

Spatiotemporal analysis of dust phenomena from 2020 to 2025 using remote sensing and source tracking with the HYSPLIT model: a case study of Ilam Province, Iran

Alireza Yousefi Kabriya¹, Ali Khalili^{2*} and Hasan Rezaei³

¹ Ph.D. Candidate in Agricultural Meteorology, Faculty of Agricultural Engineering, Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran

² Assistant Professor, Department of Computer and Cybernetics, Faculty of Engineering and Aviation, Imam Ali (AS) Military University, Tehran, Iran

³ Ph.D., Department of Geography and Climatology, Faculty of Basic Sciences, Imam Ali (AS) Military University, Tehran, Iran

Received: 11 August 2025

Accepted: 09 December 2025

Extended abstract

Introduction

Dust storms have emerged as one of the most significant environmental challenges in arid and semi-arid regions, and their frequency and intensity have notably increased in Ilam Province in recent years. These storms have had wide-ranging impacts on public health, urban infrastructure, agriculture, and the sustainability of natural resources. The province's geographical location along the borders of Iraq and Syria makes it particularly vulnerable to transboundary dust storms originating from desertified areas in neighboring countries. Accordingly, precise monitoring of the spatiotemporal dynamics of dust storms and identifying their sources are essential for developing effective mitigation strategies and reducing their adverse impacts.

Materials and methods

In this study, PM concentration data from 2020 to 2025 were collected from air quality monitoring stations in Mehran and Dehloran as ground-based observations. In parallel, satellite-based indices were utilized, including the Aerosol Optical Depth (AOD) from MODIS, the Absorbing Aerosol Index (AAI) from Sentinel-5P TROPOMI, the Normalized Difference Dust Index (NDDI), and the Dust Event Count Map (DECM). All datasets were processed and analyzed using Google Earth Engine. To track the transport pathways of dust plumes, the HYSPLIT model was applied with a 24-hour backward trajectory simulation. Additionally, MODIS True Color images were employed to visually validate the HYSPLIT model outputs.

Results and discussion

Analysis of the DECM index from 2020 to 2024 revealed an upward trend in the frequency of dust events in Ilam Province. In 2020, the lowest number of events was recorded, although even in that year, Dehloran and Abdanan experienced over 30 events. In 2021, the number rose to over 120 events in border regions, reaching a critical peak in 2022 with more than 200 dust events recorded in Mehran, Dehloran, Eyvan, and southern Ilam. Although the numbers slightly decreased to 182 and 172 in 2023 and 2024, respectively, the spatial concentration of dust activity remained in the border areas. The Absorbing Aerosol Index (AAI) extracted from Sentinel-5P data further confirmed the severity of the situation. In 2020, the mean AAI values in Mehran, Dehloran, and Abdanan were around 0.28, increasing to 0.32 in 2021, and exceeding 1.3 in 2022 -indicative of very unhealthy conditions for the general population. Despite slight declines in 2023 (0.87) and 2024 (0.86), values remained in the unhealthy range. MODIS-derived AOD data also played a key role in assessing dust intensity. In 2020, AOD levels surpassed 1 in border areas and exceeded 1.6 in some regions in 2021. The critical peak occurred in 2022, when AOD values reached over 1.85 in southern Ilam and western Dehloran. Even central parts of the province saw AOD values greater than 0.5 in the same year. In 2023 and 2024, the values were 1.3 and 1.18, respectively, remaining within hazardous levels. The NDDI index, which reflects dust deposition on surfaces, peaked in 2021 with values exceeding 0.9 in some border areas. In 2022, the index dropped to approximately 0.5, possibly indicating airborne dust with limited ground deposition. It reached its lowest point in 2023 (below 0.5), followed by a slight increase to 0.54 in 2024. The HYSPLIT model was used to simulate dust transport pathways for two critical events in

* Corresponding author: khalili@iamu.ac.ir

2025. On April 15, 2025, the model identified western Iraq as the main dust source. Simulations showed that the dust plume reached the Ilam border at 11:00 AM and Dehloran station by 12:00 PM. Vertical profiles indicated that dust particles initially traveled at 500 meters altitude and later descended into the boundary layer, corroborating the recorded AQI level of 500 in Dehloran. In the second event on May 25, 2025, the dust originated from the deserts of eastern Syria. The particles formed at an altitude of 2000 meters and traveled across Iraq, reaching Mehran station at 12:00 PM. The trajectory showed a gradual descent to 500 meters, leading to severe surface-level pollution. Trajectory frequency maps indicated that more than 90% of paths passed through Syria, confirming the combined influence of Iraqi and Syrian sources. This event also saw an AQI level of 500 in Mehran. Overall, the results underscore the spatial stabilization of dust hotspots in Ilam's border regions and highlight the critical role of transboundary dust sources in Iraq and Syria, as well as the synoptic wind patterns that facilitate their transport.

Conclusions

The findings demonstrate a notable increase in the frequency and intensity of dust storms in Ilam Province in recent years, with a clear spatial concentration in border areas. Transboundary sources, particularly desert regions in Iraq and Syria, have significantly contributed to the worsening dust pollution. The integration of satellite indices with the HYSPLIT model enabled the precise identification of dust origins, transport paths, and intensity. Consequently, implementing control strategies such as the restoration of drought-resistant vegetation, soil stabilization, land moistening, establishment of greenbelts along the borders, enhancement of regional cooperation with neighboring countries, and deployment of satellite-based early warning systems is essential. Without such interventions, the current trajectory may lead to a chronic crisis and exacerbate environmental, social, and economic vulnerabilities in the region.

Keywords: AAI index, Air quality, DECM index, Dust storm, NDDI index

Cite this article: Yousefi Kabriya, A., Khalili, A., Rezaei, H., 2026. Spatiotemporal analysis of dust phenomena from 2020 to 2025 using remote sensing and source tracking with the HYSPLIT model: a case study of Ilam Province, Iran. *Watershed. Water. Eng. Manag.*18(1), 1-24.

© 2026, The Author(s). Published by Soil Conservation and Watershed Management Research Institute (SCWMRI). This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)



تحلیل مکانی-زمانی پدیده گردوغبار طی سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۵ با استفاده از سنجش از دور و ردیابی منشأ با مدل HYSPLIT، مطالعه موردی: ایلام، ایران

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

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

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

^۳دکتری، گروه جغرافیا، اقلیم شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه افسری امام علی (ع)، تهران، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۱۸

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۵/۲۰

چکیده مبسوط

مقدمه

پدیده گردوغبار به‌عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی مناطق خشک و نیمه‌خشک، طی سال‌های اخیر در استان ایلام شدت یافته و اثرات گسترده‌ای بر سلامت عمومی، زیرساخت‌های شهری، کشاورزی و پایداری منابع طبیعی داشته است. واقع شدن این استان در مرز با کشورهای عراق و سوریه، آن را در معرض مستقیم طوفان‌های گردوغبار با منشأ فرامرزی قرار داده است. در این راستا، پایش دقیق روند تغییرات مکانی-زمانی گردوغبار و شناسایی منشأهای آن، برای طراحی راهبردهای کنترلی و کاهش اثرات این پدیده، ضروری به نظر می‌رسد.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش، داده‌های ذرات معلق (PM) مربوط به سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۵ از ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوا مهران و دهلران به‌عنوان داده‌های زمینی جمع‌آوری شد. همزمان، از شاخص‌های ماهواره‌ای شامل عمق نوری آئروسول (AOD) از سنجنده MODIS، شاخص جذب آئروسول (AAI) از سنجنده TROPOMI، شاخص NDDI (گردوغبار) و نقشه شمارش روزهای گردوغبار (DECM) استفاده شد. داده‌ها با استفاده از برنامه‌نویسی در محیط Google Earth Engine پردازش و تحلیل شدند. برای ردیابی مسیر حرکت توده‌های گردوغبار، از مدل عددی HYSPLIT با رهگیری معکوس ۲۴ ساعته استفاده شد. همچنین، تصاویر ماهواره‌ای MODIS (True Color) به‌منظور اعتبارسنجی نتایج مدل و تحلیل بصری به‌کار گرفته شدند.

نتایج و بحث

تحلیل شاخص شمارش روزهای گردوغبار (DECM) طی سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۴ حاکی از روند صعودی وقوع این پدیده در استان ایلام است. در سال ۲۰۲۰، کمترین روزهای گردوغبار ثبت شد، اما حتی در همین سال، شهرستان‌های دهلران و آبدانان با بیش از ۳۰ روز مواجه بودند. در سال ۲۰۲۱، این مقدار در مناطق مرزی به بیش از ۱۲۰ روز افزایش یافت، و در سال ۲۰۲۲، اوج بحران با ثبت بیش از ۲۰۰ روز در نواحی مرزی نظیر مهران، دهلران، ایوان و جنوب ایلام مشاهده شد. اگرچه در سال‌های ۲۰۲۳ و ۲۰۲۴ این تعداد به ترتیب به ۱۸۲ و ۱۷۲ مورد کاهش یافت، اما تمرکز مکانی

* مسئول مکاتبات: khalili@iamu.ac.ir

پدیده همچنان در نواحی مرزی باقی ماند. شاخص جذب آئروسول (AAI) که از داده‌های Sentinel-5P استخراج شده است، نیز روند بحرانی بودن شرایط را تأیید می‌کند. در سال ۲۰۲۰، میانگین AAI در مهران، دهلران و آبدانان حدود ۰/۲۸ بود؛ در سال ۲۰۲۱ این مقدار به ۰/۳۲ افزایش یافت و در سال ۲۰۲۲ به بیش از ۱/۳ رسید که معادل با شرایط بسیار ناسالم برای عموم مردم است. حتی با کاهش نسبی در سال‌های ۲۰۲۳ (۰/۸۷) و ۲۰۲۴ (۰/۸۶)، مقادیر همچنان در محدوده ناسالم باقی مانده‌اند. شاخص عمق نوری آئروسول (AOD) از محصولات MODIS نیز در تحلیل شدت گردوغبار نقش کلیدی داشته است. در سال ۲۰۲۰، مقادیر AOD در نواحی مرزی ایلام به بیش از یک رسید و در سال ۲۰۲۱ در برخی مناطق از ۱/۶ نیز فراتر رفت. بحرانی‌ترین سال در این زمینه، ۲۰۲۲ بود که در آن مقدار AOD در جنوب ایلام و غرب دهلران به بیش از ۱/۸۵ رسید. حتی مناطق مرکزی استان نیز در این سال با مقادیر AOD بیش از ۰/۵ مواجه شدند. در سال‌های ۲۰۲۳ و ۲۰۲۴ به ترتیب مقادیر ۱/۳ و ۱/۱۸ ثبت شد که گرچه کاهش نشان می‌دهند اما همچنان در محدوده ناسالم و خطرناک قرار دارند. شاخص NDDI نیز، بیانگر میزان رسوب‌گذاری ذرات گردوغبار بر سطح زمین است، در سال ۲۰۲۱ به اوج خود رسید و در برخی نواحی مرزی به بیش از ۰/۹ افزایش یافت. در سال ۲۰۲۲ مقدار شاخص به حدود ۰/۵ کاهش یافت که می‌تواند ناشی از عبور توده‌های گردوغبار بدون ته‌نشینی موضعی باشد. در سال ۲۰۲۳ این شاخص به پایین‌ترین سطح خود (کمتر از ۰/۵) رسید اما در ۲۰۲۴ بار دیگر تا ۰/۵۴ افزایش یافت. شبیه‌سازی مسیرهای حرکت ذرات گردوغبار با استفاده از مدل HYSPLIT برای دو رخداد بحرانی در سال ۲۰۲۵ انجام شد. در تاریخ ۱۵ آوریل ۲۰۲۵ (۲۶ فروردین ۱۴۰۴)، مدل نشان داد که منشأ اصلی گردوغبار از نواحی خشک غرب عراق بوده است. مسیر شبیه‌سازی شده نشان می‌دهد که توده گردوغبار ساعت ۱۱:۰۰ صبح به مرز ایلام و ساعت ۱۲:۰۰ به ایستگاه دهلران رسید. ساختار عمودی جریان نشان می‌دهد که ذرات در آغاز حرکت در ارتفاع ۵۰۰ متری قرار داشتند و هنگام ورود به استان، به لایه‌های سطحی جو نفوذ کرده‌اند، که این امر با شاخص AQI 500 در ایستگاه دهلران همخوانی دارد. در رخداد دوم، مربوط به ۲۵ می ۲۰۲۵ (۴ خرداد ۱۴۰۴)، مدل HYSPLIT منشأ گردوغبار را بیابان‌های شرق سوریه تشخیص داد. ذرات گردوغبار در ارتفاع ۲۰۰۰ متری شکل گرفته و با گذر از عراق، ساعت ۱۲:۰۰ ظهر به ایستگاه مهران رسیده‌اند. در این مسیر نیز کاهش تدریجی ارتفاع تا سطح ۵۰۰ متر باعث نفوذ ذرات به لایه مرزی و آلودگی شدید سطحی شده است. نقشه فراوانی مسیرها نشان داد که بیش از ۹۰ درصد از مسیرهای شبیه‌سازی شده از بیابان‌های سوریه عبور کرده‌اند و تأثیر ترکیبی منابع عراق و سوریه را در انتقال آلودگی تأیید می‌کنند. در این رخداد نیز شاخص AQI در ایستگاه مهران به سطح ۵۰۰ رسید. در مجموع، نتایج حاصل از مدلسازی و تحلیل‌های ماهواره‌ای نه تنها حاکی از تشبیت الگوی مکانی گردوغبار در نواحی مرزی ایلام است، بلکه بر نقش کلیدی کانون‌های فعال در عراق و سوریه و تأثیر سینوپتیکی جریان‌های باد در انتقال فرامرزی این ذرات نیز تأکید دارد.

نتیجه‌گیری

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که استان ایلام طی سال‌های اخیر با افزایش فراوانی و شدت پدیده گردوغبار مواجه بوده و کانون‌های فعال این پدیده به‌ویژه در نواحی مرزی تشبیت شده‌اند. نقش منابع فرامرزی، به‌ویژه بیابان‌های عراق و سوریه، در تشدید آلودگی گردوغبار استان، بسیار برجسته است. ترکیب تحلیل شاخص‌های ماهواره‌ای با مدل HYSPLIT امکان شناخت دقیق‌تر از منشأ، مسیر و شدت گردوغبار را فراهم نموده است. بر این اساس، اجرای راهکارهایی مانند احیای پوشش گیاهی مقاوم به خشکی، تشبیت خاک، مرطوب‌سازی اراضی خشک، ایجاد کمربند سبز در مرزها، توسعه همکاری‌های منطقه‌ای با کشورهای همسایه و به‌کارگیری سامانه‌های هشدار سریع بر پایه داده‌های ماهواره‌ای، برای مقابله با این بحران زیست‌محیطی حیاتی است. در غیر این صورت، تداوم روند فعلی می‌تواند به تشبیت یک وضعیت بحرانی و افزایش آسیب‌پذیری زیست‌محیطی، اجتماعی و اقتصادی در منطقه منجر شود.

واژه‌های کلیدی: پدیده گردوغبار، شاخص AAI، شاخص NDDI، شاخص DECM، کیفیت هوا

مقدمه

در واقع، گردوغبار به‌عنوان یک تهدید محیط‌زیستی، از حالت محلی فراتر رفته و به یک مسئله ژئواکولوژیک در مقیاس منطقه‌ای و بین‌المللی تبدیل شده است. در سطح منطقه‌ای، غرب آسیا یکی از حساس‌ترین پهنه‌ها در مواجهه با طوفان‌های گردوغبار است؛ منطقه‌ای که در آن تنش‌های آبی، بهره‌برداری ناپایدار از منابع سرزمینی، و بی‌ثباتی‌های سیاسی، روند تخریب منابع طبیعی را تسریع کرده‌اند (Hennen et al., 2022).

ایران به‌عنوان کشوری واقع در کمربند خشک و نیمه‌خشک جهانی، طی دهه‌های اخیر با افزایش قابل‌توجه فراوانی، شدت، و گستره‌ی طوفان‌های گردوغباری مواجه بوده است. این پدیده به‌ویژه در استان‌های جنوبی، جنوب‌غربی و غربی کشور، چالشی جدی برای سلامت عمومی، کشاورزی، امنیت انرژی، و پایداری محیط‌زیست ایجاد کرده است (Dargahian et al., 2023). استان‌های مرزی نظیر خوزستان، ایلام و کرمانشاه، به‌واسطه‌ی هم‌جواری با کشورهای دارای کانون‌های فعال گردوغبار، از جمله عراق و عربستان، در معرض بیشترین آسیب قرار دارند. استان ایلام، به‌ویژه به‌دلیل موقعیت جغرافیایی خاص، اقلیم خشک تا نیمه‌خشک، و قرارگیری در مسیر بادهای غالب، یکی از مناطق با ریسک بالا در کشور محسوب می‌شود.

بررسی‌های میدانی و گزارش‌های رسمی در سال‌های اخیر، گویای افزایش روزهای گردوغباری، تشدید مشکلات تنفسی، و افزایش بار بیماری‌های مرتبط در این منطقه است (Broomandi et al., 2023). در پاسخ به شدت‌یافتن این بحران، پایش و تحلیل مکانی-زمانی گردوغبار به یک ضرورت راهبردی بدل شده است. در سال‌های اخیر، توسعه فناوری‌های سنجش از دور، همراه با افزایش توان پردازش داده‌های جوی و اقلیمی، امکان ردیابی گسترده‌تر و دقیق‌تر طوفان‌های گردوغبار را فراهم کرده است. سامانه‌های ماهواره‌ای با قابلیت ثبت داده‌های چندطیفی و چندزمانی، به ابزاری مؤثر در شناسایی نواحی منشأ، ارزیابی شدت رخدادها، و تحلیل روندهای فصلی و سالانه تبدیل شده‌اند (Yousefi Kebriya et al., 2024).

پدیده گردوغبار^۱ به یکی از جدی‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی قرن بیست‌ویکم تبدیل شده است؛ پدیده‌ای فراسرزمینی با ابعادی پیچیده و چندلایه که نه تنها اکوسیستم‌های شکننده‌ی مناطق خشک و نیمه‌خشک را هدف قرار داده، بلکه آثار آن تا هزاران کیلومتر دورتر نیز قابل ردیابی است (Yousefi Kebriya et al., 2025).

این بحران طبیعی که بر اثر برهم‌کنش عوامل اقلیمی، هیدرولوژیکی، و فعالیت‌های انسانی شکل می‌گیرد، پیامدهایی گسترده بر سلامت انسان، امنیت غذایی، تنوع زیستی، منابع آبی و اقتصاد منطقه‌ای و جهانی برجای می‌گذارد. در دهه‌های اخیر، روند فزاینده‌ی بروز طوفان‌های گردوغبار در سطح جهان، به‌ویژه در مناطق کم‌بارش و آسیب‌پذیر، نگرانی‌های عمیقی در محافل علمی و سیاست‌گذاری ایجاد کرده است (Yousefi Kebriya et al., 2024).

تغییرات اقلیمی، کاهش بارش‌های فصلی، خشکسالی‌های ممتد، گرم شدن زمین، تخریب سرزمین، و برداشت بی‌رویه از منابع آب و خاک، بستری مساعد برای فعال شدن کانون‌های گردوغبار فراهم کرده‌اند. طبق برآوردهای سازمان جهانی هواشناسی، طوفان‌های گردوغبار سالانه میلیاردها دلار خسارت اقتصادی ایجاد کرده و جان میلیون‌ها نفر را از طریق تأثیر بر سلامت تنفسی، قلبی و روانی به خطر می‌اندازند (Wang et al., 2023). این پدیده همچنین با کاهش دید افقی، اختلال در حمل‌ونقل هوایی و زمینی، فرسایش خاک و کاهش عملکرد کشاورزی، پیامدهایی زنجیره‌ای و گسترده به همراه دارد (Peshev et al., 2023). در این میان، مناطق بیابانی و فراخشک قاره آفریقا (مانند صحرای بزرگ)، آسیای مرکزی، شبه‌جزیره عربستان و بخش‌هایی از آمریکای شمالی و استرالیا از کانون‌های اصلی تولید گردوغبار در مقیاس جهانی به شمار می‌روند. حرکت و انتقال این ذرات در لایه‌های جوی می‌تواند مرزهای جغرافیایی را نادیده بگیرد و کیفیت هوا را در مناطق دوردست نیز به‌طور چشمگیری تحت تأثیر قرار دهد (Gong et al., 2024).

¹ Dust storm

داده‌های AOD نیز افزایش تدریجی غلظت ذرات را تأیید کردند. در مطالعه‌ای با استفاده از داده‌های زمینی، MODIS، OMI و CALIPSO به همراه مدل HYSPLIT، طوفان ۲۰۱۸ در شمال غرب چین را بررسی کردند و دریافتند که غلظت PM10 بیش از ۴۰۰ میکروم گرم بر مترمکعب بوده و نسبت PM2.5/PM10 کمتر از ۰/۶ است که نشان‌دهنده منشأ طبیعی ذرات است. همچنین منابع اصلی از بیابان تا کلیماکان شناسایی شد (Wu et al., 2022). در پژوهشی، انتقال طوفان‌های صحرای بزرگ آفریقا، آرال-خزر و خاورمیانه به شمال فنلاند بررسی و افزایش رویدادهای زمستانی تأیید شد (Varga et al., 2023).

در مطالعه‌ای نیز تأثیر طوفان‌های صحرای مراکش و موریتانی بر افزایش PM10 تا کارائیب و جنوب ایالات متحده را گزارش کردند (Qor-el-aine et al., 2021). Jadidoleslami Ghaleño (2024) نشان داد بادهای ۱۲۰ روزه و خشکسالی نقش اصلی در فرسایش بادی و رسوب‌گذاری ماسه در چاه‌نیمه‌های سیستان دارند. در ایلام، Pourhashemi (2024) با استفاده از مدل‌های RF و MARS، ۳۸ کانون گردوغبار را شناسایی و نقش مؤثر کاربری اراضی و مراتع فقیر را برجسته کرد؛ دقت مدل RF با ROC=0.91 بیشتر از MARS بود. همچنین (Vatanparast Ghaleh Juq et al., 2024) با داده‌های Sentinel-5 (۲۰۲۱-۲۰۱۲) و MODIS (۲۰۲۱-۲۰۱۲) تغییرات غلظت آئروسول در غرب ایران را پایش کردند. نتایج نشان داد غلظت AOD در ژانویه روند کاهشی و در جولای روند افزایشی دارد؛ بیشترین AI در جولای و سپتامبر ۲۰۲۱ مشاهده شد. همپوشانی شاخص‌های پوشش گیاهی (EVI) و خاک (BSI) نیز نشان داد که بیشترین آلودگی در مناطق فاقد پوشش گیاهی رخ می‌دهد.

مطالعات پیشین عمدتاً بر بررسی عوامل اقلیمی و زیست‌محیطی مرتبط با پدیده گردوغبار تمرکز داشته‌اند، اما تاکنون پژوهشی جامع با رویکرد ترکیبی برای شناسایی منابع، تحلیل مسیر حرکت و ارزیابی شدت گردوغبار در استان ایلام، به‌ویژه در بازه زمانی ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۴، انجام نشده است. این تحقیق با بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای سنجنده‌های MODIS و Sentinel-5، به پایش زمانی و مکانی آلودگی گردوغبار

به‌موازات آن، استفاده از مدل‌های انتقال ذرات در جو، امکان تحلیل مسیر و منشأ ذرات گردوغبار را فراهم کرده و به فهم دینامیک فضایی آنها کمک شایانی کرده است. در چنین شرایطی، مطالعات محلی با تکیه بر ابزارهای علمی و داده‌های چندمنبعی، می‌توانند بستری مناسب برای ارائه راهکارهای مدیریتی، پیش‌آگاهی زیست‌محیطی و کاهش خسارات ناشی از طوفان‌های گردوغباری فراهم سازند. تمرکز بر استان‌هایی چون ایلام، که همزمان در معرض منشأهای داخلی و خارجی گردوغبار قرار دارند، از منظر شناخت الگوهای پیچیده گردوغبار و تدوین برنامه‌های سازگاری و کاهش مخاطرات، حائز اهمیت دوچندان است. در پژوهشی از داده‌های Sentinel-5 (۲۰۲۳-۲۰۱۸) برای بررسی طوفان‌های گردوغبار و تغییرات تالاب شادگان استفاده شد که نشان داد خشک شدن شدید تالاب در سال‌های ۲۰۱۸، ۲۰۲۱ و ۲۰۲۲ رخ داده و بیشترین طوفان‌ها در ۲۰۲۲-۲۰۲۳ ثبت شد (۲۱۴ روز در شمال و ۱۴۶ روز در جنوب).

مدل HYSPLIT نیز انتقال آلودگی به خوزستان و مناطق غرب و جنوب غرب ایران را تأیید کرد (Yousefi et al., 2025). در مطالعه‌ای، اثرات بهداشتی PM2.5 در جنوب غرب ایران برآورد شد و مشخص گردید که در سال ۲۰۲۱ غلظت بیش از حد مجاز WHO بوده است؛ با این حال، کاهش انتشار ذرات ناشی از صنایع و ترافیک، خطرات قلبی-ریوی و سایر بیماری‌ها را طی ۲۰۱۸-۲۰۱۸ کاهش داد (Baharvand et al., 2025). در پژوهشی از مدل WRF-Chem و داده‌های لندست ۵، ۷ و ۸ (۱۹۹۰-۲۰۲۱) برای ارزیابی تغییرات منابع آبی در سیستان استفاده شد. نتایج نشان داد خشک شدن آب‌ها باعث افزایش حدود ۴۰ درصد انتشار گردوغبار و تشدید اثرات تشعشعی شده است؛ همچنین خشک شدن دریاچه‌های هامون خنک‌کنندگی سطح زمین را افزایش داده است (Darvishi Boloorani et al., 2022). Khanfari et al., (2024)، با مدل CA-Markov پیش‌بینی کردند که تا سال ۲۰۵۰ حدود ۷۹/۶ درصد از تالاب شادگان به اراضی بایر تبدیل خواهد شد که منجر به ایجاد منابع جدید گردوغبار می‌شود.

عمدتاً کوهستانی و بخشی از رشته‌کوه زاگرس را تشکیل می‌دهند که شیب‌های تند و دره‌های عمیق دارد. میانگین ارتفاع استان ۱۲۰۰ متر از سطح دریا است، هرچند برخی قله‌ها به بیش از ۳۰۰۰ متر نیز می‌رسند. توپوگرافی ناهموار همراه با شبکه رودخانه‌ای متعدد، از جمله رودهای کرخه و سیمره، تأثیر مهمی بر پراکنش گردوغبار و جریان‌های جوی محلی دارد. اقلیم استان ایلام نیمه‌خشک تا خشک بوده و دمای هوا در تابستان‌ها به ۴۰ درجه سانتی‌گراد و در زمستان‌ها به زیر صفر می‌رسد. میزان بارندگی سالانه به طور میانگین حدود ۴۰۰ میلی‌متر است که بیشتر در فصل زمستان و بهار رخ می‌دهد.

پوشش گیاهی استان شامل مراتع و جنگل‌های پراکنده زاگرسی است و بخش‌های وسیعی از اراضی کشاورزی، به‌ویژه در دشت‌های اطراف رودخانه‌ها، تحت کشت محصولات زراعی قرار دارند. این ترکیب اقلیمی، توپوگرافی و کاربری اراضی، استان ایلام را به منطقه‌ای حساس در برابر پدیده گردوغبار تبدیل کرده است، به‌ویژه در فصول گرم و خشک که بادهای غالب غربی و جنوب غربی گردوغبار را از نواحی مرزی کشور عراق و بیابان‌های اطراف وارد استان می‌کنند (Ahmadi-Molaverdi et al., 2022).

داده‌های مورد استفاده، داده‌های زمینی و ماهواره‌ای: در این پژوهش، داده‌های ذرات معلق (PM) مربوط به سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۵ از ایستگاه‌های سنجش آلودگی هوای مهران و دهلران به‌عنوان منابع زمینی جمع‌آوری شد. علاوه بر آن، شاخص‌های ماهواره‌ای شامل AOD (عمق نوری آئروسول)، AAI (شاخص جذب آئروسول)، NDDI (شاخص تفاضلی نرمال‌شده گردوغبار) و DECM (نقشه شمارش روزهای گردوغبار) از تصاویر سنجنده MODIS و ماهواره‌ی Sentinel-5P برای بازه زمانی پنج‌ساله (۲۰۲۰ تا ۲۰۲۴) استخراج شدند. سنجنده MODIS که توسط NASA و NOAA برای پایش زمین و اقلیم طراحی شده است، داده‌هایی با ۳۶ باند طیفی و تفکیک مکانی یک کیلومتر، در بازه‌های روزانه ارائه می‌دهد (NASA, 2015). در این پژوهش، از ۱۲ تصویر

در استان ایلام پرداخته و به منظور شبیه‌سازی دقیق مسیر حرکت ذرات گردوغبار، از مدل عددی HYSPLIT استفاده شده است. در مرحله بعد، با استفاده از بستر Google Earth Engine و زبان JavaScript، شاخص‌های سنجش از دور شامل AOD^۱، AAI^۲، NDDI^۳ برای شناسایی نواحی رسوب گردوغبار در سطح زمین و DECM^۴ برای بررسی فراوانی رخدادهای گردوغبار در سطح استان استخراج و تحلیل شده‌اند. این رویکرد یکپارچه و داده‌محور، نه تنها در پر کردن خلأ مطالعاتی موجود در خصوص منشأ و مسیر گردوغبار در استان ایلام مؤثر است، بلکه گامی کاربردی در جهت پیش‌بینی الگوهای آبی گردوغبار، شناسایی مناطق مستعد و مدیریت بهینه ریسک‌های ناشی از آن به‌شمار می‌رود. یافته‌های این تحقیق با ارائه تحلیل‌های فضایی و زمانی دقیق از رخدادهای گردوغبار، نقشه‌ای جامع از شدت، الگو و منابع اصلی ذرات معلق در استان ایلام فراهم آورده است.

این اطلاعات می‌توانند مبنایی علمی و قابل اتکا برای تدوین راهبردهای مدیریت منابع طبیعی، سیاست‌گذاری در زمینه کاهش آلودگی هوا، و مقابله با پدیده‌های اقلیمی همچون بیابان‌زایی و تغییرات اقلیمی فراهم سازند. همچنین، یافته‌های حاصل می‌توانند به‌عنوان مرجعی معتبر برای پژوهش‌های آبی در زمینه تعاملات بین‌اقلیمی، آثار زیست‌محیطی فعالیت‌های انسانی و ارزیابی اکولوژیکی مناطق خشک و نیمه‌خشک مورد استفاده قرار گیرند.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: استان ایلام با وسعت تقریبی ۲۰۱۳۳ کیلومتر مربع، در غرب ایران و در ناحیه زاگرس میانی واقع شده است. این استان بین ۳۲ درجه و ۲۹ دقیقه تا ۳۴ درجه و ۱۵ دقیقه عرض شمالی و ۴۵ درجه و ۲۴ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۱۰ دقیقه طول شرقی گسترده شده است و موقعیت جغرافیایی آن در شکل ۱ نشان داده شده است. ایلام از شمال با استان لرستان، از شرق با استان خوزستان، از جنوب با استان خوزستان و از غرب با کشور عراق هم‌مرز است. ارتفاعات این استان

³ Normalized Difference Dust Index

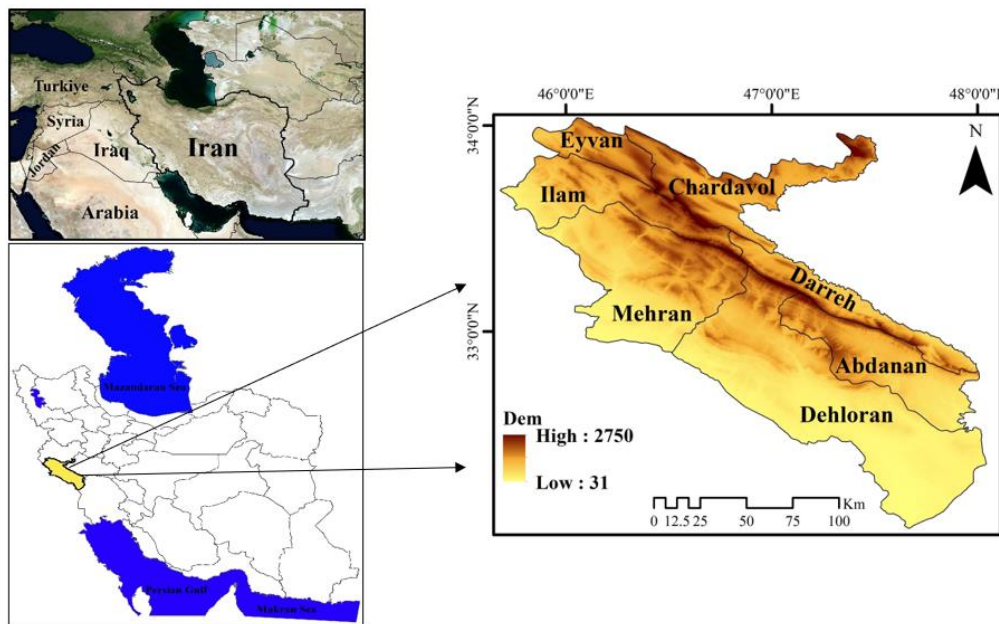
⁴ Dust Event Count Map

¹ Aerosol Optical Depth

² Aerosol Absorbing Index

ترکیبات جوی و آلاینده‌هایی مانند NO_2 ، O_3 ، CO ، آئروسول‌ها و AAI را با قدرت تفکیک مکانی $3/5 \times 7$ کیلومتر و پوشش روزانه پایش می‌کند (Copernicus, 2018).

MODIS شامل یک لندکاور (ترکیب MODIS Landsat 8)، پنج تصویر AOD و NDDI (سالانه) و یک تصویر True Color (روزانه) استفاده شد. ماهواره Sentinel-5P متعلق به آژانس فضایی اروپا و برنامه Copernicus بوده و با سنجنده TROPOMI



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و توپوگرافی استان ایلام، ایران
Fig. 1. Geographic location and dem map of Ilam Province, Iran

داده‌های سنجش از دور، تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های مکانی طراحی شده است. این سامانه ابزارهای متنوعی را در اختیار پژوهشگران، تحلیل‌گران محیط زیست و متخصصان علوم زمین قرار می‌دهد و امکان پردازش حجم بالایی از داده‌ها را با سرعت بالا و دقت مناسب فراهم می‌سازد (NOAA, 2020).

زبان برنامه‌نویسی اصلی این پلتفرم JavaScript است که از طریق آن می‌توان انواع الگوریتم‌ها و مدل‌های تحلیلی را برای تحلیل تغییرات مکانی-زمانی پیاده‌سازی نمود. در این مطالعه، به منظور بررسی و تحلیل الگوهای گردوغبار در استان ایلام، از داده‌های ترکیبی سنجنده MODIS و ماهواره Sentinel-5P استفاده شد. به طور خاص، برای پایش عمق نوری آئروسول (AOD) از داده‌های MODIS با شناسه MODIS/006/MCD19A2_GRANULES و برای محاسبه شاخص تجربی NDDI از تصاویر MODIS با دقت مکانی یک کیلومتر (MODIS/061/MOD09GA) در بازه زمانی ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۴ استفاده شد. همچنین

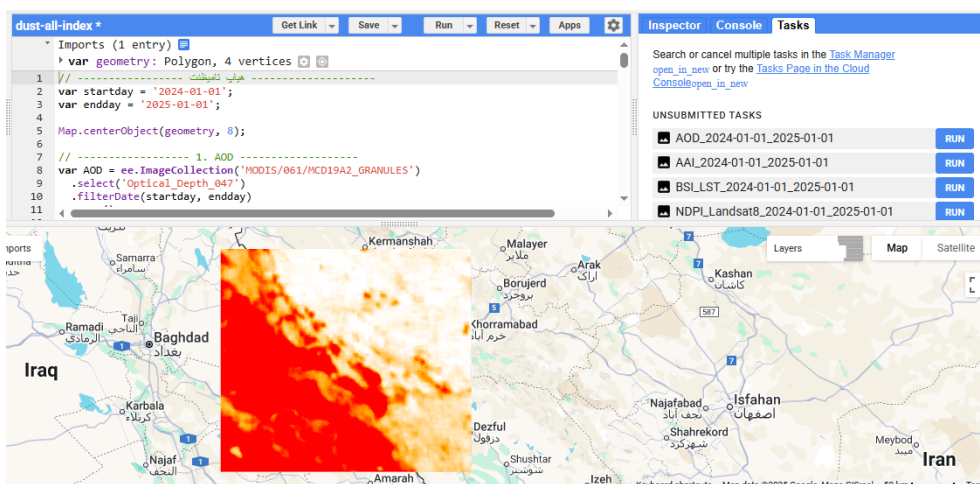
در این پژوهش، ۱۰ تصویر سالانه از شاخص‌های AAI و DECM طی سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۴ مورد استفاده قرار گرفت. فرایند استخراج و پردازش این داده‌ها با بهره‌گیری از کدنویسی پیشرفته در محیط Google Earth Engine انجام شده است. برای بررسی دقیق مسیر انتقال توده‌های گردوغبار، از مدل HYSPLIT استفاده شد. این مدل امکان ردیابی مسیرهای عقب‌گرد جریان‌های جوی را فراهم می‌سازد و در ترکیب با تصاویر MODIS Corrected Reflectance (True Color)، قابلیت بالایی در تحلیل منشأ و الگوی حرکت گردوغبار دارد.

در این راستا، ایستگاه‌های مهران و دهلران نیز به منظور پایش و تحلیل مسیرهای ورودی گردوغبار به استان ایلام در نظر گرفته شدند. موقعیت این ایستگاه‌ها در شکل ۱ نمایش داده شده است.

کدنویسی گوگل ارث انجین: سامانه Google Earth Engine یک پلتفرم ابری قدرتمند و پیشرفته است که توسط شرکت گوگل توسعه یافته و برای تحلیل

استفاده COPENICUS/S5P/NRTI/L3_AER_AI شد. نتایج محاسبات در قالب شکل ۲ قابل مشاهده هستند.

برای تحلیل ویژگی‌های گردوغبار شامل شاخص جذب آتروسول (AAI) و محاسبه نقشه شمارش روزهای گردوغبار (DECM) از داده‌های ماهواره Sentinel-5P با شناسه COPENICUS/S5P/OFFL/AER_AI و



شکل ۲- مراحل اجرای الگوریتم‌های استخراج شاخص‌های سنجش از دور در محیط Google Earth Engine
Fig. 2. Workflow of remote sensing index extraction using coding in the Google Earth Engine environment

و میزان غلظت هر آلاینده هوا را ارزیابی می‌کند. هر آلاینده پس از اندازه‌گیری، با استفاده از یک مقیاس استاندارد به عددی بین صفر تا ۵۰۰ تبدیل می‌شود. این شاخص به صورت نسبی نشان‌دهنده کیفیت هواست؛ به طوری که مقادیر پایین‌تر نمایانگر هوای پاک‌تر و خطر کمتر برای سلامت انسان و مقادیر بالاتر بیانگر کیفیت پایین‌تر هوا و افزایش خطرات سلامتی است (Yousefi Kebriya and Nadi, 2025).

شاخص کیفیت هوا بر پایه شاخص عمق اپتیکی آتروسول (AOD) و شاخص جذب‌کننده آتروسول (AAI) محاسبه می‌شود. AOD میزان جذب و پراکندگی نور توسط ذرات معلق در جو را نشان داده و به صورت کمی غلظت ذرات معلق در هر کیلومتر مکعب از جو را اندازه‌گیری می‌کند، که مقادیر بالای ۰/۳ وضعیت ناسالم را نشان می‌دهد. شاخص AAI نیز میزان جذب نور توسط آتروسول‌های جذب‌کننده مانند گردوغبار و ذرات کربن سیاه را نشان می‌دهد، به طوری که مقادیر بالاتر از ۰/۵ بیانگر افزایش آلودگی و خطرناک بودن شرایط هوا است. بر اساس جدول ۱، مقادیر AQI بالاتر از ۱۰۰ نشان‌دهنده هوای آلوده است (Yousefi Kebriya et al., 2025).

نقشه ترکیبی روزهای گردوغبار (DECM): برای تعیین تعداد روزهای گردوغبار در استان ایلام، شاخص DECM استفاده شد که از داده‌های شاخص جذب‌کننده آتروسول (AAI) ماهواره Sentinel-5P استخراج می‌شود (مجموعه داده COPENICUS/S5P/NRTI/L3_AER_AI).

در این روش، ابتدا تصاویر شاخص AAI در بازه زمانی مشخص شده فیلتر شده و هر پیکسل که مقدار آن از آستانه عددی یک فراتر رود، به عنوان یک روز گردوغبار در نظر گرفته می‌شود (Miri et al., 2021). سپس برای هر پیکسل، تعداد دفعات وقوع این رویدادها در طول بازه زمانی مطالعه جمع‌بندی شده و نقشه‌ای ترکیبی از فراوانی رویدادهای گردوغبار (DECM) تولید می‌شود. این شاخص نشان‌دهنده تعداد روزهایی است که در آنها شرایط شاخص جذب آتروسول به گونه‌ای بوده که وقوع گردوغبار محتمل است. این شاخص امکان شناسایی دقیق مناطق با بالاترین فراوانی وقوع گردوغبار و تحلیل روندهای زمانی رویدادهای گردوغبار در سطح استان را فراهم می‌کند.

شاخص کیفیت هوا (AQI): شاخص کیفیت هوا (AQI) به صورت روزانه و حتی ساعتی اندازه‌گیری شده

جدول ۱- دسته‌بندی‌های شاخص کیفیت هوا (AQI)، به همراه مقادیر AOD و AAI و سطوح مرتبط نگرانی آلودگی
Table 1. AQI categories, along with AOD and AAI values, and their corresponding pollution levels of concern

Levels of Concern	AAI Index Value	AOD Index Value	AQI Value
Good	< 0	< 0.1	0 - 50
Moderate	0 - 0.5	0.1 - 0.3	51 - 100
Unhealthy	0.5 - 2	0.3 - 0.5	101 - 200
Very Unhealthy	2 - 5	0.5 - 1	201 - 300
Hazardous	5 >	1 >	>300

مدل وارد شده و تأثیر عوامل جوی مانند جریان باد، آشفستگی و پایداری جو نیز در محاسبات لحاظ می‌شود. این مدل کاربردهای فراوانی در حوزه‌های مختلفی همچون مطالعات آلودگی هوا، پایش گردوغبار، انتشار خاکستر آتشفشانی و ردیابی مواد رادیواکتیو دارد و به‌عنوان ابزاری کلیدی برای بررسی پراکندگی آلاینده‌ها در مقیاس‌های محلی و منطقه‌ای شناخته می‌شود (Yousefi Kebriya et al., 2025, Rolph et al., 2017).

در این پژوهش، با بهره‌گیری از یک چارچوب تحلیلی جامع و تلفیقی، فرایند شناسایی، پایش و ارزیابی الگوهای گردوغبار در استان ایلام دنبال شده است. در مرحله نخست، شاخص ترکیبی رویدادهای گردوغبار (DECM) از طریق سامانه Google Earth Engine استخراج شد که این شاخص توان بالایی در تشخیص نواحی مستعد تولید گردوغبار در مقیاس منطقه‌ای دارد. در ادامه، نقشه‌های توزیع فضایی شاخص عمق نوری آئروسول (AOD) و شاخص آئروسول جذب‌کننده (AAI) برای دوره زمانی ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۴ تولید شد. این نقشه‌ها به‌طور دقیق تغییرات سالانه شدت و پراکنش ذرات معلق در جو را نشان داده و نواحی با بیشترین تراکم گردوغبار در سطح استان را آشکار می‌سازند.

جهت شناسایی مکان‌هایی که در آنها نهشت گردوغبار رخ داده است، از شاخص تفاوت نرمال شده گردوغبار (NDDI) استفاده شد. این شاخص ابزاری کارآمد برای تمایز نواحی متأثر از نشست ذرات گردوغبار در سطح زمین است. به‌منظور تحلیل منشأ، مسیر انتقال و جابه‌جایی ذرات معلق، مدل لاگرانژی HYSPLIT مورد استفاده قرار گرفت. این مدل با

شاخص تفاوت نرمال شده گردوغبار (NDDI): این شاخص برای شناسایی و پایش تجمع ذرات گردوغبار و خاک بر روی سطح زمین استفاده می‌شود. محاسبه NDDI بر اساس اختلاف بازتاب سطحی بین دو باند طیفی است؛ باند مادون قرمز کوتاه (SWIR) و باند آبی از تصاویر سنجنده MODIS. فرمول محاسبه آن به‌صورت رابطه (۱) است.

$$NDDI = \frac{SWIR-Blue}{SWIR+Blue} \quad (1)$$

که در آن، SWIR نمایانگر بازتاب باند مادون قرمز کوتاه (حدود ۲/۱۳ میکرومتر) و Blue نمایانگر بازتاب باند آبی است. داده‌های مورد استفاده از مجموعه تصاویر MODIS/061/MOD09GA با شناسه MODIS/061/MOD09GA انتخاب و با استفاده از محیط Google Earth Engine و زبان برنامه‌نویسی JavaScript پردازش و تحلیل شدند. داده‌های خام ابتدا بر اساس بازه زمانی و محدوده مکانی مطالعه فیلتر شدند، سپس شاخص NDDI برای هر تصویر محاسبه و میانگین‌گیری مکانی انجام شد تا نقشه‌های نهایی گردوغبار تولید شود (Ghazal, 2020).

مدل ¹HYSPLIT: مدل HYSPLIT که توسط اداره ملی اقیانوسی و جوی ایالات متحده (NOAA) توسعه یافته، یکی از ابزارهای معتبر برای شبیه‌سازی پراکندگی ذرات معلق و آلاینده‌های هوا است. این مدل به محققان و متخصصان محیط زیست امکان می‌دهد تا الگوهای حرکت و مسیر انتقال ذرات معلق در جو را تحلیل کنند. HYSPLIT با استفاده از روش لاگرانژی، حرکت هر ذره را در زمان و مکان به‌صورت دقیق مدل‌سازی می‌کند.

در این فرایند، داده‌های هواشناسی مانند سرعت و جهت باد، دما، فشار و رطوبت که از ایستگاه‌های زمینی و ماهواره‌ای جمع‌آوری می‌شوند، به‌عنوان ورودی به

¹ Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory

شدت وقوع گردوغبار به بیشترین میزان خود در پنج سال اخیر رسید، بلکه دامنه پراکندگی مکانی آن نیز به گونه‌ای بود که تقریباً تمامی نواحی مرزی استان را درگیر ساخت. تحلیل فضایی داده‌ها نشان می‌دهد که مرز مشترک با عراق، با تمرکز کانون‌های فعال گردوغبار، در گسترش این پدیده به داخل کشور نقش کلیدی داشته است.

افزایش مکرر روزهای گردوغباری در بازه زمانی کوتاه‌مدت، علاوه بر اثرات زیست‌محیطی، تبعات شدیدی بر سلامت عمومی، حمل‌ونقل، کشاورزی و زیرساخت‌های شهری وارد کرده است. در سال ۲۰۲۳، با کاهش نسبی شرایط بحرانی، تعداد روزهای گردوغباری به حدود ۱۸۲ مورد رسید. با این حال، هنوز مناطقی مانند دهلران، مهران، آبدانان و بخشی از شهرستان ایلام درگیر مقادیر بالایی از روزهای گردوغباری بوده‌اند. این کاهش را نمی‌توان به‌عنوان بهبود پایدار تفسیر کرد، چراکه پراکندگی مکانی همچنان ثابت باقی مانده و کانون‌های گردوغبار در همان نواحی فعال مانده‌اند. در سال ۲۰۲۴، تعداد روزهای گردوغباری به حدود ۱۷۲ مورد کاهش یافته است، اما باز هم بیشترین تمرکز در نواحی مرزی به چشم می‌خورد.

اگرچه کاهش در دو سال اخیر نوعی روند کاهشی را نشان می‌دهد، اما این کاهش از نظر آماری معنادار نبوده و سطح خطر همچنان بالا باقی مانده است. نکته قابل توجه در نتایج تحلیل نقشه‌های سالانه شاخص DECM این است که در تمامی سال‌ها، تمرکز مکانی وقایع گردوغبار در مناطق مرزی غربی استان به‌صورت مداوم تکرار شده است. در مجموع، نتایج این تحلیل نشان می‌دهد که نه‌تنها فراوانی گردوغبار افزایش یافته، بلکه الگوی گسترش فضایی آن نیز تهدیدآمیز بوده و نیازمند تدوین و اجرای راهبردهای فوری است. از جمله راهکارهای مؤثر در این زمینه می‌توان به احیای پوشش گیاهی با کاشت گونه‌های بومی مقاوم به خشکی، تثبیت خاک با مالچ‌های زیستی، مرطوب‌سازی اراضی خشک‌شده، ایجاد کمربندهای سبز در امتداد نواحی مرزی و توسعه همکاری‌های منطقه‌ای با کشور عراق جهت کنترل کانون‌های برون‌مرزی گردوغبار اشاره کرد.

به‌کارگیری داده‌های هواشناسی و اطلاعات مربوط به جهت و سرعت باد، مسیرهای بازگشت باد را شبیه‌سازی کرده و مسیر غالب نفوذ گردوغبار به استان را به همراه منابع خارجی و داخلی آن شناسایی می‌کند. نتایج مدل HYSPLIT علاوه بر تحلیل کمی جریان‌های جوی، با استفاده از تصاویر رنگی واقعی ماهواره MODIS به‌صورت کیفی مورد تطبیق قرار گرفت. تصاویر رنگی واقعی ماهواره MODIS به‌عنوان ابزاری مکمل برای تأیید بصری و اطمینان از همخوانی مسیرهای شبیه‌سازی‌شده با الگوهای واقعی گردوغبار به کار گرفته شد.

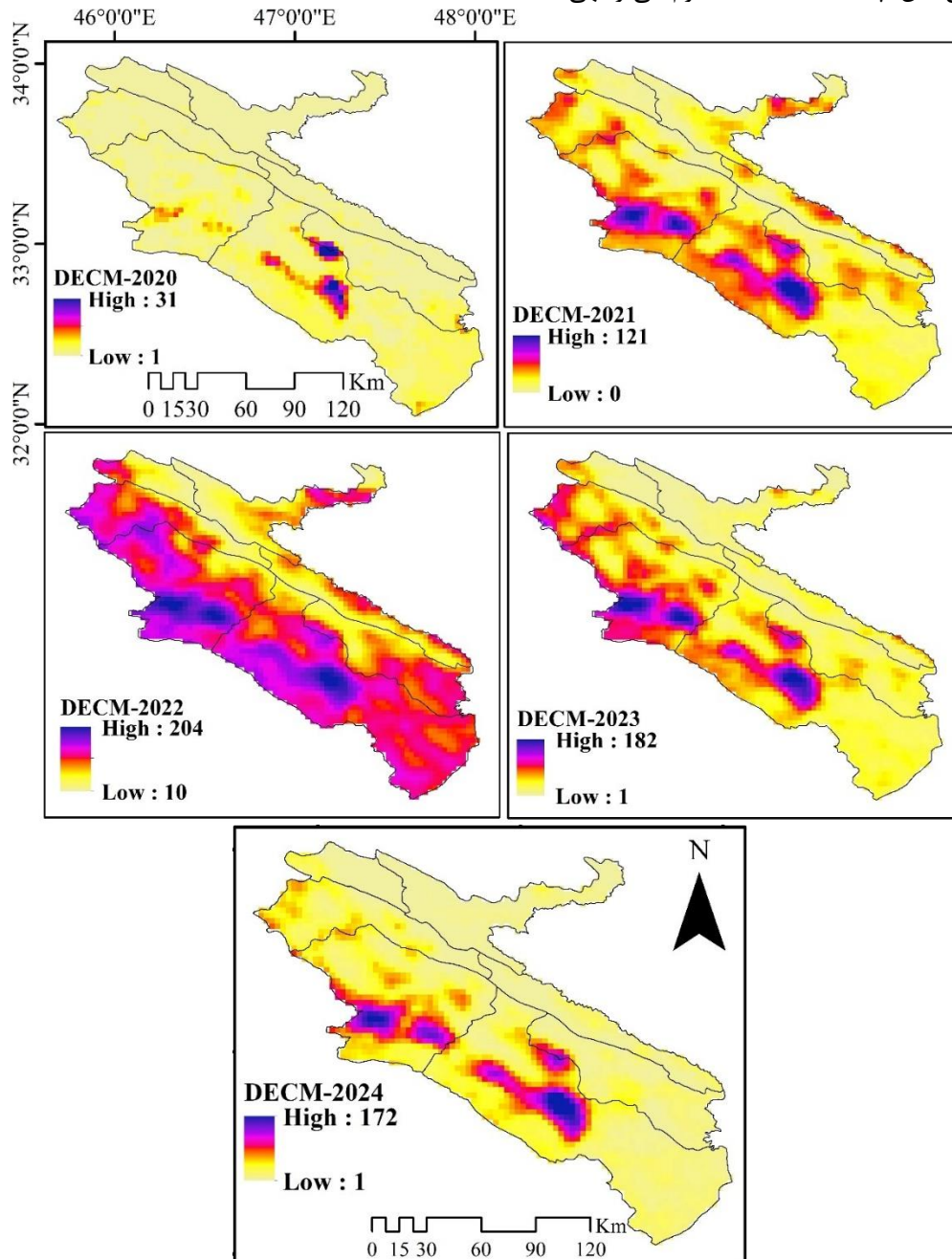
نتایج و بحث

شاخص DECM: بررسی نقشه‌های سالانه شاخص DECM برای استان ایلام در بازه زمانی سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۴ در شکل ۳ نشان می‌دهد که روزهای گردوغباری در این منطقه نه‌تنها افزایشی بوده بلکه از نظر پراکندگی مکانی نیز به‌صورت نگران‌کننده‌ای گسترش یافته است. در سال ۲۰۲۰، اگرچه نسبت به سال‌های بعدی کمترین روزهای گردوغبار ثبت شده است، اما حتی در این سال نیز بخش‌هایی از نواحی غربی استان، به‌ویژه شهرستان‌های دهلران و آبدانان، با بیش از ۳۰ روز مواجه بوده‌اند که نشان‌دهنده فعال بودن کانون‌های محلی گردوغبار در مجاورت مرز عراق است. این مقدار در ظاهر کم، اما از منظر اقلیم نیمه‌خشک منطقه، گویای وجود شرایط اولیه برای تبدیل این نواحی به کانون‌های بحرانی در سال‌های آینده بوده است. با ورود به سال ۲۰۲۱، تعداد روزهای گردوغبار در برخی نواحی مرزی به بیش از ۱۲۰ مورد افزایش یافت. این جهش چشمگیر، نشان‌دهنده افزایش فعالیت کانون‌های گردوغبار در خاک عراق و انتقال فرامرزی آن به داخل استان ایلام است. مناطق مرکزی و جنوبی استان از جمله مهران نیز در این سال با شدت بالایی روزهای گردوغباری روبه‌رو شده‌است. در سال ۲۰۲۲، اوج بحران ثبت شده است.

طبق نتایج حاصل از نقشه‌های شاخص DECM، وقوع بیش از ۲۰۰ روز گردوغبار در برخی از نواحی مرزی، به‌ویژه در دهلران، مهران، ایوان و جنوب شهرستان ایلام، مشاهده شده است. در این سال، نه‌تنها

شرایط موجود می‌تواند منجر به تثبیت یک بحران محیطی مزمن و افزایش آسیب‌پذیری استان ایلام در برابر مخاطرات فرسایشی و اقلیمی شود.

همچنین توسعه سامانه‌های هشدار سریع، پایش پیوسته شاخص‌های اقلیمی، و بهره‌گیری از فناوری‌های سنجش‌ازدور می‌تواند نقش کلیدی در مدیریت و پیش‌بینی این پدیده ایفا کند. تداوم بی‌توجهی به



شکل ۳- توزیع فضایی شاخص گردوغبار (DECM) در استان ایلام با استفاده از داده‌های ماهواره Sentinel-5
Fig. 3. Spatial distribution of the Dust Enhanced Composite Index (DECM) in Ilam Province using Sentinel-5 satellite data

(محصول TROPOMI) استخراج شده، قابلیت بالایی در شناسایی و پایش مناطق درگیر با طوفان‌های گردوغبار دارد و تغییرات سالانه آن می‌تواند به‌عنوان شاخصی معتبر برای ارزیابی کیفیت هوا در مقیاس منطقه‌ای تلقی شود.

شاخص AAI: بررسی نقشه شاخص جذب آئروسول (Aerosol Absorbing Index - AAI) که در شکل ۴ ارائه شده، بیانگر روند افزایشی وقوع پدیده گردوغبار در شهرستان ایلام طی بازه زمانی پنج‌ساله اخیر است. این شاخص که با استفاده از داده‌های ماهواره Sentinel-5

نسبی شدت بحران، مقادیر شاخص AAI تا حدودی کاهش یافته و میانگین آن به حدود ۰/۸۷ رسیده است. هرچند این مقدار نسبت به سال ۲۰۲۲ کاهش یافته، اما همچنان نشان‌دهنده شرایط ناسالم، به‌ویژه در نواحی مرزی استان است.

تمرکز مکانی آلودگی در این سال عمدتاً بر شهرستان‌های مهران، دهلران و آبدانان بوده و پهنه آلودگی نسبت به سال قبل محدودتر شده است. در سال ۲۰۲۴ نیز وضعیت مشابهی مشاهده شد و میانگین شاخص AAI در مناطق مرزی در حدود ۰/۸۶ ثبت شد. گرچه این رقم نسبت به سال‌های قبل روند کاهشی را نشان می‌دهد، اما همچنان در محدوده ناسالم قرار دارد و بیانگر استمرار تهدیدهای ناشی از پدیده گردوغبار در نواحی مرزی است. تحلیل الگوی فضایی شاخص AAI در طول دوره مطالعاتی نشان می‌دهد که شهرستان‌های مرزی استان ایلام به‌طور مداوم و مستمر با آلودگی گردوغبار مواجه بوده‌اند. این وضعیت نه‌تنها وابسته به کانون‌های داخلی استان، بلکه تحت تأثیر مستقیم کانون‌های فرامرزی واقع در غرب کشور عراق است.

در مقابل، مناطق شمالی استان ایلام که در امتداد رشته‌کوه زاگرس قرار دارند و دارای پوشش گیاهی متراکم‌تری هستند، به‌طور مستمر از کیفیت هوای مطلوب برخوردار بوده‌اند. در مناطق مرکزی استان نیز اگرچه مقادیر شاخص AAI نوساناتی داشته‌اند، اما در مقایسه با نواحی مرزی، وضعیت بهتری داشته‌اند. در مجموع، نتایج حاصل از تحلیل شاخص AAI طی پنج سال گذشته بیانگر شدت گرفتن بحران گردوغبار در مناطق مرزی استان ایلام و ضرورت تدوین راهبردهای کنترلی برای کاهش اثرات آن است. تداوم روند فعلی، به‌ویژه در شرایط افزایش گرمایش جهانی و کاهش بارندگی‌های فصلی، می‌تواند به تثبیت شرایط بحرانی در منطقه منجر شود.

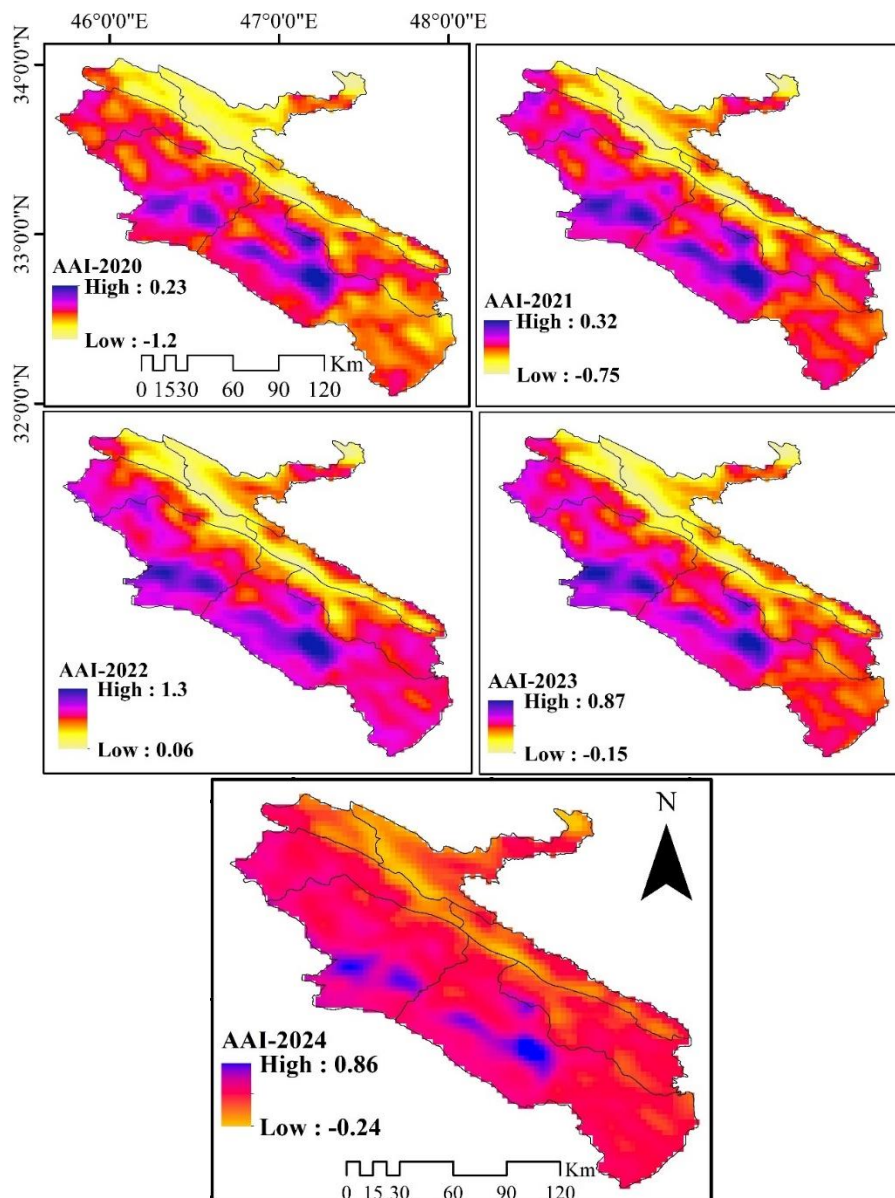
بنابراین، پایش مداوم این شاخص، احیای پوشش گیاهی، کنترل کانون‌های فرسایشی، همکاری‌های فرامرزی و بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای در تصمیم‌گیری‌های محیط‌زیستی، از جمله الزامات اساسی در مدیریت این پدیده مخرب محسوب می‌شود.

در سال ۲۰۲۰، مقادیر شاخص AAI در نواحی مرزی استان، به‌ویژه در شهرستان‌های مهران، دهلران و آبدانان، نسبت به سایر مناطق به سطح بالاتری رسید؛ به‌گونه‌ای که میانگین شاخص در این نواحی به حدود ۰/۲۸ افزایش یافت که در آستانه سطح ناسالم برای گروه‌های حساس قرار دارد. این شرایط حاکی از فعال بودن کانون‌های محلی و فرامرزی گردوغبار و همچنین تأثیرپذیری شدید مناطق غربی استان از طوفان‌های گردوغبار ورودی از مرز عراق است. در همان سال، شاخص AAI در مناطق شمالی استان، که عمدتاً کوهستانی و دارای پوشش جنگلی طبیعی (نظیر جنگل‌های بلوطی زاگرس) هستند، در پایین‌ترین حد قرار داشت که نشان‌دهنده کیفیت مطلوب هوا در این نواحی است.

در سال ۲۰۲۱، شاخص AAI روند افزایشی پیدا کرده و میانگین آن در استان به حدود ۰/۳۲ رسید که بیانگر شرایط ناسالم برای گروه‌های حساس است. این افزایش نه‌تنها از نظر شدت بلکه از منظر گستره مکانی نیز قابل توجه بوده است، به‌طوری‌که مناطق غربی، شمال‌غربی و جنوب‌غربی استان نیز تحت تأثیر قرار گرفتند. در این سال، شهرستان‌های ایلام، دهلران و آبدانان با بیشترین میزان شاخص مواجه بوده‌اند، در حالی که مناطق کوهستانی شمال استان همچنان از کیفیت هوای مطلوب برخوردار بوده‌اند.

این وضعیت نشان‌دهنده تأثیر ترکیبی عوامل اقلیمی، توپوگرافی و کاربری اراضی بر توزیع فضایی شاخص AAI است. سال ۲۰۲۲ بحرانی‌ترین سال در این دوره بوده است، به‌گونه‌ای که میانگین شاخص AAI در اکثر نواحی مرکزی و مرزی استان به بیش از ۱/۳ رسید؛ مقداری که نشان‌دهنده شرایط بسیار ناسالم برای عموم مردم است. در این سال، بخش‌های گسترده‌ای از شهرستان‌های ایوان، ایلام، مهران، دهلران و آبدانان درگیر آلودگی شدید گردوغبار بوده‌اند. به‌ویژه مناطق غربی و جنوبی استان با بالاترین شدت مواجه شدند.

در این بازه زمانی، وسعت مناطق تحت تأثیر و شدت آلودگی بالا بوده است. تداوم خشکسالی، کاهش پوشش گیاهی، تخریب اراضی و انتقال فرامرزی ذرات گردوغبار از کشور عراق از جمله مهم‌ترین دلایل بروز این وضعیت بحرانی محسوب می‌شوند. در سال ۲۰۲۳، با کاهش



شکل ۴- توزیع فضایی شاخص جذب آئروسول (AAI) در استان ایلام با استفاده از داده‌های ماهواره Sentinel-5 (محصول TROPOMI/S5P- NRTI-AER_AI)

Fig. 4. Spatial distribution of the Aerosol Absorbing Index (AAI) in Ilam Province using Sentinel-5 satellite data (TROPOMI/S5P- NRTI-AER_AI product)

دهلران و بخش‌های غربی آبدانان از مقدار یک فراتر رفت. این سطح از AOD نشان‌دهنده آلودگی شدید هوا بوده و وضعیت ناسالم تا خطرناک برای عموم مردم، به‌ویژه گروه‌های حساس را به‌دنبال داشته است. این آلودگی عمدتاً ناشی از کانون‌های فعال گردوغبار در خارج کشور و انتقال ذرات معلق از خاک‌های رهاشده در مجاورت مرز عراق بوده است. در سال ۲۰۲۱، شاخص AOD به‌صورت محسوسی افزایش یافته و در برخی نواحی به بیش از ۱/۶ رسید. این مقدار،

شاخص AOD: بررسی شاخص عمق نوری آئروسول (Aerosol Optical Depth - AOD) طی پنج سال گذشته، حاکی از تداوم شرایط بحرانی گردوغبار در بخش‌های مختلف استان ایلام، به‌ویژه در نواحی مرزی است. داده‌های حاصل از تصاویر سنجنده MODIS (محصول AOD، باند ۳) نشان می‌دهد که کیفیت هوا در این مناطق در اغلب موارد در محدوده ناسالم تا خطرناک قرار گرفته است. در سال ۲۰۲۰، مقادیر AOD در مناطق مرزی استان از جمله شهرستان‌های مهران،

هوا را تجربه کردند. به‌طور کلی، مقایسه مقادیر شاخص AOD در این بازه زمانی پنج‌ساله نشان می‌دهد که سال‌های ۲۰۲۱ و ۲۰۲۲ از نظر شدت و گستردگی آلودگی گردوغبار بحرانی‌ترین وضعیت را داشته‌اند.

همچنین، الگوی فضایی آلودگی حاکی از تمرکز مداوم گردوغبار در نواحی مرزی و غربی استان ایلام است. در مقابل، نواحی مرکزی و به‌ویژه مناطق شمالی استان که دارای ارتفاع بالا و پوشش گیاهی طبیعی شامل جنگل‌های بلوط هستند، همواره از کیفیت هوای بهتری برخوردار بوده‌اند. این نتایج بر لزوم پایش مداوم شاخص AOD، اجرای راهبردهای مقابله با فرسایش بادی، مدیریت منابع خاک و همکاری‌های منطقه‌ای در کنترل کانون‌های فرامرزی گردوغبار تأکید دارد. استمرار روند فعلی بدون مداخلات مدیریتی می‌تواند به تثبیت شرایط بحرانی در مناطق مرزی استان منجر شود و سلامت عمومی ساکنان این نواحی را با تهدید جدی مواجه سازد.

با توجه به اینکه داده‌های ماهواره MODIS دارای توان تفکیک مکانی مناسب و بازه زمانی روزانه هستند، قابلیت بسیار مناسبی برای پایش دقیق و منظم پدیده گردوغبار در مقیاس محلی فراهم می‌کنند. در مقابل، شاخص جذب آئروسول (AAI) استخراج‌شده از داده‌های ماهواره Sentinel-5 (محصول TROPOMI) اگرچه برای تحلیل‌های منطقه‌ای و پایش کلی توده‌های گردوغبار در مقیاس وسیع مفید است، اما به‌دلیل تفکیک مکانی پایین‌تر (حدود $3/5 \times 7$ کیلومتر) و حساسیت کمتر نسبت به ذرات نزدیک به سطح زمین، از دقت مکانی کمتری در مناطق کوهستانی و پیچیده‌ای مانند استان ایلام برخوردار است.

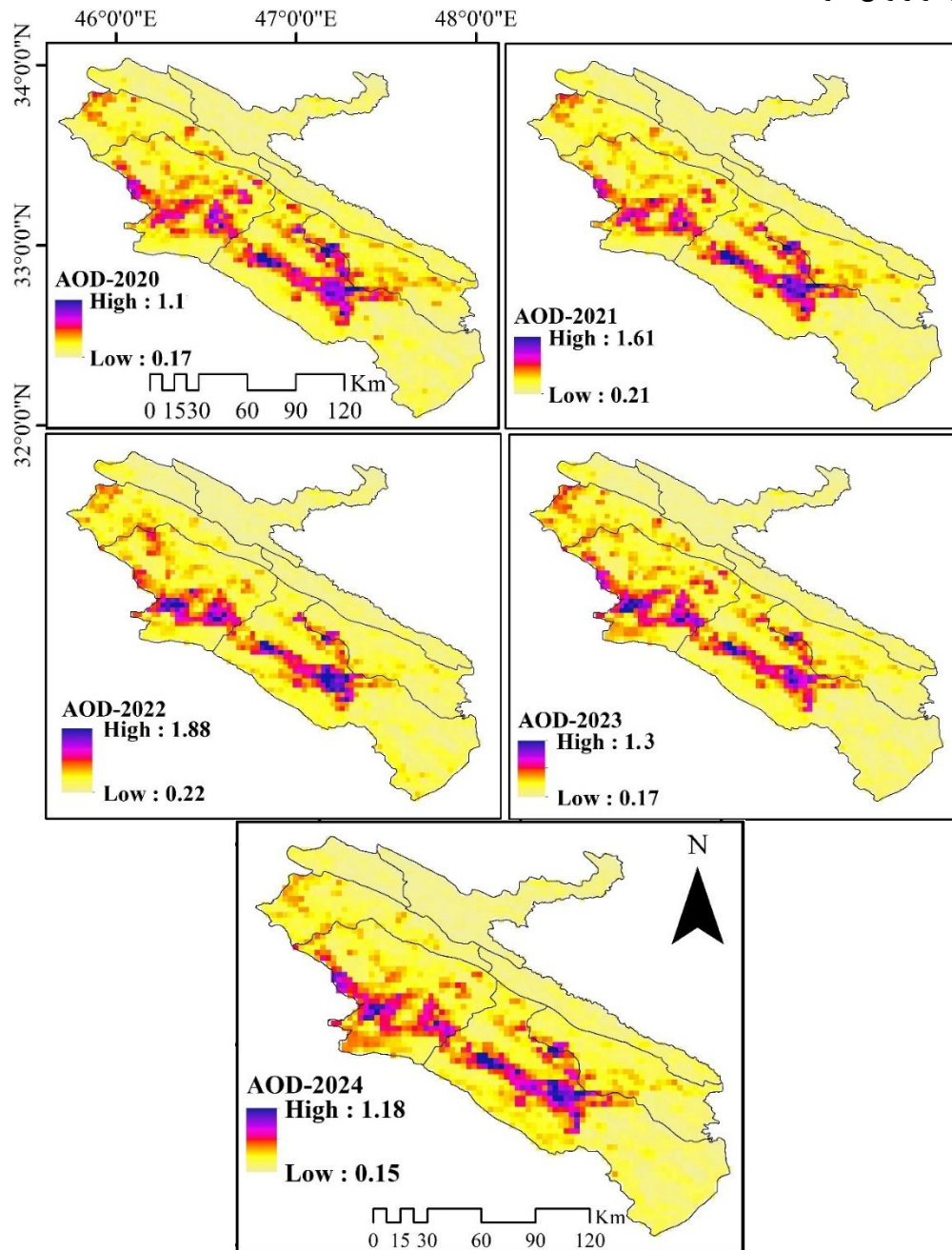
به همین دلیل، شاخص AOD حاصل از MODIS با ارائه نقشه‌هایی با وضوح بالاتر، توانسته است وضعیت گردوغبار را با جزئیات بیشتری نمایش دهد، به‌ویژه در مناطق مرزی و آسیب‌پذیر استان مانند مهران، دهلران و آبدانان. این دقت بالاتر موجب شده تا MODIS به‌عنوان منبع اصلی در تحلیل شدت، گستردگی و روند زمانی گردوغبار در پژوهش حاضر انتخاب شود. بنابراین، استفاده همزمان از شاخص‌های AOD و AAI، با در نظر گرفتن مزیت‌های مکانی و زمانی هر کدام، می‌تواند در

شرایط بحرانی را در بخش‌هایی از شهرستان‌های مرزی مانند مهران، دهلران و آبدانان به‌وجود آورده است. در این سال همچنین مناطق مرکزی استان نیز تحت تأثیر آلودگی گردوغبار قرار گرفتند؛ اگرچه سطح شاخص در این نواحی هنوز به آستانه خطرناک نرسیده و در محدوده ناسالم برای گروه‌های حساس باقی ماند. مناطق شمالی استان که تحت پوشش جنگل‌های بلوط زاگرس و ارتفاعات رشته‌کوه زاگرس قرار دارند، کمترین مقادیر AOD را تجربه کرده و کیفیت هوا در آنها در وضعیت سالم باقی ماند.

سال ۲۰۲۲ بحرانی‌ترین سال در این بازه زمانی محسوب می‌شود؛ به‌گونه‌ای که شاخص AOD در برخی مناطق به بیش از $1/85$ رسید. این وضعیت نشان‌دهنده شرایط شدیداً خطرناک در اغلب نواحی مرزی استان است. بیشترین شدت آلودگی در جنوب شهرستان ایلام، غرب شهرستان مهران و مناطق مرکزی و غربی شهرستان دهلران مشاهده شد. در این سال، حتی برخی مناطق مرکزی استان نیز به‌وضوح تحت تأثیر آلودگی قرار گرفتند، به‌طوری‌که سطح شاخص AOD در این مناطق نیز به بیش از $0/5$ رسید. تنها نواحی شمالی استان که تحت تأثیر پوشش گیاهی انبوه و توپوگرافی مرتفع قرار دارند، همچنان از کیفیت هوای مطلوب برخوردار بودند. در سال ۲۰۲۳، شاخص AOD با کاهش نسبی همراه بود و به حدود $1/3$ رسید. هرچند این کاهش در مقایسه با سال ۲۰۲۲ قابل توجه است، اما همچنان در محدوده ناسالم برای سلامت عمومی قرار دارد.

نکته قابل توجه در این سال، افزایش گستره مکانی آلودگی است، به‌طوری‌که مناطق بیشتری از استان (حتی با وجود کاهش نسبی در شدت شاخص) تحت تأثیر آلودگی گردوغبار قرار گرفتند، در سال ۲۰۲۴، مقدار AOD به $1/18$ کاهش یافت که پایین‌ترین مقدار ثبت‌شده طی این چهار سال است. با این حال، این مقدار همچنان در بازه ناسالم و خطرناک قرار می‌گیرد و بیانگر تداوم وضعیت نگران‌کننده در بخش‌هایی از استان، به‌ویژه در مناطق مرزی مهران، دهلران و آبدانان است. برخلاف سال‌های گذشته، در این سال کاهش محسوس‌تری در گستره فضایی آلودگی مشاهده شد و مناطق مرکزی و شمالی استان بهبود نسبی در کیفیت

ارائه تصویر جامع‌تر و دقیق‌تری از وضعیت آلودگی گردوغبار مؤثر واقع شود.



شکل ۵- توزیع AOD ماهواره MODIS در استان ایلام (باند ۳، محصول AOD)

Fig. 5. Distribution of AOD from MODIS Satellite in Ilam Province (Band 3, AOD Product)

مرزی غرب استان به بیش از ۰/۵ رسیده است؛ این امر بیانگر شدت بالای تجمع گردوغبار در این نواحی است. در سال ۲۰۲۱، شاخص NDDI به بیشترین مقدار خود در دوره مورد بررسی رسید و در برخی نواحی به بیش از ۰/۹ افزایش یافت. شهرستان‌های مه‌ران، دهلران، آبدانان و ایلام بیشترین میزان تجمع گردوغبار را تجربه کردند، در حالی که اثرات آن تا مناطق دره‌ای

شاخص NDDI: تحلیل نقشه شاخص NDDI در شکل ۶ نشان می‌دهد که توزیع مکانی تجمع ذرات گردوغبار روی سطح زمین در مناطق مختلف استان ایلام طی پنج سال اخیر دارای الگوی مشخصی بوده است. در سال ۲۰۲۰، به‌استثنای نواحی مرکزی استان که عمدتاً پوشش گیاهی متراکم و توپوگرافی شیب‌دار مرتبط با رشته‌کوه زاگرس دارند، شاخص NDDI در مناطق

دهلران و آبدانان رخ داده است. تداوم وقوع گردوغبار در این مناطق طی تمام سال‌ها بیانگر تأثیر مستقیم منابع خارجی گردوغبار، به‌ویژه کشورهای هم‌مرز، بر کیفیت هوای استان ایلام است.

این یافته‌ها لزوم اتخاذ تدابیر مدیریتی برای کاهش اثرات گردوغبار را دوچندان می‌کند. از جمله راهکارهای مهم می‌توان به توسعه و تقویت پوشش گیاهی مقاوم به خشکی در نواحی در معرض خطر، مدیریت بهینه منابع آبی در محدوده‌های مرزی، و احیای عرصه‌های طبیعی مانند تالاب‌های اطراف استان اشاره کرد؛ چرا که این عناصر می‌توانند نقش مؤثری در کاهش سرعت و شدت گسیل گردوغبار ایفا کنند. همچنین، توجه به سیاست‌های آموزشی و ارتقاء آگاهی عمومی، به‌ویژه در بین جوامع محلی واقع در کانون‌های بحرانی، می‌تواند زمینه‌ساز مشارکت بیشتر مردم در مدیریت بحران‌های محیط‌زیستی شود.

با توجه به شدت و تداوم آلودگی گردوغبار در استان ایلام، مقابله مؤثر با این پدیده نیازمند رویکردی یکپارچه و میان‌رشته‌ای است که تلفیقی از تحلیل داده‌های ماهواره‌ای، ارزیابی‌های اقلیمی، حفاظت از منابع زیستی، و همکاری‌های فرامنطقه‌ای را در برگیرد. تنها از طریق هم‌افزایی بین نهادهای پژوهشی، اجرایی و جوامع محلی می‌توان مسیر مناسبی برای کاهش اثرات مخرب گردوغبار در این منطقه فراهم ساخت.

شناسایی منشأ و جهت حرکت گردوغبار با مدل

HYSPLIT: به‌منظور تحلیل منشأ و مسیر انتقال گردوغبار در استان ایلام، روزهایی انتخاب شدند که شاخص کیفیت هوا (AQI) در وضعیت بسیار بحرانی و در آستانه عدد ۵۰۰ قرار داشت. فهرست این روزهای بحرانی در جدول ۲ ارائه شده است. برای شبیه‌سازی دقیق مسیر حرکت ذرات گردوغبار، از مدل عددی HYSPLIT با رهگیری معکوس در بازه زمانی ۲۴ ساعته استفاده شد. برای بررسی همزمان الگوهای رخداد گردوغبار، تصاویر رنگی ماهواره‌ای MODIS با تصحیح بازتاب (Corrected Reflectance – True Color) به کار گرفته شد تا وقوع طوفان‌های گردوغبار در آن تاریخ به‌وضوح قابل مشاهده باشد.

با توجه به تشابه مسیرها و الگوهای انتقال گردوغبار در روزهای مختلف، دو روز شاخص از سال ۲۰۲۵

شمالی نظیر شهرستان‌های چرداول و ایوان نیز مشاهده شد. در سال ۲۰۲۲، با وجود افزایش قابل توجه شاخص‌های AOD و AAI که نشان‌دهنده شدت بالای وقوع گردوغبار در منطقه است، مقدار شاخص NDDI نسبت به سال قبل کاهش یافته و در حدود ۰/۵ تثبیت شد. این موضوع می‌تواند ناشی از عبور و انتقال بیشتر توده‌های گردوغبار به سایر مناطق کشور و کاهش میزان تجمع محلی باشد.

در این سال، تمرکز تجمع گردوغبار عمدتاً در مناطق جنوبی دهلران و شمالی استان، از جمله ایوان و چرداول، مشاهده شد که احتمالاً تحت تأثیر حرکت توده‌های گردوغبار از نواحی مرزی استان کرمانشاه نیز قرار داشته‌اند.

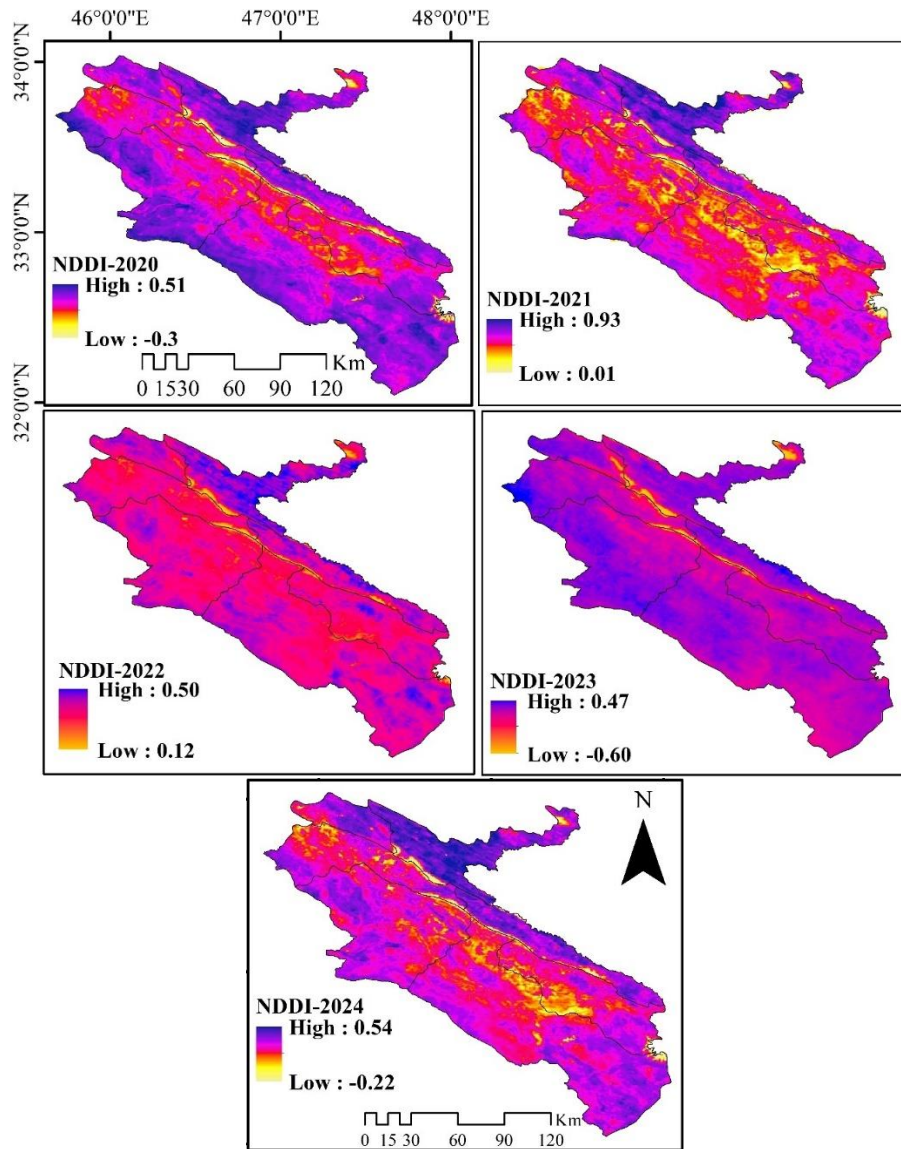
در سال ۲۰۲۳، شاخص NDDI به پایین‌ترین میزان خود در بازه پنج‌ساله رسید و در بیشتر مناطق کمتر از ۰/۵ گزارش شد، به‌ویژه در نواحی غربی استان، که نشان‌دهنده کاهش میزان تجمع ذرات گردوغبار نسبت به سال‌های قبل است. در سال ۲۰۲۴، این شاخص با افزایشی نسبی به ۰/۵۴ رسید و بار دیگر مناطق شمالی و غربی استان شامل ایوان، چرداول و دره‌شهر بیشترین تجمع گردوغبار را تجربه کردند، در حالی که مناطق مرکزی با پوشش گیاهی متراکم شاخص پایین‌تری داشتند. یکی از یافته‌های مهم این تحلیل آن است که نواحی جنوبی شهرستان دهلران و مرزهای منتهی به استان خوزستان، به‌ویژه مناطقی که رودخانه کرخه و سدهای مرتبط در آن قرار دارند، پایین‌ترین مقادیر شاخص NDDI را در تمام سال‌ها نشان داده‌اند.

این موضوع نقش کلیدی منابع آبی و پوشش‌های مرطوب در کاهش تجمع گردوغبار و عملکرد مؤثر آنها به‌عنوان فیلتر طبیعی در برابر انتقال و رسوب ذرات معلق را تأیید می‌کند. این نتایج اهمیت حفاظت از منابع آبی و تقویت پوشش گیاهی را در کنترل و کاهش اثرات مخرب گردوغبار در مناطق غربی کشور برجسته می‌سازد.

تحلیل نقشه‌های شاخص‌های مختلف گردوغبار از جمله AOD، AAI، DECM و NDDI در بازه پنج‌ساله اخیر نشان می‌دهد که بیشترین تمرکز آلودگی گردوغبار در استان ایلام در مناطق مرزی به‌ویژه نواحی غربی و جنوب غربی شامل شهرستان‌های مهران،

به دست آمده از تلفیق مدل HYSPLIT و داده‌های ماهواره‌ای، الگوهای سینوپتیکی غالب در رخدادهای گردوغبار استان ایلام را با دقت بیشتری آشکار می‌سازند و نقش منابع خارجی و الگوهای باد در شکل‌گیری این پدیده را برجسته می‌کنند.

انتخاب شد که در آنها داده‌های ایستگاه‌های مهران و دهلران در دسترس بوده و تصاویر ماهواره‌ای فاقد پوشش ابری بودند. این انتخاب، امکان بررسی دقیق‌تر منشأ خارجی گردوغبار و مسیرهای نفوذ آن از مرزهای غربی به درون استان را فراهم کرد. یافته‌های



شکل ۶- توزیع فضایی شاخص تفاوت نرمال شده گردوغبار (NDDI) در استان ایلام با استفاده از تصاویر ماهواره MODIS (محصول MOD09GA، باندهای ۲ و ۴)

Fig. 5. Spatial distribution of the Normalized Difference Dust Index (NDDI) in Ilam Province using MODIS satellite imagery (MOD09GA product, bands 2 and 4)

جدول ۲- روزهای منتخب برای بررسی مسیر آلودگی در استان ایلام

Table 2. Selected days for tracking pollution pathways in Ilam Province

No.	Date	AQI	State
1	15/04/2025	500	Dehloran
2	06/05/2025	500	Mهران

تأکیدی بر نقش کلیدی منابع برون‌مرزی در تشدید بحران گردوغبار در استان ایلام دارد. در این روز خاص، شاخص کیفیت هوا (AQI) در ایستگاه دهلران به سطح بسیار بحرانی (۵۰۰) رسیده است که بیانگر شرایط فوق‌العاده خطرناک برای سلامت عمومی، به‌ویژه برای گروه‌های حساس نظیر سالمندان، کودکان، و بیماران تنفسی است.

چنین سطحی از آلودگی نه‌تنها نشان‌دهنده شدت بالای رخداد گردوغبار است، بلکه بر ضرورت تقویت نظام‌های هشدار سریع، مدیریت مخاطرات محیطی، و سیاست‌گذاری‌های مبتنی بر داده‌های ماهواره‌ای و مدل‌سازی عددی تأکید دارد. در مجموع، تحلیل ارائه‌شده در شکل ۷ به‌خوبی بیانگر تعامل بین شرایط سینوپتیکی، ساختار ترمودینامیکی جو، و منابع ژئومورفولوژیک گردوغبار است که با بهره‌گیری از مدل HYSPLIT و داده‌های سنجش از دور، می‌توان به درک عمیق‌تری از الگوهای انتقال گردوغبار در استان ایلام دست یافت.

ایلام از غرب با کشور عراق حدود ۴۲۰ کیلومتر مرز مشترک دارد و همین موقعیت مرزی، آن را به یکی از نقاط حساس در برابر نفوذ ذرات گردوغبار فرامرزی تبدیل کرده است. توپوگرافی استان عمدتاً کوهستانی و ناهموار است و بخش بزرگی از آن را رشته‌کوه‌های زاگرس دربر گرفته‌اند. این شرایط باعث شکل‌گیری اقلیم‌های متنوعی از کوهستانی تا نیمه‌خشک در نواحی مختلف استان شده است. بخش‌هایی از دشت‌های غربی و جنوب‌غربی استان به‌دلیل کاهش پوشش گیاهی، بهره‌برداری ناپایدار از منابع آب و خاک، و هم‌جواری با بیابان‌های کشور عراق، به‌شدت در معرض پدیده گردوغبار قرار دارند.

افزون بر این، خشکسالی‌های پی‌درپی در سال‌های اخیر و کاهش منابع آبی در حوضه‌های آبریز مرزی و داخلی، منجر به تشدید شرایط بیابان‌زایی و افزایش فراوانی وقوع طوفان‌های گردوغبار شده است. گردوغبارهای ورودی از کشور عراق و منابع داخلی، به‌ویژه در فصول گرم سال، کیفیت هوای مناطق مرکزی و غربی استان را به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهد (Ahmadi-Molaverdi et al., 2022). بررسی‌های انجام‌شده با استفاده از مدل HYSPLIT، تصاویر

در این بخش و شکل‌های ۷ و ۸ به بررسی فرایند شکل‌گیری و گسترش طوفان گردوغبار در استان ایلام می‌پردازد، که از طریق ترکیب مدل‌سازی مسیرهای جوی و تحلیل تصاویر ماهواره‌ای صورت گرفته است. این شکل شامل سه بخش اصلی: نقشه مسیرهای انتقال جوی، نقشه فراوانی مسیرهای جوی و تصویر واقعی ماهواره‌ای (MODIS (Corrected Reflectance)، است. این تحلیل به‌منظور تعیین کانون‌های اصلی تولید گردوغبار، مسیرهای انتقال بین‌منطقه‌ای و ارزیابی شدت تأثیرپذیری استان ایلام از این پدیده انجام گرفته است. تجمیع این اطلاعات امکان درک بهتری از الگوهای حرکتی گردوغبار و منابع غالب آن در منطقه را فراهم می‌سازد.

گردوغبار شماره ۱: شکل ۷ مسیر انتقال گردوغبار و نقشه فراوانی وقوع آن را در تاریخ ۲۶ فروردین ۱۴۰۴ (برابر با ۱۵ آوریل ۲۰۲۵) برای ایستگاه دهلران به تصویر می‌کشد. نتایج مدل نشان داد که منشأ غالب گردوغبار از نواحی خشک و بیابانی کشور عراق، به‌ویژه مناطق غربی آن کشور، بوده که به‌عنوان یکی از کانون‌های اصلی تولید گردوغبار در منطقه شناخته می‌شود. بر اساس مسیرهای شبیه‌سازی‌شده، توده گردوغبار حدود ساعت ۱۱:۰۰ به مناطق مرزی غرب استان ایلام رسیده و سپس تا حوالی ساعت ۱۲:۰۰ ظهر، به ایستگاه دهلران نفوذ کرده است.

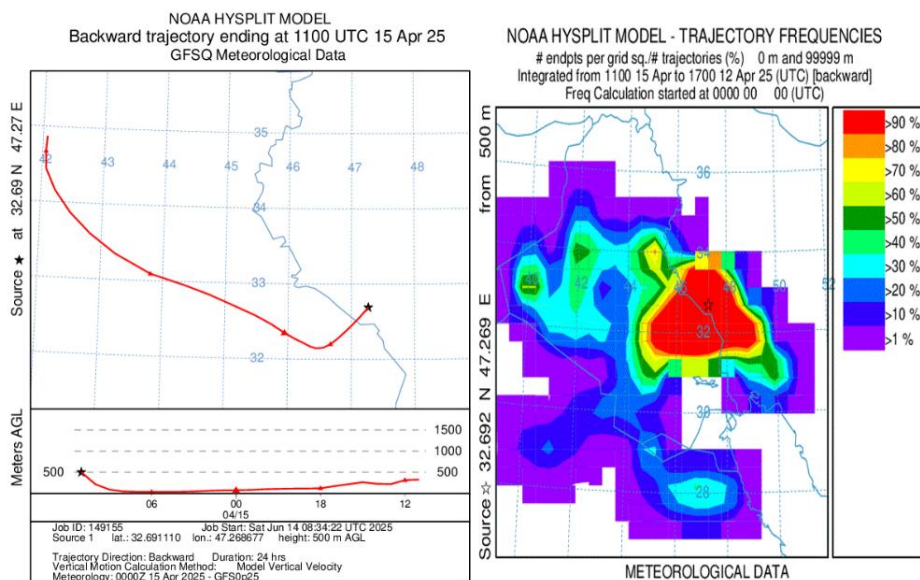
بررسی ساختار عمودی جریان هوا نشان می‌دهد که ذرات گردوغبار در آغاز حرکت خود در ارتفاع حدود ۵۰۰ متر از سطح زمین قرار داشته‌اند. با نزدیک شدن به مرز ایران و ورود به استان ایلام، کاهش تدریجی ارتفاع جریان مشاهده می‌شود که منجر به نفوذ ذرات به سطوح پایین‌تر و تأثیر مستقیم بر کیفیت هوای سطحی شده است. این ویژگی از منظر دینامیک جو، نشان‌دهنده شرایط ناپایداری مرزی و امکان رخنه جریان به لایه مرزی سیاره‌ای (PBL) است که منجر به افزایش تراکم آلاینده‌ها در سطح زمین می‌شود.

نقشه فراوانی گردوغبار حاصل از مدل HYSPLIT نشان می‌دهد که بیش از ۹۰ درصد از مسیرهای تکرارشونده مربوط به این روز خاص، از مناطق مرزی میان عراق و ایران عبور کرده‌اند، که با رنگ قرمز مشخص شده است. این تمرکز بالا در منطقه مرزی،

پژوهش با استفاده از تصاویر ماهواره MODIS، شاخص حرارتی-مادون قرمز گردوغبار (TDI) و مدل مسیریابی HYSPLIT طی ۲۱ روز گردوغباری در بازه زمانی ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۳، نقاط منبع گردوغبار مشخص شدند. نتایج نشان داد که این نقاط (در مجموع ۲۳۵ نقطه) عمدتاً در مناطق مهران، دهلران و ابو قویر متمرکز هستند که شامل مراتع فقیر و اراضی کشاورزی با ذخایر فراوان رسوبات آبرفتی هستند.

مطالعه حاضر با یافته‌های Ahmadi-Molaverdi et al., (2022)، هم‌راستا است. با این حال، پژوهش حاضر علاوه بر به‌روزرسانی داده‌ها با بازه زمانی چند سال اخیر، از مجموعه شاخص‌های متنوع و چندمنبعی بهره برده است که دقت و گستره تحلیل را نسبت به مطالعه پیشین افزایش می‌دهد.

ماهواره‌های MODIS و داده‌های سنجنده TROPOMI مستقر بر ماهواره Sentinel-5P به‌وضوح نشان داد که بیابان‌های واقع در نواحی مرزی سوریه و عراق نقش محوری در انتشار و انتقال گردوغبار به استان ایلام دارند. این مناطق بیابانی به‌عنوان منابع فعال گردوغبار، تحت تأثیر الگوهای جوی و سامانه‌های سینوپتیکی، حجم قابل‌توجهی از ذرات معلق را به سمت غرب و جنوب غربی ایران، به‌ویژه استان ایلام، هدایت می‌کنند. همچنین، تأثیرات بادهای محلی و ویژگی‌های توپوگرافی خاص منطقه، در ماندگاری و تشدید پدیده گردوغبار نقش بسزایی ایفا می‌کنند. در سال‌های گذشته، مطالعاتی پیرامون پدیده گردوغبار در استان ایلام انجام شده است، از جمله، Ahmadi-Molaverdi et al., (2022)، در مطالعه‌ای به شناسایی مهم‌ترین مناطق تولید گردوغبار در استان ایلام پرداختند. در این



شکل ۷- ردیابی طوفان گرد و غبار شماره ۱ با استفاده از مدل HYSPLIT (مسیرهای عقبگرد)، نقشه فراوانی مسیرهای جوی و نقشه مسیرهای جوی

Fig. 8. Tracking of Dust No.1 using HYSPLIT model (backward), trajectory frequencies map and trajectory map

ترکیب چندمنبعی و استفاده از شاخص‌های متنوع، تحلیل و آشکارسازی دقیق‌تر و مستندتری از منشأ و مسیر انتقال گردوغبار نسبت به مطالعه Ahmadi-Molaverdi et al., (2022)، فراهم کرده است و تصویری جامع‌تر از پراکنش گردوغبار در استان ایلام ارائه می‌دهد.

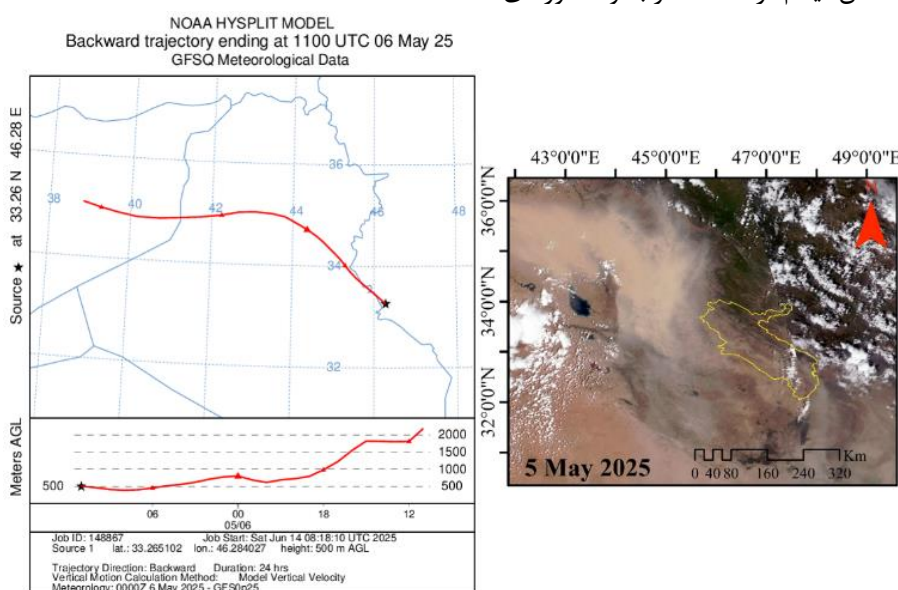
Amarloei et al., (2022)، غلظت ذرات معلق (PM10 و PM2.5) و گونه‌های باکتریایی هوای شهر

در این تحقیق، شاخص‌های AOD، AAI، NDDI و DECM از داده‌های ماهواره‌های MODIS و Sentinel-5P به‌کار گرفته شده‌اند. این شاخص‌ها امکان پایش همزمان شدت، تراکم و پراکنش زمانی-مکانی گردوغبار را فراهم کرده‌اند. علاوه بر این، مدل مسیریابی HYSPLIT (تصاویر واقعی Corrected) و Reflectance – True Color) برای بررسی مسیرها و شبیه‌سازی‌های دیداری مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این

همسایه است. با این حال، پژوهش حاضر با بهره‌گیری از مدل مسیریابی HYSPLIT و تصاویر واقعی MODIS (Corrected Reflectance – True Color) تحلیل دقیق‌تری از مسیر و منشأ گردوغبار ارائه می‌دهد.

علاوه بر این، استفاده از مجموعه شاخص‌های متنوع شامل شاخص‌های AAI، AOD، NDDI و DECM، امکان پایش دقیق‌تر مکانی و زمانی شدت و تراکم گردوغبار را فراهم کرده است. این رویکرد چندمنبعی و جامع، اعتبار و قدرت تحلیل مطالعه حاضر را نسبت به مطالعه (Amarloei et al., 2022)، افزایش داده است.

ایلام را در روزهای گردوغباری و غیرگردوغباری بررسی کردند. نتایج نشان داد تعداد رویدادهای گردوغبار در ماه‌های گرم و خشک بیشتر بوده و افزایش ذرات معلق با افزایش تعداد کلنی‌های باکتریایی همراه است. گونه‌های باکتری غالب متنوع بودند و جهت اصلی گردوغبار از سمت غرب استان و کشورهای همسایه بود. این مطالعه نقش مهم گردوغبار در تغییر ویژگی‌های میکروبی هوای محیط را تأیید کرد. یافته‌های مطالعه حاضر با نتایج (Amarloei et al., 2022)، هم‌راستا است؛ همان‌طور که آنها گزارش کردند، جهت غالب ورود گردوغبار به استان ایلام از سمت غرب و کشورهای



شکل ۸- 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

Fig. 8. Tracking of Dust No. 2 using HYSPLIT Model (Backward), Trajectory Frequencies Map, Trajectory Map, MODIS True Color Dust Particle

این مطالعه می‌تواند در پیشگیری و کنترل گردوغبار موثر باشد. مطالعه (Ranjbar et al., 2019)، عمدتاً به شناسایی منابع داخلی گردوغبار در استان ایلام متمرکز بود و تمرکز اصلی آن بر بخش‌های غربی استان قرار داشت. در مقابل، پژوهش حاضر علاوه بر بازه زمانی به‌روزتر (۲۰۲۰ تا ۲۰۲۴)، تحلیل گسترده‌تری از کل استان ارائه می‌دهد و با استفاده از شاخص‌های مختلف گردوغباری، نواحی مستعد آلودگی گردوغبار را به‌طور دقیق‌تر شناسایی کرده است. همچنین، این مطالعه با در نظر گرفتن منابع خارجی گردوغبار و بهره‌گیری از مدل مسیریابی HYSPLIT برای رهگیری توده‌های گردوغبار ورودی، توانسته است تصویر جامع‌تری از

(Ranjbar et al., 2019)، با هدف شناسایی منابع

بحرانی گردوغبار در استان ایلام، ابتدا داده‌های اقلیمی بلندمدت، پوشش گیاهی و ویژگی‌های فیزیوشناسی منطقه را جمع‌آوری کردند. سپس نمونه‌برداری خاک در عمق صفر تا ۳۰ سانتی‌متر انجام و آنالیزهای شیمیایی و فیزیکی صورت گرفت. با استفاده از مدل USEPA و ادغام نقشه‌های خاک و اقلیم، نقاط بحرانی و بسیار بحرانی گردوغبار شناسایی شدند. نتایج نشان داد، مناطق بهرام‌آباد مهران و ابوغریب و ابوگوییر در موسیان دهلران به‌عنوان منابع اصلی گردوغبار در استان ایلام هستند.

تمرکز مکانی آن عمدتاً در نواحی مرزی استان ثابت مانده است. شاخص AAI نیز از میانگین ۰/۲۸ در سال ۲۰۲۰ به بیش از ۱/۳ در سال ۲۰۲۲ رسید و در سال‌های ۲۰۲۳ و ۲۰۲۴ به ۰/۸۷ و ۰/۸۶ کاهش یافت، اما همچنان در محدوده ناسالم باقی ماند. مقادیر شاخص AOD در سال ۲۰۲۲ در مناطق مرزی از ۱/۸۵ فراتر رفت و شاخص NDDI در سال ۲۰۲۱ به بیشینه ۰/۹ رسید که بیشترین میزان تهنشست گردوغبار را نشان می‌دهد و در سال‌های بعد کاهش نسبی تا ۰/۵۴-۰/۴ داشت. مدل مسیریابی HYSPLIT منشأ خارجی گردوغبار را به‌طور دقیق مشخص کرد: رخداد اول در ۲۶ فروردین ۱۴۰۴ (۱۵ آوریل ۲۰۲۵) منشأ غرب عراق داشت و مسیر توده گردوغبار از ارتفاع ۵۰۰ متر شروع و تا ۲۰۰ متر کاهش یافت؛ شاخص AQI در دهلران به ۵۰۰ رسید.

رخداد دوم در چهار خرداد ۱۴۰۴ (۲۵ می ۲۰۲۵) منشأ شرق سوریه داشت که با عبور از خاک عراق به ایلام رسید، جریان گردوغبار از ارتفاع ۲۰۰۰ متر آغاز و به ۵۰۰ متر کاهش یافت و بیش از ۹۴ درصد مسیرها از خاک سوریه و ۹۰ درصد از خاک عراق عبور کردند؛ AQI در مهران نیز به ۵۰۰ رسید. تصاویر MODIS Corrected Reflectance حضور بصری توده گردوغبار و همسویی آن با نتایج مدل را تأیید کرد. این نتایج نشان می‌دهد که گردوغبار در استان ایلام از نظر فراوانی، شدت، دامنه نفوذ و تمرکز مکانی تهدیدآمیز است و عمدتاً از کانون‌های خارجی در خاک عراق و سوریه تغذیه می‌شود. استمرار این روند می‌تواند بحران زیست‌محیطی و تهدید سلامت عمومی در نواحی غربی ایران را تشدید کند. از این رو، تدوین و اجرای سیاست‌های کنترلی شامل احیای پوشش گیاهی بومی، استفاده از مالچ‌های زیستی، مرطوب‌سازی اراضی، احداث کمربندهای سبز مرزی و توسعه همکاری‌های منطقه‌ای ضروری است.

همچنین، بهره‌گیری از داده‌های ماهواره‌ای با قدرت تفکیک زمانی و مکانی بالا و مدل‌های عددی مسیریابی نظیر HYSPLIT ابزار مؤثری برای هشدار سریع و مدیریت پایدار گردوغبار فراهم می‌کند.

منشأ و مسیر انتقال گردوغبار در استان ارائه دهد که برتری و دقت تحلیل آن نسبت به مطالعه رنجبر و همکاران را نشان می‌دهد.

(Ehtemae et al., 2023). با نمونه‌برداری از گردوغبار خیابانی در شهر ایلام، ریسک‌های بهداشتی و اکولوژیکی ناشی از فلزات سنگین و هیدروکربن‌های چندحلقه‌ای آروماتیک (PAHs) را بررسی کرد. نتایج نشان داد که اکثر نمونه‌ها دارای سطوح بالای آلودگی فلزات سنگین بوده و برخی فلزات منشأ انسانی داشتند، در حالی که برخی دیگر طبیعی بودند. غلظت PAHs نیز در محدوده بالا گزارش شد و تحلیل‌های ریسک حاکی از احتمال خطر بالا برای سلامت انسان و اکوسیستم بود. این مطالعه عمدتاً بر منابع آلودگی داخلی و ترکیب شیمیایی ذرات گردوغبار متمرکز بود و به ورود گردوغبار خارجی اشاره‌ای نکرده است.

در مقایسه، پژوهش حاضر علاوه بر تحلیل مکانی-زمانی گردوغبار و شناسایی آلوده‌ترین نقاط، منشأ گردوغبار برون‌مرزی و مسیرهای ورود آن به استان ایلام را نیز بررسی کرده و با استفاده از داده‌های MODIS و Sentinel-5P و مدل HYSPLIT تحلیل‌های جامع‌تری ارائه می‌دهد. به‌طور کلی، مقایسه با مطالعات پیشین نشان می‌دهد که پژوهش حاضر با بهره‌گیری از داده‌های چندمنبعی، شاخص‌های متنوع و مدل مسیریابی HYSPLIT، تحلیل جامع‌تری از منشأ، مسیر و پراکنش گردوغبار در استان ایلام ارائه کرده و شکاف مطالعات گذشته در بررسی منابع داخلی و خارجی گردوغبار را پر می‌کند.

نتیجه‌گیری

پدیده گردوغبار در استان ایلام طی سال‌های اخیر به یکی از چالش‌های مهم زیست‌محیطی، بهداشتی و اقتصادی تبدیل شده است. هم‌جواری با کانون‌های فعال گردوغبار در خاک عراق و سوریه، شرایط اقلیمی نیمه‌خشک، تخریب پوشش گیاهی و کاهش منابع آبی، از عوامل اصلی تشدید این بحران هستند. تحلیل شاخص DECM نشان داد که تعداد روزهای گردوغبار از ۳۰ روز در سال ۲۰۲۰ به بیش از ۲۰۰ روز در سال ۲۰۲۲ افزایش یافته و در سال‌های ۲۰۲۳ و ۲۰۲۴ به ترتیب به ۱۸۲ و ۱۷۲ روز کاهش یافت، در حالی که

تشکر و قدردانی

با کمال احترام و امتنان، از دانشگاه افسری امام علی (ع) به‌واسطه حمایت‌های ارزنده و پشتیبانی‌های معنوی صمیمانه تقدیر و تشکر می‌نمایم.

تعارض منافع

در این مقاله تضاد منافی وجود ندارد و این مساله مورد تایید همه نویسندگان است.

منابع مورد استفاده

- Ahmadi-Molaverdi, M., Jabbari, I., Fathnia, A., 2022. Geomorphological and spatial analysis of dust sources in Ilam Province, Iran. *Sediment. Geol.* 436, 106168 (in Persian).
- Amarloei, A., Fazlzadeh, M., Jonidi Jafari, A., Zarei, A., Mazloomi, S., 2020. Particulate matters and bioaerosols during Middle East dust storms events in Ilam, Iran. *Microchem. J.* 152, 104280 (in Persian).
- Baharvand, P., Amoatey, P., Omidic Khaniabadi, Y., Sicard, P., Naqvi, H.R., Rashidi, R., 2025. Short-term exposure to PM2.5 pollution in Iran and related burden diseases. *Int. J. Environ. Health Res.* 1-14 (in Persian).
- 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 Air Quality Res.* <https://doi.org/10.4209/aaqr.220309>
- Copernicus Programme., 2018. Sentinel-5P: Monitoring air pollution and climate. European Commission. Retrieved from <https://www.copernicus.eu/en/copernicus-services/atmosphere/sentinel-5p>
- Dargahian, F., Mousivand, Y., Razavizadeh, S., Lotfinasabasl, S., 2023. Identifying dust sources affecting southwestern Iran (Khuzestan Province) using remote sensing techniques and HYSPLIT model. *J. Indian Society Remote Sens.* 51(1), 565-583 (in Persian).
- Darvishi Bolorani, A., Najafi, M.S., Soleimani, M., Papi, R., Torabi, O., 2022. Influence of Hamoun Lakes' dry conditions on dust emission and radiative forcing over Sistan plain, Iran. *Atmosph. Res.* 272, 320-33 (in Persian).
- Ehtemae, N., Ghanavati, N., Nazarpour, A., Babaeinejad, T., Watts, M.J., 2023. Status, source, and risk assessment of heavy metal(oid)s and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the street dust of Ilam, Iran. *Environ. Monito. Assess.* Advance online publication. <https://doi.org/10.1080/10406638.2023.2276864>
- Ghazal, N., 2020. Monitoring dust storm using Normalized Difference Dust Index (NDDI) and brightness temperature variation in semi-arid areas over Iraq. *Iraqi J. Physic.* 18(45), 68-75. <https://doi.org/10.30723/ijp.v18i45.517>
- Gong, H., Li, Y., Zhang, J., Zhang, B., Wang, X., 2024. A new filter feature selection algorithm for classification task by ensembling Pearson correlation coefficient and mutual information. *Engin. Applica. Artificial Intelli.* 131, 107865. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.107865>
- 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 Res.* 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. *J. Nat. Environ. Hazard.* 13(42), 71-90. <https://doi.org/10.22111/jneh.2024.47555.2014>
- Khanfari, V., Asgari, H.M., Dadollahi-Sohrab, A., 2024. Forecasting wetland transformation to dust source by employing CA-Markov model and remote sensing: A case study of Shadegan International Wetland. *Wetlands* 44(96). <https://doi.org/10.1007/s13157-024-01856-x>
- Miri, A., Maleki, S., Middleton, N., 2021. An investigation into climatic and terrestrial drivers of dust storms in the Sistan region of Iran in the early twenty-first century. *Sci. Total Environ.* 757, 143952. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143952>
- 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/>
- Peshev, Z., Chaikovskiy, A., Evgenieva, T., Pescherenkov, V., Vulkova, L., Deleva, A., Dreischuh, T., 2023. Combined characterization of airborne Saharan dust above Sofia, Bulgaria, during blocking-pattern conditioned dust episode in February 2021. *Remote Sens.* 15(15), 3833. <https://doi.org/10.3390/rs15153833>
- Pourhashemi, S., 2024. Preparing a map of the sensitivity of the lands of Ilam province to dust production using data mining models. *Environ. Erosion Res.* 14(3), 83-101. <https://doi.org/10.61186/jeer.14.3.83>

- Qor-el-aïne, A., Béres, A., Gécz, G., 2022. Dust storm simulation over the Sahara Desert (Moroccan and Mauritanian regions) using HYSPLIT. *Atmospheric Sci. Letter.* 23(4), e1076. <https://doi.org/10.1002/asl.1076>
- Ranjbar, H., Bazgir, M., Namdar Khojasteh, D., Rostaminia, M., 2019. Identification of dust sources in Ilam province. *Iran. J. Range Desert Res.* 26(3), 675–687. DOI: 10.22092/ijrdr.2019.120016
- Rolph, G., Stein, A., Stunder, B., 2017. Real-time environmental applications and display system: READY. *Environ. Model. Soft.* 95, 210–228. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.025>
- Tang, F., Wang, W., Si, F., Zhou, H., Luo, Y., Qian, Y., 2022. Successful derivation of absorbing aerosol index from the Environmental Trace Gases Monitoring Instrument (EMI). *Remote Sens.* 14(16), 4105. <https://doi.org/10.3390/rs14164105>
- Varga, G., Meinander, O., Rostási, Á., Dagsson-Waldhauserová, P., Csávic, A., Gresina, F., 2023. Saharan, Aral-Caspian and Middle East dust travels to Finland (1980–2022). *Environ. Int.* 180, 108243. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.108243>
- Vatanparast Ghaleh Juq, F., Salah, B., Zeinali, B., 2024. Monitoring temporal-spatial changes of atmospheric suspended dust in selected provinces of the western half of Iran using MODIS and sentinel-5 images. *Geograph. Environ. Plan.* 35(3), 113-128. doi: 10.22108/gep.2024.140621.1635
- 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. *Atmosph.* 14(1), 3. <https://doi.org/10.3390/atmos14010003>
- Wu, Z., Jiang, Q., Yu, Y., Xiao, H., Freese, D., 2022. Spatio-temporal evolution of a typical sandstorm event in an arid area of northwest China in April 2018 based on remote sensing data. *Remote Sens.* 14(13), 112–125. <https://doi.org/10.3390/rs14133065>
- Yousefi kebriya, A., Nadi, M., Yousefi Kebriya, H., 2025. Analysis of the Impact of Agricultural Fires on Air Quality in Mazandaran Province Using Satellite Data. *Climate Change Res.* doi: 10.30488/ccr.2025.492951.1260
- 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. *Iran. J. Energy Environ.* 16(2), 372–388. <https://doi.org/10.5829/ijee.2025.16.02.17>
- Yousefi Kebriya, A., Nadi, M., Ghanbari Parmehr, E., Sun, Z., 2024. Assessment of some environmental stresses in the Shadegan wetland: Analysis of satellite data, water quality indicators, and dust storm pathways. *Iran. J. Energy Environ.* 16(2), 372–388. <https://doi.org/10.5829/ijee.2025.16.02.17>
- Yousefi kebriya, A., Nadi, M., Ghanbariparmehr, E., Zhongchang, S., 2024. Modeling and forecasting dust pollution using satellite data and machine learning techniques: a case study of Ahvaz). *J. Agricul. Meteorol.* doi: 10.22125/agmj.2024.478677.1174
- Yousefi-Kebriya, A., Nadi, M., Afaridegan, E., Sun, Z., 2025. Wetland shrinking and dust pollution in Khuzestan, Iran: Insights from Sentinel-5 and MODIS satellites. *Scienti. Rep.* 15, Article 13626. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-96935-2>