

Synoptic-Satellite Assessment of Dust Storms in Western Iran Using Zero Horizontal Visibility Criterion

Mahnaz Saber¹, Bromand Salahi²

1. Department of Climatology, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran.

2. Department of Climatology, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran. (Corresponding Author)

E-mail: salahi@uma.ac.ir

Western Iran, due to its proximity to major dust sources in Iraq, Syria, and Saudi Arabia, is especially vulnerable to frequent and severe dust events. This study aimed to identify and analyze the most intense dust storms recorded at 16 synoptic stations in western Iran where horizontal visibility was reduced to zero meters and wind speed reached at least 15 m/s. MERRA-2 data and DCMD and DSMC indices were also used to identify the dust centers of the storms. Analysis of 74-year data (1951–2024) reveals that extreme dust storms in western Iran follow an irregular temporal pattern. The highest frequency of such events occurred in 1953 (4 cases), 1964 (4 cases), and 1965 (3 cases), with the 1960s being the most active decade (12 events). Data analysis indicates that low-altitude stations such as Abadan and Ahvaz were the most affected. These events were primarily associated with specific climatic conditions (drought periods) and shifts in atmospheric pressure patterns. The monthly distribution shows two distinct peaks in March and September, highlighting the significance of seasonal transitional periods. Synoptic analysis reveals that these storms are driven by unstable atmospheric systems and strong winds with specific directional patterns, with over two-thirds linked to Mediterranean cyclones and intensified northwesterly winds. The findings underscore the need for early warning systems, integrated management, and regional planning. Proposed mitigation strategies include wetland restoration, dust source control, and the design of localized infrastructure.

Keywords: Dust, Horizontal Visibility, Storm, Synoptic Analysis, Western Iran.

ارزیابی همیدی-ماهواره‌ای طوفان‌های گرد و غباری غرب ایران با معیار دید افقی صفر متر^۱

مهناز صابر، برومند صلاحی

گروه آب و هواشناسی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران.

^۱ این مقاله با حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه محقق اردبیلی به شماره قرارداد ۳۸۳ انجام پذیرفته است.

چکیده

نیمه غربی ایران به دلیل نزدیکی به منابع اصلی گرد و غبار در عراق و بیابان‌های سوریه و عربستان سعودی، به‌ویژه در برابر رویدادهای مکرر و شدید گرد و غبار آسیب‌پذیر است. این پژوهش با هدف شناسایی شدیدترین طوفان‌های گرد و غباری رخ داده در ۱۶ ایستگاه سینوپتیک نیمه غربی که دید افقی در آن صفر متر و سرعت باد حداقل ۱۵ متر بر ثانیه بوده است، انجام گرفت. برای شناسایی کانون گرد و غبار طوفان‌ها نیز از داده‌های MERRA-2 و شاخص‌های DCMD و DSMC نیز استفاده شد. داده‌های ۷۴ ساله (۱۹۵۱-۲۰۲۴) نشان می‌دهد که طوفان‌های گرد و غباری بسیار شدید در نیمه غربی ایران از الگوی زمانی نامنظمی برخوردارند. بیشترین فراوانی این رخداد در سال‌های ۱۹۵۳ (۴ مورد)، ۱۹۶۴ (۴ مورد) و ۱۹۶۵ (۳ مورد) رخ داده است و دهه ۱۹۶۰ با ۱۲ رخداد، فعال‌ترین دهه محسوب می‌شود. تحلیل داده‌ها نشان داد که ایستگاه‌های کم‌ارتفاع مانند آبادان و اهواز بیشترین تأثیر را از این طوفان‌ها پذیرفته‌اند. این رویدادها عمدتاً با شرایط اقلیمی خاصی (دوره‌های خشکسالی) و تغییرات الگوهای فشار جوی همراه بوده‌اند. الگوی ماهانه وقوع، دو اوج مشخص در ماه‌های مارس و سپتامبر را نشان می‌دهد که بیانگر اهمیت ویژه دوره‌های انتقالی فصلی است. ویژگی‌های همدیدی الگوهای مولد این طوفان‌ها همراهی سیستم‌های جوی ناپایدار و وزش بادهای شدید با جهت‌های خاص است و بیش از دو سوم طوفان‌ها با نفوذ سامانه‌های مدیترانه‌ای و تقویت بادهای شمال غربی مرتبط بوده‌اند. یافته‌های این پژوهش بر ضرورت توسعه سیستم‌های هشدار زودهنگام، مدیریت یکپارچه و برنامه‌ریزی منطقه‌ای تأکید دارد. احیای تالاب‌ها، کنترل کانون‌های گردوغبار و طراحی سازه‌های مناسب با توجه به ویژگی‌های محلی از جمله راهکارهای پیشنهادی است.

کلیدواژه: تحلیل همدیدی، دید افقی، طوفان، غرب ایران، گرد و غبار.

نویسنده مسئول: استان اردبیل - اردبیل - خیابان دانشگاه - دانشگاه محقق اردبیلی - دانشکده علوم اجتماعی، گروه آموزشی جغرافیای طبیعی،
salahi@uma.ac.ir

مقدمه

طوفان‌های گردوغبار یک پدیده زیست‌محیطی بزرگ در مناطق خشک و نیمه‌خشک به‌ویژه در خاورمیانه از جمله ایران است. سازمان جهانی هواشناسی^۱ طوفان گردوغبار را زمانی گزارش می‌کند که سرعت باد از ۱۵ متر بر ثانیه فراتر رود و دید افقی به کمتر از ۱۰۰۰ متر کاهش یابد (WMO, 2019). این طوفان‌ها توسط ترکیبی از عوامل طبیعی، مانند الگوهای باد و خشک‌سالی و همچنین فعالیت‌های انسانی مانند جنگل‌زدایی، چرای بیش‌ازحد و شیوه‌های کشاورزی ناپایدار هدایت می‌شوند (Goudie & Middleton, 2006; Zoljoodi et al., 2013؛ صابر و همکاران، ۱۴۰۴). نیمه غربی ایران به دلیل نزدیکی به منابع اصلی گردوغبار مانند باتلاق‌های بین‌النهرین در عراق و بیابان‌های سوریه و عربستان سعودی، به‌ویژه در برابر رویدادهای مکرر و شدید گردوغبار آسیب‌پذیر است (الدباس و همکاران، ۲۰۱۲؛ بلورانی و همکاران، ۲۰۱۴).

1- WMO

آب و هوای منطقه که با بارش کم و دمای بالا مشخص می‌شود، با ایجاد شرایط مساعد برای تولید گردوغبار، مشکل را تشدید می‌کند (رشکی و همکاران، ۲۰۱۳). طوفان‌های گردوغبار در این منطقه نه تنها یک مسئله محلی بلکه بخشی از یک مشکل فرامرزی بزرگ‌تر است، زیرا ذرات گردوغبار می‌توانند صدها کیلومتر را طی کنند و بر کیفیت هوا و اکوسیستم‌های دور از منبع خود تأثیر بگذارند (شائو و همکاران، ۲۰۱۱). علیرغم حجم فزاینده تحقیقات در مورد پدیده گردوغبار در خاورمیانه، کمبود مطالعات جامع با تمرکز بر روند بلندمدت و محرک‌های طوفان‌های گردوغبار در نیمه غربی ایران با استفاده از روش‌های آماری پیشرفته وجود دارد (نامداری و همکاران، ۲۰۱۸).

مطالعه طوفان‌های گردوغبار به دلیل تأثیرات زیست‌محیطی، بهداشتی و اجتماعی-اقتصادی گسترده آن‌ها از اهمیت حیاتی برخوردار است. از نظر زیست‌محیطی، طوفان‌های گردوغبار به فرسایش خاک، کاهش کیفیت هوا و آسیب به اکوسیستم‌ها کمک می‌کند که می‌تواند عواقب بلندمدتی برای تنوع زیستی و بهره‌وری کشاورزی داشته باشد (Middleton, 2017). از منظر بهداشتی، طوفان‌های گردوغبار با بیماری‌های تنفسی و قلبی-عروقی، به‌ویژه در میان جمعیت‌های آسیب‌پذیر مانند کودکان، سالمندان مرتبط است (گودی، ۲۰۱۴). در ایران، افزایش فراوانی وقوع طوفان‌های گردوغبار منجر به افزایش پذیرش در بیمارستان‌ها و مراکز درمانی برای بیماری‌های تنفسی شده است که نیاز مبرم به استراتژی‌های کاهش مؤثر را برجسته می‌کند (نبوی و همکاران، ۲۰۱۶). از نظر اجتماعی-اقتصادی، طوفان‌های گرد و غبار، حمل‌ونقل، کشاورزی و زندگی روزمره را مختل می‌کند که منجر به خسارات اقتصادی قابل توجهی می‌شود. به‌عنوان مثال، کاهش دید در طول طوفان‌های گردوغبار می‌تواند سفرهای هوایی و جاده‌ای را متوقف کند، درحالی‌که رسوب گردوغبار روی محصولات می‌تواند عملکرد را کاهش دهد و به زیرساخت‌ها آسیب برساند (Sissakian et al., 2013). در نیمه غربی ایران که کشاورزی یک فعالیت اقتصادی کلیدی است، تأثیر طوفان‌های گردوغبار بر معیشت شدید است (رشکی و همکاران، ۲۰۱۵). این مطالعه باهدف بررسی این چالش‌ها با تجزیه و تحلیل رویدادهای گردوغبار در نیمه غربی ایران با استفاده از روش‌های آماری پیشرفته انجام شده است. با شناسایی الگوهای مکانی و زمانی طوفان‌های گردوغبار و محرک‌های زیربنایی آن، یافته‌های این تحقیق بینش‌های ارزشمندی را در اختیار سیاست‌گذاران و ذینفعان قرار می‌دهد. به‌عنوان مثال، شناسایی مناطق منبع گردوغبار می‌تواند به هدف‌گذاری تلاش‌ها برای کاهش وقوع این رخداد، مانند احیای جنگل‌ها یا احیای زمین کمک کند، درحالی‌که درک نقش عوامل اقلیمی و انسانی می‌تواند شیوه‌های استفاده پایدار از زمین و استراتژی‌های سازگاری با آب‌وهوا را هدایت کند (وانگ و همکاران، ۲۰۱۷). علاوه بر این، این مطالعه به درک علمی گسترده‌تر پدیده گردوغبار در مناطق خشک و نیمه‌خشک کمک می‌کند و یک چارچوب روش‌شناختی ارائه می‌دهد که می‌تواند در سایر مناطق مستعد گردوغبار در سطح جهان اعمال شود (Klingmüller et al., 2016).

در اینجا به چند مورد از مطالعات انجام شده در زمینه رخداد گردوغبار اشاره می‌شود. عزیزی و همکاران (الف ۱۳۹۱) با روش تحلیلی و آماری و با استفاده از تصاویر MODIS و انجام محاسبات در محیط ENVI و RAOB به بررسی رخداد گردوغبار در غرب ایران پرداختند و دریافتند بیشترین فراوانی این پدیده در ماه‌های گرم و کمترین آن در دسامبر و ژانویه می‌باشد. همچنین یافته‌ها حاکی از ترمودینامیکی بودن علت این رخداد در دوره گرم سال و دینامیکی بودن آن در ماه‌های گذار و سرد است. شمسی‌پور و همکاران (۱۳۹۳) با تلفیقی از روش‌های همدیدی-آماري و دورسنجی الگوهای ورود گردوغبار به غرب ایران طی تابستان و زمستان دوره ۳۰ ساله (۲۰۰۸-۱۹۷۹) را استخراج کردند. نامبردگان سه مسیر ورود و دو کانون گردوغبار را شناسایی نمودند و نیز علت ایجاد آن در دوره گرم را ترمودینامیکی و ناشی از شیو شدید فشار و در دوره سرد دینامیکی عنوان کردند. رستمی و حسینی (۱۳۹۷) با ترکیبی از روش‌های دورسنجی، همدیدی و آماری به بررسی رخداد گردوغبار در جنوب و جنوب شرق ایران طی دوره ۳۰ ساله (۲۰۱۳-۱۹۸۴) پرداختند. نتیجه تحلیل همدیدی دلالت بر این دارد که در دوره گرم شیو شدید فشار و عامل ترمودینامیکی و در دوره سرد الگوی بادهای غربی و عامل دینامیکی علت اصلی این رخداد است. محمودی مه‌پاش (۱۴۰۰) غلظت گردوغبار غرب ایران و همبستگی آن با برخی متغیرهای اقلیمی را بررسی نمود و نتیجه گرفت نوع همبستگی بین این‌ها در ایستگاه‌های مختلف محدوده مورد مطالعه متفاوت بوده که علت آن را به تفاوت ذاتی هر ایستگاه و منشأ متفاوت گردوغبار آن‌ها نسبت داده است. کاتورانی و همکاران (۱۴۰۳) با استفاده از داده‌های بازتحلیل EAC4 نشان دادند که بیشینه عمق نوری گرد و غبار (DOD) در غرب آسیا در فصول بهار و تابستان در مناطق بین‌النهرین، بیابان‌های عراق و سوریه و جنوب غرب ایران رخ می‌دهد و به‌طور کلی روندی افزایشی در بیشتر ماه‌های سال دارد. همچنین، نتایج این پژوهش حاکی از آن است که کاهش پوشش گیاهی متراکم و مراتع و افزایش زمین‌های زراعی، با مناطق دارای بیشینه رخداد گرد و غبار در این ناحیه همخوانی دارد. بر اساس پژوهش محمدپور و همکاران (۱۴۰۳)، گرد و غبار در نیمه غربی ایران از الگوی مکانی نامتوازنی برخوردار است به طوری که کانون‌های اصلی این پدیده در جنوب غربی منطقه قرار داشته و منشأ آن خارجی تشخیص داده شده است. این مطالعه با تلفیق داده‌های زمینی و سنجش از دور، تطابق قابل توجهی بین نتایج شاخص NDDI و مشاهدات ایستگاه‌های زمینی نشان داده است.

پدیده گردوغبار در نیمه غربی ایران یکی از مسائل جدی زیست‌محیطی و اجتماعی به شمار می‌آید که تأثیرات نامطلوبی بر زندگی مردم، سلامت عمومی، کشاورزی و زیرساخت‌ها دارد. این پدیده به‌ویژه در استان‌های خوزستان، ایلام، کردستان، کرمانشاه و حتی لرستان به‌طور مداوم رخ می‌دهد و در دهه‌های اخیر تکرار و شدت بیشتری داشته است. به لحاظ اهمیت روزافزون پدیده گردوغبار و تغییرات نگران‌کننده افزایش رخداد آن در نیمه غربی ایران، پژوهش‌های متعددی انجام شده است که به نتایج ارزشمندی دست یافته‌اند. با این وجود برخی از پژوهشگران به بررسی این پدیده در این منطقه از بعد همدیدی (بابایی فینی و همکاران، ۱۳۹۵) یا ماهواره‌ای (جلیلیان، ۱۴۰۱) و یا روش آماری (محمودی

مه‌پاش، ۱۴۰۰) و یا ترکیب چند رویکرد و روش (عزیزی و همکاران، الف ۱۳۹۱؛ عزیزی و همکاران، ب ۱۳۹۱؛ شمسی‌پور، ۱۳۹۳) پرداخته‌اند که دوره آماری آن‌ها با زمان حال فاصله ۱۰ ساله و گاه‌آب بیشتری هم دارد درحالی‌که طی دهه اخیر وقوع رخداد گردوغبار و کاهش دید افقی محسوس‌تر شده که تبعات اجتماعی گاه‌آب‌فراگیر (تعطیلی مدارس و ادارات و ...) نیز داشته است. از این رو این پژوهش در راستای تکمیل تحقیقات پیشین در نظر دارد از آمار بلندمدت طولانی‌تری در مقایسه با پژوهش‌های سابق استفاده نماید و با استخراج فراوانی شدیدترین طوفان‌های گرد و غباری در این محدوده و محاسبات آماری و تحلیل همدیدی دو طوفان بسیار شدید، مکمل نتایج آنان باشد.

محدوده مورد مطالعه

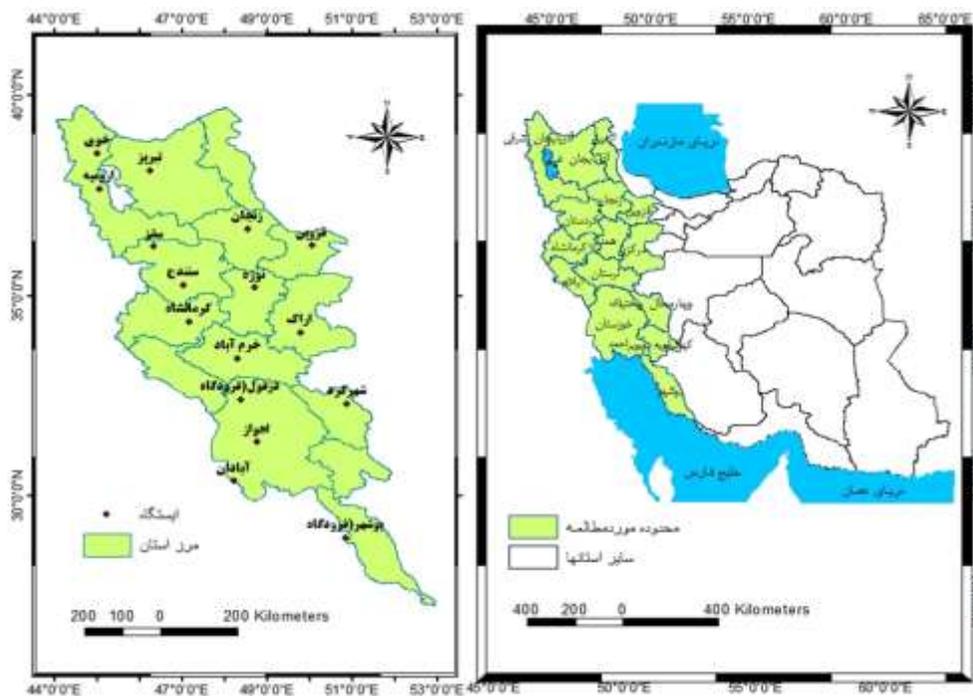
منطقه مورد مطالعه در این پژوهش شامل بخش وسیعی از غرب، شمال غرب و جنوب غرب ایران است که از استان‌های آذربایجان شرقی، آذربایجان غربی، اردبیل، زنجان، همدان، قزوین، کردستان، کرمانشاه، ایلام، لرستان، مرکزی، چهارمحال و بختیاری، خوزستان، بوشهر و کهگیلویه و بویراحمد را در بر می‌گیرد. این محدوده بین مختصات جغرافیایی ۲۸ تا ۳۹ درجه عرض شمالی و ۴۴ تا ۵۱ درجه طول شرقی قرار دارد (شکل ۱). منطقه مورد مطالعه از تنوع توپوگرافیک چشمگیری برخوردار است. ارتفاعات شمال غرب شامل ایستگاه‌های تبریز (۱۳۶۱ متر)، ارومیه (۱۳۲۸ متر) و خوی (۱۱۰۳ متر) که در دامنه‌های کوه‌های مرتفع واقع شده‌اند. مناطق کوهستانی غرب شامل ایستگاه‌های همدان (۱۶۷۹ متر)، سنندج (۱۳۷۳ متر)، کرمانشاه (۱۳۱۸ متر) و زنجان (۱۶۵۹ متر) که بخشی از زاگرس مرتفع محسوب می‌شوند. مناطق پست جنوب غرب شامل ایستگاه‌های آبادان (۶.۶ متر)، اهواز (۲۲/۵ متر) و بوشهر (۹ متر) که در جلگه خوزستان و سواحل خلیج فارس قرار دارند. فلات مرکزی شامل ایستگاه‌های اراک (۱۷۰۲ متر) و قزوین (۱۲۷۹ متر) که حد شرقی منطقه مورد مطالعه را تشکیل می‌دهند.

جدول (۱): برخی از مشخصات جغرافیایی ۱۶ ایستگاه منتخب نیمه غربی ایران

ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع m	دوره آماری	تعداد سال
آبادان	۴۸/۲۲	۳۰/۳۷	۶/۶	۱۹۵۱-۲۰۲۴	۷۴ سال
اراک	۴۹/۷۸	۳۴/۰۷	۱۷۰۲/۸	۱۹۵۱-۲۰۲۴	۷۴ سال
ارومیه	۴۵/۰۵۶	۳۷/۶۵۸	۱۳۲۸	۱۹۵۱-۲۰۲۴	۷۴ سال
اهواز	۴۸/۷۴	۳۱/۳۴	۲۲/۵	۱۹۵۱-۲۰۲۴	۷۴ سال
بوشهر (فرودگاه)	۵۰/۸۲	۲۸/۹۶	۹	۱۹۵۱-۲۰۲۴	۷۴ سال
تبریز	۴۶/۲۳۴	۳۸/۱۲۲	۱۳۶۱	۱۹۵۱-۲۰۲۴	۷۴ سال
خرم‌آباد	۴۸/۲۹	۳۳/۴۳	۱۱۴۷/۸	۱۹۵۱-۲۰۲۴	۷۴ سال

کرمانشاه	۴۷/۱۵	۳۴/۳۵	۱۳۱۸/۵	۱۹۵۱-۲۰۲۴	۷۴ سال
زنجان	۴۸/۵۲۲	۳۶/۶۶	۱۶۵۹/۴	۱۹۵۵-۲۰۲۴	۷۰ سال
شهرکرد	۵۰/۸۴	۳۲/۲۹	۲۰۴۸/۹	۱۹۵۵-۲۰۲۴	۷۰ سال
قزوین	۵۰/۰۴۵	۳۶/۲۴۵	۱۲۷۹/۱	۱۹۵۹-۲۰۲۴	۶۶ سال
خوی	۴۴/۹۹	۳۸/۵۶	۱۱۰۳/۴	۱۹۵۹-۲۰۲۴	۶۶ سال
سنندج	۴۷/۰۱۵	۳۵/۲۵۵	۱۳۷۳/۴	۱۹۶۰-۲۰۲۴	۶۵ سال
سقز	۴۶/۳۱۱	۳۶/۲۲۱	۱۵۲۲/۸	۱۹۶۱-۲۰۲۴	۶۴ سال
دزفول (فرودگاه)	۴۸/۳۸	۳۲/۳۹	۱۴۳	۱۹۵۱-۲۰۱۳	۵۴ سال
نوژه	۴۸/۶۹	۳۵/۱۹	۱۶۷۹/۷	۱۹۵۱-۲۰۱۳	۵۴ سال

در انتخاب ایستگاه‌های منطقه، شرط اصلی احراز دوره آماری بلندمدت بود (جدول ۱). علاوه بر این، ایستگاه‌های مورد مطالعه به گونه‌ای به دقت انتخاب شده‌اند تا تمامی محدوده ارتفاعی از ۶ متر (آبادان) تا ۲۰۴۸ متر (شهرکرد) را پوشش دهند، نماینده‌ای از تمامی سیستم‌های اقلیمی منطقه باشند، مناطق مرزی و مرکزی را به طور همزمان پوشش دهند و نزدیک به کانون‌های گردوغبار داخلی و خارجی قرار داشته باشند. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه و پراکنش ایستگاه‌های منتخب را نشان می‌دهد.



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه در ایران و پراکنش فضایی ایستگاه‌های منتخب

به لحاظ ویژگی‌های اقلیمی، این منطقه از تنوع اقلیمی قابل توجهی برخوردار است. مناطق مرتفع شمال غرب و غرب (همدان، سنندج، زنجان) دارای اقلیم نیمه‌خشک و سرد، مناطق جنوب غرب (اهواز، آبادان، دزفول) دارای اقلیم گرم و خشک، برخی مناطق کوهستانی زاگرس دارای اقلیم مدیترانه‌ای و بخش‌هایی از استان‌های اردبیل و آذربایجان شرقی دارای اقلیم نیمه‌مرطوب هستند.

مطالعه گردوغبار در این منطقه به لحاظ مجاورت با کانون‌های گردوغبار (نزدیکی به بیابان‌های عراق، سوریه و عربستان سعودی)، تنوع ارتفاعی (تأثیر مستقیم بر الگوی پراکنش گردوغبار)، وجود سیستم‌های بادی منطقه‌ای (شامل بادهای شمال غربی (شمال)، بادهای غربی (شمال غرب) و بادهای جنوب غربی (خوزستان)) و تأثیر بر مراکز جمعیتی (قرارگیری بسیاری از کلان‌شهرهای غرب کشور در این منطقه) اهمیت فراوانی دارد. این تنوع جغرافیایی و اقلیمی باعث شده است که منطقه غرب و جنوب غرب ایران به‌عنوان یکی از حساس‌ترین مناطق کشور در برابر پدیده گردوغبار محسوب شود. مطالعه این منطقه می‌تواند به درک بهتر مکانیسم‌های تشکیل، انتقال و اثرات گردوغبار در مقیاس منطقه‌ای کمک شایانی کند.

داده و روش تحقیق

در پژوهش حاضر، ترکیبی از روش‌های همدیدی و آماری استفاده گردید و دوره آماری داده‌های مورد نیاز طولانی‌تر از پژوهش‌های پیشین است و یک دوره بلندمدت ۷۴ ساله از ۱۹۵۱ تا ۲۰۲۴ را پوشش می‌دهد. در بخش آماری ابتدا داده سه‌ساعته متغیرهای دید افقی (VV)، وضعیت کنونی هوا (ww) و سمت (dd) و سرعت باد (ff) از هواشناسی کشور دریافت شد. سپس همه کدهای مربوط به گردوغبار استخراج و برداشت‌های گرد و غباری با دید افقی برابر صفر و سرعت باد حداقل ۱۵ متر بر ثانیه از داده‌ها جدا شده و به‌عنوان روز طوفان گرد و غباری بسیار شدید تعیین گردید. در ادامه محاسبات موردنیاز بر روی داده‌ها انجام شد و نتایج اولیه در قالب نمودار، نقشه و جدول ترسیم و ارائه گردید. سایر محاسبات آماری در نرم‌افزار SPSS22 انجام گرفت و برای محاسبه همبستگی بین رخداد طوفان شدید گردوغبار ایستگاه‌های محدوده مورد مطالعه با مشخصات جغرافیایی آن‌ها از روش پیرسون استفاده شد. برای تحلیل الگوی جوی مولد گرد و غبار بسیار شدید در غرب ایران از داده‌های روزانه SLP و دمای سطح زمین، HGT، باد مداری و نصف‌النهاری (Uwnd و Vwnd) و رطوبت نسبی تراز میانی جو در فرمت NetCDF از تارنمای NCEP-NCAR دریافت شد و نقشه‌های سینوپتیکی در محیط OpenGrADS2.2.1.oga.1 ترسیم گردید.

همچنین برای شناسایی کانون و چشمه گرد و غبار طوفان‌ها از محصول گرد و غبار MERRA-2 (M2T1NXAER) (v5.12.4) استفاده شد. M2T1NXAER یک مجموعه داده دویبعدی با میانگین زمانی ساعتی در تحلیل گذشته‌نگر Modern-Era برای نسخه دوم تحقیق و کاربردها (MERRA-2) است. این مجموعه شامل تشخیص آئروسول

جذب شده، مانند چگالی جرم ستونی اجزای آئروسول (کربن سیاه، گرد و غبار، نمک دریا، سولفات و کربن آلی)، غلظت جرم سطحی اجزای آئروسول و ضخامت نوری آئروسول (AOT) در طول موج ۵۵۰ نانومتر است. MERRA-2 آخرین نسخه بازتحلیل جو جهانی برای ماهواره Era است که توسط اداره جهانی مدل سازی و همگون سازی ناسا^۱ (GMAO) با استفاده از مدل سیستم رصد زمین گودارد^۲ (GEOS) نسخه ۵.۱۲.۴ تولید شده است و قدرت تفکیک افقی آن ۰/۶۲۵ * ۰/۵ درجه است.

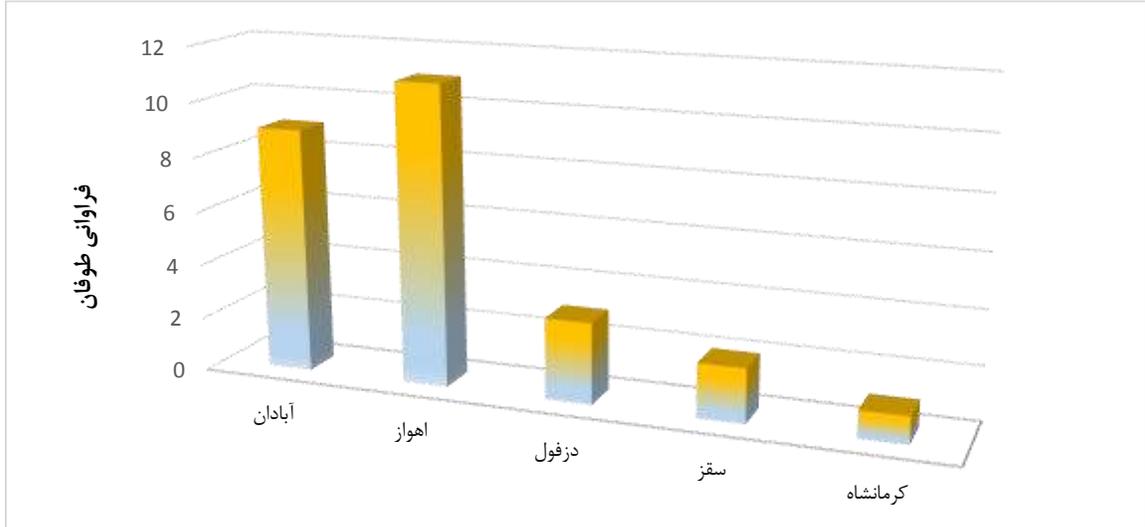
یافته‌های تحقیق

فراوانی ایستگاهی روزهای دارای طوفان گرد و غباری بسیار شدید با دید صفر

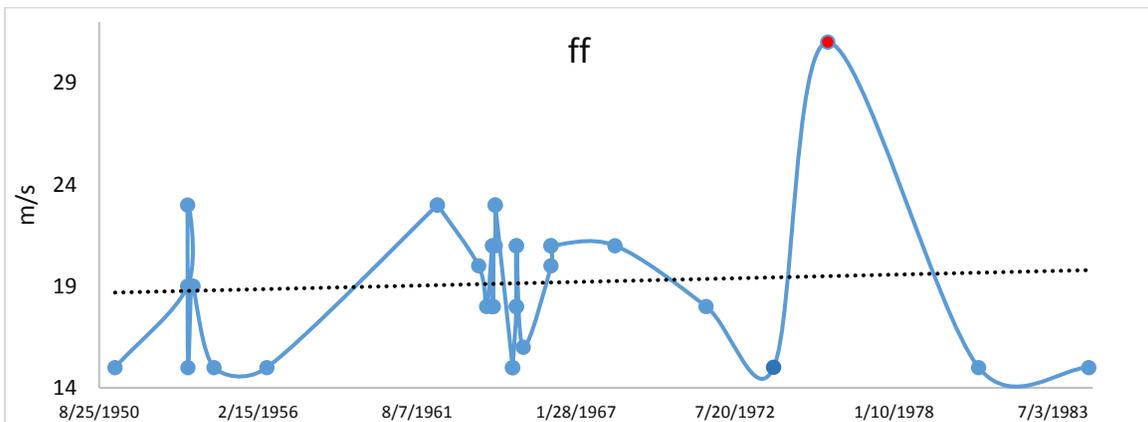
بررسی همزمان داده سینوپ سه متغیر دید افقی، وضعیت کنونی هوا و سرعت باد حداقل ۱۵ متر بر ثانیه در ۱۶ ایستگاه سینوپتیک نیمه غربی ایران طی دوره بلندمدت ۷۴ ساله (۱۹۵۱-۲۰۲۴) نشان داد در کل در ۳۶ برداشت که طوفان گرد و غباری شدید رخ داده، دید افقی به صفر رسیده است. این ۳۶ برداشت در ۲۴ روز (مطابق جدول ۲ و شکل ۳) ثبت شده است که حاکی از آن است این شرایط حاد و بحرانی در برخی ایستگاه‌ها گاهاً بیش از ۷ ساعت تداوم داشته است (مانند طوفان روز ۱۲ مارس ۱۹۶۴، ۱۷ آوریل ۱۹۶۴ و ۱۹ مارس ۱۹۶۶ در اهواز). از بین ایستگاه‌های مورد مطالعه تنها در ۵ ایستگاه این وضعیت غیرمتعارف جوی ثبت شده است که شامل ایستگاه‌های اهواز، آبادان، دزفول (فرودگاه)، سقز و کرمانشاه می‌باشد. فراوانی این روزهای مخاطره‌آمیز در ایستگاه‌های مذکور به ترتیب ۱۱، ۹، ۳، ۲ و ۱ روز محاسبه شد (شکل ۲). در سایر ایستگاه‌های محدوده مورد مطالعه هرچند دید افقی کمتر از ۱۰۰۰ و حتی ۵۰ متر ثبت شده است اما تاکنون دید صفر ناشی از گرد و غبار مشاهده نشده است.

1 NASA Global Modeling and Assimilation Office (GMAO)

2 Goddard Earth Observing System Model (GEOS)



شکل (۲): فراوانی روزهای گرد و غباری شدید با دید افقی صفر در ایستگاه‌های نیمه غربی ایران



شکل (۳): سری زمانی رخداد طوفان گرد و غباری بسیار شدید نیمه غربی ایران و سرعت آن‌ها

جدول (۲) اطلاعات جزئی‌تری را درباره ۲۴ مورد طوفان گرد و غباری بسیار شدید در نیمه غربی ایران ارائه می‌دهد. ایستگاه آبادان و اهواز بیشترین تأثیر را از این پدیده پذیرفته‌اند. الگوی زمانی طوفان‌ها نشان می‌دهد که بیشترین وقایع در بازه زمانی ۱۹۵۱ تا ۱۹۷۷ رخ داده‌اند، ماه‌های مارس و سپتامبر بیشترین فراوانی را داشته‌اند و ساعت ۹ تا ۱۵ به وقت محلی اوج فعالیت طوفان‌ها بوده است. تحلیل ویژگی‌های باد نیز مبین آن است که سرعت باد بین ۱۵ تا ۳۱ متر بر ثانیه متغیر بوده (شکل ۳)، بیشترین سرعت ثبت شده برای این طوفان‌ها مربوط به کرمانشاه با ۳۱ متر بر ثانیه در ۳۰ سپتامبر ۱۹۷۵ بوده است. سرعت‌های بالای ۲۰ متر بر ثانیه نیز عمدتاً در اهواز و آبادان مشاهده شده‌اند. طوفان ۱۲ مارس ۱۹۶۴،

۱۷ آوریل ۱۹۶۴ و ۱۹ مارس ۱۹۶۶ همگی در اهواز که در سه نوبت زمانی ثبت شده از جمله مشاهدات خاص است. این داده‌ها نشان می‌دهد که ایستگاه‌های جنوب غربی بیشترین آسیب‌پذیری را داشته‌اند. الگوی کلی ساعتی داده‌های ۷۴ ساله نشان می‌دهد طوفان‌های گرد و غباری شدید در ساعات خاصی از روز رخ داده‌اند. اوج فعالیت بین ساعات ۹ تا ۱۵ به وقت محلی (در ۶۶٪ موارد) و کمینه فعالیت در ساعات شبانه (۲۱ تا ۳ صبح) با تنها ۸٪ موارد می‌باشد. تحلیل ایستگاه‌به‌ایستگاه نشان می‌دهد آبادان در ۷۷٪ طوفان‌ها بین ساعات ۹ تا ۱۵ رخ داده‌اند که دلیل آن تشدید بادهای شمال غربی در اثر گرمایش روزانه خلیج فارس است. اهواز الگوی دوقلوی اوج در ساعات ۹-۱۲ و ۱۵-۱۲، دارد و حدود ۶۶٪ طوفان‌ها بین ۱۲ تا ۱۵ رخ داده است اما طوفان‌های ۸ و ۱۹۶۵/۰۱/۰۹ و ۱۹۸۰/۱۲/۱۱ استثنا است که در ساعات ۳ تا ۱۲ به وقوع پیوسته‌اند. از جمله عوامل مؤثر بر الگوی ساعتی می‌تواند گرمایش روزانه سطح زمین باشد که ناپایداری جو در ساعات بعدازظهر را افزایش داده و جریانات همرفتی را تشدید می‌کند. تغییرات روزانه بادهای محلی عامل دیگری است که تقویت بادهای شمال غربی در بعدازظهر و تغییر جهت بادهای دریایی در سواحل ناشی از آن است. ویژگی‌های توپوگرافیک و اثرات دره‌ای در مناطق کوهپایه‌ای نیز می‌تواند سرعت باد را در ساعات خاص در گذرگاه‌ها تشدید کند. این تحلیل نشان می‌دهد که اگرچه بیشتر طوفان‌ها در بعدازظهر رخ می‌دهند، اما ویژگی‌های محلی هر ایستگاه می‌تواند الگوی ساعتی خاصی ایجاد کند. تغییرات سرعت و جهت باد در ایستگاه‌های مختلف نشان‌گر تأثیر عوامل محلی و توپوگرافی منطقه است. در ادامه جزئیات بیشتری از این طوفان‌ها تشریح می‌شود.

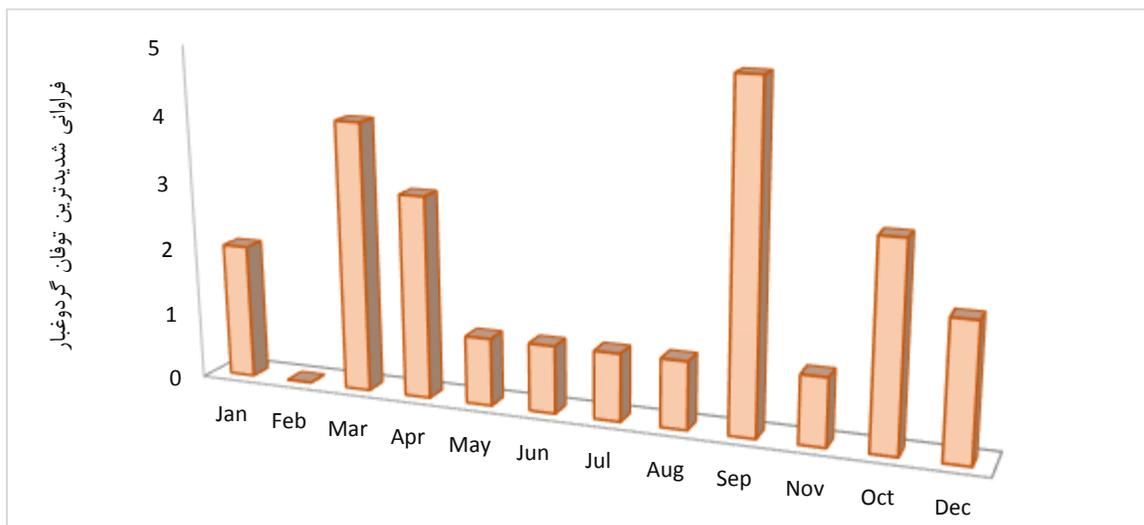
جدول (۲): مشخصات روزهای طوفان گرد و غباری بسیار شدید رخ داده در نیمه غربی ایران طی دوره ۷۴ ساله مورد مطالعه

سرعت باد	سمت باد	ایستگاه متأثر	ساعت برداشت							تاریخ رخداد	ردیف	
			۲۱	۱۸	۱۵	۱۲	۹	۶	۳			۰
۱۵	۳۱۰	آبادان								*	۱۹۵۱/۰۳/۱۳	۱
۲۳	۱۹	۳۳۰	۳۳۰	آبادان			*	*			۱۹۵۳/۰۹/۱۰	۲
۱۵	۳۳۰	آبادان					*				۱۹۵۳/۰۹/۱۶	۳
۱۹	۵۰	آبادان						*			۱۹۵۳/۱۰/۲۵	۴
۱۹	۲۰۰	آبادان					*				۱۹۵۳/۱۱/۱۸	۵
۱۵	۳۴۰	آبادان					*				۱۹۵۴/۰۸/۰۹	۶
۱۵	۳۱۰	آبادان				*					۱۹۵۶/۰۶/۰۴	۷
۲۳	۲۳	۳۶۰	۳۶۰	اهواز		*	*				۱۹۶۲/۰۴/۲۰	۸
۲۰	۲۷۰	سقز					*				۱۹۶۳/۰۹/۲۱	۹
۱۸	۹۰	دزفول (فرودگاه)			*						۱۹۶۳/۱۲/۳۰	۱۰
۱۸	۱۸	۱۸۰	۱۸۰	۱۸۰	اهواز		*	*	*		۱۹۶۴/۰۳/۱۲	۱۱
۲۱	۱۸	۹۰	۹۰	اهواز		*	*				۱۹۶۴/۰۳/۲۵	۱۲

۲۳	۲۳	۲۱	۹۰	۹۰	۹۰	اهواز				*	*	*			۱۹۶۴/۰۴/۱۷	۱۳
۱۵	۱۵		۱۳۰	۱۳۰		اهواز			*	*					۱۹۶۴/۱۱/۲۱	۱۴
۲۱	۱۸		۱۵۰	۱۵۰		اهواز				*	*				۱۹۶۵/۰۱/۰۸	۱۵
۲۱	۱۸		۱۵۰	۱۵۰		اهواز					*	*			۱۹۶۵/۰۱/۰۹	۱۶
۱۶			۳۰۰			آبادان			*						۱۹۶۵/۰۴/۰۳	۱۷
۲۱	۲۱	۲۰	۹۰	۹۰	۹۰	اهواز			*	*	*				۱۹۶۶/۰۳/۱۹	۱۸
۲۱			۲۷۰			اهواز			*						۱۹۶۸/۰۵/۳۱	۱۹
۱۸			۲۰۰			سقز			*						۱۹۷۱/۰۷/۲۳	۲۰
۱۵			۳۳۰			آبادان				*					۱۹۷۳/۱۱/۱۸	۲۱
۳۱			۱۱۰			کرمانشاه				*					۱۹۷۵/۰۹/۳۰	۲۲
۱۵			۱۶۰			اهواز					*				۱۹۸۰/۱۲/۱۱	۲۳
۱۵			۳۰			اهواز			*						۱۹۸۴/۰۹/۲۶	۲۴

فراوانی تجمعی ماهانه روزهای دارای طوفان گرد و غباری بسیار شدید با دید صفر

فراوانی تجمعی ماهانه روزهای گرد و غباری شدید در نیمه غربی ایران طی دوره مورد مطالعه که در آن‌ها با دید افقی صفر و سرعت باد حداقل ۱۵ متر در ثانیه بوده است (که تنها در ۵ ایستگاه مشاهده شد)، در شکل (۴) آورده شده است. نتایج تحلیل این داده‌ها به شناسایی الگوی فصلی آشکار، توزیع نامتقارن در نیمه گرم سال، وجود ناهنجاری قابل توجه در برخی ماه‌ها و نکات مدیریتی اشاره دارد که در زیر تشریح می‌شوند. بیشترین فراوانی در ماه‌های سپتامبر (۵ روز) و مارس (۴ روز) مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده فعالیت شدید گردوغبار در دوره‌های گذار فصلی است. این الگوی دوقلوی اوج و دو نقطه اوج (مارس و سپتامبر (اسفند و شهریور)) که در توزیع مجموع فراوانی ماهانه مشاهده می‌شود، ممکن است نشان‌دهنده تأثیر همزمان دو مکانیسم فعالیت بادهای فصلی (مطابق یافته‌های Wang et al., 2020) و خشکی سطح خاک پس از پایان بارش‌های زمستانی و تابستانی باشد. اوج ثانویه بیشترین تعداد روزهای گرد و غباری شدید در ماه سرد مارس مشاهده شده است. این الگو با مطالعات مشابه در منطقه مانند پژوهش‌های الدوساری و همکاران (۲۰۱۷) که افزایش فعالیت گردوغبار را در دوره‌های انتقالی فصلی گزارش کرده‌اند، همخوانی دارد. ماه فوریه با صفر روز، کمترین میزان گردوغبار شدید را تجربه کرده است که احتمالاً با سرکوب معمول فعالیت گرد و غبار به دلیل رطوبت بالاتر و بارندگی مکرر در ماه‌های زمستان سازگار است (Zoljoodi et al, 2013) و نیز به دلیل شرایط پایدار جوی و بارش‌های زمستانی است (Middleton, 2019). این‌ها نشانه وجود الگوی فصلی آشکار است.

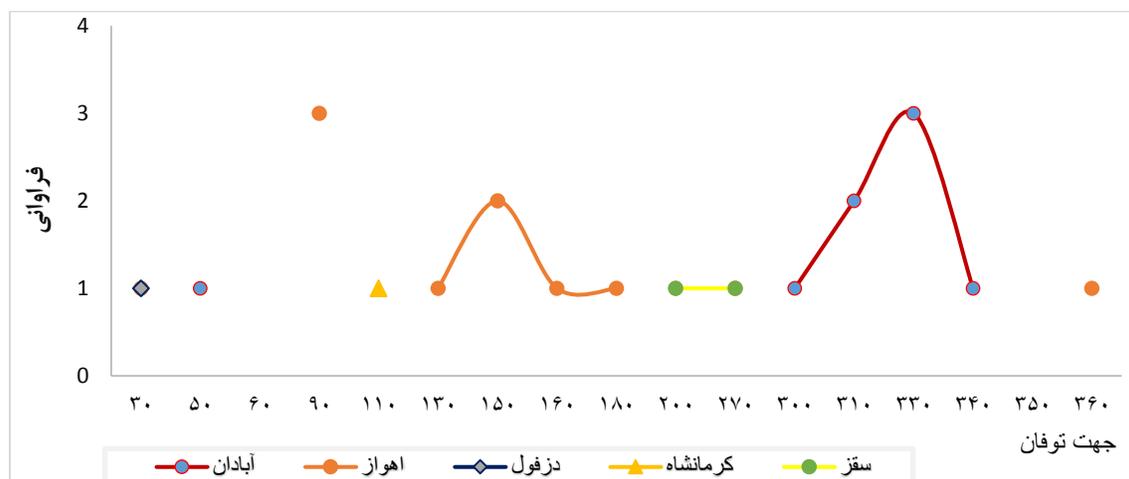


شکل (۴): فراوانی تجمعی ماهانه روزهای گرد و غباری شدید با دید افقی صفر

در ماه‌های ژوئن تا اوت (خرداد تا مرداد) با وجود گرم بودن هوا، فراوانی نسبتاً پایین است (۱ طوفان) و حاکی از توزیع نامتقارن در نیمه گرم سال می‌باشد. با وجود انتظار برای افزایش گردوغبار در ماه‌های گرم، داده‌ها نشان می‌دهد که آوریل (۳ طوفان) نسبت به خرداد (۱ طوفان) و تیر (۱ طوفان) فراوانی بیشتری دارد که احتمالاً به دلیل وزش بادهای شدید بهاری است (Goudie & Middleton, 2006). همچنین این الگو ممکن است ناشی از کاهش سرعت بادهای منطقه‌ای در اوج گرمای تابستان باشد زیرا غلبه سیستم‌های کم‌فشار حرارتی سرعت باد را کاهش می‌دهند و نیز ورود رطوبت از خلیج فارس باعث کاهش بلند شدن ذرات گرد و غبار می‌شود (Rashki et al., 2015). ماه سپتامبر که با ۵ روز گرد و غباری بسیار شدید، یک قله غیرمنتظره را نشان می‌دهد، نیاز به بررسی بیشتر دارد. این یافته با مطالعات منطقه‌ای الحمود^۱ و همکاران (۲۰۲۰) که نشان می‌دهد الگوهای باد شمال در این دوره‌ها به‌طور ویژه‌ای قوی هستند، همسو است. اوج ثانویه بهاری که شامل ۳ رویداد در آوریل و ۴ رویداد در مارس است، منعکس‌کننده تأثیر ترکیبی سیستم‌های جبهه‌ای مرتبط با سیکلون‌های مدیترانه‌ای و شرایط خشک پیش از موسمی در بین‌النهرین است (Yu et al., 2015). تفاوت محسوس بین اکتبر (۳ طوفان) و نوامبر (۱ طوفان) نیز جلب توجه می‌کند که ناهنجاری قابل توجهی است. پیامدهای مدیریتی که این داده‌ها به آن اشاره دارد عبارت است از: در ماه‌های مارس و سپتامبر که به‌عنوان بحرانی‌ترین دوره‌ها شناسایی شدند، نیاز به تقویت سیستم‌های هشدار سریع در این ماه‌ها احساس می‌شود و نیز برنامه‌ریزی برای کاهش اثرات آن بر سلامتی و بهداشت در این بازه‌های زمانی ضروری است.

سمت وزش طوفان‌های گرد و غباری بسیار شدید با دید افقی صفر

فراوانی جهت وزش این طوفان‌ها (شکل ۵) نشان می‌دهد که بیش از نیمی از این طوفان‌ها منشأ خارجی دارند. از بررسی الگوی کلی فراوانی جهت طوفان‌های گرد و غباری در نیمه غربی ایران نکات زیر قابل دریافت است: جهت‌های غالب باد در اکثر ایستگاه‌ها بین ۲۷۰ تا ۳۶۰ درجه (غربی تا شمال غربی) است که نشان‌دهنده منشأ غربی و شمال غربی گردوغبارها می‌باشد.



شکل (۵): فراوانی سمت وزش طوفان‌های گرد و غباری بسیار شدید با دید افقی صفر

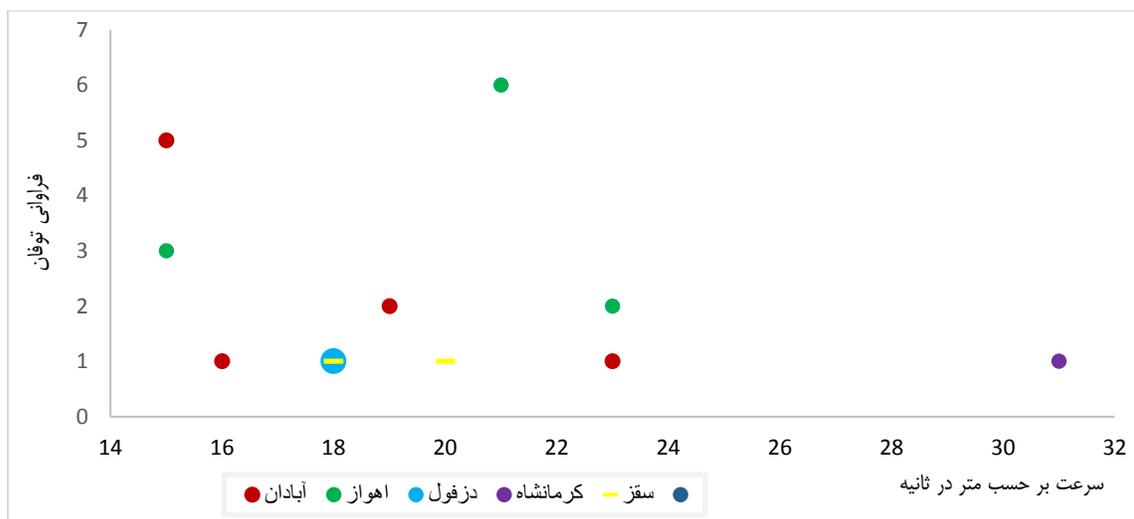
در آبادان و اهواز، بادهای با جهت ۳۰۰ تا ۳۶۰ درجه (شمال غربی تا شمالی) بیشترین فراوانی را دارند. بر اساس نزدیکی به کانون‌های گردوغبار، ایستگاه‌ها در دو دسته قرار می‌گیرند: الف) ایستگاه‌های نزدیک به مرز غربی (آبادان، اهواز، دزفول) که جهت‌های ۳۰۰-۳۶۰ درجه طوفان‌های گردوغبار بسیار شدید در ایستگاه‌ها نشان می‌دهد منشأ گردوغبارها عمدتاً از مناطق غربی (عراق و سوریه) است. وجود طوفان‌های گرد و غباری بسیار شدید با جهت ۳۰-۹۰ درجه در اهواز و ۳۰ درجه در دزفول نشان‌دهنده تأثیر احتمالی کانون‌های جنوب شرقی در برخی موارد است. در دزفول تنها جهت ۳۰ درجه ثبت شده که نیاز به بررسی بیشتر دارد. ب) ایستگاه‌های شمال غربی (کرمانشاه و سقز) که در سقز، جهت‌های ۲۷۰-۲۰۰ درجه نشان‌گر منشأ جنوب غربی گردوغبارها می‌باشد. در حالی که احتمالاً مناطق جنوب غربی بیشتر تحت تأثیر کانون‌های فرامرزی (عراق و سوریه) هستند. مناطق شمال غربی ممکن است تحت تأثیر کانون‌های محلی و فرامحلی قرار گیرند.

سرعت وزش طوفان‌های گرد و غباری بسیار شدید با دید افقی صفر

بررسی سرعت طوفان‌های گرد و غباری بسیار شدید با دید افقی صفر (شکل ۶) نشان‌دهنده تنوع منطقه‌ای قابل توجه در سرعت‌های باد همراه با طوفان‌های گرد و غباری شدید (با دید افقی صفر) در مناطق مختلف غرب ایران است که در ادامه به بررسی ایستگاهی این رخداد می‌پردازیم. بیشترین فراوانی طوفان‌های بسیار شدید در ایستگاه‌های اهواز (۱۱) مورد) و آبادان (۹ مورد) ثبت شده است و سرعت‌های فرین بسیار بالا (۳۱ متر بر ثانیه) فقط در ایستگاه کرمانشاه ثبت شده است. سایر طوفان‌ها در محدوده سرعتی ۱۵ و ۲۳ متر بر ثانیه رخ داده است که نشان‌دهنده شرایط جوی خاص مورد نیاز برای تشکیل این پدیده است.

ایستگاه آبادان بیشترین فراوانی طوفان‌های گرد و غباری بسیار شدید را با سرعت ۱۵ متر بر ثانیه (۵ طوفان) تجربه کرده است. این نتایج با مطالعات سبحانی و همکاران (۱۳۹۹) که آبادان را به‌عنوان یکی از کانون‌های اصلی گردوغبار در ایران معرفی کرده‌اند، همخوانی دارد. این ایستگاه همچنین شاهد طوفان‌هایی با سرعت‌های ۱۶ (۱ مورد)، ۱۹ (۲ مورد) و ۲۳ متر بر ثانیه (۱ مورد) بوده که نشان‌دهنده تنوع سیستم‌های بادی مؤثر بر این منطقه است. ایستگاه اهواز الگوی متفاوتی را نشان می‌دهد. در این ایستگاه، بیشتر طوفان‌ها با سرعت‌های ۲۱ متر بر ثانیه (۶ مورد) و ۲۳ متر بر ثانیه (۲ مورد) ثبت شده‌اند. اهواز همچنین ۳ مورد طوفان با سرعت ۱۵ متر بر ثانیه را ثبت کرده است. ایستگاه دزفول تنها یک مورد طوفان با سرعت ۱۸ متر بر ثانیه را ثبت کرده‌اند. این نتایج نشان می‌دهد که این مناطق کمتر تحت تأثیر طوفان‌های بسیار شدید قرار می‌گیرند. تقریباً در نیمه شرقی محدوده و در ۱۱ ایستگاه محدوده هیچ طوفان گرد و غباری بسیار شدیدی ثبت نشده است. مطالعه سبحانی و همکاران (۱۳۹۹) نیز به نادر بودن طوفان‌های شدید در شماری از ایستگاه‌های غرب ایران اشاره کرده است. در کرمانشاه، یک طوفان با سرعت بسیار بالا (۳۱ متر بر ثانیه) ثبت شده است. این یافته نشانگر وقوع طوفان‌های ناگهانی و شدید در غرب ایران است. همچنین، وقوع طوفان‌هایی با سرعت‌های بالا در این منطقه می‌تواند نشان‌دهنده تأثیر سیستم‌های جوی خاص باشد. ایستگاه سقز ۲ رخداد طوفانی با سرعت ۲۰ و ۱۸ متر بر ثانیه را تجربه نموده است.

یافته‌های این پژوهش حاکی از آن است که مناطق اهواز و آبادان با داشتن ۱۱ و ۹ رخداد طوفان گردوغبار بسیار شدید، بیشترین آسیب‌پذیری را دارند. این یافته‌ها با مطالعات پیشین که این مناطق را به‌عنوان کانون‌های اصلی گردوغبار در ایران معرفی کرده‌اند، مطابقت کامل دارد (Al-Hemoud et al., 2020). همچنین این تحلیل نشان می‌دهد که اگرچه طوفان‌های گرد و غباری بسیار شدید در حدود یک‌سوم از ایستگاه‌های مورد مطالعه نیمه غربی ایران رخ می‌دهند، اما ویژگی‌های آن‌ها به شدت تحت تأثیر شرایط محلی قرار دارد. مناطق جنوب غربی (آبادان و اهواز) بیشترین فراوانی این پدیده را تجربه می‌کنند، در حالی که در مناطق دیگر این پدیده کمتر و با سرعت‌های متفاوتی رخ می‌دهد. این تفاوت‌های قابل توجه در الگوی سرعت‌ها بین ایستگاه‌های مختلف نشان‌دهنده تأثیر عوامل محلی و توپوگرافی منطقه است.



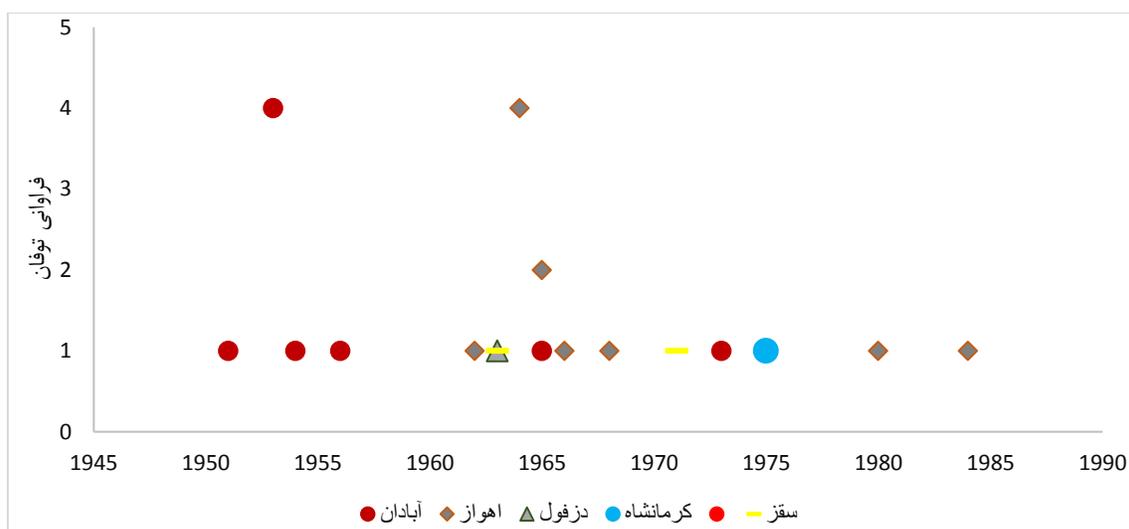
شکل (۶): فراوانی سرعت وزش طوفان‌های گرد و غباری بسیار شدید با دید افقی صفر

فراوانی وقوع شدیدترین طوفان‌های گرد و غباری در سال‌های مورد مطالعه

تحلیل زمانی و روند تغییرات فراوانی وقوع شدیدترین طوفان‌های گرد و غباری در سال‌های مورد مطالعه (شکل ۷) نشان می‌دهد که طوفان‌های گرد و غباری بسیار شدید در نیمه غربی ایران از الگوی زمانی منظمی پیروی نمی‌کنند. سال‌های ۱۹۵۳، ۱۹۶۳، ۱۹۶۴ به‌عنوان سال‌های اوج به ترتیب با ۴، ۴ و ۳ مورد بیشترین فراوانی وقوع را داشته‌اند. این سال‌ها احتمالاً با شرایط اقلیمی خاصی مانند خشکسالی‌های شدید یا الگوهای جوی غیرعادی همراه بوده‌اند. بین سال‌های ۱۹۵۶ تا ۱۹۶۲ وقوع کمتری مشاهده می‌شود و بعد از بازه زمانی تا انتهای دوره طوفان گرد و غباری بسیار شدید با دید افقی صفر متر مشاهده نشده است. مطالعات علیزاده و همکاران (۱۴۰۰) نیز به این نوسانات زمانی در وقوع طوفان‌های گرد و غباری اشاره کرده‌اند. تحلیل مکانی و جغرافیایی نیز حاکی از آن است که ایستگاه‌های اهواز و آبادان به ترتیب با ۱۱ و ۹ مورد بیشترین سهم را در وقوع طوفان‌های بسیار شدید داشته‌اند. این یافته با پژوهش رشکی و همکاران (۲۰۱۵) که این مناطق را به‌عنوان کانون‌های اصلی گردوغبار معرفی کرده‌اند، همخوانی دارد. در مقابل، ایستگاه‌های دزفول، کرمانشاه و سقز هر کدام حداکثر ۲-۱ مورد طوفان بسیار شدید را تجربه کرده‌اند. سایر ایستگاه‌های مورد مطالعه از این نظر جز مناطق کم‌خطر دسته‌بندی می‌شوند.

تحلیل ایستگاه‌های شاخص: اهواز به‌عنوان فعال‌ترین ایستگاه با ۱۱ مورد طوفان بسیار شدید در رتبه اول قرار دارد. این ایستگاه در سال‌های ۱۹۶۴ (۴ مورد) و ۱۹۶۵ (۲ مورد) در معرض این پدیده حدی قرار داشته است. موقعیت جغرافیایی اهواز در جلگه خوزستان و نزدیکی به کانون‌های گردوغبار عراق، این منطقه را به یکی از آسیب‌پذیرترین نقاط تبدیل

کرده است. آبادان با ۹ مورد طوفان بسیار شدید در رتبه دوم قرار می‌گیرد. این ایستگاه که در ارتفاع بسیار پایین (۶/۶ متر) واقع شده، در سال‌های ۱۹۵۳ (۴ مورد) بیشترین فعالیت طوفان گردوغبار را تجربه کرده است. این یافته با نتایج مطالعاتی که حساسیت مناطق پست به گردوغبار را تأیید می‌کنند (لشگری و کیخسروی، ۱۳۸۷؛ Prospero et al. 2002; Goudie & Middleton, 2006; Zoljoodi et al. 2013; Rashki et al. 2015; Al-Dousari et al. 2017) دارد و نیز احتمالاً با شرایط خشکسالی شدید آن سال مرتبط است (Al-Dousari et al., 2017).

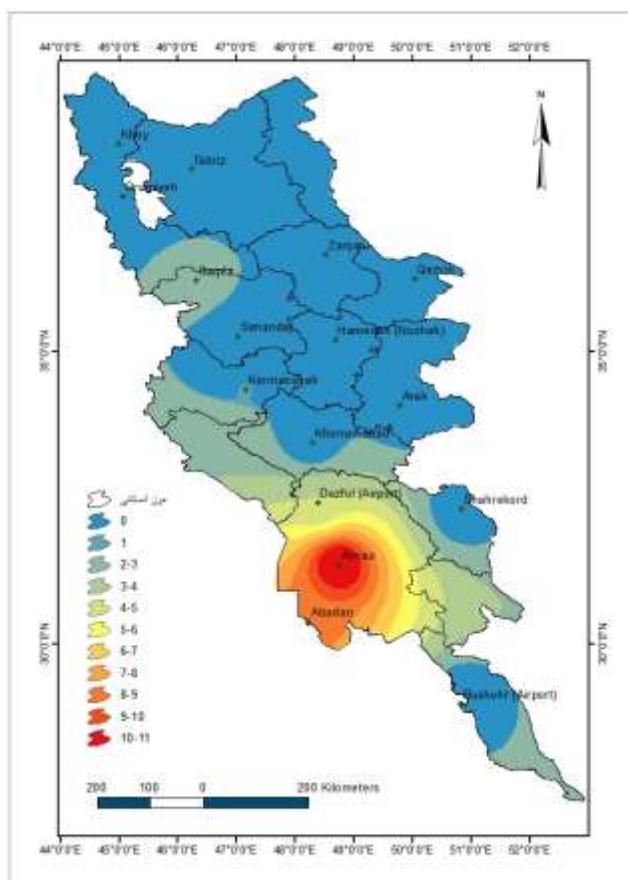


شکل (۷): فراوانی سالانه رخداد طوفان‌های گرد و غباری بسیار شدید با دید افقی صفر

توزیع فضایی فراوانی شدیدترین طوفان‌های گرد و غباری با دید افقی صفر

نتایج تحلیل فضایی داده‌های ایستگاه‌های منتخب نیمه غربی ایران (شکل ۸) و انطباق آن با ارتفاع ایستگاه‌ها نشان‌دهنده الگوی ارتفاعی مشخصی در توزیع مکانی پدیده گردوغبار شدید با دید افقی صفر است: اهواز و آبادان به‌عنوان نقاط بحرانی شناسایی شدند. اهواز با ۱۱ روز رکورددار بیشترین روزهای گرد و غباری است که نشان‌دهنده آسیب‌پذیری خاص این منطقه است. آبادان با ۸ روز در رتبه دوم قرار دارد که احتمالاً ناشی از نزدیکی به کانون‌های گردوغبار عراق است. ایستگاه‌های کم‌ارتفاع (زیر ۱۵۰ متر) شامل آبادان (۶/۶ متر)، اهواز (۲۲/۵ متر) و دزفول (۱۴۳ متر) بیشترین فراوانی گردوغبار بسیار شدید (به ترتیب ۸، ۱۱ و ۳ روز) را تجربه کرده‌اند. تمامی ایستگاه‌های با ارتفاع بالای ۱۱۰۰ متر (همچون اراک، همدان، سنندج و زنجان) هیچ مورد گردوغبار بسیار شدید گزارش نکرده‌اند. البته دو استثنا وجود دارد: سقز با ارتفاع ۱۵۲۲/۸ متر و ۲ روز گردوغبار بسیار شدید یک ناهنجاری محسوب می‌شود که نیاز به بررسی عوامل محلی دارد و کرمانشاه با ارتفاع ۱۳۱۸/۵ متر و ۱ روز گردوغبار بسیار شدید نیز از این الگو تبعیت نمی‌کند. از نظر

جغرافیایی توزیع بیشینه و کمینه به این نحو است: بیشترین فراوانی در مناطق جنوب غربی (استان خوزستان) با حداکثر فراوانی ۱۱ روز مشاهده می‌شود. مناطق شمال غربی (آذربایجان‌ها) و مرکزی (همدان، مرکزی، قزوین) بدون فراوانی روز طوفانی بسیار شدید هستند (میانگین صفر روز). از مطالب بالا می‌توان نتیجه گرفت که ارتفاع مهم‌ترین عامل کنترل‌کننده توزیع مکانی گردوغبار شدید در منطقه است. مناطق کم‌ارتفاع غرب و جنوب غرب کشور بیشترین آسیب‌پذیری را دارند. نزدیکی به کانون‌های گردوغبار بین‌المللی (عراق و عربستان) نقش مهمی در این الگو دارد.



شکل (۸): توزیع فضایی فراوانی شدیدترین طوفان‌های گرد و غباری با دید افقی صفر در نیمه غربی ایران

تحلیل همبستگی

به منظور بررسی رابطه خطی بین متغیرهای جغرافیایی و فراوانی طوفان‌ها، از تحلیل همبستگی پیرسون استفاده شد. نتایج تحلیل همبستگی پیرسون بین متغیرهای جغرافیایی و فراوانی روزهای گرد و غباری شدید با دید افقی صفر (جدول ۳) نشان‌دهنده روابط زیر است: بین عرض جغرافیایی و فراوانی شدیدترین طوفان گردوغبار با دید صفر همبستگی منفی

متوسط وجود دارد ($r = -0/50$ ، $p = 0/048$) و هر چه به عرض‌های جغرافیایی بالاتر می‌رویم، فراوانی گردوغبار کاهش می‌یابد (در سطح اطمینان ۹۵٪). بین ارتفاع ایستگاه با فراوانی شدیدترین طوفان گردوغبار با دید صفر همبستگی منفی قوی در سطح اطمینان ۹۹ درصد ($r = -0/683^{**}$ ، $p = 0/004$) مشاهده می‌شود. این رابطه معنادار نشان می‌دهد که با افزایش ارتفاع ایستگاه‌ها، فراوانی روزهای گرد و غباری به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. طول جغرافیایی با فراوانی گردوغبار ($r = 0/057$) هیچ رابطه معناداری نشان نمی‌دهد. بر اساس یافته‌های فوق می‌توان گفت ارتفاع ایستگاه قوی‌ترین پیش‌بینی‌کننده کاهش فراوانی گردوغبار است. ایستگاه‌های واقع در عرض‌های جغرافیایی بالاتر و ارتفاعات بیشتر، گردوغبار کمتری تجربه می‌کنند و طول جغرافیایی به‌تنهایی تأثیر معناداری بر فراوانی گردوغبار ندارد. پیامدهای کاربردی که این یافته‌ها به آن اشاره دارد این است که در برنامه‌ریزی برای ایستگاه‌های پایش گردوغبار، ارتفاع موقعیت یک عامل کلیدی است و مناطق کم‌ارتفاع‌تر در عرض‌های جغرافیایی پایین‌تر آسیب‌پذیری بیشتری در برابر پدیده گردوغبار دارند.

جدول (۳): همبستگی بین فراوانی شدیدترین طوفان گردوغبار با دید صفر با مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های منتخب نیمه غربی ایران

متغیر	فراوانی روز طوفانی شدید با دید صفر	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	ارتفاع
همبستگی	۱	-۰/۵۰۲*	۰/۰۵۷	-۰/۶۸۳**
فراوانی روز طوفانی شدید با دید صفر		۰/۰۴۸	۰/۸۳۳	۰/۰۰۴
تعداد زوج داده	۱۶	۱۶	۱۶	۱۶
Sig.				

الگوهای طوفان‌های گرد و غباری بسیار شدید

بررسی آرایش و توپوگرافی تراز میانی جو ۲۴ روز طوفانی نشان داد که عامل سینوپتیکی اصلی در وقوع ۲۰ طوفان، جایابی فرود مدیترانه و عارضه وابسته به آن (سردچال جوی) در نواحی شرقی‌تر و در ۴ طوفان استقرار فراز مانع و بریده پراارتفاع بر روی ایران یا غرب آن بوده است. بررسی نقشه فشار تراز دریا نیز نشان داد که کم‌فشار حرارتی عربستان-عراق و ادغام آن‌ها با کم‌فشار گنگ یا سودانی مقارن وقوع ۲۱ طوفان، کم‌فشار شمال دریای مازندران و قفقاز با وقوع ۲ طوفان و پرفشار روی مدیترانه با وقوع ۱ طوفان مشاهده گردیدند. کم‌فشارهای قوی با مکش سریع هوای اطراف خود که عمدتاً نواحی بیابانی هستند، با روبش سطوح بیابانی و انتقال ذرات غبار به سمت ایران منجر به وقوع طوفان گردوغبار در منطقه مورد مطالعه شده‌اند.

الگوهای سینوپتیک مؤثر شامل فرود بادهای غربی، کم‌فشارهای حرارتی عربستان و سامانه‌های کم‌فشار سودانی، هستند. این طوفان‌ها معمولاً ناشی از تغییرات الگوهای فشار هستند و زمانی رخ می‌دهند که سیستم‌های کم‌فشار حرارتی در

عراق و عربستان تشکیل می‌شوند، پرفشار جنب‌حاره‌ای تقویت می‌شود و گرادیان فشار افقی شدید ایجاد می‌شود. مکانیسم‌های تشکیل این طوفان‌ها اغلب ناپایداری‌های جوی، جبهه‌های باد شدید و همگرایی جریان‌های هوایی است و کاهش رطوبت خاک، تخریب پوشش گیاهی و تغییرات کاربری اراضی عوامل تشدیدکننده آن می‌باشند.

بررسی ارتباط قائم سامانه‌های سطحی با الگوهای تراز بالا روشن نمود که در مواردی اختلاف شدید ارتفاع ژئوپتانسیل پراارتفاع و کم‌ارتفاع منجر به شکل‌گیری کم‌فشار قوی در سطح زمین در غرب یا جنوب منطقه شده است. آرایش توپوگرافی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال نشان داد که واقع شدن محور فرود مدیترانه در سمت غربی کم‌فشار سطحی به تقویت حرکت سیکلونی و مکش هوای اطراف نواحی بیابانی به سمت ایران کمک کرده است. در شرق ناوه مدیترانه (که در اغلب مواقع به نواحی شرقی جابجا شده) ناپایداری سطحی ایجاد شده و مؤلفه نصف‌النهاری باد غربی بسیار قوی بوده و همراهی کم‌فشار سطح زمین که با مکش شدید هوای اطراف از روی نواحی بیابانی و کانون‌های فرامنطقه‌ای گردوغبار در راستای جنوب غربی تا جنوبی به محدوده مورد مطالعه است، خیزش گردوغبار و روانه شدن آن به سوی ایران را در پی دارد. از طرفی، وجود دمای بالا در سطح زمین و کاهش رطوبت خاک (احراز دو شرط رطوبی و دمایی) مقدمات لازم برای تسهیل انفصال ذرات خاک از سطوح بیابان‌ها و کانون‌ها و چشمه‌های گردوغبار جنوب و غرب آسیا را فراهم نموده است. سرعت زیاد باد در روزهای طوفانی علاوه بر روبش ذرات منفصل از سطح زمین، این ذرات را به نواحی دورتر از نواحی کانونی و به عمق مناطق غربی ایران و نیز به ترازهای جوی بالاتر حمل و منتقل می‌کند؛ بنابراین، متعاقب خشکی هوا و نبود رطوبت کافی، الگوهای تراز بالا به ایجاد یا تقویت طوفان‌های گردوغبار در غرب ایران منجر می‌گردند. در اینجا، الگوی دو طوفان برای نمونه تشریح می‌شود.

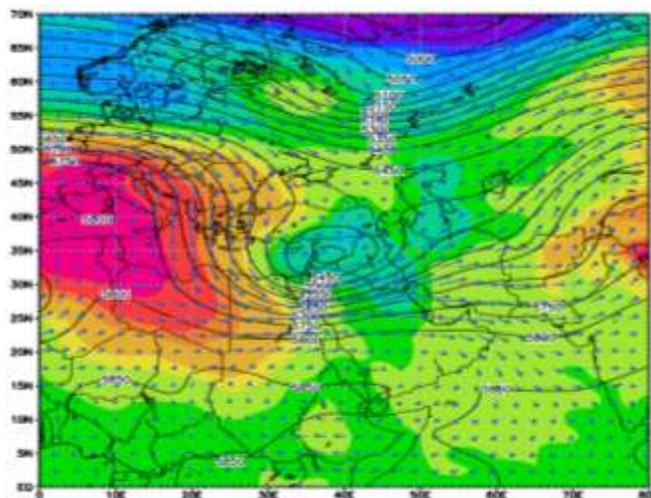
تحلیل همدیدی دو طوفان گرد و غباری بسیار شدید

طوفان گرد و غباری که در ۱۱ دسامبر ۱۹۸۰ در جنوب غرب ایران به مرکزیت اهواز رخ داده و منجر به کاهش دید افقی به صفر متر شده، نمونه‌ای از شدیدترین رخداد‌های گرد و غباری در منطقه است. این رویداد تحت تأثیر الگوهای همدیدی خاصی شکل گرفته که با تحلیل داده‌های جوی و نقشه‌های سینوپتیک قابل تبیین است. در این تحلیل، به بررسی مکانیسم‌های جوی و الگوهای فشار غالب در این روز خاص پرداخته می‌شود. در نقشه سطح دریا (شکل ۹- الف)، حاکمیت سامانه پرفشار قوی با فشار مرکزی ۱۰۳۰ هکتوپاسکال بر روی کل دریای مدیترانه و دریای سیاه مشاهده می‌شود. زبانه شرق‌سوی این پرفشار تا غرب ایران گسترش یافته است و قدرت هوای گرم این پرفشار به قدری زیاد است که زبانه شمال‌سویی از آن از این منطقه تا مرکز کم‌فشار روسیه کشیده شده و از عرض ۵۰ تا ۶۰ درجه شمالی، زبانه جنوب‌سوی آن را شکافته است و با آن تقابل پیدا کرده است. این پرفشار هوای گرم عرض‌های پایین و نواحی بیابانی را در جهت آنتی‌سیکلونی به سمت منطقه هدایت نموده و گسترش زبانه این پرفشار به سمت شرق و غرب ایران،

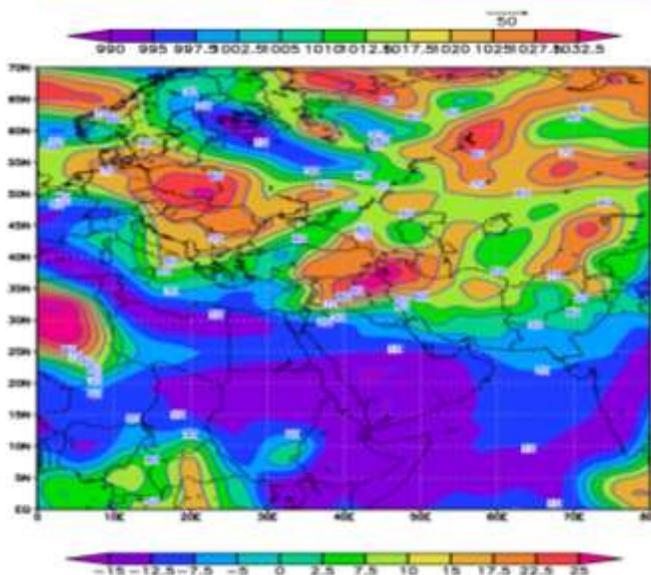
زمینه را برای انتقال ذرات گردوغبار از سمت غرب به شرق فراهم کرده است. تقابل دو الگوی فشار منجر به ایجاد گرادیان فشار قوی در منطقه شده است که بادهای شدیدی را در منطقه تا سرعت ۱۵ متر بر ثانیه ایجاد نموده است. این بادهای شدید ذرات گردوغبار را از سطح زمین بلند کرده و باعث کاهش دید افقی به صفر متر در اهواز شده است. توپوگرافی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (شکل ۹-الف) نشان می‌دهد در روز ۱۱ دسامبر ۱۹۸۰، دو الگوی اصلی ملاحظه می‌شود. اولی استقرار فرود مدیترانه در شرق ترکیه و شمال غرب ایران تا شمال عربستان است که در ارتفاع ۵۴۰۰ متری بر روی سوریه از جریان اصلی جامانده و سردچال جوی را شکل داده است و دیگری استقرار سامانه قوی تر و وسیع تر پرارتفاع (پشته) در شرق اروپا است. این فراز از شرق اروپا تا شمال آفریقا امتداد دارد و در شمال آفریقا در ارتفاع ۵۸۰۰ متری به صورت سلول بسته و فراز مانع درآمده و به نوعی منشأ ایجاد فرود غرب ایران را می‌توان به این فراز مانع نسبت داد. تقابل این دو سامانه باعث ایجاد گرادیان ارتفاعی و فشاری شدید و جریانات قوی در تراز میانی جو شده است. ناوه مذکور با ایجاد صعود هوا و ناپایداری، به تشدید طوفان کمک کرده، در حالی که پرارتفاع باعث انتقال هوای گرم از عرض‌های پایین به منطقه شده است. تعامل بین پرفشار سطح زمین در مدیترانه و پرارتفاع تراز میانی در شرق اروپا، یک مکانیسم تقویتی برای وقوع طوفان گرد و غبار ایجاد کرده است. این تعامل منجر به تقویت پایداری جو شده (استقرار پرارتفاع در تراز میانی، از توسعه عمقی ابر و بارش جلوگیری کرده)؛ سرعت بادهای سطحی را افزایش داده است (گرادیان فشار قوی بین پرفشار مدیترانه و زبانه‌های جنوب‌سوی کم‌فشارهای عرض‌های بالا، بادهای شدیدی ایجاد نموده است). همچنین موجب انتقال ذرات به ارتفاعات بالا شده است (ناوه تراز میانی با ایجاد صعود هوا، ذرات گردوغبار را به ارتفاعات بالاتر انتقال داده و زمینه را برای گسترش افقی آن فراهم کرده است).

این ترکیب سینوپتیکی منحصر به فرد موجب ایجاد تلاطم و ناپایداری جوی شدید ناشی از تقابل فرود تراز میانی با گرمای سطح زمین (شکل ۹-ب)، انتقال ذرات گردوغبار از بیابان‌های شمال عربستان و عراق (با توجه به رقم بسیار پایین رطوبت خاک (۳۰ درصد در شکل ۹-ب) در سطح زمین و لایه رویی خاک بیابان‌ها) و کانون‌های محلی جنوب غرب ایران توسط جریانات قوی سطحی به جنوب نیمه غربی ایران شده است. به طوری که در این روز در ایستگاه‌های اهواز، آبادان، دزفول، بوشهر، همدان، کرمانشاه، زنجان، اراک و تبریز در ۳۵ مورد دید افقی (ناشی از طوفان گرد و غبار یا بارش سبک یا رگباری) بین ۰ تا ۵۰۰۰ متر بوده است اما در ایستگاه‌های اهواز، آبادان، دزفول و بوشهر در ۱۳ مورد کد گرد و غبار ثبت شده است (این الگو اثر متفاوتی در شمال و جنوب نیمه غربی ایران داشته است). در آبادان کد طوفان گرد و غبار متوسط و در اهواز کد طوفان گرد و غبار شدید گزارش شده است؛ اما منشأ گرد و غبار طوفان اهواز و آبادان در ساعت ۱۵ فرامحلی بوده است. تحلیل منطقه‌ای و اثرات این طوفان نشان می‌دهد در اهواز دید افقی در ساعت ۹ به صفر متر کاهش یافته است که ناشی از قرارگیری در مجاورت با کانون‌های اصلی گردوغبار و سرعت بالای باد (جنوب شرقی با ۱۶۰ درجه و ۱۵ متر بر ثانیه) و ناپایداری جوی در نبود رطوبت مناسب بوده است. در ۱۱

مورد از کد گرد و غبار گزارش شده از اهواز، آبادان، دزفول و بوشهر، دید افقی در ساعات ۳ تا ۱۵ بین ۳۰۰ تا ۴۰۰۰ متر متغیر بوده است.



الف



ب

شکل (۹): الگوی همدید روز طوفان گرد و غباری بسیار شدید ۱۱ دسامبر ۱۹۸۰: الف) رنگ‌ها: نشانگر فشار سطح دریا، منحنی سیاه: نشانگر ارتفاع ژئوپتانسیل تراز میانی جو، بردارها: نشانگر جهت باد و طول بردار مبین سرعت باد هستند. ب) رنگ‌ها: دمای سطح زمین به درجه و منحنی‌ها: معرف رطوبت نسبی تراز میانی جو

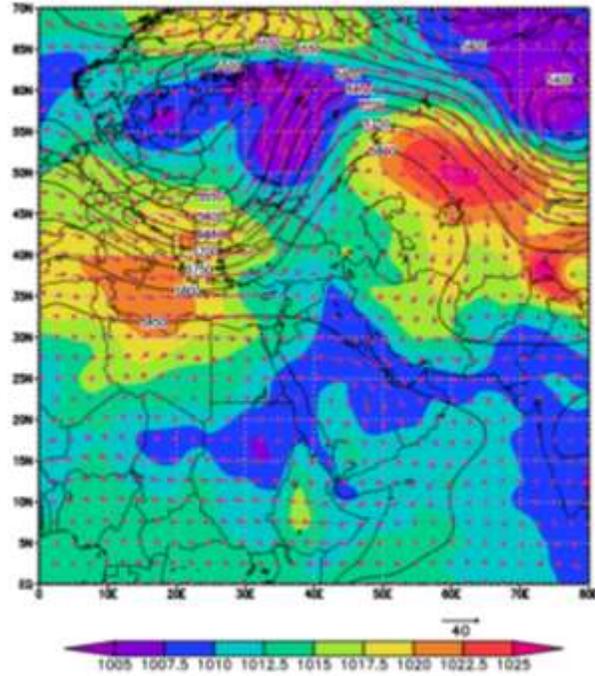
طوفان گرد و غبار شدید رخ داده در روز ۱۲۶ سپتامبر ۱۹۸۴ به عنوان دومین الگو مورد تحلیل قرار گرفت (شکل ۱۰). در نقشه فشار تراز دریا، چهار سامانه متقاطع شامل پرفشار سیبری، کم فشار عراق، پرفشار مدیترانه و کم فشار غرب روسیه

وجود دارد که دو سامانه پرفشار سیبری و کم‌فشار عراق نقش بارزی در وضعیت جوی غرب ایران داشته است (شکل ۱۰-الف). کم‌فشار حرارتی عراق و عربستان (۱۰۱۰ هکتوپاسکال) که با کم‌فشار سودانی و شمال آفریقا در غرب و کم‌فشار گنگ در شرق ادغام شده است و پرفشار سیبری با فشار مرکزی ۱۰۲۷/۵ هکتوپاسکال که از طریق زبانه جنوب سوی خود تا ایران نفوذ کرده است و ایران را نیز تحت سیطره خود درآورده است و هوای سرد عرض‌های بالا را در جهت آنتی‌سیکلونی به سمت منطقه هدایت نموده است. تقابل دو سامانه یادشده کم‌فشار حرارتی عراق و عربستان و پرفشار سیبری، گرادیان فشار (حدود ۱۷ میلی‌بار) در راستای شمالی-جنوبی ایجاد کرده است. این اختلاف فشار موجب تقویت جریانات شمالی تا جنوبی با سرعت ۸-۱۵ متر بر ثانیه در منطقه، انتقال ذرات گردوغبار از بیابان‌های عراق و شمال عربستان و کانون‌های محلی گرد و غبار و ناپایداری جوی ناشی از برخورد هوای سرد سیبری با هوای گرم سطحی شده است.

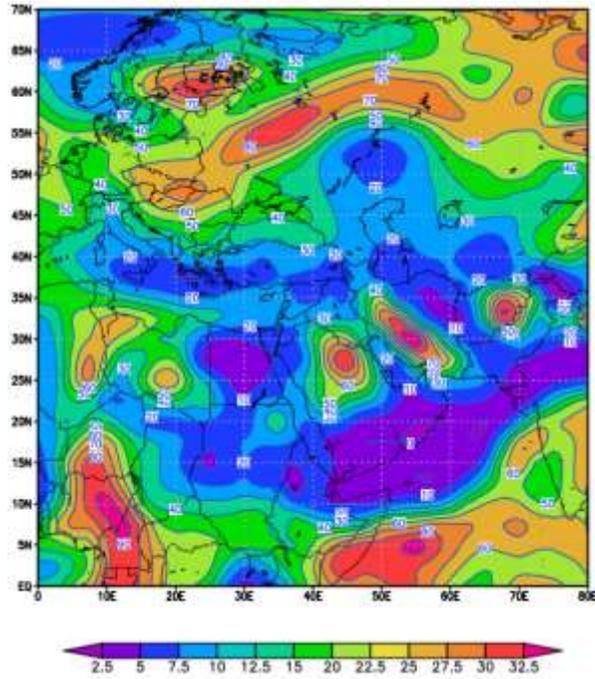
در نقشه ژئوپتانسیل تراز میانی جو، الگوی شبه‌امگایی با مشخصات زیر مشاهده می‌شود: یک فراز قوی در غرب آسیا مستقر شده که انتهای آن تا عربستان و ارتفاع ژئوپتانسیل ۵۸۵۰ متر امتداد یافته است و شمال آن در ارتفاع ژئوپتانسیل ۵۴۵۰ متر در شرق روسیه قرار دارد. این پراارتفاع موجب هدایت مستقیم هوای گرم و خشک عرض‌های پایین و شمال آفریقا به سمت شمال شده و موجب ریزش ساعتگرد هوای آلوده به گردوغبار از سطح بیابان‌ها و کانون‌های گرد و غباری فرامرزی به سمت منطقه مورد مطالعه به‌ویژه جنوب غربی ایران شده است. این فراز مابین دو فرود شرق و غرب روسیه با ارتفاع ۵۳۵۰ و ۵۵۰۰ متر قرار گرفته است. این الگو موجب هدایت مستقیم هوای گرم و خشک از عرض‌های پایین، ریزش ساعت گرد هوای آلوده به گردوغبار از سطح بیابان‌ها و کانون‌های گرد و غباری فرامرزی و محلی و تشدید ناپایداری در منطقه شده است.

تحلیل منطقه‌ای و اثرات این طوفان نشان می‌دهد در این روز ۱۶ مورد کد گرد و غبار از ۶ ایستگاه اهواز، آبادان، امیدیه، بوشهر، دزفول و کرمانشاه گزارش شده است که منشأ ۱۰ کد، فرامحلی بوده و در اهواز کد طوفان گرد و غبار شدید ثبت شده است. در اهواز دید افقی در ساعت ۱۵ به صفر متر رسیده است که ناشی از قرارگیری در مسیر مستقیم جریانات شمالی تا شرقی (باد شمال شرقی ۳۰ درجه)، مجاورت با کانون‌های اصلی گردوغبار و ناپایداری جو و سرعت بالای باد در نبود رطوبت مناسب (شکل ۱۰-ب) بوده است. در کل، جهت بادهای در ۴ مورد شمالی (۰ درجه با سرعت صفر متر بر ثانیه)، در ۳ مورد شمال شرقی (۱۰ تا ۴۰ درجه با سرعت ۸ تا ۱۵ متر بر ثانیه)، در ۱ مورد شرقی (۹۰ درجه با سرعت ۷ متر بر ثانیه)، در ۵ مورد جنوب شرقی (۱۴۰ تا ۱۹۰ درجه با سرعت ۲ تا ۶ متر بر ثانیه) و در ۳ مورد جنوب غربی (۱۹۰ تا ۲۴۰ درجه با سرعت ۲ تا ۸ متر بر ثانیه) بوده است.

الف



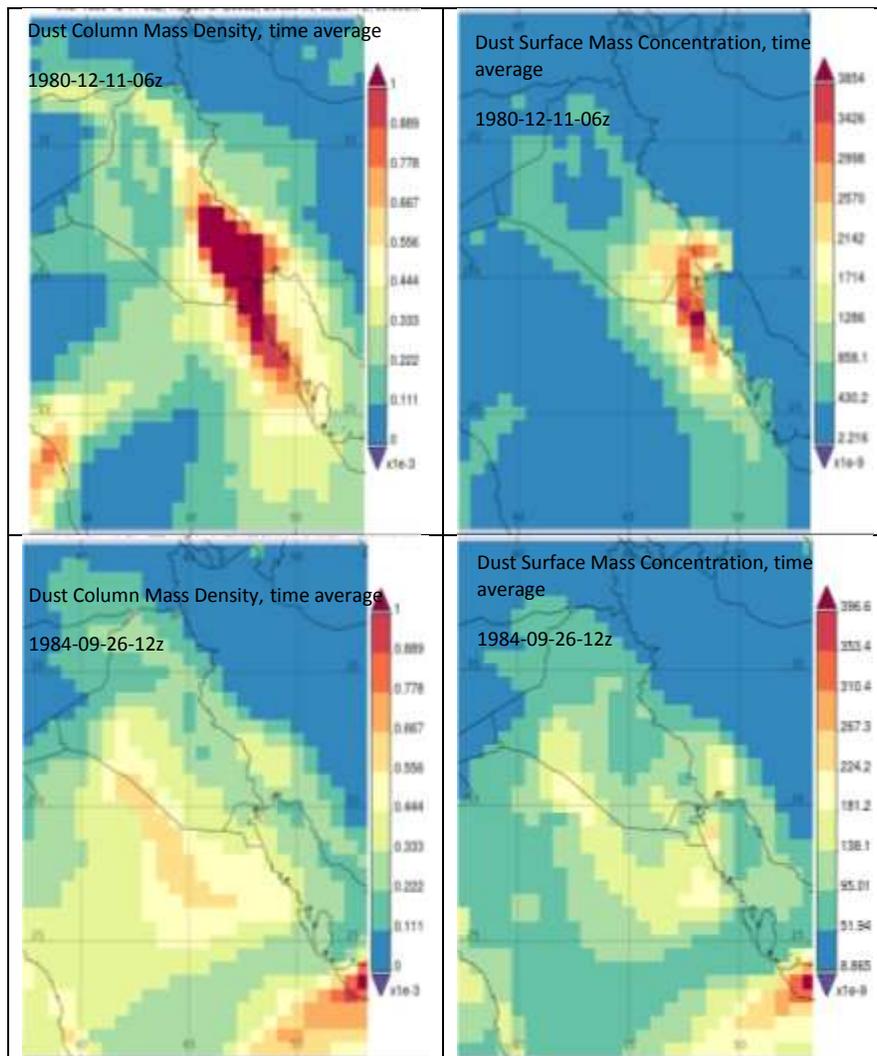
ب.



شکل (۱۰): الگوی همدید روز طوفان گرد و غباری بسیار شدید ۲۶ سپتامبر ۱۹۸۴؛ الف) رنگ‌ها: نشانگر فشار سطح دریا، منحنی سیاه: نشانگر ارتفاع ژئوپتانسیل تراز میانی جو، بردارها: نشانگر جهت باد و طول بردار مبین سرعت باد هستند. ب) رنگ‌ها: دمای سطح زمین به درجه و منحنی‌ها: معرف رطوبت نسبی تراز میانی جو

بررسی ماهواره‌ای این دو طوفان

طی طوفان ۱۱ دسامبر ۱۹۸۰ که به مرکزیت ایستگاه اهواز ثبت شده است، هسته بیشینه شاخص^۱ DCMD (۱ کیلوگرم در مترمربع) بخش قابل توجهی از جنوب غرب عراق، کویت و گوشه‌های از شمال شرق عربستان و نیز جنوب غربی استان خوزستان را در ساعت ۹ در بر گرفته است (شکل ۱۰). راستای انتشار ذرات گرد و غبار از این چشمه گرد و غبار به سمت ایران جنوبی-شمالی است که هرچند تا بوشهر، ایلام و استان‌های مرکزی نیمه غربی ایران نیز کشیده شده است اما طبعاً با افزایش فاصله از این کانون، غلظت جرم گرد و غبار کاسته می‌شود.



شکل (۱۱): شاخص غلظت ستونی جرم گرد و غبار جوی (DCMD) و تراکم جرمی گرد و غبار سطحی (DSMC) در دو روز طوفان گرد و غباری

^۱ Dust Column Mass Density (DCMD)

هسته بیشینه شاخص تراکم جرمی گرد و غبار سطحی^۱ بر روی کویت و منتهی الیه شمال شرق عربستان متمرکز شده است و با شدت کمتر در راستای شمالی به جنوب غرب ایران و در راستای شمال غربی به سمت عراق کشیده شده و ذرات گرد و غبار را منتقل کرده است. الگوی نقشه شاخص DCMD و DSMC ذرات گرد و غبار کوچکتر از ۲/۵ میکرون مشابه DSMC است.

طی طوفان ۲۶ سپتامبر ۱۹۸۴ - که به مرکزیت ایستگاه اهواز ثبت شده - هسته بیشینه شاخص DCMD (۱ کیلوگرم در مترمربع) در امارت و شرق عربستان قرار داشته و هسته ثانویه آن در شمال عربستان و بخش‌هایی از جنوب عراق (۰/۵۵ - ۰/۶۶ کیلوگرم در مترمربع) را در بر گرفته که انتشار آن راستای جنوب شرقی - شمال غربی است. نیمه جنوب غرب ایران از این الگوی انتشار متأثر شده و در عین حال شکل جزیره‌ای بودن استان خوزستان در میان مناطق متأثر می‌تواند بر نقش کانون‌های محلی جنوب غرب ایران در تقویت انتشار ذرات غبار در ساعت ۱۵ این روز دلالت داشته باشد. الگوی تراکم و انتشار ذرات بر اساس شاخص DSMC و شاخص DCMD و DSMC ذرات گرد و غبار کوچکتر از ۲/۵ میکرون، مشابه شاخص DCMD بوده و از شمال عربستان (چشمه گرد و غبار) به سمت نواحی شمالی تر کشیده شده‌اند. نیمه جنوبی غرب ایران به‌ویژه استان خوزستان، ایلام و بوشهر در راستای جنوب غربی - شمال شرقی تحت تأثیر هر دو الگوی انتشار قرار گرفته که نشان‌دهنده نقش همزمان کانون‌های فرامرزی و محلی در تشکیل یا تشدید طوفان گردوغبار این منطقه است. مشککی‌زاده و همکاران (۱۳۹۵) نیز در بررسی عمق اپتیکی ذرات گرد و غبار معلق در هوای استان خوزستان با استفاده از تصاویر مادیس به نتیجه مشابهی دست یافتند و نشان دادند که مقدار این شاخص در راستای جنوب غربی - شمال شرقی کاهش پیدا می‌کند.

نتیجه‌گیری

تحلیل کلی روند زمانی داده‌های دوره ۷۴ ساله نشان داد که طوفان‌های گرد و غباری بسیار شدید در نیمه غربی ایران، الگوهای پیچیده اما معناداری را از نظر زمانی، مکانی و همدیدی آشکار می‌سازد. در مقیاس زمانی، این پدیده از روندی نامنظم اما خوشه‌ای تبعیت می‌کند، به طوری که دهه ۱۹۶۰ به عنوان فعال‌ترین دوره با ۱۲ مورد وقوع، همزمان با دوره‌های خشکسالی گسترده در منطقه بین‌النهرین بوده است که توسط سازمان هواشناسی جهانی (۲۰۲۰) نیز تأیید شده است. این هم‌زمانی، نقش عوامل فرامرزی و تغییرات اقلیمی در تشدید این پدیده حدی را پررنگ می‌سازد. بیشترین فراوانی وقوع این پدیده در سال‌های ۱۹۵۳ (۴ مورد)، ۱۹۶۴ (۴ مورد) و ۱۹۶۵ (۲ مورد) ثبت شده است. این یافته با مطالعات گودی و میدلتون (۲۰۰۶) که به بررسی نوسانات بلندمدت گردوغبار در خاورمیانه پرداخته‌اند، همخوانی دارد. در مقابل، دهه‌های ۱۹۸۰ و ۱۹۹۰ به بعد کاهش محسوسی در فراوانی وقوع این پدیده حدی مشاهده می‌شود. با جمع‌بندی تحلیل

1 Dust Surface Mass Concentration (DSMC)

اقلیمی این رخدادهای ارتباط و وقوع این پدیده فرین با عوامل اقلیمی از جمله خشکسالی های منطقه ای، تغییرات الگوهای فشار و تأثیر ارتفاع آشکار گردید. افزایش وقوع طوفان ها در سال های خشک (۱۹۵۳، ۱۹۶۴) مطابق با یافته های پروسپرو و همکاران (۲۰۰۲) وجود ارتباط مستقیم بین خشکسالی و فعالیت گردوغبار را نشان می دهد.

همچنین سال های پرطوفان با تقویت کم فشار حرارتی خلیج فارس همراه بوده اند (Zoljoodi et al., 2013) و اینکه ارتفاع ایستگاه به عنوان قوی ترین پیش بینی کننده مکانی شناسایی شد، به طوری که بیش از ۹۵٪ طوفان های بسیار شدید در ایستگاه های دارای ارتفاع پایین تر از ۱۵۰ متر (اهواز، آبادان و دزفول) رخ داده اند. این امر نه تنها تأثیر پدیده های فیزیکی جو پایین را نشان می دهد، بلکه آسیب پذیری ویژه جلگه خوزستان را به عنوان یک منطقه بحرانی تأیید می کند. الگوی مکانی آشکار، تمرکز وقایع در مناطق کم ارتفاع جنوب غربی (به ویژه حوضه خوزستان) را نشان می دهد که علاوه بر ارتفاع پایین، تحت تأثیر مستقیم کانون های فرامرزی در عراق و عربستان قرار دارد، مؤید یافته های پروسپرو و همکاران (۲۰۰۲)؛ گودی و میدلتون (۲۰۰۶)؛ رشکی و همکاران (۲۰۱۵)، الدوسری و همکاران (۲۰۱۷) درباره نقش ارتفاع در تشدید پدیده گردوغبار است. علاوه بر موارد بالا، تغییرات کاربری اراضی نیز می تواند یکی از عوامل مؤثر بر ایجاد و یا تشدید این پدیده باشد. هم چنان که مطالعات ونگ و همکاران (۲۰۲۰) نشان داده است تخریب پوشش گیاهی و خشک شدن تالاب ها در دهه ۱۹۶۰ به افزایش کانون های گردوغبار محلی منجر شده است. شاهسونی و همکاران (۱۳۹۱) دلایل تشدید فراوانی این طوفان ها در اهواز را به افزایش روزهای گرد و غباری عراق، خشک شدن اراضی باتلاقی بین النهرین متعاقب بهره برداری بیش از حد ترکیه (با احداث سدهای عظیم بر روی دجله و فرات) و سوریه نسبت داده اند. به همین دلیل، احیا و بازگرداندن عملکرد اکولوژیک تالاب های خشک شده بین النهرین به عنوان کانون های اصلی گردوغبار و احیای مراتع و کنترل کانون های گردوغبار محلی در ایستگاه های هدف و نیز مدیریت پوشش گیاهی از طریق کنترل چرای دام در مراتع حساس به عنوان راهکار عملی برای حفاظت محیط زیست پیشنهاد می گردد. بررسی ساعت رخدادها نیز نشان داد که اغلب آن ها در ساعات بعد از ظهر اتفاق افتاده اند. این یافته با نتایج پژوهش عزیزی و همکاران (الف ۱۳۹۱) و بیرانوند و همکاران (۱۴۰۲) همخوانی دارد.

بررسی سرعت طوفان های گرد و غباری بسیار شدید نیاز به بررسی دقیق تر عوامل ایجاد کننده تفاوت های منطقه ای، اهمیت توجه ویژه به مناطق اهواز و آبادان در برنامه ریزی های مدیریت بحران، لزوم مطالعات بیشتر درباره مکانیسم های تشکیل سرعت های بسیار بالا (بالای ۲۱ متر بر ثانیه) و ضرورت در نظر گرفتن این داده ها در طراحی سازه ها و زیرساخت های منطقه را نمایان ساخت. از طرف دیگر، وقوع نادر ولی شدید این طوفان ها در مناطق مرتفع (همچون سقز و کرمانشاه) هشداردهنده گسترش جغرافیایی این پدیده است و نیاز به بررسی دقیق تر عوامل محلی در این ایستگاه ها احساس می شود و در کل، مطالعات بین رشته ای برای ارزیابی پیامدهای بهداشتی و اقتصادی ضرورت دارد.

در نمودار فراوانی ماهانه این رخداد، الگوی فصلی دوگانه (اوج‌های بهاری و پاییزی) وقوع طوفان‌ها، پیوند ناگسستنی این پدیده با دوره‌های گذار اقلیمی و فعال شدن سامانه‌های جوی خاص را نشان می‌دهد. تحلیل هم‌پدیدی مؤید آن است که تقریباً ۸۰٪ از طوفان‌ها تحت تأثیر استقرار فرود مدیترانه در تراز میانی جو و تقویت کم‌فشارهای حرارتی عربستان و عراق در سطح زمین شکل گرفته‌اند. تقویت گرادیان فشار بین این سامانه‌ها، محرک اصلی ایجاد بادهای شدید و انتقال ذرات از کانون‌های فرامرزی بوده است. این یافته مؤید نتایج پژوهش ذوالفقاری و عابدزاده، (۱۳۸۴)؛ طاووسی و همکاران (۱۳۸۹)؛ مفیدی و جعفری، ۱۳۹۰؛ ذوالفقاری و همکاران (۱۳۹۲)؛ امیدوار و همکاران (۱۳۹۲)؛ رئیس پور و همکاران (۱۳۹۲)؛ ولی و همکاران (۱۳۹۳)؛ بابایی فینی و همکاران (۱۳۹۵)؛ است. شناسایی نقش کم‌فشار حرارتی عربستان در وقوع طوفان گردوغبار غرب ایران و نواحی اطراف مؤید نتایج پژوهش العباسی و همکاران (۲۰۲۳)؛ طاووسی و همکاران (۱۳۸۹)؛ جهانبخش و همکاران (۱۳۹۳)؛ بیرانوند و همکاران (۱۴۰۲) است. در کنار عوامل ناشی از فشار جوی، شرایط سطح زمین (کاهش رطوبت خاک و افزایش دمای سطح زمین) نیز شرایط را برای وقوع طوفان‌ها مساعد کرده‌اند. میدلتون (۲۰۱۹) در پژوهش خود این ارتباط را تأیید کرده است. لذا مدیریت گردوغبار در غرب ایران نیازمند توجه ویژه به دوره‌های انتقالی بین فصول است و ارتباط این داده‌ها با منابع تولید گردوغبار در منطقه نیاز به بررسی بیشتر دارد. از این‌رو برای مطالعات آینده، تأثیر تغییرات اقلیمی اخیر بر این الگوها و نیز بررسی همزمان داده‌های سینوپتیک با پوشش گیاهی و رطوبت خاک و با توجه به تغییرات دهه‌ای چشمگیر این طوفان‌ها، ارتباط احتمالی آن‌ها با شاخص‌های اقلیمی مانند ENSO، فازهای النینو/لانینا، نوسان اطلس شمالی (NAO) و نوسان مدیترانه‌ای (MOI) و مدل‌سازی عددی شرایط جوی همراه پیشنهاد می‌شود. همچنین بررسی سمت وزش طوفان‌های گرد و غباری بسیار شدید با دید صفر در منطقه مورد مطالعه نشان داد که برنامه‌ریزی برای مقابله با گردوغبار باید بر اساس جهت‌های غالب هر منطقه انجام شود. ایجاد بادشکن‌های طبیعی با گونه‌های مقاوم به خشکی و موانع باید با در نظر گرفتن این جهت‌ها طراحی شوند، برنامه‌های منطقه‌ای برای مقابله با گردوغبار بر اساس این یافته‌ها تدوین شود و مطالعات میدانی برای شناسایی دقیق کانون‌های گردوغبار انجام گیرد. بررسی تغییرات فضایی فراوانی این رخداد حاکی از کاهش آن از جنوب به شمال و غرب به شرق است که مؤید نتایج پژوهش عزیزی و همکاران (الف ۱۳۹۱) و رسولی و همکاران (۱۳۹۰) است؛ بنابراین با توجه به فراوانی و توزیع فضایی روزهای گرد و غباری بسیار شدید در نیمه غربی ایران پیامدهای مدیریتی که متصور است عبارت‌اند از تمرکز سیستم‌های هشدار سریع باید بر مناطق کم‌ارتفاع جنوب غرب و طراحی برنامه‌های کاهش اثرات گردوغبار باید با در نظر گرفتن این الگوی مکانی.

پیامدهای اکولوژیکی که از یافته‌های این پژوهش استخراج می‌شود عبارت است از: ۱) تخریب زیستگاه‌ها (افزایش طوفان‌های گرد و غباری در دهه ۱۹۶۰ همزمان با خشک شدن تالاب‌های بین‌النهرین ناشی از پروژه‌های سدسازی ترکیه و سوریه) منجر به تشدید کانون‌های گردوغبار محلی شده است. این موضوع با یافته‌های ونگ و همکاران

(۲۰۲۰) درباره تأثیر تغییرات کاربری اراضی بر تشدید گردوغبار همخوانی دارد. (۲) کاهش تنوع زیستی (طوفان‌های شدید با سرعت ۲۵-۳۱ متر بر ثانیه در مناطق مرتفع مانند همدان و زنجان، تهدیدی برای گونه‌های گیاهی و جانوری آسیب‌پذیر محسوب می‌شود). علاوه بر این، این پیامدها بر مدیریت منابع آب و خاک منطقه نیز اثراتی دارد که شامل (۱) فرسایش آبی و بادی (الگوی زمانی نامنظم طوفان‌ها (با اوج در بهار و پاییز) موجب تشدید فرسایش خاک در دوره‌های حساس کشاورزی می‌شود)، این یافته با مطالعات شاهسونی و همکاران (۱۳۹۱) درباره تأثیر سدسازی بر خشکی اراضی باتلاقی مرتبط است و (۲) کاهش کیفیت آب (رسوبات ناشی از طوفان‌های گرد و غباری بر منابع آب سطحی و زیرزمینی تأثیر منفی می‌گذارد). سلامت محیط زیست نیز از این پیامدها متأثر می‌شود از جمله می‌توان به آلودگی هوا اشاره کرد (تمرکز طوفان‌ها در مناطق کم‌ارتفاع مانند آبادان و اهواز موجب افزایش غلظت ذرات PM10 و PM2.5 شده که پیامدهای بهداشتی جدی دارد و نیز تأثیر بر اکوسیستم‌های شهری (طوفان‌های بعدازظهر (ساعات ۱۵-۱۸) با الگوی فعالیت انسانی تداخل داشته و اثرات مضاعفی بر محیط‌های شهری می‌گذارد). در همین راستا، چالش‌ها و راهبردهای تحقیقاتی آینده می‌بایست به سمت مدل‌سازی عددی برای شبیه‌سازی دقیق‌تر طوفان‌ها و همچنین بررسی اثرات ترکیبی تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی (مانند خشک‌سازی تالاب‌ها و سدسازی در بالادست) بر تشدید این پدیده سوق داده شوند. کنش بین‌المللی و همکاری با کشورهای همسایه برای کنترل کانون‌های فرامرزی گردوغبار و نیز توسعه شاخص‌های اکولوژیکی (طراحی معیارهای ارزیابی آسیب‌پذیری اکوسیستم‌های محلی نسبت به طوفان‌های گرد و غباری) ضروری به نظر می‌رسد.

نتایج این تحلیل نشان می‌دهد که طوفان‌های گرد و غباری بسیار شدید در غرب ایران تحت تأثیر عوامل اقلیمی-انسانی پیچیده‌ای قرار دارند و اگرچه طوفان‌های گرد و غباری بسیار شدید در نیمه غربی ایران پدیده‌ای نسبتاً نادر هستند، ولی در برخی سال‌ها و مناطق خاص می‌توانند به صورت خوشه‌ای و با شدت زیاد ظاهر شوند که لزوم اتخاذ یک رویکرد مدیریت یکپارچه و پیشگیرانه را برای کاهش پیامدهای زیست‌محیطی، بهداشتی و اقتصادی این پدیده در غرب ایران ایجاب می‌کند. این یافته‌ها که با مطالعات پیشین در این منطقه همخوانی دارد، اهمیت مدیریت یکپارچه این پدیده را نشان می‌دهد، اهمیت پایش مستمر و توسعه سیستم‌های هشدار زودهنگام را برای کاهش پیامدهای این پدیده برجسته می‌سازد و می‌تواند مبنایی برای تصمیم‌گیری‌های مدیریتی و برنامه‌ریزی‌های محیط‌زیستی در سطح منطقه‌ای باشد تا بتوان به مدیریت پایدار این پدیده در غرب ایران دست یافت.

منابع

۱. امیدوار، کمال؛ نارنگی فرد، مهدی؛ حقیقت ضیابری، سیده مرضیه (۱۳۹۲). تحلیل الگوهای هم‌دید روزهای فرین آلوده به ذرات معلق در شیراز. فصلنامه جغرافیا و مطالعات محیطی. ۵ (۲)، ۴۹-۶۲.

۲. بیرانوند، آذر؛ عزیزی، قاسم؛ علیزاده، امید (۱۴۰۲). واکاوی نقش چرخندهای حرارتی و دینامیکی در طوفانهای گردوغبار غرب ایران. *کاوشهای جغرافیایی مناطق بیابانی*. ۱۱ (۲)، ۱۸۲-۱۶۵. <https://doi.org/10.22034/grd.2024.21230.1609>
۳. جلیلیان، شادی (۱۴۰۱). آشکارسازی مسیرهای طوفان گردوغبار ورودی غرب ایران با استفاده از مدل پخش لاگراژی ذرات HYSPLIT. *مدیریت اکوسیستمهای طبیعی*. ۲ (۴)، ۷۰-۶۳. <https://doi.org/10.22034/emj.2024.714453>
۴. جهانبخش، سعید و دیگران (۱۳۹۳). تحلیل و پهنه‌بندی فراوانی طوفانهای گرد و غباری ایران با استفاده از خوشه‌بندی فازی (FCM). *پژوهش‌های بوم‌شناسی شهری*. ۱۰، ۱-۱۳.
۵. ذوالفقاری، حسن؛ عابدزاده، حیدر (۱۳۸۴). تحلیل سینوپتیک سیستم‌های گردوغبار در غرب ایران. *جغرافیا و توسعه*. ۶: ۱۷۳-۱۸۸.
۶. ذوالفقاری، حسن و دیگران (۱۳۹۰). بررسی هم‌دید طوفان‌های گردوغبار در مناطق غربی ایران طی سال‌های ۱۳۸۴ تا ۱۳۸۸ (مطالعه موردی: موج فراگیر تیرماه ۱۳۸۸). *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*. ۲۲ (۳)، ۳۴-۱۷.
۷. رستمی، دانا؛ حسینی، سیداسعد (۱۳۹۷). واکاوی و ردیابی پدیده گردوغبار در جنوب و جنوب شرق ایران با استفاده از مدل HYSPLIT و اصول سنجش از دور. *تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*. ۵ (۳)، ۱۱۹-۱۰۳. <http://dx.doi.org/10.29252/jsaeh.5.3.103>
۸. رسولی، علی‌اکبر؛ ساری صراف، بهروز؛ محمدی، غلام حسن (۱۳۹۰). تحلیل روند وقوع پدیده اقلیمی گرد و غبار در غرب کشور در ۵۵ سال اخیر با به‌کارگیری روش‌های آماری پارامتری. *فصلنامه جغرافیای طبیعی*. ۴ (۱۱)، ۱۶-۱.
۹. رئیس‌پور، کوهزاد و دیگران (۱۳۹۲). بررسی نقش سیستم‌های کم‌فشار بریده‌شده در شکل‌گیری گرد و غبارهای فراگیر جنوب غرب ایران. *نخستین کنفرانس ملی آب و هواشناسی*. کرمان. ایران.
۱۰. سبحانی، بهروز؛ صفریان زنگیر، وحید؛ فیض‌اله زاده، سینا (۱۳۹۹). مدل‌سازی و پیش‌بینی گرد و غبار در غرب ایران. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*. ۵۲ (۱)، ۳۵-۱۷. <https://doi.org/10.22059/jphgr.2020.284389.1007408>
۱۱. شاهسونی، عباس و دیگران (۱۳۹۱). تحلیل روند گرد و غبار ورودی به ایران با تأکید بر استان خوزستان. *مجله تحقیقات نظام سلامت حکیم*. ۳ (۵۸)، ۲۰۲-۱۹۲.
۱۲. شمسی‌پور، علی‌اکبر؛ عزیزی، قاسم؛ میری، مرتضی (۱۳۹۳). شناسایی الگوهای تابستانه و زمستانه ورود گردوغبار به غرب ایران. *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*. ۲۵ (۴)، ۲۲۲-۲۰۳.
۱۳. صابر، مهناز؛ صلاحی، برومند؛ ملکی مرشت، رقیه (۱۴۰۴). بررسی تغییرات فضایی-زمانی دید افقی در نیمه غربی ایران: تحلیل جامع و راهکارهای مدیریتی. *فصلنامه جغرافیا و مطالعات محیطی*. ۱۴ (۵۴)، ۷۹-۵۴.
۱۴. طاووسی، تقی؛ خسروی، محمود؛ رئیس‌پور، کوهزاد (۱۳۸۹). تحلیل هم‌بندی سامانه‌های گرد و غباری در استان خوزستان. *جغرافیا و توسعه*. ۸ (۲۰)، ۹۷-۱۱۸.

۱۵. عزیزی، قاسم و دیگران (الف ۱۳۹۱). تحلیل آماری-همدید پدیده گردوغبار در نیمه غربی ایران. *محیط‌شناسی*. ۳۸ (۶۳)، ۱۳۴-۱۲۳.
۱۶. عزیزی، قاسم؛ میری، مرتضی؛ نبوی، سید امید (۱۳۹۱). ردیابی پدیده گردوغبار در نیمه جنوبی ایران. *مطالعات جغرافیایی مناطق خشک*. ۲ (۷)، ۸۱-۶۳.
۱۷. کاتورانی، شلیر؛ احمدی، محمود؛ داداشی رودباری، عباسعلی (۱۴۰۳). بررسی پراکنش فضایی و روند ذرات گرد و غبار در غرب آسیا و ارتباط آن با تغییرات کاربری اراضی. *تحقیقات آب و خاک ایران*. ۵۵ (۸)، ۱۴۳۲-۱۴۱۵.
۱۸. لشگری، حسن؛ کیخسروی، قاسم (۱۳۸۷). تحلیل آماری سینوپتیکی طوفان‌های گردوغبار استان خراسان رضوی در فاصله زمانی (۱۹۹۳-۲۰۰۵). *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*. ۵۶، ۳۳-۱۷.
۱۹. محمدپور، کاوه؛ خورشیددوست، علی محمد؛ احمدی، گونا (۱۴۰۳). ارزیابی داده‌های زمینی و تصاویر ماهواره‌ای در تحلیل گرد و غبارهای نیمه غربی ایران. *تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*. ۱۱ (۲)، ۱۶-۱.
۲۰. محمودی مه‌پاش، ناهید (۱۴۰۰). مقایسه میزان و روند غلظت ذرات گردوغبار در ارتباط با متغیرهای اقلیمی در نیمه غربی ایران. *انسان و محیط زیست*. ۵۸، ۲۹-۱۷.
۲۱. مشکى زاده، پروانه؛ اورک، ندا؛ مرشدی، جعفر (۱۳۹۵). بررسی توزیع زمانی- مکانی عمق اپتیکی ذرات معلق هوا (AOD) بر استان خوزستان با استفاده از تکنیک سنجش از دور (R.S). *فصلنامه جغرافیا و مطالعات محیطی*. ۱۷ (۵)، ۷۸-۶۹.
۲۲. مفیدی، عباس؛ جعفری، سجاد (۱۳۹۰). بررسی نقش گردش منطقه‌ای جو بر روی خاورمیانه در وقوع طوفان‌های گرد و غباری تابستانه در جنوب غرب ایران. *مطالعات جغرافیایی مناطق خشک*. ۲ (۵)، ۴۵-۱۷.
۲۳. ولی، عباسعلی و دیگران (۱۳۹۳). تحلیل اقلیمی و رهگیری طوفان‌های گردوغبار فراگیر در جنوب و مرکز ایران. *مجله محیط‌شناسی*. ۴۰ (۴)، ۹۷۲-۹۶۱. <https://doi.org/10.22059/jes.2014.53012>
24. Al-Abbasi, K. A.; Labban, A. H. & Awad, A. M. (2023). Synoptic characteristics of the spatial variability of spring dust storms over Saudi Arabia. *Atmósfera*. 37.
25. Al-Dabbas, M. A.; Al-Khafaji, R. A. & Al-Zubaidi, A. A. (2012). Dust storms and their environmental impacts in Iraq and neighboring countries. *Journal of Environmental Protection*. 3 (10), 1297-1303. <https://doi.org/10.4236/jep.2012.310144>
26. Al-Dousari, A. M.; Al-Enezi, A. K. & Al-Awadhi, J. (2017). Textural variations within different representative types of dune sediments in Kuwait. *Arabian Journal of Geosciences*. 1 (1), 17-31 <http://dx.doi.org/10.1007/s12517-008-0002-4>
27. Al-Hemoud, A. et al (2020). Health impact assessment associated with exposure to PM10 from dust storms in Kuwait. *Atmosphere*. 9 (1). <http://dx.doi.org/10.3390/atmos9010006>
28. Baddock, M. C.; Bullard J. E. & Bryant, R G. (2009). Dust source identification using MODIS: A comparison of techniques applied to the Lake Eyre Basin, Australia. *Remote Sensing of Environment*. 113 (7), 1511-1528. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.03.002>
29. Boloorani, A. D. et al (2014). Investigation of dust storms entering Western Iran using remotely sensed data and synoptic analysis. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*. 12 (1), 124. <https://doi.org/10.1186/s40201-014-0124-4>
30. Goudie, A. S. (2014). Desert dust and human health disorders. *Environment International*. 63, 101-113. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.10.011>

31. Goudie, A. S. & Middleton, N. J. (2006). *Desert dust in the global system*. Springer Berlin: Heidelberg
32. Klingmüller, K. et al (2016). Aerosol optical depth trend over the Middle East. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 16 (8), 5063–5073. <https://doi.org/10.5194/acp-16-5063-2016>
33. Middleton, N. J. (2017). Desert dust hazards: A global review. *Aeolian Research*. 24, 53–63. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2016.12.001>
34. Middleton, N. J. (2019). Variability and trends in dust storm frequency on decadal timescales: Climatic drivers and human impacts. *Geosciences*. 9 (6), 261. <http://dx.doi.org/10.3390/geosciences9060261>
35. Nabavi, S. O.; Haimberger, L. & Samimi, C. (2016). Climatology of dust distribution over West Asia from homogenized remote sensing data. *Atmospheric Environment*. 143, 328–341. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.08.053>
36. Namdari, S. et al (2018). Impacts of climate and synoptic fluctuations on dust storm activity over the Middle East. *Atmospheric Environment*. 173, 265–276. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.11.016>
37. Prospero, J. M. et al (2002). Environmental characterization of global sources of atmospheric soil dust. *Reviews of Geophysics*. 40 (1), 1002. <http://dx.doi.org/10.1029/2000RG000095>
38. Rashki, A. et al (2015). Dust-storm dynamics over Sistan region, Iran: Seasonality, transport characteristics and affected areas. *Aeolian Research*. 16, 35–48. <http://dx.doi.org/10.1016/j.aeolia.2014.10.003>
39. Rashki, A. et al (2013). Dryness of ephemeral lakes and consequences for dust activity: The case of the Hamoun drainage basin, southeastern Iran. *Science of the Total Environment*. 463–464, 552–564. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.06.045>
40. Shao, Y. et al (2011). Dust cycle: An emerging core theme in Earth system science. *Aeolian Research*. 2 (4), 181–204. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2011.02.001>
41. Sissakian, V. K.; Al-Ansari, N. & Knutsson, S. (2013). Sand and dust storm events in Iraq. *Journal of Natural Science*. 5 (10), 1084–1094. <https://doi.org/10.4236/ns.2013.510133>
42. Wang, X. et al (2017). Variability of East Asia dust events and their long-term trend. *Atmospheric Environment*. 167, 234–243. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.08.019>
43. Wang, X. et al (2020). Variability of East Asia dust events and their long-term trend. *Atmospheric Environment*. 42 (13), 3156–3165. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.07.046>
44. World Meteorological Organization (WMO) (2019). *Sand and Dust Storms*. WMO-No. 1234. DOI: 10.13140/RG.2.2.12345.67890
45. World Meteorological Organization (2020). *Sand and Dust Storms*. WMO-No. 1237.
46. Yu, Y. et al (2015). Climatology of summer Shamal wind in the Middle East. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 121 (1), 289–305. <http://dx.doi.org/10.1002/2015JD024063>
47. 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>