

Analysis of Synoptic Conditions, Transport Pathways, and Numerical Forecast Model Outputs for Three Dust Events over the Persian Gulf and Gulf of Oman in 2025

Zahra Ghassabi¹, Sara Karami² ✉

1. Forecast of Atmospheric Natural Hazards Research Group, Research Institute of Meteorology and Atmospheric Science, Tehran, Iran

Email: zghassabi@rimas.ac.ir

2. (Corresponding Author) Air Pollution and Dust Research Group, Research Institute of Meteorology and Atmospheric Science, Tehran, Iran

Email: skarami@rimas.ac.ir

Article Info

Article type:
[Research Article](#)

Article History:

Received:

9 June 2026

Revised:

27 August 2026

Accepted:

6 October 2026

Available online:

26 October 2026

Keywords:

Dust,
The Persian Gulf,
The Oman Sea,
Hysplit Model,
WRF-Chem Model.

ABSTRACT

Dust events occurring over water bodies are significant environmental phenomena. This study investigates dust events over the Persian Gulf and the Sea of Oman across three case studies during the spring, summer, and winter of 2025. The study employed satellite data, ground-based observations, synoptic analysis, and the outputs of the HYSPLIT and WRF-Chem models. Satellite products revealed intense dust plumes and significant AOD values over the Persian Gulf and the Sea of Oman in all three cases. Data from meteorological stations confirmed reduced visibility, particularly in Hormozgan Province. Synoptic analysis indicated distinct atmospheric systems across the different seasons. In the summer case study, surface maps showed the presence of a thermal low-pressure system and Shamal winds over Iraq, while the mid-troposphere exhibited a subtropical high-pressure system extending from northeastern Africa to western Iran. In the spring case study, the formation of a cold front—driven by a dynamic low-pressure system associated with a mid-tropospheric trough—was the primary cause of the dust. During winter, the presence of a dynamic low-pressure system and associated strong winds triggered dust events over the Persian Gulf and the Sea of Oman. HYSPLIT model results indicated that, in all three cases, the primary dust transport pathways originated from southern Iraq, northern and eastern Saudi Arabia, Kuwait, the UAE, and southern Iran. The WRF-Chem model outputs also accurately predicted the spatiotemporal distribution of dust concentrations and prevailing wind patterns in the region, and revealed the influence of various sources on the occurrence of these dust events.

Cite this article: Ghassabi, Z., & Karami, S. (2026). Analysis of Synoptic Conditions, Transport Pathways, and Numerical Forecast Model Outputs for Three Dust Events over the Persian Gulf and Gulf of Oman in 2025. *Physical Geography Research Quarterly*, 58 (3), 23-42.

<http://doi.org/10.22059/jphgr.2026.412942.1007927>



© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press

Extended Abstract

Introduction

Dust storms are one of the most significant natural hazards in many countries around the world, particularly those located within the global dust belt. The Middle East, as a region situated in this dust belt, contains numerous active dust source regions. Fine dust particles emitted from these sources are subsequently transported to downwind areas, often over long distances. The Persian Gulf and the Sea of Oman, two large water bodies in the Middle East, are affected annually by surrounding dust sources. These marine regions are not only ecologically sensitive but also of great economic importance for fisheries, shipping, and oil transportation. The synoptic circulation patterns affecting the region, along with prevailing wind directions, cause dust storms to pass directly over these sensitive marine environments. Pollution resulting from the transport of fine dust particles from surrounding hotspots to the Persian Gulf and the Sea of Oman is a major environmental challenge. It has created negative impacts that could damage the biodiversity of these water bodies, even in the short term. According to recent studies, the Persian Gulf and the Sea of Oman regions are among the most polluted marine areas in the world. In this study, three widespread dust phenomena over the Persian Gulf and the Sea of Oman were investigated, representing the summer, spring, and winter seasons.

Methodology

Satellite data and surface observations from Iranian synoptic stations were used to detect dust masses and assess the severity of the studied storms. To examine the mechanisms responsible for these dust events in different seasons, a synoptic analysis was performed using NCEP/NCAR reanalysis data. The HYSPLIT trajectory model was employed to identify different dust sources in the region that affect the Persian Gulf and the Sea of Oman during the selected case studies. Finally, the WRF-Chem numerical model was run to evaluate its capability in

forecasting dust storms over the Persian Gulf and the Sea of Oman.

Results and Discussion

Satellite true-color imagery revealed heavy dust masses covering a large part of the Persian Gulf, the Strait of Hormuz, and the Sea of Oman during all three cases. Aerosol optical depth (AOD) values were significant over most of the study area. Horizontal visibility data from meteorological stations also confirmed a marked decrease in visibility, especially at stations in Hormozgan province during these dust events. Visibility reductions in some cases dropped below 500 meters, indicating severe dust storm conditions. The synoptic analysis indicated different systems in the three case studies. In the summer dust storm, a thermal low-pressure system and northwesterly winds (Shamal wind) over northern Iraq were observed. At mid-tropospheric levels, subtropical high-altitude ridges extended from northeastern Africa across to the Red Sea, Saudi Arabia, and western parts of Iran. During the spring case study, the presence of a dynamic low-pressure system and its associated cold front caused severe winds and dust emission from the surface. Accordingly, this spring dust storm was classified as a frontal dust event. Additionally, a deep trough was present over the region during this case. In the winter season case, severe winds around a dynamic low-pressure system led to the formation of a dust storm. Specifically, in the first case (summer), a negative pressure anomaly over southern areas was observed; in the second case (spring), a negative altitude anomaly in the trough position over northern Iraq; and in the third case (winter), a significant pressure decrease over the study area was noted. These distinct synoptic configurations highlight the seasonal variability in dust storm triggers over the region. The outputs of the HYSPLIT model showed that the main dust paths passed through southern Iraq, northern and eastern Saudi Arabia, Kuwait, the United Arab Emirates (UAE), as well as sources located in southern Iran during all case studies. Back-trajectory analysis confirmed that air parcels arriving over the Persian Gulf and

the Sea of Oman originated primarily from these arid and semi-arid regions. The outputs of the WRF-Chem model correctly predicted the spatial and temporal distribution of high dust concentrations and the prevailing wind pattern in the region, highlighting the simultaneous role of different regional sources in the occurrence of these dust events.

Conclusion

The results indicated that there are different mechanisms causing dust storms over the Persian Gulf and the Sea of Oman, as well as various dust sources surrounding these water bodies. Dust sources in Syria, Iraq, Saudi Arabia, Kuwait, the UAE, Oman, and Iran contributed to these severe storms in the study area. Studying the synoptic systems responsible for the emission and transport of dust particles to the Persian Gulf and the Sea of Oman in different seasons can lead to more accurate dust storm forecasts in the future. Furthermore, based on the findings, numerical models such as WRF-Chem can be used as reliable tools to forecast severe dust storms over the Persian Gulf and the Sea of Oman.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

Authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work declaration of competing interest none.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to all the scientific consultants of this paper.

بررسی شرایط همدیدی، مسیرهای انتقال و خروجی مدل پیش‌بینی عددی در سه رخداد گردوخاک بر روی خلیج فارس و دریای عمان در سال ۲۰۲۵

زهرا قصابی^۱، سارا کرمی^۲ ✉

۱- گروه پژوهشی پیش‌بینی مخاطرات جوی، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران. رایانامه: zghassabi@rimas.ac.ir

۲- نویسنده مسئول، گروه پژوهشی آلودگی هوا و گردوخاک، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران. رایانامه: skarami@rimas.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	رخدادهای گردوخاک بر روی پهنه‌های آبی از جمله پدیده‌های مهم زیست‌محیطی هستند. در این پژوهش، پدیده‌های گردوخاک بر روی خلیج فارس و دریای عمان در ۳ مورد مطالعاتی در بهار، تابستان و زمستان سال ۲۰۲۵ بررسی شد. به‌منظور بررسی کامل این پدیده‌ها، از داده‌های ماهواره‌ای، مشاهدات زمینی، تحلیل همدیدی و خروجی مدل‌های HYSPLIT و WRF-Chem استفاده شد. محصولات ماهواره‌ای در هر سه مورد توده شدید گردوخاک و مقادیر قابل‌توجه AOD را بر روی خلیج فارس و دریای عمان نشان دادند. داده‌های دید افقی ایستگاه‌های هواشناسی کاهش دید، به‌ویژه در استان هرمزگان را تأیید کردند. تحلیل همدیدی، سامانه‌های متفاوتی را در فصول مختلف نشان داد. در مورد مطالعاتی فصل تابستان، در نقشه سطح زمین استقرار کم‌فشار حرارتی و وزش باد شمال بر روی عراق و در تراز میانی وردسپهر، پر ارتفاع جنب حاره از شمال شرق آفریقا تا نیمه غربی ایران مشاهده شد. در مورد مطالعاتی فصل بهار تشکیل جبهه سرد ناشی از کم‌فشار دینامیکی همراه با ناوه تراز میانی جو بر روی منطقه عامل اصلی رخداد گردوخاک بود. در فصل زمستان وجود کم‌فشار دینامیکی و وزش بادهای شدید در اطراف آن سبب شکل‌گیری پدیده گردوخاک بر روی خلیج فارس و دریای عمان شد. نتایج مدل HYSPLIT نشان داد که در هر سه مورد مسیرهای اصلی گردوخاک از مناطق جنوب عراق، شمال و شرق عربستان، کویت، امارات و جنوب ایران عبور کردند. خروجی‌های مدل WRF-Chem نیز توزیع مکانی و زمانی غلظت گردوخاک و الگوی باد حاکم بر منطقه را به‌درستی پیش‌بینی کرده و اثر چشمه‌های مختلف در وقوع این رخدادهای گردوخاک را نمایان کرد.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۱۹ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۶/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۷/۱۴ تاریخ چاپ: ۱۴۰۵/۰۸/۰۴	
واژگان کلیدی: گردوخاک، خلیج فارس، دریای عمان، مدل HYSPLIT مدل WRF- Chem	

استناد: قصابی، زهرا و کرمی، سارا. (۱۴۰۵). بررسی شرایط همدیدی، مسیرهای انتقال و خروجی مدل پیش‌بینی عددی در سه رخداد

گردوخاک بر روی خلیج فارس و دریای عمان در سال ۲۰۲۵. مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۵۸ (۳)، ۴۲-۳۳.

<http://doi.org/10.22059/jphgr.2026.416289.1007943>

مقدمه

پدیده‌های گردوخاک اثرات اقتصادی و اجتماعی زیادی دارند (Kurosaki et al., 2022; Zhao et al., 2022). تشکیل گردوخاک و انتقال آن از طریق جو به مناطق مجاور پیامدهای نامطلوبی در بخش‌های مختلف از جمله بهداشت و سلامت و محیط‌زیست بر جای می‌گذارد (حیدری و همکاران، ۱۳۹۸؛ Zhang et al., 2016; Call et al., 2018; Bhattachan et al., 2019). این پدیده معمولاً با بادهای قوی و متلاطم که بر فراز سطح بیابان یا مناطق خشک می‌وزند، باعث کاهش دید می‌شوند (Mohebbi et al., 2019). آن‌ها می‌توانند مقادیر زیادی ذرات گردوخاک را به هوا بلند کرده و صدها یا هزاران کیلومتر دورتر منتقل کنند (Zoljoodi et al., 2013).

در جنوب غرب آسیا در طول فصل قبل از مانسون توفان‌های گردوخاک منجر به تغییر ذرات در ورود سپهر می‌شوند و بر توزیع بارندگی تأثیر می‌گذارند، زیرا ذرات گردوخاک، تعادل تابشی زمین را تغییر می‌دهند، با کاهش تابش خورشید یا به صورت غیرمستقیم با افزایش هسته‌های تراکم ابر (CCN)، در نتیجه بر چرخه هیدرولوژیکی تأثیر می‌گذارند (Charlson & Heintzenberg, 1995; Hansen et al., 1997). تغییرات در تابش بر گردش موسمی تأثیر می‌گذارد و چنین تغییراتی که توسط توفان‌های گردوخاک ایجاد می‌شوند می‌توانند تأثیر عمده‌ای بر قدرت مانسون داشته باشند (Miller and Tegen, 1998; Ramanathan et al., 2001).

علاوه بر تأثیر گردوخاک بر روی زمین، انتقال آن به سمت منابع آبی نیز اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا از طریق آن عناصر بسیاری به دریاها و اقیانوس‌ها وارد می‌شوند (Vink & Measures, 2001). گردوخاکی که در مناطق بیابانی شکل می‌گیرد به‌سوی دریاها حرکت کرده و آن‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Singer et al., 2003; Rahav et al., 2016). سپیدایی و ویژگی‌های تابشی گردوخاک با تغییر شار تابشی در سطح دریا می‌تواند بر دمای سطح آب (SST) اثرگذار باشد (Luo et al., 2021).

از جمله سپیدایی گردوخاک با تغییر در بودجه گرمایی جو و مقدار تابش می‌تواند سبب تغییر در دمای سطح آب شود (افتخارزاده اردبیلی و همکاران، ۱۳۹۸). از این رو، شناخت ماهیت و منشأ تشکیل گردوخاک و سازوکار انتقال آن به منابع آبی اهمیت زیادی دارد. ایران، عراق و عربستان کانون‌های مهم گردوخاکی هستند که می‌تواند به‌سوی خلیج فارس انتقال یابد (Gholami & Mohammadifar, 2022; Masumi et al., 2019; Papi et al., 2022). خشک شدن تالاب‌ها در کشورهای عراق و سوریه از جمله تالاب‌های هورالعظیم، هورالهویزه و الحمار و دریاچه‌های اطراف کربلا، این مناطق را به کانون‌های اصلی گردوخاک در منطقه تبدیل کرده است.

عموماً برای مشخص کردن منشأ شکل‌گیری توفان‌های گردوخاک از مدل مسیریابی لاگرانژی HYSPLIT استفاده می‌شود (مبارک حسن و همکاران، ۱۴۰۰؛ صحت کاشانی و همکاران، ۱۴۰۱؛ احمدی ملاوردی و همکاران، ۱۳۹۹). خروجی این مدل منابع اصلی گردوخاک جنوب غرب ایران را در مناطق شمال تا مرکزی عراق، شرق سوریه تا شمال عربستان و کشورهای حاشیه جنوب خلیج فارس (Karami et al., 2021a) نشان می‌دهد. مدل WRF-Chem نیز به صورت گسترده‌ای در منشایابی پدیده‌های گردوخاک مورد بررسی قرار گرفته است (ساری صراف و همکاران، ۱۳۹۶). در یک مطالعه با استفاده از شبیه‌سازی مدل WRF-CHEM نیز منشأ توفان گردوخاک که بر خلیج فارس تأثیر داشته است، کشورهای عراق و عربستان شناسایی شد که با تشکیل کم‌فشار روی اردن و حرکت آن از شمال غرب عراق به‌سوی جنوب شرق آن و سپس بر روی عربستان، به تدریج بخش‌های غربی و مرکزی خلیج فارس شاهد رخداد گردوخاک شده‌اند (افتخارزاده اردبیلی و همکاران، ۱۳۹۸). در مطالعه دیگری، پژوهشگران نشان دادند که در خاورمیانه بیشینه شار گردوخاک از بخش‌هایی از قزاقستان و ازبکستان، نیمه غربی ترکمنستان، مرز عراق و سوریه و جنوب شرقی کشورهای

عراق و عربستان صورت می‌گیرد، همچنین در مناطقی از سواحل شمالی خلیج فارس و دریای عمان و مرز کشورهای ایران، افغانستان و پاکستان نیز شار گردوخاک صورت می‌گیرد (Karami et al., 2021b). در فصول غیر تابستانی، سامانه پرفشار روی جنوب شرقی شبه‌جزیره عربستان به همراه سامانه کم‌فشار روی شرق دریای مدیترانه، سبب رخداد توفان‌های گردوخاک جبهه‌ای قابل توجه روی دره رودخانه‌های دجله و فرات هستند. این سامانه‌ها شرایط مساعدی را برای انتقال توده‌های گردوخاک به سمت جنوب شرقی، شمال شرقی و شرق فراهم می‌کنند. بررسی منطقه تحت تأثیر توده‌های گردوخاک نشان داد که جنوب عراق، کویت و استان خوزستان در ایران بیشترین AOD را دارند. عراق مرکزی، غرب و جنوب غربی ایران و شمال شرقی عربستان مناطقی هستند که بیشتر از سایر مناطق خاورمیانه تحت تأثیر توفان‌های گردوخاک جبهه‌ای قرار می‌گیرند و شدیدترین توفان‌های گردوخاک جبهه‌ای در ماه‌های مارس و آوریل رخ داده است (Hamidi, 2019). این پژوهش به بررسی سه پدیده گردوخاک بر روی خلیج فارس و دریای عمان در فصول مختلف با منشأهای متفاوت می‌پردازد و عوامل هواشناختی، تصاویر ماهواره‌ای، مدل مسیریابی HYSPLIT و خروجی مدل WRF-CHEM را بررسی می‌کند.

روش پژوهش

در این مطالعه، سه مورد مطالعاتی از رخداد‌های گردوخاک در سال ۲۰۲۵ انتخاب شد که طی آن‌ها هر دو پهنه خلیج فارس و دریای عمان تحت تأثیر توده‌های گردوخاک قرار گرفته بودند و مسیرهای انتقال آن‌ها از چندین منطقه بالقوه تولید گردوخاک در منطقه عبور می‌کرد. سال ۲۰۲۵ به دلیل نزدیک بودن به زمان انجام مطالعه انتخاب شد، زیرا بررسی رخداد‌های اخیر می‌تواند تصویری به‌روزتر از شرایط کنونی فعالیت و گسترش چشمه‌های گردوخاک در منطقه ارائه دهد. این موضوع از آن جهت اهمیت دارد که تغییرات زمانی در شرایط اقلیمی، از جمله تغییرات بارش و وقوع خشک‌سالی، می‌تواند بر وضعیت و فعالیت چشمه‌های گردوخاک تأثیرگذار باشد.

سه مورد مطالعاتی به‌گونه‌ای انتخاب شدند که رخداد‌های گردوخاک در فصل‌های بهار، تابستان و زمستان را شامل شوند و امکان بررسی تفاوت شرایط همدیدی و الگوهای انتقال گردوخاک در فصل‌های مختلف فراهم شود. مورد مطالعاتی مشابهی با ویژگی‌های موردنظر در فصل پاییز شناسایی نشد. همچنین، نتایج یک مطالعه پیشین که رخداد‌های گردوخاک را در سه ایستگاه هواشناسی واقع در منطقه خلیج فارس طی یک دوره ۱۰ ساله بررسی کرده بود، نشان داد که فراوانی رخداد‌های گردوخاک در فصل پاییز به‌طور قابل‌توجهی کمتر از سایر فصل‌ها بوده است (Karami et al., 2021b). بنابراین، نبود مورد مطالعاتی پاییزی در پژوهش حاضر، علاوه بر محدودیت در دسترسی به رخداد مناسب، با فراوانی کمتر این پدیده در این فصل نیز سازگار است.

به‌منظور شناسایی توده گردوخاک در منطقه از تصاویر رنگ حقیقی سنجنده MODIS ماهواره ترا و مقادیر عمق نوری هواویزها محصول سنجنده MODIS ماهواره آکوا استفاده شد. داده‌های هواشناسی مورد استفاده شامل کمیت‌های دید افقی و سرعت باد ایستگاه‌های هواشناسی همدیدی منطقه مطالعه است که از سازمان هواشناسی کشور تهیه شد. تحلیل همدیدی و بررسی بی‌هنجاری با استفاده از نقشه‌های میانگین فشار سطح دریا و باد تراز ۱۰ متری و ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال با داده‌های NOAA با تفکیک افقی ۲/۵ درجه انجام شد.

به‌منظور شناسایی مسیرهای انتقال ذرات گردوخاک به منطقه مطالعه، مدل مسیریابی HYSPLIT به روش پسرو و به‌صورت ماتریسی بر روی خلیج فارس در ارتفاع ۵۰۰ متری با داده‌های باز تحلیل GFS با تفکیک ۰/۲۵ درجه اجرا شد.

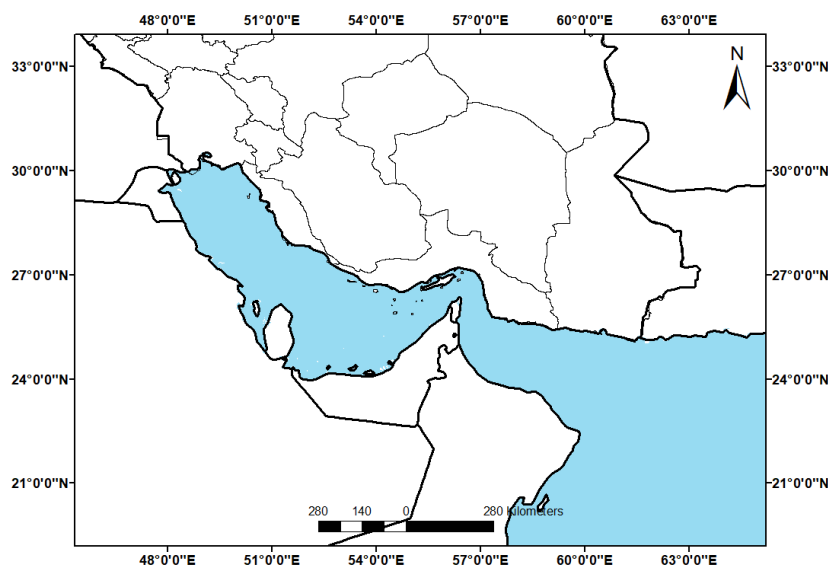
برای امکان‌سنجی پیش‌بینی این پدیده‌های گردوخاک بر روی خلیج فارس و دریای عمان، پیش‌بینی ۲۴، ۴۸ و ۷۲ ساعته غلظت گردوخاک خروجی مدل WRF-Chem ارائه شد. مدل WRF-Chem با داده‌های GFS با تفکیک افقی ۰/۵ درجه به‌عنوان شرایط اولیه و مرزی و بر روی شبکه‌ای با تفکیک ۲۱ کیلومتر اجرا شده است. جدول ۱ برخی طرح‌واره‌های مورد استفاده در اجرای مدل WRF-Chem را نشان می‌دهد. با توجه به عدم وجود ایستگاه‌های پایش غلظت ذرات معلق در منطقه مورد مطالعه، داده‌های مشاهداتی لازم برای ارزیابی کمی غلظت گردوخاک در دسترس نبود و در نتیجه، امکان محاسبه شاخص‌های آماری خطای مدل فراهم نشد. بنابراین، خروجی‌های WRF-Chem در این پژوهش به‌صورت کیفی و از طریق مقایسه با الگوی مکانی و زمانی توده‌های گردوخاک مشاهده‌شده در تصاویر ماهواره‌ای بررسی شدند.

جدول ۱. برخی طرح‌واره‌های مورد استفاده در اجرای مدل WRF-Chem

WRF Single-Moment 5-class scheme (Hong et al., 2004)	میکروفیزیک
RRTM scheme (Mlawer et al., 1997)	تابش موج بلند
Goddard shortwave (Chou and Suarez, 1999)	تابش موج کوتاه
Noah Land Surface Model (Chen, 2004)	فیزیک سطحی
Yonsei University scheme (Noh et al. 2003; Hong et al. 2006)	لایه مرزی
Grell 3D (Grell, 1993)	طرح‌واره کومولوس
AFWA	گسیل گردوخاک

محدوده مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه شامل پهنه‌های آبی خلیج فارس و دریای عمان و نواحی پیرامون آن‌ها در جنوب ایران و کشورهای مجاور است. این منطقه به دلیل قرارگیری در کمربند خشک و نیمه‌خشک خاورمیانه، مجاورت با کانون‌های متعدد انتشار گردوخاک در شبه‌جزیره عربستان، عراق و جنوب ایران و همچنین وجود سامانه‌های جوی مناسب برای انتقال ذرات معلق، از مناطق مهم در بررسی رخداد‌های گردوخاک به شمار می‌رود. شکل ۱ موقعیت منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



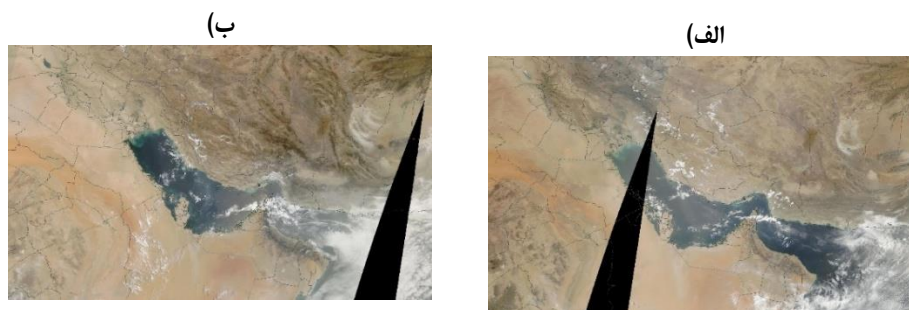
شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

یافته‌ها

مورد مطالعاتی تابستان (۳۱ ژوئیه تا ۳ اوت ۲۰۲۵)

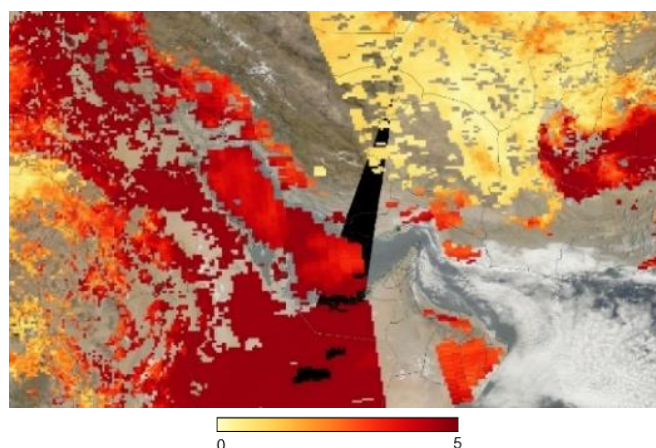
الف) تصاویر ماهواره

شکل ۲ تصاویر رنگ حقیقی سنجنده مادیس ماهواره ترا را نشان می‌دهد. در روز ۳۱ ژوئیه، توده گردوخاک بر روی بخش وسیعی از خلیج فارس مشاهده می‌شود. در روز ۱ اوت توده گردوخاک بیشتر در مناطق شرقی خلیج فارس، تنگه هرمز و دریای عمان نشان داده شده است. در این روز بخش وسیعی از مناطق جنوب شرقی ایران متأثر از گردوخاک است. در روز ۲ اوت شدت پدیده گردوخاک در سراسر خلیج فارس و دریای عمان افزایش یافته و گردوخاک در بخش وسیعی از منطقه مورد مطالعه مشاهده می‌شود. در این روز سراسر دریای عمان تحت پوشش ابر قرار دارد، باین وجود گردوخاک در میان ابرها قابل مشاهده است. در روز ۳ اوت همچنان گردوخاک در منطقه مشاهده می‌شود، اما بر روی خلیج فارس شدت آن کاهش یافته است.



شکل ۲. تصاویر رنگ حقیقی سنجنده مادیس ماهواره ترا در روزهای الف) ۱ ماه اوت، ب) ۲ اوت سال ۲۰۲۵

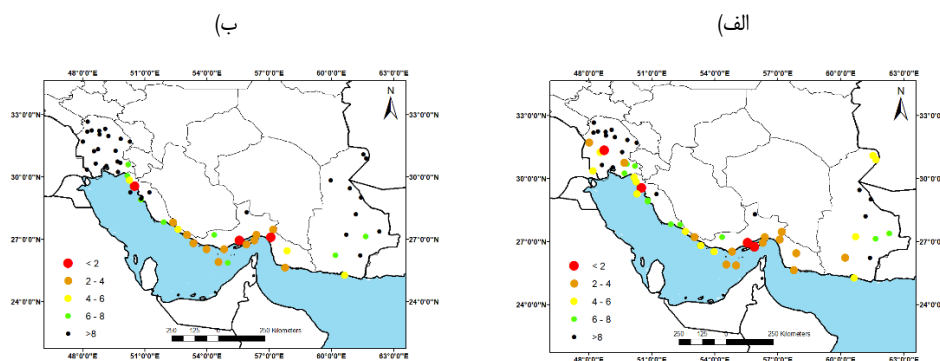
شکل ۳ مقادیر عمق نوری هواویزها محصول سنجنده مادیس ماهواره آکوا در روز ۲ اوت سال ۲۰۲۵ را نمایش می‌دهد. به دلیل اینکه بخشی از منطقه به دلیل گذار ماهواره فاقد داده AOD بود این محصول بر روی تصویر رنگ حقیقی ماهواره ترا نشان داده شده است. مقادیر AOD بر روی بخش وسیعی از خلیج فارس قابل توجه است، ولی بر روی دریای عمان به دلیل پوشش ابر نشان داده نشده است. باین وجود در تصویر ماهواره‌ای توده گردوخاک در این منطقه در میان ابرها به خوبی قابل مشاهده است. همچنین مقدار AOD بر روی بخش وسیعی از منطقه شامل کشورهای عراق، عربستان، کویت، امارات و جنوب و جنوب غربی ایران قابل توجه است که می‌تواند ناشی از وجود گردوخاک شدید باشد.



شکل ۳. مقادیر عمق نوری هواویزها محصول سنجنده مادیس ماهواره آکوا در روز ۲ اوت سال ۲۰۲۵

ب) داده‌های مشاهداتی

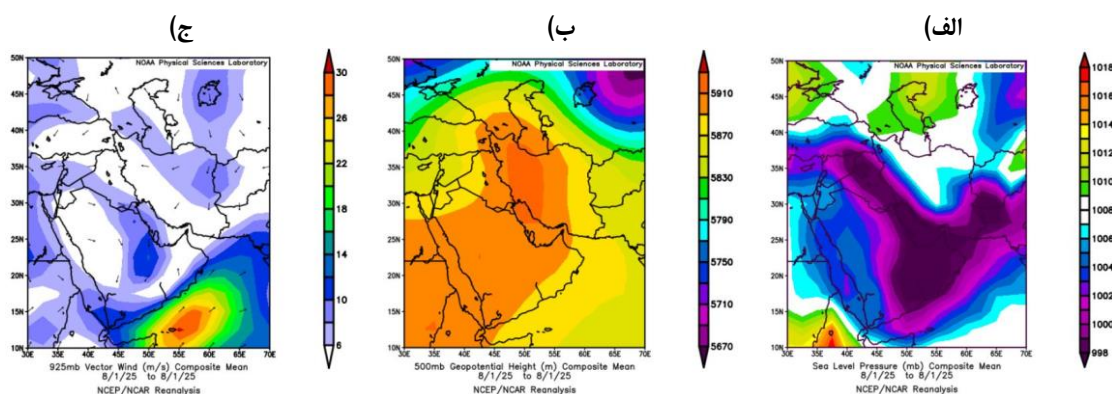
شکل ۴ دید افقی در ساعت UTC ۱۲ روزهای ۳۱ ژوئیه و ۱ اوت و ساعت‌های UTC ۶ و ۱۲ روز ۲ اوت سال ۲۰۲۵ در ایستگاه‌های هواشناسی همدید واقع در استان‌های هرمزگان، بوشهر، خوزستان و سیستان و بلوچستان را نشان می‌دهد. در روز ۳۱ ژوئیه در بیشتر ایستگاه‌های جنوبی کشور کاهش دید گزارش شده است. در سه ایستگاه بندر دیلم، بندرعباس و میر جاوه میزان دید افقی به کمتر از ۲ کیلومتر رسیده است. در روز ۱ اوت بیشترین میزان کاهش دید در ایستگاه‌های استان هرمزگان مشاهده شده است. در روز ۲ اوت همچنان مقادیر دید افقی کمتر از ۴ کیلومتر از بسیاری از ایستگاه‌های هواشناسی واقع در منطقه گزارش شده است.



شکل ۴. دید افقی در ساعت UTC ۰۶ روزهای الف) ۱، ب) ۲ ماه اوت سال ۲۰۲۵ در ایستگاه‌های هواشناسی همدیدی منطقه مطالعه

ج) بررسی همدیدی

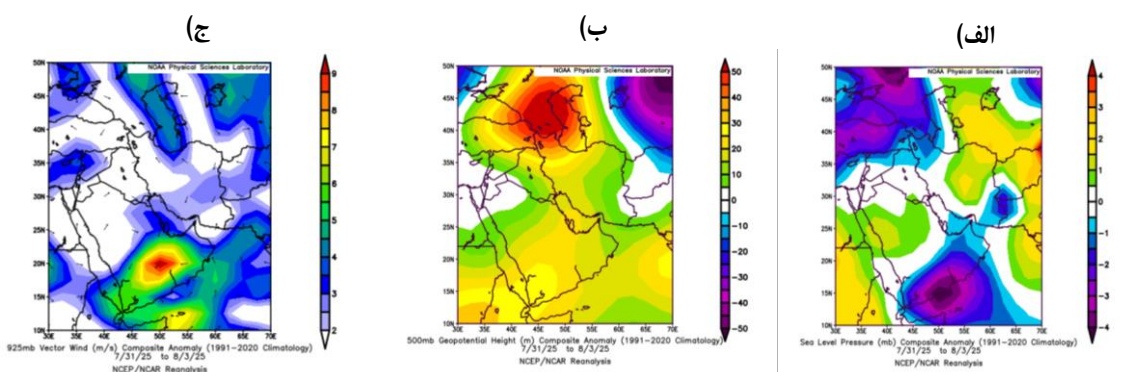
در روز ۱ اوت استقرار کم‌فشار حرارتی بر روی شرق پاکستان، جنوب ایران، دریای عمان و خلیج فارس، شرق شبه‌جزیره عربستان و کشور عراق مشاهده می‌شود که به‌صورت سه مرکز کم‌فشار در ۱- مرز پاکستان، ایران و افغانستان-۲- خلیج فارس، دریای عمان و شرق عربستان ۳- شمال عراق است. در این روز نوار شمالی ایران و دریای خزر تحت تأثیر پرفشار است (شکل ۵-الف). در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال استقرار پر ارتفاع جنب حاره از شمال شرق آفریقا، دریای سرخ، عربستان تا نیمه غربی و مرکزی ایران مشاهده می‌شود (شکل ۵-ب). بررسی الگوی باد ۱۰ متری (۹۲۵ هکتوپاسکال) جریان باد شمال غربی از سوی عراق و شمال عربستان به‌سوی آب‌های خلیج فارس را نشان می‌دهد. بعلاوه جریان باد جنوبی از روی کشور عمان به سمت تنگه هرمز مشاهده می‌شود. بیشینه سرعت وزش باد در مناطق جنوبی عربستان مستقر شده است (شکل ۵-ج). در یک مطالعه نقش باد شمال در پدیده‌های گردو خاک در غرب ایران بررسی شد (بیرانوند و همکاران، ۱۴۰۳). از ۲۲۹ رخداد گردو خاک بررسی شده در دوره زمانی ۱۹۸۷-۲۰۲۲، ۷۰ مورد توفان ناشی از باد شمال تابستانه و ۲۵ مورد ناشی از باد شمال زمستانه بودند.



شکل ۵. الف) الگوی فشار سطح زمین، ب) ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ hPa، ج) سرعت باد تراز ۹۲۵ hPa در روز ۱ ماه اوت سال ۲۰۲۵

د) بررسی الگوهای بی‌هنجاری

در بررسی الگوی بی‌هنجاری فشار نسبت به بلندمدت (۱۹۹۱-۲۰۲۰)، افزایش فشار در شمال شرق و شرق ایران و بر روی شمال عربستان، جنوب عراق و کاهش قابل‌ملاحظه فشار در جنوب شرق ایران در مرز با پاکستان و افغانستان و بر روی خلیج فارس، تنگه هرمز و دریای عمان، و شرق و جنوب شبه‌جزیره عربستان مشاهده می‌شود. این الگو به‌وضوح افزایش جریان باد شمالی از شرق و مرکز ایران به‌سوی آب‌های جنوبی ایران و نیز باد شمال غربی از کشور عراق به‌سوی خلیج فارس را تأیید می‌کند (شکل ۶-الف). در نقشه بی‌هنجاری ارتفاع ۵۰۰ هکتوپاسکال افزایش ارتفاع قابل‌ملاحظه در نیمه غربی کشور به‌ویژه در شمال غرب ایران مشاهده می‌شود (شکل ۶-ب). بی‌هنجاری باد ۱۰ متری نیز جریان شمالی باد از نواحی مرکزی و شرقی ایران، جریان شمال غربی از جنوب عراق و شمال غرب عربستان را نشان می‌دهد، همچنین بی‌هنجاری مثبت سرعت باد روی شبه‌جزیره عربستان مشاهده می‌شود (شکل ۶-ج).

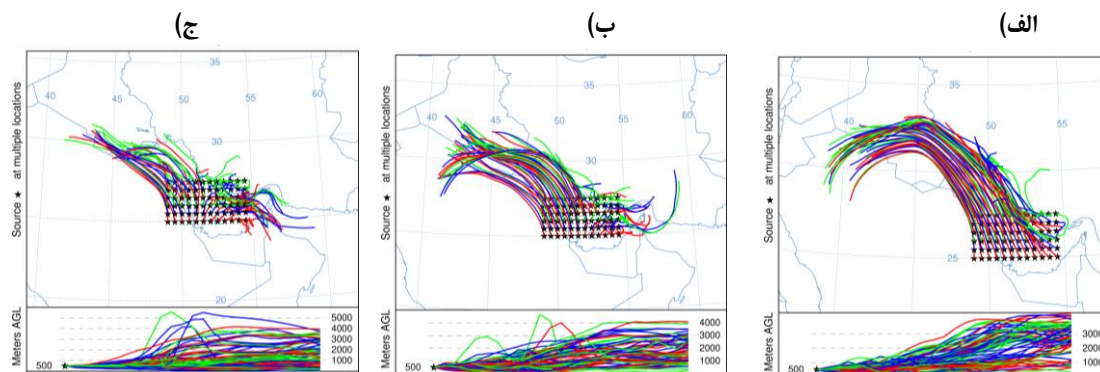


شکل ۶. الف) الگوی بی‌هنجاری فشار، ب) ارتفاع ژئوپتانسیل ۵۰۰ هکتوپاسکال و ج) باد ۱۰ متری در ۳۱ ژوئیه تا ۳ اوت ۲۰۲۵ نسبت به بلندمدت (۱۹۹۱-۲۰۲۰)

ه) بررسی مسیر حرکت ذرات گردو خاک

خروجی مدل HYSPLIT به‌صورت ماتریسی به روش پس‌رو برای ۲۴ ساعت بر روی خلیج فارس در ارتفاع ۵۰۰ متری برای ساعت ۰۰ UTC روزهای ۳۱ ژوئیه و ۲ اوت که با داده‌های باز تحلیل GFS با تفکیک ۰/۲۵ درجه اجرا شده در شکل ۷ نشان داده شده است. بررسی مسیر حرکت توده‌های گردو خاک به‌سوی منطقه مطالعه با مدل HYSPLIT نشان می‌دهد که در روز ۳۱ ژوئیه گردو خاک از چشمه‌های جنوب عراق، شمال عربستان، کویت و نیز از چشمه‌هایی در نوار جنوبی ایران در استان‌های خوزستان و بوشهر به خلیج فارس گسیل شده است. (شکل ۷-الف). طی روز ۱ اوت علاوه

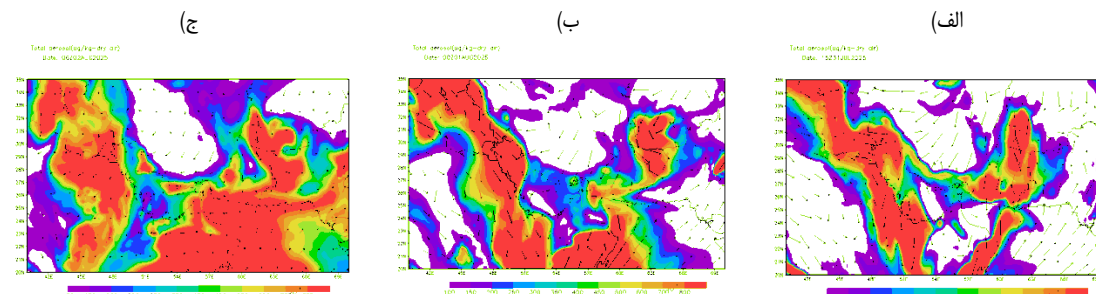
بر مناطق یادشده چشمه‌هایی از جنوب شرق ایران و استان هرمزگان و همچنین شمال کشور امارات نیز در گسیل گردوخاک به‌سوی خلیج فارس و تنگه هرمز نقش دارند (شکل ۷-ب). در روز ۲ اوت مناطق مرزی کشورهای عراق و عربستان، استان‌های بوشهر، هرمزگان و جنوب سیستان و شمال کشور امارات بیشترین سهم را در مسیرهای عبوری گردوخاک به منطقه مطالعه دارند. (شکل ۷-ج).



شکل ۷. خروجی مدل HYSPLIT برای ۲۴ ساعت بر روی خلیج فارس در ارتفاع ۵۰۰ متری برای ساعت ۰۰ UTC روز الف) ۳۱ ژوئیه، ب) ۱ اوت، ج) ۲ اوت سال ۲۰۲۵

و) مدل WRF_chem

خروجی مدل در روز ۳۱ ژوئیه ساعت ۱۵ UTC، بیشینه غلظت را در جنوب عراق، شمال خلیج فارس و سواحل جنوبی آن در روی کشور عربستان و همچنین در استان‌های بوشهر، هرمزگان و سیستان و بلوچستان نشان می‌دهد. همچنین، همان‌گونه که انتظار می‌رفت جهت باد شمال غربی روی عراق و شمال خلیج فارس، جهت باد شمالی در کناره‌های شمالی خلیج فارس و دریای عمان را به‌درستی نشان می‌دهد (شکل ۸-الف). در ساعت ۰۰ UTC روز ۱ اوت بیشترین غلظت گردوخاک (۸۰۰ میکروگرم بر مترمکعب) را بر روی عراق، شمال خلیج فارس و بخش‌هایی از سواحل دریای عمان در استان‌های هرمزگان و سیستان و بلوچستان نشان می‌دهد (شکل ۸-ب). در این روز جریان باد شرقی از روی کشور امارات به‌سوی شرق خلیج فارس نیز توسط مدل پیش‌بینی شده است که از ساعت ۰۶ UTC قابل‌رویت است. در ساعات پایانی این روز به‌تدریج با جابجایی مرکز بیشینه سرعت به شرق عربستان از غلظت گردوخاک روی شمال خلیج فارس کم شده، اما همچنان گردوخاک با غلظت زیاد بر روی دریای عمان و جنوب شرق ایران مشاهده می‌شود. در روز ۲ اوت با توجه به جریان شمالی و شمال شرقی باد در استان‌های بوشهر و هرمزگان و به سبب وجود چشمه‌های محلی در این استان‌ها دو مرکز با غلظت زیاد در استان بوشهر و غرب هرمزگان دیده می‌شود. همچنان غلظت زیاد گردوخاک در دریای عمان و سواحل جنوبی آن در استان سیستان و بلوچستان دیده می‌شود (شکل ۸-ج).

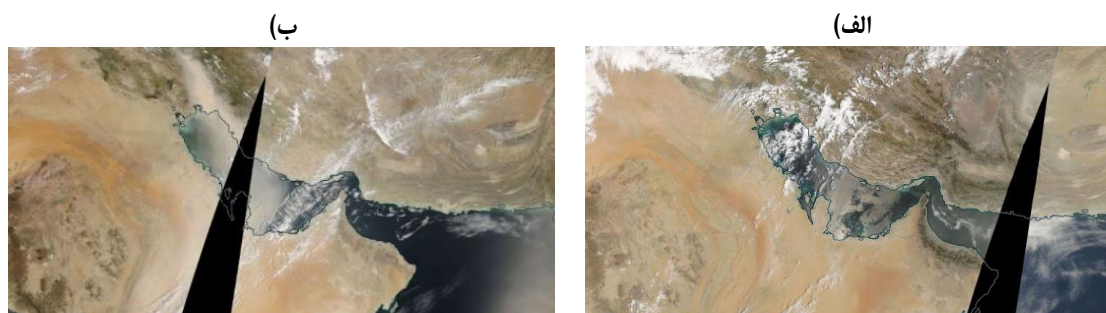


شکل ۸. خروجی مدل WRF-Chem برای الف) ۱۵ UTC روز ۳۱ ژوئیه، ب) ساعت ۰۰ UTC روز ۱ اوت و ج) ساعت ۰۶ UTC روز ۲ اوت سال ۲۰۲۵

مورد مطالعاتی بهار (۱۴ تا ۱۶ آوریل ۲۰۲۵)

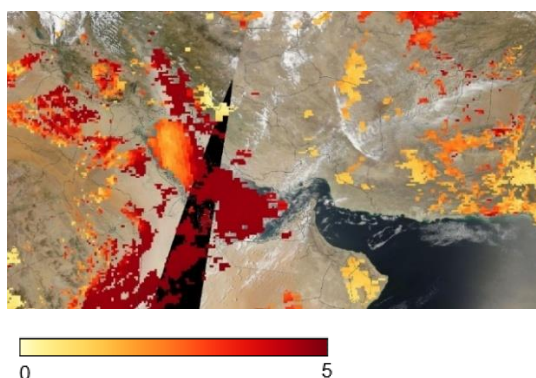
الف) تصاویر ماهواره

شکل ۹ تصاویر رنگ حقیقی سنجنده مادیس ماهواره ترا را نشان می‌دهد. در روز ۱۴ آوریل توده گردوخاک بیشتر در مناطق شرقی خلیج فارس، تنگه هرمز و دریای عمان نشان داده شده است. همچنین، مناطق جنوب شرقی ایران متأثر از گردوخاک است. در روز ۱۵ آوریل گردوخاک با غلظت بیشتر در سراسر خلیج فارس و غرب تنگه هرمز مشاهده می‌شود. در روز ۱۶ آوریل با گسترش به‌سوی شرق، توده گردوخاک بر روی تنگه هرمز، دریای عمان و دریای عرب مشاهده می‌شود و شدت آن بر روی خلیج فارس کاهش یافته است (در شکل نشان داده نشده).



شکل ۹. تصاویر رنگ حقیقی سنجنده مادیس ماهواره ترا در روز الف (۱۴ ب) ۱۵ ماه آوریل سال ۲۰۲۵

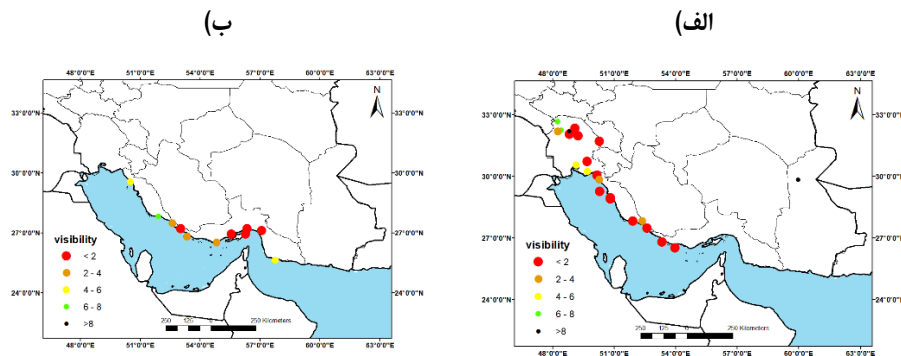
شکل ۱۰ مقادیر AOD محصول سنجنده مادیس ماهواره آکوا را در روز ۱۵ آوریل سال ۲۰۲۵ نشان می‌دهد. در این روز مقادیر AOD بر روی خلیج فارس، مناطق جنوب غربی ایران، بخش وسیعی از عراق و مناطق مرکزی عربستان بسیار زیاد است که نشان‌دهنده وجود گردوخاک شدید در این مناطق است.



شکل ۱۰. مقادیر عمق نوری هواویزها محصول سنجنده مادیس ماهواره آکوا در روز ۱۵ آوریل سال ۲۰۲۵

ب) داده‌های مشاهداتی

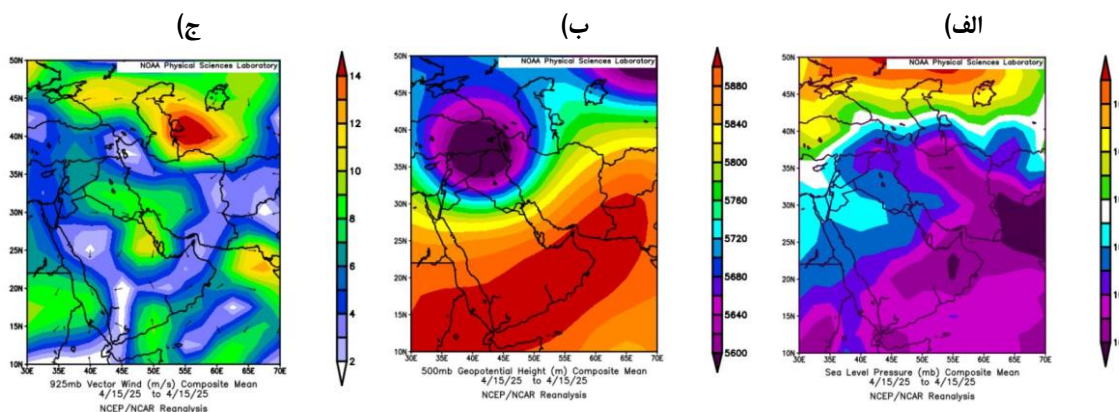
مقادیر دید افقی در ساعت ۱۲ UTC روزهای ۱۵ و ۱۶ آوریل سال ۲۰۲۵ در ایستگاه‌های هواشناسی همدید واقع در استان‌های جنوبی ایران (خوزستان، بوشهر، هرمزگان و سیستان و بلوچستان) که کد پدیده مربوط به گردوخاک را گزارش کرده بودند در شکل ۱۱ نشان داده شده است. در روز ۱۵ آوریل در بیشتر ایستگاه‌های واقع در استان‌های خوزستان و بوشهر و همچنین تعدادی ایستگاه در شرق استان هرمزگان کاهش دید قابل توجه گزارش شده و مقادیر دید افقی به کمتر از ۲ کیلومتر کاهش یافته است. در روز ۱۶ آوریل بیشترین میزان کاهش دید در ایستگاه‌های استان هرمزگان مشاهده شده است.



شکل ۱۱. دید افقی در ساعت ۱۲ UTC روزهای الف (۱۵ ب) ۱۶ ماه آوریل سال ۲۰۲۵ در ایستگاه‌های هواشناسی همدیدی منطقه مطالعه

ج) بررسی همدیدی

در الگوی فشار سطح زمین در روز ۱۵ آوریل سامانه کم‌فشار دینامیکی بر روی شمال عراق شکل گرفته است. کم‌فشار حرارتی گسترده‌ای روی پاکستان، جنوب ایران، دریای عمان و خلیج فارس، شبه‌جزیره عربستان به‌سوی شمال تا دریای خزر کشیده شده است و نیمه شمالی، شرق و جنوب کشور، همچنین دریای عمان و شرق خلیج فارس را در بر گرفته است (شکل ۱۲-الف). در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال سامانه کم ارتفاع بر فراز کم‌فشار دینامیکی، شرق دریای سیاه، شرق ترکیه، شمال عراق، شرق سوریه و نیز شمال غرب و بخشی از غرب ایران را در بر گرفته است و خط ناه از غرب کشور تا جنوب غرب و شمال خلیج فارس امتداد دارد. این در حالی است که بر ارتفاع جنب حاره به‌سوی جنوب شرق کشور و بر روی پاکستان رانده شده است (شکل ۱۲-ب). در این روز بیشینه سرعت وزش باد در منطقه به‌طور گسترده در جنوب عراق، جنوب غرب ایران، شمال و مرکز خلیج فارس و شمال شرق عربستان قرار دارد و جریان باد غربی از روی جنوب عراق به‌سوی خلیج فارس ادامه دارد. در این روز تغییر جهت باد نشان می‌دهد که جبهه سرد وابسته به کم‌فشار دینامیکی واقع بر روی عراق تا مناطق جنوب شرقی این کشور و خلیج فارس کشیده شده است. (شکل ۱۲ ج).

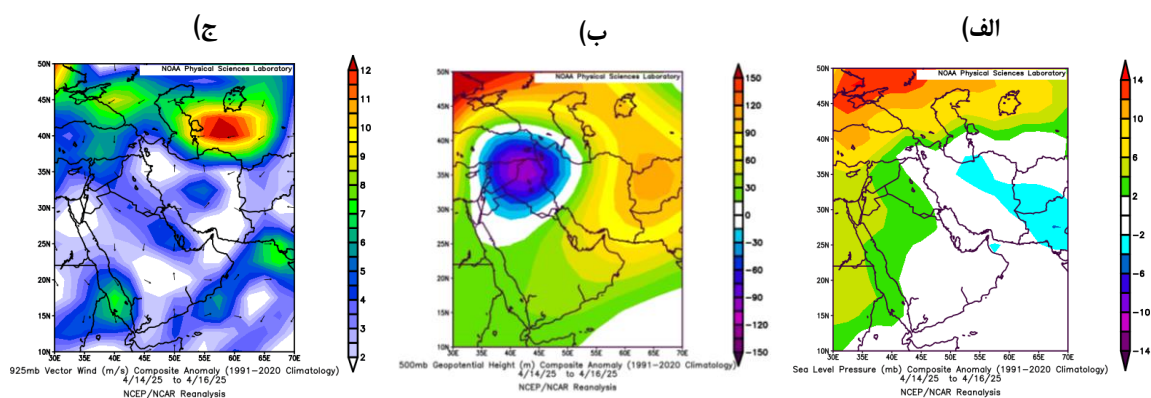


شکل ۱۲. الف) الگوی فشار سطح زمین، ب) ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ hPa، ج) سرعت باد تراز ۹۲۵ hPa در روز ۱۵ ماه آوریل سال ۲۰۲۵

ج) بررسی الگوهای بی‌هنجاری

در بررسی الگوی بی‌هنجاری فشار نسبت به بلندمدت (۱۹۹۱-۲۰۲۰)، افزایش فشار در بالای عرض ۴۰ درجه شمالی و بر روی غرب عراق، شمال غرب عربستان و کاهش فشار در شرق ایران در مرز پاکستان و افغانستان مشاهده می‌شود. این الگو افزایش جریان باد شمال غربی از روی سوریه، عراق و شمال عربستان به‌سوی خلیج فارس را تأیید می‌کند (شکل ۱۳-الف). در نقشه بی‌هنجاری ارتفاع ۵۰۰ هکتوپاسکال کاهش ارتفاع قابل‌ملاحظه در نیمه غربی کشور مشاهده می‌شود

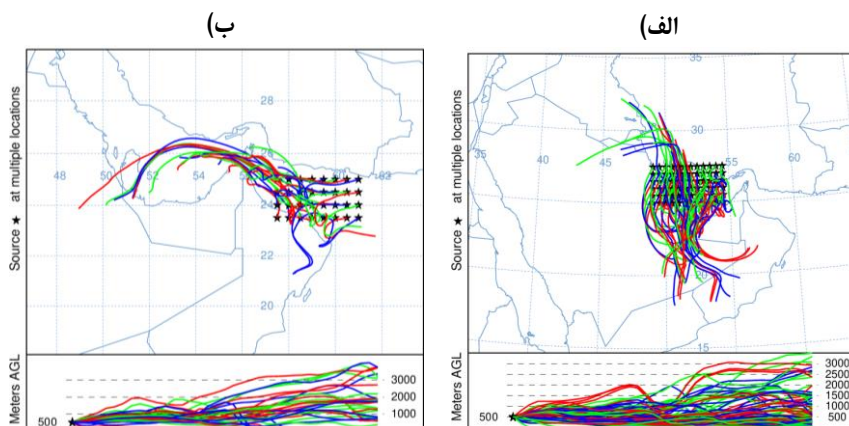
(شکل ۱۳-ب). بی‌هنجاری باد ۱۰ متری نیز وزش باد شمال غربی از روی سوریه، عراق و شمال غرب عربستان به‌سوی خلیج فارس را نشان می‌دهد، همچنین بی‌هنجاری مثبت سرعت باد روی جنوب خلیج فارس و شمال شرق شبه‌جزیره عربستان مشاهده می‌شود (شکل ۱۳-ج).



شکل ۱۳. الگوی بی‌هنجاری (الف) فشار، (ب) ارتفاع ژئوپتانسیل ۵۰۰ هکتوپاسکال و (ج) باد ۱۰ متری در ۱۴ تا ۱۶ آوریل ۲۰۲۵ نسبت به بلندمدت (۱۹۹۱-۲۰۲۰)

(د) بررسی مسیر حرکت ذرات گردوخاک

خروجی مدل HYSPLIT به‌صورت ماتریسی به روش پس‌رو برای ۳۶ ساعت بر روی خلیج فارس و دریای عمان در ارتفاع ۵۰۰ متری برای ساعت ۱۲ UTC روزهای ۱۴ و ۱۶ آوریل سال ۲۰۲۵ که با داده‌های باز تحلیل GFS با تفکیک ۰/۲۵ درجه اجرا شده در شکل ۱۳ نشان داده شده است. در روز ۱۴ آوریل ذرات گردوخاک از مناطق جنوب شرقی عراق، جنوب غربی ایران، شرق و جنوب شرقی عربستان و حتی مناطقی از کشورهای عمان و امارات وارد خلیج فارس شده‌اند. خروجی مدل در روز ۱۶ آوریل نشان می‌دهد که ذرات گردوخاک از فراز خلیج فارس وارد دریای عمان شده‌اند. همچنین انتقال ذرات از کشور عمان به این منطقه نیز مشاهده می‌شود.

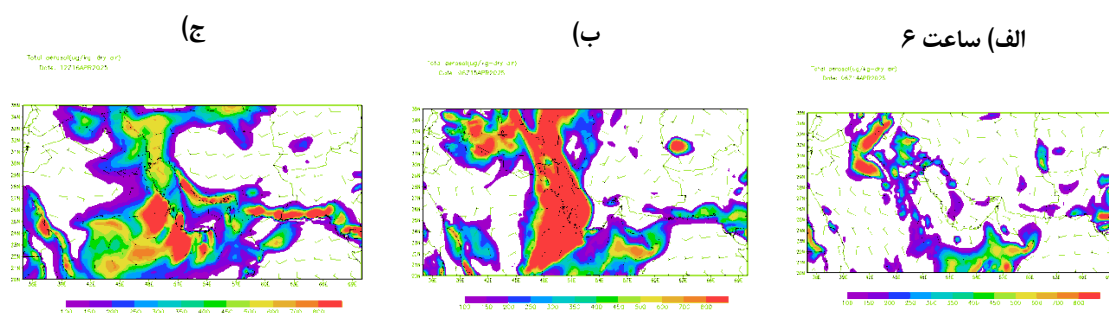


شکل ۱۴. خروجی مدل HYSPLIT برای ۲۴ ساعت بر روی خلیج فارس در ارتفاع ۵۰۰ متری برای ساعت ۱۲ UTC روز (الف) ۱۴، (ب) ۱۶ آوریل سال ۲۰۲۵

(ه) مدل WRF_chem

شکل ۱۵ غلظت گردوخاک و باد در ارتفاع ۱۰ متری خروجی مدل WRF-Chem در ساعت ۰۶ UTC روزهای ۱۴ تا ۱۶ آوریل سال ۲۰۲۵ را نشان می‌دهد. در روز ۱۴ آوریل بیشترین غلظت گردوخاک در مناطق جنوبی عراق و شمال شرقی عربستان مشاهده می‌شود. در این روز غلظت گردوخاک بر روی کویت، جنوب غربی ایران، جنوب عربستان و

مناطق از کشورهای امارات و عمان نیز قابل توجه است. چرخش بردارهای باد در مناطق مرکزی عراق نشان می‌دهد که مدل وجود کم‌فشار در این منطقه را به خوبی پیش‌بینی کرده است. مقایسه با تصاویر ماهواره‌ای نیز نشان می‌دهد که مدل توانسته است توده گردوخاک بر روی عراق و مناطق شمال شرقی عربستان، در اطراف سامانه کم‌فشار را پیش‌بینی کند. از طرف دیگر تغییر جهت باد از باد شمال و شمال غربی به جنوبی در مناطق مرکزی عربستان بیانگر این است که مدل محل جبهه سرد وابسته به این سامانه و وجود گردوخاک در محل جبهه که به دلیل وزش شدید باد و عدم وجود رطوبت سطحی شکل گرفته است را نشان داده است. در روز ۱۵ آوریل انتقال جبهه سرد به سمت شرق و استقرار آن بر روی خلیج فارس و مناطق جنوبی عربستان و پدیده گردوخاک پس جبهه‌ای در خروجی مدل مشاهده می‌شود. در این روز مدل افزایش شدید غلظت گردوخاک بر روی خلیج فارس را پیش‌بینی کرده است. در روز ۱۶ آوریل با انتقال بخشی از گردوخاک از روی خلیج فارس به دریای عمان، غلظت گردوخاک در خلیج فارس کاهش یافته است. همچنین خروجی مدل انتقال گردوخاک از مناطق جنوبی کشور عمان به دریای عرب را نشان می‌دهد.

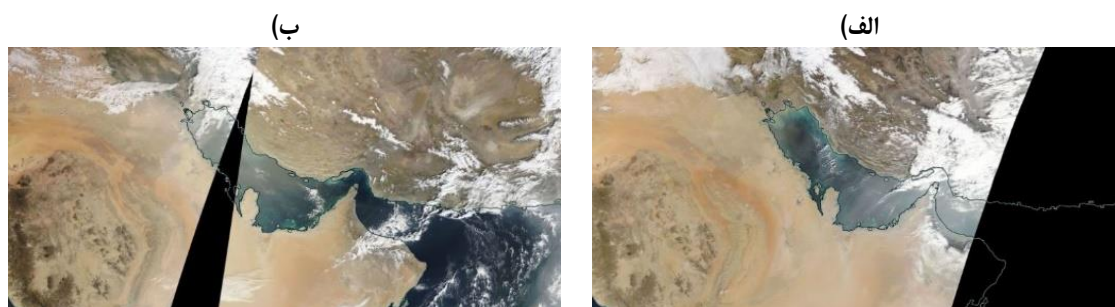


شکل ۱۵. خروجی مدل WRF-Chem برای الف) ساعت ۰۶ UTC روز ۱۴ آوریل، ب) ساعت ۰۶ UTC روز ۱۵ آوریل و ج) ساعت ۱۲ UTC روز ۱۶ آوریل سال ۲۰۲۵

مورد مطالعاتی زمستان (۲۸ تا ۳۱ دسامبر ۲۰۲۵)

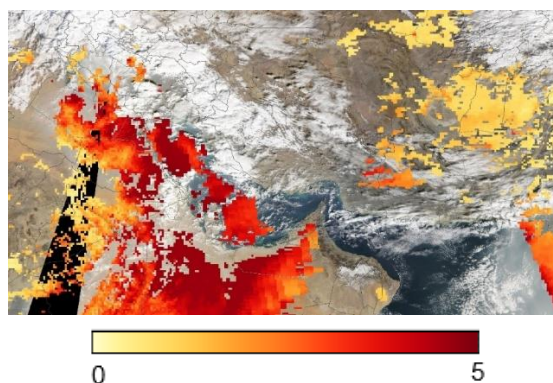
الف) تصاویر ماهواره

شکل ۱۶ تصاویر رنگ حقیقی سنجنده مادیس ماهواره ترا را نشان می‌دهد. در روز ۲۹ دسامبر پس از کاهش ابر، توده گردوخاک بر روی خلیج فارس مشاهده می‌شود. در روز ۳۰ دسامبر توده گردوخاک بر روی کل خلیج فارس مشاهده می‌شود، همچنین توده گردوخاک در جنوب شرق ایران در شمال استان سیستان و بلوچستان وجود دارد.



شکل ۱۶. تصاویر رنگ حقیقی سنجنده مادیس ماهواره ترا در روزهای الف) ۲۹ ب) ۳۰ دسامبر ۲۰۲۵

شکل ۱۷ مقادیر AOD محصول سنجنده مادیس ماهواره آکوا را در روز ۲۸ دسامبر سال ۲۰۲۵ نشان می‌دهد. در این روز مقادیر AOD بر روی خلیج فارس، جنوب غربی ایران و بخش وسیعی از کشورهای عراق و عربستان بسیار زیاد است.



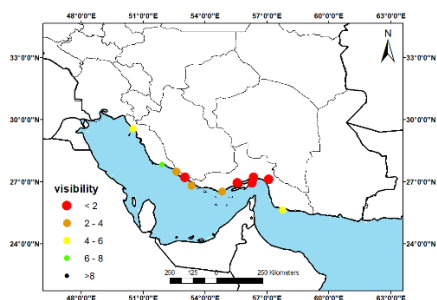
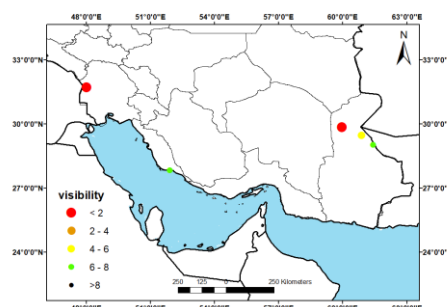
شکل ۱۷. مقادیر عمق نوری هواویزها محصول سنجنده مادیس ماهواره آکوا در روز ۲۸ دسامبر سال ۲۰۲۵

(ب) داده‌های مشاهداتی

مقادیر دید افقی در ساعت ۱۲ UTC روزهای ۳۰ و ۳۱ دسامبر سال ۲۰۲۵ در ایستگاه‌های هواشناسی همدید واقع در استان‌های جنوبی ایران که کد پدیده مربوط به گردوخاک را گزارش کرده بودند در شکل ۱۸ نشان داده شده است. در روز ۳۰ دسامبر بیشترین کاهش دید در ایستگاهی واقع در غرب استان هرمزگان مشاهده می‌شود. همچنین از ایستگاه‌هایی واقع در شرق بوشهر و شمال سیستان و بلوچستان کاهش دید افقی ناشی از گردوخاک گزارش شده است. در روز ۳۱ دسامبر پدیده گردوخاک در تعداد زیادی از ایستگاه‌های واقع در استان‌های بوشهر و هرمزگان پدیده گردوخاک مشاهده شده و دید افقی در بسیاری از ایستگاه‌های هواشناسی استان هرمزگان به کمتر از ۲ کیلومتر رسیده است.

(ب)

(الف)



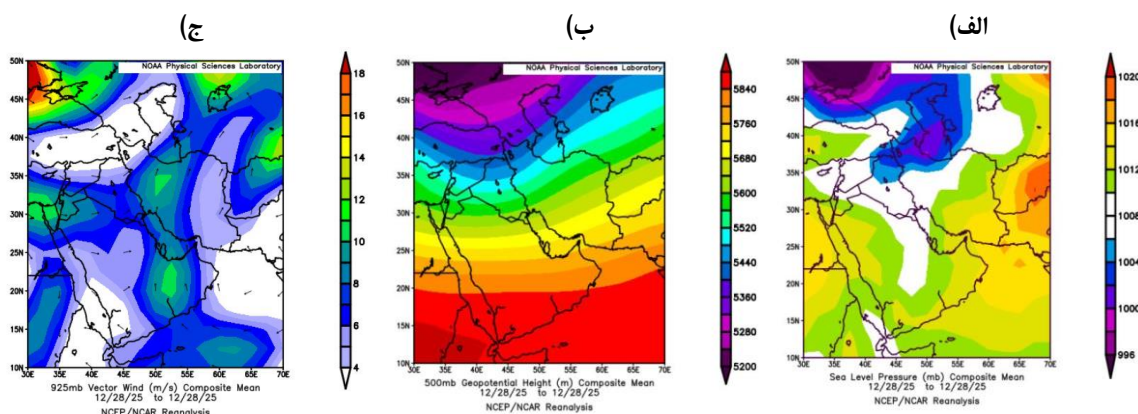
شکل ۱۸. دید افقی در ساعت ۱۲ UTC روزهای (الف) ۳۰، (ب) ۳۱ ماه دسامبر سال ۲۰۲۵ در ایستگاه‌های هواشناسی همدیدی منطقه مطالعه

(ب) بررسی همدیدی

بررسی همدیدی رخداد ۲۸ دسامبر نشان می‌دهد که در سطح زمین، زبانه‌ای از یک سامانه کم‌فشار دینامیکی از محدوده دریای خزر به سمت شمال غرب ایران و شمال عراق گسترش یافته، درحالی‌که بر روی نیمه شرقی و جنوبی ایران و همچنین آب‌های خلیج فارس و دریای عمان، شرایط پرفشار نسبی حاکم است (شکل ۱۹-الف). این آرایش فشاری موجب ایجاد گرادیان فشار قابل توجه در بخش‌هایی از منطقه و در نتیجه تقویت میدان باد سطحی شده است. در تراز میانی و ردسپهر نیز ساختار ناوه نقش مهمی در سازمان‌دهی الگوی جوی ایفا می‌کند. در این روز، محور ناوه از شرق دریای سیاه به سمت شرق ترکیه و سپس جنوب عراق امتداد یافته است (شکل ۱۹-ب). استقرار ناوه در این موقعیت نشان‌دهنده تغییر قابل توجه در میدان باد تراز میانی است. همچنین، گرادیان ارتفاع ژئوپتانسیل در محدوده مورد مطالعه نسبتاً شدید بوده و اختلاف ارتفاعی بیش از ۳۰ دکامتر در امتداد شمال غرب ایران تا جنوب کشور مشاهده می‌شود.

الگوی باد در نزدیکی سطح نیز شواهد بیشتری از وجود این سازوکار انتقالی ارائه می‌دهد. در تراز ۹۲۵ هکتوپاسکال جریان‌های غربی از سمت عراق و شمال عربستان به‌سوی خلیج فارس مشاهده می‌شود؛ هم‌زمان، جریان‌های جنوبی از شرق عربستان و عمان به سمت خلیج فارس برقرار است (شکل ۱۹-ج). بنابراین، میدان باد تنها نشان‌دهنده افزایش سرعت باد نیست، بلکه بیانگر وجود مسیرهای مشخص انتقال هوا از مناطق پیرامونی به سمت خلیج فارس و دریای عمان است. این الگو از نظر فرآیند انتقال گردوخاک اهمیت ویژه‌ای دارد، زیرا می‌تواند ذرات تولیدشده در مناطق مستعد بیابانی عراق، عربستان و نواحی پیرامونی را به سمت آب‌های جنوبی ایران منتقل کند.

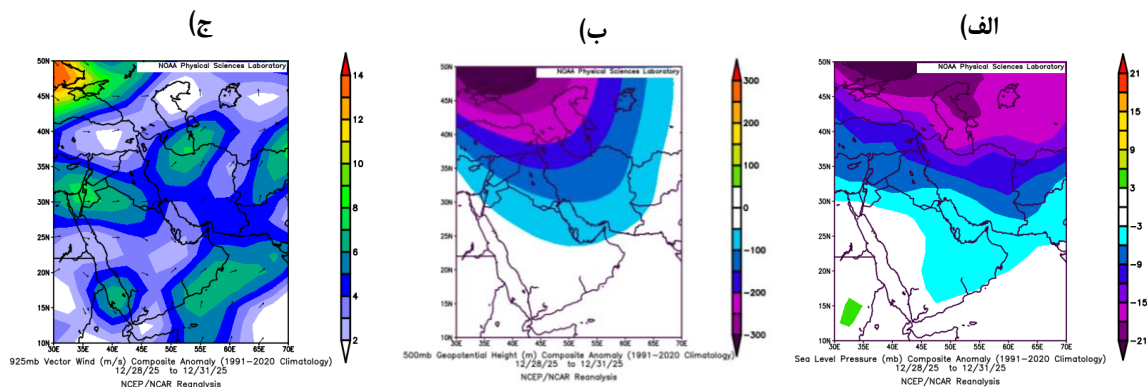
از نظر شدت باد نیز سه ناحیه متمایز قابل تشخیص است: نخست، غرب و مرکز ایران در مجاورت بخش شرقی محور ناوه؛ دوم، شمال دریای سرخ؛ و سوم، مرکز و جنوب خلیج فارس و شرق عربستان (شکل ۱۸-ج). تمرکز سرعت‌های بیشتر باد در این مناطق را می‌توان در ارتباط با گرادیان فشار سطحی و همچنین ساختار گردش ناشی از ناوه تراز میانی تفسیر کرد. در محدوده خلیج فارس و شرق عربستان، هم‌زمانی سرعت‌های نسبتاً زیاد باد با جریان‌های انتقالی غربی و جنوبی، شرایط مناسبی را برای جابه‌جایی و گسترش افقی گردوخاک فراهم کرده است. بنابراین، رخداد ۲۸ دسامبر را نمی‌توان صرفاً به افزایش سرعت باد نسبت داد؛ بلکه ترکیب یک ساختار ناوه‌ای در تراز میانی، آرایش کم‌فشار/پرفشار در سطح زمین و ایجاد جریان‌های جوی در لایه‌های پایین جو، سازوکار همدیدی اصلی مؤثر بر انتقال گردوخاک در این رخداد را تشکیل می‌دهد.



شکل ۱۹. الف) الگوی فشار سطح زمین، ب) ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ hPa، ج) سرعت باد تراز ۹۲۵ hPa در روز ۲۸ ماه دسامبر سال ۲۰۲۵

ج) بررسی الگوهای بی‌هنجاری

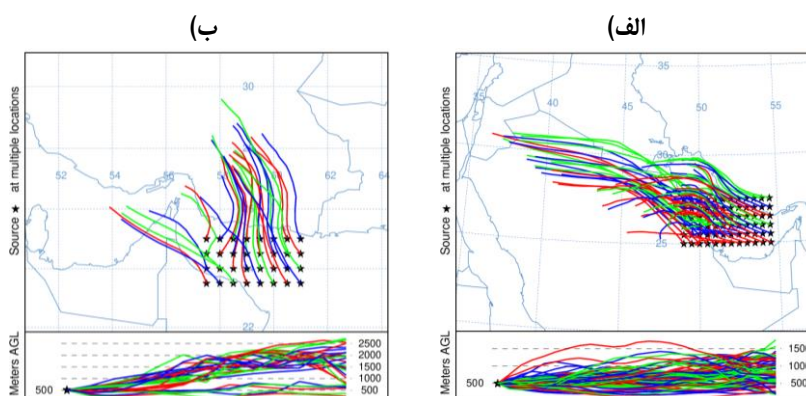
در بررسی الگوی بی‌هنجاری فشار نسبت به بلندمدت (۱۹۹۱-۲۰۲۰)، کاهش فشار قابل ملاحظه در نیمه شمالی کشور و کاهش فشار ۳ تا ۶ هکتوپاسکال بر روی نوار جنوبی کشور و آب‌های جنوبی مشاهده می‌شود (شکل ۲۰-الف). در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال کاهش ارتفاع قابل ملاحظه در شمال غرب، غرب و مرکز کشور مشاهده می‌شود، همچنین بر روی خلیج فارس و تنگه هرمز ۵ تا ۱۰ متر افت ارتفاع وجود دارد (شکل ۲۰-ب). بی‌هنجاری باد ۱۰ متری وزش باد غربی و شمال غربی از شمال غرب عربستان و جنوب عراق به‌سوی خلیج فارس را نشان می‌دهد، همچنین بی‌هنجاری مثبت سرعت باد روی جنوب خلیج فارس و دیگری در شمال غرب شبه‌جزیره عربستان و کشور اردن مشاهده می‌شود (شکل ۲۰-ج).



شکل ۲۰. الگوی بی‌هنجاری (الف) فشار، (ب) ارتفاع ژئوپتانسیل ۵۰۰ هکتوپاسکال و (ج) باد ۱۰ متری در ۲۸ تا ۳۱ دسامبر ۲۰۲۵ نسبت به بلندمدت (۱۹۹۱-۲۰۲۰)

(د) بررسی مسیر حرکت ذرات گردوخاک

خروجی مدل HYSPLIT به صورت ماتریسی به روش پس‌رو برای ۱۲ ساعت بر روی خلیج فارس و دریای عمان در ارتفاع ۵۰۰ متری برای ساعت ۱۲ UTC روزهای ۳۰ و ۳۱ دسامبر سال ۲۰۲۵ که با داده‌های باز تحلیل GFS با تفکیک ۰/۲۵ درجه اجرا شده در شکل ۲۰ نشان داده شده است. در روز ۳۰ دسامبر ذرات گردوخاک از شمال و شرق عربستان، جنوب عراق، کویت، جنوب غربی ایران و حتی شرق اردن وارد خلیج فارس شده‌اند. در روز ۳۱ دسامبر بخش عمده‌ای از گردوخاک بر فراز دریای عمان از مسیر مناطق جنوب شرقی ایران عبور کرده است.

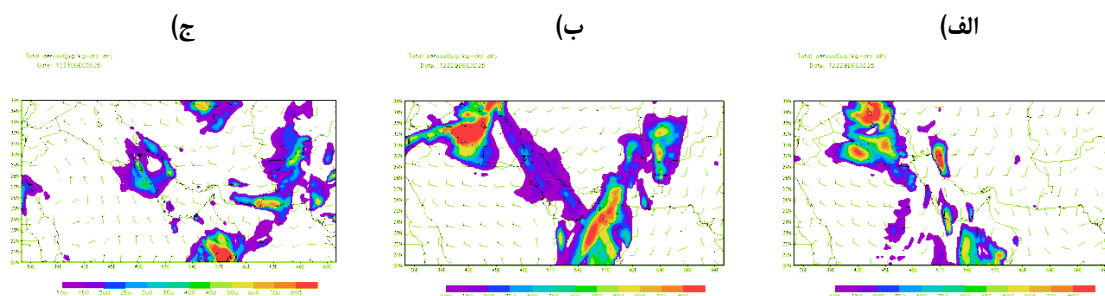


شکل ۲۱. خروجی مدل HYSPLIT برای ۲۴ ساعت بر روی خلیج فارس در ارتفاع ۵۰۰ متری برای ساعت ۱۲ UTC روز (الف) ۳۰، (ب) ۳۱ دسامبر سال ۲۰۲۵

(ه) مدل WRF_chem

شکل ۲۲ غلظت گردوخاک و باد در ارتفاع ۱۰ متری خروجی مدل WRF-Chem در ساعت ۱۲ UTC روزهای ۲۸ تا ۳۰ دسامبر سال ۲۰۲۵ را نشان می‌دهد. در روز ۲۸ دسامبر غلظت گردوخاک در بخش وسیعی از کشور عراق و مناطقی واقع در شمال کشور عربستان و استان بوشهر در جنوب غربی ایران قابل توجه است. در روز ۲۹ دسامبر وزش بادهای غرب و جنوب غربی بر روی عراق سبب ورود گردوخاک به مناطق مرزی ایران شده است. در این روز گردوخاک بخش وسیعی از خلیج فارس را پوشش داده است. وزش بادهای جنوب و جنوب غربی بر روی امارات و مناطق شمالی کشور عمان سبب ورود گردوخاک به تنگه هرمز و غرب دریای عمان و افزایش قابل توجه غلظت گردوخاک بر روی این مناطق شده است. خروجی مدل با تصاویر ماهواره‌ای که توده غلیظ گردوخاک بر روی تنگه هرمز در این روز را نشان داده، در

توافق است. در روز ۳۰ دسامبر شمال خلیج فارس و سواحل آن همچنان تحت تأثیر گردوخاک قرار دارد.



شکل ۲۲. خروجی مدل WRF-Chem برای ساعت ۱۲ UTC روز الف (۲۸، ب) ۲۹ و ج) ۳۰ دسامبر سال ۲۰۲۵

بحث

نتایج بررسی سه رخداد شدید گردوخاک در فصل‌های تابستان، بهار و زمستان نشان داد که سازوکارهای همدیدی مؤثر بر شکل‌گیری و انتقال گردوخاک در منطقه خلیج فارس و دریای عمان، بسته به فصل و ویژگی‌های سامانه‌های جوی، متفاوت هستند. با وجود تفاوت در شرایط همدیدی، در هر سه رخداد، وزش بادهای شدید و انتقال ذرات از مناطق مستعد گسیل گردوخاک در خاورمیانه نقش مهمی در گسترش این پدیده داشته است. تصاویر ماهواره‌ای سنجنده MODIS، مقادیر بالای عمق نوری هواویزها (AOD) و کاهش دید افقی در ایستگاه‌های هواشناسی، گستردگی و شدت این رخدادهای را تأیید کردند. مشاهده توده‌های گردوخاک بر روی خلیج فارس، تنگه هرمز و دریای عمان نیز بیانگر اهمیت انتقال منطقه‌ای ذرات و تأثیر آن بر مناطق ساحلی جنوب ایران است.

در رخداد تابستانی، استقرار کم‌فشار حرارتی و وزش باد شمالی بر روی عراق، همراه با الگوی گردش جو در تراز میانی و بی‌هنجاری‌های فشار و باد، شرایط مناسبی برای گسیل و انتقال گردوخاک فراهم کرده است. در رخداد بهاری، فعالیت کم‌فشار دینامیکی، ناوه تراز میانی جو و جبهه سرد وابسته به آن، با ایجاد بادهای شدید، زمینه شکل‌گیری گردوخاک جبهه‌ای را فراهم کرده است. در رخداد زمستانی نیز نفوذ زبانه‌های سامانه کم‌فشار دینامیکی عرض‌های جغرافیایی بالاتر به منطقه، موجب تقویت بادهای و شکل‌گیری گردوخاک شده است. این تفاوت‌ها نشان می‌دهد که رخدادهای گردوخاک جنوب ایران را نمی‌توان صرفاً به یک الگوی همدیدی مشخص نسبت داد، بلکه بررسی ویژگی‌های فصلی و موقعیت سامانه‌های فشار برای شناخت سازوکارهای شکل‌گیری آن‌ها ضروری است. این یافته‌ها با طبقه‌بندی ارائه‌شده توسط کریمی و همکاران (2021a) درباره چهار نوع پدیده گردوخاک همدیدی در خاورمیانه، شامل گردوخاک دینامیکی، پیش‌جبهه‌ای، پس‌جبهه‌ای و باد شمال، مطابقت دارد.

همچنین، نتایج مدل HYSPLIT نشان داد که مسیر انتقال ذرات در هر سه رخداد از مناطق مستعد گسیل گردوخاک در جنوب عراق، شمال و شرق عربستان، کویت و امارات و نیز برخی چشمه‌های منطقه‌ای در جنوب و جنوب غرب ایران عبور کرده است. این موضوع بیانگر نقش هم‌زمان منابع خارجی و داخلی در انتقال گردوخاک به منطقه مطالعه است و با نتایج مطالعات کریمی و همکاران (2021b) و رضازاده و همکاران (2013) همخوانی دارد.

خروجی‌های مدل WRF-Chem نیز بیشترین غلظت گردوخاک را در جنوب عراق، شمال خلیج فارس، بخش‌هایی از شبه‌جزیره عربستان و استان‌های بوشهر، هرمزگان و سیستان و بلوچستان نشان دادند. مقایسه باد شبیه‌سازی‌شده با داده‌های باز تحلیل، عملکرد قابل قبول مدل را در بازنمایی میدان باد نشان داد. با این حال، ارزیابی دقیق‌تر توانایی مدل در

پیش‌بینی غلظت و توزیع گردوخاک، به مقایسه کمی خروجی‌ها با مشاهدات مستقل و داده‌های ماهواره‌ای نیاز دارد. بنابراین، ترکیب تحلیل همدیدی، سنجش‌ازدور، مدل‌سازی مسیر انتقال ذرات و شبیه‌سازی عددی، رویکردی مناسب برای بررسی جامع سازوکارهای شکل‌گیری و گسترش گردوخاک در این منطقه محسوب می‌شود.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، سه رخداد شدید و فراگیر گردوخاک در فصل‌های تابستان، بهار و زمستان در محدوده خلیج‌فارس و دریای عمان با استفاده از مشاهدات زمینی، تحلیل همدیدی، داده‌های ماهواره‌ای، مدل مسیر حرکت ذرات HYSPLIT و مدل WRF-Chem بررسی شد. نتایج نشان داد که سازوکارهای همدیدی شکل‌گیری گردوخاک در رخدادهای مورد مطالعه متفاوت بوده و شامل تأثیر کم‌فشار حرارتی و باد شمال در تابستان، فعالیت سامانه دینامیکی و جبهه سرد در بهار و نفوذ سامانه‌های کم‌فشار دینامیکی در زمستان است.

تحلیل مسیر حرکت ذرات نشان داد که انتقال گردوخاک از مناطق مستعد گسیل در کشورهای همسایه، به‌ویژه عراق، عربستان، کویت و امارات، در کنار نقش چشمه‌های منطقه‌ای در جنوب ایران، در گسترش این پدیده مؤثر بوده است. همچنین، تصاویر ماهواره‌ای، مقادیر AOD و کاهش دید افقی ایستگاه‌های هواشناسی، شواهد مستقلی از گستردگی رخدادهای بررسی‌شده ارائه کردند. مدل WRF-Chem نیز مناطق با غلظت بالای گردوخاک را در بخش‌هایی از جنوب عراق، اطراف خلیج‌فارس و سواحل جنوبی ایران بازنمایی کرد و مقایسه میدان باد آن با داده‌های باز تحلیل، عملکرد قابل‌قبول مدل را در شبیه‌سازی باد نشان داد.

به‌طور کلی، نتایج این پژوهش بر اهمیت بررسی هم‌زمان شرایط همدیدی، منابع گسیل و مسیرهای انتقال ذرات برای شناخت رخدادهای گردوخاک در جنوب ایران تأکید دارد. همچنین، استفاده توأمان از داده‌های مشاهده‌ای، ماهواره‌ای و مدل‌های عددی می‌تواند به درک بهتر سازوکارهای این پدیده و بهبود ارزیابی و پیش‌بینی رخدادهای گردوخاک در منطقه کمک کند.

حامی مالی

بر اساس اظهار نویسندگان این مقاله فاقد حامی مالی بوده است.

سهم نویسندگان

نویسندگان به‌طور مساوی در کلیه مراحل طراحی و انجام پژوهش، گردآوری و تحلیل داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیش‌نویس مقاله، بررسی و کنترل نتایج و اصلاح و نهایی سازی مقاله مشارکت داشته‌اند.

تضاد منافع

بر اساس اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از تمام کسانی که در انجام این پژوهش یاری‌رسان بوده‌اند، سپاس‌گزاری می‌نمایند.

منابع

احمدی ملاوردی، مجید؛ جباری، ایرج و فتح نیا، امان اله. (۱۳۹۹). شناسایی، ارزیابی و مدیریت خاستگاه‌های گردوغبار در غرب

- ایران. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۵۲ (۳)، ۴۴۵-۴۶۵. <https://doi.org/10.22059/jphgr.2020.292998.1007455>
- حیدری، مهدی؛ خالدی، شهریار و اکبری ازیرانی، طیبه. (۱۳۹۸). تحلیل روند فراوانی روزهای گردوغبار در استان ایلام و تأثیر آن بر سلامت عمومی. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۵۱ (۱)، ۱۲۳-۱۳۴. <https://doi.org/10.22059/jphgr.2019.269358.1007298>
- ساری صراف، بهروز؛ رسولی، علی‌اکبر؛ زرین، آذر و نجفی، محمد سعید. (۱۳۹۶). شبیه‌سازی توزیع قائم سامانه‌های گردوغبارزا در ارتباط با سامانه‌های همدید و توپوگرافی در غرب ایران. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۴۹ (۲)، ۱۶۹-۱۸۹. <https://doi.org/10.22059/jphgr.2017.62840>
- صحت کاشانی، ساويز؛ رهنما، مهدی؛ کرمی، سارا؛ رنجبر سعادت‌آبادی، عباس و خدام، نوشین. (۱۴۰۱). بررسی عوامل محیطی مؤثر بر فعال‌سازی چشمه‌های گردوخاک در استان ایلام. پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۵۴ (۳)، ۴۰۳-۴۲۷. <https://doi.org/10.22059/jphgr.2022.340430.1007687>
- کرمی، سارا؛ خدام، نوشین؛ صحت کاشانی، ساويز و رهنما، مهدی (۱۳۹۹ الف). بررسی رخداد‌های گردوخاک جنوب ایران ناشی از کشورهای حاشیه خلیج فارس. نشریه هواشناسی و علوم جو، ۳ (۲)، ۱۱۳-۱۲۸. <https://doi.org/10.22034/jmas.2021.289688.1141>
- کرمی، سارا؛ حسین حمزه، نسیم؛ صحت کاشانی، ساويز؛ رهنما، مهدی و رنجبر سعادت‌آبادی، عباس (۱۳۹۹ ب). بررسی پدیده گردوخاک و عوامل مؤثر بر آن در منطقه خاورمیانه با رویکرد لزوم انجام اقدامات کاهش‌ی تغییر اقلیم. نیور، ۱۰۹-۱۰۸، ۶۱-۷۰. <https://doi.org/10.30467/nivar.2020.106249>
- مبارک حسن، الهام؛ رنجبر سعادت‌آبادی، عباس؛ فتاحی، ابراهیم و نوری، فائزه. (۱۴۰۰). بررسی ویژگی‌های رخداد پدیده گردوخاک خراسان بزرگ در دوره گرم سال و شبیه‌سازی مسیر آن توسط مدل HYSPLIT (دوره آماری ۲۰۱۷-۲۰۰۰). پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۵۳ (۲)، ۲۴۹-۲۶۸. <https://doi.org/10.22059/jphgr.2021.294599.1007466>

References

- Ahmadi Malvardi, M., Jabbari, I., & Fathnia, A. (2020). Identification, assessment and management of dust sources in western Iran. *Physical Geography Research*, 52(3), 445–465. <https://doi.org/10.22059/jphgr.2020.292998.1007455> [In Persian]
- Bhattachan, A., Okin, G. S., Zhang, J., Vimal, S., & Lettenmaier, D. P. (2019). Characterizing the role of wind and dust in traffic accidents in California. *GeoHealth*, 3(10), 328–336. <https://doi.org/10.1029/2019GH000212>
- Call, D. A., Wilson, C. S., & Shourd, K. N. (2018). Hazardous weather conditions and multiple-vehicle chain-reaction crashes in the United States. *Meteorological Applications*, 25(3), 466–471. <https://doi.org/10.1002/met.1714>
- Charlson, R. J., & Heintzenberg, J. (1995). *Aerosol forcing of climate*. Wiley.
- Gholami, H., & Mohammadifar, A. (2022). Novel deep learning hybrid models (CNN-GRU and DLDL-RF) for the susceptibility classification of dust sources in the Middle East: A global source. *Scientific Reports*, 12(1), Article 19342. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-24036-5>
- Hamidi, M. (2019). Atmospheric investigation of frontal dust storms in Southwest Asia. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 55, 177–193. <https://doi.org/10.1007/s13143-018-0083-2>
- Hansen, J., Sato, M., & Ruedy, R. (1997). Radiative forcing and climate response. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D6), 6831–6864. <https://doi.org/10.1029/96JD03436>
- Heidari, M., Khaledi, S., & Akbari Azirani, T. (2019). The trend of dust storm frequencies and its impact on public health, Ilam Province. *Physical Geography Research*, 51(1), 123–134. <https://doi.org/10.22059/jphgr.2019.269358.1007298> [In Persian]
- Karami, S., Hamzeh, N. H., Alam, K., Noori, F., & Abadi, A. R. S. (2021). Spatio-temporal and synoptic changes in dust at the three islands in the Persian Gulf region. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 214, Article 105539. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105539>
- Karami, S., Hossein Hamzeh, N., Sehat Kashani, S., Rahnema, M., & Ranjbar Saadatabadi, A. (2020). Investigation of dust phenomenon and its effective factors in the Middle East with an approach to the necessity of climate change mitigation measures. *Nivar*, 108–109, 61–70. <https://doi.org/10.30467/nivar.2020.106249> [In Persian]

- Karami, S., Kaskaoutis, D. G., Kashani, S. S., Rahnema, M., & Rashki, A. (2021). Evaluation of nine operational models in forecasting different types of synoptic dust events in the Middle East. *Geosciences*, 11(11), Article 458. <https://doi.org/10.3390/geosciences11110458>
- Karami, S., Khodam, N., Sehat Kashani, S., & Rahnema, M. (2020). Investigation of dust events in southern Iran originating from Persian Gulf rim countries. *Journal of Meteorology and Atmospheric Science*, 3(2), 113–128. <https://doi.org/10.22034/jmas.2021.289688.1141> [In Persian]
- Kurosaki, Y., Kinugasa, T., Nyamtseren, M., Liu, S., & Otani, S. (2022). Impacts of aeolian desertification and dust storms on ecosystems, economic development, and human health. In *Combating aeolian desertification in Northeast Asia* (pp. 129–158). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-981-16-9028-0_6
- Luo, B., Minnett, P. J., Zuidema, P., Nalli, N. R., & Akella, S. (2021). Saharan dust effects on North Atlantic sea-surface skin temperatures. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 126, e2021JC017282. <https://doi.org/10.1029/2021JC017282>
- Masoumi, A., Laleh, E., & Bayat, A. (2019). Optical and physical properties, time-period, and severity of dust activities as a function of source for the main dust sources of the Middle East. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 185, 68–79. <https://doi.org/10.1016/J.JASTP.2019.01.015>
- Miller, R. L., & Tegen, I. (1998). Climate response to soil dust aerosols. *Journal of Climate*, 11(12), 3247–3267. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1998\)011<3247:CRTSDA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1998)011<3247:CRTSDA>2.0.CO;2)
- Mobaraki Hasan, E. (2020). The role of low-level jet and transport pathway determination in dust over the Persian Gulf (Case study: February 17–19, 2017). *Scientific Journal of Marine Biology*, 12(45), 35–50. <https://doi.org/10.22059/jphgr.2021.294599.1007466> [In Persian]
- Mobaraki Hasan, E., Ranjbar Saadatabadi, A., Fatahi, E., & Noori, F. (2021). Investigation of the characteristics of dust phenomenon in Greater Khorasan during the warm period and simulation of its path by HYSPLIT model (2000-2017). *Physical Geography Research*, 53(2), 249–268. <https://doi.org/10.22059/jphgr.2021.294599.1007466> [In Persian]
- Mohebbi, A., Green, G. T., Akbariyeh, S., Yu, F., Russo, B. J., & Smaglik, E. J. (2019). Development of dust storm modeling for use in freeway safety and operations management: An Arizona case study. *Transportation Research Record*, 2673(5), 175–187. <https://doi.org/10.1177/0361198119839978>
- Papi, R., Attarchi, S., Boloorani, A. D., & Samany, N. N. (2022). Knowledge discovery of Middle East dust sources using Apriori spatial data mining algorithm. *Ecological Informatics*, 72, Article 101867. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101867>
- Rahav, E., Paytan, A., Chien, C. T., Ovadia, G., Katz, T., & Herut, B. (2016). The impact of atmospheric dry deposition associated microbes on the southeastern Mediterranean Sea surface water following an intense dust storm. *Frontiers in Marine Science*, 3, Article 127. <https://doi.org/10.3389/fmars.2016.00127>
- Ramanathan, V., Crutzen, P. J., Kiehl, J. T., & Rosenfeld, D. (2001). Aerosols, climate, and the hydrological cycle. *Science*, 294(5549), 2119–2124. <https://doi.org/10.1126/science.1064034>
- Rezazadeh, M., Irannejad, P., & Shao, Y. (2013). Climatology of the Middle East dust events. *Aeolian Research*, 10, 103–109. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2013.04.001>
- Sehat Kashani, S., Rahnema, M., Karami, S., Ranjbar Saadatabadi, A., & Khodam, N. (2022). Investigation of environmental factors affecting the activation of dust sources in Ilam Province. *Physical Geography Research*, 54(3), 403–427. <https://doi.org/10.22059/jphgr.2022.340430.1007687> [In Persian]
- Singer, A., Ganor, E., Dultz, S., & Fischer, W. (2003). Dust deposition over the Dead Sea. *Journal of Arid Environments*, 53(1), 41–59. <https://doi.org/10.1006/jare.2002.1023>
- Vink, S., & Measures, C. I. (2001). The role of dust deposition in determining surface water distributions of Al and Fe in the South West Atlantic. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 48(13), 2787–2809. [https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(01\)00018-2](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(01)00018-2)
- Zhang, X., Zhao, L., Tong, D. Q., Wu, G., Dan, M., & Teng, B. (2016). A systematic review of global desert dust and associated human health effects. *Atmosphere*, 7(12), Article 158. <https://doi.org/10.3390/atmos7120158>
- Zhao, H., Zhang, F., Yu, Z., & Li, J. (2022). Spatiotemporal variation in soil degradation and economic damage caused by wind erosion in Northwest China. *Journal of Environmental*

- Management*, 314, Article 115121. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115121>
- Zoljoodi, M., Didevarasl, A., & Saadatabadi, A. R. (2013). Dust events in the western parts of Iran and the relationship with drought expansion over the dust-source areas in Iraq and Syria. *Atmospheric and Climate Sciences*, 3(3), 321–336. <https://doi.org/10.4236/acs.2013.33034>