



Golestan University



Journal of the Climate Change Research

Scientific Journal of Golestan University
Vol. 7, No. 25, Spring 2026



Spatio-Temporal Analysis and Source Identification of Dust Pollution in Kurdistan Province Using Satellite-Derived Indices and HYSPLIT Model (2018–2024)

Kamiyab Tayebi¹, Mehdi Nadi^{2*}, Alireza Yousefi Kebriya³

¹ MSc, Department of Water Engineering, Agricultural Meteorology, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran, Email: kamyabtayyebibt@gmail.com

² (Corresponding author) Associate Professor, Department of Water Engineering, Agricultural Meteorology, Faculty of Agricultural Engineering, Sari Agricultural Sciences and Natural Resources University, Sari, Iran, Email: Mehdi.nadi@gmail.com

³ PhD in Agricultural Meteorology, Faculty of Agricultural Engineering, University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Sari, Iran. Email: alirezau3fikrbriya@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 2025-12-11
Accepted: 2026-2-25

Keywords:
AOD Index
AOD-Sum
AAI
DECM
Remote Sensing

ABSTRACT

Dust storms are among the most significant environmental challenges in Kurdistan Province, exerting widespread impacts on air quality and public health. This study was conducted using MODIS and Sentinel-5P satellite data and the AOD, AAI, AOD-Sum, and DECM indices over the period 2018–2024. Data processing was performed in the GEE environment, and dust transport pathways were simulated using the HYSPLIT model. Wind speed data from the ECMWF model were employed to assess the role of wind in dust dispersion. The mean AOD varied between 0.25 and 0.31, with maximum values recorded in 2018 and 2022 at 0.31 and 0.29, respectively. The AAI increased from 0.01 in 2020 to 0.67 in 2022 and then decreased to 0.41 in 2024. The cumulative AOD-Sum index indicated more than 70 dusty days in 2018 and 127.8 days in 2022. Similarly, the DECM index increased from fewer than 50 dust-event days in 2018 to more than 150 days in 2022, followed by a decline to 65 days in 2024. HYSPLIT model analysis revealed that the primary sources of incoming dust were the Al-Anbar deserts of Iraq, dust intrusion from Saudi Arabia, and the Sukhnah Desert in Syria. Dust particles formed at altitudes of approximately 1000–2500 m and entered Kurdistan Province after descending to below 500 m. More than 90% of the transport pathways crossed the Iran–Iraq border, with the Kurdistan and Ilam border regions identified as the main dust entry corridors. Wind speed analysis showed that winds in the eastern part of the province ranged from 3.2 to 3.4 m s⁻¹, while wind speeds in the western regions were below 1.1 m s⁻¹. The peak dust conditions in 2022 coincided with wind speeds of 3.4 m s⁻¹, confirming the direct role of strong winds in intensifying dust events. In addition, soil erosion, vegetation degradation, and the topographic characteristics of the eastern province contributed to dust intensification, indicating that dust pollution in Kurdistan Province is not solely driven by external sources and that local dust sources also play a significant role.

Cite this article: Tayebi, K., Nadi, M., Yousefi Kebriya, A.R. (2026). Spatio-Temporal Analysis and Source Identification of Dust Pollution in Kurdistan Province Using Satellite-Derived Indices and HYSPLIT Model (2018–2024). *Journal of the Climate Change research*, 7 (25), 105-140.



©The author(s)

Publisher: Golestan University

DOI: [10.30488/ccr.2026.565792.1319](https://doi.org/10.30488/ccr.2026.565792.1319)



تحلیل مکانی-زمانی و شناسایی منشاء آلودگی گردوغبار در استان کردستان با استفاده از شاخص‌های ماهواره‌ای و مدل HYSPLIT (۲۰۱۸-۲۰۲۴)

کامیاب طیبی^۱، مهدی نادی^{۲*}، علیرضا یوسفی کبری^۳

^۱ ارشد، گروه مهندسی آب، هواشناسی کشاورزی، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه: kamyabtayyebibt@gmail.com

^۲ دانشیار گروه هواشناسی کشاورزی، گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی کشاورزی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه: Mehdi.nadi@gmail.com

^۳ دکتری هواشناسی کشاورزی، دانشکده مهندسی زراعی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری، ساری، ایران. رایانامه: alirezau3fibrbriya@gmail.com

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله:</p> <p>مقاله کامل علمی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۹/۲۱</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۷</p>	<p>گردوغبار از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی استان کردستان است و تأثیر گسترده‌ای بر کیفیت هوا و سلامت دارد. این پژوهش با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای MODIS و Sentinel-5P و شاخص‌های AOD، AAI، AOD-Sum و DECM در دوره ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۴ انجام شد. داده‌ها در GEE پردازش و مسیرهای انتقال گردوغبار با مدل HYSPLIT شبیه‌سازی گردید. از داده‌های سرعت باد مدل ECMWF برای بررسی نقش باد در پراکنش گردوغبار استفاده شد. میانگین AOD بین ۰/۲۵ تا ۰/۳۱ متغیر بوده و بیشینه آن در سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۲۲ به ترتیب ۰/۳۱ و ۰/۲۹ ثبت شد. شاخص AAI از ۰/۰۱ در ۲۰۲۰ به ۰/۶۷ در ۲۰۲۲ افزایش و در ۲۰۲۴ به ۰/۴۱ کاهش یافت. شاخص AOD-Sum بیش از ۷۰ روز گردوغبار را در ۲۰۱۸ و ۱۲۸ روز را در ۲۰۲۲ نشان داد. شاخص DECM نیز از کمتر از ۵۰ روز در ۲۰۱۸ به بیش از ۱۵۰ روز در ۲۰۲۲ رسید و در ۲۰۲۴ به ۶۵ روز کاهش یافت. تحلیل مدل HYSPLIT نشان داد که منشأ اصلی گردوغبار ورودی از بیابان‌های الانبار عراق، نفوذ عربستان و بیابان سوخته سوریه است و ذرات گردوغبار در ارتفاع ۱۰۰۰ تا ۲۵۰۰ متر شکل گرفته و با کاهش ارتفاع تا زیر ۵۰۰ متر وارد کردستان شدند. بیش از ۹۰ درصد مسیرها از مرز ایران و عراق عبور کرده و مرزهای کردستان و ایلام به‌عنوان مسیرهای اصلی ورود شناسایی شدند. بررسی سرعت باد نشان داد که باد در شرق استان ۳/۲ تا ۳/۴ متر بر ثانیه و در غرب کمتر از ۱/۱ متر بر ثانیه است و اوج گردوغبار سال ۲۰۲۲ با باد ۳/۴ متر بر ثانیه همزمان شد که نقش مستقیم باد قوی در تشدید گردوغبار را تأیید می‌کند. همچنین فرسایش خاک، کاهش پوشش گیاهی و توپوگرافی شرق استان در تشدید گردوغبار مؤثر بوده‌اند و نشان می‌دهد که علاوه بر منابع خارجی، منابع محلی نیز نقش مهمی در گردوغبار دارند.</p>
<p>واژه‌های کلیدی:</p> <p>شاخص AOD</p> <p>شاخص AOD-Sum</p> <p>شاخص AAI</p> <p>شاخص DECM</p> <p>سنجش از دور</p>	

استناد: طیبی، کامیاب؛ نادی، مهدی؛ یوسفی کبری، علیرضا (۱۴۰۵). تحلیل مکانی-زمانی و شناسایی منشاء آلودگی گردوغبار در استان کردستان با استفاده از شاخص‌های ماهواره‌ای و مدل HYSPLIT (۲۰۱۸-۲۰۲۴). نشریه پژوهش‌های تغییرات آب و هوایی، ۷ (۲۵)، ۱۴۰-۱۰۵.



مقدمه

پدیده گردوغبار به‌عنوان یکی از چالش‌های زیست‌محیطی قرن بیست‌ویکم، به‌ویژه در نواحی خشک و نیمه‌خشک جهان، آثار گسترده و گاه غیرقابل بازگشتی بر جنبه‌های متنوع زندگی انسانی، سامانه‌های طبیعی و ساختارهای اقتصادی و اجتماعی برجای می‌گذارد (Peshev et al., 2023). خاستگاه اصلی این پدیده، جابجایی و پراکنش ذرات ریز خاک و مواد معلق سطحی توسط بادهای شدید در مناطق فاقد پوشش گیاهی متراکم و دارای استعداد بالای بیابان‌زایی است. عواملی همچون تخریب سرزمین، تغییرات اقلیمی، خشکسالی‌های مکرر، و مداخلات انسان‌ساز از جمله چرای مفرط و کشاورزی ناپایدار، روند وقوع و تشدید طوفان‌های گردوغبار را تسریع کرده‌اند (Darvishi Boloorani et al., 2023). این طوفان‌ها، که گاه هزاران کیلومتر جابجا می‌شوند، می‌توانند نواحی گسترده‌ای را درگیر ساخته و اثرات دامنه‌داری در سطوح مختلف به‌جا گذارند (Yousefi et al., 2025). پیامدهای این پدیده از حوزه سلامت عمومی و تنفس تا امنیت غذایی، تخریب منابع طبیعی، کاهش بهره‌وری اقتصادی و اختلال در عملکردهای زیربنایی کشورها را شامل می‌شود. آلودگی هوا، افزایش بروز بیماری‌های قلبی-ریوی، اختلال در شبکه حمل‌ونقل، کاهش دید، نابودی زیرساخت‌های شهری و روستایی، کاهش کیفیت و حاصلخیزی خاک‌های زراعی، تخریب زیستگاه‌های طبیعی و تهدید تنوع زیستی تنها بخشی از آثار ملموس آن هستند که بار مالی و اجتماعی سنگینی بر جوامع آسیب‌پذیر تحمیل می‌کنند (Zucca et al., 2022). از این‌رو، پایش مستمر، تحلیل رفتار زمانی و مکانی، و شناسایی دقیق کانون‌ها و مسیرهای گردوغبار، ضرورتی بنیادین برای برنامه‌ریزی محیط‌زیستی و طراحی سیاست‌های مقابله‌ای و سازگاری به‌شمار می‌رود. در این میان، با توجه به محدودیت‌های ساختاری و مکانی ایستگاه‌های زمینی در رصد پدیده‌های بزرگ‌مقیاس، فناوری سنسجش از دور به‌عنوان ابزاری توانمند در مطالعه پدیده‌های

جوی، نقش فزاینده‌ای در پایش و تحلیل پدیده گردوغبار ایفا می‌کند (Gong et al., 2024). تصاویر ماهواره‌ای با پوشش وسیع، به‌روزرسانی سریع و قابلیت استخراج پارامترهای کمی و کیفی جو، امکان تحلیل دینامیک گردوغبار در سطوح منطقه‌ای و جهانی را فراهم می‌کنند. ماهواره Sentinel-5P با سنجنده پیشرفته TROPOMI داده‌هایی با تفکیک مکانی و زمانی بالا برای شاخص‌هایی مانند AAI^۱، UVAI^۲ و ارتفاع لایه آئروسول (ALH) ارائه می‌دهد که اطلاعات ارزشمندی درباره نوع، غلظت و توزیع عمودی ذرات معلق در جو فراهم می‌کنند (Singh et al., 2025). همچنین، داده‌های MODIS از طریق محصولات AOD^۳ امکان تخمین بار آئروسول‌ها و پایش تغییرات زمانی و مکانی آن‌ها را فراهم می‌سازند (Smith et al., 2025). با این حال، برای شناخت کامل منشأ و مسیر حرکت ذرات، استفاده از مدل‌های انتقال جو، به‌ویژه HYSPLIT^۴ به‌عنوان ابزار معتبر رهگیری مسیر ذرات در ترازهای مختلف جو ضروری است. این مدل با استفاده از داده‌های هواشناسی جهانی و منطقه‌ای، از جمله داده‌های GDAS و NCEP اجرا می‌شود، که شامل سرعت و جهت باد، دما، فشار، رطوبت و پارامترهای عمودی جو است و قادر است با بازسازی مسیرهای پیش‌رونده و پس‌رونده ذرات، اطلاعات دقیقی در خصوص منشأ احتمالی، نحوه پراکنش و الگوهای حرکتی گردوغبار ارائه دهد (Treminio et al., 2025). ترکیب داده‌های ماهواره‌ای با شبیه‌سازی‌های مدل HYSPLIT ابزاری قدرتمند برای ردیابی و پایش دقیق گردوغبار فراهم می‌کند و برای توسعه سامانه‌های هشدار سریع و تصمیم‌گیری مدیریتی در منابع طبیعی حیاتی است (Zhang et al., 2024). در غرب کشور، استان‌های مرزی کردستان، ایلام، کرمانشاه و خوزستان به دلیل هم‌جواری با کانون‌های فعال گردوغبار در عراق، سوریه و عربستان، بیشترین

1. Absorbing Aerosol Index

2. UV Aerosol Index

3. Aerosol Optical Depth

4. Hybrid Single Particle Lagrangian Integrated Trajectory

در معرض خطر طوفان‌های فرامرزی قرار دارند. منشأ بسیاری از این رخدادهای بیابان‌های رهاشده، دشت‌های خشک‌شده و اراضی بدون مدیریت سرزمینی در کشورهای همسایه است که در فصول گرم و خشک فعال‌تر می‌شوند (Yousefi Kebriya et al., 2025). استان کردستان، به‌ویژه به دلیل موقعیت و قرارگیری در امتداد مسیر عبوری سامانه‌های غربی، پیوسته تحت تأثیر این پدیده قرار دارد. ورود توده‌های گردوغبار به این استان، نه تنها شاخص‌های کیفیت هوا را به شدت کاهش می‌دهد و زمینه‌ساز بروز مشکلات تنفسی در جمعیت انسانی می‌شود، بلکه تأثیرات منفی گسترده‌ای بر اکوسیستم‌های کشاورزی، منابع آبی، پوشش گیاهی، دامداری و امنیت زیستی منطقه دارد (Hosseini et al., 2024). در چنین شرایطی، به‌کارگیری روش‌های ترکیبی که شامل داده‌های سنجش از دور، شاخص‌های گردوغبار و مدل‌های انتقال ذرات است، رویکردی علمی و کارآمد برای تحلیل رفتار گردوغبار در استان کردستان محسوب می‌شود. شاخص‌های گردوغبار به همراه مسیرهای بازسازی‌شده توسط مدل‌ها، امکان بررسی منشأ، شدت، پراکنش مکانی و نوسانات زمانی ذرات گردوغبار را فراهم ساخته و پایه‌ای مطمئن برای درک دینامیک پیچیده این پدیده محیطی در منطقه ایجاد می‌کند. نتایج این‌گونه مطالعات می‌توانند نقش مهمی در تدوین برنامه‌های سازگاری، طراحی سامانه‌های هشدار سریع منطقه‌ای، و ارائه راهکارهای مدیریتی برای کاهش اثرات منفی طوفان‌های گردوغبار در استان‌های غربی کشور ایفا نمایند. مطالعات متعددی نیز در این زمینه صورت گرفته است از جمله، یوسفی کبریا و همکاران (۲۰۲۵) با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای Landsat، Sentinel-5 و MODIS در بازه ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۲، تغییرات مساحت تالاب‌ها و رخدادهای گردوغبار را بررسی کردند. شاخص‌های AOD و AAI با Google Earth Engine برای پایش فراوانی گردوغبار استخراج شد و شاخص NDWI برای بررسی سطح آب تالاب‌ها به کار رفت. نتایج نشان داد در سال‌های ۲۰۱۰، ۲۰۱۱، ۲۰۲۱ و ۲۰۲۲ تالاب‌ها

خشک‌ترین وضعیت را داشته و همبستگی منفی قوی بین مساحت تالاب و رخدادهای گردوغبار مشاهده شد. کاهش مساحت تالاب‌ها با افزایش روزهای آلوده PM10 و PM2.5 همراه بود. تحلیل شاخص‌های AOD و AAI تأکید می‌کند که کاهش سطح آب تالاب‌ها با افزایش غلظت ذرات معلق و شدت رخدادهای گردوغبار رابطه مستقیم دارد و این شاخص‌ها در بررسی گردوغبار نقش به‌سزایی دارد. یوسفی کبریا و همکاران (۲۰۲۵) با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در بازه ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳، کیفیت آب، سطح تالاب و تأثیر گردوغبار بر تالاب‌شادگان را بررسی کردند. نتایج نشان داد دمای آب و کدوری تالاب در برخی سال‌ها افزایش یافته و کاهش سطح آب در سال‌های ۲۰۱۸، ۲۰۲۱ و ۲۰۲۲ مشهود بود. تعداد روزهای گردوغبار در سال ۲۰۲۲ در نواحی شمالی بیش از ۲۱۴ روز و در نواحی جنوبی و جنوب‌شرقی بیش از ۱۴۶ روز ثبت شد. تحلیل مسیرهای گردوغبار با مدل HYSPLIT نشان داد که مناطق خشک‌شده تالاب منشأ اصلی گردوغبار بوده و تأثیر آن بر استان خوزستان و نواحی غربی و جنوب‌غربی ایران برجسته است، که اهمیت استفاده از HYSPLIT را در تحلیل منشأ و پراکنش گردوغبار تأکید می‌کند. در پژوهشی با استفاده از مدل HYSPLIT به تجزیه و تحلیل مسیرهای طوفان‌های گردوغبار در مرکز آریزونا پرداختند و نشان دادند که این طوفان‌ها اغلب از مناطق جنوبی منشأ می‌گیرند و غلظت‌های بالای ذرات را از جنوب غربی حمل می‌کنند (White et al., 2023). در یک پژوهش، انتقال طوفان‌های گردوغبار از مناطق خشک به شمال فنلاند با استفاده از داده‌های چگالی جرم ستون گردوغبار مدل MERRA-2 بررسی شد و ۸۶ رخداد گردوغبار طی دوره ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۲ شناسایی گردید. نتایج نشان داد که منابع اصلی گردوغبار شامل نواحی صحرایی، آرال-خزر و مناطق میانه شرقی بوده و فراوانی سالانه رخدادهای چهار نوسانات قابل توجهی شده است. بیشترین تعداد رخدادهای فصل بهار مشاهده شد، در حالی که افزایش رخدادهای زمستانی

با ۲۴,۹ روز بود، با بیشینه ۴۵,۵۱ روز در تابستان در ایستگاه زابل. گردوغبار دو فاز حداکثری بهاره و تابستانه دارد و با ارتفاع و عرض جغرافیایی رابطه معکوس دارد. سه عامل اصلی تولید گردوغبار شامل پارامترهای جوی، خشک شدن رودخانه‌ها و دریاچه‌ها و تغییرات کاربری اراضی شناخته شدند. تحلیل داده‌های ماهواره‌ای و ایستگاهی کانون‌های اصلی گردوغبار را در سواحل مکران، بستر خشک شده دریاچه‌های هامون و جازموریان، دشت لوت و مناطق مرزی ایران، افغانستان و پاکستان نشان داد. عرب عامری و همکاران (۱۴۰۲) رخدادهای گردوغبار استان گلستان را طی بازه ۲۰۱۳-۲۰۲۲ با استفاده از داده‌های روزانه ۸ ایستگاه سینوپتیک تحلیل کردند. نتایج نشان داد منطقه اینچه‌برون و مراوه‌تپه بیشترین میانگین گردوغبار سالانه (حدود ۸ روز) را دارند و بیشترین وقوع گردوغبار در ماه‌های می، ژوئن و ژوئیه و کمترین آن در نوامبر و دسامبر است. درصد روزهای گردوغبار با منشأ فرامحلی و محلی به ترتیب ۷۳/۷۹٪ و ۲۶/۲۱٪ بوده و بیش از ۷۹٪ از رخدادهای هر دو گروه بین ساعات ۹:۳۰ تا ۱۸:۳۰ به وقت محلی اتفاق افتاده‌اند. آنالیز تداوم رخدادهای نشان داد اکثریت طوفان‌ها دارای مدت ۱ تا ۲ روزه هستند. در پژوهشی در سال ۲۰۱۸ در شمال غربی چین، منابع آلودگی آئروسول و خواص نوری آن‌ها با استفاده از داده‌های زمینی و دورسنجی شامل MODIS، OMI و CALIPSO بررسی شد. مدل HYSPLIT برای شبیه‌سازی مسیریهای جریان هوایی و تحلیل جابه‌جایی گردوغبار به کار گرفته شد. نتایج نشان داد غلظت PM10 بیش از ۴۰۰ میکروگرم بر متر مکعب بوده و نسبت PM2.5/PM10 کمتر از ۰/۶ است، که نشان‌دهنده آلودگی طبیعی ذرات معلق است. منابع اصلی گردوغبار بیابان تاکلیماکان بودند و بررسی حساسیت فرسایش بادی نشان داد بیابان‌زایی و مناطق بیابانی از مهم‌ترین مناطق حساس اکتولوژیکی منطقه محسوب می‌شوند (Wu et al., 2022). در پژوهشی دیگر، رخداد شدید گردوغبار صحرائی در ژوئن ۲۰۲۰ در مناطق مراکش و موریتانی با استفاده از مدل

در سال‌های اخیر به تغییرات گردش جو و نقش فعالیت‌های انسانی نسبت داده شده است (Varga et al., 2023). حسینی و همکاران (۱۴۰۳) با استفاده از داده‌های روزانه گردوغبار ۱۰ ایستگاه سینوپتیک استان کردستان طی بازه ۲۰ ساله (۱۳۸۰-۱۴۰۰) و تحلیل عاملی، هفت مؤلفه اصلی را شناسایی کردند که دو عامل نخست به ترتیب ۶۸ و ۱۳,۴۵ درصد واریانس داده‌ها را توضیح دادند. شاخص AOD حاصل از سنجنده MODIS با Google Earth Engine تحلیل و روند آن با آزمون من-کندال بررسی شد و شاخص موران الگوی خوشه‌ای پراکنش گردوغبار را تأیید کرد. نتایج نشان داد ماه‌های فروردین تا شهریور بیشترین فراوانی گردوغبار را داشته و در نیمه شرقی استان روند AOD افزایشی و در نیمه غربی روند کاهشی بوده است. بیشترین تراکم گردوغبار در تابستان، به ویژه تیر و مرداد، با استقرار پرفشار آזור مرتبط بود و در سال‌های اخیر گستره وسیع‌تری از استان روند افزایشی غلظت گردوغبار را تجربه کرده است. رنجبر فردویی و ابراهیمی خوسفی (۱۴۰۳) با استفاده از داده‌های ۱۱ ایستگاه استان کرمان (۲۰۰۲-۲۰۲۰) سهم منابع داخلی و خارجی گردوغبار را تعیین کردند. نتایج نشان داد سهم گردوغبار خارجی در جیرفت، انار و سیرجان به ترتیب ۸۰٪، ۵۳/۸٪ و ۵۳/۲٪ و سهم گردوغبار داخلی در شهر بابک، رفسنجان، شهداد و بافت بیش از ۷۳٪ و در زرنند، کرمان، بم و کهنوج بیش از ۵۲٪ بود. به‌طور میانگین، سهم داخلی ۶۰/۶٪ و خارجی ۳۹/۴٪ برآورد شد. مناطق بم و جیرفت به‌عنوان نواحی حساس به فرسایش بادی شناسایی شدند و روند افزایشی معناداری برای گردوغبار داخلی در کهنوج، رفسنجان و انار و گردوغبار خارجی در سیرجان ثبت شد. جهانبخش و همکاران (۱۴۰۳) توزیع زمانی-مکانی گردوغبار فصلی در شرق و جنوب‌شرق ایران را با استفاده از داده‌های ۱۵ ایستگاه سینوپتیک (۲۰۱۵-۱۹۸۰) و شاخص‌های AOD ماهواره MODIS و AAI ماهواره OMI (۲۰۱۵-۲۰۰۵) بررسی کردند. روند روزهای گردوغبار با آزمون ناپارامتریک من-کندال ارزیابی شد و متوسط آن برابر

استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای MODIS، استفاده همزمان از مدل‌های عددی انتقال ذرات نظیر HYSPLIT برای رهگیری و تحلیل مسیر حرکت توده‌های گردوغبار، در کنار به‌کارگیری شاخص‌های نوین سنجش از دور مانند AAI (شاخص جذب آئروسول) و ^۱DECM (نقشه شمارش رخدادهای گردوغبار) استخراج شده از داده‌های Sentinel-5، در مطالعات انجام شده در استان کردستان کمتر مورد توجه قرار گرفته است. افزون بر این، با وجود قرارگیری استان کردستان در یکی از مهم‌ترین کانون‌های تحت تأثیر توده‌های گردوغبار ورودی از غرب کشور، مطالعات جامع مبتنی بر رویکردهای تلفیقی و چندمنبعی در این منطقه همچنان محدود باقی مانده‌اند. بر همین اساس، پژوهش حاضر با هدف پر کردن این خلأ علمی، با بهره‌گیری همزمان از داده‌های ماهواره‌ای MODIS و Sentinel-5 طی دوره زمانی ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۴، به تحلیل الگوی زمانی و مکانی گسترش گردوغبار در سطح کل استان کردستان پرداخته است. در این راستا، از مدل انتقال ذرات HYSPLIT به منظور شبیه‌سازی مسیرهای حرکتی و تحلیل فراوانی عبور توده‌های گردوغبار از بخش‌های مختلف استان استفاده شده و همچنین میانگین سرعت باد با اتکا به داده‌های مدل ^۲ECMWF استخراج و تحلیل گردیده است. در ادامه، با استفاده از بستر GEE شاخص‌های AOD، AAI، AOD-Sum و DECM استخراج و مورد تحلیل قرار گرفته‌اند تا نواحی منشأ، شدت پراکندگی و تکرار وقوع رخدادهای گردوغبار با دقت بالا شناسایی شوند. این چارچوب تحلیلی تلفیقی، ضمن ارائه تصویری چندبعدی از رفتار گردوغبار، زمینه‌ساز درک عمیق‌تر از فرایندهای مکانی و زمانی این پدیده در منطقه‌ای کمتر مطالعه شده مانند استان کردستان بوده و می‌تواند نقش کلیدی در ارائه راهکارهای علمی برای پیش‌بینی، مدیریت و کاهش اثرات زیست‌محیطی گردوغبار ایفا کند.

HYSPLIT و تحلیل خوشه‌ای بررسی شد. نتایج نشان داد که این طوفان موجب افزایش معنی‌دار غلظت PM10 در مناطق مرکزی این کشورها شده و انتقال بلندبرد ذرات تا دریای کارائیب، خلیج مکزیک و حتی جنوب ایالات متحده نیز اثرات قابل توجهی بر کیفیت هوا در این مناطق برجای گذاشته است (Qor-el-aine et al., 2021). شایسته و غریبی (۱۴۰۱) کانون‌های تولید گردوغبار در استان همدان و مناطق تحت تأثیر آن را شناسایی کردند. در این پژوهش از تصاویر MODIS به مدت ۱۲ سال و Sentinel-5 طی ۲ سال و سامانه Google Earth Engine برای پردازش داده‌ها استفاده شد. پارامترهای کاربری اراضی، شاخص خاک لخت و شاخص توده آب به منظور شناسایی و پایش کانون‌های گردوغبار به کار رفتند. نتایج نشان داد مساحت پهنه‌های با غلظت بالای آئروسول در MODIS و Sentinel-5 به ترتیب ۹۸۷۵ و ۷۱۰۰ کیلومترمربع بوده و تمرکز آئروسول‌ها در Sentinel-5 بر مراتع فقیر و خاک‌های غیرقابل کشت و در MODIS بر مراتع فقیر و اراضی کشاورزی دیم بوده است. ضریب همبستگی دو مجموعه تصاویر ۸۱ درصد بود و استفاده از Sentinel-5 به عنوان ابزار مؤثر برای پایش کانون‌های گردوغبار توصیه شد. شیرغلامی (۱۴۰۱) به بررسی سه طوفان گردوغبار در سال ۲۰۲۲ در استان یزد پرداخت. برای شناسایی مسیر انتقال گردوغبار از مدل HYSPLIT استفاده شد که سه مسیر اصلی جنوب‌غربی، غربی-شمال‌غربی و شمال‌شرقی را نشان داد. داده‌های MODIS (MOD04/MYD04_L2) و MOD08_D3 برای تعیین توزیع مکانی و منابع گردوغبار به کار رفتند. نتایج نشان داد کانون‌های اصلی خارجی گردوغبار بیابان‌های عراق، سوریه، شبه‌جزیره عربستان و صحرای ترکمنستان و منابع داخلی در بیابان‌های استان‌های سمنان و اصفهان قرار دارند. همچنین تالاب گاوخونی نقش تشدیدکننده گردوغبار انتقالی را ایفا کرد و همخوانی قابل توجهی میان نتایج مدل و داده‌های ماهواره‌ای مشاهده شد. علی‌رغم تمرکز اغلب پژوهش‌های پیشین بر پایش پدیده گردوغبار صرفاً از طریق شاخص AOD

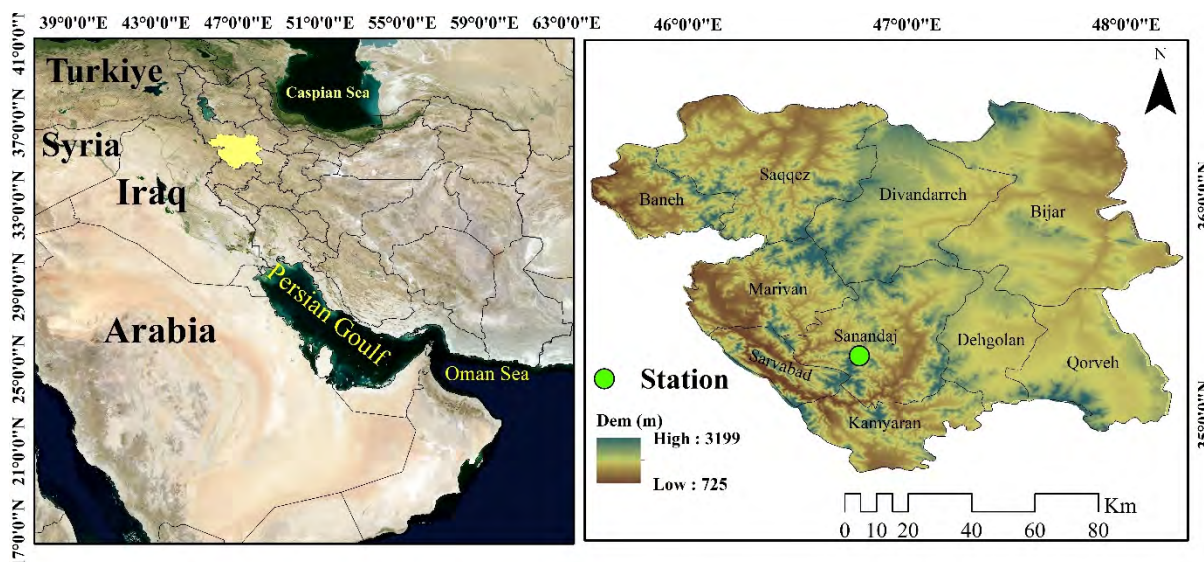
¹. Dust Event Count Map

². European Centre for Medium-Range Weather Forecasts

غربی تا سرد کوهستانی در ارتفاعات شمال شرق و مرکز استان شده است (Nabiuni et al., 2023). بخش‌هایی از دشت‌های غربی، به‌ویژه در شهرستان‌های میوان، بانه و سروآباد، با توجه به کاهش پوشش گیاهی، بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب و خاک، و نزدیکی به بیابان‌های کشور عراق، در سال‌های اخیر به کانون‌های مهم تأثیرپذیری از گردوغبارهای فرامرزی تبدیل شده‌اند (Fani et al., 2024). همچنین، خشکسالی‌های متوالی و کاهش منابع آبی در حوضه‌های مرزی، شرایط بیابان‌زایی را تشدید کرده و وقوع پدیده گردوغبار را در ماه‌های گرم سال افزایش داده‌اند (Bahrami & Separi, 2021). ورود توده‌های گردوغبار از سمت عراق، عمدتاً از طریق دره‌ها و دشت‌های مرزی، موجب افت شدید کیفیت هوا در غرب و مرکز استان می‌گردد، که این موضوع در سال‌های اخیر به‌ویژه در ایستگاه‌های سنندج و میوان به‌وضوح ثبت شده است (Hosseini et al., 2024).

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه: استان کردستان با وسعتی در حدود ۲۸۲۳۵ کیلومتر مربع در غرب ایران واقع شده و بخشی از زاگرس میانی را در بر می‌گیرد. این استان بین ۳۴ درجه و ۴۴ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۳۰ دقیقه عرض شمالی و ۴۵ درجه و ۳۱ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۱۶ دقیقه طول شرقی قرار دارد که در شکل ۱ مشاهده می‌شود. از غرب با اقلیم کردستان عراق مرز مشترکی به طول تقریبی ۲۰۰ کیلومتر دارد که این موقعیت مرزی، آن را در معرض تأثیر مستقیم گردوغبار ورودی از بیابان‌های عراق قرار داده است. توپوگرافی استان عمدتاً کوهستانی و ناهموار است و ارتفاع آن از حدود ۷۰۰ متر در نواحی غربی (نظیر دشت‌های میوان و بانه) تا بیش از ۳۳۰۰ متر در نواحی شرقی و مرکزی (مانند کوه چهل‌چشمه در نزدیکی دیواندره) متغیر است. این تنوع ارتفاع، به‌ویژه در تعامل با سامانه‌های بادی و الگوهای بارشی، منجر به شکل‌گیری اقلیم‌هایی از نیمه‌خشک در دشت‌های



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی و نقشه توپوگرافی استان کردستان، ایران

آلودگی هوا بالاتر از ۲۵۰ بود (۱۶ اردیبهشت، ۱۰ تیر ۱۴۰۴ و ۲۹ شهریور ۱۴۰۴) از ایستگاه سنندج آلودگی هوای سنندج جمع‌آوری شد. این روزها بر اساس شاخص AQI برای بررسی منشأ، مسیر و الگوی

داده‌های واقعی و ماهواره‌ای: در این پژوهش، از داده‌های واقعی شاخص AQI ایستگاه سنندج در سال ۲۰۲۳ استفاده شد، همچنین داده‌های ذرات معلق (PM₁₀ و PM_{2.5}) مربوط به روزهایی که سطح

ترکیباتی مانند CO_2 ، O_3 و CO و AAI را دارد. داده‌های حاصل دارای تفکیک مکانی تا $5/3 \times 7$ کیلومتر و تفکیک زمانی روزانه هستند، که امکان رصد منظم و دقیق تغییرات جوی را فراهم می‌سازند (Copernicus, 2018). در این پژوهش، تعداد ۱۴ تصویر مربوط به شاخص‌های AAI و $DECM$ طی سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۴ استخراج و مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

مرکز اروپایی پیش‌بینی میان‌مدت هوا (ECMWF) داده‌های مدل ERA5-Land را ارائه می‌دهد که یکی از دقیق‌ترین و جامع‌ترین مجموعه‌های داده جوی با تفکیک زمانی و مکانی بالا است. تفکیک مکانی این داده‌ها حدود ۹ کیلومتر (تقریباً $1/0$ درجه عرض و طول جغرافیایی) است و تفکیک زمانی آن ساعتی (هر یک ساعت یک نمونه) می‌باشد و اطلاعات مؤلفه‌های سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متری ($u_component_of_wind_10m$) و $v_component_of_wind_10m$) را ارائه می‌دهد. داده‌های ERA5 از سال ۱۹۵۰ به صورت پیوسته در دسترس هستند و امکان تحلیل بلندمدت شرایط جوی و اقلیمی را فراهم می‌کنند (Garcia-Prats et al., 2025). در این تحقیق، ۷ تصویر سالانه مربوط به سرعت باد استخراج شده است و جهت تحلیل روندهای باد و اثرات محیطی به کار گرفته شده‌است.

کدنویسی در محیط Google Earth Engine: GEE یک پلتفرم ابری پیشرفته است که توسط شرکت گوگل طراحی شده و به‌طور ویژه برای تحلیل داده‌های سنجش از دور و اطلاعات مکانی کاربرد دارد. این محیط، ابزارهای متعددی را برای پردازش سریع و دقیق حجم انبوهی از داده‌های ماهواره‌ای در اختیار پژوهشگران و متخصصان علوم محیطی قرار می‌دهد (NOAA, 2020). زبان برنامه‌نویسی اصلی در این پلتفرم JavaScript است و کاربران می‌توانند به کمک آن، الگوریتم‌ها و مدل‌های تحلیلی پیچیده‌ای را برای تحلیل‌های زمانی و مکانی توسعه دهند. در این پژوهش، برای تحلیل رفتار گردوغبار در استان کردستان، از تصاویر ماهواره‌ای MODIS و Sentinel-

انتقال گردوغبار به منطقه انتخاب شدند و تحلیل آن‌ها با استفاده از مدل HYSPLIT انجام شد. این مدل با امکان شبیه‌سازی مسیرهای عقب‌گرد جریان‌های جوی، قابلیت بالایی در ردیابی منبع گردوغبار دارد. در این راستا، مسیرهای انتقال گردوغبار به ایستگاه سنجش بررسی شد و برای تفسیر بهتر، از تصاویر MODIS Corrected Reflectance (True Color) نیز استفاده گردید. به‌منظور بررسی شرایط و میزان گردوغبار، شاخص‌های ماهواره‌ای شامل AOD ، Sum (مجموع عمق نوری آئروسول)، AAI و $DECM$ (نقشه شمارش رخداد‌های گردوغبار) از تصاویر ماهواره‌ای MODIS و Sentinel-5P برای دوره‌ی ۲۰۱۸-۲۰۲۴ مذکور استخراج شدند. پردازش این داده‌ها با استفاده از کدنویسی پیشرفته در محیط Google Earth Engine انجام پذیرفت.

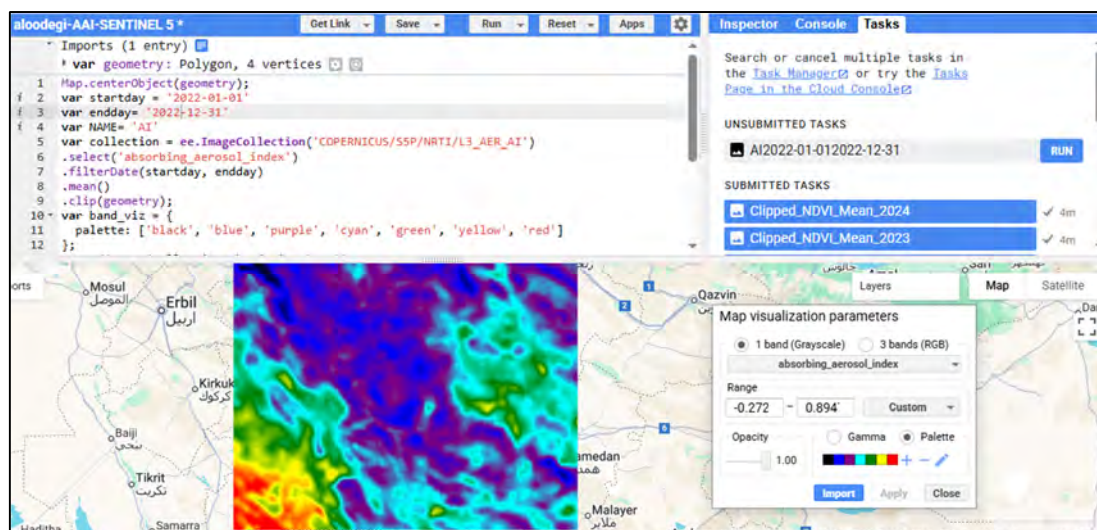
کاربرد داده‌های MODIS و Sentinel-5P در پایش

گردوغبار: ماهواره MODIS، که توسط ناسا و سازمان ملی اقیانوسی و جوی آمریکا (NOAA) توسعه یافته است، یکی از منابع کلیدی برای پایش تغییرات محیطی و اقلیمی در مقیاس جهانی به شمار می‌رود. این سامانه تصویربرداری، داده‌هایی با تفکیک زمانی روزانه تا ۴ بار در روز، تفکیک مکانی بین ۲۵۰ متر تا ۱ کیلومتر و در ۳۶ باند طیفی مختلف فراهم می‌کند و برای ارزیابی پوشش گیاهی، دمای سطح زمین، برف و یخ، ابر، گردوغبار و سایر شاخص‌های محیط‌زیستی کاربرد گسترده‌ای دارد (NASA, 2015). در این تحقیق، از مجموعه‌ای متشکل از شانزده تصویر MODIS بهره‌گیری شده است، هفت تصویر شاخص AOD و هفت تصویر $AOD\ Sum$ در بازه‌های زمانی سالانه، و دو تصویر بازتاب واقعی (True Color) با بازه زمانی روزانه می‌باشد.

از سوی دیگر، ماهواره Sentinel-5P، وابسته به برنامه کوپرنیک اتحادیه اروپا و تحت مدیریت آژانس فضایی اروپا (ESA)، با تمرکز بر پایش آلاینده‌های جوی و ترکیبات گازی، اطلاعات دقیقی از وضعیت کیفیت هوا ارائه می‌دهد. این ماهواره به‌سبب سنجنده پیشرفته TROPOMI مجهز است که قابلیت شناسایی

با این حال، محدودیت‌هایی مانند پوشش ابری در تصاویر وجود دارد که می‌تواند باعث کاهش نمونه‌های قابل استفاده شود؛ برای رفع این مشکل، داده‌ها قبل از تحلیل با فیلتر ابری پردازش شدند. این فرایند امکان پایش دقیق تغییرات زمانی و مکانی گردوغبار را در مقیاس استانی فراهم کرد. نتایج حاصل، به‌صورت نقشه‌های تحلیلی در شکل ۲ نمایش داده شده‌است. علاوه بر شاخص‌های گردوغبار، برای تحلیل الگوهای بادی مؤثر بر پراکنش گردوغبار، از داده‌های مدل ECMWF/ERA5_LAND استفاده شد و نتایج نهایی با کد ECMWF/ERA5_LAND/HOURLY در محیط GEE پردازش شدند.

5P بهره گرفته شد. شاخص‌های مورد استفاده شامل AOD، شاخص AAI، مجموع مقادیر AOD در بازه زمانی مشخص (AOD-Sum) و DECM بودند. برای استخراج AOD و AOD-Sum، از داده‌های MODIS/006/MCD19A2_GRANULES با کدهای MODIS/061/MOD09GA و داده‌های مربوط به AAI و DECM نیز از طریق سنجنده TROPOMI در ماهواره Sentinel-5P با کدهای COPERNICUS/S5P/OFFL/AER_AI و COPERNICUS/S5P/NRTI/L3_AER_AI استخراج شدند. تمام مراحل پردازش، تحلیل آماری و تولید نقشه‌های شاخص‌ها در محیط GEE انجام شد.



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

Optical_Depth_047 که عمق اپتیکی آئروسول در طول موج ۰,۴۷ میکرومتر را نمایش می‌دهد، مورد استفاده قرار گرفت. ابتدا داده‌ها با اعمال فیلترهای مکانی و زمانی مرتبط با محدوده مطالعاتی و بازه سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۴ محدود شدند. سپس عملیات میانگین‌گیری مکانی بر روی پیکسل‌ها اجرا شد تا نقشه‌های ماهانه AOD با دقت بالا تولید گردد. به‌منظور ارزیابی اثرات تجمیعی گردوغبار، شاخص AOD Sum نیز محاسبه شد. این شاخص مجموع مقادیر AOD را در طول یک بازه زمانی مشخص نشان می‌دهد و اطلاعاتی درباره بار کل آئروسول‌ها در طی

شاخص AOD و AOD Sum: شاخص AOD یکی از کلیدی‌ترین پارامترهای سنجش از دور برای پایش کیفیت هوا و شدت آلودگی ناشی از ذرات معلق موجود در جو است. این شاخص میزان جذب و پراکندگی نور توسط آئروسول‌ها در ستون عمودی جو را اندازه‌گیری کرده و معیاری حساس برای ارزیابی توزیع فضایی و شدت گردوغبار به شمار می‌آید. در این پژوهش، داده‌های AOD از محصول سطح ۲ ماهواره MODIS — شناسایی — استخراج MODIS/061/MCD19A2_GRANULES شده‌اند. برای محاسبه شاخص AOD، باند

گردوغبار (DECM) تهیه می‌شود. این شاخص نشان‌دهنده تعداد روزهایی است که شرایط مناسب برای وقوع گردوغبار در آن نقاط فراهم بوده و به همین واسطه امکان شناسایی مناطق با بیشترین تکرار رویدادهای گردوغبار و تحلیل روندهای زمانی این پدیده را در سطح استان فراهم می‌آورد.

شاخص کنترل کیفیت هوا (AQI): شاخص AQI یکی از معیارهای رایج برای ارزیابی روزانه یا حتی ساعتی کیفیت هوا است که بر پایه اندازه‌گیری غلظت آلاینده‌های مختلف محاسبه می‌شود. این شاخص با تبدیل مقادیر اندازه‌گیری شده هر آلاینده به یک عدد استاندارد در بازه صفر تا ۵۰۰، امکان مقایسه و تحلیل سطح آلودگی را فراهم می‌سازد. مقدار پایین این شاخص نشان‌دهنده هوای سالم و کم‌خطر برای سلامت عمومی است، در حالی که مقادیر بالاتر از افزایش سطح آلودگی و احتمال بروز مشکلات بهداشتی حکایت دارند. در این مطالعه، شاخص کیفیت هوا با تکیه بر دو پارامتر ماهواره‌ای یعنی عمق اپتیکی آئروسول و شاخص جذب آئروسول محاسبه شده است. شاخص AOD بیانگر شدت پراکندگی و جذب نور توسط ذرات معلق در جو است و به عنوان معیاری برای اندازه‌گیری تراکم ذرات معلق در حجم مشخصی از هوا به کار می‌رود؛ به طوری که مقادیر بالاتر از ۰٫۳ نشانگر شرایط ناسالم تلقی می‌شود. در مقابل، شاخص AAI میزان جذب نور توسط آئروسول‌های جذب‌کننده نظیر گردوغبار و دوده را نشان می‌دهد، و مقادیری بالاتر از ۰٫۵ هشداردهنده افزایش سطح آلودگی و وخامت وضعیت هوا هستند. بر پایه داده‌های جدول ۱، مقدار AQI بالاتر از ۱۰۰ نمایانگر شرایط نامطلوب و آلودگی قابل توجه در هوا است (NOAA, 2020; Yousefi Kebriya et al., 2025).

زمان ارائه می‌دهد. در این مطالعه، برای تولید نقشه AOD Sum، از ترکیب ۳۶۵ تصویر روزانه AOD هر سال استفاده شد تا الگوی سالانه انباشت آئروسول‌ها و شدت مواجهه منطقه‌ای با آلودگی گردوغبار به‌طور دقیق نمایش داده شود. استفاده همزمان از شاخص‌های AOD Sum و AOD، امکان تحلیل همزمان شدت و فراوانی آلودگی را فراهم کرده و مبنایی علمی برای ارزیابی اثرات کوتاه‌مدت و بلندمدت پدیده گردوغبار در منطقه مورد مطالعه فراهم می‌سازد.

شاخص AAI و DECM: شاخص AAI معیاری برای شناسایی وجود و میزان ذرات آئروسول جذب‌کننده نور در جو است که عمدتاً نشان‌دهنده گردوغبار و آلاینده‌های آلی می‌باشد. در این پژوهش، داده‌های AAI از ماهواره Sentinel-5P و مجموعه داده AAI COPERNICUS/S5P/NRTI/L3_AER_AI استخراج شدند. داده‌ها با توجه به بازه زمانی و منطقه مورد مطالعه فیلتر شده و سپس میانگین‌گیری مکانی بر روی تصاویر انجام گرفت (Tang et al., 2022). برای تعیین تعداد دفعات وقوع رویدادهای گردوغبار در استان کردستان، از شاخص DECM استفاده شد که از داده‌های AAI استخراج می‌شود. این شاخص یک معیار کمی برای شناسایی رخداد‌های گردوغبار بر اساس شدت جذب آئروسول است و به پژوهشگران امکان می‌دهد فراوانی، پراکنش و شدت رویدادهای گردوغبار را در یک بازه زمانی مشخص تحلیل کنند. در روش DECM، هر پیکسلی که مقدار شاخص جذب آئروسول آن از حد آستانه ۱/۲ بالاتر رود، به عنوان یک رویداد گردوغبار ثبت می‌شود (Miri et al., 2021; Zhang et al., 2025). پس از آن، تعداد دفعات رخداد این شرایط برای هر پیکسل طی دوره زمانی مطالعه جمع‌آوری شده و نقشه فراوانی وقوع رویدادهای

جدول ۱: طبقه‌بندی شاخص کیفیت هوا (AQI) همراه با مقادیر AOD و AAI و سطوح مخاطره مرتبط با آلودگی

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

گردوغبار، پایش خاکستر آتشفشانی و بررسی گسترش مواد خطرناک در جو کاربرد دارد و به عنوان ابزاری مؤثر برای مطالعات در مقیاس‌های محلی و ناحیه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد (Rolph et al., 2017; Yousefi Kebriya et al., 2025). در این پژوهش، مدل HYSPLIT به صورت آنلاین و تحت نسخه وب اجرا شد. داده‌های هواشناسی مورد استفاده شامل سرعت و جهت باد، دما، فشار و رطوبت از GFS با تفکیک 0.25° استخراج گردیدند. ارتفاع شروع مسیره‌ها ۵۰۰ متر AGL و نوع مسیر انتخاب‌شده Normal trajectory بود. برای Trajectory Starting Locations یک نقطه منبع انتخاب شد تا امکان انتخاب‌های بعدی (طول و عرض جغرافیایی، شناسه WMO یا مکان ایستگاه) فراهم شود و محدودیت‌های محاسباتی ensemble اعمال نگردد. مسیره‌های گردوغبار به صورت Backward و با بازه ۲۴ ساعت قبل بررسی شد.

مدل سرعت باد: باد، به‌عنوان جریان هوای در حال حرکت در جو، یکی از عوامل کلیدی در فرآیندهای هواشناسی و اقلیمی است. این پدیده ناشی از تفاوت فشار اتمسفری بین مناطق مختلف بوده و تحت تأثیر عواملی مانند گرادیان فشار، نیروی کوریولیس و اصطکاک سطح زمین شکل می‌گیرد. باد با دو ویژگی اصلی توصیف می‌شود: سرعت باد که سرعت باد که معمولاً بر حسب متر بر ثانیه (m/s) یا کیلومتر بر ساعت (km/h) بیان می‌گردد (AL-Yahyai et al., 2010). داده‌های مربوط به سرعت از منابع متنوع و معتبر شامل ایستگاه‌های هواشناسی زمینی، رادارهای هواشناسی، و سامانه‌های مشاهده ماهواره‌ای با دقت زمانی و مکانی بالا گردآوری می‌شوند. این داده‌ها نقش محوری در تحلیل الگوهای جوی منطقه‌ای و فراگیر،

ضریب تعیین (R^2): ضریب تعیین (R^2): این شاخص میزان واریانس متغیر وابسته که توسط متغیرهای مستقل توضیح داده می‌شود را کمی‌سازی می‌کند. مقدار آن بین ۰ و ۱ قرار دارد؛ مقادیر نزدیک به ۱ نشان‌دهنده مدل رگرسیونی قوی است که تغییرات متغیر پاسخ را به خوبی توضیح می‌دهد، در حالی که مقادیر پایین بیانگر باقی‌ماندن واریانس توضیح داده نشده و احتمال نیاز به متغیرهای اضافی یا اصلاح مدل است (Figueiredo Filho et al., 2011). برای بررسی ارتباط بین داده‌های واقعی آلودگی و داده‌های ماهواره‌ای از ضریب تعیین استفاده شد که براساس رابطه‌ی ۱ بدست می‌آید.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad (1)$$

مدل HYSPLIT: مدل HYSPLIT که توسط سازمان ملی اقیانوسی و جوی ایالات متحده (NOAA) طراحی شده، یکی از ابزارهای معتبر برای مدل‌سازی و رهگیری حرکت ذرات معلق و آلاینده‌های جوی محسوب می‌شود. این مدل با بهره‌گیری از رویکرد لاگرانژی، مسیر جابجایی ذرات در جو را به صورت زمانی و مکانی بازسازی می‌کند. برای اجرای این شبیه‌سازی، از داده‌های هواشناسی شامل سرعت و جهت باد، دما، فشار و رطوبت استفاده می‌شود که از منابع مختلف زمینی و ماهواره‌ای بدست می‌آیند. اثرات پدیده‌های جوی مانند پایداری جو، آشفستگی و جریان‌های باد نیز در فرآیند محاسبات مدل لحاظ می‌گردد. مدل HYSPLIT به طور گسترده در تحلیل و پیش‌بینی پراکندگی آلاینده‌ها، ردیابی طوفان‌های

مطالعات مربوط به باد، جزو اجزای جدایی‌ناپذیر پژوهش‌های اقلیمی، مدیریت بهینه منابع طبیعی، و برنامه‌ریزی استراتژیک فعالیت‌های کشاورزی، صنعتی و شهری باشد. در جدول ۲ مشخصات سرعت مشاهده می‌شود (Xiong et al., 2023).

پیش‌بینی‌های کوتاه‌مدت و بلندمدت هواشناسی، و همچنین مدل‌سازی‌های پیشرفته انتقال آلاینده‌ها، گردوغبار و رطوبت در اتمسفر ایفا می‌کنند. اهمیت باد در فرآیندهای انتقال آلودگی‌های هوا، توزیع ذرات معلق و تنظیم رطوبت جوی موجب شده است تا

جدول ۲: رده‌بندی سرعت باد به منظور ارزیابی تأثیرات فیزیکی آن در تولید، تشدید و انتقال گردوغبار

رده	احتمال بلند شدن گردوغبار	سرعت باد (متر بر ثانیه)	توضیحات
بسیار کم	تقریباً هیچ	۰ - ۱/۵	باد آرام، بدون بلند شدن گردوغبار
کم	کم	۱/۵ - ۳/۲	حرکت آهسته ذرات
متوسط	متوسط	۳/۲ - ۵/۴	امکان بلند شدن گردوغبار در خاک‌های خشک و رسی
زیاد	زیاد	۵/۵ - ۸	بلند شدن گردوغبار در مناطق مستعد
بسیار زیاد	بسیار زیاد	> ۸	بلند شدن و انتقال گسترده گردوغبار

منشأ آن‌ها، مدل انتقال لاگرانژی HYSPLIT به کار گرفته شد. این مدل با استفاده از داده‌های هواشناسی، الگوهای جوی و پارامترهای باد، مسیر انتقال و توزیع گردوغبار را در مقیاس محلی و منطقه‌ای شبیه‌سازی می‌کند. برای اعتبارسنجی نتایج حاصل از تحلیل شاخص‌ها و مدل‌سازی، تصاویر واقعی MODIS True Color مورد استفاده قرار گرفتند تا وقوع واقعی پدیده‌های گردوغبار با خروجی‌های تحلیل تطبیق داده شود. در پایان، با استفاده از داده‌های ERA5-Land مدل ECMWF، میانگین سالانه سرعت باد در بازه زمانی ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۴ بررسی شد. بهره‌گیری از این مجموعه داده‌ها و ابزارها، امکان تحلیل دقیق‌تری از رفتار گردوغبار و تدوین راهکارهای مدیریتی مؤثر در مواجهه با این پدیده محیط‌زیستی را فراهم کرده است.

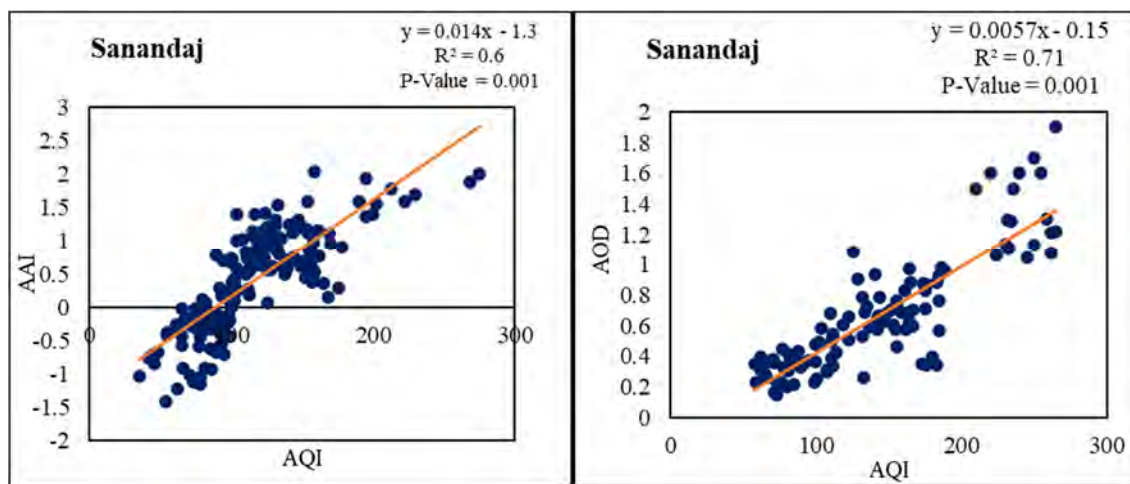
نتایج و بحث

آنالیز آماری: این پژوهش با هدف ارزیابی دقت و کارایی تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۵ و مودیس در پایش و تحلیل آلودگی هوا ناشی از ذرات معلق گردوغبار، از داده‌های ماهواره‌ای شامل شاخص جذب آئروسول (AAI) از سنتینل-۵ و شاخص عمق نوری آئروسول (AOD) از مودیس با داده‌های زمینی ایستگاه

در این پژوهش، به منظور بررسی مکانی و زمانی آلودگی ناشی از گردوغبار و شناسایی منابع، رفتار و مسیر انتقال ذرات معلق در جو استان کردستان طی سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۴، از یک رویکرد تلفیقی مبتنی بر داده‌های سنجش از دور و مدل‌سازی عددی بهره گرفته شد. این رویکرد امکان تحلیل گردوغبار را از مرحله شناسایی شدت و نوع آلودگی تا ردیابی منشأ و مسیر پراکنش آن فراهم می‌سازد. در نخستین گام، شاخص‌های AOD (عمق نوری آئروسول) و AAI (شاخص جذب آئروسول) با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در محیط GEE استخراج شدند. این شاخص‌ها به عنوان معیارهای کلیدی برای سنجش غلظت و نوع ذرات معلق جوی، نمایی دقیق از شدت آلودگی گردوغبار در منطقه ارائه می‌دهند. پس از آن، شاخص تجمیعی AOD-Sum جهت بررسی روند تجمع ذرات معلق در مقیاس سالانه محاسبه شد تا نوسانات و تراکم گردوغبار در طول دوره مورد مطالعه مشخص شود. در گام بعد، با هدف شناسایی مناطق حساس و مستعد خیزش گردوغبار، از شاخص ترکیبی DECM بهره گرفته شد که با تلفیق داده‌های اقلیمی، پوشش گیاهی و خصوصیات سطح زمین، نواحی بحرانی و پرخطر را از نظر تولید گردوغبار مشخص می‌سازد. برای تحلیل مسیر حرکت ذرات و ردیابی

AOD، چه از نظر قدرت همبستگی و چه در میزان تبیین تغییرات، نسبت به داده‌های AAI عملکرد دقیق‌تر و قابل‌اعتمادتری دارند. تجزیه و تحلیل کلی حاکی از آن است که هر دو منبع داده ماهواره‌ای، به‌ویژه AOD، دارای همخوانی بالایی با داده‌های زمینی هستند و قابلیت استفاده به‌عنوان ابزار مکمل یا جایگزین در پایش آلودگی هوا و مدل‌سازی‌های مرتبط را دارند. این همخوانی به‌طور خاص در سال ۲۰۲۳ برجسته‌تر بوده است، زیرا داده‌های ماهواره‌ای و ایستگاهی در این سال پوشش زمانی و مکانی کامل‌تری نسبت به سایر سال‌ها داشتند. با وجود آنکه در برخی روزهای سال داده‌های ماهواره‌ای یا ایستگاهی ناقص بوده است، انسجام و پایداری نتایج در کل دوره آماری نشان می‌دهد که بهره‌گیری از این داده‌ها می‌تواند نقش مهمی در بهبود پایش و تحلیل تغییرات ذرات معلق در مناطق مستعد بروز طوفان‌های گردوغبار ایفا کند.

پایش آلودگی هوای سنندج، استان کردستان، در سال ۲۰۲۳ مقایسه گردید. برای ارزیابی همخوانی و معناداری آماری بین داده‌های ماهواره‌ای و زمینی، از آزمون P-value و ضریب تبیین (R^2) استفاده شد. نمودارهای رگرسیونی نیز برای تفسیر بصری روابط ترسیم گردید. نتایج آزمون P-value منجر به رد فرضیه صفر در هر دو شاخص گردید که نشان‌دهنده وجود رابطه معنادار بین داده‌های ماهواره‌ای و زمینی است. تحلیل ضریب تبیین نشان داد که در شاخص AAI مقدار R^2 برابر با ۰/۶۰ به دست آمد، به این معنا که حدود ۶۰ درصد از تغییرات غلظت ذرات معلق اندازه‌گیری‌شده در ایستگاه زمینی توسط داده‌های AAI توضیح داده می‌شود. این مقدار برای شاخص AOD معادل R^2 برابر با ۰/۷۱ بود که بیانگر توان بالاتر این شاخص در تبیین تغییرات آلودگی و توضیح حدود ۷۱ درصد از واریانس مشاهدات زمینی است. این اختلاف به‌روشنی نشان می‌دهد که داده‌های



شکل ۳: نمودار تحلیل داده‌های ماهواره‌ای سنتینل ۵ (AAI) و مودیس (AOD) و داده‌های ایستگاهی سال ۲۰۲۳

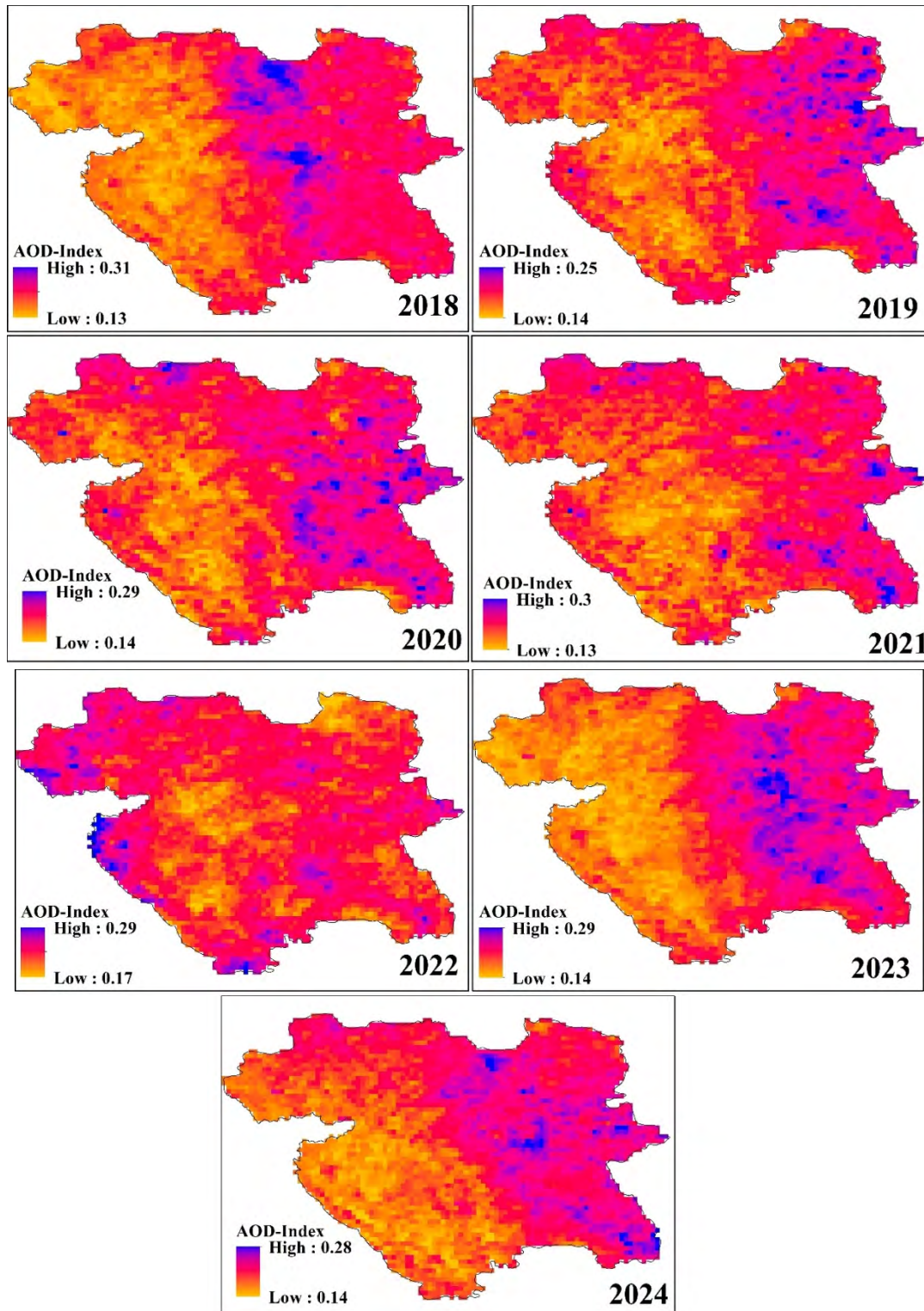
توپوگرافی، الگوهای باد و منابع داخلی و برون مرزی بر شرایط کیفی هوا در استان می‌باشد. در سال ۲۰۱۸، شاخص AOD در بسیاری از نواحی مرکزی، شرقی و جنوبی استان به سطوح نسبتاً بالایی رسید. به‌ویژه شهرستان‌های قروه، سنندج، بیجار و زرینه با میانگین AOD در حدود ۰/۳۱ در وضعیت "ناسالم برای عموم" قرار گرفتند، در حالی که مناطق شرقی استان

تحلیل تحلیل روند سالانه شاخص AOD: بررسی روند سالانه شاخص AOD طی بازه زمانی ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۴ در استان کردستان نشان‌دهنده تغییرات زمانی و مکانی چشمگیری در الگوی شدت، گستره و پراکندگی آلودگی گردوغبار است. این تحلیل بر اساس داده‌های میانگین سالانه شاخص AOD در مقیاس منطقه‌ای انجام شده و بیانگر تأثیر عوامل اقلیمی،

۲۰۲۳ و ۲۰۲۴، تمرکز آلودگی بیشتر در مناطق شرقی و مرکزی بود و در ۲۰۲۴، آلودگی به مناطق شمال غربی شهرستان بانه نیز گسترش یافت. این روند افزایش وسعت آلودگی می‌تواند ناشی از کاهش پوشش گیاهی، خشکسالی، افزایش فعالیت منابع برون مرزی و تغییرات در الگوی بادهای فصلی باشد. تحلیل شاخص AOD طی دوره ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۴ نشان می‌دهد که سال‌های ۲۰۱۸، ۲۰۲۰ و ۲۰۲۲ بحرانی‌ترین سال‌ها از نظر سطح و پوشش آلودگی هستند. مناطق مرکزی و شرقی استان معمولاً بیشترین آسیب‌پذیری را داشته‌اند، اما در برخی سال‌ها مانند ۲۰۲۲ و ۲۰۲۴، نقش نواحی غربی و مرزی پررنگ‌تر شده است. این روندها نشان می‌دهد که گردوغبار در استان کردستان نه تنها تحت تأثیر منابع داخلی، بلکه مستقیماً متأثر از منابع برون مرزی، توپوگرافی منطقه، تغییرات اقلیمی، خشکسالی و الگوهای باد است. ادامه این روند، به ویژه در صورت فقدان مدیریت مؤثر، می‌تواند پیامدهای منفی بر سلامت عمومی، کشاورزی، منابع آبی و پایداری زیست‌محیطی داشته باشد و ضرورت اتخاذ رویکردهای تلفیقی در پایش، مدیریت منابع گردوغبار و همکاری‌های منطقه‌ای را برجسته می‌سازد.

بر پایه تحلیل داده‌های سالانه شاخص تجمعی عمق نوری آئروسول‌ها (AOD Sum) در بازه زمانی ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۴ که در شکل ۴ ارائه شده است، نوسانات چشمگیری در شدت و پراکنش گردوغبار در سطح استان کردستان مشاهده می‌شود. در سال ۲۰۱۸، مقدار شاخص AOD Sum در محدوده شرقی و مرکزی استان به بیشینه خود رسید؛ به طوری که در شهرستان‌هایی نظیر سنندج، کامیاران، بیجار و دیواندره، تعداد روزهای همراه با پدیده گردوغبار از ۷۰ روز فراتر رفت و حداکثر مقدار شاخص AOD Sum به ۷۳٫۲ ثبت شد. نواحی جنوبی کامیاران نیز در این سال در زمره مناطق با شدت بالای گردوغبار قرار گرفتند. در سال ۲۰۱۹، افزایش محسوس در مقادیر AOD Sum مشاهده شد؛ این شاخص به مقدار ۸۴/۹ رسید که بیشترین تمرکز آن در مناطق شرقی و مرکزی استان قرار داشت.

با مقادیر مشابه وضعیت "هوای پاک" داشتند. این تضاد مکانی نشان‌دهنده تأثیر منابع گردوغبار ورودی از جنوب‌شرق و همچنین تمرکز ذرات در نواحی پست تر مرکزی به دلیل توپوگرافی است. در سال ۲۰۱۹، اگرچه میانگین شاخص AOD به حدود ۰/۲۵ کاهش یافت، اما پراکندگی مکانی گردوغبار گسترده‌تر شد و مناطق شرقی، شمال شرقی، مرکزی و جنوبی تحت تأثیر قرار گرفتند. همچنین در نواحی شمال غربی از جمله شهرستان مریوان افزایش شاخص مشاهده شد. این الگو ناشی از تغییرات فصلی باد، افزایش منابع محلی گردوغبار و کاهش بارش در بازه زمانی خاص بوده است. سال ۲۰۲۰ با افزایش AOD به سطح بحرانی ۰/۲۹ همراه بود و پوشش مکانی آلودگی بسیار گسترده شد، به طوری که تقریباً تمامی استان - به جز بخش‌هایی از ارتفاعات رشته‌کوه زاگرس - درگیر شد. کیفیت هوا در اغلب نواحی در بازه "ناسالم" تا "ناسالم برای گروه‌های حساس" قرار داشت. نقاطی مانند سنندج، قروه، شمال دیواندره و مرزهای مریوان با عراق بیشترین تراکم گردوغبار را داشتند، که ناشی از عبور طوفان‌های گردوغبار فرامرزی و تشدید خشکسالی‌های محلی بود. در سال ۲۰۲۱، با وجود افزایش اندک AOD نسبت به سال قبل، پراکندگی گردوغبار محدودتر شد و تمرکز آلاینده‌ها عمدتاً در نواحی مرزی با استان‌های هم‌دانش و زنجان مشاهده شد. این تمرکز موضعی ممکن است تحت تأثیر جهت‌گیری بادهای غالب، تغییرات کاربری زمین و کاهش منابع خارجی بوده باشد. سال ۲۰۲۲، برخلاف سال‌های گذشته، بیشترین مقدار AOD در نواحی غربی و مرزی استان از جمله مریوان، بانه و جنوب کامیاران ثبت شد. پراکندگی شاخص بسیار وسیع بود و تقریباً سراسر استان - به جز نواحی شمال شرق و بخشی از مرکز متمایل به غرب - تحت تأثیر قرار گرفت. جابه‌جایی کانون‌های آلاینده به سمت غرب احتمالاً ناشی از تغییرات جبهه‌های باد، فعالیت منابع گردوغبار در خاک عراق و کاهش پوشش گیاهی مرزهای غربی بوده است. میانگین AOD در این سال‌ها مشابه سال ۲۰۲۲ و حدود ۰/۲۹ باقی ماند، اما توزیع مکانی آن تغییر کرد. در سال‌های



شکل ۳: توزیع AOD ماهواره MODIS در استان کردستان (باند ۳، محصول AOD)

وقوع طوفان‌های گردوغبار نسبت به سال پیشین است. بر خلاف روند افزایشی پیشین، سال ۲۰۲۰ با کاهش قابل توجهی در شاخص AOD Sum همراه بود و

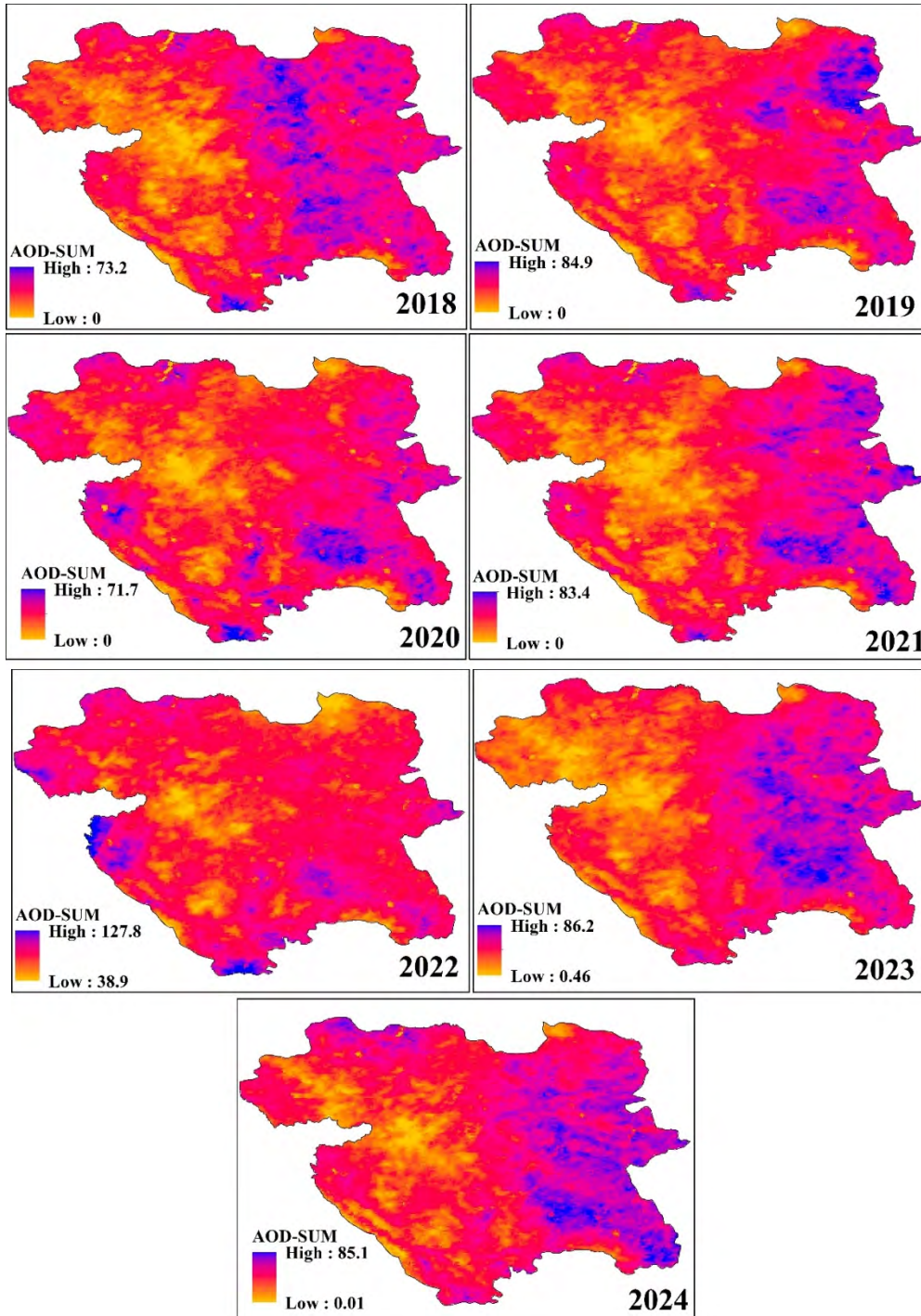
در این سال، مناطقی از جمله سنندج، یاسوکنند و بخش‌هایی از بیجار و دیواندره بیش از ۸۰ روز را در شرایط گردوغباری سپری کردند که بیانگر تشدید

کاهش پوشش گیاهی در مناطق شرقی استان کردستان است که شرایط را برای تولید گردوغبار محلی فراهم کرده است. علاوه بر این، تغییرات در الگوهای باد و شدت جریان‌های باد غالب نیز نقش مؤثری در پراکنش ذرات داشته و باعث شده سهم گردوغبارهای محلی در این مناطق افزایش یابد. در نتیجه، علی‌رغم کاهش کلی شاخص AOD-Sum، مناطقی با خاک‌های خشک و منابع محلی گردوغبار همچنان تحت تأثیر آلودگی قرار دارند. این وضعیت نشان‌دهنده تعامل پیچیده عوامل اقلیمی، توپوگرافی و بادهای فصلی در شکل‌گیری و گسترش گردوغبار محلی است و اهمیت پایش مستمر و مدیریت منابع داخلی گردوغبار را برای کاهش اثرات منفی بر کیفیت هوا و سلامت عمومی برجسته می‌کند. علی‌رغم این کاهش، مناطق مرکزی و شرقی استان همچنان کانون‌های اصلی فعالیت گردوغبار باقی ماندند. تحلیل تطبیقی بین نقشه‌های سالانه AOD Sum (شکل ۳) و نقشه‌های میانگین سالانه شاخص AOD (شکل ۲) حاکی از هم‌خوانی بالای فضایی این شاخص‌ها است. این مطابقت تأییدکننده انسجام داده‌های مورد استفاده و صحت پردازش‌های مکانی-زمانی بوده و قدرت تحلیلی شاخص AOD Sum را به‌عنوان نمایه‌ای معتبر برای بررسی شدت و توزیع فضایی گردوغبار در سطح منطقه برجسته می‌سازد. در مجموع، روند صعودی و نوسانی شاخص AOD Sum طی این سال‌ها گویای تأثیر عوامل گوناگون اقلیمی، محیطی و انسانی در وقوع و تکرار گردوغبار در استان کردستان است. در کلیه سال‌های مورد بررسی، امکان نفوذ توده‌های گردوغبار از نواحی غربی کشور همواره وجود داشته است. با عبور این ذرات از مناطق کوهستانی زاگرس، به‌ویژه در نقاطی که ارتفاعات کاهش می‌یابد و دره‌های طبیعی وجود دارند، جریان هوا به‌دلیل اختلاف فشار جو بین غرب و شرق استان تغییر مسیر داده و به سمت نواحی شرقی‌تر هدایت می‌شود. این پدیده منجر به تشدید اثرات گردوغبار در مناطق شرقی استان کردستان، نظیر مرزهای مشترک با استان‌های همدان، زنجان و کرمانشاه می‌گردد. به‌عبارتی، استان کردستان

مقدار آن به ۷۱/۷ کاهش یافت که پایین‌ترین مقدار طی سال‌های مطالعه‌شده محسوب می‌شود. با این حال، همچنان برخی نواحی جنوبی و جنوب‌شرقی استان، به‌ویژه شهرستان‌های قروه و کامیاران و همچنین بخش‌هایی از غرب استان از جمله مریوان، با بیش از ۷۰ روز پدیده گردوغبار مواجه بودند. در سال ۲۰۲۱، شاخص AOD Sum بار دیگر روند افزایشی به خود گرفت و به ۸۳/۴ رسید. بیشترین مقادیر شاخص در این سال در مناطق شرقی استان ثبت شد، به‌گونه‌ای که در اغلب این نواحی بیش از ۸۰ روز پدیده گردوغبار گزارش شد. این روند افزایشی در سال ۲۰۲۲ به اوج خود رسید؛ مقدار AOD Sum در این سال به بیشترین حد ممکن طی دوره مطالعه‌شده، یعنی ۱۲۷/۸، افزایش یافت. توزیع مکانی این افزایش گسترده بوده و نواحی غربی استان، از جمله مریوان، جنوب‌غرب شهرستان کامیاران و مناطق مرزی بانه بیش از ۱۲۰ روز تحت تأثیر پدیده گردوغبار قرار داشتند. همچنین نواحی جنوب‌شرقی مانند شهرستان قروه نیز در معرض مقادیر بالای این شاخص قرار گرفتند، که می‌تواند نشانه‌ای از گسترش منابع داخلی و خارجی تولید گردوغبار، خشکسالی و الگوهای باد باشد. انتقال ذرات گردوغبار حاکی از آن است که در سال ۲۰۲۲، علاوه بر تشدید منابع محلی، احتمالاً ورود توده‌های گردوغباری از مناطق بیابانی کشورهای همجوار نظیر عراق، سوریه و عربستان سعودی نیز نقش مؤثری در افزایش فراوانی و شدت گردوغبار در استان کردستان داشته است. بیابان‌های واقع در غرب عراق و شرق سوریه، به‌ویژه مناطق بدون پوشش گیاهی در نزدیکی مرزهای ایران، در بسیاری از موارد منشأ اولیه گردوغبار ورودی به غرب کشور محسوب می‌شوند. وزش بادهای غالب غربی-جنوب‌غربی، در ترکیب با شرایط کم‌فشار سطح زمین در منطقه زاگرس، مسیر حرکت این ذرات را از مرزهای غربی کشور به داخل استان کردستان هموار می‌سازد. در سال‌های ۲۰۲۳ و ۲۰۲۴، مقادیر شاخص AOD-Sum به ترتیب ۸۶٫۲ و ۸۵٫۱ کاهش نسبی را تجربه کردند. این کاهش تا حد زیادی ناشی از خشکی گسترده و

است. از این رو، پیشنهاد می‌شود برای تحلیل‌های آتی، ارتباط این شاخص با پارامترهای هیدرو-اقلیمی نظیر دمای سطح زمین، بارش، پوشش گیاهی، رطوبت خاک و تغییرات سطح آب تالاب‌ها نیز به‌صورت مدل‌سازی‌های چندمتغیره بررسی گردد.

نه تنها در معرض منابع محلی گردوغبار قرار دارد، بلکه به‌عنوان یکی از نخستین مناطق در مسیر انتقال توده‌های گردوغباری ورودی از خارج کشور نیز شناخته می‌شود که آثار آن در نقاط مختلف استان، به‌ویژه در نواحی مرزی و شرقی، به‌وضوح قابل مشاهده

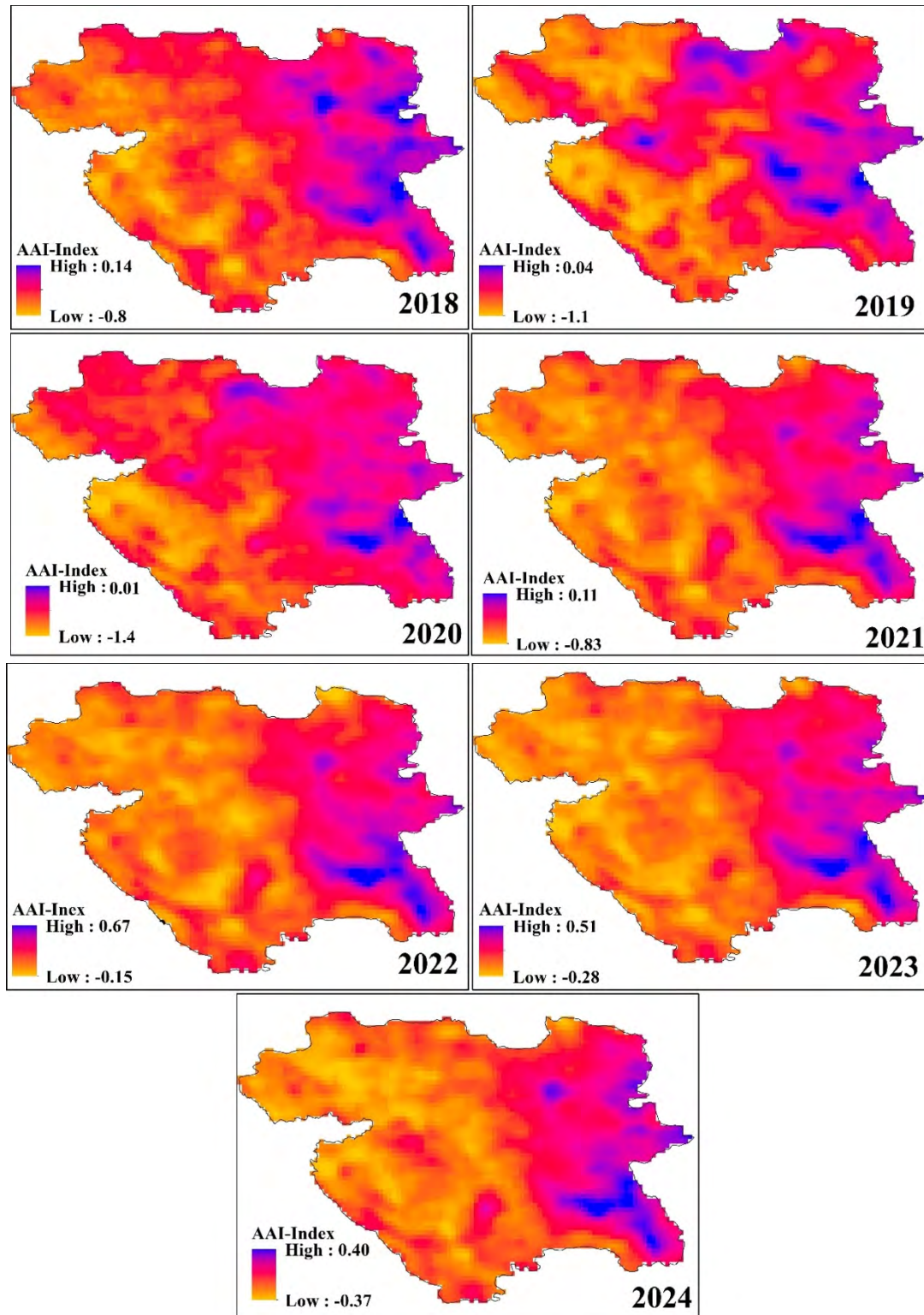


شکل ۴: توزیع AOD Sum ماهواره MODIS در استان کردستان (باند ۳، محصول AOD)

تحلیل روند سالانه شاخص آئروسول (AAI):

شاخص AAI یکی از شاخص‌های کلیدی سنجش از دور برای شناسایی و پایش ذرات معلق جوی، به‌ویژه گردوغبار، است که توانایی تفکیک آئروسول‌های جذب‌کننده نظیر گردوغبار، دوده و ذرات ناشی از سوخت‌های زیستی را دارد. بررسی روند سالانه شاخص AAI در استان کردستان طی سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۴، نشان‌دهنده تغییرات قابل‌توجه در شدت، گستره و پراکندگی گردوغبار است که تحت تأثیر عوامل اقلیمی، توپوگرافی و منابع بیابانی داخلی و مرزی استان قرار دارد. سال ۲۰۱۸ با بیشترین مقدار شاخص AAI در مناطق شرقی، شمال‌شرقی و جنوب‌شرقی آغاز شد. مقدار شاخص در این سال به حدود ۰/۱۴ رسید؛ گرچه به آستانه شرایط ناسالم نرسیده بود، اما نشان‌دهنده افزایش بار گردوغبار و کاهش نسبی کیفیت هوا در شهرستان‌های قروه، بیجار و بخش‌هایی از دیواندره بود. این الگو با توجه به نزدیکی به منابع تولید گردوغبار مرزی و تأثیر توپوگرافی نواحی پست مرکزی قابل توضیح است. در سال ۲۰۱۹، شاخص AAI به حدود ۰/۰۴ کاهش یافت، که بیانگر بهبود نسبی کیفیت هوا بود، اما پراکندگی مکانی گردوغبار گسترده‌تر شد. نواحی مرکزی و حتی غرب استان، از جمله سنندج و بانه، تحت تأثیر قرار گرفتند. این پراکنش گسترده‌تر می‌تواند ناشی از جریان‌های باد فصلی و نفوذ توده‌های گردوغبار فرامنطقه‌ای و داخلی باشد. سال ۲۰۲۰ کمترین مقدار شاخص در کل دوره (۰/۰۱) ثبت شد که نشان‌دهنده شرایط مطلوب‌تر کیفی هوا است. کاهش رخدادهای گردوغبار در این سال می‌تواند با افزایش بارندگی‌های فصلی، کاهش منابع محلی گردوغبار و فعالیت کمتر بادهای شدید مرتبط باشد. سال ۲۰۲۱ با افزایش شاخص به حدود ۰/۱۰ همراه شد و الگوی پراکنش مجدداً به شرق استان متمرکز

گردید؛ بازگشت این الگو بیانگر تأثیر منابع بیابانی شرق استان و تغییرات در شدت بادهای فصلی است. سال ۲۰۲۲ به‌عنوان سال اوج آلودگی شناسایی شد. شاخص AAI به ۰/۶۷ رسید و شرایط شدیداً ناسالم برای عموم مردم برقرار شد. پراکندگی گسترده گردوغبار مناطق شرقی، مرکزی و جنوب‌غرب استان را تحت تأثیر قرار داد. شهرستان‌های قروه، بیجار و کامیاران بیشترین شدت آلودگی را تجربه کردند. این افزایش شدید را می‌توان به ترکیبی از خشکسالی، کاهش پوشش گیاهی حفاظتی، ورود توده‌های گردوغبار فرامرزی از غرب کشور و فعالیت منابع داخلی گردوغبار نسبت داد. در سال ۲۰۲۳، شاخص AAI به ۰/۵۱ کاهش یافت، اما پراکندگی گردوغبار همچنان وسیع بود و شرق استان کانون اصلی باقی ماند. این کاهش نسبی احتمالاً ناشی از کاهش شدت بادهای موسمی یا کاهش تعداد رخدادهای گردوغبار فرامرزی است. سال ۲۰۲۴ با شاخص ۰/۴۱ نشان‌دهنده بهبود نسبی کیفیت هوا است، اما مناطق شرقی، مرکزی و بخش‌هایی از جنوب‌غرب همچنان تحت تأثیر گردوغبار قرار دارند. این وضعیت نشان‌دهنده نقش پایدار منابع محلی و تأثیر تغییرات جوی و بادهای فصلی در پراکنش گردوغبار است. به طور کلی، تحلیل روند AAI در استان کردستان حاکی از آن است که نوسانات سالانه این شاخص تحت تأثیر عوامل اقلیمی شامل خشکسالی، تغییرات در الگوهای باد و شدت جریان‌های فصلی، منابع بیابانی داخلی و مرزی و تغییرات کاربری اراضی قرار دارد. سال ۲۰۲۲ شدیدترین شرایط آلودگی و سال ۲۰۲۰ بهترین کیفیت هوا را نشان می‌دهد. استمرار آلودگی در شرق استان طی دوره بررسی اهمیت مدیریت منابع خاک، تقویت پوشش گیاهی و پایش مداوم بادهای و منابع برون‌مرزی را برجسته می‌کند.



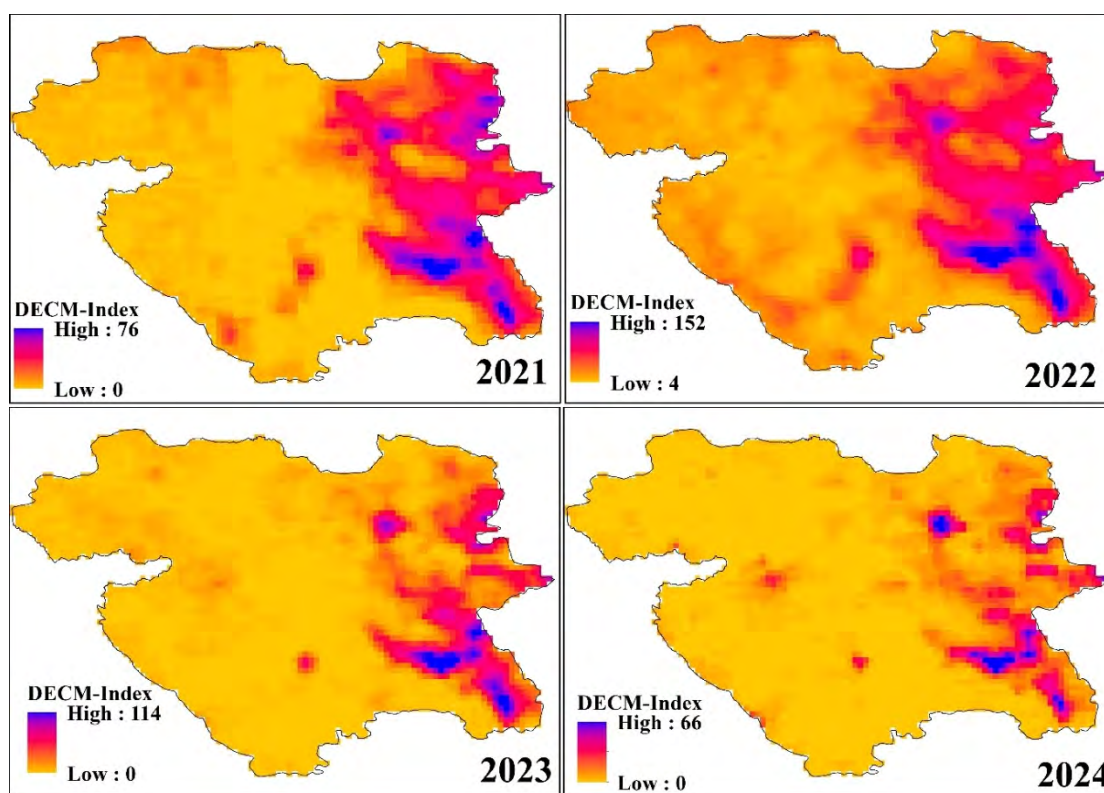
شکل ۵: توزیع فضایی شاخص جذب آتروسول (AAI) در استان کردستان با استفاده از داده‌های ماهواره Sentinel-5 (محصول TROPOMI/S5P-NRTI-AER_AI)

تحلیل تحلیل روند سالانه شاخص DECIM: پایش دقیق و مستمر رخدادهای گردوغبار در مناطق نیمه‌خشک و خشک، به‌ویژه در استان‌هایی مانند کردستان که در معرض انتقال توده‌های گردوغبار از منابع داخلی و فرامرزی هستند، از اهمیت بالایی برخوردار است. در این راستا، شاخص DECIM (Dust Event Composite Metric) که ترکیبی از پارامترهای مختلف مرتبط با ذرات معلق جذب‌کننده در جو را بر پایه داده‌های سنجنده TROPOMI ماهواره Sentinel-5P ارائه می‌دهد. با توجه به محدودیت‌های فنی و نویز بالای سنجنده در سال‌های ابتدایی پرتاب، داده‌های مربوط به سال‌های ۲۰۱۸، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ از دقت کافی برخوردار نبوده و از تحلیل حذف شده‌اند. بنابراین، تمرکز این بررسی بر چهار سال اخیر یعنی ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۴ قرار دارد. در نخستین سال بررسی (۲۰۲۱)، بیشترین تمرکز رخدادهای گردوغبار در شرق استان کردستان مشاهده شد. شهرستان‌های بیجار و قروه با ثبت حدود ۷۶ روز گردوغباری، بالاترین فراوانی را به خود اختصاص دادند. همچنین، برخی بخش‌های سنندج نیز با تعداد روزهای کمتر از ۵۰ روز تحت تأثیر قرار گرفتند. در این سال، بیشتر رویدادها در فصول گرم سال اتفاق افتادند که هم‌زمان با افزایش خشکی خاک، کاهش بارش و افزایش فراوانی بادهای منطقه‌ای در شرق استان است. این الگو نشان‌دهنده حساسیت بالای نواحی شرقی نسبت به بیابان‌زایی و نقش مجاورت با استان همدان است که دارای کانون‌های مستعد فرسایش بادی است. داده‌های سال ۲۰۲۲ گویای اوج‌گیری چشمگیر در تعداد روزهای گردوغبار و افزایش پراکنش مکانی آن در سطح استان است. در این سال، بیش از ۱۵۰ روز گردوغبار در شهرستان‌های قروه و بیجار ثبت شده که معادل نیمی از روزهای سال است. این میزان نه‌تنها بالاترین مقدار در بین سال‌های مورد بررسی است، بلکه نمایانگر وضعیت بحرانی از منظر کیفیت هوا و بهداشت محیط زیست نیز می‌باشد. نواحی مرکزی استان، به‌ویژه شهر سنندج، نیز با ثبت بیش از ۶۰ روز آلوده، برای نخستین بار در این دوره به‌صورت گسترده

تحت تأثیر قرار گرفت. همچنین شهرستان‌های مرزی غربی و جنوب‌غربی نظیر کامیاران و میوان نیز شاهد افزایش رخدادهای بوده‌اند. این وضعیت احتمالاً به دلیل هم‌زمانی فعالیت کانون‌های داخلی و نفوذ توده‌های گردوغبار از غرب کشور (مانند عراق و استان ایلام) رخ داده است. همچنین شرایط اقلیمی سال ۲۰۲۲، شامل خشکسالی گسترده، کاهش پوشش گیاهی و افزایش دمای میانگین، بستر را برای تشدید رخدادهای فراهم کرده است. در سال ۲۰۲۳، گرچه همچنان سطوح قابل توجهی از گردوغبار در مناطق شرقی گزارش شده است، اما شدت و گستره آن نسبت به سال ۲۰۲۲ کاهش یافته است. در این سال، بیشترین تعداد روزهای آلوده به گردوغبار در شهرستان‌های بیجار و قروه، حدود ۱۱۰ روز ثبت شده است. سایر مناطق استان، به‌ویژه نواحی مرکزی و غربی، با کاهش محسوس در تعداد روزهای آلوده مواجه بودند. تمرکز رخدادهای در مجاورت مرزهای شرقی، به‌ویژه نواحی هم‌مرز با بیابان‌های استان همدان، حاکی از آن است که این مناطق همچنان به‌عنوان منابع فعال گردوغبار عمل می‌کنند. با این حال، می‌توان فرض کرد که بهبود نسبی شرایط اقلیمی یا اقدامات مقطعی مانند افزایش پوشش گیاهی، عملیات مالچ‌پاشی یا مدیریت چرا می‌تواند در کاهش گستره مکانی نقش داشته باشد. آخرین سال دوره بررسی، یعنی سال ۲۰۲۴، با ثبت کمترین میزان رخداد گردوغبار از منظر شاخص DECIM همراه بوده است. در این سال، تنها بخش‌هایی از مناطق شرقی و جنوب‌شرقی استان - شامل نقاطی از قروه، بیجار و کامیاران، بیش از ۶۵ روز آلوده را تجربه کردند. سایر مناطق استان یا در وضعیت پاک قرار داشته‌اند یا در حد تعداد اندکی روز آلوده گزارش شده‌اند. این کاهش قابل توجه در فراوانی روزهای گردوغبار را می‌توان به چند عامل نسبت داد: بارش‌های بهتر در سال آبی گذشته، کاهش دمای میانگین، افزایش رطوبت خاک، تقویت پوشش گیاهی فصلی، و احتمالاً تغییر در مسیر بادهای غالب یا کاهش شدت توده‌های گردوغبار ورودی از غرب و جنوب‌غرب. با این وجود، استمرار آلودگی در مناطق

شرق به گسترش در مرکز و غرب در سال ۲۰۲۲، نشان‌دهنده‌ی پتانسیل انتقال گردوغبار در مقیاس‌های منطقه‌ای است. مناطق مرزی در همجواری با استان‌های همدان و کرمانشاه، به‌ویژه در جنوب و جنوب‌شرق استان کردستان، نقش قابل‌توجهی در تشدید رخدادهای گردوغبار ایفا می‌کنند. به‌طور کلی، نتایج این تحلیل ضرورت توسعه سیاست‌های مقابله با بیابان‌زایی، مدیریت پایدار منابع خاک، تقویت پوشش گیاهی و برنامه‌ریزی برای تاب‌آوری شهری در برابر آلودگی هوا را برجسته می‌سازد.

شرقی و جنوبی بیانگر پایداری کانون‌های گردوغبار و لزوم مداخلات مدیریتی بلندمدت است. تحلیل شاخص DECM طی سال‌های ۲۰۲۱ تا ۲۰۲۴ در استان کردستان، روندی نوسانی اما با یک نقطه اوج مشخص در سال ۲۰۲۲ را به نمایش می‌گذارد. یافته‌ها نشان می‌دهند که مناطق شرقی استان، به‌ویژه شهرستان‌های قروه و بیجار، در تمام سال‌ها بیشترین تعداد روزهای آلوده را ثبت کرده‌اند و از حساس‌ترین نواحی از نظر مخاطرات گردوغبار محسوب می‌شوند. همچنین تغییر در گستره مکانی رخدادهای، از تمرکز در



شکل ۶: توزیع فضایی شاخص گردوغبار (DECM) در شهرستان کردستان با استفاده از داده‌های ماهواره Sentinel-5

می‌دهند، می‌توان نتیجه گرفت که شدت رخدادهای گردوغبار فعال و جذب‌کننده کاهش یافته، اما بار کلی ذرات معلق در ستون جو به‌طور کامل حذف نشده است. این وضعیت می‌تواند ناشی از افزایش بارندگی، کاهش فراوانی بادهای خیزش‌دهنده و در عین حال ماندگاری ذرات ریز در جو باشد. بنابراین، تحلیل هم‌زمان این شاخص‌ها امکان تفکیک میان «شدت

لازم به تأکید است که تفاوت در رفتار شاخص‌های AOD, AAI و DECM الزاماً به معنای ناسازگاری نتایج نیست، بلکه بازتاب‌دهنده تفاوت در ماهیت فیزیکی این شاخص‌ها و نوع آئروسول‌های غالب در هر سال است. در سال‌هایی مانند ۲۰۲۰ که کاهش قابل توجه AAI مشاهده شده، در حالی که AOD یا DECM همچنان مقادیر نسبتاً پایداری را نشان

همچنین، برای صحت‌سنجی نتایج حاصل از مدل و بررسی هم‌زمان رفتار دیداری توده‌های گردوغبار، تصاویر ماهواره‌ای MODIS با اصلاح بازتاب واقعی (True Color) نیز مورد استفاده قرار گرفت. از میان رویدادهای متعدد، دو روز شاخص از سال ۲۰۲۵ انتخاب شدند که هم‌زمانی داده‌های ایستگاه سنندج با تصاویر بدون پوشش ابری ماهواره‌ای در آن‌ها فراهم بود. نتایج حاصل از همپوشانی داده‌های مدل HYSPLIT و تصاویر ماهواره‌ای، الگوهای مسلط جوی و مسیرهای غالب انتقال گردوغبار در منطقه را با وضوح و دقت بیشتری مشخص نموده و نقش عوامل سینوپتیکی و منابع بادی در ایجاد این پدیده را برجسته می‌سازد.

رخداد گردوغبار فعال» و «بار پس‌زمینه‌ای ذرات معلق» را فراهم می‌سازد و درک دقیق‌تری از پویایی گردوغبار در منطقه ارائه می‌دهد.

ردیابی مسیر حرکت جریان‌های گردوغبار با مدل HYSPLIT: برای بررسی منشأ و مسیر انتقال گردوغبار در استان کردستان، روزهایی انتخاب گردید که شاخص کیفیت هوا (AQI) در آستانه وضعیت «بسیار ناسالم» و نزدیک به عدد ۲۵۰ و ۵۰۰ قرار داشت. باتوجه به نتایج اکثر مسیرها مسابه بوده است، برای این مطالعه از اطلاعات مربوط به ۳ روز بحرانی در جدول ۲ ارائه شده است. به منظور بازسازی دقیق مسیر حرکت توده‌های گردوغبار، از مدل عددی HYSPLIT بهره گرفته شد. در این تحلیل، رهگیری معکوس در بازه زمانی ۲۴ ساعته انجام پذیرفت.

جدول ۲: روزهای شاخص برای تحلیل مسیر انتقال گردوغبار در استان کردستان

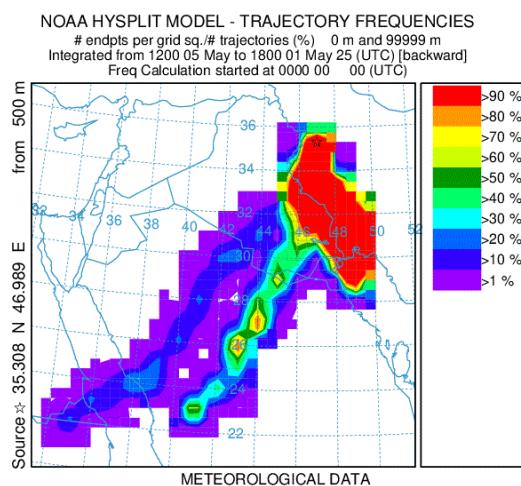
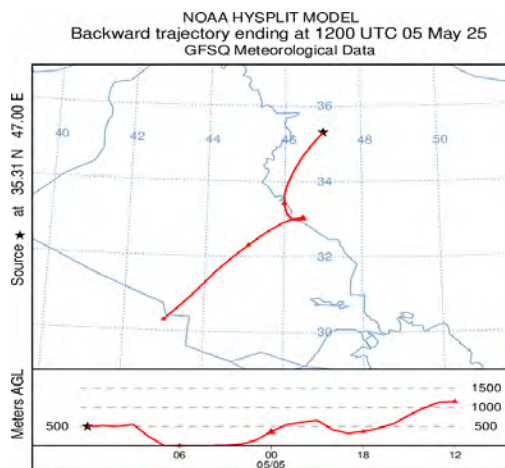
شماره	تاریخ	AQI	ایستگاه
۱	۱۴۰۴/۰۲/۱۶	۲۵۰	Sanandaj
۲	۱۴۰۴/۰۴/۱۰	۲۵۰	Sanandaj
۳	۱۴۰۴/۰۶/۲۹	۵۰۰	Kamyaran

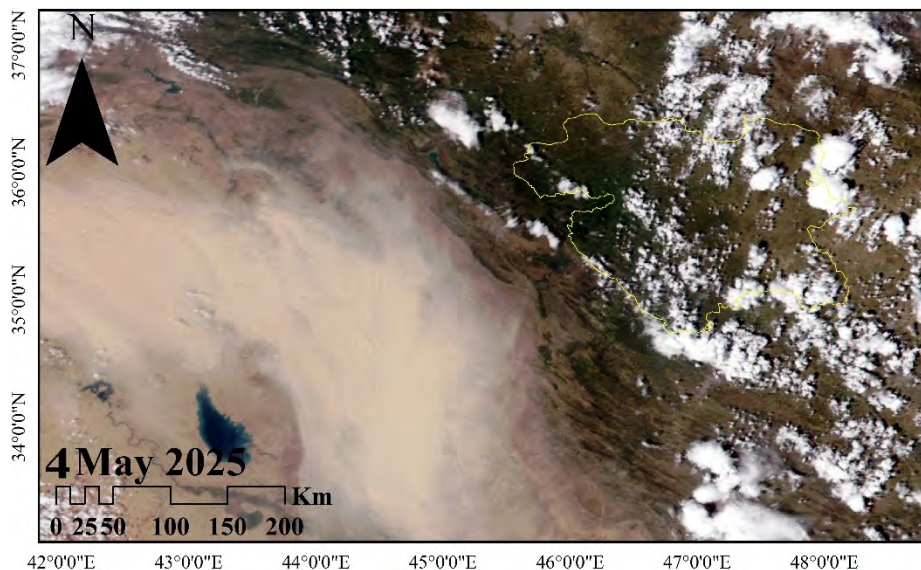
خاک سست، و وزش بادهای شدید، مستعد تولید و بلند شدن ذرات گردوغبار هستند. ذرات گردوغبار در ساعت ۱۲ ظهر روز ۱۵ اردیبهشت ۱۴۰۴ (۴ می ۲۰۲۵) در ارتفاع تقریبی ۱۰۰۰ متری از سطح زمین شروع به حرکت کرده‌اند. این ارتفاع اولیه نشان‌دهنده تأثیر سامانه‌های جوی با فشار کم است که قادر به بلند کردن ذرات از سطح زمین و انتقال آن‌ها به لایه‌های بالاتر جو هستند. با نزدیک شدن به مرزهای ایران و عراق، ذرات به تدریج ارتفاع خود را از دست داده و در منطقه مرزی به ارتفاعی کمتر از ۵۰۰ متر رسیده‌اند. این کاهش ارتفاع به دلیل تغییرات دینامیکی جو، از جمله کاهش سرعت باد و افزایش اصطکاک نزدیک به سطح زمین، رخ داده است. بین ساعت ۱ بامداد تا ۱۰ صبح روز ۱۶ اردیبهشت ۱۴۰۴، تراکم ذرات گردوغبار در پایین‌ترین لایه‌های جو (نزدیک به سطح زمین) به حداکثر خود رسیده است.

گردوغبار شماره ۱. شکل ۷ شامل سه بخش تحلیلی است: نقشه مسیر انتقال جریان‌های جوی با استفاده از مدل HYSPLIT، نقشه فراوانی مسیرها (frequency map)، و تصویر رنگ واقعی سنجنده MODIS که همگی برای تحلیل منشأ و مسیر انتقال گردوغبار در روز ۱۶ اردیبهشت ۱۴۰۴ مورد استفاده قرار گرفته‌اند. بر اساس داده‌های این مدل، مسیرهای بازگشتی (backward trajectories) نشان‌دهنده حرکت ذرات گردوغبار از مناطق جنوب‌غربی عراق و شمال‌شرقی عربستان سعودی به سمت مناطق غربی ایران، به‌ویژه استان کردستان و شهر سنندج، هستند. شبیه‌سازی‌های HYSPLIT نشان می‌دهند که ذرات گردوغبار در مناطق خشک و بیابانی جنوب‌غربی عراق (مناطق مانند صحرای الانبار) و شمال‌شرقی عربستان سعودی (مناطق نزدیک به صحرای نفود) شکل گرفته‌اند. این مناطق به دلیل پوشش گیاهی اندک،

رسیده‌اند. این الگو نشان‌دهنده نقش سامانه‌های جوی منطقه‌ای، مانند بادهای شمال‌غربی (شمال) یا جریان‌های ناشی از سامانه‌های کم‌فشار، در انتقال بین منطقه‌ای ذرات است. این نقشه نه تنها مسیرهای غالب را مشخص می‌کند، بلکه به‌عنوان ابزاری برای پیش‌بینی و پایش پدیده‌های گردوغبار در آینده نیز قابل استفاده است. تمرکز بالای مسیرها در مناطق مرزی نشان‌دهنده پتانسیل بالای این مناطق برای تجربه پدیده‌های گردوغبار در شرایط جوی مشابه است. تصویر رنگ واقعی سنجنده MODIS که در تاریخ ۱۵ اردیبهشت ۱۴۰۴ (۴ می ۲۰۲۵) ثبت شده است، به‌عنوان یک منبع مستقل برای تأیید نتایج مدل HYSPLIT استفاده شده است. این تصویر اطلاعاتی درباره توزیع مکانی گردوغبار در زمان نزدیک به رخداد اصلی ارائه می‌دهد. تصویر MODIS حضور گسترده گردوغبار را در مناطق غربی ایران، به‌ویژه در امتداد مرزهای غربی استان کردستان، نشان می‌دهد. این تصویر ابری خاکستری رنگ از ذرات معلق در جو را به‌وضوح نمایش می‌دهد که با مسیرهای شبیه‌سازی شده توسط HYSPLIT هم‌خوانی دارد. مناطق تحت تأثیر گردوغبار در تصویر MODIS با مناطق مشخص شده در نقشه‌های HYSPLIT (به‌ویژه مناطق قرمز و نارنجی در نقشه فراوانی) هم‌پوشانی قابل توجهی دارند. این تطابق نشان‌دهنده دقت بالای مدل‌سازی عددی HYSPLIT در پیش‌بینی مسیر انتقال ذرات است.

این امر نشان‌دهنده رسوب ذرات و تأثیر مستقیم آن‌ها بر کیفیت هوای شهر سنندج و مناطق اطراف است. این بازه زمانی با اوج پدیده گردوغبار در منطقه هم‌خوانی دارد و نشان‌دهنده ورود جریان‌های آلوده به لایه‌های مرزی جو (Boundary Layer) است که مستقیماً بر سلامت انسان و محیط زیست تأثیر می‌گذارد. نقشه فراوانی مسیرها، که بر اساس تحلیل‌های بازگشتی مدل HYSPLIT تولید شده است، توزیع مکانی مسیرهای انتقال ذرات گردوغبار را نشان می‌دهد. این نقشه با استفاده از رنگ‌بندی (مانند قرمز برای مناطق با بیشترین فراوانی و نارنجی برای مناطق با فراوانی کمتر) اطلاعات ارزشمندی درباره الگوهای غالب انتقال گردوغبار ارائه می‌دهد. بیش از ۹۰ درصد از مسیرهای بازگشتی (back trajectories) در مناطق مرزی ایران و عراق، به‌ویژه در نزدیکی شهرهای مرزی مانند قصرشیرین و ایلام، متمرکز شده‌اند. رنگ قرمز در این مناطق نشان‌دهنده تراکم بالای مسیرهای انتقال است که بیانگر انباشت قابل توجه ذرات گردوغبار در لایه‌های نزدیک به سطح زمین است. این تمرکز بالای مسیرها نشان می‌دهد که جریان‌های جوی در این مناطق به‌طور مؤثری ذرات را از منشا (عراق و عربستان) به ایران منتقل کرده‌اند. حدود ۷۰ درصد از مسیرهای جریان با رنگ نارنجی در نقشه، منشا خود را در مناطق شمال‌شرقی عربستان سعودی نشان می‌دهند. این مسیرها از طریق دشت‌های مرکزی عراق به سمت ایران حرکت کرده‌اند و در نهایت به نواحی غربی ایران، به‌ویژه کردستان،





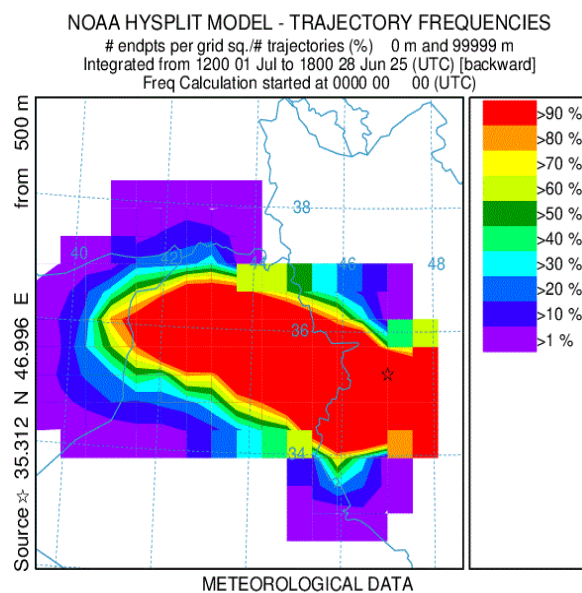
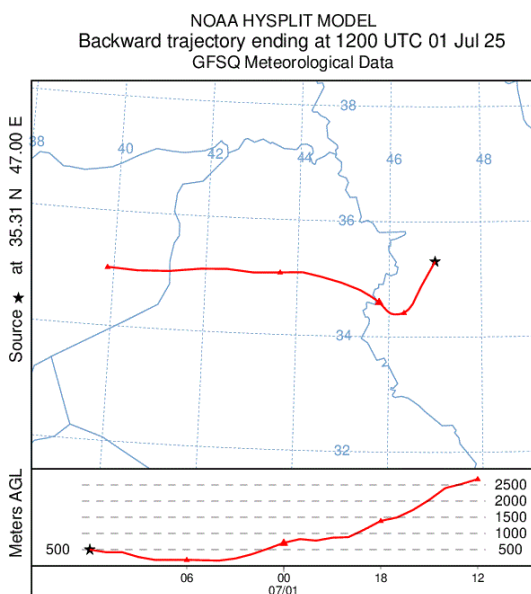
شکل ۷: ردیابی طوفان گرد و غبار شماره ۱ با استفاده از مدل HYSPLIT (مسیرهای عقبگرد)، نقشه فراوانی مسیرهای جوی، نقشه مسیرهای جوی، نقشه رنگ واقعی ذرات گرد و غبار MODIS

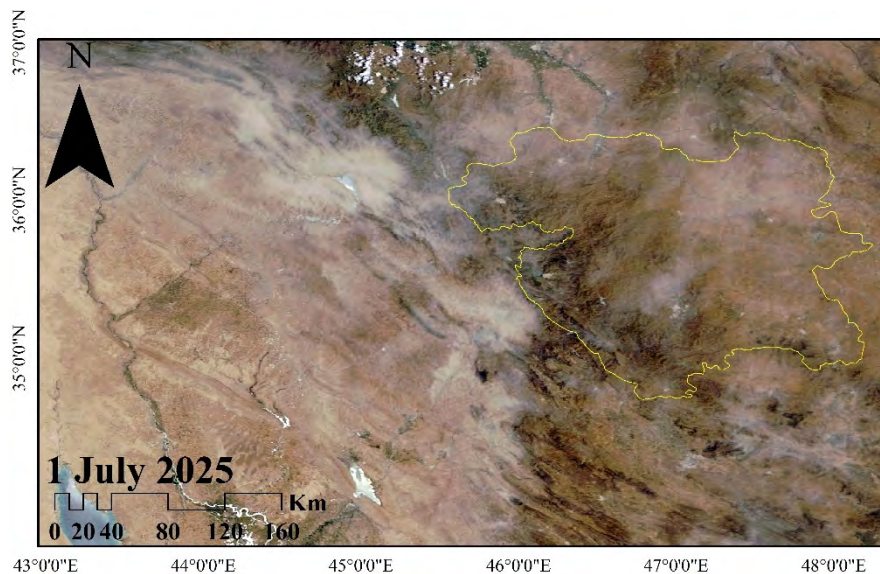
عراق، ارتفاع ذرات به کمتر از ۱۰۰۰ متر رسیده و در نهایت، در مرزهای ایران و عراق، این توده به ارتفاع زیر ۵۰۰ متر کاهش یافته است. این کاهش تدریجی ارتفاع، امکان رسوب ذرات در لایه‌های نزدیک به سطح زمین را فراهم کرده و تأثیر مستقیم آن بر کیفیت هوای مناطق مرزی و استان کردستان را تشدید کرده است. داده‌های مدل نشان می‌دهند که توده گردوغبار در ساعت ۲ بامداد روز ۱۰ تیر ۱۴۰۴ وارد فضای جوی استان کردستان شده است. این زمان‌بندی با اوج تراکم ذرات در لایه‌های مرزی جو (Boundary Layer) هم‌خوانی دارد و نشان‌دهنده ورود مؤثر جریان‌های آلوده به مناطق شهری و روستایی، به‌ویژه در نواحی غربی استان، است. نقشه‌های فراوانی تولیدشده توسط مدل HYSPLIT، توزیع مکانی مسیرهای انتقال ذرات گردوغبار را با استفاده از رنگ‌بندی (قرمز برای فراوانی بالا و نارنجی برای فراوانی متوسط) به تصویر می‌کشند. بیش از ۹۰ درصد مسیرهای شبیه‌سازی‌شده با فراوانی بالا (مشخص‌شده با رنگ قرمز) از کریدورهای مرزی میان سوریه، عراق، و ایران عبور کرده‌اند. این کریدورها به‌عنوان شاه‌راه‌های اصلی انتقال گردوغبار به مناطق غربی ایران، به‌ویژه استان کردستان، شناسایی شده‌اند. مناطق مرزی مانند

گردوغبار شماره ۲. ر اساس نتایج حاصل از تحلیل نقشه‌های مدل HYSPLIT ارائه‌شده در شکل ۸، مشخص شد که در تاریخ ۱۰ تیر ۱۴۰۴ (برابر با ۱ جولای ۲۰۲۵)، تحلیل مسیرهای بازگشتی نشان می‌دهد که منشأ اصلی گردوغبار ورودی به استان کردستان، بیابان‌های خشک و وسیع شمال و غرب عراق و نواحی مرزی سوریه (منطقه سوخته) است. این مناطق به دلیل شرایط اقلیمی خشک، پوشش گیاهی ناچیز، و وزش بادهای شدید (مانند بادهای شمالی یا شمال‌غربی)، مستعد تولید و بلند شدن ذرات گردوغبار هستند. شبیه‌سازی‌های HYSPLIT نشان می‌دهند که ذرات گردوغبار در این مناطق در ارتفاع اولیه حدود ۲۵۰۰ متری از سطح دریا شکل گرفته‌اند، که نشان‌دهنده تأثیر سامانه‌های جوی پرفشار یا جریان‌های همرفتی قوی در بلند کردن ذرات به لایه‌های میانی جو است. توده گردوغبار پس از شکل‌گیری در منطقه سوخته سوریه، به سمت شرق حرکت کرده و در نزدیکی بیابان‌های البعاج عراق به ارتفاع حدود ۱۵۰۰ متر کاهش یافته است. این کاهش ارتفاع به دلیل تغییرات در ساختار دینامیکی جو، از جمله کاهش سرعت باد یا تأثیر لایه‌های پایدار جو، رخ داده است. با نزدیک شدن به منطقه هترا در شمال

است. توزیع مکانی گردوغبار در تصاویر MODIS با مسیره‌های شبیه‌سازی‌شده توسط HYSPLIT هم‌خوانی بالایی دارد. به‌ویژه، مناطق با تراکم بالای ذرات در تصاویر ماهواره‌ای با مناطق قرمز در نقشه‌های فراوانی HYSPLIT مطابقت دارند، که این امر دقت بالای مدل‌سازی عددی را تأیید می‌کند. داده‌های ماهواره‌ای نشان می‌دهند که این رخداد گردوغبار از نظر شدت و گستره، یکی از شاخص‌ترین رویدادهای دوره بررسی شده بوده است. این شدت احتمالاً به دلیل ترکیب عوامل جوی (مانند وزش بادهای قوی) و شرایط سطحی (مانند خشکی خاک در مناطق منشاء) تشدید شده است. با توجه به تکرارپذیری کریپدورهای مرزی سوریه-عراق-ایران به‌عنوان شاه‌راه‌های اصلی انتقال گردوغبار، نشان‌دهنده ضرورت ایجاد یک سیستم پایش مستمر با استفاده از مدل‌های عددی و داده‌های ماهواره‌ای است. چنین سیستمی می‌تواند هشدارهای زود هنگام برای کاهش اثرات بهداشتی و زیست‌محیطی ارائه دهد و مدیریت منطقه‌ای را تسهیل کند. علاوه بر این، ایجاد نقشه‌های تجمیعی مسیره‌های گردوغبار به‌عنوان توصیه‌ای برای پژوهش‌های آینده، می‌تواند درک جامع‌تر از الگوهای انتقال گردوغبار و بهبود سیستم‌های پایش مؤثر باشد.

قصر شیرین، ایلام، و مهران به‌عنوان نقاط کلیدی ورود ذرات به ایران برجسته شده‌اند. تمرکز بالای مسیره‌های قرمز در این کریپدورها نشان‌دهنده تکرارپذیری این الگوی انتقال در رخداد های مشابه گردوغبار است. این امر اهمیت جغرافیایی و جوی این مناطق را به‌عنوان مسیره‌های غالب انتقال ذرات تأیید می‌کند و می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای پیش‌بینی‌های آینده مورد استفاده قرار گیرد. تحلیل نقشه‌های فراوانی نشان می‌دهد که جریان‌های جوی شمال‌غربی یا ناشی از سامانه‌های کم‌فشار منطقه‌ای، نقش کلیدی در هدایت ذرات از بیابان‌های سوریه و عراق به ایران داشته‌اند. تصاویر رنگ واقعی (True Color) سنجنده MODIS در تاریخ ۱۰ تیر ۱۴۰۴، به‌عنوان یک منبع مستقل برای تأیید نتایج مدل HYSPLIT، اطلاعات بصری ارزشمندی درباره توزیع مکانی و شدت پدیده گردوغبار ارائه می‌دهند. تصاویر MODIS حضور گسترده توده گردوغبار را در غرب ایران، به‌ویژه در امتداد مرزهای غربی استان کردستان، تأیید می‌کنند. این توده نه تنها نواحی غربی مانند بانه و مریوان، بلکه مناطق مرکزی و شرقی استان، از جمله شهرهای سنندج، بیجار، و قروه را نیز تحت تأثیر قرار داده است. این گستردگی نشان‌دهنده شدت بالای رخداد و توانایی توده گردوغبار در نفوذ به مناطق داخلی‌تر





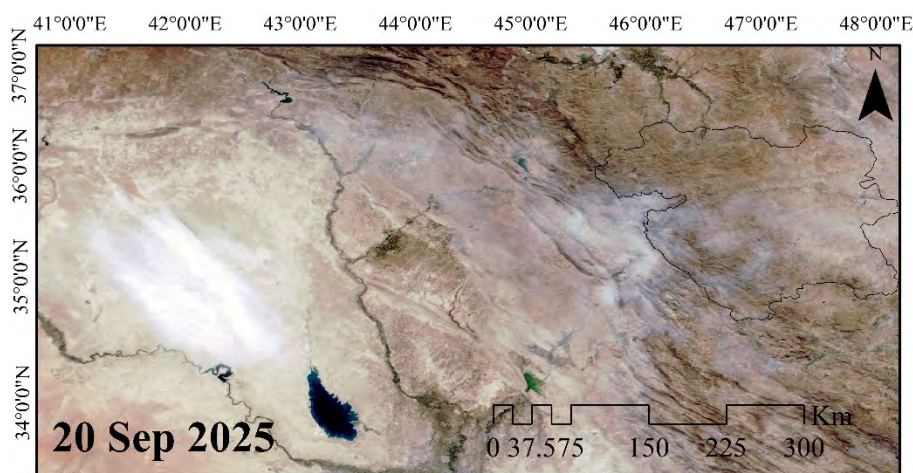
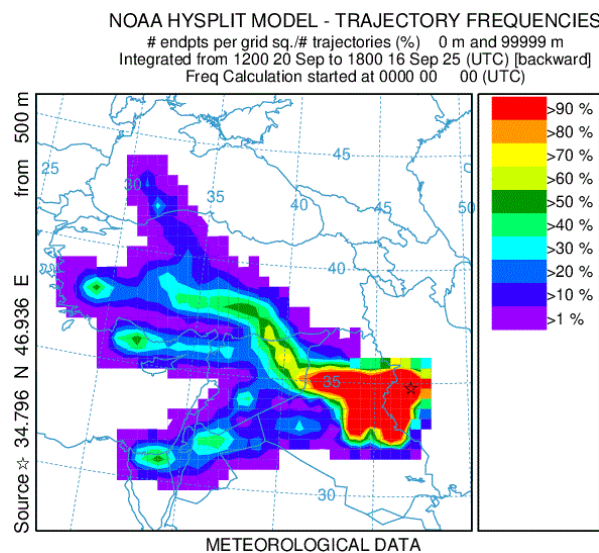
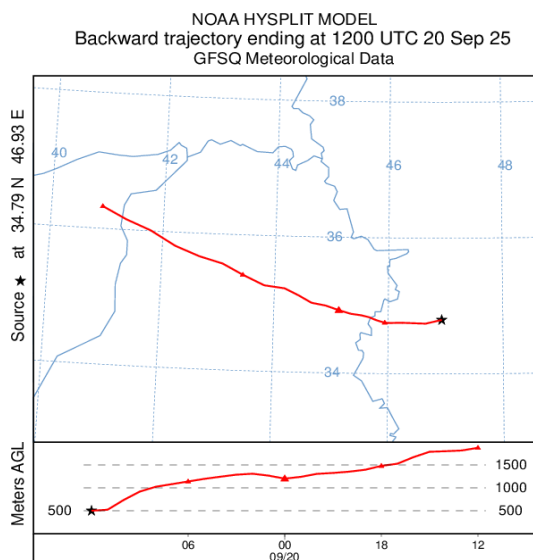
شکل ۸: ردیابی طوفان گرد و غبار شماره ۲ با استفاده از مدل HYSPLIT (مسیرهای عقبگرد)، نقشه فراوانی مسیره‌های جوی، نقشه مسیره‌های جوی، نقشه رنگ واقعی ذرات گرد و غبار MODIS

که امکان رسوب و افزایش تراکم ذرات در نزدیکی سطح زمین و تأثیر مستقیم بر کیفیت هوا در مناطق مرزی و استان کردستان را فراهم کرد. نقشه‌های فراوانی تولیدشده توسط مدل HYSPLIT، توزیع مکانی مسیره‌های انتقال ذرات گردوغبار را با استفاده از رنگ‌بندی نشان می‌دهند؛ به‌طوری‌که رنگ‌های قرمز و نارنجی بیانگر فراوانی بالا و رنگ زرد نشان‌دهنده فراوانی متوسط هستند. بیش از ۷۰ درصد مسیره‌های شبیه‌سازی‌شده با فراوانی بالا از کریدورهای مرزی میان سوریه و عراق عبور کرده و این فراوانی در مناطق مرکزی عراق و مرزهای ایران به حدود ۹۰ درصد رسیده است. این فرکانس‌های بالا، نشان‌دهنده شدت قابل توجه گردوغبار در این مسیره‌ها و نقش کلیدی منابع فرامرزی در تأمین ذرات معلق است. تصاویر MODIS نیز حضور گسترده توده گردوغبار را در استان کردستان تأیید می‌کنند؛ به‌طوری‌که یک لایه کدر در کل استان مشاهده می‌شود، و در مناطق مرکزی عراق، این لایه بزرگ‌تر و متراکم‌تر است، که نشان‌دهنده امتداد مسیر گردوغبار واردشده به استان کردستان می‌باشد. مقایسه مستقیم توزیع مکانی گردوغبار در تصاویر MODIS با نقشه‌های فراوانی HYSPLIT نشان از همخوانی بالای آن‌ها دارد. مناطق

گردوغبار شماره ۳. بر اساس نتایج حاصل از تحلیل نقشه‌های مدل HYSPLIT ارائه‌شده در شکل ۹، مشخص شد که در تاریخ ۲۹ شهریور ۱۴۰۴ (برابر با ۲۰ سپتامبر ۲۰۲۵)، منشأ اصلی گردوغبار ورودی به استان کردستان، بیابان‌های خشک و وسیع شمال غربی عراق، به ویژه مناطق نزدیک بیابان‌های الباج، و نواحی مرزی شمال شرقی سوریه بوده است. این مناطق به دلیل شرایط اقلیمی خشک، پوشش گیاهی اندک و وزش بادهای شدید، از جمله بادهای شمالی و شمال‌غربی، مستعد تولید و بلند شدن ذرات گردوغبار هستند. شبیه‌سازی‌های HYSPLIT نشان داد که ذرات گردوغبار در این مناطق در ارتفاع اولیه حدود ۱۵۰۰ متر از سطح دریا شکل گرفته‌اند؛ این ارتفاع قابل توجه، تأثیر سامانه‌های جوی پرفشار و جریان‌های همرفتی قوی در بلند کردن ذرات به لایه‌های میانی جو را برجسته می‌کند. پس از شکل‌گیری، توده گردوغبار به سمت شرق حرکت کرده و در نزدیکی بیابان‌های مرکزی عراق ارتفاع آن به حدود ۱۰۰ متر کاهش یافت، که نشان‌دهنده تغییرات دینامیکی جو، از جمله کاهش سرعت باد و تثبیت نسبی لایه‌های جو است. با نزدیک شدن به نواحی شمال شرقی عراق و مرزهای ایران، ارتفاع ذرات به کمتر از ۵۰۰ متر رسید،

منابع اصلی آن را روشن می‌سازد، بلکه اطلاعات ارزشمندی برای مدیریت بحران، پیش‌بینی کیفیت هوا و ارائه هشدار به ساکنان و مسئولان محیط‌زیست فراهم می‌کند.

با تراکم بالای ذرات در تصاویر ماهواره‌ای به‌وضوح با مناطق قرمز در نقشه‌های فراوانی HYSPLIT مطابقت دارند، که اعتبار تحلیل مسیرهای برگشتی و توانایی مدل در شناسایی منشأها و مسیرهای غالب را تقویت می‌کند. این تحلیل نه تنها مسیر انتقال گردوغبار و



شکل ۹: 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

سال نسبتاً پایدار بوده و نوسانات مکانی چشمگیری نداشته است. به‌طور کلی، بیشینه سرعت باد به‌صورت مداوم در نواحی شرقی، شمال‌شرقی، جنوب‌شرقی و مرکزی استان ثبت شده و کمترین مقادیر در مناطق غربی مشاهده گردیده است.

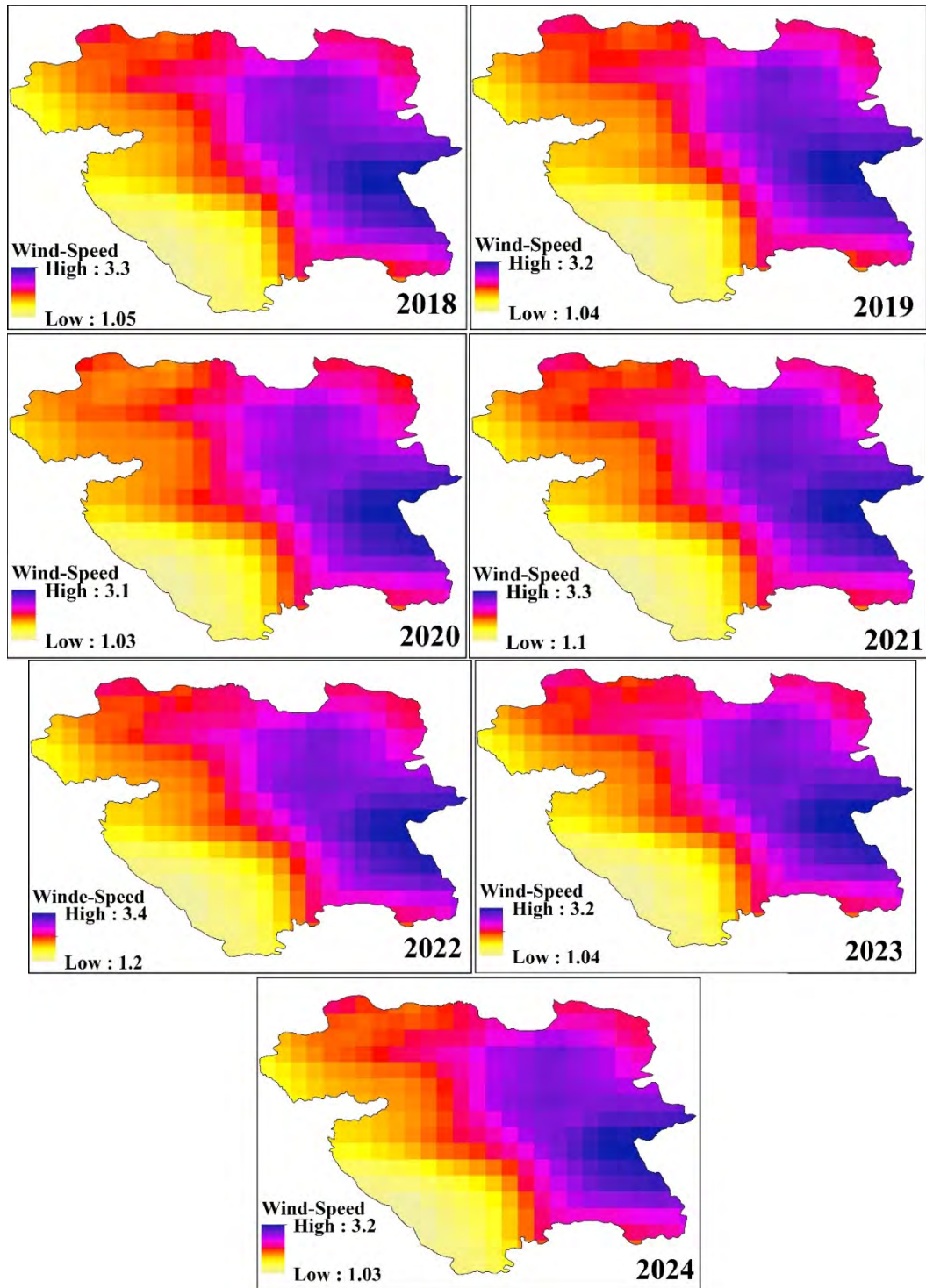
تحلیل سرعت باد: برای بررسی نقش دینامیکی باد در انتقال و پراکنش گردوغبار در استان کردستان، از نقشه‌های سالانه سرعت باد حاصل از مدل ECMWF در بازه زمانی ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۴ استفاده شد. تحلیل مکانی-زمانی این داده‌ها (شکل ۱۰) نشان می‌دهد که الگوی غالب سرعت باد در سطح استان طی این هفت

عراق، سوریه و شمال عربستان سعودی است. جریان‌های باد غالب غربی، شمال‌غربی و جنوب‌غربی، گردوغبار را پس از عبور از زاگرس به استان کردستان منتقل می‌کنند. تحلیل ارتفاعی نشان داد که توده‌های گردوغبار ابتدا در ارتفاعات ۱۵۰۰ تا ۲۵۰۰ متر شکل گرفته و با نزدیک شدن به مرزهای غربی، ارتفاع آن‌ها کاهش یافته و در نواحی غربی استان به زیر ۵۰۰ متر می‌رسد؛ این کاهش ارتفاع باعث نفوذ گردوغبار به لایه‌های نزدیک سطح زمین و افزایش تراکم ذرات در لایه‌های تنفسی شده است. علاوه بر منشأ خارجی، کانون‌های محلی خیزش گردوغبار در شرق استان نیز نقش مهمی دارند. دشت‌ها و اراضی کم‌پوشش مرزی با استان همدان، به دلیل فرسایش‌پذیری خاک و فقدان پوشش گیاهی، استعداد بالایی برای تولید گردوغبار دارند. هنگامی که سرعت باد به آستانه بحرانی می‌رسد، گردوغبار محلی تولید شده و با توده‌های خارجی ترکیب می‌شود. توپوگرافی شرق استان، به‌ویژه ساختار پله‌ای و دره‌های زاگرس، باعث تمرکز جریان باد و افزایش سرعت محلی می‌شود و شهرستان‌های بیجار، قروه، دیواندره و سنندج حتی در شرایط باد متوسط به کانون‌های اصلی گردوغبار تبدیل می‌شوند.

در مجموع، بررسی همزمان داده‌های باد مدل ECMWF، نتایج HYSPLIT و تحلیل‌های مکانی-زمانی شاخص‌های AOD و AAI نشان می‌دهد که شکل‌گیری و پراکنش گردوغبار در استان کردستان ناشی از ترکیب سه عامل اصلی است: ۱) شدت و توزیع مکانی باد، ۲) منشأهای خارجی گردوغبار، و ۳) شرایط فیزیکی-جغرافیایی محلی شامل توپوگرافی و کانون‌های بومی. این تحلیل نشان می‌دهد که میانگین سالانه باد، با وجود تفاوت‌های روزانه، به‌خوبی مناطق پرخطر را شناسایی کرده و پایه‌ای محکم برای پیش‌بینی، پایش و مدیریت اثرات گردوغبار و طراحی اقدامات کاهش محلی و منطقه‌ای فراهم می‌کند.

در سال ۲۰۱۸، میانگین بیشینه سرعت باد در شرق استان، به‌ویژه شهرستان‌های بیجار، قروه، بخش‌هایی از دیواندره و سنندج، برابر با $3/2$ متر بر ثانیه بود؛ در حالی که در غرب استان تنها $1/05$ متر بر ثانیه گزارش شد. این الگوی مکانی کاملاً با نقشه‌های شاخص‌های اپتیکی گردوغبار نظیر AOD و AAI هم‌خوانی دارد، به‌طوری که بیشترین تراکم گردوغبار در همین نواحی شرقی ثبت شده است. در سال ۲۰۱۹، میانگین بیشینه سرعت باد در شرق $3/2$ و در غرب $1/04$ متر بر ثانیه گزارش شد. در سال ۲۰۲۰، سرعت‌ها اندکی کاهش یافته و به ترتیب در شرق و غرب به $3/1$ و $1/03$ متر بر ثانیه رسید. سال ۲۰۲۱ با تقویت گرادیان‌های فشاری منطقه‌ای، افزایش محسوسی در سرعت باد مشاهده شد و مقادیر آن در شرق به $3/3$ و در غرب به $1/1$ متر بر ثانیه رسید. روند افزایشی در سال ۲۰۲۲ به اوج خود رسید و میانگین بیشینه سرعت باد در شرق به $4/3$ متر بر ثانیه رسید، که هم‌زمان با بالاترین میزان غلظت گردوغبار و شاخص AOD در منطقه بوده و نشان‌دهنده ارتباط مستقیم شدت باد و آلودگی جوی است. در سال‌های ۲۰۲۳ و ۲۰۲۴، با وجود نوسانات اندک، الگوی مکانی سرعت باد ثابت باقی ماند و میانگین در شرق $3/2$ و در غرب به ترتیب $1/04$ و $1/03$ متر بر ثانیه بود. با توجه به جدول ۲، میانگین سالانه سرعت باد در شرق استان نزدیک آستانه بحرانی خیزش گردوغبار است؛ این بدان معناست که در برخی روزها سرعت باد از این آستانه فراتر رفته و خیزش ذرات رخ داده، و در برخی روزهای دیگر کمتر بوده است، ولی همواره شرایط برای تولید گردوغبار محلی فراهم بوده است. این یافته توضیح می‌دهد که حتی تغییرات جزئی در سرعت باد می‌تواند موجب تمرکز ذرات در مسیرهای دره‌ای و افزایش تراکم گردوغبار شود.

نتایج مدل‌سازی مسیر معکوس ذرات با استفاده از HYSPLIT نشان داد که منشأ اصلی گردوغبار ورودی به استان عمدتاً از نواحی بیابانی غرب ایران شامل



شکل ۱۰: توزیع مکانی سرعت باد در استان کردستان با استفاده از داده‌های مدل پیش‌بینی عددی مرکز پیش‌بینی میان‌مدت اروپا (ECMWF)

بحث

مقایسه با مطالعات پیشین: بررسی‌های انجام‌شده با استفاده از مدل HYSPLIT، داده‌های ماهواره‌ای Sentinel-5P و سنجنده MODIS و همچنین بازتحلیل‌های سرعت باد مدل ECMWF، نقش قابل توجهی برای مناطق بیابانی واقع در مرزهای غربی ایران، به ویژه در نواحی عراق، سوریه و شمال عربستان، در انتقال و پراکنش گردوغبار به استان کردستان نشان داده است. این مناطق به‌عنوان منابع اصلی گردوغبار، تحت تأثیر سامانه‌های سینوپتیکی منطقه‌ای و الگوهای غالب بادهای غربی و جنوب‌غربی، حجم گسترده‌ای از ذرات معلق را به سمت شرق و نواحی مرکزی استان کردستان هدایت می‌کنند. علاوه بر منابع خارجی، پژوهش فوق نشان می‌دهد که کانون‌های محلی در شرق استان کردستان، شامل دشت‌ها و بیابان‌های کم‌پوشش گیاهی همدان و مناطق خشک اطراف قروه، نیز به عنوان منابع فرعی گردوغبار، به ویژه در زمانی که سرعت باد به آستانه خیزش ذرات می‌رسد، در تشدید این پدیده نقش دارند. در این میان، تخریب پوشش گیاهی، افزایش سطوح اراضی برهنه، فرسایش شدید خاک، تغییر کاربری اراضی و فشارهای انسانی ناشی از فعالیت‌های کشاورزی و چرای مفرط، می‌توانند با کاهش پایداری سطح زمین، شرایط خیزش و انتقال ذرات گردوغبار را تشدید کنند. همچنین، ویژگی‌های توپوگرافی زاگرس به‌ویژه ساختار دره‌ای و کوهستانی، تأثیر مهمی در هدایت جریان باد و تجمع ذرات گردوغبار داشته و الگوهای مکانی گردوغبار را شکل می‌دهد. در سال‌های گذشته، مطالعاتی پیرامون پدیده گردوغبار در استان کردستان و مناطق غربی کشور انجام شده است، در مطالعه‌ای که توسط حسینی و همکاران (۱۴۰۲) انجام شد، با استفاده از داده‌های ۲۰ ساله گردوغبار در ۱۰ ایستگاه استان کردستان و تحلیل عاملی، هفت مؤلفه اصلی شناسایی شد که دو عامل نخست بیش از ۸۰٪ واریانس داده‌ها را توضیح دادند. شاخص AOD از داده‌های MODIS با Google Earth Engine تحلیل و روند آن با آزمون من-کندال بررسی شد. نتایج نشان

دادند که بیشترین وقوع گردوغبار در ماه‌های گرم سال (به‌ویژه تیر و مرداد) بوده و روند AOD در نیمه شرقی استان افزایشی و در نیمه غربی کاهش‌ی بوده است. همچنین شاخص موران وجود الگوی خوشه‌ای گردوغبار را تأیید کرد. نتایج مطالعه حسینی و همکاران، در کلیت خود با یافته‌های پژوهش حاضر هم‌راستا بوده و بر اهمیت نواحی شرقی استان در بروز پدیده گردوغبار تأکید دارند. با این حال، پژوهش حاضر در مقایسه با آن، از لحاظ دامنه و دقت، توسعه یافته‌تر است. در این تحقیق علاوه بر شاخص AOD، از داده‌های سنجنده TROPOMI مستقر بر ماهواره Sentinel-5P برای استخراج شاخص جذب آئروسول (AAI) بهره‌گیری شده و شاخص‌های تلفیقی جدیدی مانند AOD-Sum و DECM به کار رفته‌اند. همچنین، تحلیل دینامیکی باد با استفاده از داده‌های مدل ECMWF و مدل‌سازی مسیر انتقال ذرات گردوغبار از طریق مدل HYSPLIT انجام گرفته است که در مجموع تصویری جامع‌تر و دقیق‌تر از الگوهای مکانی-زمانی گردوغبار در استان ارائه می‌دهد. نگرهبان و همکاران (۱۴۰۳) در پژوهشی با هدف شناسایی مناطق مستعد ایجاد کانون‌های گردوغبار در جنوب‌غرب کشور، از ترکیبی از داده‌های ماهواره‌ای MODIS، CHIRPS، تصاویر Google Earth، و مدل رقومی ارتفاعی SRTM استفاده کردند. ابزارهای مورد استفاده در این مطالعه شامل سامانه Google Earth Engine، نرم‌افزارهای ArcGIS و IDRISI بوده و از شاخص AOD و مدل تصمیم‌گیری WLC برای تحلیل بهره گرفته شده است. این پژوهش در سه مرحله انجام شد که در آن ابتدا نقشه غلظت گردوغبار تهیه، سپس ارتباط آن با پارامترهای محیطی بررسی، و در نهایت مناطق مستعد خیزش گردوغبار شناسایی شد. نتایج نشان داد که بیشترین همبستگی گردوغبار با شاخص NDVI (۰٫۶۳) و ارتفاع (۰٫۶۰۲) بوده و واحدهای ژئومورفولوژیکی مانند تپه‌های ماسه‌ای و دشت بیشترین پتانسیل تولید گردوغبار را دارند. همچنین مناطقی در اطراف شهرهای اهواز، هویزه و حدفاصل امیدیه تا اهواز به‌عنوان کانون‌های فعال گردوغبار

شناسایی شدند. در حالی که مطالعه نگهبان و همکاران صرفاً از شاخص AOD به عنوان معیار اصلی سنجش گردوغبار بهره برده و تمرکز آن بر شناسایی کانون‌های داخلی گردوغبار با تکیه بر داده‌های مکانی و پارامترهای سطح زمین بوده است، پژوهش حاضر با رویکردی جامع‌تر و چندبعدی، نه تنها از شاخص AOD بلکه از مجموعه‌ای از شاخص‌های تکمیلی شامل AOD-Sum، AAI و DECM به منظور تحلیل شدت، نوع و پویایی گردوغبار استفاده کرده است. افزون بر این، در این مطالعه برای تحلیل منشأ و مسیر حرکت گردوغبار، از مدل‌های پیشرفته HYSPLIT و داده‌های باد ECMWF بهره گرفته شده تا نقش جریان‌های جوی و انتقال‌های فرامنطقه‌ای به صورت دقیق‌تری بررسی شود. این رویکرد ترکیبی، امکان تمایز میان منابع داخلی و خارجی گردوغبار را فراهم کرده و تحلیلی عمیق‌تر از عوامل مؤثر در بروز طوفان‌های گردوغبار ارائه داده است که در مطالعات پیشین کمتر به آن پرداخته شده بود. اقوامی و همکاران (۱۳۹۳) در پژوهشی با هدف بررسی علل همدید توفان‌های گردوغبار در استان کردستان، از داده‌های روزانه PM₁₀ ایستگاه سنندج، فشار تراز دریا و ارتفاع ژئوپتانسیل ۵۰۰ هکتوپاسکال در دوره ۲۰۰۹-۲۰۱۲ استفاده کردند. در روش شناسی، روزهای توفانی (PM₁₀ > ۲۰۰ μg/m³) و غیرتوفانی (> ۲۰۰ μg/m³) طبقه‌بندی و با تحلیل خوشه‌ای (روش ادغام وارد) در حوزه وسیع خاورمیانه، الگوهای فشار تراز دریا و ضخامت ۵۰۰-۱۰۰۰ هکتوپاسکال شناسایی شد. نتایج نشان داد سه الگوی اصلی فشار و سه الگوی ضخامت در رخداد توفان‌ها مؤثرند؛ به‌ویژه ناه عمیق بر شرق مدیترانه، گسترش پرفشار از بیابان‌های لیبی، مصر، شمال عربستان و عراق به سمت ایران، و نقش پرارتفاع عربستان در هدایت جریان به غرب و جنوب غربی ایران (از جمله سنندج). توفان‌ها عمدتاً در نیمه گرم سال رخ می‌دهند و اوج فراوانی و شدت آن‌ها در تیرماه است. پژوهش حاضر علاوه بر بررسی مسرهای گردوغباری به بررسی شاخص‌های مختلف گردوغبار با استفاده از داده‌های

سنجش از دور پرداخته و پایش مکانی-زمانی سالانه را برای کل استان ارائه داده همچنین نقشه باد سالانه استان را برای سال‌های ۲۰۱۸-۲۰۲۴ آورده تا درک بهتری از پراکنش گردوغبار صورت گیرد، که نسبت به مطالعه اقوامی و همکاران (۱۳۹۳) جامع‌تر می‌باشد. حسینی و همکاران (۱۴۰۴) پدیده گردوغبار استان کردستان را در دوره ۱۹۹۲-۲۰۲۲ با میانگین ۳۲ روز گردوغباری در سال بررسی کردند. داده‌های استفاده شده شامل مشاهدات ۸ ایستگاه همدیدی، محصولات ماهواره‌ای، AOD و داده‌های بازکاوی جو بود. همچنین با استفاده از مدل HYSPLIT، مسیرهای انتقال ذرات گردوغبار و منابع اصلی آن‌ها شناسایی شد. نتایج نشان داد که بهار ۴۰٪ و تابستان ۲۷٪ بیشترین تعداد روزهای گردوغباری را دارند و پراکنش مکانی با حرکت از غرب به شرق و شمال به جنوب استان کاهش می‌یابد. منابع اصلی گردوغبار شامل رسوبات کف رودخانه‌ها و هورهای خشک شده عراق و بیابان‌های سوریه، اردن و شمال شبه‌جزیره عربستان بوده است. پژوهش حاضر نیز همسو با نتایج حسینی و همکاران (۱۴۰۴) نشان داد که گردوغبار مناطق غربی استان عمدتاً از مرزهای خارجی وارد می‌شود. با این حال، مطالعه حاضر علاوه بر این، پایش مکانی و زمانی شاخص‌های گردوغبار MODIS AODmax، AAI، Sentinel-5 و DECM را نیز مورد بررسی قرار داد و نقش گردوغبار محلی در مناطق شرقی استان را مشخص نمود. برای افزایش دقت تحلیل‌ها، نقشه‌های سرعت باد استخراج و با شاخص‌های گردوغبار تلفیق شد و همچنین همبستگی داده‌های واقعی آلودگی با داده‌های ماهواره‌ای AOD و AAI تحلیل گردید، که امکان ارزیابی دقیق‌تر منابع و پراکنش گردوغبار در سطح استان را فراهم ساخت. بیرانوند و همکاران (۱۴۰۳) با استفاده از داده‌های هواشناسی ۳۳ ایستگاه همدیدی طی سال‌های ۱۹۸۷ تا ۲۰۲۲ و داده‌های بازتحلیل ERA-Interim، روزهای گردوغبار را با دید افقی ≥ 1 کیلومتر در حداقل سه ایستگاه شناسایی کردند. تحلیل نقشه‌های فشار سطح و ارتفاع ژئوپتانسیل نشان

داد دو الگوی باد شمال تابستانه و زمستانه نقش اصلی در انتقال گردوغبار به غرب ایران دارند. از ۲۲۹ رخداد، ۷۰ مورد (۳۰/۶٪) مربوط به باد شمال تابستانه و ۲۵ مورد (۱۰/۹٪) به باد شمال زمستانه بود. منشاء گردوغبار تابستانه عمدتاً کانون‌های شمال عراق شامل دریاچه ثرثار، نینوا و کرکوک بود، در حالی که در زمستان سهم کانون‌های مرکزی عراق کاهش (حدود ۱۵٪) و نقش مناطق شرق و جنوب شرق عراق، شمال عربستان، کویت و جنوب غرب ایران افزایش یافت. این پژوهش اهمیت الگوهای فصلی باد را در انتقال گردوغبار به ایران نشان داد. در حالی که مطالعه بیرانوند و همکاران (۱۴۰۳) عمدتاً به تحلیل الگوهای باد شمال تابستانه و زمستانه و نقش آن‌ها در انتقال گردوغبار به غرب ایران از طریق داده‌های هواشناسی و ERA-Interim پرداخته است، پژوهش حاضر با رویکردی جامع‌تر، علاوه بر تحلیل مکانی-زمانی سرعت باد در استان کردستان، از مدل پیشرفته HYSPLIT برای ردیابی مسیر گردوغبار بهره برده است. نتایج نشان داد که جریان‌های گردوغبار از مناطق غربی کشور و کشورهای همجوار شامل عراق، سوریه و عربستان از ارتفاعات بالا (۱۵۰۰ تا ۲۵۰۰ متر) شروع شده و با نزدیک شدن به مناطق مرزی ایران به ارتفاعات کمتر از ۳۰۰ متر می‌رسند که زمینه انتقال گردوغبار به داخل استان کردستان را فراهم می‌کند. همچنین نقش مهم بیابان‌ها و مناطق کویری داخلی و شرق استان کردستان در تولید گردوغبار به‌ویژه در شرایط محلی مورد تأکید قرار گرفت. علاوه بر آن، استفاده همزمان از شاخص‌های ماهواره‌ای متنوع شامل AOD، AOD-Sum، AAI و DECM، تحلیل جامعی از پدیده گردوغبار ارائه داد که نقش ترکیبی منابع داخلی و جریان‌های انتقالی خارجی را به‌خوبی نمایان ساخت. این رویکرد چندمنبعی، شناخت عمیق‌تر و دقیق‌تری از فرآیندهای تولید و انتقال گردوغبار در منطقه را فراهم آورده که فراتر از محدوده تحلیل‌های صرفاً بادی مطالعه بیرانوند و همکاران است. نتایج حاصل از این پژوهش می‌تواند به بهبود درک فرآیندهای تولید، انتقال و پراکنش

گردوغبار در استان کردستان و مناطق مجاور کمک شایانی کند و زمینه‌ساز توسعه مدل‌های پیش‌بینی دقیق‌تر گردوغبار شود. این یافته‌ها، علاوه بر ارزش علمی، پیامدهای عملی و مدیریتی مهمی برای سیاست‌گذاران محیط‌زیست استان و کشور دارند. به‌ویژه، اطلاعات مکانی-زمانی دقیق گردوغبار و شناخت کانون‌های فعال، می‌تواند در برنامه‌ریزی اقدامات پیشگیرانه، تعیین اولویت در کنترل منابع داخلی گردوغبار و مدیریت پوشش گیاهی حفاظتی مورد استفاده قرار گیرد. همچنین، با شناسایی نقش باد و توپوگرافی در تمرکز و انتقال ذرات، تصمیم‌گیران می‌توانند راهکارهایی مانند طراحی کمربندهای سبز، اصلاح کاربری زمین و کنترل فعالیت‌های انسانی در مناطق بحرانی را به‌طور هدفمند اجرا کنند. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های آینده، با بهره‌گیری از داده‌های دقیق‌تر میدانی و ماهواره‌ای، تحلیل‌های چندمنبعی گسترده‌تری انجام شود. همچنین، ارتباط بین فعالیت‌های انسانی و تغییرات پوشش زمین با شدت گردوغبار باید مورد بررسی قرار گیرد تا سیاست‌های مدیریت خاک، توسعه شهری و کشاورزی پایدار با دید علمی و مبتنی بر داده تدوین شود. در این راستا، اجرای اقدامات عملی برای کاهش تولید و انتشار گردوغبار نیز ضروری است؛ از جمله احیای جنگل‌ها و مراتع بلوط، کشت گیاهان مقاوم به خشکی و باد مانند سالسولا در مناطق بیابانی، تثبیت خاک در مناطق بحرانی، مدیریت بهینه مراتع و جلوگیری از چرای بی‌رویه دام، ایجاد کمربندهای سبز حفاظتی در اطراف کانون‌های خیزش گردوغبار و احیای پوشش گیاهی طبیعی در اراضی آسیب‌دیده نیز صورت گیرد. در نهایت، توسعه سامانه‌های هشدار زودهنگام بر اساس مدل‌های ردیابی دینامیکی گردوغبار، می‌تواند به کاهش اثرات منفی پدیده گردوغبار در سطح منطقه‌ای و فرامنطقه‌ای، حفاظت از سلامت عمومی و کاهش خسارات اقتصادی کمک کند. این رویکرد تلفیقی، امکان اتخاذ تصمیمات مدیریتی سریع و مؤثر را برای مقابله با مخاطرات گردوغبار فراهم می‌سازد و به سیاست‌گذاران ابزار علمی و عملی ارزشمندی به‌ویژه

در زمینه برنامه‌ریزی محیط‌زیستی، کشاورزی و مدیریت منابع طبیعی استان و کشور ارائه می‌دهد. این پژوهش با محدودیت‌هایی نیز همراه بود که باید در تفسیر نتایج در نظر گرفته شوند. داده‌های ماهواره‌ای ممکن است تحت تأثیر خطاهای سنجنده و پوشش ابری قرار گیرند و دسترسی به داده‌های زمینی کامل نیز محدود بود؛ به‌طور مثال، اطلاعات آلودگی هوا تنها برای ایستگاه سنندج در سال ۲۰۲۳ در دسترس بود و داده‌های سرعت باد ایستگاه‌ها در دسترس نبود. با وجود این محدودیت‌ها، تحلیل‌های انجام‌شده با بهره‌گیری از داده‌های موجود، توانستند شناخت ارزشمندی از رفتار و الگوهای پراکنش گردوغبار در استان کردستان ارائه دهند.

نتیجه‌گیری

تحلیل روند گردوغبار در استان کردستان طی سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۴ بر اساس شاخص‌های AOD، AAI، AOD-Sum و DECM نشان داد که شدت و فراوانی گردوغبار در این دوره دارای نوسانات زمانی و مکانی مشخصی بوده است. در سال ۲۰۱۸، میانگین AOD برابر ۰٫۳۱ و AAI حدود ۰٫۱۴ ثبت شد که بیانگر شرایط ناسالم کیفیت هوا در نواحی مرکزی، جنوبی و شرقی استان بود. مقدار AOD-Sum به ۷۳٫۲ رسید که بیش از ۷۰ روز آلودگی را نشان می‌دهد، در حالی که شاخص DECM کمتر از ۵۰ روز رخداد گردوغبار را ثبت کرد. در سال ۲۰۱۹، میانگین AOD به ۰٫۲۵ کاهش یافت، اما پراکنش آلودگی به شمال‌غرب استان گسترش پیدا کرد. مقدار AAI به ۰٫۰۴ کاهش یافت، در مقابل AOD-Sum با افزایش به ۹۸٫۴ بیش از ۸۰ روز آلودگی را نشان داد و شاخص DECM نیز حدود ۷۰ تا ۸۰ روز گردوغبار را ثبت نمود. این وضعیت بیانگر افزایش تداوم زمانی گردوغبار با وجود کاهش شدت متوسط آن است. در سال ۲۰۲۰، میانگین AOD دوباره به ۰٫۲۹ افزایش یافت و شرایط بحرانی به‌ویژه در سنندج، قروه و مریوان مشاهده شد. مقدار AAI به کمترین حد خود (۰٫۰۱) رسید، اما مناطق مرکزی و شرقی همچنان آلوده باقی

ماندند. مقدار AOD-Sum برابر ۷۱٫۷ و شاخص DECM در سنندج کمتر از ۵۰ روز بود. در سال ۲۰۲۱، تمرکز آلودگی به نواحی مرزی همدان و زنجان منتقل شد. مقدار AAI به ۰٫۱۰ افزایش یافت، AOD-Sum به ۸۳٫۴ رسید و شاخص DECM بیش از ۷۶ روز گردوغبار را در بیجار و قروه ثبت کرد. سال ۲۰۲۲ بحرانی‌ترین سال دوره مطالعه بود؛ میانگین AOD در حدود ۰٫۲۹ باقی ماند، اما AAI به ۰٫۶۷ رسید که نشان‌دهنده شرایط بسیار ناسالم در شرق استان (قروه، بیجار و کامیاران) است. مقدار AOD-Sum برابر ۱۲۷٫۸ ثبت شد که بیش از ۱۲۰ روز آلودگی را در مریوان، بانه و کامیاران نشان می‌دهد و شاخص DECM نیز بیش از ۱۵۰ روز گردوغبار را در قروه و بیجار گزارش کرد. در سال ۲۰۲۳، بهبود نسبی مشاهده شد؛ AAI به ۰٫۵۱ کاهش یافت، در حالی که AOD-Sum و DECM به ترتیب به ۸۶٫۲ و حدود ۱۱۰ روز رسیدند و شرایط در نواحی مرکزی و غربی استان بهبود پیدا کرد. در سال ۲۰۲۴، میانگین AOD در حدود ۰٫۲۹، مقدار AAI برابر ۰٫۴۱، AOD-Sum معادل ۸۵٫۱ و شاخص DECM با ۶۵ روز رخداد گردوغبار به کمترین مقدار در کل دوره رسید. برای بررسی منشأ گردوغبار، رخدادهایی با AQI نزدیک به ۲۵۰ در سال ۲۰۲۵ تحلیل شد. در رخداد ۱۶ اردیبهشت ۱۴۰۴، منشأ ذرات بیابان‌انبار عراق و بیابان نفود عربستان شناسایی شد؛ ذرات از ارتفاع حدود ۱۰۰۰ متر آغاز شده و با کاهش به زیر ۵۰۰ متر وارد استان شدند، به‌طوری که بیش از ۹۰٪ مسیرها در مرز ایران و عراق و حدود ۷۰٪ آن‌ها منشأ عربستان داشتند. در رخداد ۱۰ تیر ۱۴۰۴، ذرات از بیابان‌های جنوب‌غرب عراق و مرز سوریه (سوخنه) و از ارتفاع حدود ۲۵۰۰ متر منشأ گرفته و پس از عبور از کریدورهای سوریه-عراق-ایران به زیر ۵۰۰ متر رسیدند. مسیرهای اصلی شامل قصرشیرین، ایلام، مهران، بانه و مریوان بوده و تطابق بالایی بین تصاویر MODIS و مدل HYSPLIT مشاهده شد. تحلیل داده‌های باد ECMWF نشان داد بیشینه سرعت باد بین ۳٫۲ تا ۳٫۴ متر بر ثانیه در شرق استان و کمینه

فرامرزی، شرایط باد و ویژگی‌های محلی است و نتایج عددی این مطالعه مبنای قابل اتکایی برای پایش و مدیریت مخاطرات گردوغبار فراهم می‌کند.

تقدیر و تشکر

این مقاله مستخرج از پایان نامه ارشد نویسنده اول می‌باشد و مراتب تشکر و قدردانی از حمایت مادی و معنوی دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی ساری به جا آورده می‌شود.

آن بین ۱،۰۳ تا ۱،۱ متر بر ثانیه در غرب استان ثبت شده است. سال ۲۰۲۲ با سرعت ۳،۴ متر بر ثانیه و هم‌زمانی با بیشترین مقادیر AOD و AAI، بحرانی‌ترین سال بود. نتایج HYSPLIT نشان می‌دهد توده‌های گردوغبار در ارتفاع ۱۵۰۰ تا ۲۵۰۰ متر وارد شده و در نواحی مرکزی استان رسوب کرده‌اند. علاوه بر منابع فرامرزی، کانون‌های محلی در شرق استان و نقش توپوگرافی زاگرس در هدایت و تمرکز گردوغبار در بیجار و قروه نیز مؤثر بوده است. به‌طور کلی، گردوغبار در استان کردستان نتیجه تعامل منابع

منابع

1. AL-Yahyai, S., Charabi, Y., Gastli, A., & Al-Alawi, S. (2010). Assessment of wind energy potential locations in Oman using data from existing weather stations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(5), 1428–1436. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.01.008>
2. Arab Ameri, F., Mohammadian Behbahani, A., Ownegh, M. and Arami, S. H. (2024). Statistical Analysis of Spatio-Temporal Variations of Dust Occurrences in Golestan Province. *Desert Ecosystem Engineering*, 12(40), 59-72. doi: 10.22052/deej.2024.254036.1037
3. Bahrami, R., & Separi, M. (2021). Investigating the socio-economic and environmental effects of drought on rural areas of Kurdistan Province of Iran. *Village and Development*, 24(1), 173–194. <https://doi.org/10.30490/rvt.2021.341691.1194>
4. Beyranvand, A., Azizi, G. and Alizadeh, O. (2024). The Role of Summer and Winter Shamal Winds in the Occurrence of Dust Storms in Western Iran. *Physical Geography Research*, 56(4), 1-19. doi: 10.22059/jphgr.2025.372219.1007809
5. Copernicus Programme. (2018). Sentinel-5P: Monitoring air pollution and climate. European Commission. Retrieved from <https://www.copernicus.eu/en/copernicus-services/atmosphere/sentinel-5p>
6. 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
7. Fani, B., Banj Shafiei, A., Pourhashemi, M., & Heidari, M. (2024). Changes of some soil components under the influence of thinning intensity in Marivan forests. *Forest Research and Development*, 10(2), 183–203. <https://doi.org/10.30466/jfrd.2023.54798.1680>
8. Figueiredo Filho, D. B., Silva Júnior, J. A., & Rocha, E. C. (2011). What is R² all about? *Leviathan (São Paulo)*, 3(3), 60–68. <https://doi.org/10.11606/issn.2237-4485.lev.2011.132282>
9. Garcia-Prats, A., Carricondo-Antón, J. M., Ippolito, M., De Caro, D., Jiménez-Bello, M. A., Manzano-Juárez, J., & Pulido-Velazquez, M. (2025). High-resolution spatially interpolated FAO Penman-Monteith crop reference evapotranspiration maps of Sicily Island (Italy) and Jucar River system (Spain) using AgERA5 and ERA5-Land reanalysis datasets. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 60, 102531. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102531>
10. Gong, H., Li, Y., Zhang, J., Zhang, B., & Wang, X. (2024). A new filter feature selection algorithm for classification task by ensembling Pearson correlation coefficient and mutual information. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 131, 107865. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.107865>

11. Hosseini, S. A., Rahnama, M., Bagheri, H., Panahi, A., Charehkhah, B., Ghamari, K., Khoddam, N., Noori, F., & Sehat Kashani, S. (2025). Synoptic-satellite analysis of dust in Kurdistan Province. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 14(2), 45–67. <https://doi.org/10.22067/geoeh.2025.85624.1434>
12. Hosseini, S. M., Khoramabadi, F. and tahani yazdly, M. (2024). Analysis of Spatio-Temporal Changes of Dust Hazard in Kurdistan Province. *Environmental Researches*, 14(28), 181-197. doi: 10.22034/eiap.2024.191709
13. Jahanbakhsh, S., Rezaei Banafsheh, M., Khorshiddoust, A. and Farahmand, H. (2024). Spatio-temporal Seasonal Distribution of Dust in East and Southeast Iran Based on Station and Remote Sensing Data. *Journal of Geography and Planning*, 28(87), 20-1. doi: 10.22034/gp.2024.17732
14. Nabiuni, S., Hassanabadib, D., & Faraji Rad, A. (2023). Analysis of the impact of climate change on security (Case study: Kurdistan Province). *Journal of Geographical Studies of Mountainous Areas*, 3(12), 163–183. <https://doi.org/10.52547/gsma.3.4.163>
15. NASA (National Aeronautics and Space Administration), 2015. GMS: NASA Images.
16. Negahban, S., Ganjaeian, H., Ghisarian, S. S. and Ebrahimi, A. (2024). Identifying the Centers of Dust and Analyzing the Factors Influencing Its Occurrence Based on Remote Sensing Data (Case Study: Southwest Iran). *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 13(4), 386-405. doi: 10.22067/geoeh.2024.89088.1504
17. NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). NOAA ESRL global monitoring laboratory: SURFRAD aerosol optical depth. <https://gml.noaa.gov/grad/surfrad/aod/> (accessed 2020)
18. NOAA Research. (2020). NOAA ESRL global monitoring laboratory: SURFRAD aerosol optical depth. <https://gml.noaa.gov/grad/surfrad/aod/>
19. Peshev, Z., Chaikovsky, 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 Sensing*, 15(15), 3833. <https://doi.org/10.3390/rs15153833>
20. Qhavami, S., Kaboodvandpour, S., Mohammadi, B., & Amanollahi, J. (2014). Analysis of synoptic patterns affecting the occurrence of dust storms in Kurdistan province. *Journal of Climate Research*, 5(19-20), 67-80. https://clima.irimo.ir/article_15696.html?lang=en
21. Qor-el-aïne, A., Béres, A., & Géczi, G. (2021). Dust storm simulation over the Sahara Desert (Moroccan and Mauritanian regions) using HYSPLIT. *Atmospheric Science Letters*, 23(4), e1076. <https://doi.org/10.1002/asl.1076>
22. Ranjbar, A. and Ebrahimi-Khusfi, Z. (2024). Analysis of internal and external dust contributions and their spatial-temporal changes in Kerman province. *Journal of Arid Biome*, 14(1), 1-19. doi: 10.29252/aridbiom.2024.20961.1979
23. 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>
24. Shayesteh, K. and Gharibi, S. (2022). Application of GEE in Dust Actual Sources Detection using Sentinel- 5 and Modis. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 11(34), 1-16. doi: 10.22111/jneh.2022.38729.1813
25. Shirgholami, M. R. (2023). Identifying trajectories and sources of dust events in Yazd province using HYSPLIT model and remote sensing data. *Journal of Arid Biome*, 13(2), 35–52. <https://doi.org/10.29252/aridbiom.2024.20805.1969>
26. Singh, S., Avtar, R., Jain, A., Alsulamy, S., Ouda, M. M., & Kharrazi, A. (2025). Identifying micro-level pollution hotspots using Sentinel-5P for the spatial analysis of air quality degradation in the National Capital Region, India. *Sustainability*, 17(5), 2241. <https://doi.org/10.3390/su17052241>

27. 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. *EGUsphere* [preprint]. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-3596>
28. Treminio, R. S., Webb, N. P., Dhital, S., Faist, A., Newingham, B., Brungard, C., DuBois, D., Edwards, B. L., & Kachergis, E. (2025). Dust transport pathways from the Great Basin. *Aeolian Research*, 72, 100958. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2024.100958>
29. Varga, G., Meinander, O., Rostási, Á., Dagsson-Waldhauserova, P., Csávics, A., & Gresina, F. (2023). Saharan, Aral-Caspian and Middle East dust travels to Finland (1980–2022). *Environment International*, 180, 108243. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.108243>
30. White, J. R., Balling, R. C., & Cervený, R. S. (2023). Trajectory analysis of central Sonoran Desert dust storms. *Journal of Arid Environments*, 219, 105077. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2023.105077>
31. 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 Sensing*, 14(13), 112–125. <https://doi.org/10.3390/rs14133065>
32. Xiong, J., Li, J., Gao, F., & Zhang, Y. (2023). City wind impact on air pollution control for urban planning with different time-scale considerations: A case study in Chengdu, China. *Atmosphere*, 14(7), 1068. <https://doi.org/10.3390/atmos14071068>
33. 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>
34. 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. *Scientific Reports*, 15, Article 13626. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-96935-2>
35. Zhang, Y., Wang, N., & Jin, S. (2025). Performance and evaluation of remote sensing satellites for monitoring dust weather in East Asia. *Atmospheric Measurement Techniques*, 18(18), 4885–4905. <https://doi.org/10.5194/amt-18-4885-2025>
36. Zhang, Z., Kuang, Z., Yu, C., Wu, D., Shi, Q., Zhang, S., Wang, Z., & Liu, D. (2024). Trans-boundary dust transport of dust storms in northern China: A study utilizing ground-based lidar network and CALIPSO satellite. *Remote Sensing*, 16(7), 1196. <https://doi.org/10.3390/rs16071196>
37. 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>