

Analysis of the effect of atmospheric dust corridors in the Middle East and North Africa on Iran's climate

Rezaei, M.¹  | Farajzadeh, M.² 

1. Department of Geography, Faculty of Humanities, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran.

2. Department of Geography, Faculty of Humanities, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

Corresponding Author E-mail: m.rezaei@hormozgan.ac.ir

(Received: 16 Nov 2024, Revised: 18 Dec 2024, Accepted: 29 April 2025, Published online: 10 June 2025)

Summary

Dust aerosols can travel thousands of kilometers through the atmosphere. In this study, we refer to these long-distance dust movements as Atmospheric Dust Corridors (ADCs). The main objective of this study is to identify ADCs using an automated algorithm and to analyze their temporal and spatial characteristics in the Middle East. To achieve this, we utilized daily Aerosol Optical Depth (AOD) and Angstrom Exponent (AE) data from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) (Aqua), spanning from 2003 to 2020, with a resolution of 1° by 1°. In this study, dust aerosols were identified based on AOD values greater than 0.3 and AE values below 0.75.

An algorithm was developed to automatically detect ADCs after applying specific conditions. First, dust masses were identified using the connected components labeling method, and the largest dust mass for each day was selected. The algorithm then examined several factors, including the geometric shape and movement of the dust mass (based on wind data). This method identified 281 ADCs, which were categorized by their direction of movement. Of these, 33% of ADCs moved westward, 19% eastward, 36% southward, and 12% northward. These corridors were most frequent in September, April, and March, while February, November, and December experience the lowest occurrence. Geographically, the highest frequency of ADCs was observed around 45°E, covering parts of Saudi Arabia, Iraq, and Syria.

Western and southern ADCs were primarily observed in the Arabian Peninsula, Iraq, Syria, southern Iran, southern Afghanistan, and northern Pakistan, while northern and eastern ADCs were predominantly found in northern Africa (Sudan, Chad, Niger, and Libya). May was the key month for western ADCs, September for southern ADCs, and April for eastern and northern ADCs. The Mann-Kendall test revealed no significant trends on a monthly or annual basis during the study period.

The analysis of ADCs' impact revealed that 58% of the ADCs observed, affected some regions of Iran. From March to September, at least 60% of Iran's area was impacted by these corridors, with the highest frequency in summer. The geographical distribution of ADC frequency showed an inverse relationship with altitude, with the highest occurrence in the southwest of Iran, particularly in Khuzestan province. Most ADCs entered Iran from the west and south, in line with prevailing wind patterns and the location of dust centers.

In conclusion, this study provides a comprehensive understanding of dust transport patterns in the Middle East and North Africa, offering valuable insights into their impact on Iran's climate. It also underscores the importance of studying ADCs for climate planning, public health, and sustainable development.

Keywords: Aerosols, Atmospheric Dust Corridors, Middle East and North Africa, Iran.

Cite this article: Rezaei, M., & Farajzadeh, M. (2025). Analysis of the effect of atmospheric dust corridors in the Middle East and North Africa on Iran's climate. *Journal of the Earth and Space Physics*, 51(1), 267-287. DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2025.385133.1007643>

E-mail: (2) farajzam@modares.ac.ir



Publisher: University of Tehran Press.
DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2025.385133.1007643>

Print ISSN: 2538-371X
Online ISSN: 2538-3906

تحلیل تأثیر دالان‌های جوی گردوخاک خاورمیانه و شمال آفریقا بر آب‌وهوای ایران

محمد رضائی^۱ | منوچهر فرج‌زاده^۲

۱. گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران.

۲. گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

رایانامه نویسنده مسئول: m.rezaei@hormozgan.ac.ir

(دریافت: ۱۴۰۳/۸/۲۶، بازنگری: ۱۴۰۳/۹/۲۸، پذیرش نهایی: ۱۴۰۴/۲/۹، انتشار آنلاین: ۱۴۰۴/۳/۲۰)

چکیده

این مطالعه با هدف شناسایی دالان‌های گردوخاک توسط یک الگوریتم خودکار و بررسی ویژگی‌های زمانی و مکانی آنها در خاورمیانه و شمال آفریقا و اثر آن بر آب‌وهوای ایران انجام شده است. برای انجام این کار، داده‌های عمق نوری هواویز و نمایه آنگستروم از طیف‌سنج تصویربرداری با وضوح متوسط (MODIS) (آکوا) در مقیاس روزانه با وضوح 1×1 درجه بین سال‌های ۲۰۰۳ و ۲۰۲۰ استفاده شده است. پس از تعیین مجموعه‌ای از شرایط، الگوریتمی برای شناسایی خودکار دالان‌های گردوخاک ایجاد شد. در نتیجه، ۲۸۱ دالان گردوخاک در خاورمیانه شناسایی و بر اساس جهت حرکت‌شان طبقه‌بندی شدند. بر اساس نتایج، در محدوده خاورمیانه و شمال آفریقا، ۳۳ درصد دالان‌ها به سمت غرب، ۱۹ درصد موارد به سمت شرق، ۳۶ درصد موارد به سمت جنوب و ۱۲ درصد موارد به سمت شمال جریان دارند. بررسی تأثیر دالان‌های گردوخاک بر ایران نشان داد که درصد قابل توجهی (۵۸٪) از دالان‌های جوی گردوخاک رخ داده (در شمال آفریقا و خاورمیانه)، کشور ایران را تحت تأثیر قرار داده است. از ماه مارس تا سپتامبر (حداکثر در تابستان) حداقل ۶۰ درصد از مساحت ایران حداقل برای یک‌بار تحت تأثیر دالان‌های گردوخاک قرار می‌گیرد. به‌طور کلی توزیع جغرافیایی چگالی وقوع دالان‌ها با ارتفاع از سطح دریا رابطه معکوس دارد. بیشترین فراوانی دالان‌های گردوخاک در جنوب غرب کشور و در استان خوزستان مشاهده شد. این تحقیق شواهد جدیدی در مورد اهمیت و الگوهای حرکت دالان‌های گردوخاک منطقه و اثرات آنها بر آب‌وهوای ایران ارائه می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: هواویزها، دالان‌های جوی گردوخاک، خاورمیانه و شمال آفریقا، ایران.

۱. مقدمه

و همکاران، ۲۰۱۴؛ اسرائیلویچ و همکاران، ۲۰۱۲؛ دی مائورو و همکاران، ۲۰۱۹). بنابراین، این رودخانه‌های جوی نه تنها در ایجاد سیلاب، بلکه در انتقال گردوخاک نیز اثرگذارند و این ویژگی می‌تواند پیامدهای گسترده‌ای به همراه داشته باشد (دزفولی و همکاران، ۲۰۲۱؛ فرانسیس و همکاران، ۲۰۲۲).

گردوخاک می‌تواند مشکلات بسیاری ایجاد کند؛ از جمله کاهش دید و افزایش تصادفات رانندگی (بادوک و همکاران، ۲۰۱۴؛ بهاتچان و همکاران، ۲۰۱۹)، تشدید بیماری‌های تنفسی (تم و همکاران، ۲۰۱۲)، و کاهش حاصل‌خیزی خاک (انته و همکاران، ۲۰۱۲). همچنین

رودخانه‌های جوی کانال‌هایی باریک و پُربخارند که نقش مهمی در چرخه آب بر روی سیاره زمین دارند (رالف و دیتینگر، ۲۰۱۱). این رودخانه‌ها در مقیاس سیاره‌ای قادر به ایجاد مخاطرات آب‌وهوایی همچون بارش‌های شدید و بادهای سهمگین هستند (رالف و همکاران، ۲۰۰۶؛ والایزر و گوان، ۲۰۱۷). به‌دلیل تولید بادهای قوی، این رودخانه‌ها می‌توانند گردوخاک را به فواصل بسیار دور منتقل کنند؛ به‌گونه‌ای که ذرات گردوخاک ممکن است تا ۴۰۰۰ کیلومتر از منبع اولیه خود جابه‌جا شوند (فورمن، ۲۰۰۳). برای نمونه، گردوخاک می‌تواند از آسیا به سواحل غربی ایالات متحده و از صحرای آفریقا به اروپا برسد (کریمین

استناد: رضائی، محمد و فرج‌زاده، منوچهر (۱۴۰۴). تحلیل تأثیر دالان‌های جوی گردوخاک خاورمیانه و شمال آفریقا بر آب‌وهوای ایران. مجله فیزیک زمین و فضا، ۵۱(۱)،

DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2025.385133.1007643>

رایانامه: (۲) farajzam@modares.ac.ir



ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jesphys.2025.385133.1007643>

دیده می‌شود .

پژوهش‌های مختلفی درباره مسیرهای انتقال گردوخاک در خاورمیانه انجام شده است. نوتارو و همکاران (۲۰۱۳) بیان می‌کنند که منبع اصلی گردوخاک محلی صحرای روب‌الخالی و منابع دورافتاده اولیه مانند صحرای صحرای برای غرب عربستان و بیابان‌های عراق برای شمال و شرق عربستان است. در جنوب غرب ایران نیز اهواز به عنوان شهری با بیشترین تأثیر از گردوخاک شناسایی شده است (برومندی و همکاران، ۲۰۱۷؛ سلم‌آبادی و همکاران، ۲۰۲۰). طوفان‌های گردوخاک در کویت نیز منشأیی از صحرای آفریقا و عربستان دارند (یاسین و همکاران، ۲۰۱۸). یکی از پژوهش‌های مرتبط توسط ووس و همکاران (۲۰۲۰) انجام شده که نشان می‌دهد چگونه رودخانه‌های جوی و گردوخاک همزمان با هم رخ می‌دهند.

شناسایی دالان‌های جوی گردوخاک به دلیل نیاز به داده‌های پیوسته مکانی، چالش برانگیز است. داده‌های ماهواره‌ای می‌توانند این نیاز را برطرف کنند و در شرایط آسمان صاف به شناسایی و نظارت بر مسیر حرکت گردوخاک کمک کنند (عبدالواحد و همکاران، ۲۰۱۹). اما تاکنون داده‌های ماهواره‌ای برای اقلیم‌شناسی دالان‌های جوی گردوخاک مورد استفاده قرار نگرفته است. هرچند مطالعات متعددی با داده‌های ماهواره‌ای در زمینه گردوخاک صورت گرفته است (جعفری و ملکیان، ۲۰۱۵؛ یو و همکاران، ۲۰۱۸؛ ووس و ایوان، ۲۰۲۰).

در ایران، تحقیقات متعددی به بررسی ابعاد مختلف پدیده گردوخاک پرداخته‌اند، که هر یک جنبه‌های مهمی از این پدیده را مورد مطالعه قرار داده‌اند. این پژوهش‌ها شامل تحلیل سینوپتیکی طوفان‌های گردوخاک، شناسایی منابع داخلی و خارجی گردوخاک، بررسی ترکیبات شیمیایی ذرات، مدل‌سازی و پیش‌بینی وقوع طوفان‌ها، و تحلیل تأثیرات زیست‌محیطی و بهداشتی آنها بوده است. به عنوان نمونه، لشکری و صبوئی (۱۳۹۲) چهار الگوی سینوپتیکی مختلف را هنگام وقوع طوفان‌های گردوخاک استان خوزستان شناسایی کردند. براتی و همکاران (۱۳۹۶)، به

اثرات آن بر کاهش تابش خورشیدی و آسیب به سیستم‌های مکانیکی ثبت شده است (الحدیدی و همکاران، ۱۹۹۰؛ عبدالله‌یف و سوکولیک، ۲۰۲۰) و حتی ممکن است خطر ابتلا به برخی بیماری‌ها را افزایش دهد (برومندی و همکاران، ۲۰۲۲). اثرات غیرمستقیم نیز شامل تغییر در الگوی بارش از طریق تأثیر بر ابرها می‌باشد (دموت و همکاران، ۲۰۱۰). به همین دلیل، درک و مطالعه انتقال گردوخاک در جو از اهمیت زیادی برخوردار است.

کمربند گردوخاک شامل صحرای آفریقا، خاورمیانه، آسیای مرکزی و جنوبی و چین، یکی از بزرگ‌ترین منابع گردوخاک جهان است (پروسپرو و همکاران، ۲۰۰۲). در این منطقه، شمال آفریقا، خاورمیانه و آسیای جنوب غربی به عنوان منابع اصلی گردوخاک شناخته می‌شوند (علیزاده چویری و همکاران، ۲۰۱۴؛ گودی و میدلتون، ۲۰۰۶). به همین دلیل، گردوخاک به عنوان یکی از مخاطرات طبیعی این مناطق شناخته شده است (حمیدی و همکاران، ۲۰۱۳). همچنین، فورمن (۲۰۰۳) خاورمیانه را پس از آفریقا، دومین منطقه تحت تأثیر گردوخاک معرفی کردند. طبق برخی برآوردها، حدود دو میلیارد تن گردوخاک هر ساله وارد جو می‌شود (گریفین و همکاران، ۲۰۰۲) و شمال آفریقا و خاورمیانه سالانه بین ۱۱۰۰ تا ۵۰۰۰ تن گردوخاک تولید می‌کنند (انگل‌اشتر و همکاران، ۲۰۰۶؛ پروسپرو و همکاران، ۲۰۰۲). در حالی که مطالعات زیادی بر دالان‌های بخار آب صورت گرفته، پژوهش مستقلی درباره دالان‌های جوی گردوخاک انجام نشده است و به همین علت، تحقیقاتی در این زمینه در ادبیات علمی به چشم نمی‌خورد. با این حال، در مناطق خاص مانند شمال آفریقا و خاورمیانه، پژوهش‌های متعددی با استفاده از داده‌های زمینی و ماهواره‌ای بر انتقال گردوخاک متمرکز شده‌اند (میدلتون، ۱۹۸۶؛ فورمن، ۲۰۰۳؛ رضازاده و همکاران، ۱۳۹۲). بر پایه این پژوهش‌ها، جابه‌جایی گردوخاک در خاورمیانه و شمال آفریقا از نظر زمانی و مکانی متفاوت است و در ایران، شمال شرق عراق و سوریه بیشترین تراکم آن در تابستان

می‌خواهیم میزان تأثیر این دالان‌ها بر کشور ایران را بسنجیم.

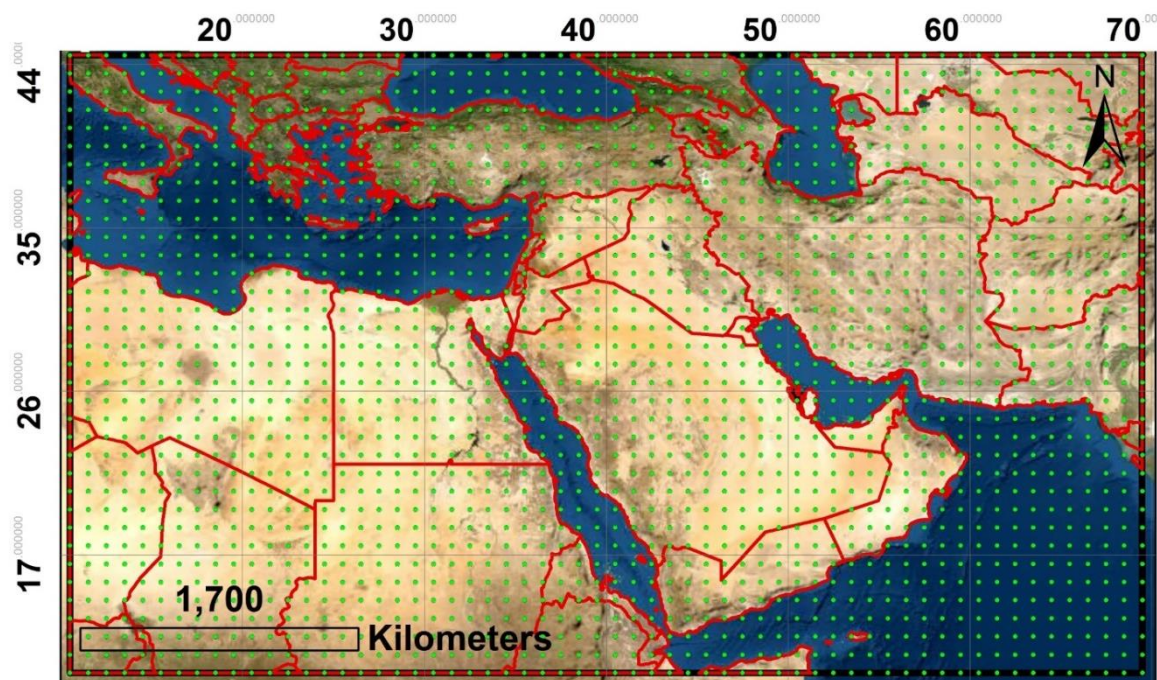
۲. مواد و روش‌ها

در این پژوهش، برای شناسایی دالان‌های جوی انتقال گردوخاک از داده‌های سنجنده مودیس استفاده شده است. مودیس که ابزاری کلیدی در سیستم مشاهده زمین است، امکان بررسی پارامترهای جوی مختلفی مانند خصوصیات ابرها، بخار آب و هواویزها را با وضوح بالا و جهانی فراهم می‌کند (سالومونسون و همکاران، ۱۹۸۹). مودیس می‌تواند ذرات معلق را هر ۱ تا ۲ روز یک‌بار مشاهده کند. دو الگوریتم برای استخراج این ذرات به کار گرفته می‌شوند: الگوریتم آبی عمیق و اهداف تیره. در این تحقیق، به دلیل ویژگی‌های بیابانی منطقه خاورمیانه، الگوریتم آبی عمیق استفاده شده است (هسو و همکاران، ۲۰۰۴).

برای شناسایی دالان‌های گردوخاک در خاورمیانه، داده‌های عمق نوری هواویزها و نمایه آنگستروم با استفاده از الگوریتم آبی عمیق و ماهواره آکوا بین سال‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۰ به دست آمد. این داده‌ها با وضوح 1×1 درجه و شامل ۲۱۰۰ نقطه در منطقه مورد مطالعه هستند (شکل ۱). داده‌های عمق نوری هواویزها و نمایه آنگستروم به ترتیب میزان و اندازه ذرات معلق در هوا را نشان می‌دهند. این دو پارامتر در مطالعات متعددی برای تشخیص نوع هواویز استفاده شده‌اند (سییر و همکاران، ۲۰۱۳؛ پنینگ دی وریس و همکاران، ۲۰۱۵؛ رضائی و همکاران، ۲۰۱۹a). در این پژوهش، مقادیر عمق نوری هواویزها بزرگتر از ۰/۳ و نمایه آنگستروم کمتر از ۰/۷۵ به عنوان شاخص نقاط دارای گردوخاک در نظر گرفته شده‌اند که این مقادیر بر اساس پژوهش رضائی و همکاران (۲۰۱۹b) تعیین شده است.

نقش کم فشار تابستانی سند در وقوع طوفان‌های گردوخاک جنوب ایران پرداختند. در حوزه منابع گردوخاک، برای مثال شمسی‌پور و همکاران (۱۳۹۴) به شناسایی الگوهای تابستانه و زمستانه ورود گردوخاک به غرب ایران پرداختند. طبق مطالعه آنها منطقه مرزی بین سوریه و عراق، غرب و جنوب غرب عراق به ترتیب دو کانون اصلی گردوخاک برای منطقه غرب ایران هستند. همچنین پژوهش‌هایی مانند باغی و همکاران (۱۳۹۹) ترکیبات شیمیایی ذرات گردوخاک را مورد بررسی قرار داده و به ارزیابی تأثیرات آنها بر سلامت انسان پرداخته‌اند، که نشان‌دهنده غلظت بالای آلاینده‌هایی نظیر فلزات سنگین در برخی مناطق است.

با وجود این تلاش‌های گسترده، مطالعات انجام شده عمدتاً به ابعاد محلی و محدودتر پدیده گردوخاک پرداخته‌اند و کمتر به بررسی الگوهای انتقال گسترده و بین منطقه‌ای ذرات گردوخاک توجه داشته‌اند. مفهوم دالان‌های جوی گردوخاک، به عنوان مسیرهای پیوسته و گسترده‌ای که ذرات گردوخاک را از منابع اصلی به مناطق دوردست منتقل می‌کنند، در تحقیقات داخلی کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. این در حالی است که شناخت این دالان‌ها می‌تواند تأثیرات مهمی بر تحلیل الگوهای حمل و نقل گردوخاک و پیش‌بینی اثرات آن بر مناطق مختلف، از جمله ایران، داشته باشد. این تحقیق با بررسی ویژگی‌های زمانی و مکانی این دالان‌ها، شکاف موجود در مطالعات پیشین را پر کرده و بستری مناسب برای مطالعات بیشتر در زمینه مدیریت محیط زیست و برنامه‌ریزی اقلیمی فراهم می‌کند. هدف از این مطالعه، ایجاد اقلیم‌شناسی دالان‌های جوی گردوخاک در شمال آفریقا و خاورمیانه، شناسایی ویژگی‌های آنها و تجزیه و تحلیل روندهای آنها طی دوره‌ای طولانی مدت و با استفاده از الگوریتم‌های خودکار است. همچنین،

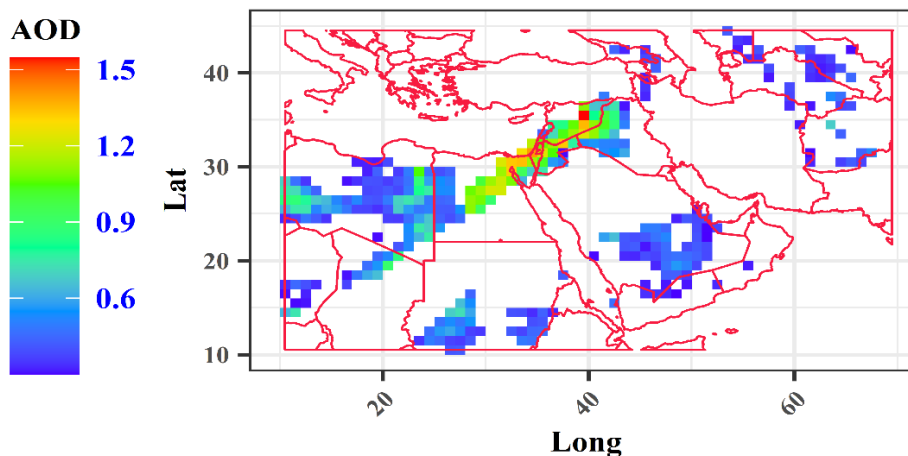


شکل ۱. منطقه مورد مطالعه برای شناسایی دالان‌های جوی انتقال گردوخاک به همراه نقاط شبکه جغرافیایی یک در یک درجه.

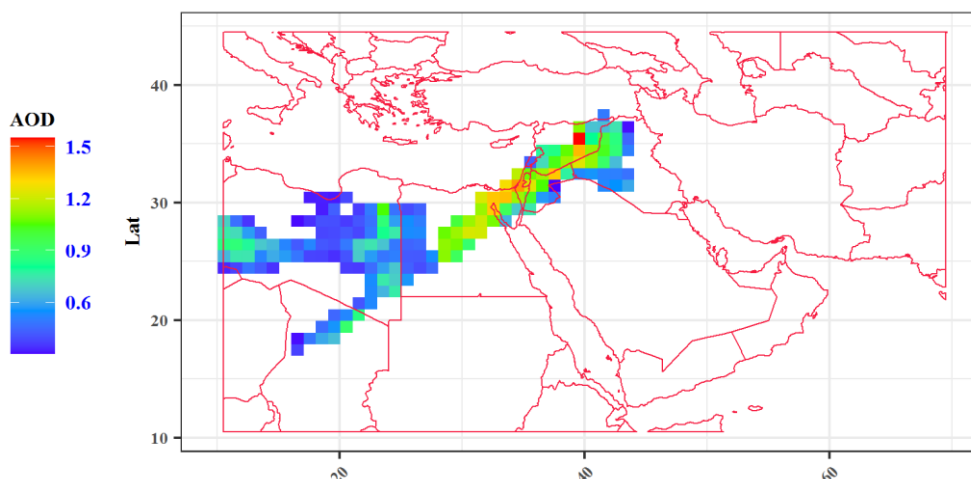
(۱) ابتدا با استفاده از مقادیر عمق نوری هواپرها و نمایه آنگستروم، نقاط دارای گردوخاک شناسایی شدند. در سوم مارس ۲۰۱۴، گردوخاک در ۲۹/۵ درصد پیکسل‌ها شناسایی شد (شکل ۲).

(۲) در مرحله بعد، از روش اتصال اجزای برجسب‌گذاری شده در نرم‌افزار R برای تعیین توده‌های گردوخاکی استفاده شد. در نتیجه، ۲۳ توده جداگانه شناسایی شد که بزرگ‌ترین آنها طولی برابر با ۳۷۴۰ کیلومتر و عرض متوسط ۵۷۵ کیلومتر داشت و به‌عنوان یک دالان جوی انتقال گردوخاک تشخیص داده شد.

۱-۲. نحوه شناسایی دالان‌های جوی انتقال گردوخاک
مطالعات رودخانه‌های جوی معمولاً بر جریان بخار آب تمرکز دارند، اما در این پژوهش توده‌های گردوخاک را نیز در نظر گرفته‌ایم. در این زمینه، رودخانه‌های جوی بر اساس طول (حداقل ۲۰۰۰ کیلومتر) و عرض (حداکثر ۱۰۰۰ کیلومتر) تعریف شده‌اند (رالف و همکاران، ۲۰۰۴؛ دیتینگر و همکاران، ۲۰۱۱). برای شناسایی دالان گردوخاکی، از مراحل زیر استفاده شده است که به‌عنوان نمونه بر طوفان گردوخاک مارس ۲۰۱۴ اعمال شد:



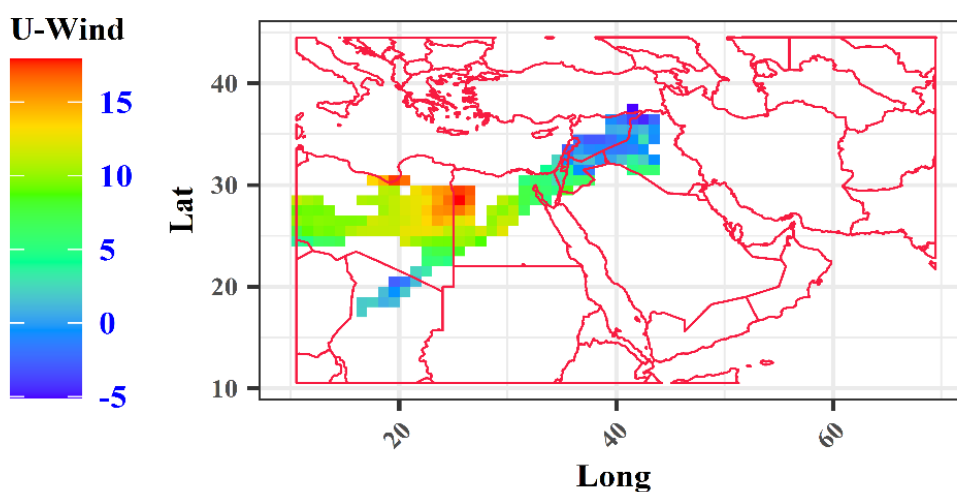
شکل ۲. نقاط گردوخاکی برای ۰۳ مارس ۲۰۱۴.



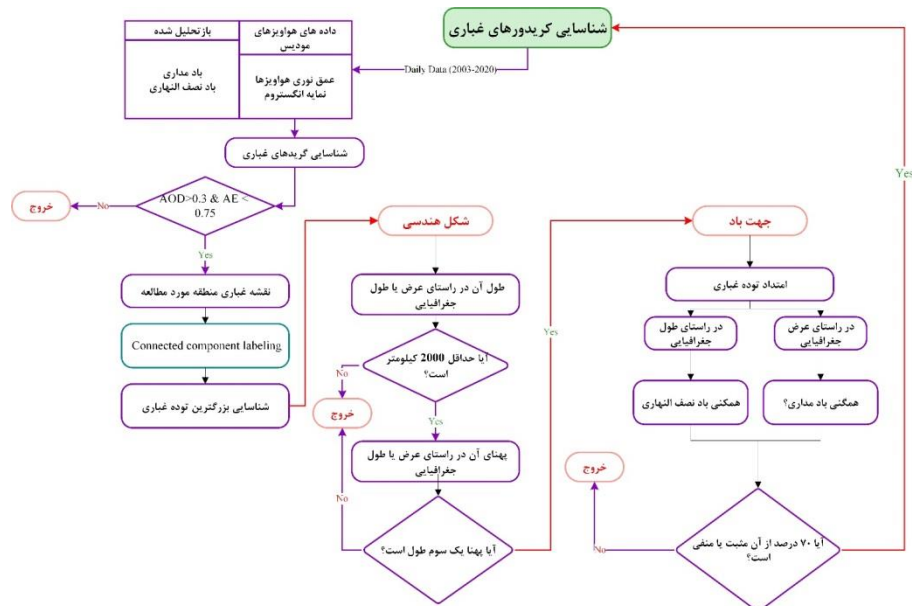
شکل ۳. بزرگ‌ترین توده گردوخاک که در شکل ۲ به‌عنوان یک دالان احتمالی انتقال گردوخاک شناسایی شده است.

گردوخاک با جهت غربی تلقی کرد (شکل ۳ و ۴). شکل ۵ الگوریتم شناسایی دالان‌های جوی گردوخاک را نمایش می‌دهد. در این شکل، مراحل مختلف الگوریتم از جمله شناسایی توده‌های گردوخاک و اعمال شرایط شکل هندسی و حرکتی دالان‌ها بر اساس داده‌های باد نشان داده شده است. این الگوریتم به‌صورت خودکار دالان‌های جوی گردوخاک را استخراج کرده و آنها را بر اساس جهت حرکت طبقه‌بندی می‌کند. تحلیل این مراحل در شکل ۵ می‌تواند به درک بهتر روند انجام تحقیق و درک روش‌های به‌کار رفته کمک کند.

سپس، وضعیت باد در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال در محدوده این دالان مورد بررسی قرار گرفت. توده‌های گردوخاکی طبق مطالعه چن و همکاران (۲۰۲۳) در نزدیکی تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال ظاهر می‌شوند و به‌همین دلیل وضعیت باد در این تراز بررسی شده است. اگر طول دالان در امتداد عرض جغرافیایی باشد، حرکت شمال یا جنوب فرض می‌شود و وضعیت باد نصف‌النهاری ارزیابی می‌شود. میانگین باد مداری $7/2$ متر بر ثانیه نشان می‌دهد که بیش از ۷۰ درصد مقادیر U-wind مثبت و همگن هستند. بنابراین، می‌توان این دالان را یک دالان جوی انتقال



شکل ۴. مقادیر u-wind (متر بر ثانیه) در شکل ۳ به‌عنوان یک دالان انتقال گردوخاک.



شکل ۵. مراحل انجام کار برای شناسایی یک دالان‌های جوی انتقال گردوخاک.

۳. نتایج و بحث

۳-۱. چند نمونه از دالان‌های جوی گردوخاک در

خاورمیانه

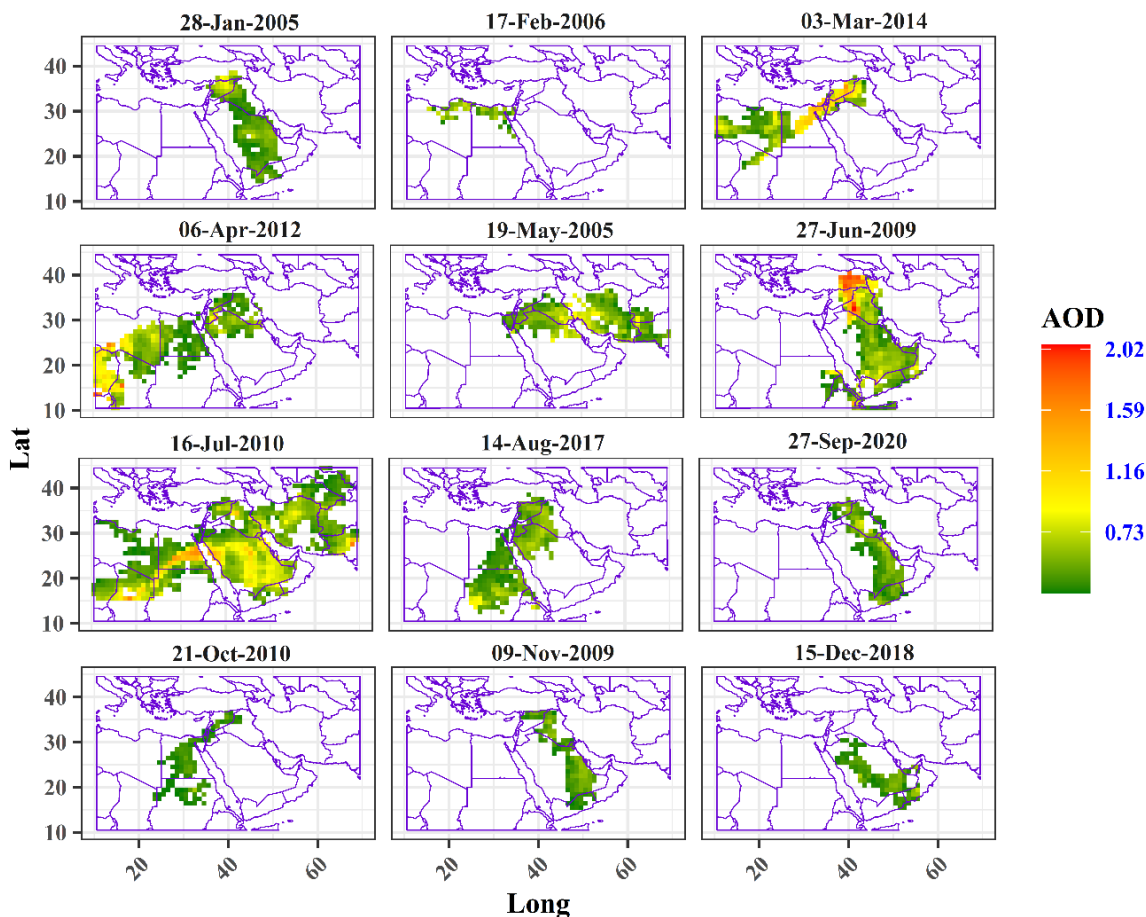
جدول ۱ ویژگی‌های هر نمونه را به‌طور خلاصه ارائه می‌کند. طولانی‌ترین دالان‌های جوی گردوخاک در ۱۶ ژوئیه ۲۰۱۰ به‌دست آمد (شکل ۶). طول آن در امتداد طول جغرافیایی ۶۶۰۰ کیلومتر و در امتداد عرض جغرافیایی ۳۴۱۰ کیلومتر بوده و محور آن دارای میانگین عمق نوری هواویزها (۱/۰۰۶) با جهت غربی و میانگین سرعت باد مداری ۴/۳ متر بر ثانیه بوده است.

دالان‌های جوی گردوخاک شناسایی شده در این مطالعه

گاهی به قدری گسترده بوده‌اند که محققان قبلی نیز از جنبه‌های مختلف آنها را مورد مطالعه قرار داده‌اند. برای مثال، دوگان و همکاران (۲۰۱۰) اثرات سلامت گردوخاک و ابرها را در ۲۷ ژوئن ۲۰۰۹ در ترکیه بررسی کردند. کاسکوتیس و همکاران (۲۰۱۹) دینامیک جوی طوفان‌های گردوخاک متعدد در مدیترانه و یونان در طول ماه مارس ۲۰۱۸ را مورد بحث قرار دادند. شپانسکی و همکاران (۲۰۱۶) طوفان گردوخاک ۲۱-۱ ژوئن ۲۰۱۳ را بررسی کردند و نشان دادند که گردوخاک شمال آفریقا دقیقاً در این تاریخ به سمت حوزه غربی مدیترانه منتقل شده است.

جدول ۱. ویژگی‌های برخی از مهم‌ترین دالان‌های جوی گردوخاک شناسایی شده در خاورمیانه به تفکیک هر ماه.

ماه	روز	سال	طول (کیلومتر)	عرض (کیلومتر)	عمق نوری هواویزها	پهنای (کیلومتر)	جهت
ژانویه	۲۸	۲۰۰۵	۱۸۷۰	۲۷۵۰	۰/۶۵	۱۳۹/۲	شمالی
فوریه	۱۷	۲۰۰۶	۲۲۰۰	۹۹۰	۰/۶۱	۲۵۳	غربی
مارس	۳	۲۰۱۴	۳۷۴۰	۲۳۱۰	۰/۹۳	۵۷۵/۸	غربی
آوریل	۶	۲۰۱۲	۴۱۸۰	۲۸۶۰	۰/۸۲	۹۰۳/۱	شرقی
مه	۱۹	۲۰۰۵	۴۱۸۰	۱۴۳۰	۰/۶۸	۶۷۷/۳	غربی
ژوئن	۲۷	۲۰۰۹	۲۵۳۰	۳۴۱۰	۱/۰۱	۱۰۳۲/۵	شمالی
ژوئیه	۱۶	۲۰۱۰	۶۶۰۰	۳۴۱۰	۱/	۱۲۷۴/۱	غربی
اوت	۱۴	۲۰۱۷	۲۳۱۰	۲۹۷۰	۰/۷	۹۸۵/۹	شمالی
سپتامبر	۲۷	۲۰۲۰	۱۹۸۰	۲۶۴۰	۰/۵۹	۶۹۲/۰۸	شمالی
اکتبر	۲۱	۲۰۱۰	۲۲۰۰	۲۳۱۰	۰/۴	۵۲۳/۸	شرقی
نوامبر	۹	۲۰۰۹	۱۸۷۰	۲۴۲۰	۰/۴۹	۵۵۰	شمالی
دسامبر	۱۵	۲۰۱۸	۲۰۹۰	۱۷۶۰	۰/۴۹	۵۶۱/۵	شرقی



شکل ۶. نمونه‌هایی از دالان‌های جوی گردوخاک در خاورمیانه به‌دست‌آمده با الگوریتم ارائه‌شده در این مطالعه.

۳-۲. ویژگی‌های زمانی و مکانی دالان‌های جوی

گردوخاک در خاورمیانه

شکل ۷ فراوانی کل سالانه ذرات معلق گردوخاک را بر اساس دالان‌های جوی گردوخاک در تمام ماه‌های ۲۰۰۳ تا ۲۰۲۰ نشان می‌دهد. این نقشه نشان می‌دهد که هر نقطه شبکه چند بار تحت تأثیر دالان‌های جوی گردوخاک قرار گرفته است. در منطقه مورد مطالعه، کل منطقه به‌طور میانگین ۴۴/۳ بار تحت تأثیر قرار گرفته است که دامنه آن از ۱ تا ۱۵۶ مورد متغیر بوده است. همان‌طور که در نقشه مشخص است، عربستان سعودی، عراق و سوریه بیشترین فراوانی را دارند. در سمت غرب منطقه مورد مطالعه (شمال آفریقا، نیجر و چاد) بالاترین میزان دالان‌های جوی گردوخاک قابل مشاهده است. با این حال، بالاترین فراوانی هواویزهای گردوخاک از دالان‌های جوی گردوخاک در شبه جزیره عربستان، عراق و سوریه رخ می‌دهد. در نتیجه هیچ تناسب مکانی بین این دو متغیر

(یعنی فراوانی هواویزهای گردوخاک و دالان‌های جوی گردوخاک) وجود ندارد. از آنجایی که مرز غربی منطقه مورد مطالعه ما در ۱۰ درجه شرقی است، دالان‌هایی که از چاد و نیجر به غرب می‌آیند، به دلیل شرط داشتن طول ۲۰۰۰ کیلومتر، قابل شناسایی نیستند. با این حال، بسیاری از مطالعات نشان داده‌اند که گردوخاک بیابان با حرکت به سمت غرب، حتی به جنگل‌های آمازون نیز می‌رسند (پرویسپرو و همکاران، ۱۹۸۱).

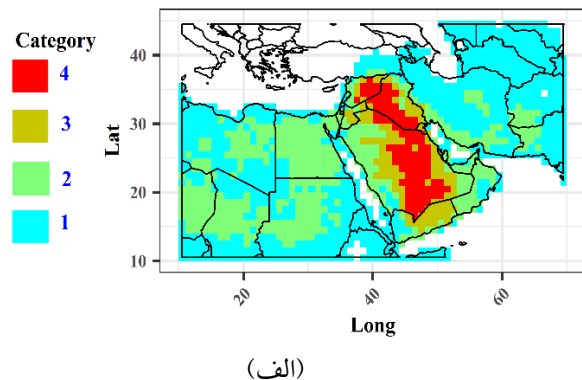
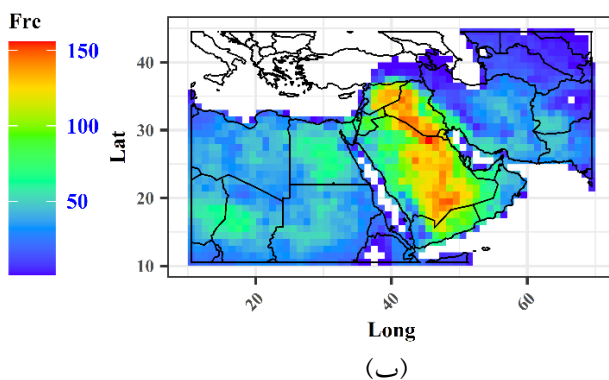
مقادیر فراوانی هواویزهای گردوخاک از دالان‌های جوی گردوخاک، برای نمایش فضایی بهتر به چهار دسته تقسیم شدند (شکل ۷، الف). گروه اول (با رنگ آبی) دارای مقادیری بین ۰ تا ۴۰ بوده و ۵۵ درصد (با ضریب تغییرات ۵۸ درصد) از منطقه مورد مطالعه را پوشش می‌دهند. این مقادیر در همه کشورها دیده می‌شود. گروه دوم (رنگ سبز) دارای مقادیری بین ۴۰ تا ۸۰ بوده و در ۳۰ درصد منطقه مشاهده شده است (ضریب تغییرات = ۱۸ درصد).

سال بیشتر از ماه‌های سرد است. در این مطالعه، مجموعاً ۲۸۱ دالان گردوخاک شناسایی شد که از این تعداد، ۱۴۶ دالان در جهت طول‌جغرافیایی و ۱۳۵ دالان در جهت عرض‌جغرافیایی بوده‌اند. شکل ۸ فراوانی ماهانه دالان‌های جوی گردوخاک را بر اساس جهت حرکت نشان می‌دهد. بیشترین فراوانی سالانه دالان‌ها در سال‌های ۲۰۰۴، ۲۰۱۵ و ۲۰۱۶ (هر سال ۲۰ مورد) و کمترین فراوانی در سال ۲۰۲۰ (۹ مورد) مشاهده شد. بیشترین تعداد دالان‌های جوی گردوخاک در سطح ماهانه، در سپتامبر ۲۰۰۵ با ۶ مورد مشاهده شد. روند فراوانی دالان‌های جوی گردوخاک برای همه جهت‌ها محاسبه شد. آزمون من-کندال هیچ روند معناداری را برای هیچ‌یک از جهت‌ها در طول دوره مشاهده‌شده نشان نداد. شکل ۸ روند ماهانه دالان‌های جوی گردوخاک (در همه جهت‌ها) را نشان می‌دهد. علاوه بر این، آزمون من-کندال تأیید کرد که در هیچ‌یک از ماه‌ها روند قابل توجهی مشاهده نشده است. همبستگی فضایی ضعیفی بین فراوانی هواویزهای گردوخاکی و فراوانی دالان‌های جوی گردوخاکی وجود دارد، و دالان‌ها سهم ناچیزی از فراوانی هواویزهای گردوخاکی را تشکیل می‌دهند.

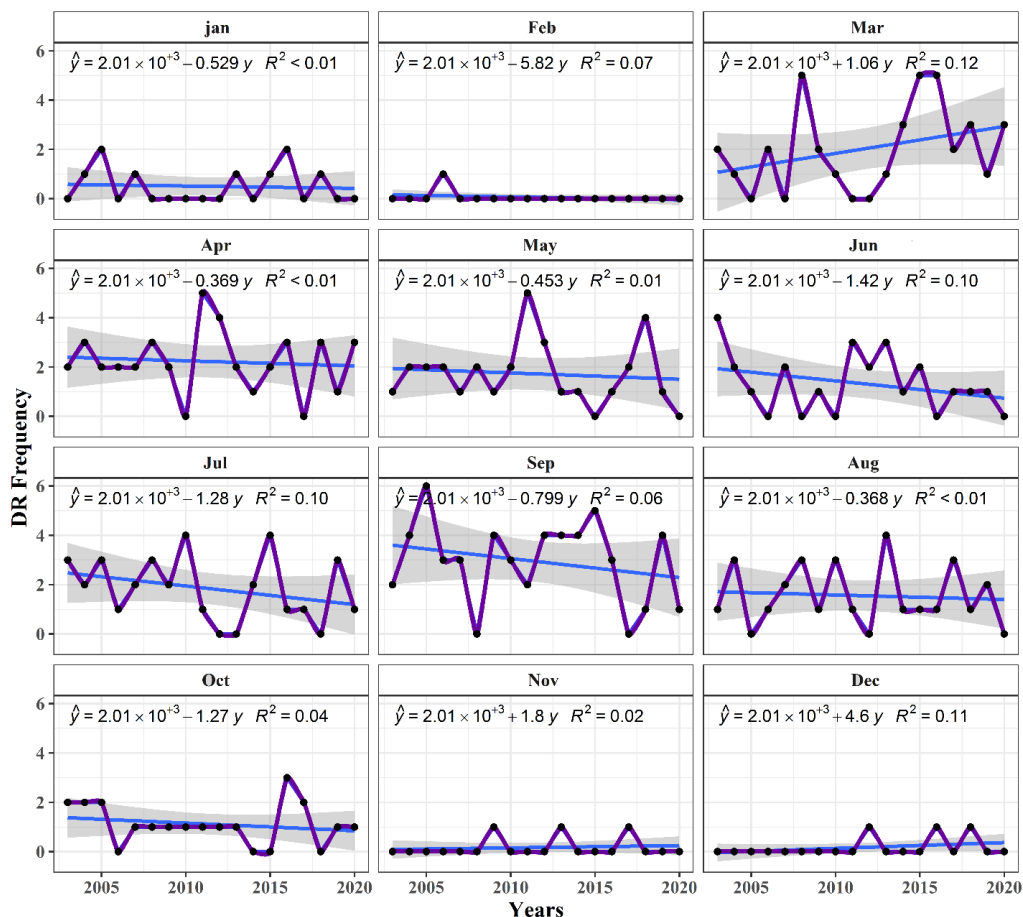
این گروه در شمال آفریقا، غرب عربستان سعودی، شرق و جنوب غرب ایران، جنوب افغانستان و غرب پاکستان مشاهده شده است. گروه سوم (رنگ زرد) (با مقادیر بین ۸۰ تا ۱۲۰) ۸ درصد از منطقه مورد مطالعه (با ضریب تغییرات ۱۱ درصد) را در بر می‌گیرد و در یمن، سوریه، عربستان سعودی، شرق عراق و اردن قابل مشاهده است. گروه نهایی (با رنگ قرمز) (با مقادیر بین ۱۲۰ تا ۱۶۰) دارای بیشترین فراوانی (با ضریب تغییرات مکانی ۶ درصد) بوده و ۷ درصد مساحت منطقه مورد مطالعه را پوشش می‌دهند. دالان‌های جوی گردوخاک در این منطقه بیشترین فراوانی را دارند که در شرق عربستان سعودی، غرب عراق و شرق سوریه یافت می‌شود.

۳-۳. روند فراوانی دالان‌های جوی گردوخاک

فراوانی ماهانه دالان‌های جوی گردوخاک برای تمام جهت‌ها محاسبه شد (به‌منظور جلوگیری از طولانی شدن متن شکل آن نشان داده نشده است). دالان‌های جوی گردوخاک در ماه‌های سپتامبر (۵۳ مورد)، آوریل (۴۰ مورد)، مه (۳۶ مورد) و ژوئیه (۳۳ مورد) بیشترین فراوانی و در فوریه (۱ مورد)، نوامبر (۳ مورد)، دسامبر (۳ مورد) و ژانویه (۹ مورد) کمترین فراوانی را دارند. بنابراین به‌طور کلی فراوانی دالان‌های جوی گردوخاک در ماه‌های گرم



شکل ۷. فراوانی مجموع سالانه هواویز گردوخاک ناشی از دالان‌های جوی گردوخاک (الف) فراوانی سالانه (ب) خوشه‌بندی فضایی بر اساس مقادیر فراوانی.



شکل ۸. تغییرات ماهانه در فراوانی دالان‌های جوی گردوخاک در تمام جهات‌ها در خاورمیانه.

۳-۴. ویژگی‌های زمانی و مکانی دالان‌های جوی

گردوخاک در ایران

شکل ۹-الف فراوانی مشاهدات هواویزهای گردوخاکی ناشی از وقوع دالان‌های جوی گردوخاک را برای هر نقطه شبکه در ایران، در تمامی جهات و برای تمامی ماه‌ها نشان می‌دهد. در این شکل می‌توان مشاهده کرد که هر نقطه شبکه چند بار در طول سال تحت تأثیر دالان‌های جوی گردوخاکی قرار گرفته است. به‌طور کلی، دامنه مقادیر عمق نوری هواویزها (ناشی از دالان‌های جوی گردوخاک) بین ۱ تا ۹۱ مورد متغیر است. بیشترین مقدار در مختصات طول جغرافیایی ۴۷/۵ و عرض جغرافیایی ۳۲/۵ درجه، در جنوب غرب ایران و استان خوزستان مشاهده می‌شود.

در تمامی ماه‌ها، امتداد طول جغرافیایی ۵۴/۵ درجه دارای بیشترین فراوانی وقوع هواویزهای گردوخاکی (میانگین ۳۷ مورد) است، در حالی که در طول جغرافیایی ۵۰/۵

درجه شرقی، این مقدار به حداقل (میانگین ۷ مورد) کاهش می‌یابد. به‌طور مشابه، در امتداد عرض جغرافیایی ۲۷/۵ و ۲۸/۵ درجه شمالی بیشترین فراوانی (۴۵ و ۴۱ مورد به ترتیب) دیده می‌شود، در حالی که در عرض‌های جغرافیایی بالاتر از ۳۶ درجه شمالی، این میانگین کاهش یافته و در تمامی ماه‌ها کمتر می‌شود. به نظر می‌رسد توزیع فراوانی هواویزهای گردوخاکی ناشی از دالان‌های جوی گردوخاک با توزیع ارتفاع از سطح دریا مرتبط باشد، چنان‌که رضائی و همکاران (۲۰۱۸) نشان داده‌اند که بین ناهمواری‌ها و وقوع گردوخاک ارتباط معناداری وجود دارد.

در یک طبقه‌بندی کلی، ایران از نظر مقادیر فراوانی هواویزهای گردوخاکی ناشی از دالان‌های گردوخاکی به ۴ بخش تقسیم شده است (شکل ۹-ب). در طبقه اول با رنگ آبی، کمترین مقادیر گردوخاک مشاهده می‌شود که عمدتاً منطبق با رشته‌کوه‌های

نشان‌دهنده هماهنگی تغییرپذیری سالانه این پدیده در ایران و کل محدوده مورد مطالعه است. بیشترین تعداد دالان‌های جوی گردوخاک در سطح ماهانه در می ۲۰۱۱ (۵ مورد) ثبت شد.

فراوانی ماهانه دالان‌های جوی گردوخاک در ایران، بر اساس جهت حرکت به این ترتیب است:

- دالان‌های غربی (شکل ۱۰-ب): در راستای طول جغرافیایی، با ۶۳ نمونه و بیشترین فراوانی در ماه‌های می (۱۷ مورد) و ژوئیه (۱۰ مورد)، ۷۰ درصد از دالان‌های جوی گردوخاک غربی که در امتداد طول جغرافیایی قرار دارند و از غرب به سمت شرق حرکت می‌کنند، ایران را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهند. تقریباً تمامی دالان‌های جوی گردوخاک ماه می (۱۷ از ۱۸ مورد) ایران را تحت تأثیر قرار داده‌اند.

- دالان‌های شرقی (شکل ۱۰-ج): تعداد نمونه‌های دالان‌های شرقی کمتر از دالان‌های غربی است (۵۵ مورد در تمام ماه‌ها)، با بیشترین فراوانی در آوریل و می (۵ مورد). حدود ۳۴ درصد از دالان‌های جوی گردوخاک که در امتداد طول جغرافیایی قرار دارند و از شرق به غرب حرکت می‌کنند، ایران را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهند.

- دالان‌های جنوبی (شکل ۱۰-د): فراوانی دالان‌های جنوبی نسبت به جهت‌های طولی بیشتر است (۷۲ مورد)، به‌طوری که حدود ۷۲ درصد از دالان‌های جوی گردوخاک که در امتداد طول جغرافیایی قرار دارند و از جنوب به شمال حرکت می‌کنند، ایران را تحت تأثیر قرار می‌دهند. بیشترین فراوانی در ماه‌های سپتامبر (۲۴ مورد) و اوت (۱۴ مورد) مشاهده می‌شود، اما در ماه‌های زمستان هیچ موردی ثبت نشده است.

- دالان‌های شمالی (شکل ۱۰-ه): با فراوانی کمتر در مقایسه با جهات دیگر (۳۴ مورد)، عمدتاً در سپتامبر (۴ مورد) مشاهده شده و هیچ دالان گردوخاکی شمالی در ماه‌های ژوئن و ژوئیه یافت نشد.

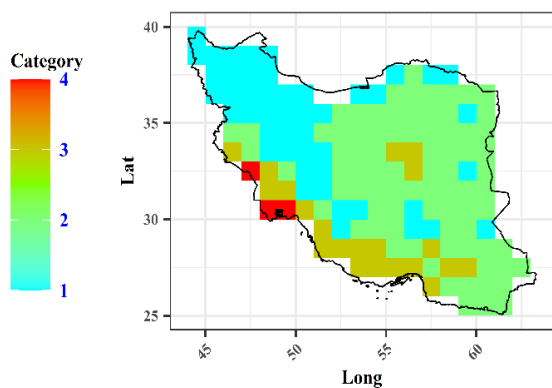
زاگرس و البرز است. طبقه دوم با رنگ سبز، شامل مناطق کوهپایه‌های ایران مرکزی است. اما طبقات سوم و چهارم (به ترتیب با رنگ‌های زرد و قرمز)، که مناطق کم‌ارتفاع جنوب و جنوب‌غرب ایران را شامل می‌شود، دارای مقادیر بالاتری از فراوانی هواویزهای گردوخاکی هستند و این تفاوت ارتفاع نقش قابل توجهی در توزیع جغرافیایی هواویزهای گردوخاکی در کشور ایفا می‌کند.

۳-۵. تغییرپذیری ماهانه دالان‌های جوی گردوخاک

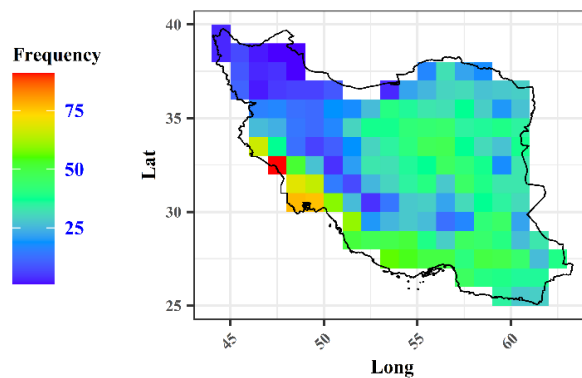
فراوانی ماهانه دالان‌های جوی گردوخاک که ایران را تحت تأثیر قرار می‌دهند، برای همه جهت‌ها محاسبه شد (شکل ۱۰). دالان‌های جوی گردوخاک در ماه‌های سپتامبر (۳۵ مورد)، مه (۲۸ مورد) و ژوئیه (۲۵ مورد) به بالاترین مقدار می‌رسند، در حالی که در دوره سرد سال (ماه‌های نوامبر تا فوریه) به‌ندرت دالان‌های جوی گردوخاک در ایران مشاهده می‌شوند (شکل ۱۰). بنابراین، مشابه با کل منطقه مورد مطالعه (شمال آفریقا و خاورمیانه)، فراوانی دالان‌های جوی گردوخاک در ماه‌های گرم سال بیشتر از ماه‌های سرد است.

همان‌طور که اشاره شد، در این مطالعه، در مجموع ۲۸۱ دالان گردوخاک شناسایی شد که ۱۴۶ دالان در جهت طول جغرافیایی و ۱۳۵ دالان در جهت عرض جغرافیایی برای کل منطقه مورد مطالعه بودند. از این تعداد، ۱۶۵ دالان جوی گردوخاک نیز ایران را تحت تأثیر قرار داده است، به این معنی که ۵۸ درصد از دالان‌های گردوخاکی که در خاورمیانه و شمال آفریقا رخ می‌دهند، ایران را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهند.

بیشترین فراوانی سالانه دالان‌ها در سال‌های ۲۰۰۴ و ۲۰۱۱ (هر کدام ۱۴ مورد) و کمترین فراوانی در سال ۲۰۲۰ (۱ مورد) مشاهده شد. در سال‌های مذکور، کل منطقه تحت تأثیر ۳۰ دالان جوی گردوخاک قرار گرفته است که

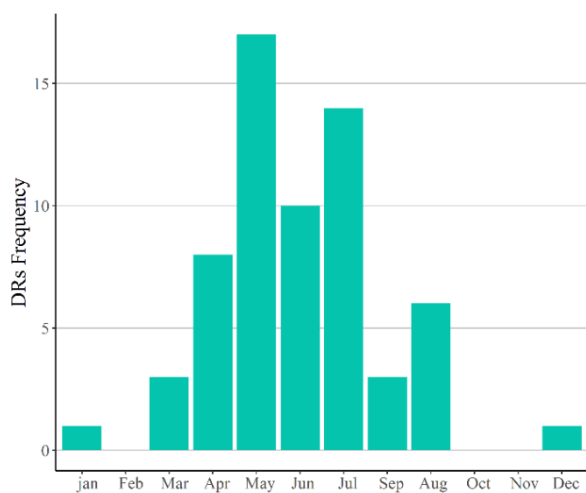


(ب)

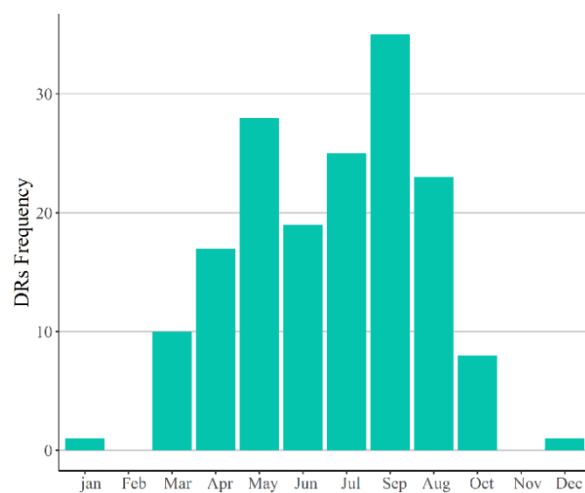


(الف)

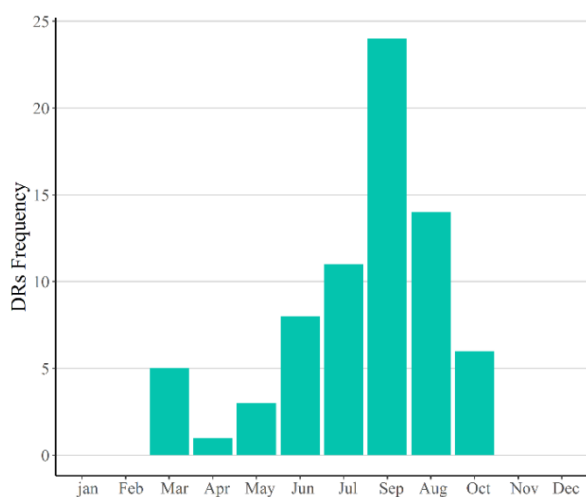
شکل ۹. فراوانی سالانه هواویز گردوخاک ناشی از دالان‌های جوی گردوخاک در ایران. (الف) فراوانی سالانه و (ب) خوشه‌بندی فضایی بر اساس مقادیر فراوانی.



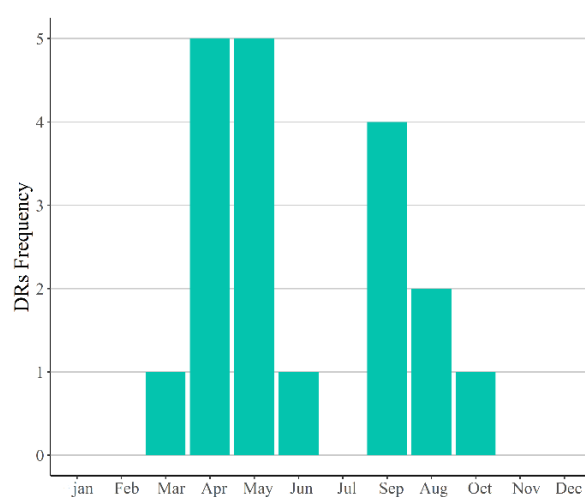
(ب)



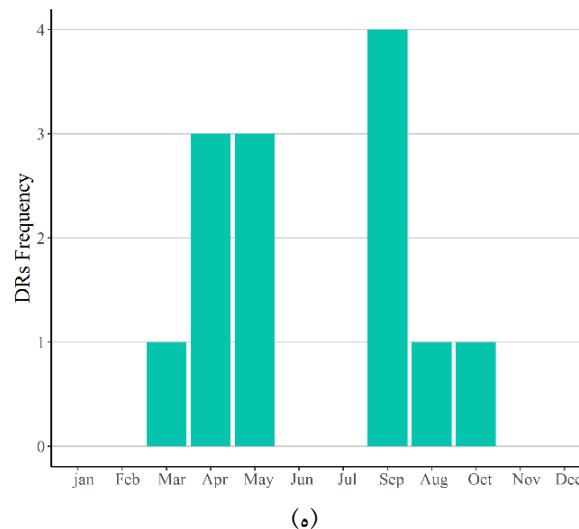
(الف)



(د)



(ج)



شکل ۱۰. فراوانی دالان‌های جوی گردوخاک در یک دوره ۱۸ ساله بر اساس جهت حرکت در ایران. الف) همه طبقات ب) دالان‌های جوی گردوخاک در امتداد طول‌جغرافیایی با جهت غربی ج) دالان‌های جوی گردوخاک در امتداد طول‌جغرافیایی با جهت شرقی. د) دالان‌های جوی گردوخاک در امتداد عرض‌جغرافیایی با جهت جنوبی، ه) دالان‌های جوی گردوخاک در امتداد عرض‌جغرافیایی با جهت شمالی.

نزدیک می‌شویم، از میزان آن نیز کاسته می‌شود. اگرچه از ماه مارس تا سپتامبر دالان‌های جوی گردوخاک بخش وسیعی از ایران را پوشش می‌دهند، اما از لحاظ میانگین دفعات وقوع، ماه می با میانگین ۹/۷ و ضریب تغییرات ۴/۲ بیشترین مقدار را داراست. مشابه با کل منطقه خاورمیانه و شمال آفریقا، بیشترین مقدار ضریب تغییرات فضایی در میانگین چگالی وقوع در ماه سپتامبر (۹۶ درصد) و کمترین آن در ماه می (۴۳ درصد) مشاهده می‌شود. در ماه سپتامبر، اختلاف میانگین وقوع دالان‌های جوی گردوخاک بین جنوب غرب ایران با سایر مناطق بسیار زیاد است و برعکس، در ماه می، به‌طور یکنواختی میانگین وقوع دالان‌های جوی در سراسر ایران بالاست.

بالاترین فراوانی وقوع دالان‌های گردوخاکی به میزان ۲۱ مورد در مختصات ۴۷/۵ درجه طول شرقی و ۳۲/۵ درجه عرض شمالی (جنوب غرب ایران) ثبت شده است. همچنین، مقدار دیگری از بیشینه فراوانی در مختصات ۵۴/۵ درجه طول شرقی و ۲۷/۵ درجه عرض شمالی، در جنوب ایران و نزدیک به سواحل خلیج فارس، مشاهده می‌شود. به‌طور کلی، در تمام ماه‌ها، در امتداد طول‌های جغرافیایی ۴۸/۵ و ۵۸/۵ درجه، فراوانی بیشتری از وقوع

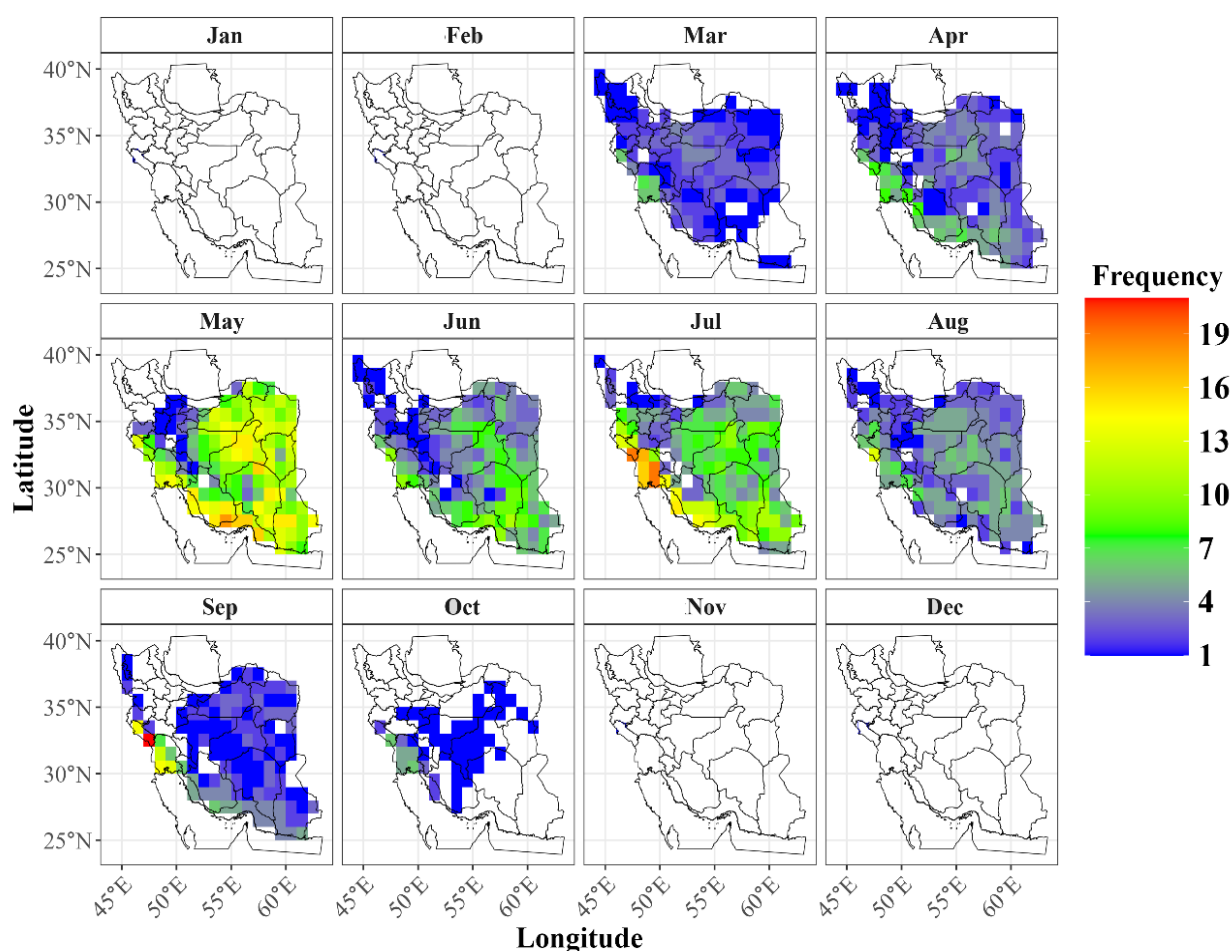
روند فراوانی دالان‌های جوی گردوخاک برای همه جهت‌ها در ایران مورد بررسی قرار گرفت. مشابه با کل مطالعه، آزمون من-کنندال هیچ روند معنی‌داری برای هیچ‌یک از جهت‌ها مشاهده نکرد. تنها مورد قابل توجه، وقوع بیش از دو پدیده گردوخاک ناشی از دالان‌های جوی گردوخاک در ماه اکتبر پس از سال ۲۰۱۵ است.

۳-۶. ویژگی‌های فضایی دالان‌های جوی گردوخاک

شکل ۱۱ چگالی وقوع دالان‌های جوی گردوخاک را برای هر نقطه شبکه در ایران و در تمامی جهات نشان می‌دهد. این شکل به وضوح نشان می‌دهد که هر نقطه شبکه در چند مرتبه تحت تأثیر دالان‌های جوی گردوخاک قرار گرفته است. از ماه مارس تا سپتامبر (یعنی هفت ماه از سال)، حداقل ۶۰ درصد از مساحت ایران حداقل یک‌بار تحت تأثیر دالان‌های جوی گردوخاک قرار گرفته است. بیشترین مساحت تحت پوشش دالان‌ها در ماه ژوئیه (۷۲ درصد) و کمترین میزان در ماه‌های ژانویه، فوریه، نوامبر و دسامبر مشاهده می‌شود. بنابراین، در ماه‌های سرد سال کشور ایران تحت تأثیر دالان‌های جوی گردوخاک که در شمال آفریقا و خاورمیانه شکل می‌گیرند، قرار نمی‌گیرد و هر چه به دوره سرد سال

در امتداد عرض جغرافیایی، بیشترین فراوانی چگالی وقوع دالان‌های جوی گردو خاک در عرض‌های ۲۶/۵ و ۲۷/۵ درجه شمالی، به ترتیب با مقادیر ۶/۵ و ۷ مشاهده می‌شود. در عرض‌های جغرافیایی بالاتر از ۳۶ درجه شمالی، این میانگین به کمتر از ۲ می‌رسد. به این ترتیب، در ایران، بین عرض جغرافیایی و چگالی وقوع دالان‌های جوی گردو خاک یک رابطه معکوس وجود دارد. (رضائی و همکاران، ۲۰۱۹ b؛ باغبانان و همکاران، ۲۰۲۰) در بررسی فراوانی هواپیزهای گردو خاکی در ایران به کمک داده‌های ماهواره‌ای نشان داده‌اند که در عرض‌های جغرافیایی بالاتر از ۳۴/۵ درجه شمالی، فراوانی وقوع هواپیزهای گردو خاکی به طور چشمگیری کاهش می‌یابد.

دالان‌های جوی گردو خاک مشاهده می‌شود (میانگین ۵/۲ برای تمامی ماه‌ها). این در حالی است که در امتداد طول جغرافیایی ۵۰/۵ درجه شرقی این مقدار به حداقل می‌رسد (۲/۸۹ مورد). افزایش وقوع در امتداد ۵۸/۵ درجه به دلیل وجود مناطق کم ارتفاع و بیابانی مانند بیابان لوت و دشت کویر است. از سوی دیگر، جلگه پر گردو خاک خوزستان در طول ۴۸/۵ درجه شرقی، باعث افزایش وقوع دالان‌های جوی گردو خاک در این امتداد شده است. کاهش مقادیر در امتداد طول جغرافیایی ۵۰/۵ درجه شرقی به علت واقع شدن رشته کوه زاگرس در این ناحیه است. رضائی و همکاران (۲۰۱۸) نشان داده‌اند که ارتباط معناداری بین ناهمواری‌ها و وقوع گردو خاک وجود دارد.



شکل ۱۱. توزیع فضایی فراوانی دالان‌های جوی گردو خاک برای همه طبقات در ایران در تمامی ماه‌ها.

۳-۷. طبقه‌بندی دالان‌های جوی گردوخاک بر اساس

جهت حرکت

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، ۱۶۵ رودخانه جوی گردوخاک در این منطقه وسیع نیمکره شمالی شناسایی شد که کشور ایران را تحت تأثیر قرار می‌دهند. از این تعداد، حدود ۵۸ درصد از دالان‌های جوی گردوخاک که در خاورمیانه و شمال آفریقا رخ می‌دهند، ایران را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهند. طبق شکل ۱۰، از لحاظ فراوانی وقوع، به ترتیب دالان‌های جنوبی، غربی، شرقی و شمالی بیشترین فراوانی را در ایران دارند.

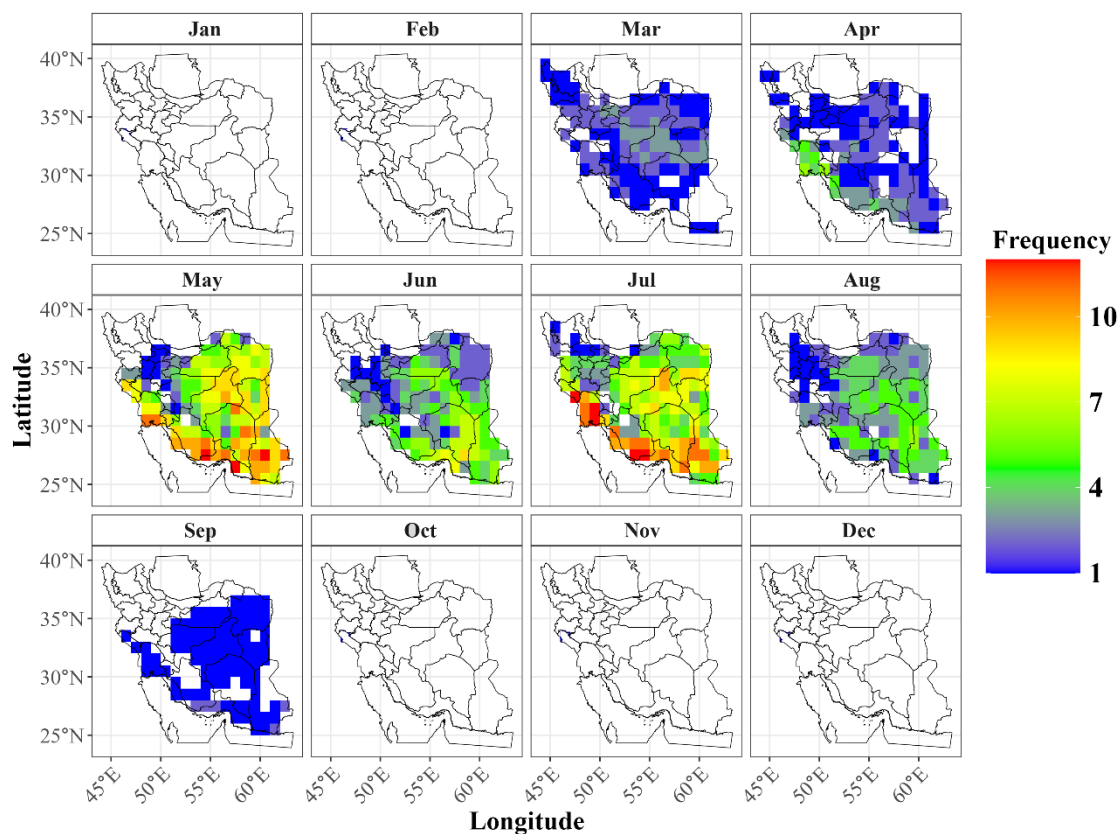
دالان‌های جوی گردوخاکی غربی: این دالان‌ها در بالاترین مقدار خود در ماه‌های ژوئیه (پوشش ۷۰ درصد از منطقه) و می (۶۶ درصد) مشاهده می‌شوند (شکل ۱۲). در ماه‌های اکتبر، نوامبر، دسامبر، ژانویه و فوریه، یعنی پنج ماه سرد سال، دالان‌های غربی ایران را تحت تأثیر قرار نمی‌دهند. از لحاظ میانگین فضایی چگالی دالان‌ها (شکل ۱۳)، ماه‌های می (۶/۷) و ژوئیه (۶/۴) بیشترین مقادیر را دارند. ماه آوریل بیشترین ضریب تغییرات فضایی را در چگالی دالان‌های جوی گردوخاک نشان می‌دهد که نشان‌دهنده تفاوت بالای چگالی در جنوب غرب ایران نسبت به سایر مناطق است. در ماه‌های می و ژوئیه، بیشترین چگالی به مقدار ۱۲ مورد در مناطق جنوبی کشور مشاهده می‌شود. در تمامی ماه‌ها، در امتداد طول جغرافیایی ۶۱/۵ درجه بیشترین مقدار چگالی (میانگین ۴/۴) دیده می‌شود، که احتمالاً به دلیل وجود دشت کویر و بیابان لوت در این امتداد است. در عرض جغرافیایی ۲۷/۵ درجه شمالی نیز بیشترین مقدار چگالی مشاهده شده است.

دالان‌های جوی گردوخاکی شرقی: این دالان‌ها در بیشترین مقدار مساحت تحت پوشش خود، در ماه‌های آوریل (۵۹ درصد) و سپتامبر (۴۱ درصد) مشاهده می‌شوند. دالان‌های گردوخاکی شرقی در ماه‌های سرد

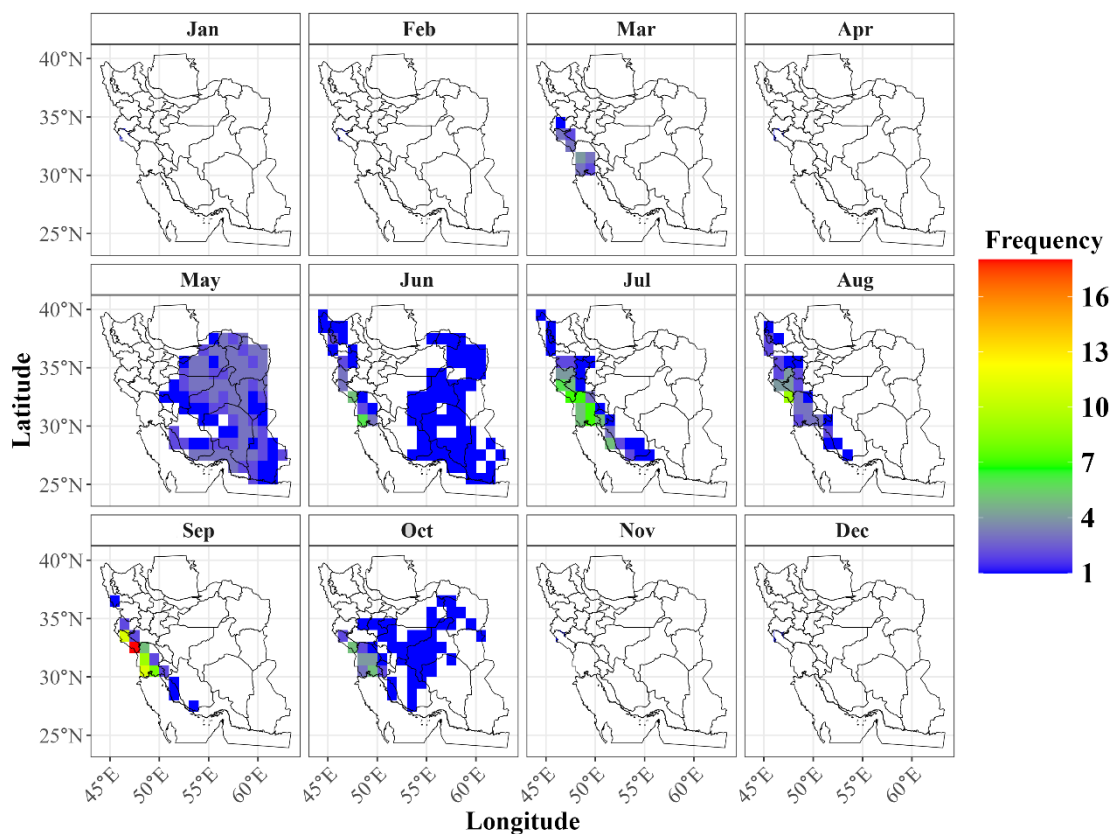
سال (نوامبر، دسامبر، ژانویه و فوریه) و ماه ژوئیه که مجموع چگالی دالان‌های گردوخاکی بالا است، کشور ایران را تحت تأثیر قرار نمی‌دهند. از لحاظ میانگین فضایی چگالی دالان‌ها، ماه سپتامبر (۱/۶) و ماه می (۱/۴) بیشترین مقادیر را دارند. ضریب تغییرات فضایی در ماه سپتامبر بالا است و نشان‌دهنده اختلاف زیاد چگالی در نوار جنوبی ایران نسبت به سایر مناطق می‌باشد.

دالان‌های جوی گردوخاکی جنوبی: دالان‌های جوی گردوخاکی جنوبی که در امتداد طول جغرافیایی کشیده شده و از سمت جنوب به شمال حرکت می‌کنند، بیشترین مساحت تحت پوشش خود را در ماه‌های می (۵۰ درصد) و اکتبر (۲۵ درصد) دارند (شکل ۱۳). این دالان‌ها در دوره سرد سال کشور ایران را تحت تأثیر قرار نمی‌دهند. با وجود این که در ماه می، دالان‌های جنوبی حداقل نیمی از مساحت ایران را تحت پوشش دارند، چگالی آنها در ماه سپتامبر در غرب و جنوب غرب ایران بیشتر است (میانگین ۵/۲). در همین محدوده، اختلاف زیادی بین چگالی در جنوب استان خوزستان با سایر مناطق وجود دارد.

دالان‌های جوی گردوخاکی شمالی: این دالان‌ها که از سمت شمال به جنوب حرکت می‌کنند، در ماه‌های می (۳۲ درصد پوشش) و آوریل (۲۷ درصد پوشش) بیشترین مساحت تحت پوشش را دارند. دالان‌های شمالی، مشابه با سایر دالان‌ها، در دوره سرد سال ایران را تحت تأثیر قرار نمی‌دهند. علاوه بر این، دالان‌های شمالی تنها در دوره محدودی از سال، از ماه‌های آوریل تا می و سپس ماه سپتامبر، کشور ایران را تحت تأثیر قرار می‌دهند. با وجود این که دالان‌های شمالی در ماه می حداقل یک سوم مساحت ایران را تحت تأثیر قرار می‌دهند، چگالی آنها به‌طور کلی بسیار پایین و میانگین آنها حدود ۱ است. تمرکز دالان‌های شمالی عمدتاً در نیمه شرقی کشور و به‌ویژه در مناطق شمال شرق ایران مشاهده می‌شود.



شکل ۱۲. توزیع فضایی چگالی دالان‌های جوی گردو خاک در ایران برای دالان‌های جوی گردو خاک غربی در امتداد طول جغرافیایی.



شکل ۱۳. توزیع فضایی چگالی دالان‌های جوی گردو خاک در ایران برای دالان‌های جوی گردو خاک جنوبی در امتداد عرض جغرافیایی.

۳-۸. نسبت فراوانی هواویزهای گردوخاکی ناشی از

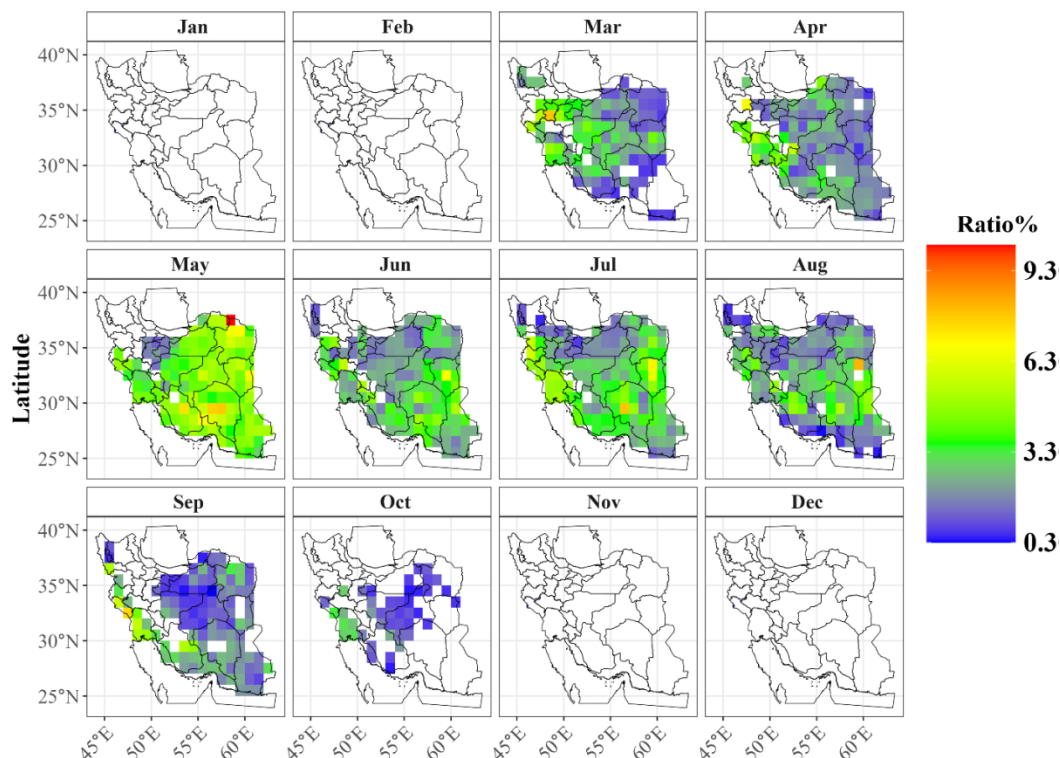
دالان‌های جوی گردوخاک در ایران

در ماه‌های نوامبر، دسامبر، ژانویه و فوریه هیچ کدام از مشاهدات گردوخاکی در ایران به دلیل وقوع دالان‌های جوی گردوخاک نبوده است. شکل ۱۴ نشان می‌دهد که در منطقه خاورمیانه و شمال آفریقا، اگرچه به‌طور کلی در ماه آوریل فراوانی بیشتری از دالان‌های جوی گردوخاک رخ می‌دهد، اما این نسبت در ماه‌های می (۲۷/۵ درصد) و ژوئیه (۲۳/۳ درصد) نسبت به سایر ماه‌ها بیشتر است. ضریب تغییرات فضایی این نسبت در ماه می (۲۸ درصد) نسبت به سایر ماه‌ها کمتر است که نشان‌دهنده توزیع یکنواخت‌تر فراوانی گردوخاک در ایران ناشی از دالان‌های جوی گردوخاک است. از سوی دیگر، در ماه سپتامبر، ضریب تغییرات فضایی این نسبت (۶۳ درصد) نسبت به سایر ماه‌ها بیشتر است، که نشان‌دهنده توزیع نابرابر سهم گردوخاک در نواحی مختلف، به‌ویژه در نوار غربی کشور، است.

به‌طور میانگین در امتداد طول‌های جغرافیایی ۴۷/۵ و ۴۸/۵ درجه شرقی، میانگین این نسبت از فراوانی هواویزهای

گردوخاکی ناشی از دالان‌های جوی گردوخاک (۳/۵ درصد) بیشتر از سایر طول‌های جغرافیایی است. به‌همین ترتیب، در امتداد عرض جغرافیایی ۲۹/۵ درجه شمالی، این نسبت در مقایسه با سایر عرض‌های جغرافیایی بیشتر است (۳/۷ درصد) که نشان می‌دهد سهم مناطق جنوبی ایران نسبت به عرض‌های جغرافیایی بالاتر در وقوع دالان‌های جوی گردوخاک بیشتر است. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که در تمامی ماه‌ها، این نسبت در جنوب غرب ایران نسبت به سایر مناطق بالاتر است.

بالاترین مقدار این نسبت را می‌توان در ماه می به میزان ۱۰/۱ درصد در نقطه‌ای با مختصات ۵۸/۵ درجه طول شرقی و ۳۷/۵ درجه عرض شمالی، در شمال شرق ایران، مشاهده کرد. به نظر می‌رسد که این نسبت بالا به دلیل مجاورت با بیابان قره‌قوم در ترکمنستان است که نقش زیادی در ایجاد دالان‌های جوی گردوخاک در این ناحیه دارد. در نهایت، شایان ذکر است که در شمال غرب ایران و سواحل جنوبی دریای خزر، به‌طور کلی سهم دالان‌های جوی گردوخاک در فراوانی هواویزهای گردوخاکی بسیار ناچیز است.



شکل ۱۴. نسبت فراوانی هواویزهای گردوخاکی ناشی از دالان‌های جوی گردوخاک به کل دالان‌های جوی گردوخاک به‌صورت ماهانه برای ایران.

۴. نتیجه گیری

نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که دالان‌های جوی گردوخاک نقش مهمی در انتقال گردوخاک به مناطق وسیعی از ایران به‌ویژه در ماه‌های گرم سال دارند. داده‌ها نشان می‌دهند که بیش از نیمی از دالان‌های شناسایی‌شده، ایران را تحت تأثیر قرار می‌دهند و مناطق جنوبی و جنوب‌غربی کشور، به‌ویژه استان خوزستان، بیشترین میزان تأثیرپذیری را دارند. همچنین، توزیع جغرافیایی گردوخاک بر اساس جهت حرکت دالان‌ها نشان داد که دالان‌های غربی و جنوبی بیشترین فراوانی و اثرگذاری را در این منطقه دارند، که به دلیل نزدیکی منابع گردوخاکی عمده در شبه جزیره عربستان، عراق و شمال آفریقا است.

این پژوهش با شناسایی ۲۸۱ دالان گردوخاکی و بررسی ویژگی‌های زمانی و مکانی آنها، نه تنها شناخت بیشتری از الگوهای انتقال گردوخاک در منطقه فراهم کرد، بلکه به‌طور خاص مشخص کرد که فصول گرم سال از لحاظ فراوانی دالان‌ها بیشترین تأثیر را بر کشور دارند. نتایج نشان داد که دالان‌های جوی گردوخاک در ماه‌های مارس تا سپتامبر، بیش از ۶۰ درصد از مساحت ایران را حداقل یک‌بار پوشش می‌دهند. این دالان‌ها در فصول سرد کمتر فعال‌اند و در این زمان کمتر از مناطق ایران عبور می‌کنند.

یافته‌های این مطالعه می‌تواند برای مدیریت مخاطرات زیست‌محیطی و بهداشتی گردوخاک در ایران بسیار ارزشمند باشد. به کارگیری سیستم‌های هشدار و پیش‌بینی بر اساس داده‌های اقلیمی و شناسایی دالان‌های جوی گردوخاک، به کاهش اثرات منفی ناشی از گردوخاک بر سلامت عمومی، کاهش دید و اثرات زیست‌محیطی کمک خواهد کرد. علاوه بر این، این نتایج می‌توانند در بهبود راهکارهای مدیریتی جهت کنترل کیفیت هوا و توسعه سیاست‌های مقابله با پدیده‌های گردوخاکی، به‌ویژه در مناطق حساس‌تر جنوب‌غربی ایران، مفید واقع شوند.

اگرچه مطالعات پیشین به جنبه‌های مختلفی از گردوخاک در ایران پرداخته‌اند، اما بیشتر این تحقیقات بر

تأثیرات زیست‌محیطی و بهداشتی، شناسایی منابع گردوخاک و تحلیل سینوپتیکی الگوهای جوی متمرکز بوده‌اند. این تحقیقات ابعاد مهمی از مسئله گردوخاک را روشن کردند، اما تمرکز اصلی آنها بر پیامدهای محلی یا بررسی‌های کیفی پدیده بوده است.

در مقابل، مطالعه حاضر با معرفی مفهوم جدیدی به نام «دالان‌های جوی گردوخاک» به صورت سیستماتیک و کمی به تحلیل الگوهای مکانی و زمانی انتقال گردوخاک در خاورمیانه و شمال آفریقا پرداخته است. این پژوهش با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای و الگوریتم خودکار، ۲۸۱ دالان جوی گردوخاک را شناسایی و طبقه‌بندی کرده و برای نخستین بار تأثیر این دالان‌ها بر مناطق مختلف ایران را از نظر تراکم، فراوانی و مسیر بررسی کرده است. چنین رویکردی، که تأکید بیشتری بر دینامیک انتقال و تأثیرات منطقه‌ای گردوخاک دارد، در تحقیقات قبلی کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

به‌طور کلی، این پژوهش با ارائه درکی جامع از الگوهای انتقال گردوخاک در خاورمیانه و شمال آفریقا و بررسی اثرات آن بر آب‌وهوای ایران، بستر مناسبی برای تحقیقات آتی فراهم می‌کند و اهمیت بررسی دالان‌های جوی گردوخاک در برنامه‌ریزی‌های اقلیمی، بهداشت عمومی و توسعه پایدار را برجسته می‌سازد.

تشکر و قدردانی

این پژوهش تحت حمایت مادی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) برگرفته شده از طرح شماره ۴۰۰۴۸۴۵، انجام شده است. نویسندگان مراتب تشکر و قدردانی خود را از صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور اعلام می‌دارند.

مراجع

لشکری، ح. و صبوئی، م. (۱۳۹۲). تحلیل سینوپتیکی الگوهای حاکم بر طوفان گرد و غبار استان خوزستان. فصلنامه علمی-پژوهشی اطلاعات جغرافیایی «سپهر»

- ایران. *جغرافیا و برنامه ریزی محیطی*، ۲۵(۴)، ۲۰۳-۲۲۰.
- باغی، م.؛ راشکی، ع. و محمودی قزایی، م. (۱۳۹۹). بررسی خصوصیات شیمیایی و کانی شناسی گرد و غبار ورودی به شمال شرق ایران و پتانسیل بیماری زایی آن. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۹(۱)، ۱۳۹-۱۵۳.
- Abdullaev, S. F., & Sokolik, I. N. (2020). Assessment of the influences of dust storms on cotton production in Tajikistan. *Landscape Dynamics of Drylands across Greater Central Asia: People, Societies and Ecosystems*, 17- 87.
- Abdulwahed, A., Dash, J., & Roberts, G. (2019). An evaluation of satellite dust-detection algorithms in the Middle East region. *International journal of remote sensing*, 40(4), 1331-1356.
- Alizadeh-Choobari, O., Sturman, A., & Zawar-Reza, P. (2014). A global satellite view of the seasonal distribution of mineral dust and its correlation with atmospheric circulation. *Dynamics of atmospheres and oceans*, 68, 20-34.
- Baddock, M. C., Strong, C. L., Leys, J. F., Heidenreich, S. K., Tews, E. K., & McTainsh, G. H. (2014). A visibility and total suspended dust relationship. *Atmospheric Environment*, 89, 329-336.
- Baghbanan, P., Ghavidel, Y., & Farajzadeh, M. (2020). Spatial analysis of spring dust storms hazard in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 139, 1447-1457.
- 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.
- Broomandi, P., Dabir, B., Bonakdarpour, B., & Rashidi, Y. (2017). Identification of the sources of dust storms in the City of Ahvaz by HYSPLIT. *Pollution*, 3(2), 341-348.
- Broomandi, P., Crape, B., Jahanbakhshi, A., Janatian, N., Nikfal, A., Tamjidi, M., Kim, J.R., Middleton, N., & Karaca, F. (2022). Assessment of the association between dust storms and COVID-19 infection rate in southwest Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(24), 36392-36411.
- Chen, Y., Chen, S., Zhou, J., Zhao, D., Bi, H., Zhang, Y., Alam, K., Yu, H., Yang, Y., & Chen, J., (2023). A super dust storm enhanced by radiative feedback. *npj Climate and Atmospheric Science*, 6(1), 90.
- Creamean, J. M., Spackman, J. R., Davis, S. M., & White, A. B. (2014). Climatology of long-range transported Asian dust along the West Coast of the United States. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(21), 12-171.
- Dettinger, M. D., Ralph, F. M., Das, T., Neiman, P. J., & Cayan, D. R. (2011). Atmospheric rivers, floods and the water resources of California. *Water*, 3(2), 445-478.
- DeMott, P.J., Prenni, A.J., Liu, X., Kreidenweis, S.M., Petters, M.D., Twohy, C.H., Richardson, M.S., Eidhammer, T. and Rogers, D. (2010). Predicting global atmospheric ice nuclei distributions and their impacts on climate. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(25), 11217-11222.
- Dezfuli, A., Bosilovich, M. G., & Barahona, D. (2021). A Dusty Atmospheric River Brings Floods to the Middle East. *Geophysical Research Letters*, e2021GL095441.
- Di Mauro, B., Garzonio, R., Rossini, M., Filippa, G., Pogliotti, P., Galvagno, M., Morra di Cella, U., Migliavacca, M., Baccolo, G., Clemenza, M., & Delmonte, B. (2019). Saharan dust events in the European Alps: role in snowmelt and geochemical characterization. *The Cryosphere*, 13(4), 1147-1165.
- Dogan, T. R., Saydam, A. C., Yesilnacar, M. I., & Gencer, M. (2010). In-cloud alteration of desert-dust matrix and its possible impact on health: a test in southeastern Anatolia, Turkey. *European Journal of Mineralogy*, 22(5), 659-664.
- Elhadidy, M. A., Abdel-Nabi, D. Y., & Kruss, P. D. (1990). Ultraviolet solar radiation at Dhahran, Saudi Arabia. *Solar Energy*, 44(6), 315-319.
- Enete, I. C., Igu, I. N., & Ayadiulo, R. (2012). Harmattan dust: composition, characteristics and effects on soil fertility in Enugu, Nigeria. *British Journal of Applied Science and Technology*, 2(1), 72-81.
- Engelstaedter, S., Tegen, I., & Washington, R. (2006). North African dust emissions and transport. *Earth-Science Reviews*, 79(1-2), 73-100.
- Francis, D., Fonseca, R., Nelli, N., Bozkurt, D., Picard, G., & Guan, B. (2022). Atmospheric rivers drive exceptional Saharan dust transport towards Europe. *Atmospheric Research*, 266, 105959.
- Furman, H. K. H. (2003). Dust storms in the Middle East: sources of origin and their temporal

- characteristics. *Indoor and Built Environment*, 12(6), 419-426.
- Goudie, A. S., & Middleton, N. J. (2006). *Desert dust in the global system*. Springer Science & Business Media.
- Griffin, D. W., Kellogg, C. A., Garrison, V. H., & Shinn, E. A. (2002). The global transport of dust: an intercontinental river of dust, microorganisms and toxic chemicals flows through the Earth's atmosphere. *American Scientist*, 90(3), 228-235.
- Hamidi, M., Kavianpour, M. R., & Shao, Y. (2013). Synoptic analysis of dust storms in the Middle East. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 49(3), 279-286.
- Hsu, N. C., Tsay, S. C., King, M. D., & Herman, J. R. (2004). Aerosol properties over bright-reflecting source regions. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 42(3), 557-569.
- Israelevich, P., Ganor, E., Alpert, P., Kishcha, P., & Stupp, A. (2012). Predominant transport paths of Saharan dust over the Mediterranean Sea to Europe. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117(D2).
- Jafari, R., & Malekian, M. (2015). Comparison and evaluation of dust detection algorithms using MODIS Aqua/Terra Level 1B data and MODIS/OMI dust products in the Middle East. *International Journal of Remote Sensing*, 36(2), 597-617.
- Kaskaoutis, D.G., Dumka, U.C., Rashki, A., Psiloglou, B.E., Gavriil, A., Mofidi, A., Petrinoli, K., Karagiannis, D., & Kambezidis, H.D. (2019). Analysis of intense dust storms over the eastern Mediterranean in March 2018: Impact on radiative forcing and Athens air quality. *Atmospheric environment*, 209, 23-39.
- Middleton, N. J. (1986). Dust storms in the Middle East. *Journal of Arid Environments*, 10(2), 83-96.
- Notaro, M., Alkolibi, F., Fadda, E., & Bakhrjy, F. (2013). Trajectory analysis of Saudi Arabian dust storms. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(12), 6028-6043.
- Penning de Vries, M. J. M., Beirle, S., Hörmann, C., Kaiser, J. W., Stammes, P., Tilstra, L. G., & Wagner, T. (2015). A global aerosol classification algorithm incorporating multiple satellite data sets of aerosol and trace gas abundances. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(18), 10597-10618.
- Prospero, J. M., Glaccum, R. A., & Nees, R. T. (1981). Atmospheric transport of soil dust from Africa to South America. *Nature*, 289(5798), 570-572.
- Prospero, J. M., Ginoux, P., Torres, O., Nicholson, S. E., & Gill, T. E. (2002). Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust identified with the Nimbus 7 Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) absorbing aerosol product. *Reviews of geophysics*, 40(1), 2-1.
- Ralph, F. M., Neiman, P. J., & Wick, G. A. (2004). Satellite and CALJET aircraft observations of atmospheric rivers over the eastern North Pacific Ocean during the winter of 1997/98. *Monthly Weather Review*, 132(7), 1721-1745.
- Ralph, F. M., Neiman, P. J., Wick, G. A., Gutman, S. I., Dettinger, M. D., Cayan, D. R., & White, A. B. (2006). Flooding on California's Russian River: Role of atmospheric rivers. *Geophysical Research Letters*, 33(13).
- Ralph, F. M., & Dettinger, M. D. (2011). Storms, floods, and the science of atmospheric rivers. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 92(32), 265-266.
- Rezaei, M., Farajzadeh, M., Ghavidel, Y., & Alam, K. (2018). Spatio-temporal variability of aerosol characteristics in Iran using remotely sensed datasets. *Pollution*, 4(1), 53-67.
- Rezaei, M., Farajzadeh, M., Mielonen, T., & Ghavidel, Y. (2019a). Analysis of spatio-temporal dust aerosol frequency over Iran based on satellite data. *Atmospheric Pollution Research*, 10(2), 508-519.
- Rezaei, M., Farajzadeh, M., Mielonen, T., & Ghavidel, Y. (2019b). Discrimination of aerosol types over the Tehran city using 5 years (2011–2015) of modis collection 6 aerosol products. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 17(1), 1-12.
- Rezaei, M., Irannejad, P., & Shao, Y. (2013). Climatology of the Middle East dust events. *Aeolian Research*, 10, 103-109.
- Salmabadi, H., Khalidy, R., & Saeedi, M. (2020). Transport routes and potential source regions of the Middle Eastern dust over Ahvaz during 2005–2017. *Atmospheric Research*, 241, 104947.
- Salomonson, V. V., Barnes, W. L., Maymon, P. W., Montgomery, H. E., & Ostrow, H. (1989). MODIS: Advanced facility instrument for studies of the Earth as a system. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 27(2), 145-153.
- Sayer, A. M., Hsu, N. C., Bettenhausen, C., & Jeong, M. J. (2013). Validation and uncertainty estimates for MODIS Collection 6 “Deep Blue” aerosol data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(14), 7864-7872.
- Schepanski, K., Mallet, M., Heinold, B., & Ulrich, M. (2016). North African dust transport toward the western Mediterranean basin: atmospheric controls on dust source activation and transport pathways during June–July 2013. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(22), 14147-14168.
- Yassin, M. F., Almutairi, S. K., & Al-Hemoud, A. (2018). Dust storms backward Trajectories' and source identification over Kuwait. *Atmospheric research*, 212, 158-171.
- Yu, Y., Kalashnikova, O. V., Garay, M. J., Lee, H., & Notaro, M. (2018). Identification and characterization of dust source regions across North Africa and the Middle East using MISR satellite observations. *Geophysical Research*

- Letters*, 45(13), 6690-6701.
- Tam, W. W., Wong, T. W., Wong, A. H., & Hui, D. S. (2012). Effect of dust storm events on daily emergency admissions for respiratory diseases. *Respirology*, 17(1), 143-148.
- Voss, K. K., Evan, A. T., Prather, K. A., & Ralph, F. M. (2020). Dusty Atmospheric Rivers: Characteristics and Origins. *Journal of Climate*, 33(22), 9749-9762.
- Voss, K. K., & Evan, A. T. (2020). A new satellite-based global climatology of dust aerosol optical depth. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 59(1), 83-102.
- Waliser, D., & Guan, B. (2017). Extreme winds and precipitation during landfall of atmospheric rivers. *Nature Geoscience*, 10(3), 179-183.