



Synoptic- Ssatellite Analysis of Dust in Kurdistan Province

Seyed Asaad Hosseini¹ , Mehdi Rahnama² , Hamid Bagheri³ , Ali Panahi⁴ , Bahram Charehkhah⁵ , Khabat Ghamari⁶ , Noushin Khoddam⁷ , Faezeh Noori⁸ , Saviz Sehat Kashani⁹ *

^{1&3}Synoptic Meteorology Expert, Kurdistan Province Meteorological Office, Sanandaj, Iran

²Associate Professor, Sand and Dust Storm International Research Center, Research Institute of Meteorology and Atmospheric Science (RIMAS), Tehran, Iran

⁴Deputy Director of Development and Forecasting, Kurdistan Province Meteorological Office, Sanandaj, Iran

⁵Deputy Director of Technical and Stations Network, Kurdistan Province Meteorological Office, Sanandaj, Iran

⁶Weather Forecasting Expert, Kurdistan Province Meteorological Office, Sanandaj, Iran

^{7&8}Researcher, Sand and Dust Storm International Research Center, Research Institute of Meteorology and Atmospheric Science (RIMAS), Tehran, Iran

⁹*Associate Professor, Sand and Dust Storm International Research Center Research Institute of Meteorology and Atmospheric Science (RIMAS), Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article history

Received: 08 September 2024

Revised: 23 October 2024

Accepted: 27 October 2024

Available Online: 12 June 2025

Keywords:

Dust Storms

Synoptic Analysis

Aerosol Optical Depth (AOD)

HYSPLIT Model

Kurdistan Province

ABSTRACT

Dust events have been a serious environmental issue causing annual damage to infrastructure in Kurdistan Province in western of Iran. This study investigated the frequency and source regions of dust events during 1992–2022, indicating an average of approximately 32 dusty days per year. In addition, data from eight weather stations, satellite images, and aerosol optical depth (AOD) products were collected, while the HYSPLIT model was used to track the trajectories of dust particles. The results revealed that the highest dust activity occurred in spring (40%), followed by summer (27%). The intensity of dust decreases from west to east and from north to south. The examination of this event shows that dust forms and moves due to low-pressure systems over Iraq and Syria, along with unstable weather conditions. Most dust originates from sediments in riverbeds and dried wetlands in central and southern Iraq. Additional sources include deserts in Syria, Jordan, and the northern Arabian Peninsula, which produce increased dust during spring and summer.

*Corresponding Author's: Dr. Saviz Sehat Kashani

E-mail address: savizsehat@yahoo.com

How to cite this article: Hosseini, S. A., Rahnama, M., Bagheri, H., Panahi, A., Chehkhah, B., Ghamari, Kh., ... & 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>



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

According to the World Meteorological Organization, dust storms are atmospheric phenomena that typically occur in arid and semi-arid regions with wind speeds exceeding 15 m/s. Dust storms usually consist of particles ranging from 0.5 to 0.1 mm and even smaller, which move in a saltation or suspended manner and can travel long distances. Due to its climatic conditions and proximity to desert regions in the east, northeast, west, and southwest, Iran frequently experiences this phenomenon. The incidence of dust storms has increased over recent decades across most parts of the country, including Kurdistan Province. Given the substantial environmental and economic impacts of dust storms, which are considered natural hazards, this study aims to examine the synoptic conditions and satellite imagery of dust events in Kurdistan Province to identify their origins and dominant patterns.

Material and Methods

The study area is Kurdistan Province, covering 28,203 km² in western Iran. This research employed statistical and synoptic analyses using data from eight synoptic meteorological stations across the province. Dust event data (coded as 06) were collected at 3-hour intervals (SYNOP reports) over a 31-year period (1992–2022). Additionally, geopotential height data at 500, 700, and 850 hPa levels, sea level pressure (SLP), and vector wind data were obtained from the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Gridded datasets were processed and analyzed using factor analysis and hierarchical clustering (Ward's method) to identify the prevailing synoptic patterns associated with dust generation. For a detailed case study, the large-scale dust storm occurring from July 4 to 7, 2009, was selected. In addition to synoptic analysis, Aerosol Optical Depth (AOD) was retrieved using the MOD04 L1B product from the MODIS sensor on the Terra satellite. AOD at 550 nm was analyzed using a combination of the Deep Blue and Dark Target algorithms to assess the presence of suspended dust particles. Furthermore, the HYSPLIT model was used for backward trajectory analysis at 500, 1000, and 1500 meters to trace the origin and pathway of dust-laden winds during the storm.

Results and Discussion

The analysis of dust frequency across stations revealed that Baneh (in the west) recorded the highest average of 48 dust days per year, while Kamyaran (in the south) had the lowest with 25 days. Overall, Kurdistan Province experiences an average of 32 dust days annually. Spatial distribution patterns showed that the western and central regions are more affected by dust events compared to the eastern parts, while northern regions experience more dust days than southern ones.

Three dominant synoptic patterns associated with dust events were identified based on 500 hPa geopotential height data. These patterns commonly involve low-pressure systems over Iraq and Syria, which enhance atmospheric instability over nearby deserts and position Kurdistan within the influence of deep troughs—creating favorable conditions for dust transport.

The dust storm of July 5, 2009, analyzed through AOD imagery, showed higher values in the western parts of Kurdistan and lower values in the northern and eastern parts. The AOD retrieval using Deep Blue and Dark Target algorithms effectively detected dust-affected areas. The storm's source regions were identified as the deserts of Iraq, Syria, Jordan, Saudi Arabia, and the broader Mesopotamian plain.

Combined analysis of satellite images and HYSPLIT trajectory modeling revealed three main dust sources affecting Kurdistan:

1. Primary Source: Central Iraq—particularly sediment-rich riverbeds and dried ponds—as well as Jordanian deserts, most active in spring and associated with the most severe events.
2. Secondary Source: Northern Iraq and eastern Syria, with moderate contributions during spring and summer.

3. Tertiary Source: Southern Iraq and northeastern Saudi Arabia, which predominantly affect the region in the warm season but may contribute less frequently during colder months.

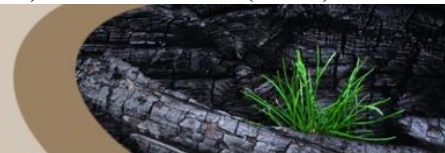
Conclusion

Statistical analysis confirmed that the spatiotemporal distribution of dust days across Kurdistan is shaped by both topographic features and distance from dust sources, with a west-to-east decreasing trend in frequency. Seasonally, spring and summer account for the majority of dust activity 40% and 27% respectively though events occur throughout the year at lower intensities.

Baneh station reported the highest total number of dust days (1111), while Kamyaran recorded the lowest (405) during the 31-year period. Synoptic analysis revealed three distinct atmospheric patterns contributing to dust events. AOD measurements confirmed that dust concentrations are higher in the western parts of the province. Dust tracking via satellite imagery and HYSPLIT confirmed the region's primary external sources: central and southern Iraq, northern Saudi Arabia, and deserts in Jordan and Syria.

Acknowledgements

We sincerely thank our colleagues at the Kurdistan Meteorological Administration and the Research Institute of Meteorology and Atmospheric Sciences for their support and assistance in conducting this research.



واکاوی همدیدی و ماهواره‌ای گرد و خاک در استان کردستان

سید اسعد حسینی^۱، مهدی رهنما^۲، حمید باقری^۳، علی پناهی^۴، بهرام چاره خواه^۵، خهبات

قمری^۶، نوشین خدام^۷، فائزه نوری^۸، ساویز صحت کاشانی^{۹*}

^۱ کارشناس هواشناسی همدیدی، اداره کل هواشناسی استان کردستان، سنندج، ایران

^۲ دانشیار، مرکز بین‌المللی مطالعات توفان ماسه و گردوخاک، رئیس پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

^۳ معاون توسعه و پیش‌بینی، اداره کل هواشناسی استان کردستان، سنندج، ایران

^۴ معاون فنی و شبکه ایستگاه‌ها، اداره کل هواشناسی استان کردستان، سنندج، ایران

^۵ کارشناس پیش‌بینی، اداره کل هواشناسی استان کردستان، سنندج، ایران

^۶ پژوهشگر، مرکز بین‌المللی مطالعات توفان ماسه و گردوخاک، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

^۷ دانشیار، مرکز بین‌المللی مطالعات توفان ماسه و گردوخاک، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

چکیده	اطلاعات مقاله
<p>پدیده گردوخاک به‌عنوان یکی از مهم‌ترین مخاطرات جوی و زیست‌محیطی، استان کردستان واقع در غرب کشور را متأثر ساخته و هرساله خسارات زیادی را به زیرساخت‌های مختلف در این استان وارد کرده است. در این مقاله شرایط و منشاء شکل‌گیری رخداد‌های گردوخاک در استان کردستان با میانگین ۳۲ روز گردوخاکی در سال برای دوره آماری ۱۹۹۲ تا ۲۰۲۲ با استفاده از روش‌های تحلیل ترکیبی آماری - همدیدی و ماهواره‌ای مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور از داده‌های مشاهداتی ۸ ایستگاه همدیدی، محصولات ماهواره‌ای، عمق نوری ذرات معلق (AOD) و داده‌های بازکاوی برای ترازهای مختلف جو استفاده شد. همچنین با استفاده از مدل HYSPLIT، مسیرهای انتقال ذرات گردوخاک رهگیری و درنهایت چشمه‌های عمده گردوخاک استان تعیین شد. بر اساس نتایج، فصول بهار با ۴۰٪ و تابستان با ۲۷٪ از بیشترین تعداد روزهای همراه با پدیده گردوخاک برخوردارند. پراکنش مکانی گردوخاک نشان داد با حرکت از غرب به شرق و از شمال به جنوب استان تعداد روزهای گردوخاکی کاهش می‌یابد. با توجه به بررسی‌های همدیدی در بیشتر موارد استقرار یک سامانه کم‌فشار بر روی عراق و سوریه و تقویت شرایط ناپایداری در سطح بیابان‌های این مناطق و همچنین قرارگیری منطقه مورد مطالعه در جلوی ناوه عمیق، زمینه انتقال گردوخاک به جو منطقه را فراهم می‌آورد. براساس نتایج پدیده گردوخاک در استان کردستان از ۳ چشمه اصلی شامل رسوبات کف رودخانه‌ها و هورهای خشک‌شده در نواحی مرکزی و جنوبی عراق و</p>	<p>تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۶/۱۸ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۸/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۰۶</p> <p>کلمات کلیدی: توفان‌های گرد و خاک تحلیل‌های سینوپتیک عمق نوری ذرات معلق (AOD) HYSPLIT</p>

بیابان‌های سوریه، اردن و شمال شبه‌جزیره عربستان منشاء می‌گیرد. بیشترین فعالیت این چشمه‌های گردوخاک نیز در فصل‌های بهار و تابستان است.

E-mail: savizsehat@yahoo.com

* نویسنده مسئول: دکتر ساویز صحت کاشانی

مقدمه

توفان گردوخاک یکی از پدیده‌های جوی است که بنا بر تعریف سازمان هواشناسی جهانی معمولاً در مناطق خشک و نیمه‌خشک همراه با سرعت باد بیش از ۱۵ متر بر ثانیه رخ می‌دهد (Goudie & Middleton, 2006). وزش باد سبب جدا شدن ذرات خاک با اندازه‌های مختلف از بستر خود شده که به صورت جهش، خزش و یا معلق به حرکت درآمده و به نقاط دوردست منتقل شده و سبب فرسایش خاک در مناطق برداشت و متناسب با قدرت و سرعت باد سبب انباشت رسوبات در نقاط دیگر می‌شود (Refahi, 2004; Ardalan & Rahimzadegan, 2015). توفان‌های ماسه^۱ معمولاً از ذرات درشت با اندازه بزرگ‌تر از ۰/۵ میلی‌متر یا ۵۰۰ میکرون تشکیل شده‌اند که امکان جابه‌جایی مسافت طولانی را ندارند. حرکت این ذرات به صورت خزشی است به‌گونه‌ای که این ذرات از بستر خاک جدا نمی‌شوند و با نیروی باد بر روی سطح خاک غلطانده می‌شوند. درحالی‌که توفان‌های گردوخاک^۲ عموماً از ذرات ۰/۵ تا ۰/۱ و کوچک‌تر از ۰/۱ میلی‌متر تشکیل شده‌اند که به صورت جهشی یا معلق حرکت نموده و می‌توانند مسافت‌های طولانی را طی کنند (USEPA, 2001). بسیاری از کشورهای واقع در کمربند خشک و نیمه‌خشک جهان با توجه به وجود بیابان‌های گسترده و فاقد پوشش گیاهی مناسب، تغییر کاربری زمین و نبود فناوری مناسب برای سازگاری با خشکسالی‌های شدید و پیامدهای ناشی از آن تحت تأثیر رخدادهای گردوخاک قرار گرفته‌اند (Hejazizadeh, Khosravi, Hosseini, Rahimi & Karbalaee doree, 2021; Lashkari & Mohammadi, 2022). کشور ایران نیز با توجه به شرایط اقلیمی و موقعیت بیابان‌های واقع در کشورهای هم‌جوار شرقی، شمال شرقی، غربی و جنوب غربی آن، با این پدیده مواجه بوده است که در چند دهه اخیر میزان رخداد آن در بیشتر مناطق کشور از جمله استان کردستان افزایش پیدا کرده است (Esfandyari darabad, Hosseini & Mohammadpour, 2013).

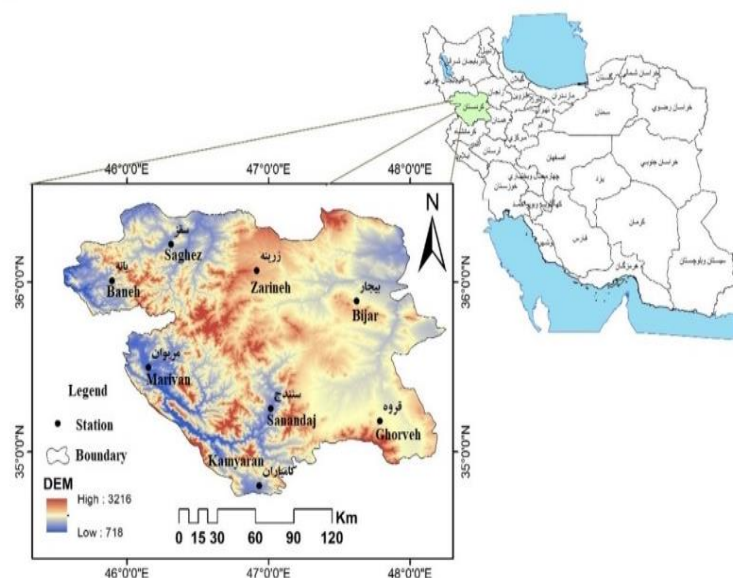
از آنجاکه پدیده گردوخاک زندگی جوامع انسانی را متحمل هزینه‌های هنگفت می‌کند و به‌عنوان یک مخاطره طبیعی در نظر گرفته می‌شود (Middleton, Tozer & Tozer, 2019)، مطالعه و بررسی جنبه‌های مختلف آن مورد توجه محققان داخلی و خارجی قرار گرفته است. به‌منظور نظارت و پایش گردوخاک در شمال غرب چین از داده‌های سنجنده MODIS استفاده شد و نتایج نشان داد که گردوخاک از غرب استان مغولستان داخلی به سمت مرکز مغولستان داخلی حرکت کرده است (Dia, 2005). کو و همکاران (Qu, Hao, Kafatos & Wang, 2006)، نیز با استفاده از روش‌های سنجش‌از‌دور ماهواره‌ای و با ترکیب باند بازتابی نور خورشید به‌دست‌آمده از تصاویر MODIS ماهواره‌های آکوا و ترا توانسته‌اند توفان‌های گردوخاک را از ابرها متمایز کنند. آنوفوروم (Anuforum, 2007) با مطالعه همدیدی و بررسی الگوهای روزانه هوا بر روی سواحل غربی آفریقا در یک دوره ۳۰ ساله به این نتیجه رسید که بیشترین گردوخاک در این منطقه در ماه نوامبر تا فوریه است که بر اثر بادهای تجارتنی شمال شرق از جنوب صحرا آفریقا به این منطقه حمل می‌شوند. لی و همکاران (Li, Ge, Dong & Chang, 2010) داده‌های سنجنده MODIS را به‌منظور پایش توفان گردوخاک در استرالیا به کار برد و از طریق محاسبات اختلاف درجه حرارت روشنایی دو باند حرارتی مادون‌قرمز موفق به جدا کردن گردوخاک از ابرها شدند و گردوخاک پخش‌شده را بازایی و تخمین زدند. رضازاده و همکاران (Rezazadeh, Irannejad & Shao, 2013) در بررسی اقلیم‌شناسی رخدادهای گردوخاک در خاورمیانه نشان دادند که بیشترین رخداد گردوخاک در بخش غربی

خاورمیانه در ماه‌های زمستان و در بخش شرقی در ماه‌های تابستان اتفاق می‌افتد. کائو و همکاران (Cao, Jian, Guizhou, Guang & Lei, 2015) نیز با رویکرد جدید شناسایی منابع گردوخاک در ایران با استفاده از ۹ مجموعه داده همچون رخدادهای خشکسالی، دما، بارش، موقعیت خاک‌های شنی، فراوانی توفان‌های گردوخاک ناشی از تخریب انسان، شاخص تأثیر انسان، راندمان استفاده از باران و حاصلخیزی خاک لُس نشان دادند که دو منبع بزرگ در تالاب‌های هویزه و یا هورالعظیم و دشت سیستان به‌عنوان دو منبع گردوخاک داخلی شناخته شده‌اند. بیدختی و همکاران (Bidokhti, Gharaylou, Pegahfar, Sabetghadam & Rezazadeh, 2016) رخدادهای شدید گردوخاک را برای دو منطقه شهری کرمانشاه و تهران بررسی کردند. آن‌ها با استفاده از داده‌های همدیدی، غلظت گردوخاک و مدل HYSPLIT به این نتیجه رسیدند که رخدادهای گردوخاکی عمدتاً زمانی به وقوع می‌پیوندد که در وردسپهر زیرین سرعت باد زیاد و میزان رطوبت کم باشد. بررسی مدل رهگیری نیز نشان داد که وقایع گردوخاکی از بیابان‌های عراق و سوریه منشأ گرفته‌اند. فرانسیس و همکاران (Francis et al., 2017) باد شمال و نقش آن‌ها در انتشار گردوخاک عراق را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که بین بادهای سطح زمین و بادهای تراز زیرین وردسپهر ارتباط وجود دارد. جین و همکاران (Jin, Wei, Pu, Yang & Parajuli, 2018) در مشاهدات درازمدت ماهواره‌ای و توزیع ذرات معلق بر روی دریای عرب نشان دادند که یک ناهمگونی فصلی و سالانه در طی فصل تابستان بر روی دریای عرب وجود دارد که ناشی از تغییرات قابل‌ملاحظه در چرخه گردوخاک مناطق مجاور است که با پدیده‌های هواشناسی و تغییرات سالانه الگوهای گردش جوی ارتباط قوی دارند. ریز و همکاران (Reyers, Hamidi & Shao, 2019) به واکاوی همدیدی و شبیه‌سازی رویدادهای گردوخاک در بیابان‌های آتاکاما پرداختند. بر اساس نتایج ناوه میانی وردسپهر منجر به تشکیل یک نوار همگرایی افقی بر فراز آتاکامای شمالی و در نتیجه باد رو به پایین در زیر آن می‌شود و تضاد دمایی شدید در غرب آند رخ می‌دهد که منجر به بادهای فوق‌العاده شدید در آتاکاما می‌شود. الخلیدی و همکاران (Al-Khalidi, Bakr & Abdullah, 2021) به تحلیل همدیدی توفان‌های گردوخاک در عراق پرداختند. بر اساس نتایج بیابان‌های شرق سوریه، ربع‌الخالی و منطقه بین‌النهرین از منابع اصلی گردوخاک در عراق هستند. شمشیری (Shamshiri, 2012) به پهنه‌بندی گردوخاک با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای MODIS و الگوریتم‌های تفکیک و استخراج گردوخاک مانند آکرمین و TDI¹ در استان کرمانشاه پرداخت. نتایج حاکی از دقت بالای تصاویر سنجنده MODIS در ثبت ذرات گردوخاک و نیز دقت بالای الگوریتم TDI در تفکیک و استخراج مناطق دارای گردوخاک از غیر گردوخاک داشت. رضائی بنفشه و همکاران (Rezaee Banafsheh, Dharifi & Pirkhazraian, 2012) با استفاده از تصاویر و محصولات سنجنده TOMS بر روی ماهواره Nimbus7 نشان دادند که روند تغییرات رخدادهای گردوخاک شدید در استان کردستان طی سال‌های اخیر افزایش یافته در حالی که فراوانی رخدادهای گردوخاک با شدت متوسط روند کاهش داشته است. اسلامی و همکاران (Eslami, Atafar, Pirsahab & Asadi, 2014) به بررسی روند تغییرات غلظت ذرات معلق در شهر کرمانشاه پرداختند. نتایج نشان داد که تغییرات غلظت در کل دوره موردبررسی فقط از نظر فصل و ماه متفاوت است و بدترین کیفیت هوا در تیرماه اتفاق می‌افتد. قوامی و همکاران (Qhavam, Kaboodvandpour, Mohammadi & Amanollahi, 2014) با بررسی مقادیر روزانه PM^{2.5} در سنندج و نیز بررسی الگوهای جوی در ترازهای مختلف نشان دادند که با استقرار یک ناوه نسبتاً عمیق در نواحی شرقی دریای مدیترانه و گسترش هوا از روی مناطق خشک به سمت ایران هم‌زمان با حضور یک مرکز پراترفاع روی عربستان به‌ویژه در فصول گرم سال سبب شکل‌گیری توفان‌های گردوخاک و انتقال توده‌های گردوخاکی به داخل کشور می‌شود. صحت کاشانی و همکاران (Sehatkashani, VazifeDoust, Kamali & Bidokhti, 2015) به تحلیل همدیدی رخدادهای گردوخاک در نواحی غربی و جنوب غربی کشور پرداختند. نتایج نشان داد استقرار سامانه کم‌فشار مدیترانه‌ای در مناطق غرب و جنوب غرب ایران به همراه سامانه پر ارتفاع جنب‌حاره بر روی کشور منجر به شکل‌گیری رخدادهای گردوخاک در فصل بهار می‌شود.

مشکی‌زاده و همکاران (Meshkizadeh, Orak & Morshedi, 2016) به بررسی توزیع زمانی و مکانی عمق نوری ذرات معلق^۱ (AOD) در استان خوزستان پرداختند. نتایج حاصل نشان داد که تغییرات مکانی AOD از روند خاصی پیروی می‌کند و بر این اساس تغییرات ذرات معلق هوا در شهرستان‌های غربی استان خوزستان بسیار بیشتر است. صلاحی و همکاران (Salahi, Nohegar & Behrouzi, 2019) نیز در مطالعه خود با استفاده از مدل HYSPLIT یک رخداد توفان گردو خاک را در شهر سنندج را مسیریابی و مشاهده کردند چشمه این رخداد در نواحی بیابانی عراق و سوریه بوده است. همچنین با بررسی رخدادهای گردو خاک در بازه زمانی ۲۴ ساله نشان دادند روند تغییرات فراوانی این پدیده در سنندج افزایشی است. سلطانی و همکاران (Soltani, Motamedvaziri, Noroozi, Ahmadi & Mosaffaei, 2021) به شناسایی و اولویت‌بندی عوامل مؤثر بر ایجاد گردو خاک در شهرستان هندیجان پرداختند. نتایج نشان داد که رشد جمعیت، توسعه کشاورزی، توسعه دامداری، توسعه صنعتی و تغییر اقلیم، از مهم‌ترین پیشران‌های مؤثر بر وضعیت رخداد گردو خاک در منطقه هستند. چوبین و همکاران (Choubin, Sajedi Hosseini, Rahmati, Mehdizadeh & Youshanloei & Jalali, 2022) به بررسی تغییرات زمانی و مکانی وقوع گردو خاک با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در استان آذربایجان غربی پرداختند. نتایج نشان داد بیشترین وقایع گردو خاک در فصل‌های تابستان و بهار به وقوع پیوسته و نوسان‌های ماهانه گردو خاک نشان‌گر بیشینه گردو خاک از ماه اسفند تا مهر است. حسینی و همکاران (Hosseini, Khoramabadi & Tahani Yazdly, 2024) به بررسی تغییرات زمانی و مکانی مخاطره گردو غبار در استان کردستان پرداختند. نتایج نشان داد که فصل تابستان و ماه‌های تیر و مرداد، دارای بیشترین تراکم و غلظت گردو غبار و پس‌از آن، فصل بهار در رتبه دوم قرار دارد. بر اساس نتایج افزایش میزان گردو غبار در این دو فصل می‌تواند به دلیل استقرار پرفشار جنب‌حاره‌ای آזור و خشکی هوا به علت کمی رطوبت سطحی در ایران و کشورهای هم‌جوار باشد. محمدپور و همکاران (Mohammadpour, Saligheh, Raziei & Darvishi Bloorani, 2024) به بارزسازی پدیده‌های حدی گردو خاک در استان کردستان با استفاده از مدل MACC و صحت سنجی داده‌های MODIS پرداختند. نتایج نشان داد که زمستان و پاییز دارای کمترین و فصل بهار و تابستان دارای بیشترین مقدار AOD است. امروزه به‌وسیله داده‌های ماهواره‌ای بسیاری از کمیت‌های موردنیاز مطالعه گردو خاک‌ها مانند، غلظت آن‌ها، عمق نوری، دمای توده گردو خاک، تابش خالص رسیده به زمین و غیره را می‌تواند به دست آورد مزیت این داده‌ها آن است که سطح وسیعی را پوشش می‌دهند و برای مطالعات و تحقیقات منطقه‌ای کاربرد خوبی دارند (Rostami & Hosseini, 2018). بنابراین با توجه به اهمیت موضوع در این پژوهش به واکاوی آماری-همدیدی و ماهواره‌ای گردو خاک در استان کردستان با هدف منشاء‌یابی این پدیده پرداخته شده است.

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این مقاله استان کردستان است که با مساحت ۲۸۲۰۳ کیلومتر در غرب ایران و در مجاورت کشور عراق 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 از نصف‌النهار گرینویچ قرار دارد (Khodakarami, Hooshyar, Javid & Hosseini, 2022). روش مورد مطالعه در این مقاله به صورت آماری-تحلیلی بوده و در جهت دستیابی به اهداف تعیین‌شده از آمار ایستگاه‌های هواشناسی همدیدی در منطقه مورد مطالعه استفاده شده است. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و ایستگاه‌های هواشناسی مورد بررسی را نشان می‌دهد.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و ایستگاه‌های هواشناسی مورد بررسی

Fig. 1. Geographical location of the study area and meteorological stations under study

مواد و روش‌ها

داده‌های مورد نیاز، گزارش‌های پدیده گردوخاک با کد ۰۶ (گردوخاک معلق و گسترده در هوا که منشأ محلی ندارد) ایستگاه‌های همدیدی به صورت سه‌ساعته (سینوپ) در دوره آماری بلندمدت ۳۱ ساله (۱۹۹۲-۲۰۲۲) را در برمی‌گیرد. همچنین داده‌های ارتفاع ژئوتانسیمی ترازهای ۵۰۰، ۷۰۰ و ۸۵۰ هکتوپاسکالی، فشار تراز سطح دریا (SLP) و سمت و سرعت باد در محدوده جغرافیایی ۰ تا ۶۰ درجه عرض شمالی و ۱۰ تا ۷۰ درجه طول شرقی از تارنمای مرکز ملی جوی و اقیانوسی (NOAA) اخذ شد. روزهای مورد مطالعه در دوره آماری مورد بررسی به‌گونه‌ای انتخاب گردید که بیشترین تداوم و بیشترین گستردگی را در سطح منطقه مورد مطالعه داشته باشد تا بتوان رخداد‌های گردوخاک را با دقت بیشتر مورد واکاوی قرار داد. برای انتخاب نمونه‌های رخداد گردوخاک مورد مطالعه معیارهای زیر مدنظر قرار گرفت:

- ۱- نمونه‌ها بر اساس گزارش کد ۰۶ در تمام ساعات همدیدی و تداوم زمانی دو روز و بیشتر از آن انتخاب شدند.
 - ۲- گسترش مکانی گردوخاک در ۴ ایستگاه (۵۰ درصد ایستگاه‌ها) یا بیشتر از آن به‌طوری‌که روزهای انتخابی به‌گونه‌ای باشد که در مجموع رخداد‌های گردوخاک از پراکنش مناسبی در سطح استان کردستان برخوردار باشند.
 - ۳- رسیدن دید به ۱۰۰۰ متر و کمتر از آن در اثر گردوخاک در ایستگاه‌های نزدیک به منشأ گردوخاک، چراکه در ایستگاه‌های دورتر ممکن است بر اثر فاصله گرفتن از مناطق منشأ در صورت وجود گردوخاک دید به بالای ۱۰۰۰ متر نیز برسد.
- به‌این ترتیب ۴۰ روز گردوخاک منتخب در دوره آماری (۱۹۹۲-۲۰۲۲) استخراج گردید. داده‌های دریافت‌شده در محیط نرم‌افزار اکسل به‌صورت مجموعه داده لازم تنظیم و وضعیت روزهای همراه با گردوخاک به‌صورت میانگین و فراوانی برای هر ایستگاه در قالب نمودار مشخص شد. همچنین با استفاده از سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS) پراکنش مکانی فراوانی روزهای گردوخاک در سطح استان تعیین شد. از آنجاکه فاصله تلاقی داده‌های NCEP از هم $2/5 \times 2/5$ درجه جغرافیایی است. ماتریسی از شبکه نقاط مذکور به ابعاد ۲۵ ردیف در ۲۹ ستون با مجموع ۷۲۵ برای ۴۰ روز منتخب همراه با گردوخاک، مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفت.

پس از استخراج داده‌های شبکه‌ای و مرتب کردن آن‌ها با استفاده از روش تحلیل عاملی و روش تحلیل خوشه‌ای به تجزیه و تحلیل داده‌ها پرداخته شد و الگوهای همدیدی غالب مولد گرد و خاک در منطقه شناسایی گردید. در ادامه برای بررسی رخداد یک توفان گسترده با تداوم چندروزه (توفان چهارم تا هفتم ژوئیه ۲۰۰۹) علاوه بر واکاوی همدیدی به بررسی AOD با استفاده از محصول MOD04 L1B سنجنده MODIS ماهواره ترا پرداخته شد و جهت شناسایی وجود ذرات معلق در جو در توفان مذکور از AOD در باند نوری ۵۵۰ نانومتر و ترکیب الگوریتم‌های Deep Blue و Dark Target استفاده شد. عمق نوری کمتر از ۰/۱ نشان‌دهنده هوای صاف و عمق نوری بیشتر از ۴ بیانگر حضور حجم متراکمی از ذرات معلق است که مانع از رسیدن نور خورشید حتی در میانه روز به سطح زمین می‌شوند (Hsu, Tsay, King & Herman, 2006; Ginoux, Prospero, Gill, Hsu & Zhao, 2012). علاوه بر این برای ردیابی مسیر باد در توفان مذکور از مدل HYSPLIT به صورت پسگرد و در ارتفاع‌های ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ متر استفاده شد. مدل HYSPLIT یکی از کامل‌ترین مدل‌ها برای محاسبات خط سیر حرکت ذرات گردوغبار در اندازه‌های مختلف در شرایط متفاوت جوی، پراکندگی و ته‌نشینی آن در مقیاسی وسیع است (Draxler, Stunder, Rolph, Stein & Taylor, 2009; Ellis Jr & Merrill, 1995).

پس از جمع‌آوری و تنظیم داده‌های ارتفاعی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال به صورت آرایه (S-mode) و قبل از انجام تحلیل عاملی، ابتدا اعتبارسنجی انجام تحلیل عاملی برای ۷۲۵ متغیر مورد مطالعه آزمون شد. جدول ۱ نتایج اعتبارسنجی را برای ماتریس داده‌های مذکور نشان می‌دهد. از آنجاکه مقدار آماره KMO برابر ۰/۹۲ شد و نزدیک به یک است انجام تحلیل عاملی مناسب تشخیص داده شد و مورد تأیید قرار گرفت.

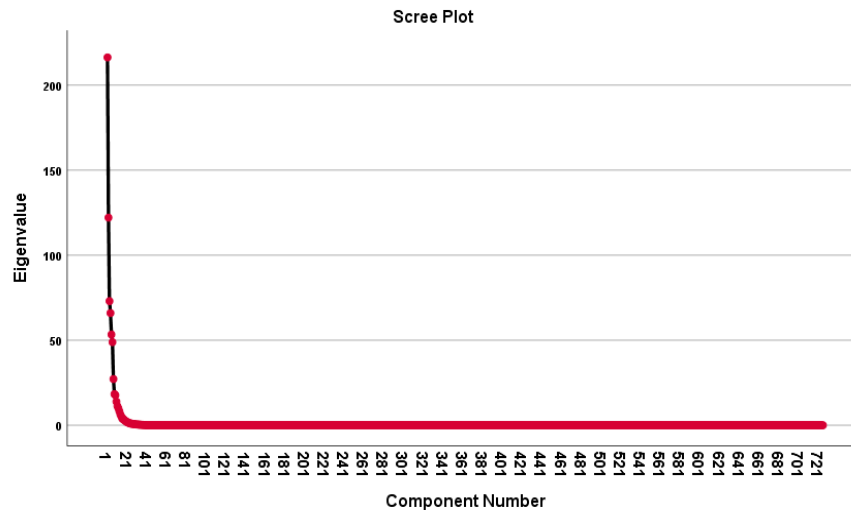
جدول ۱- مقادیر آماره کایزر-مایر-اولکین (KMO)

Table 1- Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) statistic values

اندازه‌گیری کفایت نمونه‌گیری کایزر-مایر-اولکین	0.922
Kaiser-Meyer-Olkin measure of sampling adequacy	
خی دو	115345.024
Chi-square	
درجه آزادی	724
آزمون بارتلت	
Bartlett's Test	
سطح معنی‌داری	0.000
Significance level	

سپس در راستای رسیدن به اهداف کلی این مطالعه طی دوره‌ی ۳۱ ساله (۱۹۹۲-۲۰۲۲) پس از اعمال روش تحلیل عاملی بر روی ماتریس کوواریانس داده‌های تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال روزهای همراه با گردوغبار، سیزده عامل که در مجموع، ۹۴/۶ درصد از کل واریانس داده‌ها را تبیین می‌کردند استخراج شدند (جدول ۲) و مابقی عواملی را که ارزش ویژه آن‌ها کمتر از یک بود و نتوانسته بودند بیشتر از یک درصد کل واریانس داده‌ها را تبیین کنند، کنار گذاشته شدند (شکل ۲). نمودار مذکور تغییرات مقادیر ویژه را که بر اساس محاسبه ماتریس کوواریانس به دست آمده بر حسب اهمیت از بزرگ به کوچک را برای همه متغیرها نشان می‌دهد. همچنان که مشاهده می‌شود، بر اساس نمودار مذکور فاصله یا شباهت بین خوشه‌ها بعد از عامل سیزدهم کاهش چشمگیری پیدا می‌کند. بنابراین، نقطه افت منحنی در عامل سیزدهم تشخیص داده شد. در این بین، با توجه به این‌که عامل اول توانست به تنهایی ۲۹/۸ درصد کل واریانس داده‌ها را تبیین کند و بررسی اجمالی جدول ماتریس همبستگی بین عامل‌های استخراج شده هم حاکی از عدم وجود وابستگی بین آن‌ها بود و عامل‌ها از همدیگر استقلال کامل داشتند، مدل مذکور پذیرفته شد (جدول ۲)؛

اما با توجه به این که مهم‌ترین ویژگی روش تجزیه‌ی عاملی این است که بتواند رابطه‌ی بین متغیرهای اولیه و عامل‌های ایجادشده را به‌صورت واضح و ساده بیان کند و عامل‌های ایجادشده از نظر علمی (اقلیم‌شناسی همدیدی) قابل توجیه و بهتر تفسیر شوند، عامل‌های مذکور به روش چرخش متعامد (واریماکس) دوران داده شدند. جدول ۲ مقادیر کل واریانس تبیین شده توسط عامل‌ها را در حالت قبل و بعد از چرخش متعامد عامل‌ها را نشان می‌دهد که تفاوت چندانی ندارند.



شکل ۲- نمودار اسکری تغییرات مقادیر ویژه برحسب اهمیت برای کل متغیرها

Fig. 2. Scree plot of eigenvalue variation based on importance for all variables

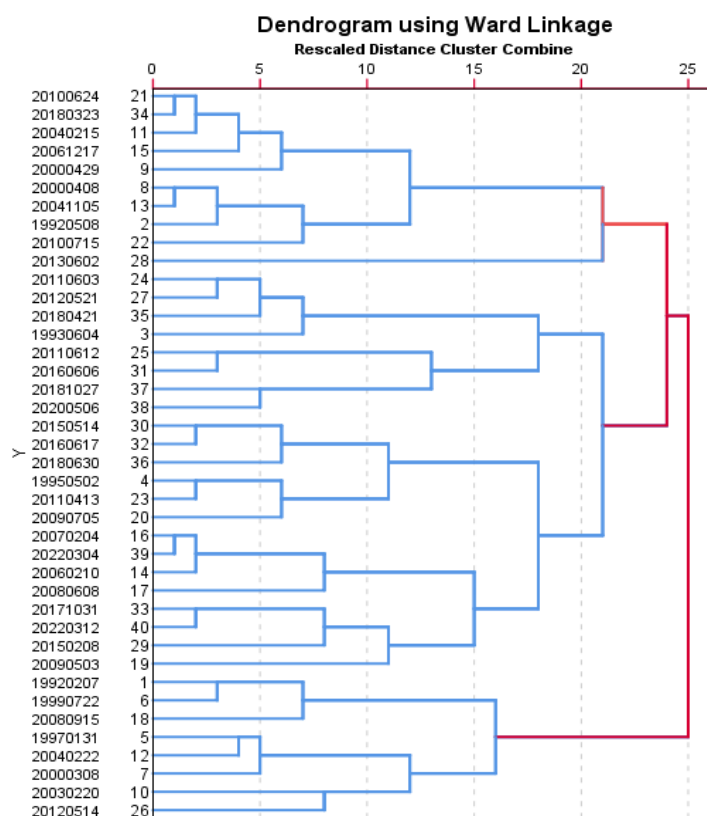
جدول ۲- مقدار ویژه، درصد واریانس و واریانس تجمعی هر یک از عامل‌ها

Table 2- Eigenvalue, percentage of variance, and cumulative variance for each factor

عامل Factor	مقادیر ویژه اولیه			مجموع مجذور عامل‌های اکتشافی		
	Initial eigenvalues			Rotation Sum of squared loadings		
	مجموع Total	% واریانس Variance	% تجمعی Cumulative	مجموع Total	% واریانس Variance	% تجمعی Cumulative
1	216.276	29.831	29.831	216.276	29.831	29.831
2	122.076	16.838	46.669	122.076	16.838	46.669
3	72.991	10.068	56.737	72.991	10.068	56.737
4	65.950	9.097	65.834	65.950	9.097	65.834
5	53.350	7.359	73.192	53.350	7.359	73.192
6	48.846	6.737	79.929	48.846	6.737	79.929
7	27.178	3.749	83.678	27.178	3.749	83.678
8	18.286	2.522	86.200	18.286	2.522	86.200
9	17.689	2.440	88.640	17.689	2.440	88.640
10	13.891	1.916	90.556	13.891	1.916	90.556
11	11.272	1.555	92.111	11.272	1.555	92.111
12	9.967	1.375	93.486	9.967	1.375	93.486
13	8.206	1.132	94.618	8.206	1.132	94.618
14	6.358	0.877	95.495	6.358	0.877	95.495
15	5.117	0.706	96.201	5.117	0.706	96.201

در ادامه، پس از انجام تحلیل خوشه‌ای به روش سلسله مراتبی وارد بر روی نمرات عاملی حاصل، از آنجا که میزان مربع فواصل اقلیدسی خوشه‌های ادغام شده از عدد ۲۲ به بعد افزایش ناگهانی پیدا کرده و سبب کاهش شباهت الگوهای همدیدی نماینده‌ی روزهای همراه با گردوخاک واقع در خوشه‌ها می‌شود، لذا ادغام خوشه‌ها در فاصله‌ی مذکور متوقف شد و کل روزهای همراه با گردوخاک منتخب در سه گروه طبقه‌بندی شدند. شکل ۳ نمودار درختی ادغام خوشه‌ها را همراه با خط افقی محدودکننده‌ی خوشه‌ها در مربع فاصله اقلیدسی ۲۲ نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که بر اساس خط مذکور ادغام خوشه با سه خوشه نهایی متوقف خواهد شد.

بر اساس تحلیل داده‌های ارتفاعی سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال روزهای همراه با گردوخاک با استفاده از روش تحلیل عاملی و روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی وارد، سه الگوی همدیدی حاکم بر روزهای همراه با گردوخاک شناسایی و تعیین شد که توضیحات هر کدام از الگوهای سه‌گانه در ادامه به تفصیل بیشتر خواهد آمد. در نهایت نیز یک رخداد توفان گردوخاک وسیع انتخاب و شرایط همدیدی و سنجش‌ازدوری آن بررسی شد.



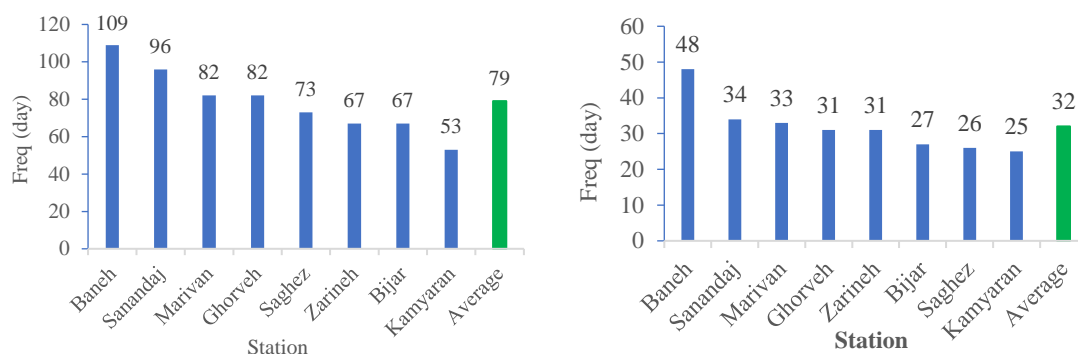
شکل ۳- درخت خوشه‌بندی و الگوهای مولد گردوخاک در استان کردستان بر اساس روزهای گردوخاک منتخب

Fig. 3. Clustering and generative patterns of dust storms in Kurdistan Province based on selected dust storm days

نتایج و بحث

نتایج حاصل از توزیع میانگین سالانه روزهای همراه با گردوخاک در ایستگاه‌های مورد مطالعه در طول دوره آماری مورد بررسی (۱۹۹۲-۲۰۲۲) نشان می‌دهد که بیشترین تعداد روزهای همراه با گردوخاک مربوط به ایستگاه بانه در غرب استان با متوسط ۴۸ روز در سال و کمترین تعداد نیز مربوط به ایستگاه کامیاران در جنوب استان با متوسط ۲۵ روز در سال است. بر این اساس متوسط

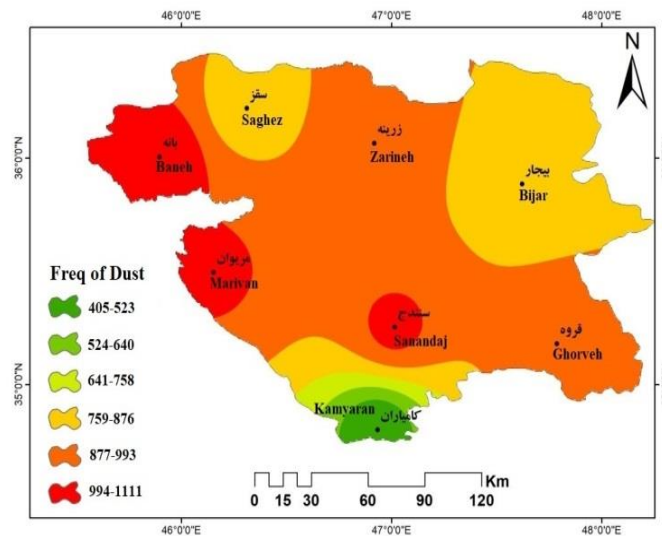
تعداد روزهای همراه با گردوخاک در استان کردستان برابر با ۳۲ روز در سال در طول دوره آماری مورد بررسی است. بیشترین فراوانی رخداد پدیده گردوخاک در سال در طول دوره آماری مورد بررسی نیز مربوط به ایستگاه بانه با ۱۰۹ روز و سپس ایستگاه سنندج با ۹۶ روز در سال است که در سال ۲۰۰۹ میلادی (۱۳۸۸ شمسی) رخ داده است (شکل ۴).



شکل ۴- متوسط تعداد روزهای همراه با گردوخاک (سمت راست) و بیشینه رخداد پدیده گردوخاک در سال برحسب روز (سمت چپ) در ایستگاه‌های مورد مطالعه در طول دوره آماری مورد بررسی (۱۹۹۲-۲۰۲۲)

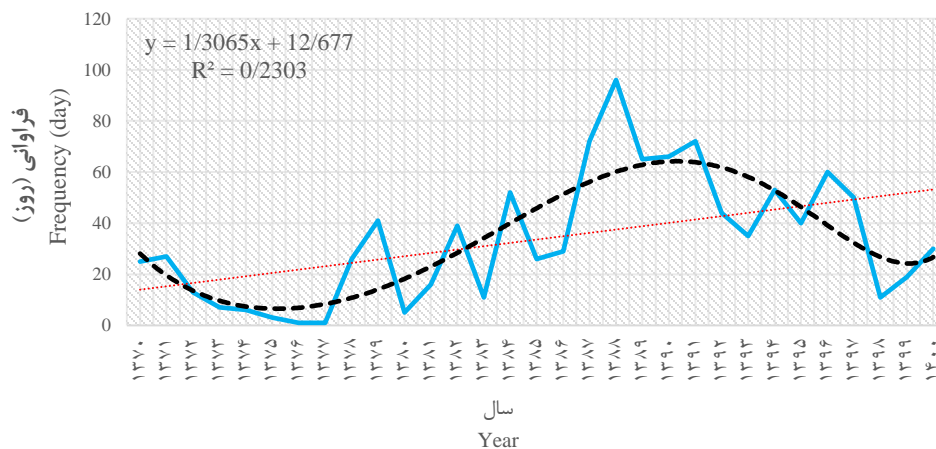
Fig. 4. Average number of dusty days (right) and maximum occurrence of dust event per year (left) at the study stations during the statistical period (1992-2022)

پراکنش مکانی فراوانی روزهای همراه با گردوخاک در طول دوره آماری مورد مطالعه (۱۹۹۲-۲۰۲۲) نیز نشان می‌دهد که ایستگاه‌های واقع در نواحی غربی و مرکزی استان نسبت به نواحی شرقی استان و ایستگاه‌های واقع در نواحی شمالی نسبت به نواحی جنوبی استان از روزهای همراه با گردوخاک بیشتری برخوردارند بر اساس نتایج ایستگاه بانه در غرب استان با ۱۱۱۱ روز، بیشترین و ایستگاه کامیاران در جنوب استان با ۴۰۵ روز کمترین فراوانی روزهای همراه با گردوخاک را در طول دوره آماری مورد بررسی (۱۹۹۲-۲۰۲۲) داشته‌اند (شکل ۵). با توجه به موقعیت جغرافیایی استان کردستان در غرب کشور و هم‌جواری با کشور عراق و هم‌چنین ویژگی‌های محیطی و طبیعی استان، عوامل ارتفاع، عرض جغرافیایی، ساختار زمین‌شناسی و پوشش گیاهی منطقه می‌تواند در کاهش و افزایش رخداد روزهای همراه با گردوخاک نقش داشته باشد که با نتایج مطالعات گودرزی و همکاران (Goodarzi, Hoseini & Ahmadi, 2018) مبنی بر پراکنش روزهای همراه با گردوخاک در غرب کشور مطابقت دارد.



شکل ۵- پراکنش مکانی فراوانی روزهای همراه با گردوخاک در منطقه مورد مطالعه در طول دوره آماری (۱۹۹۲-۲۰۲۲)

Fig. 5. Spatial distribution of the frequency of dusty days in the study area during the study period (1992-2022)
 نتایج حاصل از بررسی روند تغییرات روزهای همراه با گردوخاک با استفاده از رگرسیون خطی در استان کردستان نشان داد که در تمام ایستگاه‌های مورد بررسی روند تغییرات افزایشی بوده است. برای نمونه روند خطی و پولی نومیال تغییرات روزهای همراه با گردوخاک در ایستگاه همدید سنندج در مرکز استان در طول دوره آماری مورد بررسی آورده شده است. بر اساس نتایج متوسط روزهای همراه با گردوخاک در سنندج در طول دوره مورد بررسی برابر با ۳۴ روز در سال بوده است. کمترین تعداد روزهای همراه با گردوخاک در سال ۱۳۷۷ (۱ روز در سال)، بوده است. همان‌طور که از نمودار شکل ۶ مشخص است تعداد روزهای همراه با گردوخاک از سال ۱۳۷۹ شروع به افزایش کرده است و در سال ۱۳۸۸ به بیشترین میزان رسیده (۹۶ روز در سال)، سپس روند کاهشی پیدا کرده است. با این حال به‌طور کلی مشاهده می‌شود که بر اساس روند خطی میزان افزایش در طول دوره مورد بررسی برابر با ۱/۳ روز در سال بوده است.



شکل ۶- روند تغییرات فراوانی پدیده گردوخاک در ایستگاه همدید سنندج در طول دوره آماری (۱۹۹۲-۲۰۲۲)

Fig. 6. Trend of dust phenomenon variation at the Sanandaj synoptic station during the study period (1992-2022)

الگوی اول (ناوه شرق مدیترانه)

بررسی نقشه ترکیبی ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (شکل ۷a) در گستره‌ای از عرض جغرافیایی صفر تا ۶۰ درجه شمالی و صفر تا ۷۰ درجه شرقی نشان می‌دهد که در این الگو، استقرار یک ناهه در شرق دریای مدیترانه و غرب سوریه که محور آن از شمال ترکیه تا شبه‌جزیره عربستان امتداد یافته است زمینه ناپایداری و صعود هوا را در این ناحیه فراهم آورده است. منحنی ۵۷۰۰ متر این ناهه با دامنه نسبتاً عمیق‌تری بر روی منطقه مورد مطالعه و گسترش زبانه‌های آن تا غرب کشور باعث انتقال گردوخاک بیابان‌های سوریه و عراق و شمال شبه‌جزیره عربستان می‌شود. در نقشه ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال این الگو (شکل ۷b)، استقرار یک مرکز کم ارتفاع با پربند ۱۴۵۰ متر بر روی شمال دریای مدیترانه باعث شکل‌گیری یک ناهه عمیق بر روی بخش بزرگی از عراق و سوریه و شمال شرق آفریقا و شبه‌جزیره عربستان شده و سبب انتقال هوای گرم همراه با گردوخاک از نواحی شمال شرقی آفریقا، عراق و سوریه به غرب و شمال غرب کشور شده است. بررسی نقشه همدیدی فشار سطح دریا در الگوی اول (شکل ۷c) نشان می‌دهد که یک سلول کم‌فشار بسته با هسته ۱۰۰۸ هکتوپاسکال بر روی استان کردستان در راستای شمال غربی- جنوب شرقی شکل گرفته است که زبانه‌های آن تا نواحی مرکزی و جنوبی کشور گسترش یافته است و باعث مکش هوا به نواحی تحت سیطره خود شده است. لازم به ذکر است که یک سلول کم‌فشار دیگر نیز با فشار مرکزی ۱۰۱۰ هکتوپاسکال بر روی عراق و شرق عربستان تا خلیج فارس و یک سلول پرفشار در شمال ترکیه با فشار مرکزی ۱۰۱۲ هکتوپاسکال مستقر است که می‌تواند باعث تغییرات شیب فشار و انتقال گردوخاک به غرب و جنوب غرب کشور نیز باشد. بررسی نقشه همدیدی بردار باد در این الگو نیز نشان می‌دهد که با توجه به جهت وزش بادهای غربی و جنوب غربی در منطقه (باد شمال) شرایط برای انتقال گردوخاک به غرب کشور و منطقه مورد مطالعه مناسب است. سرعت باد در منطقه مورد مطالعه نیز بین ۲ تا ۵ متر بر ثانیه است که باعث تداوم و ماندگاری گردوخاک در منطقه شده است (شکل ۷d).

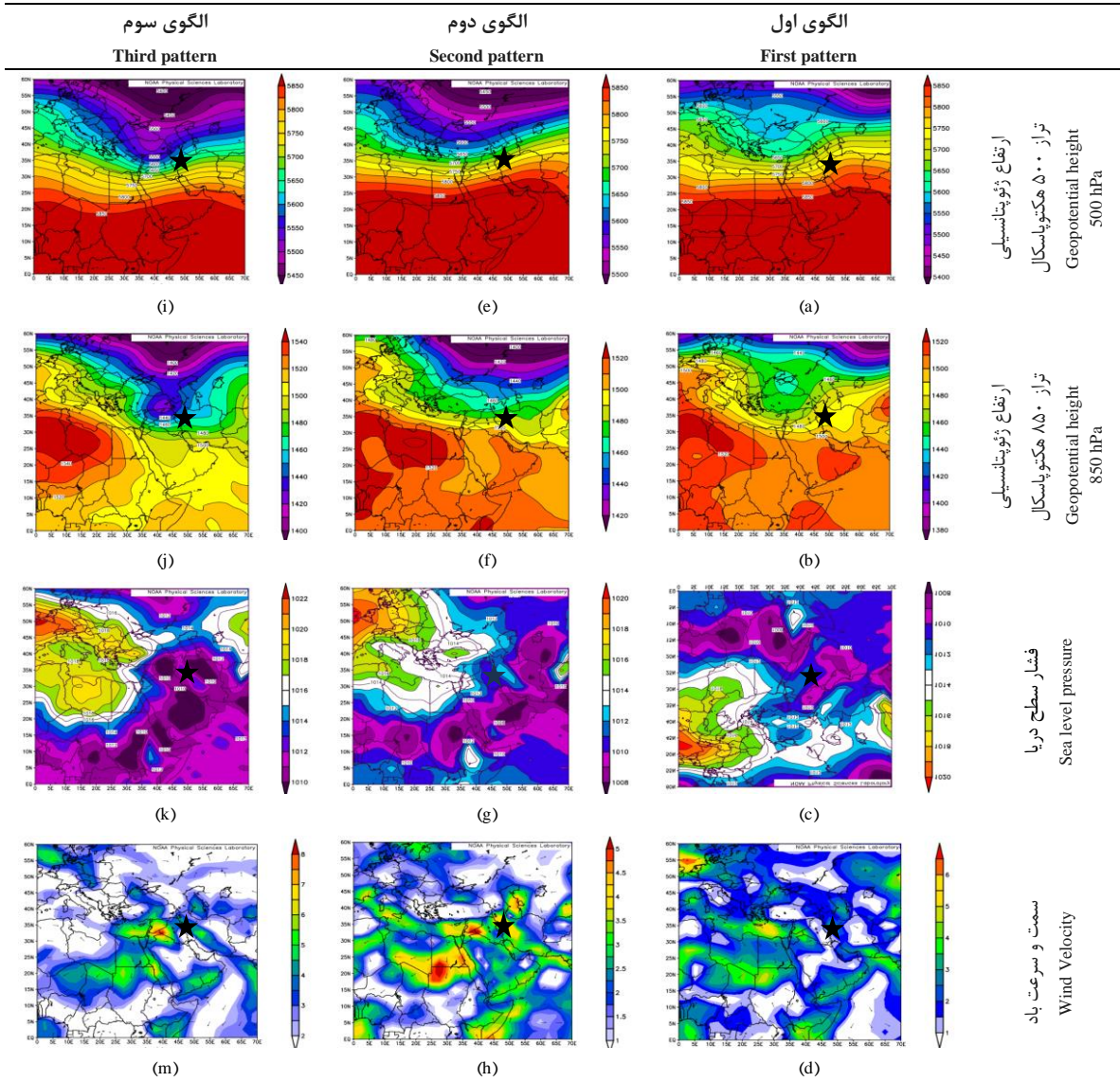
الگوی دوم (پشته عربستان)

نقشه ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در این الگو (شکل ۷e)، یک ناهه به محوریت شمال کشور ترکیه تا شمال شرق آفریقا را نشان می‌دهد. عمق این ناهه از ۵۰ درجه عرض شمالی تا ۲۵ درجه عرض شمالی است و طول موج آن از ۵ درجه طول شرقی تا ۵۰ درجه طول شرقی است که باعث شده منطقه مورد مطالعه ما در جلو این ناهه قرار بگیرد و باعث گسیل گردوخاک از بیابان‌های عراق، سوریه و شمال آفریقا و شبه‌جزیره عربستان و انتقال آن به سمت غرب و جنوب غرب کشور و منطقه مورد مطالعه شده است. در نقشه ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال (شکل ۷f) نیز منطقه مورد مطالعه در جلو یک ناهه که بر روی کشور عراق و سوریه شکل گرفته است قرار گرفته است که باعث انتقال گردوخاک بیابان‌های این مناطق و ریزش آن بر روی منطقه مورد مطالعه شده است. با توجه به الگوهای همدیدی سطح دریا یک کم‌فشار از نواحی جنوب غربی ایران به سمت مرزهای غربی کشور تا جنوب شرقی ترکیه کشیده شده و هم‌زمان با آن نفوذ یک پشته از غرب به روی اردن، شمال عربستان و غرب سوریه باعث شکل‌گیری شیو فشاری روی جنوب سوریه و غرب عراق شده که سبب افزایش تندی باد در این نواحی شده است (شکل ۷g). سپس تقویت جریان‌های غربی و فعال شدن چشمه‌های گردوخاک در جنوب سوریه و شمال غربی عراق سبب انتقال گردوخاک به داخل مرزهای کشور شده است. جهت باد با توجه به سامانه‌های مذکور نیز غربی و شمال غربی و با سرعت بین ۳ تا ۵ متر بر ثانیه است که شرایط برای ماندگاری گردوخاک در آسمان منطقه مورد مطالعه را فراهم می‌آورد (شکل ۷h).

الگوی سوم (کم ارتفاع شمال عراق)

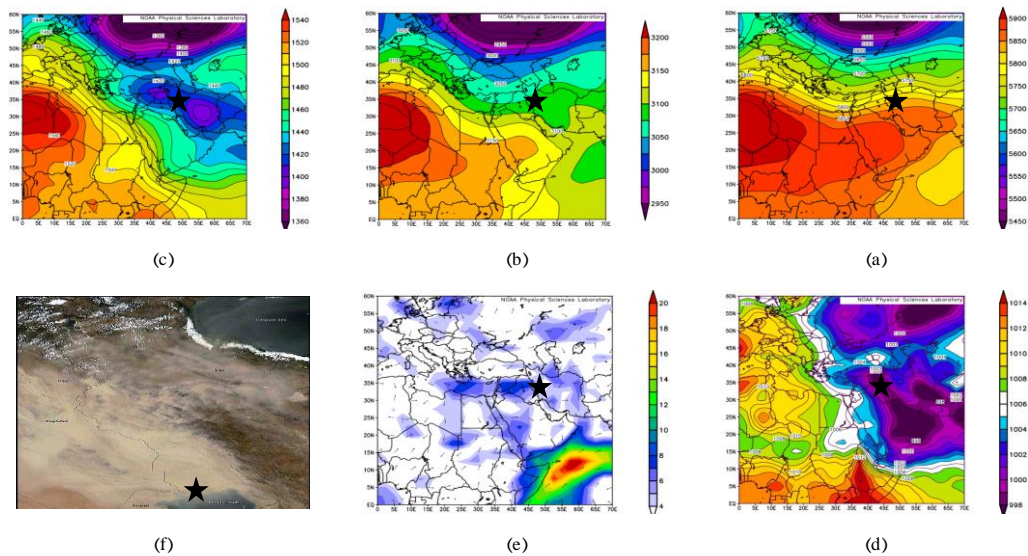
در نقشه ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال الگوی سوم (شکل ۷i)، یک ناوه عمیق با محوریت شمال شرق ترکیه تا شمال شرق آفریقا گسترده شده است. این شرایط باعث قرارگیری منطقه مورد مطالعه در جلو فرود و هم‌گرایی در ترازهای زیرین و واگرایی در ترازهای فوقانی جو بر روی غرب کشور شده است که در نتیجه خیزش گردوخاک از روی بیابان‌های شمال شرق آفریقا، شبه‌جزیره عربستان و عراق و ورود آن به منطقه مورد مطالعه را به دنبال دارد. در نقشه ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال (شکل ۷j) یک مرکز کم ارتفاع (سردچال) با منحنی هم‌ارتفاع ۱۴۲۰ متر بر روی شمال عراق و سوریه شکل گرفته است. این مرکز کم ارتفاع با قرارگیری بر روی بیابان‌های این مناطق و با جریان پادساعت‌گرد خود، باعث خیزش گردوخاک این مناطق و انتقال آن به نواحی غربی کشور شده است. در نقشه تراز سطح دریای این الگو (شکل ۷k) یک مرکز کم‌فشار با فشار مرکزی ۱۰۱۰ هکتوپاسکال بر روی عراق و سوریه شکل گرفته است که با گردش پادساعت‌گرد خود باعث انتقال گردوخاک بیابان‌های این نواحی به غرب کشور می‌شود. همچنین در نقشه تراز دریای این الگو یک مرکز پرفشار نیز با منحنی بسته ۱۰۱۸ هکتوپاسکال بر روی دریای مدیترانه شکل گرفته است که سبب نفوذ پشته روی اردن و شمال عربستان شده و در نهایت باعث تغییرات شیب فشار به سمت مرکز کم‌فشار مستقر بر روی عراق شده است. نقشه بردار باد در سطح زمین نیز جهت غربی باد به سطح منطقه مورد مطالعه و همچنین تشکیل هسته بیشینه سرعت با مقادیر بیش از ۸ متر بر ثانیه بر روی مناطق بیابانی عراق و سوریه را نشان می‌دهد (شکل ۷m).

در ادامه توفان گردوخاک چهارم تا هفتم ژوئیه ۲۰۰۹ با توجه به گستردگی و شدت فراوان در دوره آماری مورد بررسی مورد تحلیل همدیدی و ماهواره‌ای قرار گرفت. بررسی نقشه‌های همدیدی ترازهای ۵۰۰ هکتوپاسکال (شکل ۸a) طی روزهای چهارم تا هفتم ژوئیه ۲۰۰۹ نشان داد که در روز اوج فعالیت این سامانه (۵ ژوئیه)، منطقه مورد مطالعه در جلو یک فرود موج کوتاه که محور آن بر روی شمال شرق آفریقا و شرق مدیترانه است، قرار گرفته و منحنی ارتفاعی ۵۸۰۰ متر بر روی منطقه مورد مطالعه کشیده است. در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال نیز منحنی‌های پراارتفاع ۳۰۷۵ متر کشیده شده بر روی منطقه مورد بررسی، حاکمیت شرایط ناپایداری و قرارگیری در جلو فرود در سطح منطقه را نشان می‌دهد (شکل ۸b)؛ بنابراین یک فرود موج کوتاه بر روی شرق مدیترانه و شمال شبه‌جزیره عربستان باعث قرارگیری منطقه مورد مطالعه در جلو فرود و تقویت شرایط ناپایداری و چرخندزایی در سطح منطقه می‌شود. این شرایط سبب خیزش و انتقال گردوخاک از بیابان‌های عراق، سوریه و اردن که در مرکز فعالیت ناپایداری قرار گرفته‌اند، به سمت غرب و جنوب غرب ایران می‌شود. در بررسی نقشه همدیدی تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال (شکل ۸c) یک مرکز کم‌ارتفاع روی شمال غرب عراق و شرق سوریه و همچنین نواحی مرکزی و شرقی کشور کاملاً مشهود است. یک سلول کم‌فشار با فشار مرکزی ۱۰۰۰ هکتوپاسکال نیز در نقشه فشار سطح دریا (شکل ۸d) روی مناطق ذکر شده گسترش یافته است که با قرارگیری در جلو فرود موج کوتاه سطح بالا شرایط برای ناپایداری و گسیل گردوخاک فراهم شده که با توجه به جهت وزش بادهای غربی و جنوب غربی در منطقه (باد شمال) انتقال این گردوخاک به منطقه مورد مطالعه رخ داده است (شکل ۸e). سنجنده MODIS ماهواره آکوا، تصاویری از گسترش این توفان را به ثبت رسانده که نشان می‌دهد این موج گردوخاک نه تنها منطقه مورد مطالعه بلکه بیشتر مناطق کشور حتی تهران را درنوردیده است (شکل ۸f).



شکل ۷- نقشه همدید ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال، فشار تراز دریا، سمت و سرعت باد برای الگوهای اول، دوم و سوم

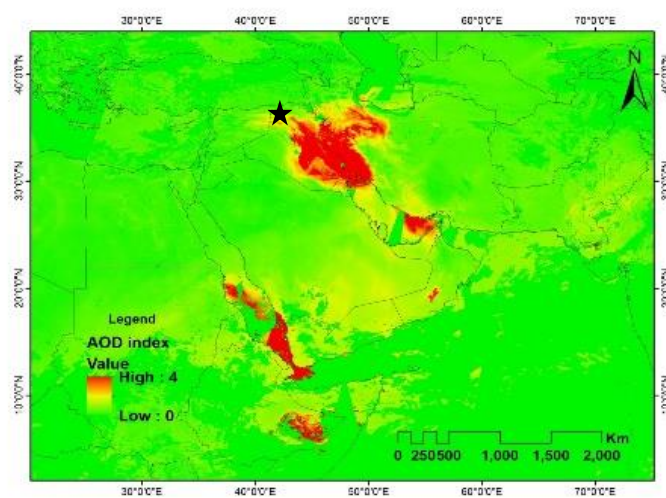
Fig. 7. Synoptic map of geopotential height at 500 hPa level, 850 hPa level, sea level pressure, wind velocity for the three- mode patterns



شکل ۸- نقشه همدید ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز (a) ۵۰۰ هکتوپاسکال، (b) ۷۰۰ هکتوپاسکال، (c) ۸۵۰ هکتوپاسکال، (d) فشار سطح دریا، (e) سمت و سرعت باد در ۵ ژوئیه ۲۰۰۹. (f) تصویر سنجنده MODIS از گسترش گردو خاک در روز ۷ ژوئیه ۲۰۰۹

Fig. 8. Synoptic map of geopotential height at a) 500 hPa, b) 700 hPa, c) 850 hPa, d) sea level pressure, e) wind velocity on July 5, 2009. f) MODIS image of dust development on July 7, 2009

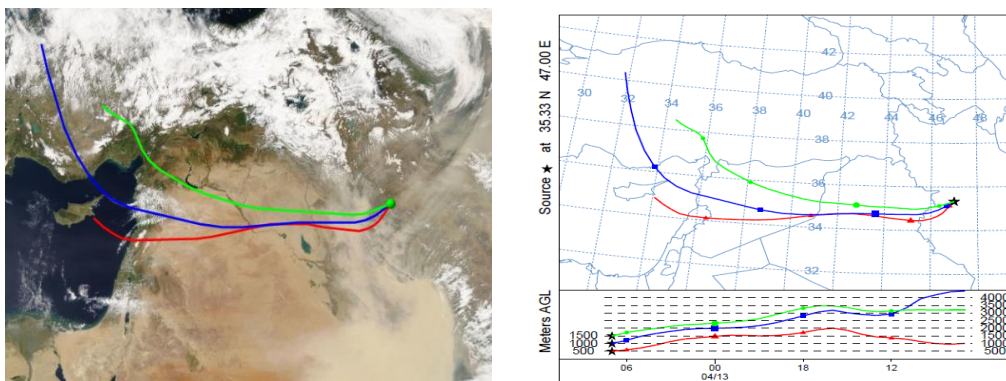
نتیجه اجرای ترکیب الگوریتم Deep Blue و Dark Target بر روی توفان گردو خاک ۵ ژوئیه ۲۰۰۹ نشان داد که این الگوریتم‌ها به خوبی توانسته‌اند با اندازه‌گیری عمق نوری، مناطق آلوده به گردو خاک را شناسایی کند. بر اساس نتایج بیشترین مقادیر AOD در استان کردستان مربوط به نواحی غربی و کمترین مقادیر مربوط به بخش‌های شمالی شرقی استان است در این توفان همان‌طور که مشاهده می‌شود تمام استان تحت تأثیر گردو خاک بوده است و تا نواحی مرکزی کشور نیز گسترش یافته است. در مجموع بیشترین مقادیر شاخص AOD در این رخداد مربوط به نیمه شرقی کشور عراق و منطقه مورد مطالعه پژوهش در غرب کشور است (شکل ۹).



شکل ۹- عمق نوری ذرات معلق (AOD) بر اساس ترکیب دو الگوریتم Deep blue و Dark target در توفان ۵ ژوئیه ۲۰۰۹

Fig. 9. AOD based on the combination of Deep blue and Dark target algorithms in the dust storm of July 5, 2009

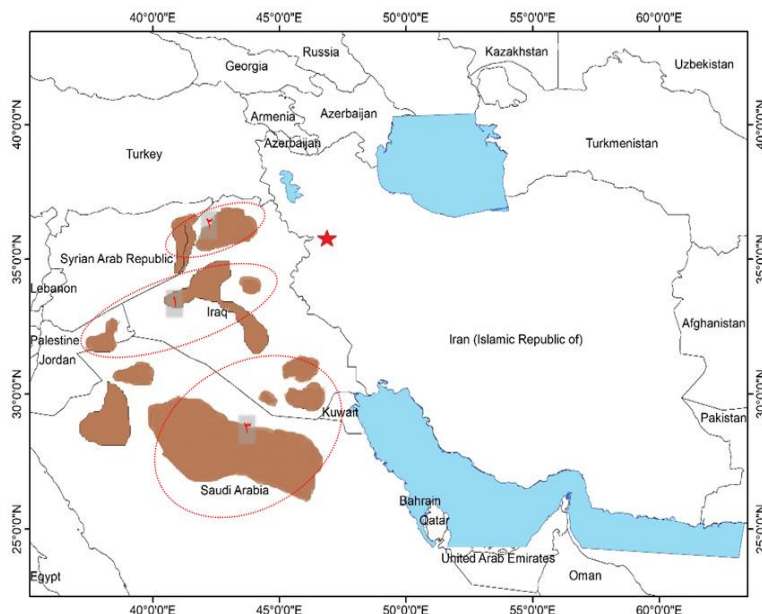
بررسی نتایج مربوط به منشاء گردوخاک ثبت شده در ایستگاه هواشناسی سنندج واقع در مرکز استان کردستان در توفان گردوخاک ۵ ژوئیه ۲۰۰۹، بیابان‌های کشورهای عراق، سوریه، اردن، عربستان و منطقه بین‌النهرین را به‌عنوان چشمه تولید گردوخاک معرفی می‌نماید (شکل ۱۰).



شکل ۱۰- نقشه‌های رهگیری مسیر باد با صورت پسگرد در توفان گردوخاک ۵ ژوئیه ۲۰۰۹

Fig. 10. Wind tracking maps with a backward trajectory in the dust storm of July 5, 2009

آشکارسازی گردوخاک بر روی تصاویر ماهواره‌ای همراه با رهگیری مسیر باد در مدل HYSPLIT نشان داد که پدیده گردوخاک در استان کردستان از ۳ چشمه اصلی منشاء می‌گیرد: (۱) اولین مرکز که شدیدترین گردوخاک‌ها نیز طی دوره مورد مطالعه مربوط به آن است رسوبات کف رودخانه‌ها و هورهای خشک شده در نواحی مرکزی عراق و همچنین بیابان‌های اردن است و بیشترین رخداد این چشمه در فصل بهار است. (۲) شمال عراق و شرق سوریه چشمه دیگری است که بیشتر در فصول تابستان و بهار منبع گردوخاک به منطقه مورد مطالعه است. بررسی تصاویر نشان می‌دهد که این چشمه در مقایسه با چشمه جنوب عراق و مناطق مرکزی و شمال شرقی عربستان نقش کمتری در گردوخاک وارده به منطقه مورد مطالعه دارد؛ با این وجود یکی از مراکز مهم فعالیت گردوخاک برای منطقه مورد مطالعه محسوب می‌شود. (۳) مناطق جنوبی عراق و شمال شرقی عربستان چشمه دیگری است که بیشترین رخداد گردوخاک ناشی از این چشمه، در دوره گرم سال است. هرچند در دوره سرد سال با فراوانی و شدت کمتر نیز این چشمه می‌تواند منطقه مورد مطالعه را تحت تأثیر قرار دهد. نقشه کلی چشمه‌های بالقوه تولید گردوخاک در منطقه مورد مطالعه در شکل ۱۱ ارائه شده است. بر این اساس بیشتر گردوخاک وارده به استان کردستان از کشورهای همسایه (عراق، سوریه، اردن و عربستان) منشاء می‌گیرد.



شکل ۱۱- نقشه توزیع چشمه‌های بالقوه تولید گردو خاک در منطقه مورد مطالعه

Fig. 11. Distribution map of potential dust sources in the study area

نتیجه‌گیری

در این پژوهش به واکاوی همدیدی و ماهواره‌ای روزهای همراه با گردو خاک در استان کردستان از سال ۱۹۹۲ تا ۲۰۲۲ پرداخته شده است. نتایج حاصل از بررسی وضعیت رخداد و مجموع روزهای همراه با گردو خاک نشان داد که شرایط جغرافیایی منطقه از طریق ساختار ناهمواری‌های منطقه و همچنین دور شدن از منشأ گردو خاک باعث شده تا پراکنش زمانی و مکانی رخداد روزهای همراه با گردو خاک یکسان نباشد و از غرب به شرق منطقه مورد مطالعه کاهش رخ دهد. توزیع زمانی گردو خاک نشان داد که در استان کردستان فصل بهار با ۴۰ درصد و تابستان با ۲۷ درصد بیشترین روزهای همراه با گردو خاک را دارند، هرچند این پدیده با شدت کمتر تقریباً در تمام سال در منطقه مورد مطالعه مشاهده می‌شود. نتایج حاصل با مطالعات محمدپور و همکاران (Mohammadpour et al., 2024) مبنی بر آشکارسازی فرین‌های فصلی گردو خاک در کردستان مطابقت دارد. پراکنش مکانی روزهای همراه با گردو خاک در طول دوره آماری مورد مطالعه نیز نشان داد که ایستگاه بانه در غرب استان با ۱۱۱۱ روز، بالاترین و ایستگاه کامیاران در جنوب استان با ۴۰۵ روز کمترین فراوانی روزهای همراه با گردو خاک را در طول دوره آماری مورد بررسی تجربه کرده‌اند. در مجموع ایستگاه‌های واقع در نواحی غربی و مرکزی استان نسبت به نواحی شرقی استان و ایستگاه‌های واقع در نواحی شمالی نسبت به نواحی جنوبی استان از روزهای همراه با گردو خاک بیشتری برخوردارند. بر اساس بررسی‌های و مطالعات قبلی صورت گرفته از جمله گودرزی و همکاران (Goodarzi et al., 2018)، صلاحی و همکاران (Salahi et al., 2019)، رستمی و حسینی (Rostami & Hosseini, 2018) و لشکری و محمدی (Lashkari & Mohammadi, 2022) عواملی از قبیل ارتفاع، عرض جغرافیایی، ساختار زمین‌شناسی و پوشش گیاهی منطقه در پراکنش و کاهش و افزایش رخداد روزهای همراه با گردو خاک در یک منطقه نقش مؤثری ایفا می‌نمایند. بررسی نقشه‌های همدیدی سطوح بالا و سطح زمین نشان داد که سه الگوی مشخص برای رخداد گردو خاک در منطقه مورد مطالعه قابل‌شناسایی است. بر اساس نتایج در بیشتر موارد استقرار یک سامانه کم‌فشار بر روی عراق و سوریه و تقویت شرایط ناپایداری در سطح بیابان‌های این مناطق و همچنین قرارگیری منطقه مورد مطالعه در جلو ناوه عمیق، زمینه مناسب برای انتقال گردو خاک به

جو منطقه را فراهم می‌آورد و با نزدیک شدن هر چه بیشتر محور ناوه در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال به نواحی غربی کشور، شدت و غلظت گردوخاک افزایش بیشتری می‌یابد. همچنین با توجه به جهت وزش بادهای غربی و جنوب غربی در منطقه (باد شمال) شرایط برای انتقال گردوخاک به غرب کشور و منطقه مورد مطالعه فراهم است. نتایج حاصل با مطالعات محمدپور و همکاران (Mohammadpour, Rashki, Sciortino, Kaskaoutis & Boloorani, 2022) در شناسایی و خوشه‌بندی رژیم‌های گردوخاک در جنوب غربی آسیا و قوامی و همکاران (Qhavami et al., 2014) در شناسایی الگوهای جوی منجر به گردوخاک در سندج مطابقت دارد.

AOD و ترکیب دو الگوریتم Deep Blue و Dark Target بر روی توفان گردوخاک منتخب نیز نشان داد که بیشترین و کمترین میزان AOD به ترتیب مربوط به نواحی غربی و شمال شرقی استان کردستان است. نتایج حاصل با مطالعات محمدپور و همکاران (Mohammadpour, Saligheh, Darvishi Bloorani & Razi, 2020) در شبیه‌سازی AOD در غرب کشور مطابقت دارد. آشکار-سازی گردوخاک بر روی تصاویر ماهواره‌ای همراه با رهگیری مسیر باد در مدل HYSPLIT نیز نشان داد که پدیده گردوخاک در استان کردستان از رسوبات کف رودخانه‌ها و هورهای خشک‌شده در نواحی مرکزی عراق، بیابان‌های اردن، نواحی شمال عراق و شرق سوریه و همچنین مناطق جنوبی عراق و شمال شرقی عربستان منشأ می‌گیرد. نتایج حاصل با مطالعات محمدپور و همکاران (Mohammadpour, Sciortino, Saligheh, Rezaei & Bloorani, 2021) مبنی بر پراکنش زمانی و مکانی گرد و غبارهای جوی در ایران و همچنین مطالعه دیگر محمدپور و همکاران (Mohammadpour et al., 2022) مبنی بر شناسایی اقلیم‌شناسی چشمه‌های گردوخاک، AOD و خوشه‌بندی الگوهای گردوخاک در جنوب غربی آسیا و دریای عرب مطابقت دارد. گردوخاک همچون نواحی جنوب غربی کشور تقریباً به یک پدیده آشنا در آسمان غرب کشور نیز تبدیل شده است، بنابراین می‌توان با مدیریت بهتر زمینه سازگاری با این پدیده را فراهم نمود و مدیریت بحران قبل و حین بحران توسط سازمان‌های مدیریتی کشور مانند هلال‌احمر، محیط‌زیست، وزارت بهداشت و مدیریت بحران کشور برای مقابله با این پدیده ضروری است و قرار دادن این پدیده در لیست مخاطرات طبیعی مخرب در سازمان‌های ذی‌ربط می‌تواند زمینه سازگاری بهتر و کاهش اثرات مخرب این پدیده در آینده برای منطقه غرب و بیشتر کشور باشد.

سپاسگزاری

از همکاران محترم اداره کل هواشناسی استان کردستان و پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو که ما را در انجام این تحقیق یاری نموده‌اند، صمیمانه تشکر می‌کنیم.

References

- Al-Khalidi, J., Bakr, D., & Abdullah, A. (2021). Synoptic Analysis of Dust Storm in Iraq. *EnvironmentAsia*, 14(1), 13-22. <http://dx.doi.org/10.14456/ea.2021.2>
- Anuforum, A. (2007). Spatial distribution and temporal variability of Harmatan dust haze in sub-sahel west Africa. *Atmospheric Environment*, 41, 43-47. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.08.003>
- Ardalan, P. M., & Rahimzadegan, M. (2015). Identification of atmospheric dust on MODIS sensor images using NDDI index (case study: Sanandaj city). Paper presented at the Proceedings of the 2nd National Congress in Environmental Pollution and the Sustainable Development, Sanandaj. [In Persian] <https://civilica.com/doc/365078>

- Bidokhti, A. A. A., Gharaylou, M., Pegahfar, N., Sabetghadam, S., & Rezazadeh, M. (2016). Characteristics of extreme dust events observed over two urban areas in Iran. *Journal of Earth System Science*, 125, 431-442. <https://doi.org/10.1007/s12040-016-0668-z>
- Cao, H., Jian, L., Guizhou, W., Guang, Y., & Lei, L. (2015). Identification of sand and dust storm source areas in Iran. *Journal of Arid Land*, 7(5), 567-578. <https://doi.org/10.1007/s40333-015-0127-8>
- Choubin, B., Sajedi Hosseini, F., Rahmati, O., Mehdizadeh Youshanloei, M., & Jalali, M. (2022). Temporal and Spatial Variations of Dust Days in Western Azarbaijan Province, Determination of the Influencing Factors and Source of Events. *Desert Management*, 10(2), 71-86. [In Persian] <https://doi.org/10.22034/jdmal.2022.550729.1378>
- Dia, A. C. (2005). Eolian contribution to soils on Mount Cameroon: isotopic and trace element records. *Chem Geol*, 226, 232-252. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2005.09.022>
- Draxler, R., Stunder, B., Rolph, G., Stein, A., & Taylor, A. (2009). *HYSPLIT4 user's guide*. Air Resources Laboratory Silver Spring, Maryland, Version 4.9.
- Ellis Jr, W. G., & Merrill, J. T. (1995). Trajectories for Saharan dust transported to Barbados using Stokes's law to describe gravitational settling. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 34(7), 1716-1726. <https://doi.org/10.1175/1520-0450-34.7.1716>
- Esfandyari darabad, F., Hosseini, S. A., & Mohammadpour, K. (2013). Synoptic statistical analysis of dust storms in Sanandaj city. Paper presented at the Proceedings of the 5th International Congress of the Islamic World Geographers, Tabriz. [In Persian] <https://civilica.com/doc/196486>
- Eslami, A., Atafar, Z., Pirsahab, M., & Asadi, F. (2014). Trends of particulate matter (PM10) concentration and related Air Quality Index (AQI) during 2005-2012 in Kermanshah, Iran. *Journal of Health in the Field*, 2(1), 19-28. [In Persian] <https://doi.org/10.22037/jhf.v2i1.5633>
- Francis, D. B. K., Flamant, C., Chaboureaud, J. P., Banks, J., Cuesta, J., Brindley, H., & Oolman, L. (2017). Dust emission and transport over Iraq associated with the summer Shamal winds. *Aeolian Research*, 24, 15-31. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2016.11.001>
- Ginoux, P. A., Prospero, J. M., Gill, T. E., Hsu, C., & Zhao, M. (2012). Global-scale attribution of anthropogenic and natural dust sources and their emission rates based on MODIS Deep Blue aerosol products. *Reviews of Geophysics*, 50(3), 1-36. <https://doi.org/10.1029/2012RG000388>
- Goodarzi, M., Hoseini, A., & Ahmadi, H. (2018). Assessing Temporal and Spatial Distribution of Dust Storm in the south and south west of Iran. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 11(39), 1-10. [In Persian] <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20089554.1396.11.39.9.7>
- Goudie, A. S., & Middleton, N. J. (2006). *Desert Dust in the Global System*. Springer Science & Business Media.
- Hejazizadeh, Z., Khosravi, A., Hosseini, S. A., Rahimi, A., & Karbalaee doree, A. R. (2021). Potential analysis of Kavir & Desert Region and Makran Coasts in order to obtain eEnergy from the sun using fuzzy logic and AHP. *Journal of Applied Researches in Geographical Sciences*, 21(63), 1-18. [In Persian] <http://dx.doi.org/10.52547/jgs.21.63.1>
- Hosseini, S. M., Khoramabadi, F., & Tahani Yazdly, M. (2024). Analysis of Spatio-Temporal Changes of Dust Hazard in Kurdistan Province. *Environmental Researches*, 14(28), 181-197. [In Persian] https://www.iraneiap.ir/article_191709.html?

- Hsu, N. C., Tsay, S. C., King, M. D., & Herman, J. R. (2006). Deep blue retrievals of Asian aerosol properties during ACE-Asia. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44, 3180–3195. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.879540>
- Jin, Q., Wei, J., Pu, B., Yang, Z. L., & Parajuli, S. P. (2018). High summertime aerosol loadings over the Arabian Sea and their transport pathways. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(18), 10-568. <https://doi.org/10.1029/2018JD028588>
- Khodakarami, A., Hooshyar, M., Javid, A., & Hosseini, S. A. (2022). Finding the Potential of Underground Water Resources of Saghez City using Fuzzy Hierarchical Analysis Process (FAHP) in GIS. *Journal of Geography and Regional Development*, 20(4), 173-133. [In Persian] <https://doi.org/10.22067/jgrd.2023.77871.1180>
- Lashkari, H., & Mohammadi, Z. (2022). Comparison and analysis of the temporal and spatial distribution of dust storms with visibility of fewer than 200 meters in western and southwestern Iran. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 9(1), 129-150. [In Persian] <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.24237892.1401.9.1.8.4>
- Li, X., Ge, L., Dong, Y., & Chang, H. C. (2010). Estimating the greatest dust storm in eastern Australia with MODIS satellite images. In *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Honolulu, Hawaii, USA. <http://dx.doi.org/10.1109/IGARSS.2010.5649212>
- Meshkizadeh, P., Orak, N., & Morshedi, J. (2016). Study of the spatial-temporal distribution of aerosol optical depth (AOD) in Khuzestan Province using remote sensing (RS) technique. *Geography and Environmental Studies*, 5(17), 69-78. [In Persian] <https://sanad.iau.ir/en/Article/978737>
- Middleton, N., Tozer, P., & Tozer, B. (2019). Sand and dust storms: underrated natural hazards. *Disasters*, 43(2), 390-409. <https://doi.org/10.1111/disa.12320>
- Mohammadpour, K., Rashki, A., Sciortino, M., Kaskaoutis, D. G., & Bloorani, A. D. (2022). A statistical approach for identification of dust-AOD hotspots climatology and clustering of dust regimes over Southwest Asia and the Arabian Sea. *Atmospheric Pollution Research*, 13(4), 101395. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101395>
- Mohammadpour, K., Saligheh, M., Darvishi Bloorani, A., & Raziiei, T. (2020). Analysis and Comparing Satellite Products and Simulated of AOD in West Iran (2000-2018). *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 7(1), 15-32. [In Persian] <http://dx.doi.org/10.29252/jsaeh.7.1.3>
- Mohammadpour, K., Saligheh, M., Raziiei, T., & Darvishi Bloorani, A. (2024). Spatiotemporal Detection of Dust Seasonal Extremes in Kurdistan Province from MACC and MODIS. *Journal of Applied Researches in Geographical Sciences*, 24(72), 1-24. [In Persian] <http://dx.doi.org/10.52547/jgs.24.72.1>
- Mohammadpour, K., Sciortino, M., Saligheh, M., Raziiei, T., & Bloorani, A. D. (2021). Spatiotemporal regionalization of atmospheric dust based on multivariate analysis of MACC model over Iran. *Atmospheric Research*, 249, 105322. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105322>
- Qhavam, 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), 67-80. [In Persian] https://clima.irimo.ir/article_15696.html
- Qu, J. J., Hao, X., Kafatos, M., & Wang, L. (2006). Asian dust storm monitoring combining Terra and Aqua MODIS SRB measurements. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 3(4), 484-486. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2006.877752>

- Refahi, H. Gh. (2004). *Wind Erosion and Its Control*. Tehran: University of Tehran Press. [In Persian] https://press.ut.ac.ir/book_1602.html
- Reyers, M., Hamidi, M., & Shao, Y. (2019). Synoptic analysis and simulation of an unusual dust event over the Atacama Desert. *Atmospheric Science Letters*, 20(6), e899. <https://doi.org/10.1002/asl.899>
- Rezaee Banafsheh, M., Dharifi, L., & Pirkhazraian, S. L. (2012). Estimating Dust Volume Using Satellite Images (Case Study: Kurdistan Province). *Quarterly Journal of Physical Geography*, 5(18), 13-22. [In Persian] <https://faculty.tabrizu.ac.ir/mrbanafsheh/fa/articlesInPublications/download/1115>
- Rezazadeh, M., Irannejad, P., & Shao, Y. J. A. R. (2013). Climatology of the Middle East dust events. *Aeolian Research*, 10, 103-109. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2013.04.001>
- Rostami, D., & Hosseini, S. A. (2018). Analysis and Tracking Dust Phenomenon in South and Southeast of Iran by using HYSPLIT Model and the Principles of Remote Sensing. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 5(3), 103-119. [In Persian] <http://dx.doi.org/10.29252/jsaeh.5.3.103>
- Salahi, B., Nohegar, A., & Behrouzi, M. (2019). Tracking of dust at levels of atmospheric in Sanandaj Using HYSPLIT model in order to manage environmental hazards. *Geography (Regional Planning)*, 9(34), 83-95. [In Persian] <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.22286462.1398.9.2.6.2>
- Sehatkashani, S., VazifeDoust, M., Kamali, G., & Bidokhti, A. A. (2015). Synoptic Analysis and Pressure Patterns of Dust events in the West and South West of Iran. *Journal of Climate Research*, 1(21), 9-20. [In Persian] https://clima.irimo.ir/article_40440_en.html
- Shamshiri, S. (2012). *Dust Zoning Using MODIS Satellite Data Case Study: Kermanshah Province*. Master's thesis. Isfahan University of Technology. [In Persian]
- Soltani, M. J., Motamedvaziri, B., Noroozi, A. A., Ahmadi, H., & Mosaffaei, J. (2021). Identifying and prioritizing the factors affecting the creation of dust in Hendijan City and providing management solutions by DPSIR framework. *Watershed Engineering and Management*, 13(2), 269-282. [In Persian] <https://doi.org/10.22092/ijwmse.2021.352406.1848>
- USEPA. (2001). *EPA/Water Quality, Environmental Matters*. Environmental Protection Agency, United States.