmospheric dust in Zabol City, Iran. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 17, 2491–2513. <https://doi.org/10.1007/s11869-024-01582-7>

Wang, Y., Tang, J., Zhang, Z., Wang, W., Wang, J., & Wang, Z. (2023). Hybrid methods' integration for remote sensing monitoring and process analysis of dust storm based on multi-source data. *Atmosphere*, 14(1), 3. <https://doi.org/10.3390/atmos14010003>

World Meteorological Organization. (2023, March 18). *Sand and dust storms*. Retrieved from <https://public.wmo.int/en/our-mandate/focus-areas/environment/sand-and-dust-storms>

Yarmohamadi, M., Alesheikh, A. A., Sharif, M., & Vahidi, H. (2023). Predicting dust-storm transport pathways using a convolutional neural network and geographic context for impact adaptation and mitigation in urban areas. *Remote Sensing*, 15(9), 2468. <https://doi.org/10.3390/rs15092468>

Yousefi Kebriya, A., Nadi, M., & Ghanbari Parmehr, E. (2023). Estimation of ozone and nitrogen dioxide pollutants in Mazandaran Province using sentinel 5 satellite images. *Iranica Journal of Energy and Environment*, 16(1), 56-66. <https://doi.org/10.5829/ijee.2025.16.01.07>

Yousefi Kebriya, A., Nadi, M., Ghanbari Parmehr, E., & Sun, Z. (2025). Assessment of some environmental stresses in the Shadegan Wetland: Analysis of satellite data, water quality indicators, and dust storm pathways. *Iranica Journal of Energy & Environment*, 16(2), 372-388. <https://doi.org/10.5829/ijee.2025.16.02.17>

Yousefi Kebriya, A., Nadi, M., Ghanbari Parmehr, E., & Zhongchang, S. (2024). Modeling and forecasting dust pollution using satellite data and machine learning techniques: A case study of Ahvaz. *Journal of Agricultural Meteorology*, (13), 15-30. <https://doi.org/10.22125/agmj.2024.478677.1174>

Zucca, C., Fleiner, R., Bonaiuti, E., & Kang, U. (2022). Land degradation drivers of anthropogenic sand and dust storms. *CATENA*, 106575. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106575>