

رویکرد تلفیقی (هم‌دید) - دورسنجی) برای بررسی مخاطره گردو خاک در غرب و جنوب غرب ایران (مورد مطالعه: ۲۸-۲۵ اردیبهشت ۱۴۰۱)

پریسا سهرابی پیردوستی^۱، حسن ذوالفقاری^{۲*}، سعید فرهادی پور^۳

^۱ دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

^۲ دانشیار آب و هواشناسی، گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه رازی، کرمانشاه، ایران

^۳ استادیار هواشناسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۲۹ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۰۷

چکیده

گردو خاک یکی از بحران‌های محیطی در مناطق خشک و نیمه خشک است. این پژوهش با هدف تحلیل زمانی-مکانی گردو خاک در غرب و جنوب غرب ایران و واکاوی رخداد شاخص ۱۵ تا ۱۸ مه ۲۰۲۲، با رویکردی تلفیقی آماری، هم‌دید و سنجش‌ازدور انجام شد. داده‌های شامل شاخص‌های گردو خاک، مؤلفه‌های تابشی، رطوبت خاک و متغیرهای جوی از محصولات ماهواره‌ای و داده‌های ERA5 برای شش ایستگاه منتخب طی دوره ۲۰۰۰-۲۰۲۵ بود. نتایج نشان داد که عمق نوری هواویز (AOD) مؤثرترین شاخص شناسایی گردو خاک است. شاخص‌های گردو خاک (DUS و DU، AOD) در دوره بلندمدت روندی افزایشی داشته و هم‌زمان با کاهش معنی‌دار رطوبت خاک و تغییر رژیم تابشی همراه بوده‌اند. تحلیل بی‌هنجاری‌ها نشان می‌دهد که رخداد مه ۲۰۲۲ از نظر شدت گردو خاک، مؤلفه‌های تابشی و شرایط سطح زمین به‌طور معنی‌داری از الگوی اقلیمی نرمال ماه مه فاصله دارد. یافته‌های هم‌دید نشان داد که تمایز اصلی این رخداد ناشی از هم‌زمانی و تداوم بی‌هنجاری‌های سطحی با آرایش‌های دینامیکی ناپایدار در چندین تراز جو بوده، به‌گونه‌ای که تاوایی تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال و بادهای سطحی در آغاز، تاوایی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و جت تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال در اوج و کاهش فشار سطحی در فروکش نقش کلیدی داشتند. بادهای سطحی در تمام مراحل، عامل اصلی انتقال افقی گردو خاک باقی مانده‌اند. تحلیل سنجش‌ازدور نیز گسترش فضایی، شدت و تداوم غیرعادی گردو خاک را تأیید کرد. در مجموع، تحلیل هم‌زمان بی‌هنجاری‌های آماری و ساختارهای دینامیکی جو، در کنار شاخص AOD، تابش مستقیم (DI)، تابش پراکنده (DIF)، رطوبت خاک و تاوایی، می‌تواند ابزاری برای شناسایی و پیش‌آگاهی رخدادهای حدی گردو خاک فراهم آورد.

کلمات کلیدی: گردو خاک، رویکرد تلفیقی، هم‌دید-سنجش از دور، غرب و جنوب غرب ایران

مقدمه

گردوخاک یکی از مهم‌ترین چالش‌های محیط‌زیستی و اقلیمی در بسیاری از مناطق جهان، به‌ویژه مناطق خشک و نیمه‌خشک است. این پدیده پیامدهای گسترده‌ای بر سلامت انسان، کشاورزی، صنعت، کاهش دید افقی و عملکرد سامانه‌های حمل‌ونقل دارد (بارکان^۱ و همکاران، ۲۰۰۵). در مقیاس وسیع‌تر، گردوخاک می‌تواند چرخه‌های زیست‌کره‌ای، فرایندهای ژئوشیمیایی و حتی اقلیم جهانی را تحت تأثیر قرار دهد (لاو^۲ و همکاران، ۲۰۰۶). ذرات معلق ناشی از گردوخاک علاوه بر تهدید سلامت انسان، با تغییر ویژگی‌های تابشی و ابرناکی، چرخه بارش و بودجه انرژی جو را نیز دگرگون می‌کنند (صلاحی، ۱۳۹۴، عباسی و همکاران، ۱۳۷۸).

ایران به دلیل قرارگیری در کمربند خشک و نیمه‌خشک جهانی و مجاورت با کانون‌های عمده گردوخاک در کشورهای همسایه مانند عراق، سوریه، عربستان و افغانستان، یکی از کشورهای بسیار آسیب‌پذیر در برابر این پدیده است (فرهادی‌پور و همکاران، ۱۳۹۶). علاوه بر منابع خارجی، وجود منابع داخلی مانند دشت خوزستان و تالاب خشک‌شده هورالعظیم نیز نقش مهمی در تشدید گردوخاک دارد (فولادوند و همکاران، ۱۳۹۲). هم‌زمانی منابع برون‌مرزی و داخلی، پیچیدگی رژیم گردوخاک جنوب‌غرب ایران را افزایش داده است (فرهادی‌پور و همکاران، ۱۳۹۶).

گردوخاک صرفاً یک مسئله محلی یا منطقه‌ای نیست، بلکه بازتابی از تغییرات اقلیمی در مقیاس جهانی است. تشدید خشکسالی‌ها، افزایش دما، کاهش پوشش گیاهی و تغییر الگوهای بارش، زمینه‌ساز فعال شدن کانون‌های جدید گردوخاک و افزایش فراوانی رخدادهای آن

شده‌اند. مطالعه این پدیده نه تنها برای مدیریت مخاطرات زیست‌محیطی و اجتماعی در حال حاضر ضروری است، بلکه برای درک روندهای آینده اقلیم و تدوین راهبردهای سازگاری با تغییر اقلیم نیز اهمیت بنیادین دارد (ابراهیمی خوسفی و همکاران، ۲۰۲۰؛ میری، ۲۰۲۱؛ WMO، ۲۰۲۵). مطالعات بین‌المللی اخیر نشان می‌دهند که طوفان‌های گردوخاک نه تنها پدیده‌ای منطقه‌ای بلکه یک چالش جهانی مرتبط با تغییرات اقلیمی هستند. مطالعات بین‌المللی اخیر نشان می‌دهند که طوفان‌های گردوخاک به‌طور فزاینده‌ای با تغییرات اقلیمی پیوند خورده‌اند؛ برای مثال، پژوهش‌های لی^۳ و همکاران (۲۰۲۵) و چن^۴ و همکاران (۲۰۲۴) افزایش فراوانی و شدت طوفان‌های گردوخاک در شرق آسیا را گزارش کرده‌اند و پونز و همکاران (۲۰۲۵) اثرات فرامنطقه‌ای گردوخاک آفریقا بر اروپا را نشان داده‌اند.

پدیده‌ی گردوخاک در دهه‌های اخیر به‌طور گسترده در مناطق مختلف جهان مورد مطالعه قرار گرفته است. در شمال آفریقا و حوضه مدیترانه، کیوتال^۵ و البرت^۶ (۲۰۰۵) نشان دادند که ناوهای منشأ گرفته از کم‌فشار ایسلند همراه با پرفشار جنب‌حاره‌ای، عامل اصلی انتقال غبار صحرای آفریقا است. در شرق آسیا، گائو^۷ و همکاران (۲۰۱۱) تأکید کردند کاهش بارش و پوشش گیاهی، خشکی خاک و افزایش زمین‌های شنی از مهم‌ترین محرک‌های طوفان‌های گردوخاک معرفی کردند. مطالعات جدیدتر نیز بر ماهیت فراگیر انتقال ذرات تأکید دارند؛ به‌گونه‌ای که ذرات گردوخاک می‌توانند هزاران کیلومتر دورتر از منبع اولیه منتقل شده و ویژگی‌های تابشی و چرخه بارش مناطق دوردست را تغییر دهند (کالندرسکی و همکاران، ۲۰۱۴). در سال‌های اخیر، ادبیات بین‌المللی گردوخاک از رویکردهای توصیفی

⁵ kutiel

⁶ Alpert

⁷ Gao

¹ Barkan

² Lau

³ Li

⁴ Chen

صرف به سمت تحلیل‌های فرایندمحور و بررسی نقش هم‌زمان شرایط سطحی و آرایش‌های دینامیکی جو حرکت کرده است. برای نمونه، پژوهش‌های منتشرشده در نشریات بین‌المللی نشان داده‌اند که شکل‌گیری و تداوم رخداد‌های حدی گردوفاک حاصل برهم‌کنش پیچیده میان خشکی سطح زمین، منابع فعال گردوفاک و الگوهای هم‌دیدي و بالاجوی است (Notaro et al., 2013؛ Goudie, 2014). همچنین مطالعات اخیرتر، از جمله (Dehshiri et al., 2023؛ Beyranvand et al., 2023) و (Rahdari et al., 2024)، با بهره‌گیری از داده‌های بازتحلیل و سنجش از دور، بر ضرورت تحلیل هم‌زمان سازوکارهای دینامیکی و شرایط سطحی در مقیاس منطقه‌ای و فرامنطقه‌ای تأکید کرده‌اند. این تحول رویکردی نشان می‌دهد که تبیین رخداد‌های حدی گردوفاک مستلزم چارچوبی یکپارچه و چندترازی است. در ایران نیز پژوهش‌های متعددی انجام شده که هر یک بخشی از سازوکار گردوفاک را روشن کرده‌اند. میری و همکاران (۱۳۹۳) بیابان‌های عراق و سوریه را به‌منزله کانون‌های اصلی گردوفاک غرب ایران معرفی کردند. هرمزی و همکاران (۱۳۹۸) و امیدوار و همکاران (۱۳۹۶) نقش الگوهای هم‌دیدي خاص، از جمله زبان‌های پرارتفاع و کم‌فشار سودانی، را در تشدید رخداد‌های گردوفاک برجسته کرده‌اند. مطالعات دیگر نیز نشان داده‌اند که تضعیف پرفشارهای جنب‌حاره‌ای و نفوذ چرخنده‌های مهاجر، مسیر انتقال گردوفاک به غرب و جنوب‌غرب ایران را هموار می‌کند (ذوالفقاری و همکاران، ۱۳۸۶؛ خسروی، ۱۳۸۷؛ رئیس‌پور و همکاران، ۱۳۸۹). پژوهش‌های جدیدتر در ایران ابعاد تازه‌ای از مسئله را نمایان ساخته‌اند. عبادی و همکاران (۲۰۲۵) روند افزایشی فراوانی و شدت رخداد‌های گردوفاک در غرب ایران و ارتباط آن با بی‌هنجاری‌های بارش را گزارش کردند. بیرانوند و همکاران (۲۰۲۳) و یوسفی کبریا و همکاران (۲۰۲۵) نقش خشک‌شدن تالاب‌ها و

تغییر کاربری اراضی را در فعال‌سازی منابع جدید گردوفاک نشان دادند. همچنین رهداری و همکاران (۲۰۲۴) و دهشیری و همکاران (۲۰۲۴) بر نقش هم‌زمان شرایط سطحی و سازوکارهای دینامیکی جو در تشدید روند بلندمدت گردوفاک تأکید کرده‌اند.

جمع‌بندی مطالعات پیشین نشان می‌دهد که اگرچه تحلیل‌های آماری، هم‌دیدي و سنجش‌ازدور هر یک به‌طور جداگانه در بررسی گردوفاک به‌کار رفته‌اند، تمرکز بر تبیین فرایندمحور «چرایی» رخداد‌های حدی و تمایز آن‌ها از رخداد‌های متعارف کمتر مورد توجه قرار گرفته است. به‌ویژه، نقش هم‌زمانی شرایط سطحی غیرعادی با آرایش‌های دینامیکی خاص در لایه‌های میانی و بالایی جو، غالباً به‌صورت ضمنی و نه به‌منزله سازوکار اصلی تحلیل شده است.

پژوهش حاضر با تمرکز بر رخداد گردوفاک ۱۵-۱۸ مه ۲۰۲۲ (۲۵-۲۸ اردیبهشت ۱۴۰۱)، به‌دنبال تبیین این پرسش است که چرا این رخداد نسبت به رخداد‌های متعارف منطقه از نظر شدت و تداوم متمایز بوده است. یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهد که رخداد مه ۲۰۲۲ به‌طور معنی‌داری حاصل یک برهم‌کنش غیرمعمول و هم‌افزا میان خشکی شدید سطح زمین، تقویت تاوایی در لایه‌های پایین و میانی جو و واگرایی بالایی ناشی از آرایش جریان جت در تراز فوقانی بوده است؛ سازوکاری که منجر به تداوم برداشت، خیزش و انتقال افقی-قائم ذرات گردوفاک در تمام مراحل رخداد شده است.

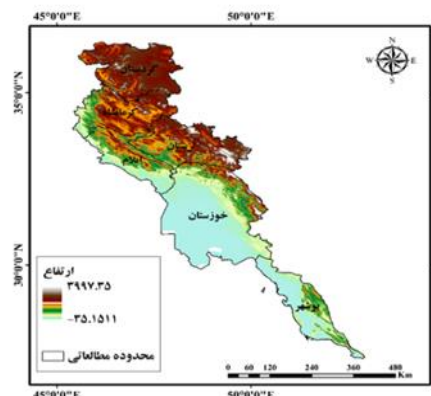
بدین منظور، در این پژوهش از ترکیب تحلیل آماری بلندمدت (۲۰۰۰-۲۰۲۵)، تحلیل بی‌هنجاری رخداد شاخص و تحلیل هم‌دیدي چندترازی مبتنی بر داده‌های بازتحلیل ERA5 و سنجش‌ازدور استفاده شده است. نوآوری این مطالعه نه در به‌کارگیری ابزارها، بلکه در ارائه یک چارچوب تبیینی یکپارچه برای شناسایی سازوکارهای دینامیکی متمایز رخداد‌های حدی

گردوخاک در مناطق خشک و نیمه‌خشک نهفته است؛ چارچوبی که می‌تواند در بهبود پایش، پیش‌آگاهی و مدیریت مخاطرات گردوخاک کاربرد داشته باشد.

روش پژوهش

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، بخشی از منطقه غرب و جنوب غرب ایران است که به طور خاص استان های کرمانشاه، کردستان، ایلام، خوزستان، بوشهر، لرستان را دربر گرفته است. این محدوده در مختصات جغرافیایی ۲۶ تا ۳۷ درجه عرض شمالی و ۴۵ تا ۵۳ درجه طول شرقی قرار دارد. مساحت این منطقه بالغ بر ۳۸۷،۳۱۰ کیلومتر مربع است که معادل ۱۱/۴۵ درصد از مساحت کشور است. حدود ۱۲ میلیون نفر در این بخش از کشور زندگی می‌کنند. موقعیت منطقه در شکل ۱ نمایش داده شده است.



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی و کوهساری منطقه مورد مطالعه

روش کار و داده ها

این پژوهش با رویکردی تلفیقی شامل تحلیل‌های آماری، هم‌دیدگی و سنجش از دور، به بررسی جامع پدیده گردوخاک در غرب و جنوب غرب ایران می‌پردازد. برای این منظور از داده‌های چندمنبعی شامل داده‌های ماهواره‌ای (به منظور استخراج متغیرهای گردوخاک و اعتبارسنجی نتایج)، داده‌های ایستگاه‌های هم‌دیدگی

سازمان هواشناسی کشور و ایستگاه‌های پایش آلودگی محیط‌زیست (برای شناسایی رخداد‌های شاخص گردوخاک) و نیز داده‌های بازتحلیل ERA5 (برای تحلیل هم‌دیدگی) استفاده شده است. داده‌های بازتحلیل ERA5 که توسط مرکز پیش‌بینی میان‌مدت هواشناسی اروپا (ECMWF) تولید می‌شوند، به دلیل تفکیک مکانی بالا (حدود $0/25^\circ \times 0/25^\circ$ درجه)، تفکیک زمانی ساعتی و بازنمایی دقیق‌تر میدان‌های جوی، امکان تحلیل ساختارهای هم‌دیدگی و دینامیکی مؤثر بر رخداد‌های گردوخاک را در ترازهای مختلف جو فراهم می‌سازند. این ویژگی‌ها موجب بهبود شناسایی الگوهای فشار سطحی، ارتفاع ژئوپتانسیلی، میدان باد و شاخص‌های دینامیکی نسبت به مجموعه داده‌های بازتحلیل با تفکیک مکانی پایین‌تر شده است. به منظور پردازش داده‌ها و ترسیم نقشه‌های هم‌دیدگی از نرم‌افزار Analysis and Display System (GrADS) استفاده شد. این نرم‌افزار با قابلیت خواندن داده‌های بازتحلیل، ترکیب متغیرهای چندلایه و محاسبه شاخص‌های دینامیکی نظیر گرادیان فشار، تاوایی، فرارفت و واگرایی، ابزار مناسبی برای تحلیل هم‌دیدگی در این پژوهش محسوب می‌شود.

مراحل اجرای پژوهش در چهار گام اصلی انجام شده است که در ادامه تشریح می‌شود.

تحلیل آماری بلندمدت

در گام نخست، داده‌های آماری مربوط به متغیرهای مرتبط با گردوخاک شامل عمق نوری هواویز (AOD)، واداشت تابشی مستقیم (DI)، واداشت تابشی خالص (DSR)، تابش پراکنده (DIF)، گردوخاک پراکنده (DU)، گردوخاک پراکنده همراه با ذرات (DUS) PM2.5 و رطوبت خاک (Soil Moisture) استخراج شدند. این داده‌ها طی دوره زمانی ۲۰۲۵-۲۰۰۰ (۲۵)

ساله)، از محصولات ماهواره‌ای و بازتحلیل شامل MODIS MAIAC مجموعه (MCD19A2)، نسخه ۰۶۱ (برای شاخص عمق نوری هواویز (AOD) با تفکیک مکانی ۱ کیلومتر و تفکیک زمانی روزانه، بازتحلیل⁸ MERRA-2 برای شاخص گردوفاک (DUS) با تفکیک مکانی حدود $(0/5^\circ \times 0/5^\circ)$ و تفکیک زمانی ساعتی، و GLDAS-2 برای رطوبت خاک با تفکیک مکانی ۰/۲۵ درجه استفاده شد. همچنین مؤلفه‌های تابشی از محصول MODIS MCD18A1 با تفکیک مکانی ۱ کیلومتر استخراج گردید. به منظور تطبیق داده‌های ماهواره‌ای با مقیاس ایستگاهی، برای هر یک از شش ایستگاه منتخب، مختصات جغرافیایی تعریف و میانگین فضایی پیکسل‌های واقع در محدوده پیرامونی ایستگاه با استفاده از تابع `reduceRegion` در محیط `Google Earth Engine` و با مقیاس متناظر هر محصول محاسبه شد. بدین ترتیب، سری‌های زمانی روزانه منسجم و قابل مقایسه برای تحلیل آماری تولید گردید و داده‌های خروجی در محیط برنامه‌نویسی `Python` مورد پردازش و تحلیل آماری قرار گرفتند. این داده‌ها به دلیل پوشش مکانی گسترده، دقت و کیفیت بالا و دسترسی آزاد، امکان بررسی روندهای بلندمدت گردوفاک و متغیرهای تابشی مرتبط را فراهم می‌کنند. تحلیل آماری در این مرحله در سه سطح انجام گرفت:

- تحلیل توصیفی: محاسبه شاخص‌هایی مانند میانگین، میانه، انحراف معیار و دامنه تغییرات متغیرها.
- تحلیل روند: بررسی تغییرات سالانه، فصلی و ماهانه متغیرهای مورد نظر به منظور شناخت رفتار بلندمدت پدیده.
- تحلیل همبستگی: بررسی ارتباط آماری بین متغیرهای گردوفاک، مؤلفه‌های تابشی و

رطوبت خاک با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون.

شناسایی و تحلیل آماری یک رخداد گردوفاک

به منظور تحلیل دقیق رفتار کوتاه‌مدت گردوفاک، رخدادهای شدید با استفاده از داده‌های ایستگاهی سازمان هواشناسی کشور و بر اساس معیار دید افقی کمتر از ۱۰۰۰ متر و تداوم بیش از ۲۴ ساعت در ایستگاه‌های منتخب شناسایی شدند. از میان این رخدادهای گردوفاک ۱۵ تا ۱۸ مه ۲۰۲۲ (۲۵-۲۸ اردیبهشت ۱۴۰۱) به منزله رخداد شاخص انتخاب شد و تحلیل آماری مشابه تحلیل بلندمدت، با تمرکز زمانی بر این بازه انجام گرفت. برای ارزیابی میزان غیرعادی بودن این رخداد نسبت به شرایط اقلیمی مرجع، تحلیل بی‌هنجاری آماری نیز انجام شد. در این راستا، اقلیم بلندمدت ماه مه در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۵ به منزله مبنای مقایسه در نظر گرفته شد و مقادیر متغیرهای کلیدی گردوفاک در رخداد مه ۲۰۲۲ با توزیع آماری این دوره مقایسه گردید. بی‌هنجاری متغیرها با استفاده از شاخص `Z-score` محاسبه شد تا میزان انحراف رخداد از رفتار نرمال اقلیمی مشخص شود. علاوه بر این، برای تفسیر دقیق‌تر، جایگاه مقادیر رخداد مه ۲۰۲۲ بر روی توزیع آماری بلندمدت ماه مه با استفاده از هیستوگرام، منحنی گاوسی و نمودارهای جعبه‌ای بررسی شد. این تحلیل امکان تشخیص رخدادهای حدی و تمایز آن‌ها از نوسانات معمول اقلیمی را فراهم می‌سازد و پیوندی منطقی میان تحلیل بلندمدت و تحلیل رخداد شاخص برقرار می‌کند.

تحلیل هم‌دید - دینامیک رخداد گردوفاک

به منظور بررسی ساختارهای هم‌دید و شرایط دینامیکی حاکم بر رخداد گردوفاک مه ۲۰۲۲، از داده‌های

⁸ (NASA/GSFC/MERRA/aer/2)

مرزی فوقانی و پایین جو با دقت بیشتری قابل تحلیل باشد (Notaro et al., 2013; Goudie, 2014).

بهره‌گیری از این ترکیب‌های هدفمند امکان تحلیل یکپارچه سازوکارهای افقی و قائم گردوخاک را فراهم کرده و در شناسایی مناطق مستعد تولید، تشدید و انتقال ذرات نقش مؤثری ایفا می‌کند (گودی^{۱۰}، ۲۰۱۴؛ نوتارو^{۱۱} و همکاران، ۲۰۱۳). علاوه بر نقشه‌های هم‌دیدگی مطلق، به‌منظور ارزیابی میزان غیرعادی بودن ساختارهای هم‌دیدگی رخداد گردوخاک مه ۲۰۲۲، نقشه‌های بی‌هنجاری (Anomaly) نیز تهیه و تحلیل شدند. در این راستا، بی‌هنجاری فشار سطح دریا و ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال با تفاضل مقادیر روزهای رخداد (۱۷، ۱۵ و ۱۸ مه ۲۰۲۲) از میانگین بلندمدت همان روزها در دوره مرجع محاسبه گردید. همچنین، برای بررسی پایداری و تداوم این انحراف‌ها، نقشه بی‌هنجاری میانگین کل دوره رخداد نیز ترسیم شد. تحلیل هم‌دیدگی بی‌هنجاری‌ها به‌منزله مکمل تحلیل آماری بی‌هنجاری، امکان پیونددهی منسجم میان انحراف‌های آماری و بازتاب فضایی-دینامیکی آن‌ها در ساختار جو را فراهم می‌سازد و بستر لازم برای تبیین چرایی شدت و تداوم رخداد گردوخاک مه ۲۰۲۲ را مهیا می‌کند.

سنجش از دور و اعتبارسنجی تحلیل‌ها

به‌منظور تحلیل ساختار زمانی-مکانی گردوخاک و کمی‌سازی شدت و گستره فضایی آن، از داده‌های سنجش از دور سنجنده MODIS استفاده شد. برای بررسی بصری رخداد ۱۵-۱۸ مه ۲۰۲۲، تصاویر True Color به‌منظور شناسایی مسیر انتقال افقی و گسترش فضایی گردوخاک و تصاویر Dust RGB برای تشخیص شدت، تمرکز و ساختار قائم ذرات معلق به کار گرفته شدند. این تصاویر به‌منزله ابزار مکمل در تفسیر

بازتحلیل ERA5 در سطوح مختلف جو شامل فشار سطح دریا، ارتفاع ژئوپتانسیلی و مؤلفه‌های باد مداری و نصف‌النهاری استفاده شد. داده‌ها با بهره‌گیری از نرم‌افزار Grid Analysis and Display System (GrADS) پردازش و در قالب نقشه‌های هم‌دیدگی چندلایه ترکیب شدند تا نمایی یکپارچه از برهم‌کنش لایه‌های مختلف جو و سازوکارهای مؤثر در شکل‌گیری و گسترش گردوخاک ارائه شود. در همین راستا، سه دسته نقشه ترکیبی طراحی شدند که هر یک متشکل از سه متغیر کلیدی در ترازهای مختلف جو هستند و با هدف تحلیل هم‌زمان شرایط پایداری، واگرایی بالایی، انتقال افقی و قائم ذرات گردوخاک در نظر گرفته شدند. (حمیدی و همکاران، ۲۰۱۳؛ میدلتون^۹، ۲۰۱۷). در ترکیب نخست، فشار سطح دریا به‌صورت پلات رنگی، ارتفاع ژئوپتانسیلی در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال به‌صورت پربند و بردار باد در تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال نمایش داده شد. این ترکیب امکان تحلیل هم‌زمان الگوهای فشار سطحی، ناهما و پشته‌های تراز میانی و موقعیت و شدت جریان‌های جتی را فراهم کرده و نقش آن‌ها را در تقویت صعود و انتقال قائم ذرات گردوخاک آشکار می‌سازد. در ترکیب دوم، تاوایی نسبی در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در کنار جت در تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال و باد سطحی ۱۰ متری به‌کار گرفته شد تا شرایط ناپایداری قائم، واگرایی بالایی و تأثیر آن‌ها بر خیزش گردوخاک از سطح زمین بررسی شود. در ترکیب سوم، که با تمرکز بر دینامیک لایه‌های نزدیک به سطح طراحی شد، به‌جای باد ۱۰ متری از باد تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال در کنار تاوایی تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال و جت تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال استفاده گردید. این انتخاب با هدف کاهش اثر ناهمگنی‌های موضعی سطح زمین و برجسته‌سازی میدان جریان نماینده‌تر در مقیاس هم‌دیدگی انجام شد، به‌گونه‌ای که انتقال افقی و جابه‌جایی توده‌های گردوخاک در لایه

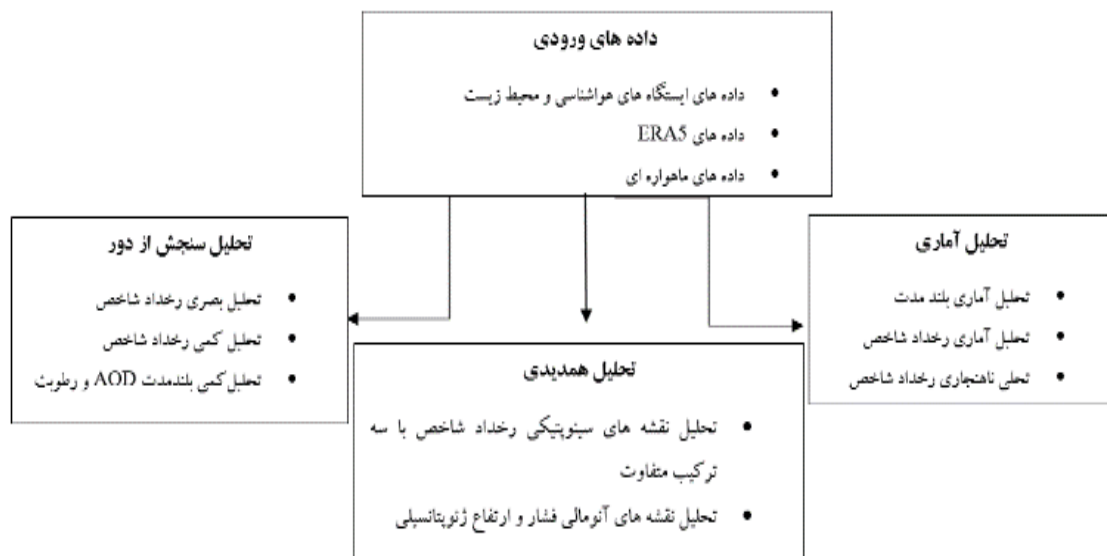
¹⁰ Goudie

¹¹ Notaro

⁹ Middleton

مراحل آغاز، اوج و فروکش رخداد و اعتبارسنجی نتایج تحلیل‌های آماری و هم‌دید مورد استفاده قرار گرفتند. به منظور کمی‌سازی رفتار گردوفاک در مقیاس رخداد، شاخص گردوفاک پراکنده همراه با ذرات ریز (DUS) به‌منزله نماینده بار ذرات PM2.5 استخراج و با میانگین اقلیمی ماه مه در دوره ۲۰۰۰-۲۰۲۵ مقایسه شد تا شدت و ماهیت ناهنجار رخداد مه ۲۰۲۲ به صورت کمی ارزیابی گردد. علاوه بر رخداد شاخص، برای بررسی رفتار بلندمدت گردوفاک در مقیاس منطقه‌ای، شاخص AOD ماه مه طی دوره ۲۰۰۰-۲۰۲۵ به صورت پیکسل مینا محاسبه و بر اساس آستانه‌های شدت به پنج طبقه تقسیم شد. مساحت هر طبقه استخراج و نتایج

به صورت میانگین‌های پنج‌ساله ارائه گردید. تا تغییرات سطح پوشش گردوفاک و پایداری پهنه‌های فعال مشخص شود. تغییرات بلندمدت رطوبت خاک نیز به‌منزله متغیر زمینه‌ای مؤثر بر فعال‌سازی منابع گردوفاک از طریق تحلیل روندها و الگوهای فضایی بررسی شد. در مجموع، تحلیل سنجش از دور در این پژوهش با پیوند بررسی بصری، تحلیل پیکسل مینا و کمی‌سازی مساحتی، نقش مؤثری در تبیین شدت و تداوم رخداد گردوفاک مه ۲۰۲۲ و جایگاه آن در چارچوب تغییرپذیری بلندمدت منطقه‌ای ایفا می‌کند. شکل ۲ روش کار را به صورت جامع با فلوجارت نمایش می‌دهد.



شکل ۲- فلوجارت روش کار

نتایج و بحث

تحلیل توصیفی آمار بلندمدت متغیرهای گردوفاک تحلیل آماری بلندمدت داده‌های گردوفاک، مؤلفه‌های تابشی و شرایط سطحی طی بازه ۲۰۰۰-۲۰۲۵، تصویری جامع از رفتار اقلیمی این پدیده در منطقه مورد

مطالعه می‌دهد. نتایج آمار توصیفی (جدول ۱) نشان می‌دهد. که شاخص‌های گردوفاک شامل AOD، DU و DUS دارای نوسانات قابل توجهی هستند. شاخص AOD، به‌منزله نماینده‌ی شدت بار ذرات معلق جوی، در این بازه با میانگین ۰/۲۱۹ و دامنه تغییرات گسترده (تا حدود ۳/۳) همراه بوده است که بیانگر وقوع رخداد‌های گردوفاک شدید در برخی سالهاست. افزایش مقادیر DU و DUS با کاهش تابش مستقیم (DI) و افزایش

قابل توجهی را تجربه کرده است. بررسی هم‌زمان تغییرات AOD و رطوبت خاک نشان می‌دهد که در دوره‌های خشک‌تر، شدت و فراوانی گردوخاک افزایش یافته است؛ امری که بیانگر نقش کلیدی خشکی سطح زمین و کاهش بارندگی در تسهیل خیزش و انتقال ذرات غباری در منطقه مورد مطالعه است.

تابش پراکنده (DIF) هم‌زمان بوده و نشان‌دهنده نقش مؤثر گردوخاک در تغییر رژیم تابشی جو است. مقدار میانگین تابش خالص (DSR) برابر با ۰/۷۱ بوده، اما در دوره‌های با AOD بالا به‌طور محسوسی کاهش یافته است که حاکی از برهم‌زدن تعادل انرژی سطح زمین در شرایط عبارآلود است. رطوبت خاک نیز با میانگین ۱۸/۹۷ و حداقل حدودی ۹/۲۵ نوسانات

جدول ۱- آمار توصیفی متغیرهای اقلیمی گردوخاک در دوره آماری مورد مطالعه

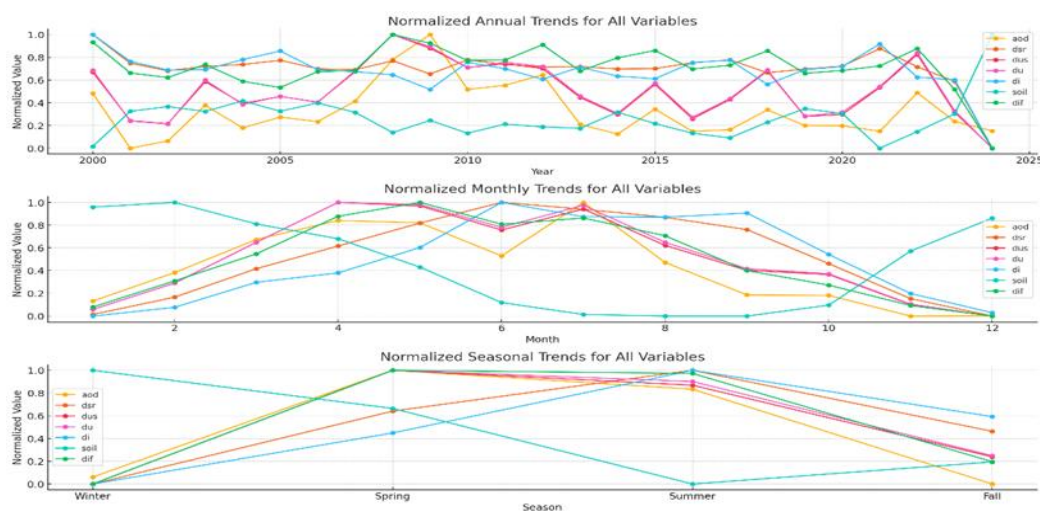
متغیر	تعداد	میانگین	میانه	انحراف معیار	کمینه	بیشینه	٪۲۵	٪۷۵
عمق نوری هواویز (AOD)	۸۲۳۸	۰/۲۲	۰/۱۹	۰/۱۸	۰/۰۳	۳/۲۸	۰/۱۴	۰/۲۵
گردوخاک (DU)	۸۲۳۸	۰/۱۷	۰/۱۵	۰/۱۱	۰/۰۱	۰/۸۹	۰/۰۹	۰/۲۲
گردوخاک معلق (DUS)	۸۲۳۸	۰/۰۹	۰/۰۸	۰/۰۶	۰/۰۱	۰/۴۶	۰/۰۵	۰/۱۱
تابش خالص (DSR)	۸۲۳۸	۰/۷۱	۰/۷۶	۰/۲۴	۰/۰۶	۱/۱۶	۰/۵۲	۰/۹۰
تابش مستقیم (DI)	۸۲۳۸	۰/۴۱	۰/۴۰	۰/۲۴	۰/۰۰	۱/۰۹	۰/۲۵	۰/۵۳
تابش پراکنده (DIF)	۸۲۳۸	۰/۳۰	۰/۲۸	۰/۱۴	۰/۰۵	۰/۸۱	۰/۱۹	۰/۴۱
رطوبت خاک (Soil)	۸۲۳۸	۱۹	۱۸/۶۷	۷/۸۴	۹/۲۶	۳۷/۲۴	۱۰/۷۸	۲۵/۸۶

بعد کاهش یافته و در ماه‌های زمستانی (دسامبر تا فوریه؛ آذر تا بهمن) به کمینه می‌رسد. این الگو تمرکز فعالیت گردوخاک در فصل گرم سال و هم‌زمانی آن با افزایش دما، کاهش رطوبت خاک و تقویت سامانه‌های بادی را نشان می‌دهد. متغیرهای DU و DUS نیز رفتاری مشابه AOD داشته و بیشترین مقادیر آن‌ها در فصل‌های بهار و تابستان (مارس تا اوت؛ فروردین تا مرداد) مشاهده می‌شود که بیانگر افزایش برداشت و معلق شدن ذرات در شرایط سطحی خشک و ناپایدار است. در مقابل، متغیرهای تابشی DI و DSR به‌طور میانگین در فصل‌های گرم میلادی (ژوئن تا اوت؛ خرداد تا مرداد) بیشینه و در فصل‌های سرد کمینه دارند که عمدتاً ناشی از تغییر زاویه تابش خورشید است. با این حال، افزایش قابل توجه تابش پراکنده (DIF) در ماه‌های غبارآلود، نقش مستقیم گردوخاک در تغییر رژیم تابشی جو را تأیید می‌کند. بررسی روند بلندمدت رطوبت خاک نیز کاهش معنی‌داری را نشان می‌دهد؛ به گونه‌ای که مقادیر آن در ماه‌های گرم (ژوئن تا سپتامبر؛ خرداد تا شهریور) به

روند تغییرات بلند مدت متغیرهای گردوخاک بررسی روند تغییرات سالانه شاخص عمق نوری هواویز (AOD) طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۵ (شکل ۳) نشان‌دهنده یک روند افزایشی تدریجی است که بیانگر تشدید بار ذرات معلق در جو می‌باشد. این روند می‌تواند بازتابی از افزایش فراوانی و شدت رخداد‌های گردوخاک، تشدید خشکسالی‌ها، کاهش پوشش گیاهی و تغییرات اقلیمی منطقه‌ای باشد. کاهش مقدار AOD در سال ۲۰۲۵ ناشی از ناقص بودن داده‌ها تا زمان استخراج (ماه‌های ابتدایی سال) بوده و این سال در محاسبه و تفسیر روند بلندمدت به‌منزله سال کامل لحاظ نگردیده است. تحلیل تغییرات ماهانه و فصلی متغیرها (شکل ۳) نشان می‌دهد که مقدار AOD از ماه مارس (اسفند-فروردین) به تدریج افزایش یافته و در ماه‌های آوریل و مه (فروردین-اردیبهشت و اردیبهشت-خرداد) به بیشینه می‌رسد. این مقادیر در ماه‌های ژوئن و ژوئیه (خرداد-تیر و تیر-مرداد) در سطوح بالایی باقی مانده و از سپتامبر (شهریور-مهر) به

تأیید کرده‌اند. روند نزولی رطوبت خاک و نقش آن در تشدید فرسایش بادی نیز با یافته‌های (Shao 2008) و Baddock et al (2011) هم‌راستا است. در مجموع، تحلیل روند بلندمدت نشان می‌دهد که افزایش AOD و متغیرهای مرتبط با گردوفاک، همراه با کاهش تدریجی رطوبت خاک، بیانگر تشدید شرایط اقلیمی مساعد برای رخداد‌های گردوفاک است؛ شرایطی که بستر لازم برای بروز رخداد‌های حادی مانند گردوفاک مه ۲۰۲۲ را فراهم کرده و پیوندی روشن میان تغییرپذیری بلندمدت اقلیم و رخداد‌های کوتاه‌مدت شدید برقرار می‌کند.

حداقل و در ماه‌های سرد (دسامبر تا فوریه؛ آذر تا بهمن) به حداکثر می‌رسد. این الگوی فصلی با افزایش دمای سطح زمین، تشدید تبخیر و کاهش بارندگی در فصل گرم سازگار بوده و شرایط مساعدی برای خیزش و تداوم گردوفاک فراهم می‌کند. الگوهای زمانی مشاهده‌شده با نتایج مطالعات پیشین در ایران و غرب آسیا هم‌خوانی دارد. برای نمونه، (Prospero et al. 2002) و Ginoux et al. (2012) بیشینه فعالیت گردوفاک را در فصل گرم نیمکره شمالی گزارش کرده‌اند. همچنین Middleton (2017) افزایش AOD و فراوانی رخداد‌های گردوفاک در بهار و تابستان غرب آسیا را



شکل ۳- روند تغییرات سالانه، ماهانه و فصلی متغیرهای گردوفاک (تقسیم‌بندی ماهانه و فصلی بر اساس تقویم میلادی انجام و معادل شمسی تطبیق شده)

و قابل توجهی (ضریب ۰/۵۹) دارد که بیانگر نقش مستقیم افزایش بار ذرات معلق در کاهش شفافیت جو و افزایش ضخامت نوری هواویزهاست. ارتباط معکوس AOD با تابش مستقیم خورشیدی (DI با ضریب -۰/۱۹) و هم‌زمان ارتباط مثبت آن با تابش پراکنده (DIF با ضریب ۰/۳۳) نشان می‌دهد که در شرایط افزایش گردوفاک، سهم تابش مستقیم کاهش یافته و بخش بیشتری از انرژی خورشیدی به صورت پراکنده به سطح زمین می‌رسد. این تغییر در مؤلفه‌های تابشی، بیانگر تأثیر مستقیم ذرات معلق بر رژیم تابشی جو است. علاوه بر این، همبستگی منفی قابل توجه میان تابش مستقیم (DI) و تابش خالص

تحلیل همبستگی متغیرهای گردوفاک

بر اساس نتایج ارائه‌شده در جدول ۲، همبستگی کامل میان متغیرهای DU و DUS ضریب همبستگی برابر با ۱ است. این دو متغیر از نظر فیزیکی به اجزای متفاوتی از بار گردوفاک اشاره دارند، اما به دلیل منشأ مشترک، تغییرات آن‌ها در این دوره کاملاً هم‌جهت بوده است؛ بنابراین ضریب همبستگی کامل به معنای یکسان بودن داده‌ها نیست، بلکه بیانگر پاسخ مشابه آن‌ها به شرایط گردوفاک منطقه است. شاخص عمق نوری هواویز (AOD) نیز با هر دو متغیر DU و DUS همبستگی مثبت

تضعیف رطوبت خاک در دوره‌های افزایش تابش و گردوخاک بوده و نقش شرایط سطحی را در بازخورد میان گردوخاک و مؤلفه‌های اقلیمی برجسته می‌سازد.

(DSR) با رطوبت خاک (به ترتیب با ضرایب $-0/56$ و $-0/71$) نشان می‌دهد که افزایش دریافت انرژی تابشی، به ویژه در شرایط غبار آلود، با کاهش رطوبت سطح زمین همراه است. این رابطه حاکی از تشدید فرایند تبخیر و

جدول ۲- همبستگی آماری بین متغیرهای گردوخاک

متغیر	aod	dsr	dus	du	di	soil	dif
aod	۱	۰	۰/۵۹	۰/۵۹	-۰/۱۹	-۰/۰۲	۰/۳۳
dsr	۰	۱	۰/۲۵	۰/۲۶	۰/۸۲	-۰/۷۱	۰/۲۹
dus	۰/۵۹	۰/۲۵	۱	۱	-۰/۰۵	-۰/۲۲	۰/۵
du	۰/۵۹	۰/۲۶	۱	۱	-۰/۰۵	-۰/۲۳	۰/۵۱
di	-۰/۱۹	۰/۸۲	-۰/۰۵	-۰/۰۵	۱	-۰/۵۶	-۰/۳۲
soil	-۰/۰۲	-۰/۷۱	-۰/۲۲	-۰/۲۳	-۰/۵۶	۱	-۰/۲۳
dif	۰/۳۳	۰/۲۹	۰/۵	۰/۵۱	-۰/۳۲	-۰/۲۳	۱

افزایش هم‌زمان تابش پراکنده (DIF) را نشان می‌دهد. همبستگی منفی قوی بین AOD و DI ($-0/77$) و همبستگی مثبت آن با DIF ($0/87$) مؤید نقش غالب ذرات گردوخاک در تضعیف تابش مستقیم و تقویت پراکندگی تابش خورشیدی را تأیید می‌کند. کاهش محسوس رطوبت خاک (میانگین حدود ۱۵ واحد) بیانگر شرایط خشکی سطح زمین در زمان رخداد بوده و می‌تواند به منزله یکی از عوامل زمینه‌ای مؤثر در تشدید برداشت و خیزش ذرات گردوخاک در نظر گرفته شود. هم‌خوانی این نتایج با الگوی شناسایی شده در تحلیل بلندمدت، نشان می‌دهد که رخداد مه ۲۰۲۲ نمونه‌ای تشدید شده از رفتار اقلیمی غالب منطقه است. نکته قابل توجه در این رخداد، نسبت مقادیر DU به DUS است. غلبه نسبی ذرات درشت‌تر (DU) نسبت به ذرات ریز ($PM_{2.5}$) حاکی از آن است که ترکیب گردوخاک این رخداد بیشتر با منشأ طبیعی سازگار بوده است. هر چند تعیین منشأ قطعی نیازمند تحلیل‌های تکمیلی منبع‌یابی است، این الگو از منظر آماری با فرایندهای غالب فرسایش بادی و خشکی سطح زمین هم‌خوانی دارد و

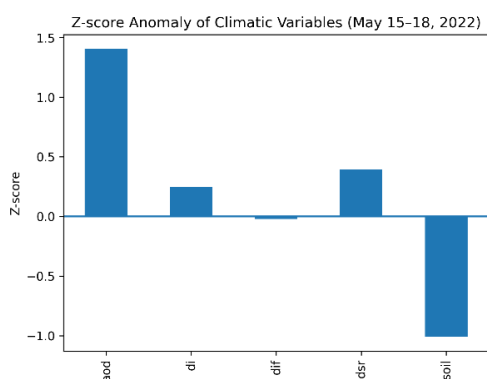
تحلیل آماری رخداد (۱۵ تا ۱۸ ماه مه ۲۰۲۲) ۲۵-۲۸ اردیبهشت ۱۴۰۱))

رخداد شدید گردوخاک در بازه زمانی ۱۵ تا ۱۸ مه ۲۰۲۲ به منزله مطالعه موردی انتخاب شد. معیار انتخاب این رخداد، هم‌زمانی شدت بالا، گستره مکانی وسیع و تداوم چندروزه پدیده در ایستگاه‌های مورد مطالعه، در کنار بروز پاسخ‌های هم‌زمان و منسجم در متغیرهای گردوخاک، تابش و شرایط سطح زمین بوده است. این ویژگی‌ها امکان تحلیل آماری معنادار و مقایسه آن با الگوی بلندمدت را فراهم می‌سازد. بر اساس نتایج آماری جدول ۳، میانگین شاخص AOD در طول این رخداد برابر با $0/577$ بوده و در روز ۱۷ مه به بیشینه $1/25$ رسیده است که بیانگر شدت بالای بار ذرات معلق در جو طی مرحله اوج رخداد است. هم‌زمان، مقادیر DU و DUS نیز نسبت به میانگین بلندمدت افزایش یافته و به ترتیب به $0/436$ و $0/251$ رسیده‌اند که نشان‌دهنده افزایش بار گردوخاک در هر دو بخش ذرات درشت‌تر و ریزتر است. بررسی تغییرات مؤلفه‌های تابشی (شکل ۳)، کاهش چشمگیر تابش مستقیم (DI) و تابش خالص (DSR) و

اهمیت بررسی منطقه‌ای منابع گردوفاک را در مراحل بعدی پژوهش برجسته می‌سازد.

جدول ۳. آمار توصیفی متغیرهای گردوفاک در رخداد مورد مطالعه

متغیر	تعداد	میانگین	میانه	انحراف معیار	کمینه	بیشینه	%۲۵	%۷۵
عمق نوری هواویز (AOD)	۴	۰/۵۸	۰/۴۵	۰/۴۷	۰/۱۶	۱/۲۵	۰/۳۲	۰/۷۱
گردوفاک (DU)	۴	۰/۳۶	۰/۳۷	۰/۰۸	۰/۲۷	۰/۴۴	۰/۳۰	۰/۴۳
گردوفاک معلق (DUS)	۴	۰/۲۱	۰/۲۱	۰/۰۵	۰/۱۶	۰/۲۵	۰/۱۸	۰/۲۴
تابش خالص (DSR)	۴	۰/۹۴	۰/۹۱	۰/۰۷	۰/۸۹	۱/۰۴	۰/۸۹	۰/۹۶
تابش مستقیم (DI)	۴	۰/۵۲	۰/۴۴	۰/۲۵	۰/۳۱	۰/۸۹	۰/۳۸	۰/۵۷
تابش پراکنده (Dif)	۴	۰/۴۲	۰/۴۵	۰/۲۰	۰/۱۵	۰/۶۲	۰/۳۵	۰/۵۲
رطوبت خاک (Soil)	۴	۱۴/۹۷	۱۴/۹۵	۰/۳۷	۱۴/۵۶	۱۵/۴۱	۱۴/۷۵	۱۵/۱۷



شکل ۴ - نمودار Z-score متغیرهای گرد و غبار

بررسی توزیع آماری AOD بر اساس هیستوگرام و برازش منحنی گاوسی اقلیم بلندمدت ماه مه (شکل ۵) نشان می‌دهد که مقدار این شاخص در رخداد مه ۲۰۲۲ در بخش انتهایی توزیع نرمال بلندمدت قرار گرفته و فاصله محسوسی با مقادیر غالب اقلیمی دارد. از آنجا که رخداد مه ۲۰۲۲ تنها شامل چند روز داده است، تعریف یک توزیع آماری مستقل برای آن امکان‌پذیر نبوده و مقدار رخداد به‌درستی به‌منزله یک مشاهده منفرد بر روی توزیع اقلیمی مرجع نمایش داده شده است. این نتیجه نشان می‌دهد که شدت گردوفاک در این رخداد فراتر از دامنه نوسانات معمول اقلیمی ماه مه بوده است.

به‌منظور بررسی میزان انحراف رخداد شدید گردوفاک مه ۲۰۲۲ از الگوی اقلیمی مرجع، تحلیل بی‌هنجاری متغیرهای کلیدی گردوفاک و مؤلفه‌های تابشی انجام شد. در این راستا، اقلیم بلندمدت ماه مه در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۵ به‌منزله مبنای مرجع در نظر گرفته شد و مقادیر رخداد مه ۲۰۲۲ با توزیع بلندمدت متناظر مقایسه گردید. نتایج تحلیل بی‌هنجاری مبتنی بر شاخص Z-score (شکل ۴) نشان می‌دهد که در طول این رخداد، شاخص AOD و متغیرهای مرتبط با گردوفاک (DU) و (DUS) دارای انحراف مثبت معنی‌دار نسبت به میانگین بلندمدت ماه مه بوده‌اند. در مقابل، تابش مستقیم (DI) و تابش خالص (DSR) بی‌هنجاری منفی و تابش پراکنده (DIF) بی‌هنجاری مثبت را نشان می‌دهند. این الگو بیانگر تغییر قابل توجه در رژیم تابشی جو در مقایسه با شرایط نرمال اقلیمی و نقش مؤثر ذرات گردوفاک در تعدیل مؤلفه‌های تابشی است.

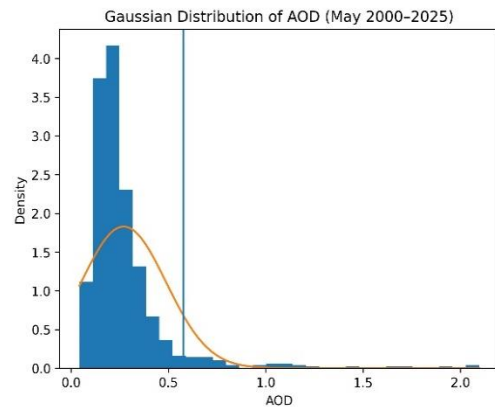
دینامیکی این انحراف‌ها در ساختار جو از طریق بررسی الگوهای هم‌دیدگی بی‌هنجاری فشار سطح دریا و ارتفاع ژئوپتانسیل مورد تحلیل قرار می‌گیرد.

در مجموع، نتایج تحلیل بی‌هنجاری‌ها (اشکال ۴ تا ۶) نشان می‌دهد که رخداد گردو خاک مه ۲۰۲۲ نه تنها از نظر شدت، بلکه از منظر ساختار تابشی و شرایط سطح زمین نیز رفتاری متمایز و غیرنرمال نسبت به الگوی میانگین ۲۵ ساله داشته است. این یافته‌ها پیوندی منسجم میان تحلیل بلندمدت و تحلیل رخداد کوتاه‌مدت برقرار کرده و رخداد مه ۲۰۲۲ را به منزله یک رخداد شاخص و به‌طور معنی‌دار ناهنجار در چارچوب تغییرپذیری اقلیمی منطقه معرفی می‌کند.

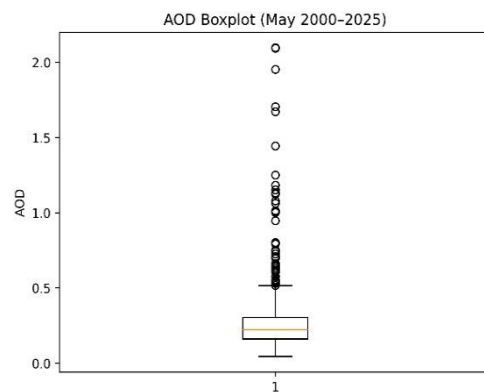
مقایسه نتایج تحلیل بلندمدت ۲۵ ساله با تحلیل رخداد

شاخص مه ۲۰۲۲، با در نظر گرفتن نتایج تحلیل بی‌هنجاری، نشان می‌دهد که متغیرهایی نظیر AOD و رطوبت خاک در هر دو مقیاس زمانی، رفتارهایی سازگار و هم‌راستا از خود نشان داده‌اند و از نظر تشخیص انحراف رخداد‌های حدی از شرایط اقلیمی نرمال دارای حساسیت بالایی هستند. این هم‌راستایی بیانگر آن است که الگوهای آماری شناسایی شده در مقیاس بلندمدت، در رخداد‌های حدی نیز به‌صورت تشدیدشده بروز می‌یابند. افزایش AOD هم‌زمان با کاهش تابش مستقیم (DI) و افزایش تابش پراکنده (DIF) در هر دو تحلیل مشاهده شده و نشان می‌دهد که گردو خاک تأثیر پایدار و قابل تشخیصی بر مؤلفه‌های تابشی جو اعمال می‌کند (جدول ۴). همچنین، روندهای فصلی حاکی از تمرکز رخداد‌های گردو خاک در فصل‌های بهار و تابستان هستند و رخداد مه ۲۰۲۲ نیز به‌طور کامل این الگوی زمانی را بازنمایی می‌کند. لازم به ذکر است که نتایج ارائه‌شده مبتنی بر مقایسه توصیفی، تحلیل بی‌هنجاری و هم‌زمانی تغییرات متغیرهاست و هدف آن ارزیابی سازگاری رفتاری شاخص‌ها در

همچنین، نتایج نمودارهای جعبه‌ای (شکل ۶) نشان می‌دهد که مقادیر AOD رخداد مه ۲۰۲۲ بالاتر از چارک‌های بالایی توزیع اقلیم بلندمدت قرار گرفته‌اند که مؤید ماهیت ناهنجار این رخداد از منظر اقلیمی است.



شکل ۵- نمودار گاوسی عمق نوری هواویز AOD



شکل ۶- نمودار جعبه‌ای عمق نوری هواویز AOD

هم‌زمان، بی‌هنجاری منفی تابش مستقیم (DI) و رطوبت خاک، که پیش‌تر در تحلیل Z-score نیز مشاهده شد، بیانگر تضعیف مؤلفه‌های تابشی مستقیم و تشدید خشکی سطحی هم‌زمان با رخداد گردو خاک است. مشاهده بی‌هنجاری‌های مثبت قابل توجه در شاخص‌های گردو خاک و هم‌زمان بی‌هنجاری منفی رطوبت خاک، این پرسش را مطرح می‌کند که چه سازوکارهای دینامیکی موجب ایجاد و تداوم این انحراف از شرایط نرمال اقلیمی شده‌اند. به‌منظور پاسخ به این پرسش و تکمیل تحلیل بی‌هنجاری آماری، در بخش بعدی بازتاب

پیشین در مناطق خشک و نیمه‌خشک هم‌خوانی دارد؛ به‌گونه‌ای که پژوهش‌های (Middleton 2017) ، (Beyranvand et al. و Ginoux et al. 2012) (2023) نیز بر نقش هم‌زمان افزایش بار گردوفاک، تضعیف تابش مستقیم و خشکی سطح زمین در تشدید رخدادهای گردوفاک تأکید کرده‌اند. این هم‌راستایی نتایج، قابلیت کاربرد شاخص‌هایی مانند AOD ، DI ، DSR ، DIF و رطوبت خاک را در پایش و ارزیابی شرایط گردوفاک و رخدادهای حدی منطقه‌ای تقویت می‌کند.

مقیاس‌های زمانی مختلف است. تعیین سهم نسبی هر یک از متغیرها و استخراج مؤلفه‌های غالب نیازمند به‌کارگیری روش‌هایی مانند تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) است که خارج از اهداف و چارچوب روش‌شناختی این پژوهش قرار دارد. در یک نگاه کلی، یافته‌های این مطالعه نشان می‌دهند که گردوفاک نه تنها از طریق تغییر رژیم تابشی و برهم‌زدن تعادل انرژی سطح زمین نقش مؤثری در سیستم اقلیمی منطقه ایفا می‌کند، بلکه با کاهش رطوبت خاک و تشدید خشکی سطحی، در قالب یک چرخه بازخوردی با تغییرات اقلیمی و زیست‌محیطی منطقه‌ای در تعامل است. نتایج حاضر با یافته‌های مطالعات

جدول ۴- نقش متغیرهای کلیدی در تحلیل کوتاه‌مدت و بلندمدت رخدادهای گردوفاک

متغیر	نقش در تحلیل (بلندمدت / کوتاه‌مدت)	توضیح مختصر
عمق نوری هواویز (AOD)	اصلی‌ترین شاخص (بلندمدت و رخداد مه ۲۰۲۲)	تعیین شدت و گستره پدیده
تابش مستقیم (DI)	حساسیت بالا در رخداد کوتاه‌مدت	کاهش لحظه‌ای آن نشانگر افزایش ذرات معلق
تابش پراکنده (DIF)	مؤثر در هر دو مقیاس	بیانگر پراکندگی تابش در شرایط غبارآلود
گردوفاک معلق (DU/DUS)	نقش تکمیلی	سنجه‌های غلظت ذرات معلق
رطوبت خاک (Soil)	تقویت‌کننده روند	کاهش آن محرک خیزش و تداوم گردوفاک

هم‌دید، دینامیک جوی حاکم بر هر یک از مراحل رخداد به‌صورت مرحله‌ای و در ترازهای مختلف جو مورد بررسی قرار می‌گیرد تا سازوکارهای مؤثر بر خیزش، تقویت و انتقال ذرات گردوفاک به‌طور دقیق‌تر تفسیر شود.

ترکیب متغیرهای فشار سطحی، ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰hPa و بردار باد تراز ۳۰۰hPa (ترکیب اول)

هدف از این ترکیب، شناسایی الگوهای هم‌دید بزرگ‌مقیاس و تبیین ساختار دینامیکی حاکم بر جو در سه تراز کلیدی شامل سطح زمین، لایه میانی و لایه بالایی جو است؛ به‌گونه‌ای که محرک‌های هم‌دید مؤثر بر مراحل آغاز، اوج و فروکش رخداد گردوفاک به‌صورت یکپارچه مورد بررسی قرار گیرند.

تحلیل هم‌دید- دینامیک جو در رخداد گردوفاک ۱۵ تا ۱۸ ماه مه ۲۰۲۲ (۲۵-۲۸ اردیبهشت ۱۴۰۱)

رخداد گسترده گردوفاک در بازه زمانی ۱۵ تا ۱۸ مه ۲۰۲۲ نمونه‌ای بارز از برهم‌کنش پیچیده سامانه‌های جوی در فرایندهای شکل‌گیری، انتقال و پراکنش ذرات گردوفاک است و می‌تواند به‌منزله یکی از رخدادهای شاخص سال‌های اخیر در منطقه مورد مطالعه شناخته شود. به‌منظور تحلیل هم‌دید این پدیده، ساختارهای فشارسطح دریا، ارتفاع ژئوپتانسیلی، تاوایی، میدان باد و جریان جت در ترازهای مختلف جو مورد ارزیابی قرار گرفتند. این بررسی با هدف تبیین نقش سامانه‌های سطحی، میانی و بالایی جو در مراحل سه‌گانه آغاز، اوج و فروکش رخداد گردوفاک انجام شده است. در این راستا، با تکیه بر سه ترکیب تحلیلی از نقشه‌های

۱۵ مه (شروع رخداد (۲۵ اردیبهشت))

در آغاز رخداد گردو خاک (شکل ۷-الف)، میدان فشار سطح دریا نشان‌دهنده استقرار فشارهای نسبتاً بالاتر بر شمال غرب منطقه مورد مطالعه (شرق مدیترانه، ترکیه و بخش‌هایی از شمال عراق) و هم‌زمان شکل‌گیری یک کم‌فشار در نواحی شرقی و جنوب شرقی دامنه مورد بررسی (جنوب شرق ایران و پیرامون دریای عمان) است. این آرایش فشاری، منجر به ایجاد گرادیان فشاری قابل توجه از نواحی عراق و غرب ایران به سمت نواحی شرقی تر شده و زمینه را برای تقویت بادهای سطحی و برداشت اولیه ذرات گردو خاک از منابع بیابانی عراق و سوریه فراهم می‌کند. در تراز میانی جو (500 hPa)، خمیدگی خطوط ارتفاع ژئوپتانسیلی بیانگر استقرار یک ناوه نسبتاً کم‌عمق بر غرب ایران و عراق است. حضور این ناوه با افزایش ناپایداری دینامیکی و تقویت حرکات صعودی، انتقال بخشی از ذرات گردو خاک به لایه‌های میانی جو را تسهیل می‌کند و نقش مؤثری در آغاز فرایند گسترش عمودی ذرات ایفا می‌کند. در تراز بالایی جو (300 hPa)، جریان غالب غربی تا جنوب غربی حاکم است که اگرچه در این مرحله از رخداد از شدت و سازمان‌یافتگی کمتری نسبت به روزهای بعد برخوردار است، اما با ایجاد پشتیبانی دینامیکی در جلوی ناوه میانی، به تقویت حرکات صعودی و تداوم انتقال اولیه گردو خاک کمک می‌کند. در مجموع، هم‌زمانی گرادیان فشار سطحی، ناپایداری لایه میانی و پشتیبانی نسبی لایه بالایی جو، چارچوب دینامیکی لازم برای آغاز و سازمان‌یافتگی اولیه رخداد گردو خاک و انتقال نخستین توده‌های غبار به سمت نواحی غربی ایران را فراهم ساخته است.

در روز اوج رخداد گردو خاک (شکل ۷-ب)، میدان فشار سطح دریا نشان‌دهنده تعمیق و گسترش کم‌فشار بر نواحی شرقی و جنوب شرقی منطقه مورد مطالعه (جنوب شرق ایران و پیرامون دریای عمان) هم‌زمان با تداوم فشارهای بالاتر بر شمال غرب منطقه است. این آرایش هم‌دیدگی منجر به پیشینه‌شدن گرادیان فشار سطحی بر روی عراق، غرب و بخش‌های مرکزی ایران شده و شرایط لازم برای تقویت بادهای سطحی، افزایش برداشت ذرات و تشدید انتقال افقی گردو خاک را فراهم می‌سازد. در تراز میانی جو (500 hPa)، الگوی ناوه نسبت به روز آغاز رخداد عمیق‌تر و متمرکزتر شده و امتداد آن بخش‌های وسیعی از عراق و غرب ایران را در بر می‌گیرد. این ناوه عمیق با تشدید ناپایداری دینامیکی و افزایش حرکات صعودی، نقش کلیدی در نگهداشت ذرات گردو خاک در جو و انتقال عمودی آنها به لایه‌های میانی ایفا کرده و بستر مناسبی برای گسترش فضایی رخداد فراهم می‌کند. در تراز بالایی جو (300 hPa)، جریان غربی تا جنوب غربی به صورت منسجم‌تر و با شدت بیشتر بر فراز منطقه برقرار بوده و نوار جریان جتی به‌طور مشخص قابل تشخیص است. این جریان قوی بالاجو با ایجاد پشتیبانی دینامیکی مؤثر در جلوی ناوه میانی، موجب تقویت هم‌زمان صعود هوا و انتقال افقی گردو خاک شده و هم‌افزایی میان لایه‌های سطحی، میانی و فوقانی جو را به پیشینه می‌رساند. در مجموع، هم‌زمانی گرادیان فشار شدید سطحی، استقرار ناوه عمیق در تراز میانی و پشتیبانی قوی بالاجو، عامل اصلی اوج‌گیری شدت و گسترش فضایی رخداد گردو خاک در این روز بوده و انتقال گسترده ذرات از منابع غربی (عراق و سوریه) به نواحی مرکزی ایران را تسهیل کرده است.

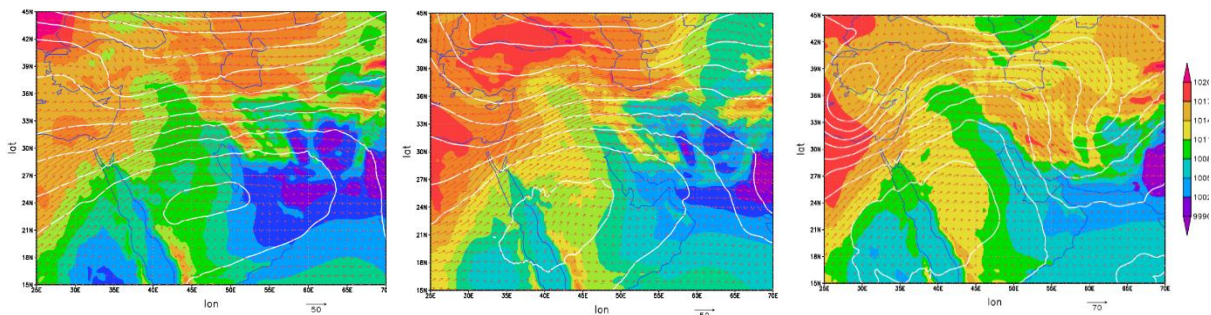
۱۸ مه (فروکش رخداد (۲۸ اردیبهشت))

در روز فروکش رخداد گردو خاک (شکل ۷-ج)، الگوی فشار سطح دریا نسبت به روز اوج یکنواخت‌تر

۱۷ مه (اوج رخداد (۲۷ اردیبهشت))

شده و شدت گرادیان فشار سطحی به‌طور محسوسی کاهش یافته است. این تغییر در میدان فشار به تضعیف بادهای سطحی انجامیده و در نتیجه، نقش آن‌ها در برداشت و انتقال افقی ذرات گردوفاک کاهش یافته است. در تراز میانی جو (500 hPa)، الگوی ناوه نسبت به روزهای پیشین بازتر و کم‌عمق‌تر شده و نشانه‌هایی از کاهش ناپایداری دینامیکی و تضعیف حرکات صعودی مشاهده می‌شود. این وضعیت موجب افت انتقال عمودی ذرات و کاهش توان نگهداشت آن‌ها در لایه‌های میانی جو شده است.

جریان جت تا حدودی جابه‌جا شده است. این تغییرات با کاهش واگرایی مؤثر در لایه‌های فوقانی همراه بوده و پشتیبانی دینامیکی بالاجو را تضعیف کرده است؛ عاملی که شرایط را برای ته‌نشینی تدریجی ذرات گردوفاک فراهم می‌سازد. در مجموع، تضعیف هم‌زمان گرادیان فشار سطحی، کاهش ناپایداری لایه میانی و افت پشتیبانی دینامیکی بالاجو، به فروپاشی سازوکارهای مؤثر در خیزش و انتقال گردوفاک انجامیده و زمینه را برای کاهش تدریجی غلظت ذرات و پایان یافتن رخداد در منطقه فراهم کرده است.



ج

ب

الف

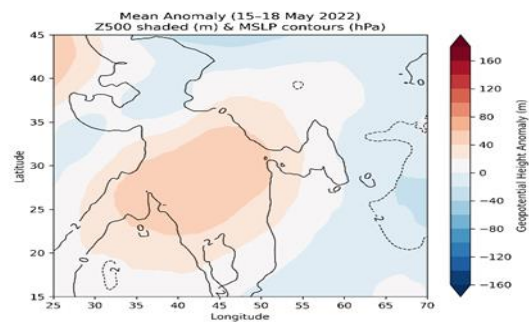
شکل ۷- تحلیل هم‌دید رخداد گردوفاک در بازه ۱۵ تا ۱۸ مه ۲۰۲۲ (۲۵-۲۸ اردیبهشت ۱۴۰۱) بر اساس فشار سطحی، ارتفاع ژئوپتانسیلی (hPa) ۵۰۰ و باد تراز بالایی (۳۰۰hPa) در سه مرحله زمانی: الف) ۱۵مه (شروع رخداد)- ب) ۱۷مه (اوج رخداد)- ج) ۱۸ مه (فروکش رخداد)

بی‌هنجاری فشار سطح دریا و ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (Anomaly Analysis)

به‌منظور ارزیابی میزان غیرعادی بودن سامانه هم‌دید مؤثر بر رخداد گردوفاک ۱۵ تا ۱۸ مه ۲۰۲۲، بی‌هنجاری فشار سطح دریا و ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال نسبت به میانگین بلندمدت همان روزهای تقویمی محاسبه و ترسیم شد (شکل ۸). نتایج نشان می‌دهد که در طول رخداد، میدان فشار سطح دریا با بی‌هنجاری‌های منفی قابل‌توجهی بر فراز بخش‌های وسیعی از غرب و مرکز منطقه مورد مطالعه همراه بوده است که بیانگر استقرار یک سامانه کم‌فشار تقویت‌شده و

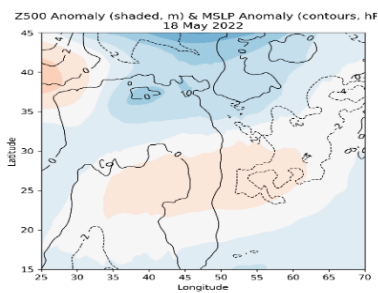
فراتر از شرایط نرمال اقلیمی در مقیاس هم‌دید است. هم‌زمان، بی‌هنجاری ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال نیز مقادیر منفی معنی‌داری را بر فراز عراق، غرب ایران و نواحی پیرامونی نشان می‌دهد که حاکی از استقرار ناوهای عمیق‌تر و فعال‌تر از الگوی میانگین اقلیمی در لایه میانی جو است. این الگو بیانگر تقویت گردش سیکلونیک و افزایش ناپایداری دینامیکی در مقیاس منطقه‌ای می‌باشد.

نقشه بی‌هنجاری میانگین رخداد (۱۵-۱۸ مه؛ شکل ۸) بیانگر تداوم و پایداری این الگوی غیرعادی طی چند روز متوالی است. تداوم و هم‌مکانی بی‌هنجاری‌های منفی فشار سطح دریا و ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال، به‌ویژه در مرحله اوج رخداد، نشان‌دهنده تقویت غیرعادی گردش سیکلونیک و تشدید شرایط دینامیکی مؤثر بر صعود و انتقال گردو خاک است. این یافته‌ها بازتاب دینامیکی بی‌هنجاری‌های آماری مشاهده‌شده در شاخص‌های گردو خاک و مؤلفه‌های تابشی بوده و پیوند روشنی میان انحراف‌های آماری و ساختارهای هم‌دیدگی جو برقرار می‌سازد. در مجموع، تحلیل بی‌هنجاری‌های هم‌دیدگی نشان می‌دهد که رخداد گردو خاک مورد بررسی صرفاً حاصل نوسانات معمول گردش جو نبوده، بلکه با یک الگوی هم‌دیدگی تقویت‌شده و پایدار در مقیاس چندروزه همراه بوده است؛ الگویی که نقش کلیدی در فراهم‌سازی شرایط لازم برای شکل‌گیری، تشدید و تداوم رخداد گردو خاک در منطقه ایفا کرده است.

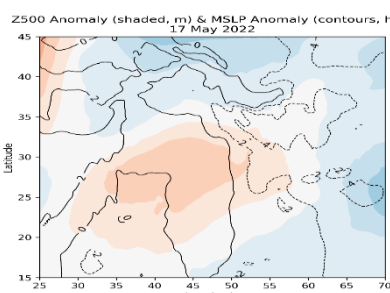


شکل ۸- میانگین بی‌هنجاری ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و فشار سطح دریا طی دوره‌ی رخداد گردو خاک (۱۵-۱۸ مه ۲۰۲۲) نسبت به میانگین بلندمدت همان روزها.

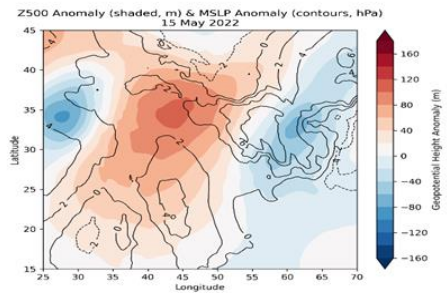
بررسی نقشه‌های بی‌هنجاری روزهای مختلف رخداد (۱۵، ۱۷ و ۱۸ مه؛ شکل ۹- الف تا ج) نشان می‌دهد که شدت و گستره این بی‌هنجاری‌ها در روز اوج رخداد (۱۷ مه) به بیشینه خود رسیده و در روزهای پیش و پس از آن روندی کاهشی و تضعیفی را تجربه کرده است. نقشه بی‌هنجاری روز اوج رخداد (۱۷ مه ۲۰۲۲) بیشینه انحراف میدان فشار سطح دریا و ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال از شرایط نرمال را نشان می‌دهد، در حالی



ج



ب



الف

شکل ۹- نقشه‌های ناهنجاری ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (کتور پرشده، متر) و ناهنجاری فشار سطح دریا (خطوط کتور، هکتوپاسکال) نسبت به میانگین بلندمدت همان روزها (۲۰۰۰-۲۰۲۵) برای روزهای ۱۵ تا ۱۸ مه ۲۰۲۲ (۲۵-۲۸ اردیبهشت ۱۴۰۱)

مؤثر بر تحریک و تشدید پدیده گردو خاک در سه لایه کلیدی جو می‌پردازد. در این چارچوب، تاوایی مثبت در تراز میانی به‌منزله شاخص حرکت‌های صعودی، جریان جت در تراز فوقانی به‌منزله عامل تقویت و آگرایی و

۳۰۰ hPa و باد سطحی (ترکیب دوم)

این ترکیب با هدف بررسی دینامیک ناپایداری و فرایندهای صعود در جو، به تحلیل الگوهای هم‌دیدگی

مکش دینامیکی، و بادهای سطحی به‌منزله محرک اصلی برداشت و انتقال افقی ذرات گردوخاک در نظر گرفته شده‌اند. ترکیب هم‌زمان این متغیرها امکان تحلیل یکپارچه سازوکارهای دینامیکی حاکم بر رخداد گردوخاک را فراهم می‌سازد.

۱۵مه (شروع رخداد) (۲۵ اردیبهشت))

در آغاز رخداد گردوخاک (شکل ۱۰-الف)، میدان تاوایی نسبی در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال نشان‌دهنده استقرار نواحی تاوایی مثبت بر فراز عراق، غرب ایران و بخش‌هایی از شمال عربستان است که با الگوی ناوهای لایه میانی جو هم‌خوانی دارد. این آرایش تاوایی بیانگر تقویت ناپایداری دینامیکی و آغاز حرکت‌های صعودی در لایه‌های میانی جو بوده و شرایط لازم برای انتقال اولیه ذرات گردوخاک به ارتفاعات بالاتر را فراهم می‌سازد. در تراز بالای جو (۳۰۰ هکتوپاسکال)، جریان جت غربی با شدت متوسط بر فراز منطقه برقرار است و اگرچه نسبت به روزهای بعد از سازمان‌یافتگی و شدت کمتری برخوردار است، اما با فراهم کردن پشتیبانی دینامیکی نسبی در جلوی ناوه میانی، به تقویت صعود هوا کمک می‌کند. هم‌زمان، میدان باد سطحی (۱۰ متری) با جهت غالب غربی تا جنوب‌غربی بر نواحی بیابانی عراق و شمال عربستان حاکم است که نقش مؤثری در برداشت اولیه ذرات گردوخاک و انتقال آن‌ها به سمت غرب ایران ایفا می‌کند. در مجموع، هم‌زمانی تاوایی مثبت در لایه میانی، پشتیبانی نسبی بالاجو و بادهای سطحی مؤثر، چارچوب دینامیکی لازم برای آغاز رخداد گردوخاک و سازمان‌یافتگی اولیه انتقال ذرات را فراهم کرده است.

۱۷ مه (اوج رخداد) (۲۷ اردیبهشت))

در روز اوج رخداد گردوخاک (شکل ۱۰-ب)، میدان تاوایی نسبی در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال گسترش و تقویت

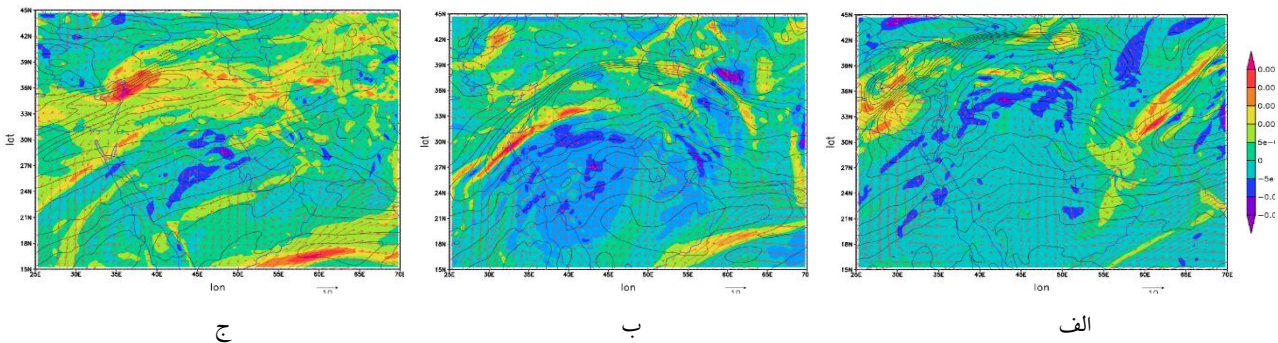
قابل توجه نواحی تاوایی مثبت را بر فراز شمال عربستان، عراق و غرب ایران نشان می‌دهد که بیانگر تشدید ناپایداری دینامیکی و صعود گسترده در لایه‌های میانی جو است. این وضعیت نقش مهمی در افزایش عمق و تداوم حرکت‌های صعودی و نگهداشت ذرات گردوخاک در جو ایفا می‌کند. در تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال، جریان جت بالایی نسبت به روز آغاز رخداد منسجم‌تر و قوی‌تر شده و استقرار بخش‌های مؤثر آن بر فراز مسیر انتقال گردوخاک، پشتیبانی دینامیکی قوی‌تری را در لایه‌های فوقانی فراهم می‌سازد. این پشتیبانی بالاجو، هم‌زمان با ناپایداری لایه میانی، موجب تشدید فرایندهای عمودی و تقویت انتقال قائم ذرات می‌شود. در سطح زمین نیز، بادهای ۱۰ متری با شدت و سازمان‌یافتگی بیشتر، نقش تعیین‌کننده‌ای در برداشت مستمر ذرات از منابع بیابانی عراق و شمال عربستان و انتقال افقی آن‌ها به سمت نواحی غربی و مرکزی ایران ایفا می‌کنند. بدین ترتیب، هم‌افزایی ناپایداری میانی، پشتیبانی قوی بالاجو و بادهای سطحی مؤثر، موجب اوج‌گیری شدت و گسترش فضایی رخداد گردوخاک در این روز شده است.

۱۸ مه (فروکش رخداد) (۲۸ اردیبهشت))

در روز فروکش رخداد گردوخاک (شکل ۱۰-ج)، میدان تاوایی نسبی در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال کاهش نواحی تاوایی مثبت و تضعیف ناپایداری دینامیکی لایه میانی را نشان می‌دهد که حاکی از افت حرکت‌های صعودی و کاهش توان جو در نگهداشت ذرات گردوخاک است. در تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال، شدت جریان جتی نسبت به روز اوج کاهش یافته و محور آن تا حدودی به عرض‌های شمالی‌تر جابه‌جا شده است. این تغییر موجب کاهش پشتیبانی دینامیکی بالاجو و تضعیف فرایندهای صعودی در منطقه می‌شود. هم‌زمان، بادهای ۱۰ متری نیز از شدت و سازمان‌یافتگی کمتری برخوردار

شده‌اند که نقش آن‌ها را در برداشت و انتقال افقی ذرات کاهش می‌دهد. در مجموع، تضعیف هم‌زمان تاوایی لایه میانی، افت پشتیبانی بالاجو و کاهش بادهای سطحی، به

ته‌نشینی تدریجی ذرات گردو خاک و فروکش رخداد در منطقه انجامیده است.



شکل ۱۰- تحلیل همدیدی رخداد گردو خاک در بازه ۱۵ تا ۱۸ مه ۲۰۲۲ (۲۵-۲۸ اردیبهشت ۱۴۰۱) بر اساس تاوایی hPa ۵۰۰، جت hPa ۳۰۰ و باد سطحی در سه مرحله زمانی: الف) ۱۵ مه (شروع رخداد)- ب) ۱۷ مه (اوج رخداد)- ج) ۱۸ مه (فروکش رخداد)

ترکیب متغیرهای تاوایی نسبی تراز ۸۵۰ hPa، جت تراز ۳۰۰ hPa و باد تراز ۸۵۰ (ترکیب سوم)

هدف از این ترکیب، بررسی دینامیک لایه‌های پایینی جو و نقش آن‌ها در آغاز، تشدید و فروکش رخداد گردو خاک، با تأکید بر فرایندهای انتقال افقی و پشتیبانی دینامیکی از منشأهای بالقوه گردو خاک است. در این راستا، تاوایی نسبی تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال به منزله شاخص فعالیت دینامیکی و چرخندگی در لایه‌های پایین جو، جریان جت تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال به منزله عامل پشتیبانی بالاجو، و بردار باد تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال به منزله نماینده جریان‌های نزدیک سطح (با کاهش اثرات اصطکاک سطحی و ناهم‌واری‌های کوهساری) به صورت هم‌زمان مورد تحلیل قرار گرفته‌اند تا سازوکارهای مؤثر بر انتقال گردو خاک در لایه‌های پایین جو تبیین شود.

۱۵ مه (شروع رخداد (۲۵ اردیبهشت))

که نشان‌دهنده فعال شدن اولیه دینامیک لایه‌های پایین جو می‌باشد. این شرایط، زمینه لازم برای آغاز فرایندهای ناپایداری و تسهیل خیزش ذرات از سطح زمین را فراهم کرده است. در تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال، جریان جت غربی تا جنوب غربی بر فراز منطقه برقرار است که اگرچه از شدت و سازمان‌یافتگی بالایی برخوردار نیست، اما پشتیبانی دینامیکی نسبی را برای سامانه فراهم می‌سازد. هم‌زمان، بردار باد تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال جهت‌گیری غالب جریان‌های لایه پایین را در مسیر انتقال از نواحی بیابانی عراق و شمال عربستان به سمت غرب ایران نشان می‌دهد و نقش مؤثری در جابه‌جایی افقی اولیه ذرات گردو خاک ایفا می‌کند. در مجموع، هم‌زمانی دینامیک فعال در لایه پایین (تاوایی ۸۵۰)، پشتیبانی نسبی بالاجو و جریان مؤثر تراز ۸۵۰، چارچوب لازم برای آغاز رخداد و انتقال اولیه ذرات گردو خاک را فراهم کرده است.

۱۷ مه (اوج رخداد (۲۷ اردیبهشت))

در روز اوج رخداد گردو خاک (شکل ۱۱-ب)، میدان تاوایی نسبی در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال تقویت و گسترش قابل توجه نواحی تاوایی مثبت را نسبت به روز آغاز

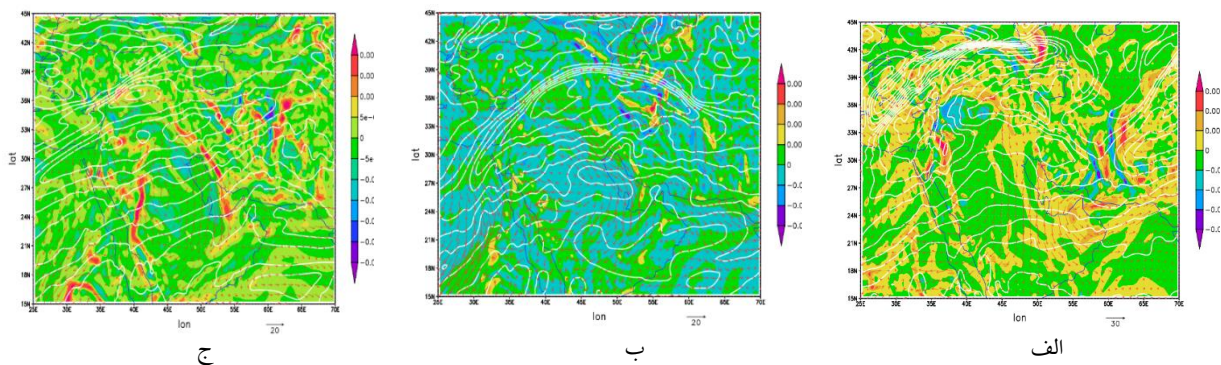
در آغاز رخداد گردو خاک (شکل ۱۱-الف)، میدان تاوایی نسبی در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال بیانگر استقرار نواحی تاوایی مثبت ضعیف تا متوسط و پراکنده بر بخش‌هایی از عراق، شمال عربستان و غرب ایران است

رخداد نشان می‌دهد که بیانگر تشدید فعالیت دینامیکی در لایه‌های پایین جو و مساعد شدن شرایط برای تداوم و تقویت سامانه است. این وضعیت با افزایش تداوم زمانی سامانه و تقویت فرایندهای نگهداشت و انتقال ذرات در لایه‌های پایین جو همراه می‌شود. در تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال، جریان جت بالایی نسبت به روز آغاز رخداد منسجم‌تر و قوی‌تر شده و با فراهم کردن پشتیبانی دینامیکی مؤثرتر در مقیاس بزرگ، به تقویت سازوکارهای صعود و سازمان‌یافتگی سامانه کمک می‌کند. هم‌زمان، باد تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال با شدت و انسجام بیشتر، نقش تعیین‌کننده‌ای در انتقال افقی ذرات در لایه پایین و گسترش رخداد به سمت نواحی وسیع‌تر ایفا می‌کند. بدین ترتیب، هم‌افزایی دینامیک لایه پایین (تاوایی ۸۵۰)، پشتیبانی قوی‌تر بالاجو و جریان سازمان‌یافته تراز ۸۵۰ موجب اوج‌گیری شدت و گسترش فضایی رخداد گردوفاک در این روز شده است.

۱۸ مه (فروکش رخداد (۲۸ اردیبهشت))

در روز فروکش رخداد گردوفاک (شکل ۱۱-ج)، میدان تاوایی نسبی در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال کاهش نواحی تاوایی مثبت و تضعیف فعالیت دینامیکی لایه‌های

پایین جو را نشان می‌دهد که با افت توان سامانه در تداوم شرایط مساعد برای گردوفاک همراه است. در تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال، شدت جریان جت نسبت به روز اوج کاهش یافته و محور آن تا حدودی جابه‌جا شده است؛ در نتیجه پشتیبانی دینامیکی بالاجو تضعیف شده و سازوکارهای صعودی کاهش می‌یابد. هم‌زمان، باد تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال نیز از شدت و سازمان‌یافتگی کمتری برخوردار شده و نقش آن در انتقال افقی ذرات در لایه پایین کاهش می‌یابد. در مجموع، تضعیف هم‌زمان دینامیک لایه پایین، کاهش پشتیبانی بالاجو و افت جریان تراز ۸۵۰، به کاهش انتقال، افزایش ته‌نشینی تدریجی ذرات و فروکش رخداد گردوفاک در منطقه انجامیده است. به‌طور کلی، نتایج ترکیب سوم نشان می‌دهد که در رخداد مه ۲۰۲۲، لایه‌های پایینی جو نقشی فراتر از یک عامل انتقال صرف ایفا کرده‌اند. تقویت تاوایی تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال همراه با جریان‌های سازمان‌یافته این تراز، نه تنها در برداشت اولیه ذرات، بلکه در تداوم انتقال و پایداری زمانی رخداد نقش تعیین‌کننده داشته است. این ویژگی، رخداد مه ۲۰۲۲ را از بسیاری از رخداد‌های متعارف که عمدتاً تحت کنترل بالاجو قرار دارند، متمایز می‌سازد.



شکل ۱۱- تحلیل هم‌دید رخداد گردوفاک در بازه ۱۵ تا ۱۸ مه ۲۰۲۲ (۲۵-۲۸ اردیبهشت ۱۴۰۱) بر اساس تاوایی تراز hPa ۸۵۰ جت تراز hPa ۳۰۰ و باد تراز hPa ۸۵۰ در سه مرحله زمانی: الف) مه ۱۵ (شروع رخداد) - ب) مه ۱۷ (اوج رخداد) - ج) مه ۱۸ (فروکش رخداد)

جمع‌بندی تطبیقی ترکیب‌های هم‌دیدگی و عملکرد شاخص‌ها

تحلیل سه ترکیب هم‌دیدگی به‌کاررفته در این پژوهش نشان می‌دهد که هر ترکیب، با تمرکز بر لایه‌ای خاص از جو، نقش منحصربه‌فردی در تبیین فرایندهای گردو خاک ایفا کرده است. ترکیب اول، تصویری جامع از ساختار هم‌دیدگی چندترازی ارائه داد و برای درک الگوهای کلان‌مقیاس و شناسایی مسیرهای انتقال گردو خاک بسیار مؤثر بود. ترکیب دوم، ناپایداری‌های لایه میانی جو و تعامل دینامیکی بین صعود و واگرایی بالایی را برجسته ساخت و امکان تحلیل دقیق‌تر مرحله اوج رخداد را فراهم کرد. در مقابل، ترکیب سوم با تمرکز ویژه بر دینامیک لایه‌های پایینی جو، فعال‌سازی منابع گردو خاک و سازوکار خیزش اولیه و انتقال ذرات، برای تحلیل مرحله آغاز رخداد کارآمدتر بود. ارزیابی تطبیقی عملکرد شاخص‌ها در مراحل مختلف رخداد در جدول ۵ ارائه شده است. بر اساس نتایج این جدول، تاوایی تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال و باد لایه پایینی در مرحله

شروع، تاوایی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال و جت تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال در مرحله اوج، و فشار سطح دریا همراه با تضعیف جریان جتی و تغییرات ارتفاع ژئوپتانسیلی در مرحله فروکش، به‌منزله شاخص‌های کلیدی شناسایی شدند. در تمامی مراحل رخداد، جریان‌های بادی لایه‌های پایین جو به‌منزله عامل پیوسته و مؤثر در انتقال افقی گردو خاک نقش غالب داشته‌اند. یافته‌های این تحلیل تطبیقی نشان می‌دهد که رخداد‌های گردو خاک در غرب آسیا حاصل برهم‌کنش پیچیده دینامیک جو در سطوح مختلف هستند. با توجه به افزایش فراوانی این رخدادها در دهه‌های اخیر و تشدید شرایط خشکسالی، به‌کارگیری تحلیل هم‌دیدگی چندلایه می‌تواند مبنایی مؤثر برای طراحی سامانه‌های پایش و پیش‌آگاهی گردو خاک، ارزیابی مخاطرات جوی و تدوین راهبردهای سازگاری با رخداد‌های حدی در مناطق خشک و نیمه‌خشک فراهم آورد. در این چارچوب، شاخص‌هایی مانند تاوایی تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال و جریان جت تراز ۳۰۰ هکتوپاسکال، بیشترین قابلیت را در شناسایی شرایط دینامیکی مساعد برای شدت‌گیری رخداد‌های گردو خاک نشان می‌دهند.

جدول ۵- ارزیابی تطبیقی نقش متغیرهای هم‌دیدگی-دینامیکی در مراحل مختلف رخداد گردو خاک ۱۵-۱۸ مه ۲۰۲۲ (۲۵-۲۸ اردیبهشت ۱۴۰۱). در این جدول، نماد ● بسیار قوی نشان‌دهنده نقش غالب و تعیین‌کننده متغیر، نماد ○ قوی بیانگر نقش مؤثر، نماد ⊖ متوسط نشان‌دهنده نقش ثانویه و نماد ⊙ ضعیف بیانگر تأثیر محدود متغیر در مرحله مربوطه از رخداد است.

شاخص	مرحله شروع	مرحله اوج	مرحله فروکش	نقش اصلی
فشار سطحی	● قوی	● قوی	○ ضعیف	کنترل گرادیان فشار و هدایت بادهای سطحی
ارتفاع ژئوپتانسیل ۵۰۰ hPa	○ متوسط	● قوی	○ ضعیف	نشانگر ناپایداری لایه میانی و صعود
جت ۳۰۰ hPa	○ متوسط	● بسیار قوی	○ متوسط	ایجاد واگرایی فوقانی و تقویت مکش دینامیکی و صعود
تاوایی ۵۰۰ hPa	● قوی	● قوی	○ متوسط	شاخص اصلی صعود دینامیکی در لایه میانی
تاوایی ۸۵۰ hPa	● بسیار قوی	○ متوسط	○ ضعیف	شناسایی ناپایداری سطحی و فعال‌سازی منابع گردو خاک
باد لایه پایینی	● قوی	● قوی	○ متوسط	عامل برداشت ذرات و انتقال افقی در تمامی مراحل

است. به‌منظور بررسی بازتاب فضایی-زمانی این سازوکارها و ارزیابی نحوه گسترش و شدت‌یابی گردو خاک در مقیاس مکانی، در بخش بعدی از داده‌های

در مجموع، تحلیل هم‌دیدگی چندلایه نشان داد که رخداد گردو خاک مه ۲۰۲۲ حاصل هم‌زمانی و تداوم سازوکارهای دینامیکی مؤثر در لایه‌های مختلف جو بوده

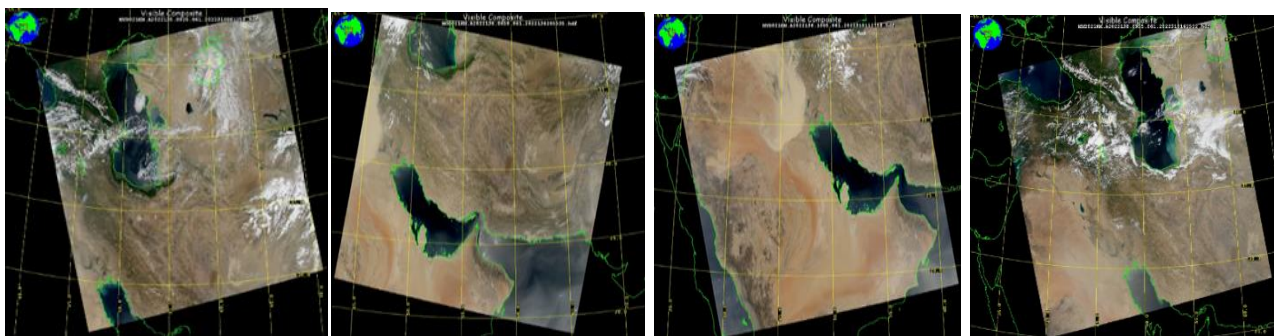
سنجش‌ازدور برای تکمیل و اعتبارسنجی یافته‌های هم‌دید استفاده می‌شود.

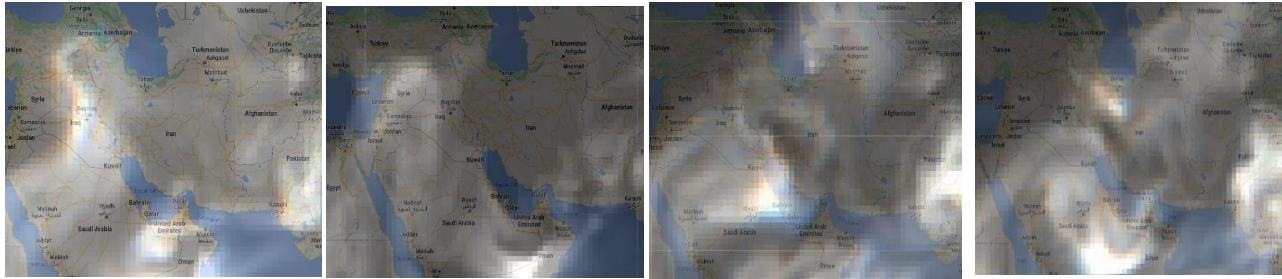
تحلیل رخدادهای گردوفاک ۱۵ تا ۱۸ ماه مه ۲۰۲۲ (۲۵-۲۸ اردیبهشت ۱۴۰۱) بر پایه تصاویر ماهواره ای

بررسی فضایی رخداد

به‌منظور تحلیل ساختار زمانی-مکانی و رفتار فضایی پدیده گردوفاک مه ۲۰۲۲، از دو نوع تصویر مکمل حاصل از داده‌های ماهواره‌ای MODIS استفاده شد. تصاویر طبیعی (True Color) با نمایش رنگ‌های واقعی، امکان مشاهده مستقیم گستره فضایی گردوفاک، مسیر انتقال و تغییرات سطح زمین را فراهم می‌کنند، در حالی که تصاویر پردازش‌شده Dust RGB با تأکید بر ویژگی‌های طیفی هواویزها، شدت، چگالی و توزیع عمودی-فضایی ذرات گردوفاک را با دقت بیشتری آشکار می‌سازند. استفاده هم‌زمان از این دو نوع تصویر، امکان مستندسازی بصری رخداد و تفسیر دقیق‌تر مراحل تکاملی آن را فراهم می‌کند. بررسی تصاویر در سه مقطع زمانی کلیدی (شکل ۱۲) روند تکاملی رخداد را به‌وضوح نشان می‌دهد. در ۱۵ مه (مرحله آغاز)، تصاویر True Color (شکل ۱۲-ب) نشانه‌های اولیه خیزش گردوفاک را عمدتاً بر فراز بیابان‌های عراق و سوریه نمایش می‌دهند، به‌گونه‌ای که بازتاب سطحی هنوز بالا بوده و سطح زمین به‌خوبی قابل تشخیص است. تصاویر Dust RGB نیز تنها لکه‌هایی پراکنده از هواویزها را نشان می‌دهند که بیانگر تمرکز محدود گردوفاک در

نواحی منشأ است. در ۱۷ مه (مرحله اوج)، هر دو دسته تصویر افزایش چشمگیر چگالی و گستره گردوفاک را ثبت کرده‌اند. تصاویر طبیعی توده‌های متراکم گردوفاک را در گستره وسیعی از غرب و مرکز ایران - از خوزستان و ایلام تا مناطق مرکزی - نشان می‌دهند، در حالی که تصاویر Dust RGB نیز بیشینه تمرکز هواویزها را تأیید می‌کنند. این مرحله با نتایج تحلیل آماری افزایش (AOD) و تحلیل هم‌دید (تقویت بادهای سطحی، تاوایی و واگرایی بالاجو) هم‌خوانی کامل دارد. در ۱۸ مه (مرحله فروکش)، کاهش محسوس در چگالی و گسترش گردوفاک در هر دو نوع تصویر مشاهده می‌شود. شفاف‌تر شدن جو و بازبایی تدریجی جزئیات سطح زمین نشان‌دهنده تضعیف سازوکارهای انتقال و آغاز ته‌نشینی ذرات گردوفاک است. در مجموع، تحلیل تلفیقی تصاویر True Color و Dust RGB نشان می‌دهد که روند زمانی-فضایی رخداد گردوفاک مه ۲۰۲۲ به‌طور شفاف قابل ردیابی است. هم‌راستایی شواهد ماهواره‌ای با نتایج تحلیل‌های آماری و هم‌دید، اعتبار رویکرد تلفیقی پژوهش را تقویت کرده و نقش داده‌های سنجش‌ازدور را به‌منزله مکملی مؤثر در تفسیر دینامیک رخدادهای گردوفاک منطقه‌ای برجسته می‌سازد.





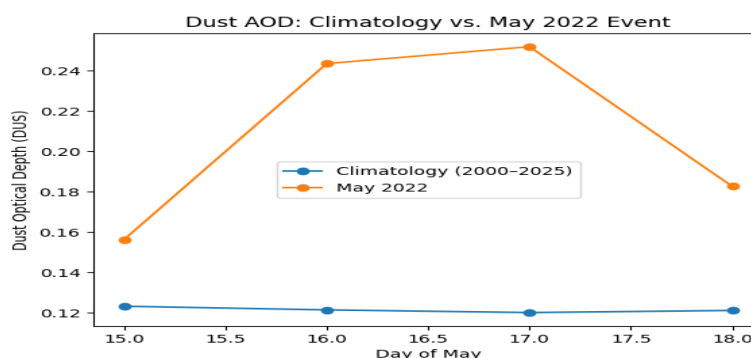
شکل ۱۲- روند زمانی-مکانی رخداد گردو خاک ۱۸-۱۵ مه ۲۰۲۲ (۲۵-۲۸ اردیبهشت ۱۴۰۱) (به ترتیب از چپ به راست)، بر پایه دو نوع تصویر حاصل از سنجنده MODIS ردیف بالا: تصاویر True Color نشان‌دهنده نمای بصری و واقعی از توده گردو خاک و بازتاب سطح زمین. ردیف پایین: تصاویر پردازش شده Dust RGB که شدت، چگالی و گستره افقی- قائم ذرات گردو خاک را مشخص می‌کنند.

مثبت و قابل توجهی (حدود $0.09 \pm$ واحد) را نشان می‌دهد که بیانگر شدت و تداوم غیرعادی بار گردو خاک در مقیاس منطقه‌ای است. الگوی زمانی تغییرات DUS در طول رخداد مه ۲۰۲۲ در مقایسه با اقلیم بلندمدت (شکل ۱۳) نشان می‌دهد که افزایش این شاخص از روز آغاز رخداد تشدید شده، در روز اوج به بیشترین مقدار خود می‌رسد و سپس در روز ۱۸ مه روندی کاهشی می‌یابد. این نتایج کمی با شواهد بصری حاصل از تصاویر True Color و Dust RGB همچنین یافته‌های تحلیل هم‌دیدگی هم‌خوانی کامل داشته و وقوع یک رخداد غیرعادی از نظر بار گردو خاک را تأیید می‌کند. در ادامه، به منظور تبیین جایگاه رخداد مه ۲۰۲۲ در زمینه اقلیمی منطقه و ارزیابی پایداری و تغییرپذیری رژیم گردو خاک، رفتار بلندمدت گردو خاک طی دوره ۲۰۰۰-۲۰۲۵ مورد بررسی قرار می‌گیرد.

به منظور تقویت بُعد کمی تحلیل سنجش از دور رخداد مه ۲۰۲۲ و فراتر رفتن از توصیف صرف بصری، تغییرات شاخص غلظت ذرات گردو خاک (Dust Aerosol Optical Depth; DUS) به صورت کمی مورد بررسی قرار گرفت. اگرچه شاخص AOD نمایانگر بار کل آئروسول‌های معلق در ستون جو است، در این بخش به دلیل تمرکز مستقیم بر پدیده گردو خاک و حذف سهم سایر انواع آئروسول‌ها، از شاخص DUS به‌منزله نماینده اختصاصی گردو خاک معدنی استفاده شد. مقایسه مقادیر DUS در روزهای رخداد ۱۵ تا ۱۸ مه ۲۰۲۲ با میانگین اقلیمی متناظر در دوره ۲۰۰۰-۲۰۲۵ نشان می‌دهد که در تمامی روزهای رخداد، مقدار این شاخص بالاتر از شرایط نرمال اقلیمی بوده است (جدول ۶) بیشینه بی‌هنجاری مثبت در روز ۱۷ مه مشاهده شد؛ به گونه‌ای که مقدار DUS در این روز حدود 0.13 واحد بیش از میانگین بلندمدت همان روز بوده است. افزون بر این، میانگین بی‌هنجاری کل رخداد ۱۵-۱۸ مه نیز مقدار

جدول ۶ - مقایسه مقدار عمق نوری ذرات گردوغبار (DUS) در روزهای رخداد ۱۵-۱۸ مه ۲۰۲۲ (۲۵-۲۸ اردیبهشت ۱۴۰۱) با میانگین اقلیمی همان روزها در دوره ۲۰۰۰-۲۰۲۵ و بی‌هنجاری متناظر. مقادیر مثبت بی‌هنجاری بیانگر افزایش غیرعادی بار گردوغبار نسبت به شرایط نرمال اقلیمی هستند.

روز	DUS میانگین بلندمدت (۲۰۰۰-۲۰۲۵)	DUS در ۲۰۲۲	بی‌هنجاری
مه ۱۵	۰/۱۲۳	۰/۱۵۶	+۰/۰۳۳
مه ۱۶	۰/۱۲۱	۰/۲۴۳	+۰/۱۲۲
مه ۱۷	۰/۱۲۰	۰/۲۵۲	+۰/۱۳۲
مه ۱۸	۰/۱۲۱	۰/۱۸۳	+۰/۰۶۱



شکل ۱۳ - مقایسه تغییرات روزانه عمق نوری ذرات گردوغبار (DUS) در طول رخداد ۱۵-۱۸ مه ۲۰۲۲ (۲۵-۲۸ اردیبهشت ۱۴۰۱) با میانگین اقلیمی همان روزها در دوره ۲۰۰۰-۲۰۲۵. مشاهده مقادیر بالاتر DUS در تمامی روزهای رخداد و بیشینه بی‌هنجاری در روز ۱۷ مه، نشان‌دهنده شدت و تداوم غیرعادی بار گردوغبار در مقیاس منطقه‌ای است.

تحلیل روندهای بلندمدت سنجش از دور طی این دوره نشان می‌دهد که دو شاخص کلیدی، یعنی AOD و رطوبت خاک، به‌طور مستقیم تحت تأثیر تغییرات اقلیمی قرار گرفته و با فعالیت‌های گردوغبار پیوندی معنی‌دار دارند. نتایج حاصل از تصاویر پنج‌ساله AOD استخراج‌شده از داده‌های ماهواره MODIS (شکل ۱۴) نشان می‌دهد که پهنه‌های متناظر با طبقات گردوغبار متوسط تا شدید (نمایش‌یافته با رنگ‌های نارنجی و قرمز) در بخش‌های وسیعی از کمربند گردوغبار منطقه‌ای و در تمامی بازه‌های زمانی حضور غالب دارند. این الگوی فضایی بیانگر پایداری و تداوم نواحی مستعد گردوغبار در مقیاس منطقه‌ای است و نشان می‌دهد که رژیم گردوغبار بیش از آنکه با افزایش یکنواخت مساحت گردوغبار شدید مشخص شود، با تثبیت پهنه‌های فعال

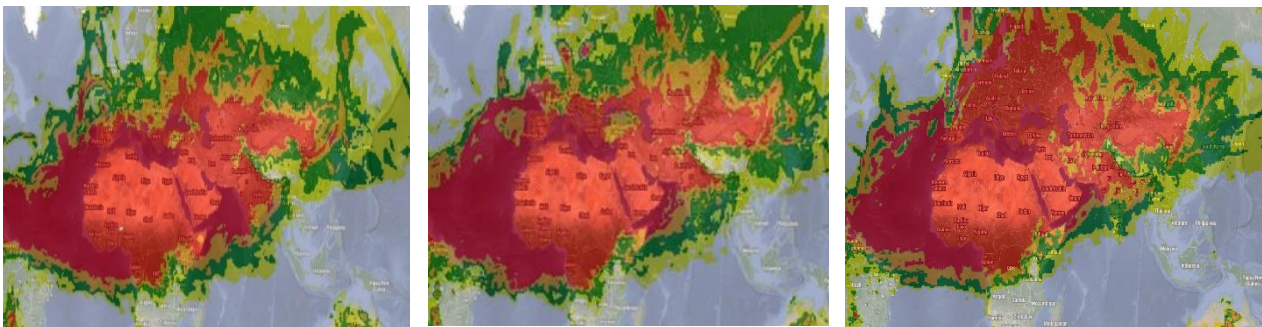
تحلیل روند رطوبت خاک و AOD در رخداد‌های گردوغبار منطقه

به‌منظور بررسی رفتار بلندمدت گردوغبار در مقیاس منطقه‌ای و فرامنطقه‌ای و شناسایی روندهای مرتبط با منابع و نواحی مبدأ گردوغبار مؤثر بر ایران، تغییرات شاخص عمق نوری هواویز (AOD) و رطوبت خاک در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۵ بر پایه داده‌های سنجش از دور مورد تحلیل قرار گرفت. دامنه مکانی تحلیل به گونه‌ای انتخاب شد که علاوه بر ایران، بخش‌های عمده‌ای از غرب و جنوب غرب آسیا شامل عراق، سوریه، شبه‌جزیره عربستان و نواحی واقع در کمربند جهانی گردوغبار را در بر گیرد؛ نواحی‌ای که به‌منزله کانون‌های اصلی تولید و انتقال گردوغبار به ایران شناخته می‌شوند.

و تکرارپذیری رخدادها شناخته می‌شود (Prospero et Middleton, 2017; al., 2002).

به منظور پشتیبانی کمی از این شواهد بصری و حفظ قابلیت مقایسه زمانی، میانگین ماه مه شاخص AOD به صورت پیکسل مینا محاسبه و بر اساس آستانه‌های شدت

به پنج طبقه از شرایط «پاک» تا «بسیار غبارآلود» طبقه‌بندی شد. نتایج مساحتی این طبقه‌بندی که در قالب میانگین‌های پنج‌ساله ارائه شده است جدول (۷)، امکان ارزیابی کمی تغییرات سطح پوشش گردو خاک را در گستره‌ای فراتر از مرزهای سیاسی و در ارتباط با نواحی مبدأ فراهم می‌سازد.



شکل ۱۴- تغییرات عمق نوری آئروسول (AOD) در بازه ی زمانی ۲۵ ساله (از چپ به راست)

نتایج جدول ۷ و تصاویر پنج‌ساله (AOD) نشان می‌دهد که الگوی گردو خاک در کل منطقه مورد مطالعه، بیش از آنکه با یک روند افزایشی یکنواخت و خطی در مساحت طبقات بسیار غبار آلود همراه باشد، با پایداری و تداوم پهنه‌های دارای گردو خاک متوسط تا شدید در کمربند گردو خاک منطقه‌ای مشخص می‌شود. به طور مشخص، طبقات Moderate Hazy و Hazy در تمامی بازه‌های زمانی بیشترین سهم مساحتی را به خود اختصاص داده‌اند و بخش عمده‌ای از پهنه‌های بیابانی و نیمه‌بیابانی واقع در مسیرهای اصلی انتقال گردو خاک به ایران را

پوشش می‌دهند. هرچند در برخی بازه‌ها افزایش مقطعی مساحت طبقه Very Hazy مشاهده می‌شود، این تغییرات ماهیتی نوسانی داشته و بیانگر یک روند افزایشی یکنواخت در کل دوره نیست. این رفتار کمی با الگوی رنگی تصاویر پنج‌ساله AOD (شکل ۱۴) هم‌خوانی داشته و تأیید می‌کند که تغییرات گردو خاک منطقه‌ای بیش از آنکه ناشی از گسترش تدریجی فضایی باشد، حاصل تداوم پهنه‌های فعال و تشدید مقطعی شدت رخدادها است.

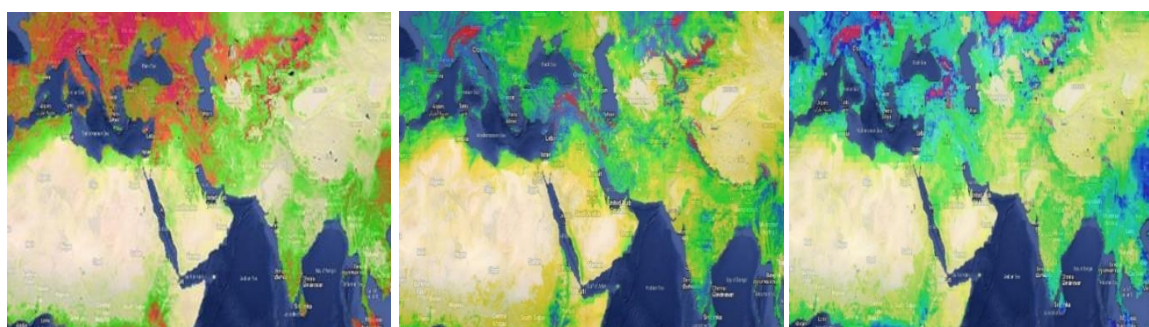
جدول ۷- میانگین مساحت (km²) طبقات مختلف عمق نوری هواویز (AOD) در ماه مه طی دوره ۲۰۰۰-۲۰۲۵ (۲۵-۲۸ اردیبهشت ۱۴۰۱) در محدوده مطالعه، استخراج شده به روش پیکسل مینا. ستون‌ها میانگین‌های ۵ ساله را نشان می‌دهند.

کد طبقه	نام طبقه	۲۰۰۰-۲۰۰۴	۲۰۰۵-۲۰۰۹	۲۰۱۰-۲۰۱۴	۲۰۱۵-۲۰۱۹	۲۰۲۰-۲۰۲۵
۱	Clear	۴۵۶,۲۲۰	۴۴۵,۱۳۲	۳۲۹,۶۳۵	۴۲۰,۸۳۵	۴۲۹,۶۴۳
۲	Clear-Hazy	۱,۰۷۳,۰۵۸	۷۶۶,۵۴۱	۸۵۹,۱۹۰	۱,۲۰۴,۲۸۶	۱,۵۳۳,۱۰۹
۳	Moderate Hazy	۳,۳۳۶,۷۸۱	۳,۱۷۵,۹۷۸	۳,۱۱۵,۴۰۰	۳,۲۵۱,۹۲۶	۳,۲۰۲,۴۳۸
۴	Hazy	۲,۵۹۱,۳۶۲	۲,۷۶۶,۹۰۰	۲,۸۳۳,۴۹۴	۲,۵۶۸,۰۰۴	۲,۳۷۶,۵۸۲
۵	Very Hazy	۷۴۲,۱۹۲	۱,۰۴۷,۰۶۳	۱,۰۶۱,۸۹۴	۷۵۴,۵۶۰	۶۵۷,۸۴۳

در کنار تحلیل AOD ، بررسی روند تغییرات رطوبت خاک به‌منزله یکی از مهم‌ترین متغیرهای زمینه‌ای مؤثر بر خیزش گردوفاک انجام شد. تصاویر پیوسته تغییرات رطوبت سطحی حاصل از داده‌های ماهواره‌ای (شکل ۱۵) گسترش تدریجی نواحی با مقادیر پایین‌تر رطوبت خاک را در بخش‌های وسیعی از منطقه نشان می‌دهد. این کاهش رطوبت با تضعیف پیوند میان ذرات خاک، شرایط سطحی لازم برای خیزش گردوفاک در اثر باد را فراهم می‌کند (Shao, 2008; Ginoux et al., 2012). هم‌پوشانی مکانی و زمانی میان کاهش رطوبت خاک (شکل ۱۵) و غلبه پهنه‌های با AOD بالاتر (شکل ۱۴ و جدول ۷)، بازتاب یک چرخه بازخورد مثبت اقلیمی است؛ چرخه‌ای که از خشکسالی آغاز شده، با کاهش پوشش گیاهی و افزایش دما تقویت می‌شود و به پایداری و تکرارپذیری بیشتر رخدادهای گردوفاک می‌انجامد (Prospero et al., 2002; Middleton, 2017). الگو با دینامیک داخلی اقلیم منطقه و جهت‌گیری‌های تغییر اقلیم جهانی نیز هم‌راستا است (IPCC, 2021). در این پژوهش، برخلاف شاخص AOD ، از انجام طبقه‌بندی کمی و مساحتی رطوبت خاک اجتناب شد؛

زیرا مقادیر این متغیر به‌شدت وابسته به نوع محصول ماهواره‌ای، عمق لایه خاک و آستانه‌های انتخابی بوده و تفسیر طبقه‌بندی آستانه‌محور آن می‌تواند با عدم قطعیت بالایی همراه باشد. از این‌رو، رطوبت خاک به‌منزله یک متغیر کنترلی و زمینه‌ای و از طریق تحلیل روندها و الگوهای فضایی مورد استفاده قرار گرفت. هم‌زمانی کاهش رطوبت خاک در نواحی منبع با پایداری و گستره وسیع طبقات غبارآلود، نقش کلیدی خشکی سطح زمین را در تداوم رژیم گردوفاک منطقه‌ای و انتقال آن به ایران تأیید می‌کند (Shao & Dong, 2006; Baddock et al., 2011).

در مجموع، نتایج تحلیل بلندمدت سنجش از دور نشان می‌دهد که گردوفاک مؤثر بر ایران حاصل تعامل یک کمربند منطقه‌ای فعال گردوفاک، شرایط سطحی خشک و سازوکارهای جوی است؛ سامانه‌ای که طی ۲۵ سال گذشته تثبیت شده و به‌صورت رخدادهای تکرارشونده و گاه شدید، نقش مهمی در مخاطرات محیطی و اقلیمی ایران و غرب آسیا ایفا کرده است.



شکل ۱۵- تغییرات رطوبت خاک در بازه زمانی ۲۵ ساله

نتیجه گیری

رژیم گردوفاک غرب و جنوب‌غرب ایران طی دوره ۲۰۰۰-۲۰۲۵ در بستری از کاهش تدریجی رطوبت خاک و

این پژوهش با رویکردی تلفیقی در سه مقیاس آماری بلندمدت، دینامیکی هم‌دیدی و سنجش‌از‌دور، نشان داد که

افزایش شاخص‌های بار هواویزها تحول یافته است. هم‌زمانی روند افزایشی AOD با افت رطوبت سطحی و تغییر در مؤلفه‌های تابشی، بیانگر شکل‌گیری یک زمینه اقلیمی مستعد برای تشدید رخدادهای حدی در منطقه است.

تحلیل رخداد ۱۵-۱۸ مه ۲۰۲۲ نشان داد که تمایز این رویداد نسبت به طوفان‌های متعارف منطقه، صرفاً در شدت بالای گردوخاک نبوده، بلکه در خروج هم‌زمان شاخص‌های سطحی و دینامیکی از دامنه نوسانات معمول اقلیمی ماه مه نهفته است. بی‌هنجاری مثبت معنی‌دار AOD و شاخص‌های گردوخاک، همراه با بی‌هنجاری منفی رطوبت خاک و مؤلفه‌های تابشی مستقیم، در کنار تداوم چندروزه تقویت تاوایی میانی و واگرایی بالا، بیانگر یک الگوی هم‌افزایی سطح-جو بوده است. این هم‌افزایی پایدار، سازوکاری کلیدی در تشدید صعود، انتقال و ماندگاری ذرات گردوخاک ایجاد کرده است.

در مقایسه با مطالعات پیشین در مناطق خشک (مانند Middleton, 2017; Ginoux et al., 2012)، که نقش کلی خشکی سطح زمین یا آرایش‌های هم‌دیدگی را به صورت مجزا بررسی کرده‌اند، یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که رخدادهای حدی زمانی شکل می‌گیرند که بی‌هنجاری‌های سطحی و دینامیکی به‌طور هم‌زمان و پایدار در چندین تراز جو هم‌پوشانی پیدا کنند. بدین ترتیب، شدت رخداد مه ۲۰۲۲ را می‌توان نتیجه یک ساختار چندترازی ناهنجار دانست که فراتر از الگوی هم‌دیدگی کلاسیک منطقه عمل کرده است.

این نتایج نشان می‌دهد که تحلیل توأمان شاخص‌های آماری، شرایط سطحی و ساختارهای دینامیکی، چارچوبی کارآمد برای تشخیص رخدادهای با پتانسیل تشدید فراهم می‌کند. در این چارچوب، تمرکز بر بی‌هنجاری‌های هم‌زمان AOD، رطوبت خاک و مؤلفه‌های تابشی، در کنار تحلیل چندترازی میدان‌های جوی، می‌تواند در بهبود پیش و ارزیابی مخاطرات گردوخاک در مناطق خشک و نیمه‌خشک نقش مؤثری ایفا کند.

منابع

۱. امیدوار، ک.، و سپندار، ن. (۱۳۹۷). تحلیل همدید و پایش ماهواره‌ای پدیده گردوغبار استان کرمانشاه در بازه زمانی ۱۹۸۷-۲۰۱۰ (مطالعه موردی: گردوغبار فراگیر ۲۷ و ۲۸ خرداد ۱۳۸۸). *تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی*، ۱۸(۴۹)، ۱-۱۸.
۲. حیدری، م. ط. (۱۳۸۶). غبار و الگوی جوی مولد آن در غرب کشور. *نشریه هواشناسی کشور*، ۱۱، ۱۱-۱۲.
۳. خسروی، م. (۱۳۸۷). تأثیرات محیطی اندرکنش نوسان‌های رودخانه هیرمند با بادهای ۱۲۰ روزه سیستان. *تحقیقات جغرافیایی*، ۲۳(۴)، ۱۹-۴۸.
۴. ذوالفقاری، ح.، و عابدزاده، ح. (۱۳۸۴). تحلیل سینوپتیک سیستم‌های گردوغبار در غرب ایران. *جغرافیا و توسعه*، ۶، ۱۸۸-۱۷۴.
۵. رئیس‌پور، ک.، خسروی، م.، و طاوسی، ت. (۱۳۸۹). بررسی تأثیر طوفان‌های شن در منطقه سیستان. در *مجموعه مقالات همایش ملی جغرافیا، امنیت و توسعه در جنوب شرقی ایران* (صص ۲۷۱-۲۸۰). دانشگاه امام حسین.
۶. صلاحی، ب.، مرادی، م.، و عالی‌جهان، م. (۱۳۹۴). واکاوی شرایط همدید-سنجش‌ازدور رخداد طوفان گردوخاک در شمال‌غرب ایران (مهر ۱۳۹۲). *جغرافیا*، ۱۳(۴۴)، ۷۵-۹۳.
۷. عباسی، ح.، رفیعی‌امام، ع.، و روحی‌پور، ح. (۱۳۷۸). تحلیل منشأ گردوغبارهای بوشهر و خوزستان با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای. *فصلنامه جنگل و مرتع*، ۴۸، ۷۸-۵۱.
۸. فرهادی‌پور، س.، آزادی، م.، علی‌اکبری‌بیدختی، ع.، عزیزاده‌چوبی، ا.، و سیاری، ح. (۱۳۹۶). طوفان‌های خاک در منطقه غرب و جنوب‌غرب ایران و تأثیر آن‌ها بر شارهای تابشی: مطالعه موردی مجله ژئوفیزیک ایران، ۱۱(۳)، ۷۵-۸۹.
۹. فولادوند، س.، صیاد، غ.، حمادی، ک.، و معاضد، ه. (۱۳۹۲). بررسی تغییرات کمی و کیفی آب ورودی به تالاب هورالعظیم در اثر احداث سد مخزنی کرخه. *علوم و مهندسی آبیاری*، (۴) ۳۶، ۸-۱.
۱۰. لشکری، ح.، و کیخسروی، ق. (۱۳۸۷). تحلیل آماری هم‌دیدگی طوفان‌های گردوغبار استان خراسان رضوی در فاصله زمانی ۱۹۹۳-۲۰۰۵. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۴۰(۶۵)، ۱۷-۳۳.
۱۱. میری، م.، عزیزی، ق.، و شمسی‌پور، ع. ا. (۱۳۹۳). شناسایی الگوهای گردش جوی تابستانه و زمستانه ورود گردوخاک به غرب ایران. *جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی*، ۲۵(۴)، ۲۲۰-۲۰۳.
۱۲. هرمزی، و.، حمزه‌نژاد، م.، امیدوار، ک.، و حسین‌پور، م. (۱۳۹۸). واکاوی هم‌دیدگی-دورکاوی رخداد طوفان گردوخاک استان

279–286. <https://doi.org/10.1007/s13143-013-0020-6>

21. IPCC. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis*. Cambridge University Press.
22. Kalenderski, S., Stenchikov, G., & Zhao, C. (2013). Modeling a typical winter-time dust event over the Arabian Peninsula and the Red Sea. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 13, 1999–2014. <https://doi.org/10.5194/acp-13-1999-2013>
23. Lau, K.-M., Kim, M. K., & Kim, K. M. (2006). Asian summer monsoon anomalies induced by aerosol direct forcing: The role of the Tibetan Plateau. *Climate Dynamics*, 26, 855–864. <https://doi.org/10.1007/s00382-006-0114-z>
24. Li, X., Ge, L., Dong, Y., & Chang, H.-C. (2010). Estimating the greatest dust storm in eastern Australia with MODIS satellite images. In *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)* (pp. 1039–1042). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2010.5649212>
25. Middleton, N. J. (2017). Sand and dust storms: Impact mitigation. *Sustainability*, 9(6), 1053. <https://doi.org/10.3390/su9061053>
26. Miri, A. (2021). An investigation into climatic and terrestrial drivers of dust storms in the Sistan region of Iran in the early twenty-first century. *Science of the Total Environment*, 757, 143952. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143952>
27. Notaro, M., Vizzy, E. K., & Cook, K. H. (2013). The role of dust aerosols in the climate of the Middle East and North Africa. *Climate Dynamics*, 41(9–10), 2543–2561. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1722-4>
28. Rahdari, V., Gholami, V., Fathabadi, A., & Amini, S. (2024). Spatial-temporal assessment of dust events and trends in Iran's arid and semi-arid regions. *Land*, 13(11), 1906. <https://doi.org/10.3390/land13111906>
29. World Meteorological Organization. (2025). Sand and dust storms. <https://wmo.int/topics/sand-and-dust-storms>
13. Abadi, A., Tavousi, T., Mofidi, A., & Mansouri, B. (2025). Long-term spatio-temporal analysis of dust events over Iran. *Atmosphere*, 16(3), 334. <https://doi.org/10.3390/atmos16030334>
14. Barkan, J., Alpert, P., Kutiel, H., & Kishcha, P. (2005). Synoptics of dust transportation days from Africa toward Italy and central Europe. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110(D7), D07208. <https://doi.org/10.1029/2004JD005222>
15. Beyranvand, M., Alizadeh-Choobari, O., Farajzadeh, M., & Alizadeh, E. (2023). Dust in western Iran: The emergence of new sources. *Scientific Reports*, 13(1), 14714. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-42173-3>
16. Dehshiri, H., Kaskaoutis, D. G., Rashki, A., Goudarzi, G., & Dastorani, M. T. (2024). Dust emission, transport, and deposition in central Iran and their relationship with atmospheric circulation. *Aeolian Research*, 64, 100927. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2024.100927>
17. Ebrahimi-Khusfi, Z., Mirakbari, M., Ebrahimi, M., & Taghizadeh-Mehrjardi, R. (2020). Impacts of vegetation anomalies and agricultural drought on wind erosion over Iran from 2000 to 2018. *Applied Geography*, 125, 102330. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2020.102330>
18. Gao, T., Han, J., Wang, Y., Pei, H., & Lu, S. (2012). Impacts of climate abnormality on remarkable dust storm increase of the Hunshdak Sandy Lands in northern China during 2001–2008. *Meteorological Applications*, 19(3), 265–278.
19. 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>
20. Hamidi, M., Kaviani-pour, M. R., & Shao, Y. (2013). Synoptic analysis of dust storms in the Middle East. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 49(3), 222–234. (۱۲)۲۱

هرمزگان (آذرماه ۱۳۹۵). علوم و تکنولوژی محیط زیست، ۲۲۲–۲۳۴، (۱۲)۲۱

Integrated approach (synoptic-remote sensing) to assessing dust hazards in the west and southwest of Iran (Case study: Dust phenomenon May 15-18, 2022(25-28 Ordibehesht))

Parisa Sohrabi Pirdousti¹, Hassan Zolfaghari^{2*}, Saeed Farhadipour³

¹ PhD Candidate in Climatology, Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, Razi University, Kermanshah, Iran

² Associate Professor of Climatology, Department of Geography, Faculty of Literature and Humanities, Razi University, Kermanshah, Iran

³ Assistant Professor of Meteorology, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran

*Corresponding Author Email: h.zolfaghari2002@yahoo.com

Received: 20 November 2025, Accepted: 26 February 2026

ABSTRACT

Dust represents one of the major environmental crises in arid and semi-arid regions. This study examines the spatiotemporal variability of dust activity in western and southwestern Iran and investigates the severe dust storm event of 15–18 May 2022 using an integrated statistical, synoptic–dynamic, and remote sensing approach. The dataset comprises dust indices, radiative components, soil moisture, and atmospheric variables derived from satellite products and ERA5 reanalysis data for six selected stations during the 2000–2025 period. Long-term analysis reveals increasing trends in dust-related indices (AOD, DU, and DUS), accompanied by a significant decline in soil moisture and notable changes in the regional radiative regime. Anomaly analysis indicates that the May 2022 event deviated substantially from climatological May conditions in terms of dust intensity, radiative components, and surface dryness. Synoptic analysis demonstrates that the uniqueness of this event was not solely attributable to dust intensity, but rather to the concurrence and persistence of surface anomalies combined with unstable atmospheric configurations across multiple pressure levels. Relative vorticity at 850 hPa and surface winds governed the initiation stage; intensified vorticity at 500 hPa and a strengthened jet stream at 300 hPa dominated the peak phase; and surface pressure recovery characterized the decay stage. Surface winds remained the primary driver of horizontal dust transport throughout all phases. Remote sensing analysis based on MODIS True Color and Dust RGB imagery confirmed the spatial expansion, intensity, and anomalous persistence of dust plumes. Overall, this integrated framework enhances the identification and early warning of extreme dust storm events.

Keywords: Dust storms, integrated approach, Synoptic–Remote Sensing, Western and South-western Iran

HOW TO CITE THIS ARTICLE

Sohrabi Pirdousti, P., Zolfaghari, H., Farhadipour, S. (2026). Integrated approach (synoptic-remote sensing) to assessing dust hazards in the west and southwest of Iran (Case study: Dust phenomenon May 15-18, 2022(25-28 Ordibehesht)). *Journal of Meteorology and Atmospheric Science*, 8(1): 63- 90. Doi: 10.22034/jmas.2026.560098.1255

COPYRIGHTS

Copyright for this article is retained by the author(s), with publication rights granted to the JMAS Journal. This is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

