

تحلیل سینوپتیکی و ماهواره‌ای طوفان گردوغبار در مرکز ایران: مطالعه موردی راه ارتباطی نائین-اردکان (مقاله پژوهشی)

۱- کمال امیدوار^{*}، استاد، گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

komidvar@yazd.ac.ir

۲- فروغ محمدی راوری، دانشجوی دکتری، گروه جغرافیا، دانشکده علوم انسانی و اجتماعی، دانشگاه یزد، یزد، ایران.

دریافت: ۱۴۰۵/۰۳/۲۴

پذیرش: ۱۴۰۵/۰۵/۰۶

چکیده

بحران‌های محیطی مانند خشکسالی، سیل، طوفان‌های گردوغبار و آلودگی هوا از مهم‌ترین مخاطرات طبیعی هستند که زندگی انسان و اکوسیستم‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهند. ایران نیز به دلیل موقعیت جغرافیایی و شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک، همواره در معرض این پدیده‌ها قرار دارد. در سال‌های اخیر، طوفان‌های گردوغبار به‌ویژه در مناطق مرکزی کشور افزایش یافته و پیامدهای قابل توجهی در بخش‌های حمل‌ونقل، سلامت و اقتصاد ایجاد کرده‌اند. این پژوهش به بررسی یک رخداد شدید گردوغبار در مرکز ایران طی ۱۱ تا ۱۲ مارس ۲۰۲۲ با تمرکز بر راه ارتباطی نائین-اردکان می‌پردازد. برای تحلیل این رخداد از داده‌های سینوپتیکی شامل فشار سطح دریا (SLP)، ارتفاع ژئوپتانسیل سطوح ۵۰۰ و ۸۵۰ هکتوپاسکال، مؤلفه‌های باد، رطوبت نسبی، تصاویر ماهواره‌ای MODIS و نمودار Skew-T-Log-P استفاده شد. نتایج نشان داد که تشکیل یک کم‌فشار عمیق با فشار مرکزی حدود ۱۰۰۵ هکتوپاسکال بر روی شبه‌جزیره عربستان موجب افزایش گرادیان فشار و تقویت بادهای شمال‌غربی شد، به‌طوری‌که بیشینه سرعت باد به حدود ۳۰ متر بر ثانیه رسید و دید افقی در محور نائین-اردکان به کمتر از ۵۰ متر کاهش یافت. تصاویر ماهواره‌ای MODIS انتقال گسترده گردوغبار از کانون‌های بیابانی به سمت مرکز ایران را تأیید کردند. همچنین شاخص‌های ناپایداری K Index (KI) و Showalter Index (SI) به‌ترتیب به حدود ۲۱.۳۰ و ۲.۹۸ رسیدند که بیانگر شرایط ناپایدار جو در زمان وقوع رخداد بودند. نتایج نشان می‌دهد که برهم‌کنش سامانه کم‌فشار عربستان با شرایط توپوگرافی منطقه عامل اصلی وقوع و تشدید این طوفان گردوغبار بوده است.

واژگان کلیدی: تصاویر ماهواره‌ای MODIS، فشار سطح دریا، بادهای شدید، دید افقی، ناپایداری جوی.

مقدمه

توده‌های هوایی در شرایط ناپایدار جوی، احتمال وقوع و تشدید طوفان‌های گردوغبار را افزایش می‌دهد (علیجانی، ۱۹۹۷؛ لشکری، ۲۰۰۸). این پدیده که با انتقال حجم زیادی از ذرات معلق و کاهش قابل توجه دید افقی همراه است، یکی از مهم‌ترین مخاطرات محیطی مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان محسوب می‌شود ناتسگدورج، یوگدر و چونگ^۳، ۲۰۰۲، آریموتو^۴، ۲۰۰۱؛ همیش و گرانت و همکاران^۵،

در مناطق خشک و بیابانی، شرایط محیطی برای شکل‌گیری طوفان‌های گردوغبار بسیار مناسب است. کمبود رطوبت، پوشش گیاهی محدود و وجود رسوبات سست سبب کاهش چسبندگی بین ذرات خاک شده و در صورت وزش بادهای نسبتاً شدید، ذرات ریز با قطر کمتر از ۰.۱ میلی‌متر از سطح زمین جدا شده و وارد جو می‌شوند (گودی و میدلتون^۱، ۲۰۰۱؛ ژانگ، ژو و همکاران^۲، ۲۰۰۸). همچنین، خشک بودن

³ Natsagdorj, Jugder and Chung

⁴ Arimoto

⁵ Hamish, Grant et al

¹ Goudie and Middleton

² Zhang, Zhu et al

۲۰۰۱). وقوع طوفان‌های گردوغبار ارتباط تنگاتنگی با الگوهای گردش جو و استقرار سامانه‌های سینوپتیکی دارد و تغییرات در میدان فشار، الگوی باد و شرایط ناپایداری جو نقش تعیین‌کننده‌ای در شکل‌گیری، انتقال و گسترش این پدیده ایفا می‌کنند. در خاورمیانه، به‌ویژه طی دهه‌های اخیر، کاهش بارندگی، تشدید خشکسالی، خشک‌شدن تالاب‌ها، افزایش برداشت از منابع آب و سایر فشارهای محیطی موجب افزایش فراوانی و شدت رخداد‌های گردوغبار شده است (انگلشتادر^۶، ۲۰۰۱، ذوالفقاری، ۲۰۰۵). برای نمونه، رخداد گردوغبار ژوئیه ۲۰۱۸ بخش وسیعی از ایران را تحت تأثیر قرار داد و انتقال ذرات از بیابان‌های سوریه و عراق تا مرکز ایران گزارش شد (مفیدی، ۲۰۱۱؛ رنجبر سعادت‌آبادی، ۲۰۱۲). این شرایط نشان می‌دهد که بررسی سازوکارهای جوی مؤثر بر انتقال و گسترش گردوغبار، به‌ویژه در مناطق مرکزی ایران، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. افزایش فعالیت گردوغبار در ایران علاوه بر کاهش کیفیت هوا، موجب اختلال در سامانه‌های حمل‌ونقل، کاهش دید افقی، افزایش احتمال وقوع سوانح جاده‌ای و تحمیل خسارات اقتصادی و اجتماعی شده است (خلیلی، ۲۰۱۳؛ ملکوتی، ۲۰۱۳). از این‌رو، مطالعه رخداد‌های شدید گردوغبار با استفاده از داده‌های سینوپتیکی و مشاهدات ماهواره‌ای، نقش مهمی در شناخت سازوکارهای ایجاد و توسعه این پدیده و بهبود پیش‌بینی آن دارد (خوشحال دستجردی، ۲۰۱۲). پژوهش‌های متعددی با رویکردهای مختلف، از جمله تحلیل سینوپتیکی، سنجش از دور، مدل‌سازی عددی و ارزیابی پیامدهای محیطی، به بررسی ابعاد گوناگون پدیده گردوغبار پرداخته‌اند.

برای مثال، وانگ، استین و همکاران^۷ (۲۰۱۱) با استفاده از مدل HYSPLIT چهار منطقه اصلی تولید گردوغبار شامل شمال آفریقا، خاورمیانه، مغولستان و شمال غرب چین را شناسایی کردند. در حوزه سنجش از دور، هسو، ژنگ و همکاران^۸ (۲۰۱۳) عملکرد

الگوریتم Deep Blue را برای شناسایی گردوغبار ارزیابی کردند و نشان دادند که این الگوریتم در مناطق خشک و نیمه‌خشک کارایی بالایی دارد. همچنین اولافسون، آرنالدس و همکاران^۹ (۲۰۱۶) دو رخداد گردوغبار در ایسلند را با استفاده از مدل‌سازی عددی بررسی کردند و نشان دادند که ذرات زیرمیکرونی سهم قابل توجهی در ترکیب گردوغبار دارند. از دیدگاه سینوپتیکی، پورپنجاه (۲۰۱۴) نقش ناوه‌های سطوح بالا و ناپایداری جو را در ایجاد طوفان‌های گردوغبار در مرکز ایران بررسی کرد. همچنین رنجبرسعادت آبادی و همکاران (۲۰۱۷) کانون اصلی گردوغبار در شرق ایران را خشک شدن بستر هامون معرفی کردند. رایگانی (۲۰۱۹) نیز نشان داد که اراضی رهاشده و فرسایش‌پذیر در جنوب و جنوب‌شرق البرز نقش مهمی در تولید گردوغبار دارند. در نهایت، رئیسی (۲۰۲۲) اثرات اقتصادی و اجتماعی گردوغبار را شامل کاهش سلامت عمومی، کاهش تولید کشاورزی، مهاجرت و کاهش کیفیت زندگی بررسی کرد.

با وجود انجام پژوهش‌های متعدد درباره طوفان‌های گردوغبار در ایران، بیشتر مطالعات بر شناسایی کانون‌های گردوغبار، بررسی روندهای زمانی یا ارزیابی پیامدهای زیست‌محیطی این پدیده متمرکز بوده‌اند و مطالعات اندکی به تحلیل جامع رخداد‌های شدید گردوغبار در مناطق مرکزی ایران با تلفیق داده‌های سینوپتیکی، تصاویر ماهواره‌ای و شاخص‌های ناپایداری جو پرداخته‌اند. از این‌رو، نوآوری پژوهش حاضر در تحلیل هم‌زمان شرایط سینوپتیکی، ویژگی‌های ترمودینامیکی جو و مشاهدات ماهواره‌ای برای تبیین سازوکار شکل‌گیری و گسترش یک رخداد شدید گردوغبار در محور ارتباطی نائین-اردکان است. بر این اساس، هدف این پژوهش شناسایی عوامل جوی مؤثر بر وقوع و تشدید این رخداد، بررسی نقش سامانه‌های سینوپتیکی و شرایط محلی در کاهش شدید دید افقی و ارزیابی الگوی انتقال گردوغبار با استفاده از تصاویر MODIS است.

^۶ Engelstädter

^۷ Wang, Stein et al

^۸ Hsu, Jeong et al

^۹ Olafsson, Arnalds et al

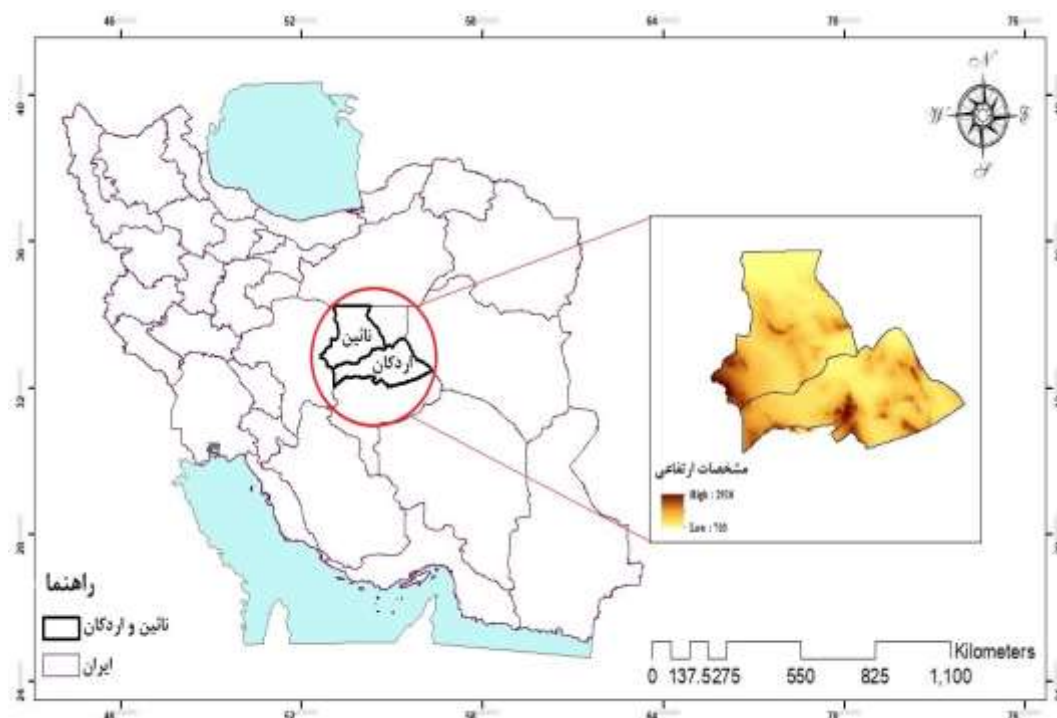
اراضی بیابانی است و کاربری غالب آن را اراضی بایر، مراتع فقیر و پهنه‌های فاقد پوشش گیاهی متراکم تشکیل می‌دهد. این ویژگی‌ها در کنار بارندگی اندک، تباخیر بالا و وزش بادهای شدید، شرایط مناسبی برای تأمین منابع رسوبی و انتقال گردوغبار فراهم کرده‌اند (امیدوار، ۲۰۰۶). شهرستان نائین در استان اصفهان، در ارتفاع حدود ۱۵۸۰ متر از سطح دریا و در مختصات ۳۲ درجه عرض شمالی و ۵۲ درجه طول شرقی واقع شده است. شهرستان اردکان نیز در شمال استان یزد، با وسعتی بیش از ۲۴ هزار کیلومتر مربع، در ارتفاع حدود ۱۰۴۰ متر از سطح دریا و مختصات ۳۲ درجه عرض شمالی و ۵۴ درجه طول شرقی قرار دارد (شکل ۱). قرارگیری این محور ارتباطی در مسیر انتقال توده‌های گردوغبار، اهمیت آن را از نظر مخاطرات حمل‌ونقل و بررسی شرایط سینوپتیکی حاکم بر رخدادها و گردوغبار دوچندان می‌کند.

نتایج این مطالعه می‌تواند در شناخت بهتر سازوکار وقوع طوفان‌های گردوغبار و بهبود مدیریت مخاطرات حمل‌ونقل در مناطق مرکزی ایران مؤثر باشد.

مواد و روش‌ها

منطقه مطالعه

منطقه مورد مطالعه در مرکز ایران و بین دو استان اصفهان و یزد واقع شده است؛ ناحیه‌ای که به دلیل قرارگیری در کمربند خشک و نیمه‌خشک کشور، به‌طور مکرر تحت تأثیر طوفان‌های گردوغبار قرار می‌گیرد. محور ارتباطی نائین-اردکان در محدوده دشت یزد-اردکان واقع شده که به دلیل شرایط اقلیمی خشک، پوشش گیاهی پراکنده، وجود رسوبات سست و ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی، از مناطق مستعد فرسایش بادی و تولید ذرات گردوغبار محسوب می‌شود. از نظر ژئومورفولوژی، منطقه عمدتاً شامل دشت‌های آبرفتی، مخروط افکنه‌ها، پلایاها و



شکل ۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه به همراه مشخصات ارتفاعی

داده‌ها و روش پژوهش

به‌منظور بررسی دقیق شرایط سینوپتیکی، دینامیکی و ترمودینامیکی حاکم بر رخداد شدید طوفان گردوغبار سرخ در روزهای ۱۱ و ۱۲ مارس ۲۰۲۲، ابتدا ویژگی‌های جغرافیایی منطقه مورد مطالعه بررسی و سپس شرایط جوی حاکم بر زمان وقوع رخداد به‌صورت مرحله‌ای تحلیل شد. با توجه به اینکه در این رخداد میزان دید افقی در محور ارتباطی نائین-اردکان به کمتر از ۵۰ متر کاهش یافت و ذرات معلق غالب منطقه از نوع رسوبات ریزدانه و غنی از رس بودند، این رخداد در گروه طوفان‌های گردوغبار سرخ طبقه‌بندی شد (امیدوار، ۱۳۸۵) (شکل ۲). به‌منظور تحلیل همزمان ویژگی‌های محیطی و شرایط جوی مؤثر بر این رخداد، از دو گروه داده شامل داده‌های سطح زمین و داده‌های جو بالا استفاده شد. انتخاب روزهای گردوغباری براساس گزارش پدیده گردوغبار در ایستگاه‌های هواشناسی، کاهش دید افقی، افزایش سرعت باد و بررسی همزمان تصاویر ماهواره‌ای MODIS انجام گرفت. رخداد ۱۱ تا ۱۲ مارس ۲۰۲۲ به‌دلیل کاهش دید افقی به کمتر از ۵۰ متر، وقوع اختلال گسترده در محور ارتباطی نائین-اردکان و شدت بالای طوفان به‌عنوان رخداد شاخص برای تحلیل انتخاب شد. در مرحله نخست، داده‌های روزانه هواشناسی شامل میانگین دما، سرعت باد و دید افقی از اداره‌کل هواشناسی استان‌های اصفهان و یزد تهیه شد. سپس به‌منظور تحلیل الگوهای سینوپتیکی مؤثر بر شکل‌گیری و گسترش طوفان، نقشه‌های فشار سطح دریا (SLP)، ارتفاع ژئوپتانسیل

ترازهای ۵۰۰ و ۸۵۰ هکتوپاسکال (HGT)، مؤلفه‌های باد U و V و رطوبت نسبی تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال از پایگاه داده سازمان ملی اقیانوسی و جوی آمریکا (NOAA) دریافت شد. نقشه‌های مذکور پس از دریافت، در محیط نرم‌افزار GrADS پردازش و ترسیم شدند. تمامی داده‌های مورد استفاده دارای تفکیک زمانی روزانه بودند. داده‌های ایستگاهی از ایستگاه‌های هواشناسی استان‌های اصفهان و یزد استخراج شد و داده‌های جو بالا به‌صورت شبکه‌ای از پایگاه NOAA دریافت گردید. همچنین، تصاویر ماهواره‌ای MODIS با قدرت تفکیک مکانی مناسب، برای بررسی گسترش و انتقال توده گردوغبار در طول رخداد مورد استفاده قرار گرفتند. به‌منظور ارزیابی شرایط ترمودینامیکی جو، از نمودار Skew-T و شاخص‌های ناپایداری K Index (KI) و Showalter Index (SI) استفاده شد. با توجه به عدم دسترسی به داده‌های Skew-T برای ایستگاه‌های یزد و کرمان در زمان وقوع رخداد، از ایستگاه شیراز که نزدیک‌ترین ایستگاه دارای داده‌های کامل و معتبر بود، استفاده شد. اگرچه این ایستگاه با منطقه مورد مطالعه فاصله مکانی دارد، اما در زمان وقوع رخداد هر دو منطقه تحت تأثیر سامانه سینوپتیکی گسترده و یکسان قرار داشتند؛ بنابراین، نمودار Skew-T صرفاً برای ارزیابی وضعیت کلی پایداری و ناپایداری توده هوای حاکم بر جنوب و مرکز ایران به‌کار گرفته شد و نتایج آن در کنار سایر داده‌های سینوپتیکی و تصاویر ماهواره‌ای تفسیر گردید.

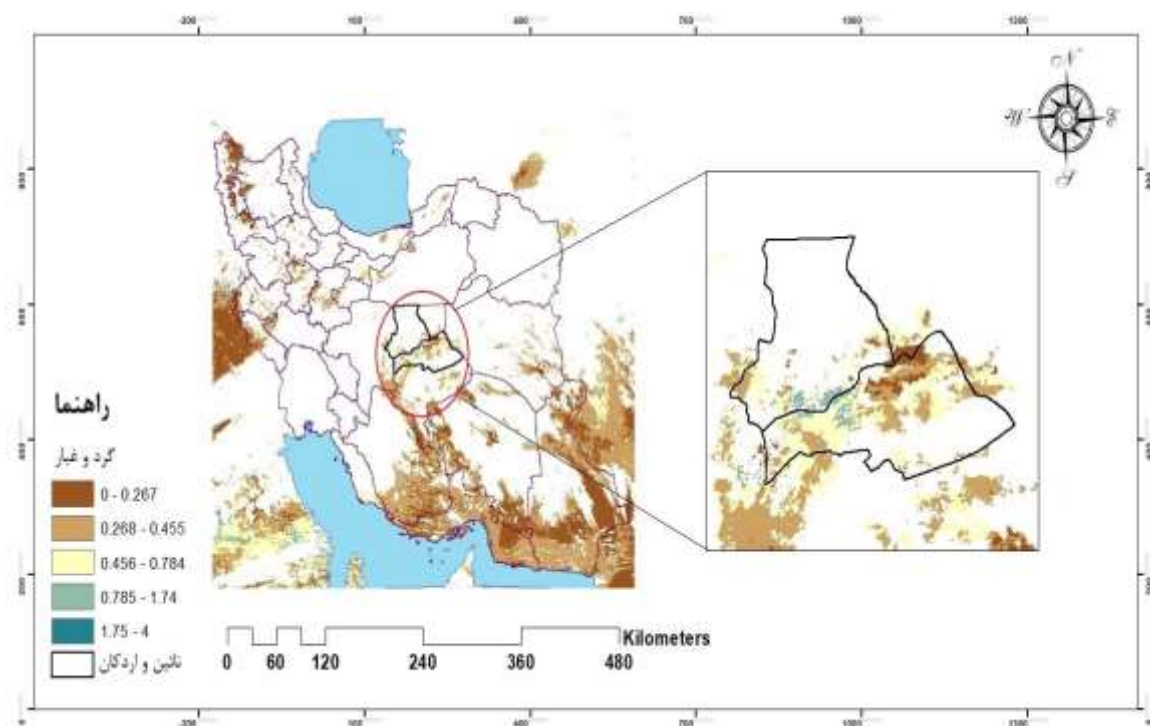


شکل ۲- تصاویر طوفان گردوغبار سرخ، انسداد مسیر و وقوع تصادف در راه ارتباطی نائین-اردکان (منبع: خبرگزاری ایسنا)

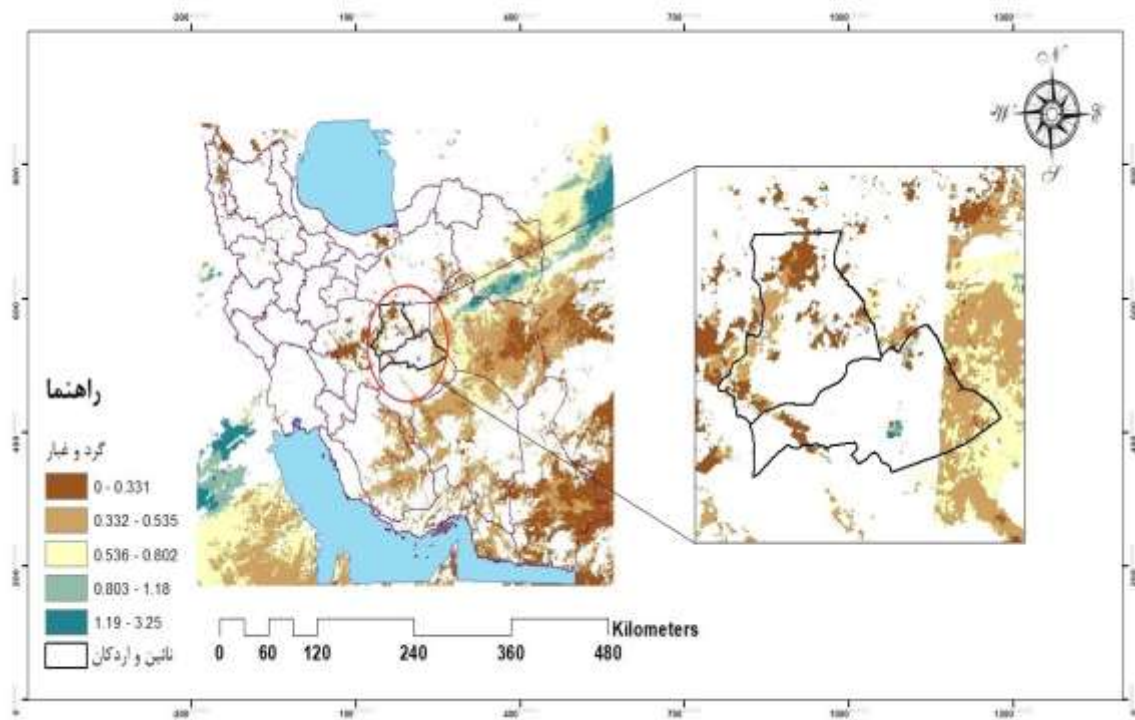
نتایج و بحث

به منظور بررسی گستره مکانی و روند گسترش طوفان گردوغبار، از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده MODIS نصب شده بر روی ماهواره‌های Terra و Aqua متعلق به سازمان فضایی ناسا استفاده شد. این تصاویر با قدرت تفکیک مکانی حدود یک کیلومتر و برخورداری از باندهای طیفی متعدد، امکان شناسایی و پایش توده‌های گردوغبار و بررسی الگوی پراکنش آن‌ها را فراهم می‌کنند. شکل‌های ۳ و ۴ تصاویر مربوط به رخداد شدید گردوغبار در روزهای ۱۱ و ۱۲ مارس ۲۰۲۲ را نشان می‌دهند. بررسی تصاویر ماهواره‌ای وقوع یک طوفان شدید گردوغبار در محدوده نائین-اردکان را به خوبی تأیید می‌کند. تصاویر MODIS به تنهایی برای تعیین منشأ گردوغبار مورد استفاده قرار نگرفتند، بلکه در کنار تحلیل نقشه‌های سینوپتیکی شامل فشار سطح دریا، ارتفاع ژئوپتانسیل، میدان باد و رطوبت نسبی، برای تفسیر

مسیر گسترش و انتقال توده گردوغبار به کار گرفته شدند. نتایج نشان داد که همزمان با استقرار سامانه کم‌فشار بر روی شبه‌جزیره عربستان، افزایش گرادیان فشار موجب تقویت بادهای شمال غربی و جنوب غربی شد و شرایط لازم برای انتقال و گسترش توده گردوغبار به سمت مناطق مرکزی ایران فراهم گردید. همچنین، همزمان با کاهش فشار مرکزی سامانه به حدود ۱۰۰۵ هکتوپاسکال، سرعت باد در منطقه تا حدود ۳۰ متر بر ثانیه افزایش یافت و دید افقی در محور نائین-اردکان به کمتر از ۵۰ متر کاهش پیدا کرد. این همزمانی بیانگر ارتباط مستقیم میان تشدید گرادیان فشار، افزایش سرعت باد و گسترش توده گردوغبار مشاهده شده در تصاویر ماهواره‌ای است. افزون بر این، ویژگی‌های توپوگرافی و شرایط سطحی منطقه در تشدید انتقال ذرات و کاهش دید افقی نقش مؤثری داشته‌اند.



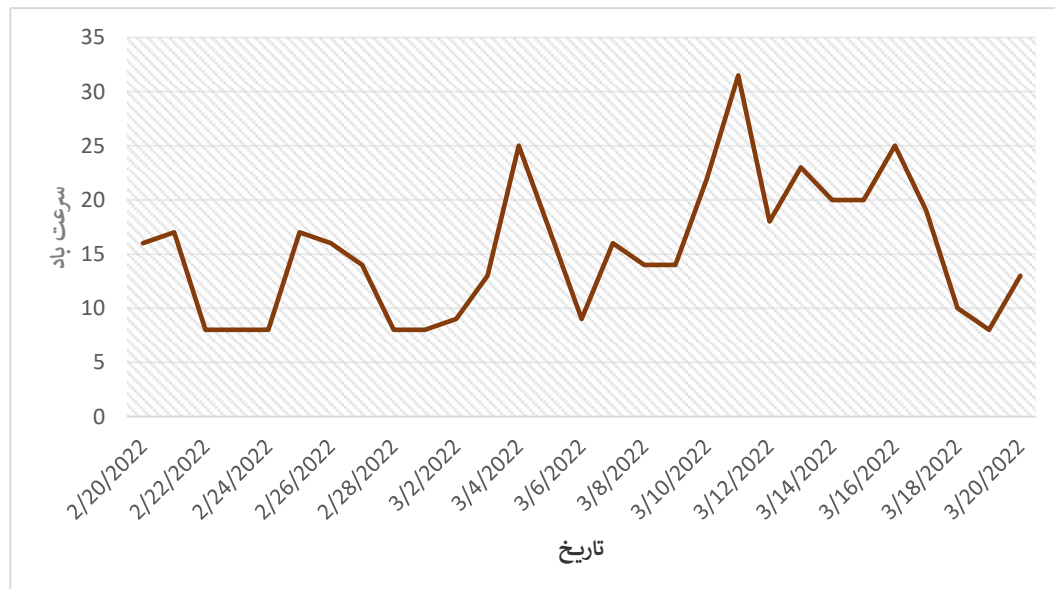
شکل ۳- تصویر ماهواره‌ای MODIS از طوفان گردوغبار در منطقه نائین-اردکان در ۱۱ مارس ۲۰۲۲



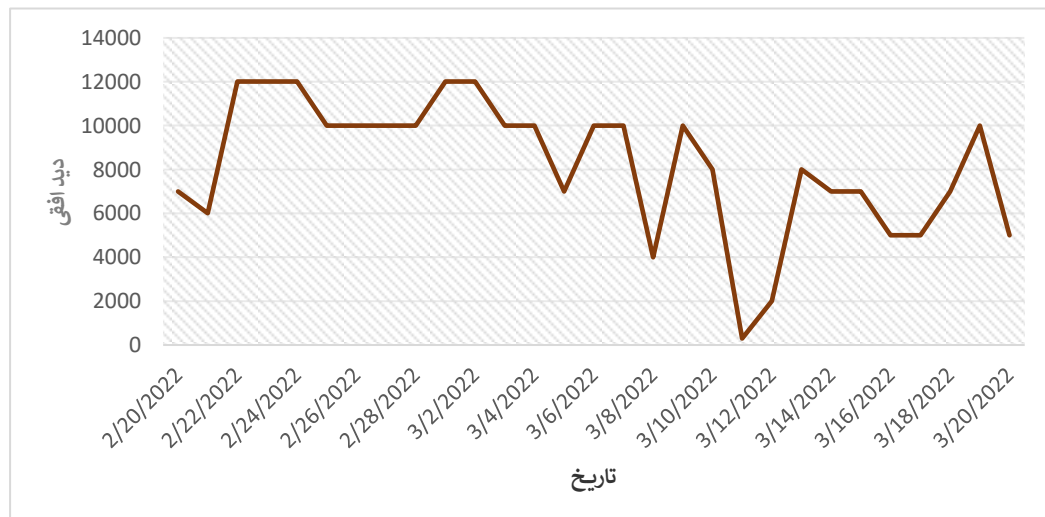
شکل ۴- تصویر ماهواره‌ای MODIS از گسترش توده گردوغبار بر فراز مرکز ایران در ۱۲ مارس ۲۰۲۲

کاهش یافته که نشان‌دهنده شدت بسیار بالای طوفان گردوغبار و مخاطرات ناشی از آن برای حمل‌ونقل جاده‌ای و فعالیت‌های انسانی است. همزمانی وقوع بیشینه سرعت باد با کمینه دید افقی نشان می‌دهد که افزایش سرعت باد نقش اصلی را در خیزش، انتقال و تمرکز ذرات گردوغبار در منطقه ایفا کرده است. این شرایط منجر به کاهش شدید میدان دید، اختلال در تردد وسایل نقلیه و وقوع تصادفات زنجیره‌ای در محور ارتباطی نائین-اردکان شده است (شکل‌های ۵ و ۶).

بررسی کدهای حاضر هوا و تغییرات زمانی سرعت باد در دوره مورد مطالعه نشان می‌دهد که حداکثر سرعت باد در ایستگاه نائین-اردکان در روز ۱۱ مارس ۲۰۲۲ به بیش از ۳۰ متر بر ثانیه رسیده است. همچنین نوسانات سرعت باد در این روز دامنه قابل توجهی داشته که بیانگر حاکمیت شرایط جوی ناپایدار و تشدید گرادیان فشاری در منطقه است. تحلیل تغییرات دید افقی نیز نشان می‌دهد که میزان کاهش دید در ایستگاه نائین-اردکان نسبت به سایر ایستگاه‌های منطقه بسیار شدیدتر بوده است. در جریان این رخداد، دید افقی به کمتر از ۵۰ متر



شکل ۵- تغییرات سرعت باد در روزهای همراه با طوفان گردوغبار در نائین-اردکان



شکل ۶- تغییرات دید افقی در روزهای همراه با طوفان گردوغبار در نائین-اردکان

تحلیل نقشه‌های جوی

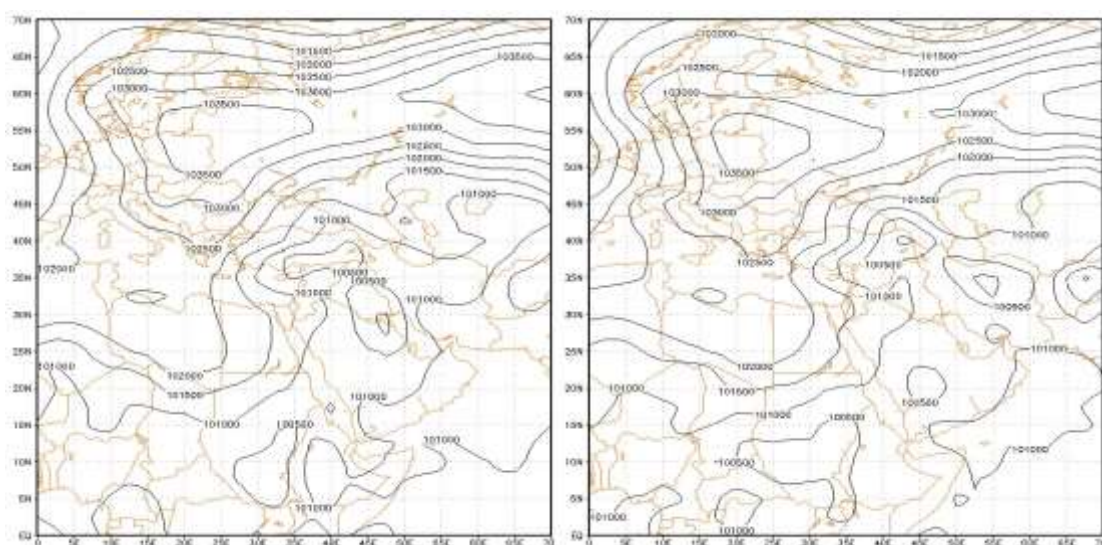
الگوهای گردش جو حاکم بر منطقه طی رخداد طوفان گردوغبار (۱۱ و ۱۲ مارس ۲۰۲۲)

بررسی نقشه‌های فشار تراز دریا (SLP) در روزهای ۱۱ و ۱۲ مارس ۲۰۲۲ نشان‌دهنده حاکمیت الگوهای پیچیده گردش جو بر منطقه مورد مطالعه است. در ساعت ۰۰ گرینویچ روز ۱۱ مارس، یک مرکز پرفشار قوی با فشاری حدود ۱۰۳۷ هکتوپاسکال از نواحی مدیترانه تا شمال دریای سیاه گسترش یافته بود. همزمان، یک مرکز پرفشار ضعیف‌تر با فشاری حدود ۱۰۱۵ هکتوپاسکال از شرق دریای سیاه تا دریای

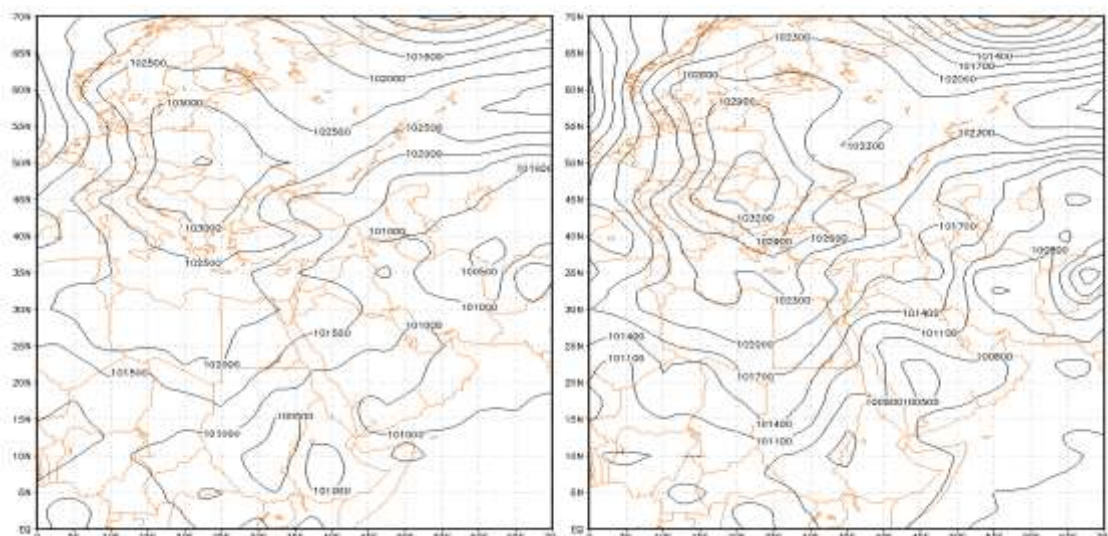
خزر امتداد داشت. در مقابل، یک سامانه کم‌فشار با فشاری حدود ۱۰۰۵ هکتوپاسکال بر روی خلیج فارس، عربستان سعودی و کویت شکل گرفته و در حال حرکت به سمت ایران بود. در ساعت ۱۲ گرینویچ همان روز، این سامانه کم‌فشار بر فراز مرکز ایران مستقر شد. گسترش این سامانه بر روی منطقه مورد مطالعه با کاهش رطوبت جو، افزایش سرعت بادهای سطحی و تشدید فرایند خیزش ذرات گردوغبار همراه بود. این شرایط موجب افزایش ناپایداری جو و تقویت پدیده کانالیزه‌شدن باد در امتداد راه ارتباطی نائین-اردکان شد که در نهایت به

سمت نواحی شرقی کشور جابه‌جا شد و تحت تأثیر شرایط جوی حاکم بر افغانستان و پاکستان عمق بیشتری پیدا کرد. این وضعیت موجب افزایش گرادیان حرارتی و تقویت نفوذ کم‌فشار به منطقه شد. علاوه بر این، عبور جریان‌های هوا از روی شبه‌جزیره عربستان و عراق سبب انتقال توده‌های هوای گرم و خشک به منطقه گردید که نقش مهمی در تشدید انتقال گردوغبار و افزایش غلظت ذرات معلق در جو منطقه ایفا کرد (شکل ۸).

شکل‌گیری یک طوفان شدید گردوغبار سرخ منجر گردید. داده‌های هواشناسی نشان می‌دهد که در جریان این رخداد، میزان دید افقی در ایستگاه نائین به کمتر از ۵۰ متر کاهش یافته و در برخی بخش‌های محور ارتباطی نائین-اردکان تقریباً به صفر رسیده است. همچنین حداکثر سرعت باد از ۳۰ متر بر ثانیه فراتر رفت که پیامد آن اختلال گسترده در تردد جاده‌ای و وقوع چندین تصادف زنجیره‌ای بود (شکل ۷). در ساعت ۰۰ گرینویچ روز ۱۲ مارس، سامانه کم‌فشار ۱۰۰۵ هکتوپاسکالی مستقر بر مرکز ایران به



شکل ۷- نقشه فشار تراز دریا (SLP) در ساعت ۰۰ (سمت چپ) و ۱۲ گرینویچ (سمت راست) روز ۱۱ مارس ۲۰۲۲

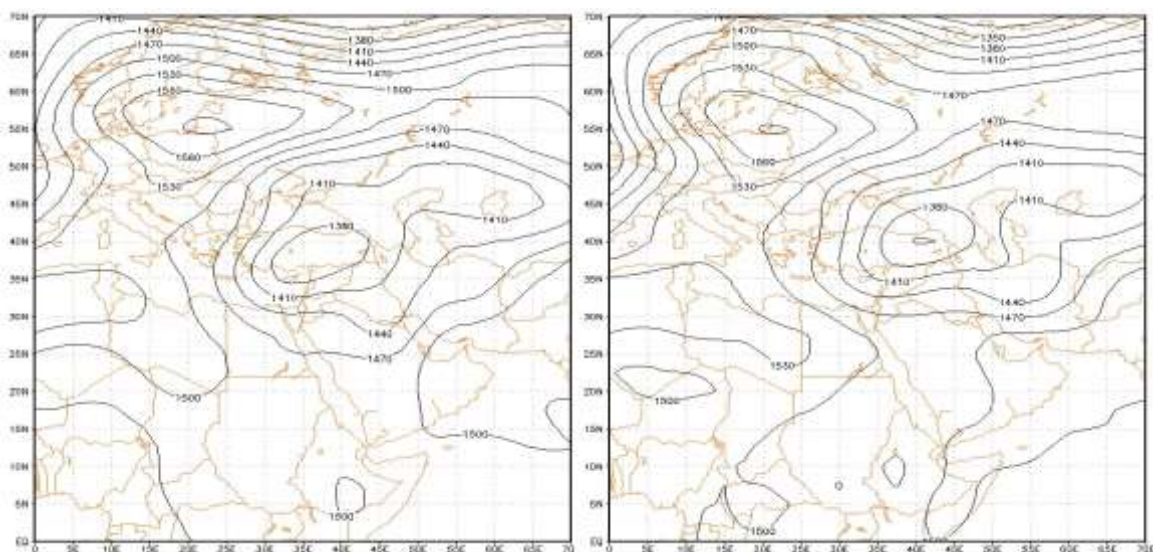


شکل ۸- نقشه فشار تراز دریا (SLP) در ساعت ۰۰ (سمت چپ) و ۱۲ گرینویچ (سمت راست) روز ۱۲ مارس ۲۰۲۲

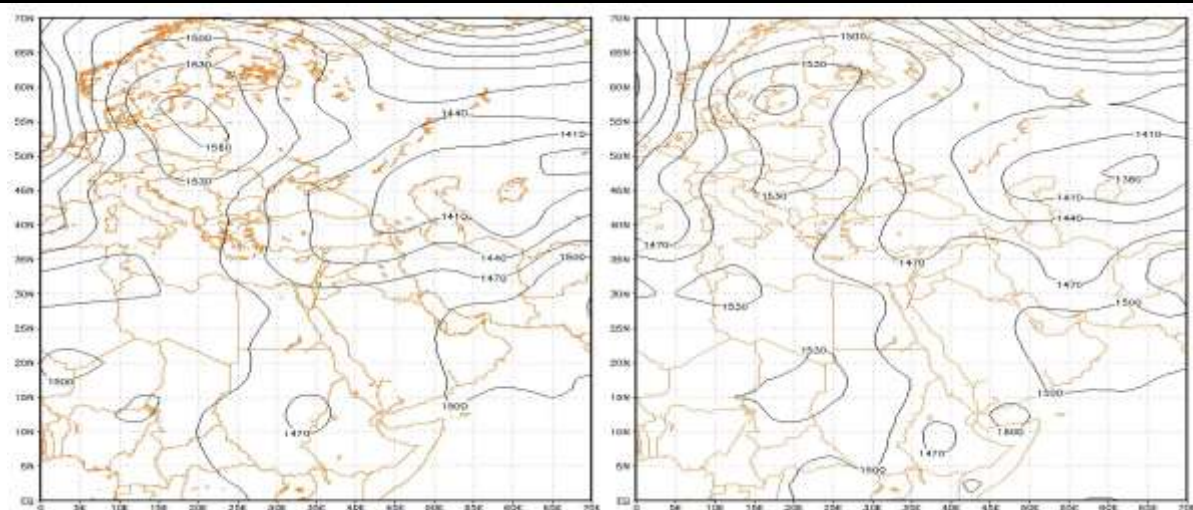
۹). در روز ۱۲ مارس و در ساعت ۰۰ گرینویچ، سامانه پرفشار واقع بر دریای بالتیک به سمت شرق گسترش یافته و سامانه کم‌فشار مرتبط با نواحی دریای سیاه و مدیترانه بر روی بخش‌هایی از ترکیه شرقی، شمال عراق و ایران توسعه یافته است. همچنین ناه مستقر بر مرکز ایران که متناظر با کم‌فشار سطح زمین است، دارای امتداد شرقی-غربی بوده و بخش جنوبی ایران، شبه‌جزیره عربستان و عراق را در بر گرفته است. این الگوی گردش جو موجب انتقال توده‌های هوای گرم و خشک به منطقه و تشدید فعالیت گردوغبار شده است. در ساعت ۱۲ گرینویچ، این سامانه به سمت عرض‌های جغرافیایی پایین‌تر و شرق جابه‌جا شده و هسته کم‌فشار بسته‌ای در بخش‌هایی از افغانستان و پاکستان عمیق‌تر شده است. این شرایط موجب افزایش گرادیان حرارتی و تقویت گردوغبار در منطقه مورد مطالعه شده است (شکل ۱۰). علاوه بر این، نقشه‌های رطوبت نسبی تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال در ساعات ۰۰ و ۱۲ گرینویچ به‌وضوح نشان می‌دهند که انتقال رطوبت از منابع آبی جنوب ایران بسیار ضعیف بوده است. نبود تأمین رطوبتی کافی نقش مهمی در تداوم ناپایداری جو و تداوم شرایط شدید گردوغبار در طول رخداد داشته است (شکل‌های ۱۱ و ۱۲).

تحلیل ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال و رطوبت نسبی

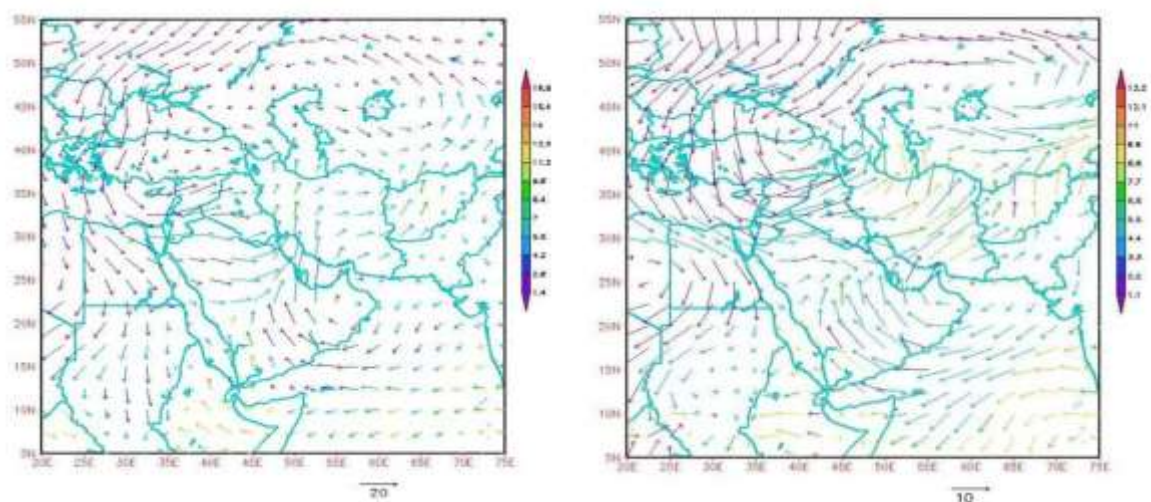
تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال (HGT 850 hPa) به دلیل نزدیکی به سطح زمین، به شدت تحت تأثیر ویژگی‌های سطحی قرار دارد و در نتیجه بازتاب‌دهنده الگوهای تعدیل‌شده گردش جو در لایه‌های پایینی جو است. بررسی نقشه‌های ارتفاع ژئوپتانسیل این تراز در روز ۱۱ مارس ۲۰۲۲ در ساعت ۰۰ گرینویچ نشان می‌دهد که یک مرکز پرفشار بسته بر فراز دریای بالتیک قرار داشته است. همزمان، هسته‌ای کم‌ارتفاع در بخش‌هایی از دریای سیاه، ترکیه، دریای اژه و نواحی مدیترانه مشاهده می‌شود. علاوه بر این، یک ناه عمیق از روی عراق، عربستان سعودی و بخش‌هایی از خلیج فارس گسترش یافته است. در ساعت ۱۲ گرینویچ همان روز، این ناه به سمت جنوب‌غرب و مرکز ایران توسعه یافته است. براساس نقشه‌های رطوبت نسبی متناظر، نبود بارش قابل توجه پیش از وقوع طوفان، همراه با وجود خاک‌های ریزدانه و محدودیت منابع رطوبتی سطحی، شرایط بسیار ناپایدار در جو ایجاد کرده است. این شرایط موجب شکل‌گیری یک طوفان شدید گردوغبار سرخ در راه ارتباطی نائین-اردکان شده و دید افقی را به کمتر از ۵۰ متر کاهش داده است؛ به‌طوری‌که در برخی بخش‌ها دید تقریباً به صفر رسیده است (شکل



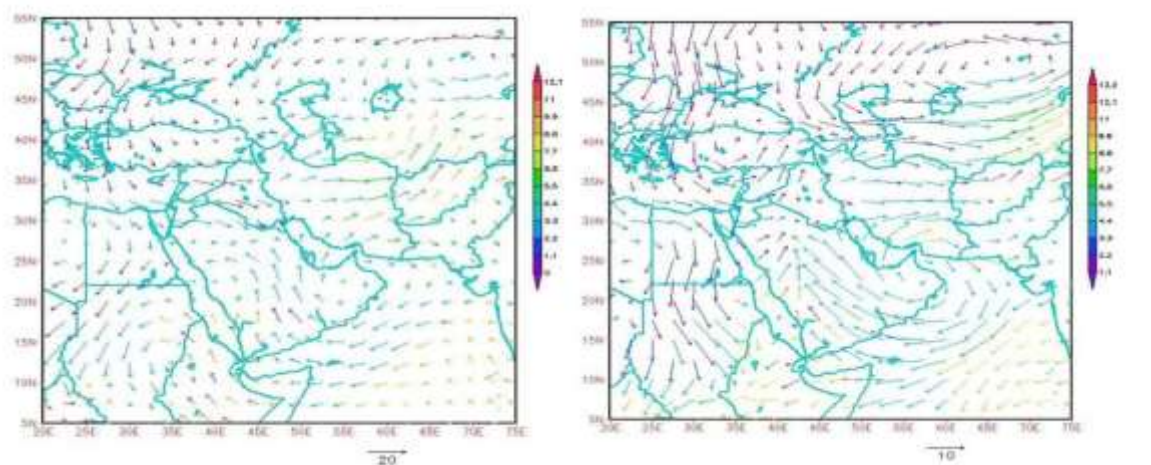
شکل ۹- نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال در ۱۱ مارس ۲۰۲۲، ساعت ۰۰ گرینویچ (سمت چپ) و ۱۲ گرینویچ (سمت راست)



شکل ۱۰- نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال در ۱۲ مارس ۲۰۲۲، ساعت ۰۰ گرینویچ (سمت چپ) و ۱۲ گرینویچ (سمت راست)



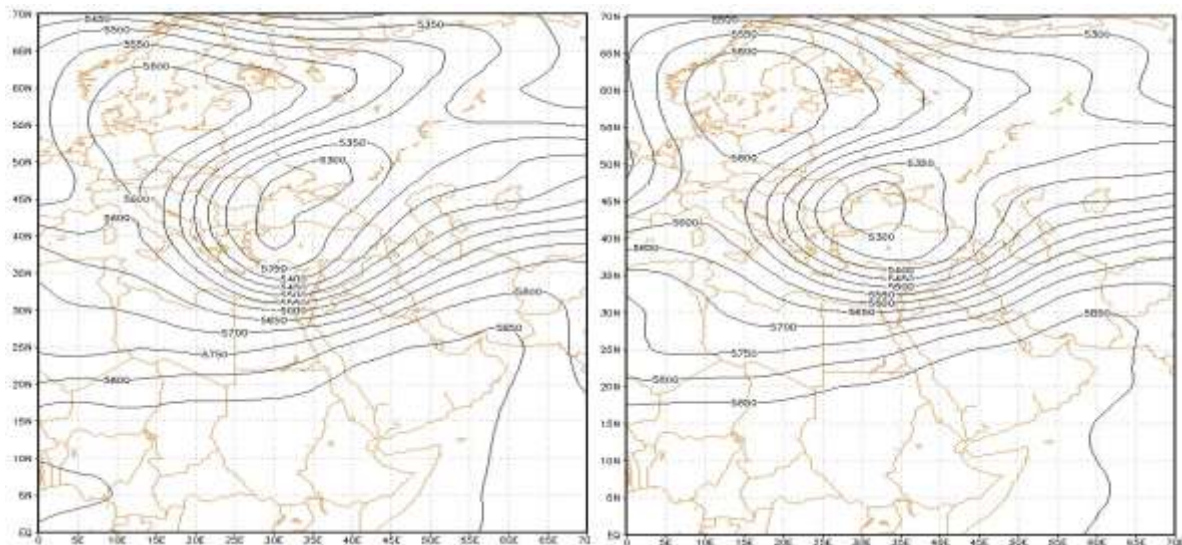
شکل ۱۱- نقشه رطوبت نسبی تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال در ۱۱ مارس ۲۰۲۲، ساعت ۰۰ گرینویچ (سمت چپ) و ۱۲ گرینویچ (سمت راست)



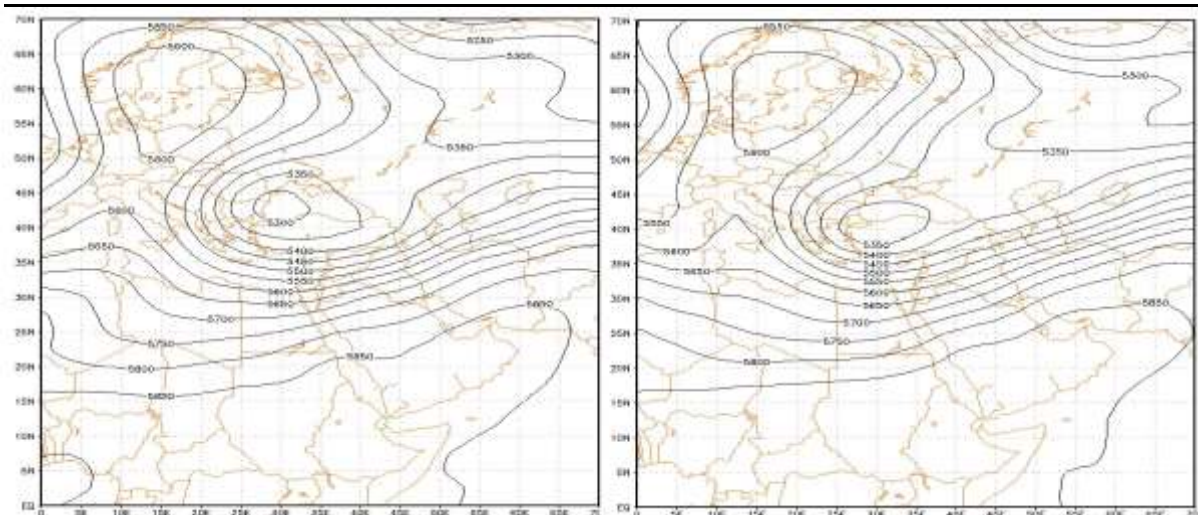
شکل ۱۲- نقشه رطوبت نسبی تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال در ۱۲ مارس ۲۰۲۲، ساعت ۰۰ گرینویچ (سمت چپ) و ۱۲ گرینویچ (سمت راست)

گردوغبار سرخ ظاهر شد. در این دوره، سرعت باد از ۳۰ متر بر ثانیه فراتر رفت، دید افقی به کمتر از ۵۰ متر کاهش یافت و در برخی مناطق به شرایط نزدیک به صفر رسید که منجر به وقوع تصادفات زنجیره‌ای و خسارات قابل توجه شد (شکل ۱۳). در روز ۱۲ مارس در ساعت ۰۰ گرینویچ، سامانه کم‌فشار مرتبط با نواحی دریای سیاه و مدیترانه عمیق‌تر شده و گسترش بیشتری یافت، به‌طوری‌که بخش عمده‌ای از ایران را پوشش داد و شرایط طوفانی در مقیاس سینوپتیکی را بر مرکز کشور حاکم کرد. در ساعت ۱۲ گرینویچ همان روز، این سامانه به سمت عرض‌های جغرافیایی شرقی جابه‌جا شد و هم‌زمان یک مرکز کم‌فشار بسته در بخش‌هایی از افغانستان و پاکستان تقویت گردید. این شرایط موجب افزایش گرادیان دمایی نصف‌النهاری و تقویت فرایندهای خیزش و انتقال گردوغبار در منطقه شد (شکل ۱۴).

تحلیل ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال
بررسی میدان ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (HGT) نشان‌دهنده سلطه الگوهای گردش غربی در عرض‌های میانی بر منطقه مورد مطالعه در دوره رخداد است. در روز ۱۱ مارس ۲۰۲۲ در ساعت ۰۰ گرینویچ، یک مرکز پرفشار با ارتفاع ژئوپتانسیل حدود ۵۶۲۵ متر بر فراز دریای بالتیک قرار داشت. در ادامه، یک ناوه عمیق از نواحی دریای مدیترانه، دریای سیاه، دریای سرخ، شبه‌جزیره عربستان، عراق و ترکیه گسترش یافته و تا مرکز ایران امتداد پیدا کرد. در ساعت ۱۲ گرینویچ همان روز، این ناوه تشدید شده و در شرایط جوی خشک و با حداقل منابع رطوبتی به سمت شرق گسترش یافت. این سامانه دینامیکی نقش مهمی در ایجاد ناپایداری شدید جوی در راه ارتباطی نائین-اردکان ایفا کرد؛ به‌گونه‌ای که این ناپایداری به شکل یک طوفان شدید



شکل ۱۳- نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در ۱۱ مارس ۲۰۲۲، ساعت ۰۰ گرینویچ (سمت چپ) و ۱۲ گرینویچ (سمت راست)



شکل ۱۴. نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در ۱۲ مارس ۲۰۲۲، ساعت ۰۰ گرینویچ (سمت چپ) و ۱۲ گرینویچ (سمت راست)

ترمودینامیکی جو در زمان وقوع طوفان گردوغبار استفاده شد. همچنین، مقادیر شاخص‌های Showalter Index (SI) و K Index (KI) برای ایستگاه شیراز در جدول (۱) ارائه شده است.

تحلیل نمودارهای Skew-T در دوره رخداد

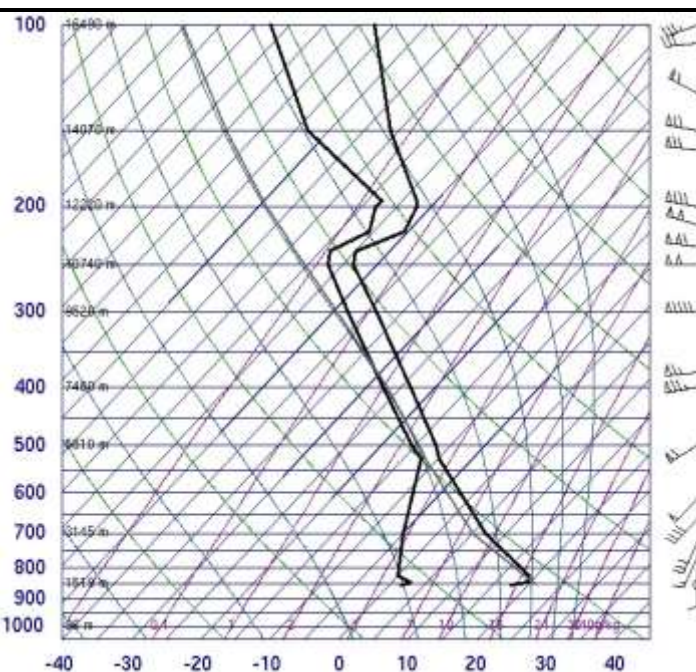
نمودارهای ترمودینامیکی Skew-T به‌طور گسترده برای تحلیل داده‌های بالاسنجی جو و ارزیابی وضعیت پایداری یا ناپایداری جو مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این پژوهش، از این نمودارها برای بررسی شرایط

جدول ۱- شاخص‌های ناپایداری جو

ایستگاه	تاریخ	Ki	Si
شیراز	۲۰۲۲/۰۳/۱۱	۲۱.۳۰	۲.۹۸

بادهای شدید سطحی، شرایط برای خیزش و انتقال ذرات گردوغبار فراهم شده است. بنابراین، وقوع این رخداد بیش از آنکه ناشی از ناپایداری شدید همرفتی باشد، تحت تأثیر برهم‌کنش شرایط سینوپتیکی، خشکی سطح زمین و بادهای قوی قرار داشته است (شکل ۱۵).

نتایج نشان می‌دهد که در ساعت ۰۰ گرینویچ روز ۱۱ مارس ۲۰۲۲، مقدار شاخص Showalter (SI) برابر با ۲.۹۸ و مقدار شاخص K برابر با ۲۱.۳۰ بوده است. این مقادیر بیانگر شرایط نسبتاً ناپایدار جو و وجود پتانسیل محدود تا متوسط برای ناپایداری هستند. با این حال، با توجه به خشکی لایه‌های زیرین جو، رطوبت کم، افزایش گرادیان فشار و وزش



شکل ۱۵- نمودار Skew-T فشار-دما ایستگاه شیراز در ساعت ۰۰ روز ۱۱ مارس ۲۰۲۲

نتیجه گیری

طوفان‌های گردوغبار یکی از مهم‌ترین مخاطرات اقلیمی در مناطق خشک و نیمه‌خشک محسوب می‌شوند که پیامدهای گسترده‌ای در ابعاد محیطی، اقتصادی و اجتماعی دارند. در این پژوهش، سازوکارهای سینوپتیکی، دینامیکی و ترمودینامیکی مؤثر در وقوع یک طوفان گرد و غبار شدید (رنگی/قرمز) در راه ارتباطی نائین-اردکان طی بازه زمانی ۱۰ تا ۱۱ مارس ۲۰۲۲ با استفاده از مجموعه‌ای یکپارچه از داده‌ها شامل مشاهدات هواشناسی سطحی، نقشه‌های سینوپتیکی (فشار سطح دریا، ارتفاع ژئوپتانسیل در سطوح ۵۰۰ و ۸۵۰ هکتوپاسکال، مؤلفه‌های باد و رطوبت نسبی)، تصاویر ماهواره‌ای MODIS و تحلیل نمودار Skew-T لگاریتمی فشار-دما مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان داد که استقرار سامانه کم‌فشار بر روی شبه‌جزیره عربستان، تقویت گرادیان فشار و وزش بادهای شدید، در کنار خشکی جو و شرایط سطحی منطقه، مهم‌ترین عوامل مؤثر در خیزش، انتقال و گسترش گردوغبار بوده‌اند. همچنین، ویژگی‌های توپوگرافی محور نائین-اردکان با هدایت و

تشدید جریان باد، نقش مهمی در کاهش شدید دید افقی و افزایش مخاطرات حمل‌ونقل ایفا کرده است. این نتایج نشان می‌دهد که وقوع چنین رخدادهایی تنها به یک عامل محدود نبوده و حاصل برهم‌کنش فرآیندهای جوی در مقیاس بزرگ با شرایط محلی است. یافته‌های این پژوهش با نتایج مطالعات گودی و میدلتون (۲۰۰۱) و وانگ و همکاران (۲۰۱۱) همخوانی دارد که نقش سامانه‌های سینوپتیکی و گردش‌های جوی را در انتقال و گسترش گردوغبار در مناطق خشک و نیمه‌خشک مورد تأکید قرار داده‌اند. همچنین، نتایج حاصل با پژوهش‌های لشکری (۲۰۰۸) و کارگر و همکاران (۲۰۱۷) نیز در زمینه تأثیر شرایط اقلیمی و الگوهای جوی بر وقوع گردوغبار در ایران همسو است. با این حال، تفاوت اصلی پژوهش حاضر با مطالعات پیشین در تمرکز بر تحلیل یک رخداد شدید در مقیاس محلی و بررسی همزمان داده‌های سینوپتیکی، ترمودینامیکی، مشاهدات سطحی و تصاویر ماهواره‌ای است که امکان شناخت دقیق‌تر سازوکار وقوع این رخداد را فراهم کرده است. از دیدگاه کاربردی نیز، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تلفیق داده‌های سینوپتیکی، تصاویر

اردکان، کمک کند. بهره‌گیری از این رویکرد در برنامه‌ریزی مدیریت بحران و حمل‌ونقل می‌تواند نقش مؤثری در کاهش خسارات جانی و اقتصادی ناشی از کاهش دید افقی و اختلال در تردد ایفا کند.

ماهواره‌ای و مشاهدات ایستگاهی می‌تواند دقت پایش و پیش‌بینی رخداد‌های شدید گردوغبار را افزایش داده و به توسعه سامانه‌های هشدار سریع در محورهای مواصلاتی مستعد، از جمله محور نائین-

References

- [1]. Alijani, B. (1997). "Climate of Iran." Tehran, Payam Noor Publications. [in Farsi]
- [2]. Arimoto, R. (2001). Eolian dust and climate: relationships to sources, tropospheric chemistry, transport and deposition. *Earth-Science Reviews*, 54(1-3), 29-42. <https://doi.org/10.1029/2000JD900714>
- [3]. Engelstädter, S. (2001). *Dust storm frequencies and their relationship to land surface conditions* (Doctoral dissertation, Friedrich-Schiller-Universität Jena). <https://hdl.handle.net/21.11116/0000-0009-D2E6-6>
- [4]. Goudie, A. S., & Middleton, N. J. (2001). Saharan dust storms: nature and consequences. *Earth-science reviews*, 56(1-4), 179-204. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(01\)00067-8](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(01)00067-8)
- [5]. Hamish, A., Grant, M., Tanish, A., Sturman, P., & Zavtar, P. (2001). Inter-Regional Transport of Australian Dust Storms, Soil Erosion Research for the 21th Century. In *Proceeding of int. symp. Honolulu. HI. USA*.
- [6]. Hsu, N. C., Jeong, M. J., Bettenhausen, C., Sayer, A. M., Hansell, R., Seftor, C. S., ... & Tsay, S. C. (2013). Enhanced Deep Blue aerosol retrieval algorithm: The second generation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(16), 9296-9315. <https://doi.org/10.5194/amt-6-1821-2013>
- [7]. Khaledi, K. (2013). Economic loss of dust storms in Iran west provinces case study (of Ilam, Khuzestan and Kermanshah). *Economic Modeling*, 7(3 (23rd issue), 105-125. SID. <https://sid.ir/paper/176293/fa> [in Farsi]
- [8]. karegar, M. E., Bodagh Jamali, J., Ranjbar Saadat Abadi, A., Moeenoddini M., & Goshtasb, H. (2017). Simulation and Numerical Analysis of severe dust storms Iran East. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*. 7; 3(4):101-119. <https://sid.ir/paper/264764/fa> [in Farsi]
- [9]. Khoshhal Dastjerdi, J., Mousavi, S. H., & Kashki, A. (2012). Synoptic analysis of Ilam dust storms (1987-2005). *Geography and Environmental Planning*, 23(2), 15-34. https://gep.ui.ac.ir/article_18542.html [in Farsi]
- [10]. Lashkari, H., & Kikhosravi, G. H. (2008). Synoptic statistical analysis of dust storms in Khorasan Razavi province in time interval (1993-1995). *Natural Geography Studies*, 40(65), 17-33. https://jphgr.ut.ac.ir/article_27757.html [in Farsi]
- [11]. Malakoti, H., Babahosseini, S., Nohegar, A., Azadi, M., Mohammadpour, M. (2013). "A synoptic and numerical study of propagation, transmission and identification of the source of a heavy dust storm in the Middle East region." *Environmental Erosion Research*: pp. 69-80. <https://civilica.com/doc/629587/> [in Farsi]
- [12]. Mofidi, A., Jafari, S. (2011). "Investigating the role of regional atmospheric circulation over the Middle East in the occurrence of summer dust storms in southwest Iran". *Geographical studies of dry areas, Sabzevar*. <https://civilica.com/doc/794801> [in Farsi]
- [13]. Natsagdorj, L., Jugder, D., & Chung, Y. S. (2002). Analysis of dust storms observed in Mongolia. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 38(3), 209-223. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(02\)01023-3](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(02)01023-3)

- [14]. Dagsson-Waldhauserova, P., Magnusdottir, A. Ö., Olafsson, H., & Arnalds, O. (2016). The spatial variation of dust particulate matter concentrations during two Icelandic dust storms in 2015. *Atmosphere*, 7(6), 77. <https://doi.org/10.5194/acp-16-123-2016>
- [15]. Omidvar, K. (2006). "review and synoptic analysis of sandstorms in Yazd-Ardakan plain". *Geographical Research Quarterly*, 81, 44-58. <https://civilica.com/doc/100903/> [in Farsi]
- [16]. Pour Panjah, M., Memarian, MH, Mirrokni, SM, (2014). "Analysis of dust storms in Yazd province based on numerical modeling". *Geography and Environmental Hazards*, pp. 17-33. https://geoeh.um.ac.ir/article_28077.html [in Farsi]
- [17]. Raigani, B., Barati Ghahfarokhi, S, Khushnava, A. (2019). "Identification of dust production centers using remote sensing data. Pasture and watershed management". *Journal of Natural Resources of Iran*, 72(1): 83-105. <https://doi.org/10.22059/jrwm.2019.251015.1223> [in Farsi]
- [18]. Raisi, M. Firoozi Rad., S (2022). "Prioritizing the consequences of wind erosion and dust storms in Sistan and Baluchistan region". *the 5th National Conference on Wind Erosion and Dust Storms*, Yazd University, Yazd. <https://civilica.com/doc/1683897/> [in Farsi]
- [19]. Ranjbar Saadat Abadi, A., & Azizi, Q. (2012). Study of meteorological patterns, identification of sources of dust production and movement path of suspended particles. *Natural Geography Research*, 44(81), 73-92. <https://doi.org/10.22059/jphgr.2012.29215> [in Farsi]
- [20]. Wang, Y., Stein, A. F., Draxler, R. R., de la Rosa, J. D., & Zhang, X. (2011). Global sand and dust storms in 2008: Observation and HYSPLIT model verification. *Atmospheric environment*, 45(35), 6368-6381. <https://doi.org/10.5194/acp-11-10131-2011>
- [21]. Zhang, H., Zhu, H., Peng, Y., Kang, L., Chen, J., & Park, S. U. (2008). Experiment on dust flux during duststorm periods over desert area. *Acta Meteorol. Sin*, 22(2), 239-247. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2007.12.005>
- [22]. Zoulfaghari, H., Abedzadeh, H, (2005). "Synoptic analysis of dust systems in western Iran." *Journal of Geography and Development*, 6, 173-183). <https://ecc.isc.ac/showJournal/1306/3392/34639> [in Farsi]

Synoptic and Satellite Analysis of a Dust Storm in Central Iran: A Case Study of the Naein–Ardakan Transportation Route (Research Paper)

1- Kamal Omidvar*, Professor, Department of Geography, Faculty of Humanities and Social Sciences, Yazd University, Yazd, Iran.

komidvar@yazd.ac.ir

2- Forough Mohammadi Ravari, PhD Student, Department of Geography, Faculty of Humanities and Social Sciences, Yazd University, Yazd, Iran.

Received: 14 Jun. 2026

Accepted: 28 Jul. 2026

Abstract

Environmental crises, including droughts, floods, dust storms, and air pollution, are among the most significant natural hazards affecting human societies and ecosystems. Owing to its geographical location and predominantly arid and semi-arid climate, Iran is highly vulnerable to these environmental phenomena. In recent years, the frequency and intensity of dust storms have increased, particularly across central Iran, resulting in substantial impacts on transportation, public health, and economic activities. This study investigates a severe dust storm that occurred over central Iran during 11–12 March 2022, with a particular focus on the Naein–Ardakan transportation corridor. Synoptic meteorological data, including sea-level pressure (SLP), 500- and 850-hPa geopotential heights, wind components, relative humidity, MODIS satellite imagery, and the Shiraz station Skew-T diagram, were analyzed to examine the atmospheric conditions associated with this event. The results revealed that the development of a deep low-pressure system over the Arabian Peninsula, with a central pressure of approximately 1005 hPa, intensified the pressure gradient and strengthened northwesterly winds over central Iran. Consequently, the maximum wind speed reached approximately 30 m s^{-1} , while horizontal visibility along the Naein–Ardakan corridor decreased to less than 50 m. MODIS satellite imagery confirmed the large-scale transport of dust from major desert source regions toward central Iran. Furthermore, the K Index (KI) and Showalter Index (SI) reached approximately 21.30 and 2.98, respectively, indicating unstable atmospheric conditions during the event. Overall, the findings demonstrate that the interaction between the Arabian low-pressure system and the regional topographic characteristics played a dominant role in the initiation and intensification of this severe dust storm.

Keywords: MODIS, Sea-Level Pressure, Horizontal Visibility, Instability Indices, Transportation Hazard.