



Analysis of the frequency and intensity of extremely severe to weak dust storms and their relationship with the dust storm index in Kerman province

Zohre Ebrahimi-Khusfi¹, Mojtaba Soleimani-Sardo¹ and Mahdieh Abbasi²

1- Associate Professor, Department of Environmental Science and Engineering, Faculty of Natural Resources, University of Jiroft, Jiroft, Iran
Email: Zohreebrahimi2018@ujiroft.ac.ir

2- Bachelor student, Department of Environmental Sciences and Engineering, Faculty of Natural Resources, University of Jiroft.

Article Info

Article type: Research Article

Article history:

Received: Dec. 05, 2024

Revised: Jan. 12, 2025

Accepted: Jan. 14, 2025

Published: Summer, 2025

Keywords:

Land Degradation,
Horizontal Visibility,
Dust Storm Index,
Dust Pollution,
Wind Erosion.

ABSTRACT

Wind erosion is one of the primary causes of soil degradation in many arid and semi-arid regions. The severity of this natural disaster and the concentration of suspended particles significantly affect air quality and horizontal visibility. The primary objectives of this study were to analyze spatial variations in dust storm events under different visibility conditions, identify dust-prone areas, and examine the relationship between the dust storm index and horizontal visibility during the period 2002-2022 in Kerman province, as the largest country of Iran. To this end, the aforementioned index and the frequency of dust events with visibility less than 200, 200-1000, 1000-3000, 3000-5000, and 5000-9000 meters, representing extremely severe to very weak conditions, were calculated for 11 synoptic stations in the province. Finally, the percentage of changes in the dust storm index under different visibility conditions was determined using the coefficient of determination. The results of this study indicated lower visibility in the cities of Bam, Fahraj, and Narmashir compared to other regions of Kerman province, suggesting that these areas are more sensitive to wind erosion. Findings also showed that under extremely severe and severe conditions, approximately 50% of the variations in the dust storm index could be explained by the frequency of events recorded with visibility less than 1000 meters. However, under moderate to very weak conditions, more than 71% of the variations in the index corresponded to changes in visibility greater than 1000 meters. In other words, as the visibility radius increased, the correlation with the Dust Storm Index (DSI) also increased, and the effectiveness of this index was higher for events with moderate to very weak conditions compared to extremely severe and severe conditions. Therefore, using these results, better planning can be made for forecasting and managing dust storm events, especially in vulnerable areas of Kerman province.

Cite this article: Ebrahimi-Khusfi, Z., Soleimani-Sardo, M. and Abbasi, M., (2025), Analysis of the frequency and intensity of extremely severe to weak dust storms and their relationship with the dust storm index in Kerman province, *Soil and Sustainable Development*, 1 (1), 16-32.

DOI: <https://doi.org/10.22034/ssd.2025.492339.1003>

© The Author(s). Publisher: The University of Jiroft Press

تحلیل فرکانس و شدت طوفان‌های گردوغبار فوق بحرانی تا ضعیف و ارتباط آن‌ها با شاخص طوفان گردوغبار در استان کرمان

زهره ابراهیمی خوسفی^۱✉، مجتبی سلیمانی ساردو^۱ و مهدیه عباسی^۲

۱- دانشیار گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه جیرفت، ایمیل: Zohreebrahimi2018@ujroft.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی رشته مهندسی محیط زیست، گروه علوم و مهندسی محیط زیست، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه جیرفت.

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: پژوهشی	فرسایش بادی یکی از علل اصلی تخریب خاک در بسیاری از مناطق خشک و نیمه‌خشک است. شدت وقوع این بلای طبیعی و غلظت ذرات معلق منتشرشده، کیفیت هوا و شعاع دید افقی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. اهداف اصلی مطالعه حاضر؛ تحلیل تغییرات مکانی رخداد‌های گردوغبار در دیدهای افقی مختلف، شناسایی مناطق غبارآلود و تحلیل ارتباط بین شاخص طوفان گردوغبار و دید افقی در بازه زمانی سال‌های ۲۰۲۲-۲۰۲۰ است. بدین منظور، شاخص مذکور و فراوانی وقوع رخداد‌های گردوغبار در دیدهای افقی کمتر از ۲۰۰، ۱۰۰۰-۲۰۰، ۱۰۰۰-۳۰۰۰، ۳۰۰۰-۵۰۰۰ و ۵۰۰۰-۹۰۰۰ متر که بیانگر شرایط فوق بحرانی تا خیلی ضعیف می‌باشند برای ۱۱ ایستگاه همدید استان محاسبه شد. درنهایت، درصد تغییرات شاخص طوفان گردوغبار در دیدهای افقی مختلف با استفاده از ضریب تبیین مشخص شد. نتایج این مطالعه، پایین‌تر بودن دید افقی را در شهرستان‌های بم، فهرج و نرماشیر در مقایسه با سایر مناطق استان کرمان نشان داد که بیانگر حساس‌تر بودن این نواحی به پدیده فرسایش بادی است. همچنین یافته‌ها نشان داد که در شرایط فوق بحرانی و بحرانی به‌طور متوسط حدود ۵۰٪ از تغییرات شاخص طوفان گردوغبار با فراوانی رخداد‌های ثبت‌شده در شعاع دیدهای کمتر از ۱۰۰۰ متر قابل تبیین است. این در حالی است که در شرایط متوسط تا خیلی ضعیف بیش از ۷۱٪ تغییرات شاخص با تغییرات دید افقی بیشتر از ۱۰۰۰ متر انطباق نشان داد. به‌عبارت‌دیگر، با افزایش شعاع دید افقی، همبستگی با DSI نیز افزایش پیدا کرده و کارایی این شاخص در رخداد‌های با شرایط متوسط تا خیلی ضعیف بالاتر از شرایط فوق بحرانی و بحرانی بوده است. لذا با استفاده از این نتایج می‌توان برنامه‌ریزی بهتری برای پیش‌بینی و مدیریت رخداد‌های گردوغبار به‌ویژه در مناطق آسیب‌پذیر استان کرمان انجام داد.
واژه‌های کلیدی: شاخص طوفان گردوغبار، فرسایش بادی، تخریب اراضی، دید افقی، غبارآلودگی هوا.	
تاریخ دریافت: ۱۵ آذر ۱۴۰۳ تاریخ بازنگری: ۲۳ دی ۱۴۰۳ تاریخ پذیرش: ۲۵ دی ۱۴۰۳ تاریخ انتشار: تابستان ۱۴۰۴	
ارجاع به مقاله: ابراهیمی خوسفی، زهره، سلیمانی ساردو، مجتبی و عباسی، مهدیه، (۱۴۰۴)، تحلیل فرکانس و شدت طوفان‌های گردوغبار فوق بحرانی تا ضعیف و ارتباط آن‌ها با شاخص طوفان گردوغبار در استان کرمان، خاک و توسعه پایدار، ۱ (۱)، ۱۶-۳۲.	
© نویسندگان، ناشر: انتشارات دانشگاه جیرفت	
DOI: https://doi.org/10.22034/ssd.2025.492339.1003	

مقدمه

بخش وسیعی از ایران را مناطق خشک و نیمه‌خشک دربرگرفته که فرسایش بادی یکی از رایج‌ترین پدیده‌های این مناطق است. رخداد‌های گردوغبار حاصل از پدیده فرسایش بادی از بلایای طبیعی و چالش‌های مهم زیست‌محیطی سال‌های اخیر محسوب می‌شوند که اثرات نامطلوبی بر سلامت مردم و اکوسیستم‌ها داشته‌اند (Lwin et al., 2023; Zhang et al., 2023). علاوه بر این، پیامدهای زیان‌بار اقتصادی و اجتماعی بر کیفیت زندگی روستانشینان (منجری و رکن‌الدین افتخاری، ۱۴۰۳)، معیشت کشاورزان (نظری و همکاران، ۱۳۹۶) و عملکرد پنل‌های خورشیدی (Saini et al., 2023) به دنبال دارد.

شدت فرسایش بادی و وقوع طوفان‌های گردوغبار، عامل اصلی تغییر غلظت ذرات معلق و دید افقی است (Ebrahimi-Khusfi et al., 2022). روند تغییرات غلظت آئروسول‌ها در ایران طی دو بازه زمانی ۲۰۱۰-۲۰۱۸ و ۲۰۰۰-۲۰۱۰ به ترتیب افزایشی و کاهش‌ی بوده و عامل اصلی مؤثر بر این تغییرات، رطوبت خاک گزارش شده است (Yousefi et al., 2023). در مطالعه‌ای تغییرات زمانی بلندمدت وقوع طوفان گردوغبار در ۴۴ ایستگاه سینوپتیک کل کشور با استفاده از داده‌های فراوانی روزهای طوفان گردوغبار مورد ارزیابی قرار گرفته است (Baghbanan et al., 2020). نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد حداکثر فراوانی روزهای طوفان گردوغبار در نواحی جنوب شرقی و جنوبی کشور به ثبت رسیده است. در مطالعه‌ای که توسط جبالی و همکاران (۱۳۹۹) در استان یزد انجام شد، دقت داده‌های عمق نوری حاصل از سنجنده مودیس مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این بررسی نشان داد همبستگی قابل قبولی بین داده‌های مودیس و مقادیر دید افقی وجود دارد.

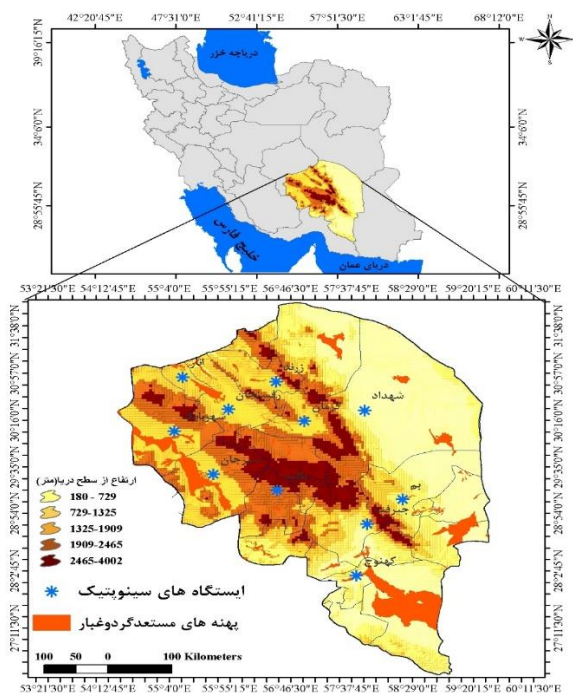
درگایان و رضوی‌زاده (۱۴۰۰) به بررسی تحلیل و شدت فرکانس رخداد‌های گردوغبار در طبقات مختلف دید افقی پرداختند و بیشترین فرکانس و شدت‌ها را برای مناطقی که فرودگاه دارند نظیر آبادان، دزفول، اهواز و امیدیه مشاهده کردند. جنت‌رستمی و همکاران (۱۴۰۰) به بررسی روند تغییرات شاخص تجربی طوفان گردوغبار (DSI) و رابطه‌ی آن با شاخص‌های خشک‌سالی بارندگی استاندارد شده (SPI) و شاخص بارش - تبخیر و تعرق استاندارد شده (SPEI) در دامنه‌ی جنوبی البرز پرداختند. نتایج این بررسی نشان داد که از غرب به شرق، بر شدت گردوغبار افزوده شده و در فصل بهار با حداکثر شدت مواجه بوده است. آن‌ها همچنین دریافتند که ایستگاه‌های غربی و مرکزی دارای روند معنی‌دار بوده و در

نواحی شرقی، تغییرات زمانی نامنظم‌تر و فاقد روند معنی‌دار بوده است. از طرفی همبستگی معنی‌داری بین شاخص DSI و SPI وجود نداشته و بین شاخص‌های DSI و SPEI به‌جز در قسمت غربی منطقه، یک رابطه‌ی منفی وجود داشته است که در برخی از ایستگاه‌ها با شدت بالا به‌صورت ارتباط معنی‌دار بوده و با استانداردسازی، این ارتباط نیز مشهودتر شده است. یوسفی میرهن و همکاران (۱۴۰۱) به بررسی و تحلیل زمانی - مکانی خشکی یونپ و شاخص طوفان گردوغبار (DSI) در استان سمنان پرداختند. با پهنه‌بندی نقشه شاخص طوفان گردوغبار، شهرستان‌های شاهرود و دامغان به‌عنوان مناطق حساس‌تر شناسایی شدند. علاوه بر این، مشخص شد که ارتباط نسبتاً خوبی بین دو شاخص در دوره آماری ۲۰۰۳ تا ۲۰۱۷ وجود داشته است. اکبری ازیرانی و همکاران (۱۴۰۲) تغییرات پدیده گردوغبار را در غرب ایران برای دوره زمانی ۱۹۷۹-۲۰۱۸ مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که روند فراوانی‌ها در غرب کشور تابع نظم خاصی و افزایشی بوده و فراوانی وقوع رخداد‌های در مقیاس فصلی، بهار و تابستان بیشتر از پاییز و زمستان بوده است. افسری و همکاران (۱۴۰۳) در پایش زمانی - مکانی پدیده گردوغبار در جنوب غربی ایران به این نتیجه رسیدند که کاهش سطح پهنه‌های آبی از سال ۲۰۰۸ به بعد در این منطقه منجر به تشدید وقوع رخداد‌های گردوغبار، افزایش عمق آئروسول‌ها و تخریب کیفیت هوا شده است.

یکی از شاخص‌های رایج برای پایش بیابان‌زایی ناشی از فرسایش بادی و تحلیل رخداد‌های گردوغبار، شاخص طوفان گردوغبار است (O'Loingsigh et al., 2014). دید افقی نیز یکی دیگر از معیارهای ارزیابی این وضعیت و کیفیت هوا است که بر این اساس در مطالعه حاضر رفتار پدیده گردوغبار در استان کرمان بر اساس این دو معیار مورد ارزیابی قرار گرفته است. این استان پهناور با چالش‌های اقتصادی و اجتماعی متعددی روبه‌رو است و بیابان‌زایی ناشی از عوامل مختلف و به‌ویژه عامل فرسایش بادی می‌تواند به کاهش محصولات کشاورزی، بیکاری و مهاجرت‌های اجباری در مناطق حساس‌تر و غبارآلود منجر شود. لذا پایش مداوم و بررسی این پدیده‌ها می‌تواند به تدوین راهبردهایی برای توسعه پایدار و افزایش تاب‌آوری اجتماعی کمک کند. بر این اساس مطالعه حاضر با اهداف اصلی تحلیل وضعیت رخداد‌های فوق بحرانی تا خیلی ضعیف و تحلیل ارتباط آن با شاخص معرف فرسایش بادی به‌عنوان یکی از عوامل اصلی بیابان‌زایی در این استان با استفاده از روش‌هایی که در ادامه توضیح داده شده است، انجام شد.

منطقه مطالعاتی

منطقه مطالعاتی تحقیق حاضر، استان کرمان است که با وسعت ۱۸۳۱۹۳ کیلومترمربع، بیش از ۱۱ درصد از ایران را دربرگرفته و در پهنه ارتفاعی ۱۳۸ تا ۴۳۱۷ متر از سطح دریا واقع شده است (شکل ۱). وسعت عرصه‌های مستعد تولید گردوغبار در این استان حدود ۶۵۹۰۸۱۳ هکتار است (سازمان حفاظت محیط زیست استان کرمان، خبرنامه آموزشی و پژوهشی شماره ۲). متوسط بارندگی استان حدود ۱۴۳ میلی‌متر و متوسط بیشینه دما، متوسط کمینه دما و متوسط دمای سالانه به ترتیب ۲۸/۷، ۶/۹ و ۱۵/۷ درجه سانتی‌گراد است. سرعت متوسط باد در استان کرمان بین ۱/۴ تا ۳/۷ متر بر ثانیه متغیر است و در اغلب مناطق بیش از ۲/۵ متر بر ثانیه گزارش شده است (میجانی و همکاران، ۱۴۰۳).



شکل ۱- موقعیت منطقه مطالعاتی، ایستگاه‌های سینوپتیک و پهنه‌های مستعد تولید گردوغبار

مواد و روش‌ها

داده‌های تحقیق

داده‌های مورد استفاده در تحقیق حاضر، داده‌های سه‌ساعته مربوط به پدیده گردوغبار و دید افقی ایستگاه‌های همدید استان کرمان می‌باشد که از سازمان هواشناسی استان اخذ شد. از بین ۹۹ کد پدیده هواشناسی، ۱۱ کد بیانگر پدیده

فرسایش بادی و رخدادهای گردوغبار می‌باشند که توضیحات مربوط به هر کد در جدول (۱) آورده شده است (O'Loingsigh et al., 2014؛ لطفی نسب اصل و همکاران، ۱۴۰۰).

جدول ۱- کدهای مربوط به رخدادهای گردوغبار

کد	نوع رخداد	شرح رخداد
۶	مه گردوغبار	گردوغباری که به وسیله باد در ایستگاه یا نزدیکی ایستگاه بلند نشده است.
۷	گردوغبار معلق	گرد و غباری که در ایستگاه و یا در نزدیکی آن در ساعت دیده‌بانی بلند شده است.
۸	گردباد	گردبادهای توسعه یافته در خود ایستگاه یا اطراف آن در زمان دیده بانی یا یک ساعت قبل
۹	طوفان	طوفان گرد و خاک در ساعت دیدبانی در اطراف ایستگاه یا در طی ساعت گذشته در خود ایستگاه وجود داشته است.
۳۰	طوفان گردو خاک با ماسه و شن ملایم	طی ساعت گذشت ه از شدت طوفان کاسته شده است.
۳۱	طوفان گردو خاک با ماسه و شن ملایم	طی ساعت گذشت ه شدت طوفان تغییری نکرده است.
۳۲	طوفان گردو خاک با ماسه و شن ملایم	طی ساعت گذشت ه بر شدت طوفان افزوده شده است.
۳۳	طوفان گردو خاک با ماسه و شن شدید	طوفان شدید گردو خاک یا شن- طی ساعت گذشته از شدت طوفان کاسته شده است.
۳۴	طوفان گردو خاک با ماسه و شن شدید	طی ساعت گذشت ه شدت طوفان تغییری نکرده است.
۳۵	طوفان گردو خاک با ماسه و شن شدید	طی ساعت گذشت ه بر شدت طوفان افزوده شده است.
۹۸	رعد و برق توأم با طوفان گردو خاک یا طوفان شن	طوفان رعدوبرق همراه با گرد و غبار یا طوفان شن

روش انجام تحقیق

به‌منظور بررسی اهداف کلی تحقیق حاضر، در گام اول؛ دوره آماری مربوط به داده‌های اخذشده مورد بررسی قرار گرفت و بازه زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۲ به‌عنوان بازه مشترک زمانی در نظر گرفته شد. فراوانی رخدادهای گردوغبار در ۵ طبقه مختلف دید افقی محاسبه گردید. دو طبقه شامل رخدادهای فوق بحرانی و بحرانی است که به ترتیب رخدادهای متعلق به میدان دید افقی کمتر از ۲۰۰ متر (HV1) و ۱۰۰۰-۲۰۰ متر (HV2) را شامل می‌شوند. سه طبقه دیگر؛ رخدادهای ثبت‌شده با دید افقی ۱۰۰۰-۳۰۰۰ (HV3)، ۳۰۰۰-۵۰۰۰ (HV4) و ۵۰۰۰-۹۰۰۰ (HV5) است که بیانگر رخدادهای با شدت کمتر می‌باشند و در این تحقیق به‌عنوان رخدادهای متوسط، ضعیف و خیلی ضعیف در نظر گرفته و فراوانی‌های آن‌ها محاسبه شدند. در گام بعدی، اقدام به محاسبه DSI شد. این شاخص بیانگر شدت و فرکانس فرسایش بادی و رخدادهای گردوغبار است که بر اساس رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$DSI = \sum_{i=1}^n [(0.05 * LDE) + MDS + (5 * SDS)]_i \quad \text{رابطه (۱)}$$

در رابطه مذکور؛ SDS؛ روزهای طوفانی با گردوغبار شدید، مجموع مشاهدات کدهای گردوغبار حداکثر روزانه کدهای ۳۳-۳۵؛ MDS؛ روزهای طوفانی با گردوغبار متوسط، مجموع مشاهدات کدهای گردوغبار حداکثر روزانه ۳۰ تا ۳۲ و ۹۸ و LDE؛ روزهای با گردوغبار محلی، مجموع مشاهدات کدهای گرد و غبار حداکثر روزانه ۰۷ تا ۰۹ می‌باشد.

در نهایت الگوی تغییرات مکانی DSI و تغییرات دید افقی در ۵ طبقه به روش وزن‌دهی فاصله معکوس (IDW) تهیه گردید. این روش یکی از روش‌های درون‌یابی و یکی از تکنیک‌های معمول در تحلیل داده‌های مکانی است که در بسیاری از مطالعات گذشته، به‌ویژه مطالعات مربوط به غلظت گردوغبار محاسبه‌شده بر اساس دید افقی نیز استفاده‌شده است (Ebrahimi-Khusfi et al., 2022). روش وزن‌دهی با توجه به نقاط همسایه و با میانگین‌گیری از نقاط نمونه که در همسایگی هر نقطه مجهول قرار دارند، انجام می‌شود و فرض بر این است که هر چه فاصله بین نقطه‌ای که داده را از آن دریافت می‌کنیم و نقطه‌ای که می‌خواهیم مقدار آن را پیش‌بینی کنیم، کمتر باشد، تأثیر آن نقطه بیشتر خواهد بود. ارزش سلول‌های نامعلوم با استفاده از ارزش سلول‌های اطراف که در یک شعاع مخصوص قرار گرفته‌اند، با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌شود (Tomczak, 1998):

$$Z^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot Z(x_i)$$

$$\lambda_i = \frac{1}{h_i^n}$$

رابطه (۲)

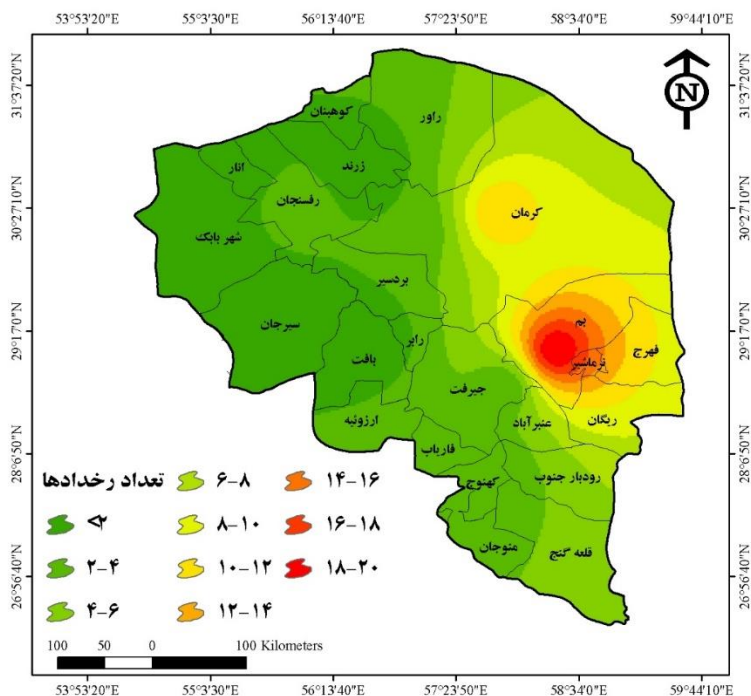
که در این معادله Z^* مقدار متغیر مکانی برآورد شده، $Z(x_i)$ مقدار متغیر مکانی مشاهده‌شده در نقطه موردنظر، h_i وزن آماری مربوط به نمونه x_i و بیانگر اهمیت نقطه i ام است. h_i فاصله بین نقطه x_i و نقطه‌ای که متغیر آن برآورد می‌شود و n توان فاصله است.

در نهایت، میزان همبستگی مکانی شاخص DSI با طبقات دید افقی با استفاده از ضریب همبستگی پیرسون در نرم‌افزار RStudio محاسبه و نتایج به‌دست‌آمده؛ تجزیه و تحلیل شد.

نتایج و بحث

نتایج حاصل از تحلیل تغییرات مکانی رخدادهای فوق بحرانی تا خیلی ضعیف در شکل‌های ۲ تا ۵ نشان داده‌شده است. شکل ۲ نشان می‌دهد که فراوانی رخدادهای فوق بحرانی از شمال غرب استان به نوار شرقی افزایشی بوده است. حداکثر رخدادهای فوق بحرانی که در آن‌ها شعاع دید افقی به کمتر از ۲۰۰ متر رسیده، مربوط به شهرستان‌های بم و نرماشیر و

بین ۱۸ تا ۲۰ رخداد بوده است. گرچه نواحی شمال غربی استان نیز با این رخدادها مواجه شده‌اند، اما فرکانس وقوع آن‌ها چندان قابل توجه نبوده (کمتر از ۲ رخداد) است.



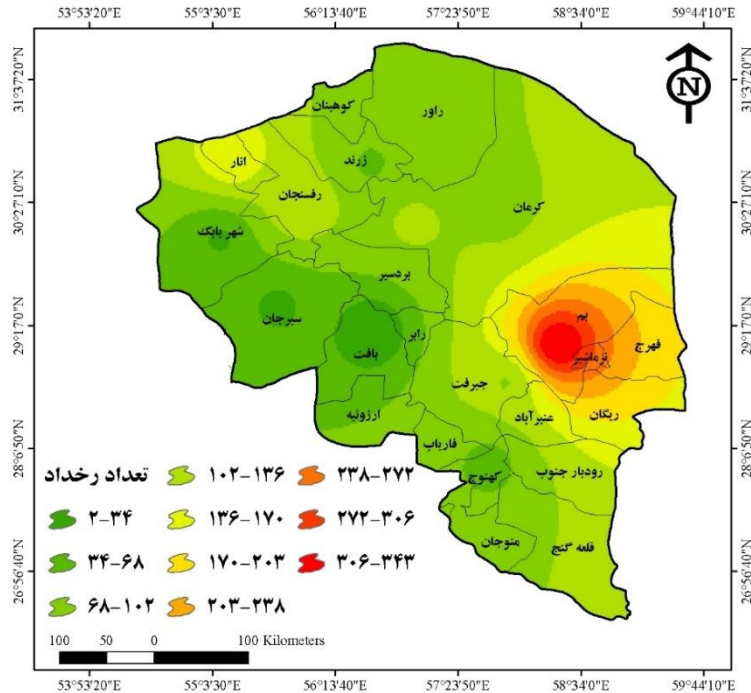
شکل ۲- تغییرات مکانی فراوانی رخدادهای گردوغبار در شرایط فوق بحرانی (۲۰۲۲-۲۰۰۲)

در شعاع دید افقی بین ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ متر، شرایط کیفی هوای نواحی جنوب و جنوب شرق استان و به‌ویژه شهرستان‌های بهم، نرماشیر، فهرج و کهنوج بدتر از سایر مناطق بوده است؛ این در حالی است که نواحی جنوب غربی با شرایط بهتری مواجه بوده‌اند. تعداد رخدادهای گردوغبار در مناطق غبارآلودتر به بیش از ۳۵ و در مناطق با هوای پاک‌تر کمتر از ۵ رخداد در دو دهه گزارش شده است (شکل ۳).

در شعاع دید افقی بین ۳۰۰۰ تا ۵۰۰۰ متر نیز وضعیت هوای نواحی شهرستان‌های بم، نرماشیر و فهرج با بیش از ۳۰۶ رخداد بدتر از سایر مناطق بوده است؛ این در حالی است که نواحی جنوب غربی با کمتر از ۶۸ رخداد وضعیت بهتری را تجربه کرده‌اند (شکل ۵).

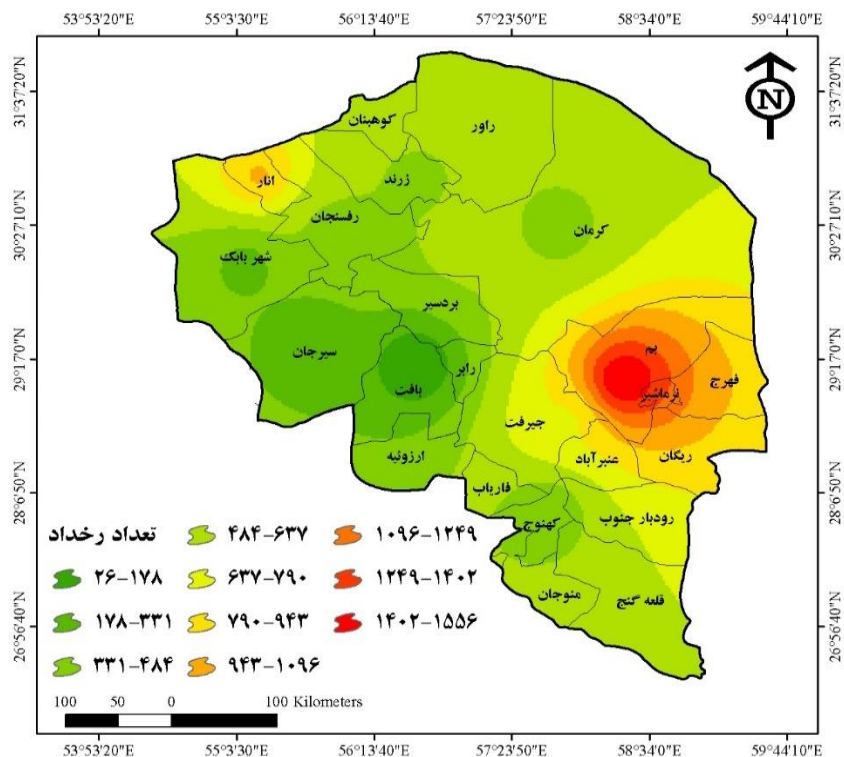
شکل ۶ نشان می‌دهد که فراوانی رخداد‌های خیلی ضعیف از نواحی غربی به سمت نواحی شرقی افزایشی بوده است. حداکثر رخداد‌هایی که در آن‌ها شعاع دید افقی به کمتر از ۹۰۰۰ متر رسیده مربوط به شهرستان‌های بم، نرماشیر، فهرج و انار و بین ۱۰۹۶ تا ۱۵۵۶ رخداد بوده است. فرکانس وقوع این رخدادها در نواحی غربی کمتر از ۴۸۴ رخداد گزارش شده است.

به‌طور کلی، نواحی جنوب شرق استان بیشترین و مناطق غربی استان با کمترین فراوانی وقوع رخداد‌های گردوغبار مواجه بوده‌اند. با توجه به اینکه نیروی محرکه باد یکی از عوامل اصلی مؤثر بر وقوع پدیده فرسایش بادی و وقوع طوفان‌های گردوغبار در مناطق خشک و نیمه‌خشک است و فراوانی باد در نیمه شرقی استان کرمان بیشتر از نیمه غربی آن است (لطفی نسب اصل و همکاران، ۱۴۰۰)؛ لذا یکی از علل احتمالی افزایش فرکانس وقوع رخداد‌های گردوغبار در شهرستان‌های واقع در نواحی شرقی استان را می‌توان به این موضوع نسبت داد.



شکل ۵- تغییرات مکانی فراوانی رخدادهای گردوغبار در شرایط ضعیف (۲۰۲۲-۲۰۰۲)

به‌طور کلی غبارآلودترین هسته استان کرمان، در شعاع‌های مختلف دید افقی، شهرستان بم و محدوده اطراف آن بوده است. درگاهیان و اشرفی (۱۴۰۱) نیز در مطالعه خود، هسته‌های بیشینه وقوع طوفان‌های گردوغبار را در اغلب طبقات دید افقی، نواحی غربی و مرکزی استان یزد معرفی کرده‌اند. در مطالعه دیگری، نواحی غربی استان خوزستان به‌عنوان غبارآلودترین مناطق در دیدهای افقی مختلف، شناسایی شده‌اند (درگاهیان و رضوی زاده، ۱۴۰۰). اگرچه استان‌های مطالعاتی متفاوت بوده است، اما از این جهت که در طبقات مختلف، هسته‌های نسبتاً ثابتی شناسایی شده‌اند، با یافته‌های مطالعه حاضر همخوانی دارد.

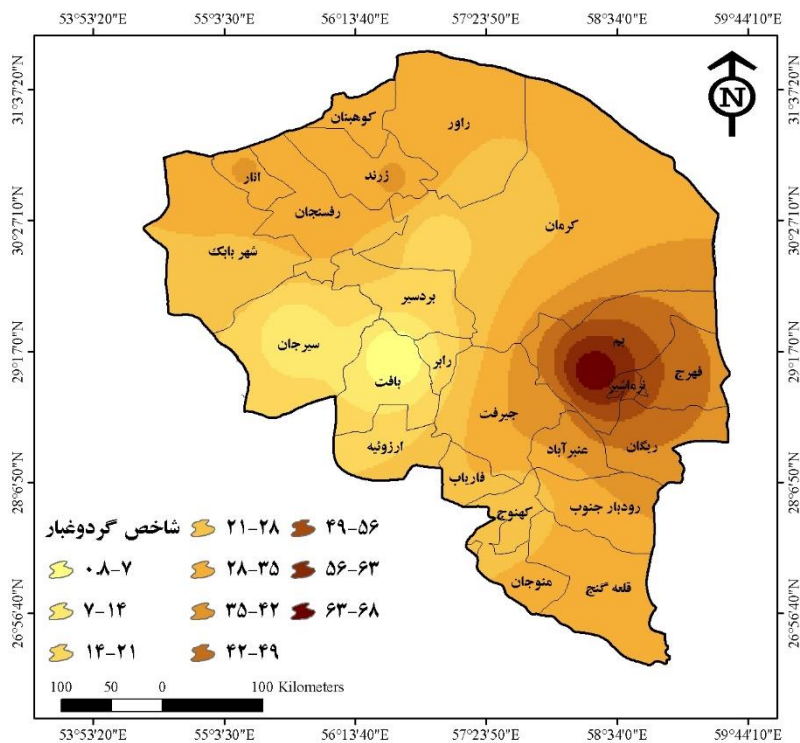


شکل ۶- تغییرات مکانی فراوانی رخداد‌های گردوغبار در شرایط خیلی ضعیف (۲۰۰۲-۲۰۲۲)

نتایج حاصل از بررسی نمایه‌های مختلف شاخص طوفان گردوغبار در ایستگاه‌های همدید استان کرمان، نشان می‌دهد که بیشترین رخداد‌های محلی در ۲۰ سال مطالعه شده، در بم (۵۳۹)، انار (۳۱۰)، شهداد (۲۷۰) و زرنند (۲۲۳) به وقوع پیوسته است. حداکثر رخداد‌های متوسط در جیرفت و انار (۱۰ رخداد) و بیشینه طوفان‌های شدید در بم (۷) و سپس زرنند (۴) گزارش شده است (جدول ۲). گرچه تغییرات مکانی شاخص طوفان گردوغبار شواهدی از کاهش دید افقی و افزایش غلظت گردوغبار را در شهرستان‌های زرنند و انار نشان می‌دهند اما تشدید وقوع فرسایش بادی و افزایش غبارآلودگی هوا در نواحی جنوب شرقی استان کرمان طی دو دهه اخیر کاملاً مشهود و قابل توجه بوده است (شکل ۷). به عبارت دیگر، تشدید وقوع پدیده فرسایش بادی با استفاده از شاخص DSI نیز در این مناطق تأیید شد.

جدول ۲- نمایه‌های شاخص طوفان گردوغبار در ایستگاه‌های همدید استان کرمان

ایستگاه همدید	LDE	MDS	SDS	DSI
انار	۳۱۰	۱۰	۲	۳۵/۵
بافت	۱۶	۰	۰	۰/۸
بم	۵۳۹	۶	۷	۶۸
جیرفت	۲۱۶	۱۰	۳	۳۵/۸
رفسنجان	۲۴۰	۶	۳	۳۳
زرند	۲۲۳	۵	۴	۳۶/۲
سیرجان	۶۹	۰	۱	۸/۵
شهداد	۲۷۰	۹	۱	۲۷/۵
شهر بابک	۱۹۳	۸	۲	۲۷/۷
کرمان	۲۲۳	۵	۰	۱۶/۲
کهنوج	۱۴۹	۳	۳	۲۵/۵
متوسط بلندمدت در استان	۲۲۲/۵	۵/۶	۲/۴	۲۸/۶



شکل ۷- تغییرات مکانی شاخص طوفان گردوغبار در استان کرمان (۲۰۲۲-۲۰۰۲)

میزان همبستگی مکانی بین DSI با رخدادهای ثبت‌شده با دید افقی کمتر از ۲۰۰ متر (HV1)، ۱۰۰۰-۲۰۰ متر (HV2)؛ ۱۰۰۰-۳۰۰۰ متر (HV3)؛ ۳۰۰۰-۵۰۰۰ متر (HV4) و ۵۰۰۰-۹۰۰۰ متر (HV5) به ترتیب ۰/۷، ۰/۷۲، ۰/۸۴، ۰/۸۷ و ۰/۹ و در سطح اطمینان ۰/۹۵ تا ۰/۹۹ معنی‌دار بود (شکل ۸). بر اساس ضریب تبیین به‌دست‌آمده، در شرایط فوق بحرانی با دید افقی کمتر از ۲۰۰ متر، ۴۹٪ از تغییرات شاخص طوفان گردوغبار و در شرایط بحرانی با دید افقی ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ متر، ۵۱٪ این تغییرات به دلیل تغییر در فراوانی رخدادهای ثبت‌شده در شعاع دیدهای کمتر از ۲۰۰ و بین ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ متر بوده است. این در حالی است که در شرایط متوسط بادید افقی ۱۰۰۰-۳۰۰۰ متر، ۷۱٪؛ در شرایط ضعیف بادید افقی ۳۰۰۰-۵۰۰۰ متر، ۷۵٪ و در شرایط خیلی ضعیف با دید افقی ۵۰۰۰-۹۰۰۰ متر، ۸۰٪ تغییرات شاخص طوفان گردوغبار با تغییرات دید افقی قابل تبیین است. به‌عبارت‌دیگر، با افزایش شعاع دید افقی، همبستگی با DSI نیز افزایش پیدا کرده است و کارایی این شاخص در رخدادهای با شرایط متوسط تا خیلی ضعیف بالاتر از شرایط فوق بحرانی و بحرانی است. علت آن می‌تواند مربوط به ضریب ۵ برابری نمایه SDS در معادله ارائه‌شده توسط اولنگسای^۱ و همکاران (۲۰۱۴) و عدم انطباق خوب آن برای استان کرمان باشد. در استان یزد، بیشترین انطباق بین DSI با شرایط فوق بحرانی و بحرانی توسط درگاهیان و اشرفی (۱۴۰۱) گزارش‌شده که با نتایج تحقیق حاضر انطباق ندارد. با توجه به اینکه تنوع اقلیمی و توپوگرافی استان کرمان بیشتر از استان یزد است و از طرفی جنس سازندهای زمین‌شناسی و میزان حساسیت آن‌ها در برابر نیروی برش باد متفاوت است؛ علت عدم انطباق نتایج را می‌توان به تفاوت در شرایط اقلیمی و زمین‌شناسی این دو استان و همچنین متفاوت بودن دوره آماری مطالعاتی نسبت داد.

¹ O'Loingsigh

MDS	0.58	0.57	0.5	0.49	0.39	0.31	0.24	0.26
0.58	LDE	0.93	0.93	0.93	0.94	0.71	0.75	0.8
0.57	0.93	DSI	0.9	0.84	0.87	0.72	0.91	0.7
0.5	0.93	0.9	HV5	0.92	0.96	0.77	0.76	0.7
0.49	0.93	0.84	0.92	HV3	0.96	0.78	0.67	0.85
0.39	0.94	0.87	0.96	0.96	HV4	0.72	0.74	0.79
0.31	0.71	0.72	0.77	0.78	0.72	HV2	0.66	0.67
0.24	0.75	0.91	0.76	0.67	0.74	0.66	SDS	0.59
0.26	0.8	0.7	0.7	0.85	0.79	0.67	0.59	HV1

شکل ۸- همبستگی مکانی بین طبقات مختلف دید افقی و شاخص طوفان گردوغبار در استان کرمان (۲۰۲۲-۲۰۰۲)
 (HV1): رخدادهای ثبت شده با دید افقی کمتر از ۲۰۰ متر، HV2: رخدادهای ثبت شده با دید افقی ۱۰۰۰-۲۰۰ متر؛ HV3:
 رخدادهای ثبت شده با دید افقی ۳۰۰۰-۱۰۰۰ متر؛ HV4: رخدادهای ثبت شده با دید افقی ۵۰۰۰-۳۰۰۰ متر؛ HV5: رخدادهای
 ثبت شده با دید افقی ۹۰۰۰-۵۰۰۰ متر؛ DSI: شاخص طوفان گردوغبار؛ LDE: روزهای با گردوغبار محلی؛ MDS: روزهای
 طوفانی با گردوغبار متوسط و SDS: روزهای طوفانی با گردوغبار شدید)

نتیجه گیری

نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد که در دو دهه اخیر، نواحی جنوب شرقی استان به ویژه شهرستان های بم، فهرج و نرماشیر به عنوان غبارآلودترین مناطق استان کرمان در دو دهه گذشته بوده اند. افزایش قابل توجه گردوغبار در دو دهه اخیر و همچنین همبستگی بالای میان شاخص طوفان گردوغبار (DSI) و تغییرات دید افقی در شرایط مختلف، بیانگر آسیب پذیری این نواحی در برابر پدیده فرسایش بادی است. همچنین بر اساس یافته های تحقیق حاضر، به دلیل اینکه بیش از ۷۱٪ تغییرات شاخص DSI در استان کرمان در دیدهای افقی بیشتر از ۱۰۰۰ متر قابل تبیین است؛ استفاده از این معیار به جای شاخص مذکور به ویژه در شعاع های دید افقی بالا توصیه می شود. با توجه به پایین بودن کیفیت هوا در نواحی جنوب شرقی استان که به دلیل فعالیت رخداد های گردوغبار اتفاق افتاده؛ توسعه و استقرار سیستم های پیش بینی

و هشدار سریع گردوغبار می‌تولند به بهبود آمادگی محلی و کاهش آسیب‌های احتمالی در این منطقه کمک کند. شناسایی عوامل اصلی مؤثر برافزایش حساسیت این نواحی به پدیده فرسایش بادی می‌تواند به ارائه راهکارهای مناسب‌تر مدیریتی و اجرایی در خصوص کاهش پیامدهای نامطلوب زیست‌محیطی مفید باشد. لذا توصیه می‌شود در تحقیقات آتی به این موضوع پرداخته شود.

منابع مورد استفاده

- افسری، ر.، ک، جعفری و ش. جعفری. ۱۴۰۳. پایش مکانی-زمانی پدیده گردوغبار در جنوب غربی ایران با تأکید بر تغییرات آب‌های سطحی منطقه. نشریه کاربرد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در علوم محیطی، دوره ۴، شماره ۱۲، صفحه ۹۴-۷۲. اکبری ازیرانی، ط.، آ. یحیوی دیزج و ق. کیخسروی. ۱۴۰۲. تحلیل روند تغییرات پدیده گرد و غبار ناحیه غرب ایران طی دوره آماری ۲۰۱۸-۱۹۷۹. پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، شماره ۵۳، صفحه ۱۴۷-۱۶۲.
- جبال، ع.، م. زارع، م. اختصاصی و ر. جعفری. ۱۳۹۹. بررسی گستره تغییرپذیری دید افقی مناطق متأثر از رخداد‌های گرد و غبار در استان یزد. مدیریت بیابان، دوره ۸، شماره ۱۵، صفحه ۲۱-۳۶.
- جنت‌رستمی، م.، م. رحیمی و حسن کابلی. ۱۴۰۰. تحلیل روند تغییرات شاخص گردوغبار (DSI) و ارزیابی ارتباط آن با خشک‌سالی در دامنه جنوبی البرز. مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، دوره ۱۲، شماره ۴۳، صفحه ۴۰-۱۹.
- درگاهیان، ف و س. اشرفی. (۱۴۰۱). بررسی پتانسیل شدت طوفان گرد و غبار با استفاده از مقایسه داده‌های میدان دید افقی و شاخص DSI در استان یزد. پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، شماره ۵۲، صفحه ۱۸۳-۱۹۲.
- درگاهیان، ف و س. رضوی زاده. ۱۴۰۰. توزیع مکانی فرکانس و شدت پدیده گرد و غبار براساس میدان دید افقی در استان خوزستان. طبیعت ایران، دوره ۳، شماره ۶، صفحه ۷۵-۸۱.
- لطفی نسب اصل، س.، گوهردوست، آ.، درگاهیان، ف و م. خسروشاهی. ۱۴۰۰. تحلیل بادهای توام با گردوغبار و فرساینده در استان کرمان با هدف ارائه تقویم پیش‌بینی و مدیریت کنترل گردوغبار. نشریه علمی تحقیقات حمایت و حفاظت جنگلها و مراتع ایران، دوره ۱۹، شماره ۲، صفحه ۲۱۱-۱۷۹.
- منجزی، ن و ع. رکن‌الدین افتخاری. ۱۴۰۳. ارزیابی اثرات اقتصادی، اجتماعی و محیطی پدیده گرد و غبار بر کیفیت زندگی خانوارهای روستایی شهرستان مسجدسلیمان. مطالعات علوم محیط زیست، دوره ۹، شماره ۲، صفحه ۸۳۳۳-۸۳۴۴.
- میجانی، س.، پارسامطلق، ب و ز. ابراهیمی خوسفی. ۱۴۰۳. ارزیابی ارتباط متغیرهای اقلیمی و خشکسالی هواشناسی با عملکرد محصولات زراعی در استان کرمان. نشریه هواشناسی کشاورزی، دوره ۱۲، شماره ۱، صفحه ۶۳-۵۰.
- نظری، م.، م. فروزانی، م. یزدان پناه و م. برادران. ۱۳۹۶. تبیین امنیت معیشت کشاورزان در شرایط گرد و غبار در شهرستان شوش. علوم ترویج و آموزش کشاورزی ایران، دوره ۱۳، شماره ۲، صفحه ۱۶۹-۱۵۳.
- یوسفی مبرهن، ا.، م. قدرتی و م. خسروشاهی. ۱۴۰۱. واکاوی همبستگی الگوی زمانی-مکانی خشکی و شاخص توفان گردوغبار در مناطق خشک (استان سمنان، ایران). تحلیل فضایی مخاطرات محیطی. دوره ۹، شماره ۴، صفحه ۲۱۰-۱۹۵.
- Baghbanan, P., Ghavidel, Y., & Farajzadeh, M. (2020). Spatial analysis of spring dust storms hazard in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 139, 1447-1457.
- Ebrahimi-Khusfi, Z., Mirakbari, M., & Soleimani-Sardo, M. (2022). Aridity index variations and dust events in Iran from 1990 to 2018. *Annals of the American Association of Geographers*, 112, 123-140.
- Lwin, K.S., Tobias, A., Chua, P.L., Yuan, L., Thawonmas, R., Ith, S., Htay, Z.W., Yu, L.S., Yamasaki, L., & Roqué, M. (2023). Effects of desert dust and sandstorms on human health: a scoping review. *Geohealth* 7, e2022GH000728.

- O’Loingsigh, T., McTainsh, G., Tews, E., Strong, C., Leys, J., Shinkfield, P., Tapper, N. (2014). The Dust Storm Index (DSI): a method for monitoring broadscale wind erosion using meteorological records. *Aeolian Research*, 12, 29-40.
- Saini, R.K., Saini, D.K., Gupta, R., Verma, P., Dwivedi, R., Kumar, A., Chauhan, D., & Kumar, S. (2023). Effects of dust on the performance of solar panels—a review update from 2015–2020. *Energy & Environment*, 34, 2110-2162.
- Tomczak, M. (1998). Spatial interpolation and its uncertainty using automated anisotropic inverse distance weighting (IDW)-cross-validation/jackknife approach. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 2, 18-30.
- Yousefi, R., Wang, F., Ge, Q., Shaheen, A., Kaskaoutis, D.G. (2023). Analysis of the winter AOD trends over Iran from 2000 to 2020 and associated meteorological effects. *Remote Sensing*, 15, 905.
- Zhang, T., Zheng, M., Sun, X., Chen, H., Wang, Y., Fan, X., Pan, Y., Quan, J., Liu, J., & Wang, Y. (2023). Environmental impacts of three Asian dust events in the northern China and the northwestern Pacific in spring 2021. *Science of The Total Environment* 859, 160230