Journal of Natural Environment Hazards
University of Sistan and Baluchestan
Print ISSN: 2676 - 4377 Online ISSN: 2676 - 4385
Homepage: https://jneh.usb.ac.ir

Journal of Natural Environmental Hazards, Vol.14, Issue 44, June 2025

Monitoring and zoning of long-term variation of the DSI in the eastern half of Iran

Mehdi Rahnama[1], Faezeh Noori[2], Saviz Sehat Kashani[3*], Noushin Khoddam[4]

1. Associate Professor, Sand and Dust Storm International Research Center (SDS-IRC), Research Institute of Meteorology and Atmospheric Science (RIMAS), Tehran, Iran
2. PhD student of Meteorology, Researcher, Sand and Dust Storm International Research Center (SDS-IRC), Research Institute of Meteorology and Atmospheric Science (RIMAS), Tehran, Iran
3. *Corresponding Author*, Associate Professor, Sand and Dust Storm International Research Center (SDS-IRC), Research Institute of Meteorology and Atmospheric Science (RIMAS), Tehran, Iran
4. - PhD in Meteorology, Researcher, Sand and Dust Storm International Research Center (SDS-IRC), Research Institute of Meteorology and Atmospheric Science (RIMAS), Tehran, Iran

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received: 29 April 2024
Revised: 04 December 2024
Accepted: 12 January 2025

Keywords:
DSI, Dust, Eastern half of Iran, Zoning.

ABSTRACT

Climate change is an important factor that increases the risks of wind erosion and dust storms. To study the frequency and intensity of the dust phenomenon in the eastern half of the country, the Dust Storm Index was used between 2002 and 2023. Based on the DSI, profiles of the frequency and intensity of dust storms in the study area were calculated using the geostatistical interpolation methods of Inverse distance weighted interpolation. In general, the time series of the dust storm index during the 2002–2023 statistical period showed a significant increasing trend in the Razavi Khorasan, South Khorasan, and North Khorasan. In Sistan and Baluchestan, we observed more irregular variation and no significant trends. The Zabol and Sarkhs stations had the highest number of dust storms. The results showed that the monthly average variation in the DSI in the first eight months of the year generally increased. The DSI decreased in the months following December. In terms of geographical distribution, the DSI showed higher values in the eastern and southeastern halves, and the lowest values in the northeastern regions. Analyzing the trend of variations of this index in the half-east, north-east, and south-east of the country, in addition to the south-east parts of the country, in recent years the eastern parts of Razavi Khorasan have also been involved in this phenomenon. The formation of low pressure in the southwest of Afghanistan, northwest Pakistan, and east of Iran, simultaneously with the establishment of high pressure in the north of Afghanistan and northeast of Iran, causes the creation of an intensive pressure gradient and relatively strong surface winds. These conditions activated internal and transboundary sources of dust in the study area, leading to the spread and transfer of dust to the eastern half of Iran.

Cite this article: Rahnama, M. , Noori, F. , Sehat Kashani, S. and Khoddam, N. (2025). Monitoring and zoning of long-term variation of the DSI in the eastern half of Iran. Journal of Natural Environmental Hazards, 14(44), 19-36. DOI: 10.22111/jneh.2025.48604.2040

© Saviz Sehat Kashani*
Publisher: University of Sistan and Baluchestan
DOI: 10.22111/jneh.2025.48604.2040

* Corresponding Author Email: s-sehat@irimo.ir

مخاطرات محیط طبیعی
شاپا چاپی: ۲۶۷۶-۴۳۷۷ شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۴۳۸۵
Homepage: https://jneh.usb.ac.ir

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۴، شماره ۴۴، تیر ۱۴۰۴

پایش و پهنه‌بندی تغییرات بلندمدت شاخص طوفان گردوغبار نیمه شرقی ایران

مهدی رهنما[۱]، فائزه نوری[۲]، ساویز صحت کاشانی[۳*]، نوشین خدام[۴]

۱. دانشیار، مرکز بین‌المللی مطالعات گردوخاک، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران
۲. دانشجوی دکتری هواشناسی، پژوهشگر، مرکز بین‌المللی مطالعات گردوخاک، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران
۳. دانشیار، مرکز بین‌المللی مطالعات گردوخاک، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران (نویسنده مسئول)
۴. دانش آموخته دکتری هواشناسی، پژوهشگر، مرکز بین‌المللی مطالعات گردوخاک، پژوهشگاه هواشناسی و علوم جو، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۱۰

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۳/۰۹/۱۴

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۳/۱۰/۲۳

واژه‌های کلیدی:
پهنه‌بندی، گردوغبار، DSI، نیمه شرقی ایران.

چکیده

تغییرات اقلیمی یکی از عوامل مهمی است که سبب افزایش خطر فرسایش بادی و طوفان‌های گردوغبار می‌شود؛ به‌ویژه وقوع رخدادهای شدید و حرکت به سمت اقلیم خشک‌تر، این امر را تشدید می‌نماید. در این پژوهش به‌منظور مطالعه فراوانی و شدت پدیده گردوغبار در نیمه شرقی ایران، از شاخص طوفان گردوغبار (DSI) بین سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۳ استفاده شد. بر اساس DSI نمایه‌هایی از فراوانی و شدت طوفان گردوغبار در منطقه موردمطالعه بر اساس روش‌های درون‌یابی زمین‌آماری عکس مجذور فاصله با تفکیک مکانی یک‌دریک کیلومتر محاسبه شده است. به‌طورکلی، سری زمانی شاخص طوفان گردوغبار طی دوره آماری ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۳، نشان‌دهنده روند افزایشی معنی‌داری در دو استان خراسان رضوی و خراسان شمالی است. در استان سیستان و بلوچستان و خراسان جنوبی شاهد تغییرات نامنظم‌تر و فاقد روند معنی‌دار هستیم. ایستگاه‌های زابل و سرخس بیشترین مقدار شاخص طوفان گردوغبار را دارا هستند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که تغییرات میانگین ماهانه DSI در ۸ ماه اول سال میلادی (ژانویه تا اوت) به‌طورکلی افزایشی است و در ماه‌های بعد تا ماه دسامبر مقدار DSI کاهشی است. ازنظر توزیع جغرافیایی، DSI در نیمه شرقی و جنوب شرقی مقادیر بالاتری را نشان می‌دهد و در نواحی شمال شرقی دارای حداقل مقدار است. بررسی روند تغییرات این شاخص در شرق، شمال شرق و جنوب شرق کشور مشخص نمود علاوه بر قسمت‌های جنوب شرقی کشور، در سال‌های اخیر بخش‌های شرقی استان خراسان رضوی نیز درگیر این پدیده شده است. با مطالعه دو رخداد گردوغبار، مشاهده شد که شکل‌گیری مراکز کم‌فشار در جنوب غربی افغانستان، شمال غربی پاکستان و شرق ایران همزمان با استقرار مراکز پرفشار در شمال افغانستان و شمال شرقی ایران سبب شکل‌گیری شیو فشاری و ایجاد بادهای نسبتاً شدید سطحی شده و چشمه‌های گردوغبار داخلی و فرامرزی را در محدوده موردمطالعه تقویت کرده و گسیل و انتقال گردوغبار را به نیمه شرقی ایران به‌همراه دارد.

استناد: رهنما، مهدی ، نوری، فائزه ، صحت کاشانی، ساویز و خدام، نوشین . (۱۴۰۴). پایش و پهنه‌بندی تغییرات بلندمدت شاخص طوفان گردوغبار نیمه شرقی ایران. مخاطرات محیط طبیعی، ۱۴(۴۴)، ۳۶-۱۹. DOI: 10.22111/jneh.2025.48604.2040

ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان

© مهدی رهنما، فائزه نوری، ساویز صحت کاشانی*، نوشین خدام.

*- ساویز صحت کاشانی (نویسنده مسئول)
Email: s-sehat@irimo.ir

مقدمه

طوفان‌های گردوغبار، یکی از مهم‌ترین مخاطرات جوی است که جنبه‌های مختلف زندگی انسان‌ها ازجمله سلامت، زیست‌بوم، صنعت و انرژی را دستخوش تغییراتی نموده و خسارت‌های مالی و جانی قابل‌توجهی را بر جوامع تحمیل می‌کند (رهنما و همکاران، ۱۴۰۰؛ میدلتون، ۲۰۱۹). بر اساس برآورد انتشار کل گردوغبار توسط بانک جهانی (۲۰۱۹)، سهم منابع طبیعی در انتشار گردوغبار ۷۵٪ و منابع انسان‌زاد ۲۵٪ تخمین زده شده است. بااین‌حال، انتشار سالانه جهانی گردوغبار از خاورمیانه و آسیای مرکزی حدود ۳۰ درصد کل انتشار گردوغبار جهانی در جو را به خود اختصاص می‌دهد (کوک و همکاران، ۲۰۲۱). طبق دستورالعمل سازمان جهانی هواشناسی، می‌توان طوفان گردوغبار را بر اساس تأثیر گردوغبار بر قابلیت رؤیت و شدت گردوغبار به سه دسته تقسیم کرد (گودی، ۲۰۱۴؛ تن و همکاران، ۲۰۱۴؛ فورمن، ۲۰۰۳) که شامل طوفان گردوغبار، گردوغبار وزشی و گردوغبار معلق می‌شود. همچنین، بر اساس قدرت دید می‌توان به چهار دسته اصلی تقسیم کرد (شائو و دانگ، ۲۰۰۶) که شامل ۱) گردوغبار معلق (DIS[1]) با گسترش وسیع و قدرت دید بیشتر از ۱۰ کیلومتر، ۲) گردوغبار وزشی (BD[2]) شن و یا گردوغبار بلندشده در زمان مشاهده رویداد و قدرت دید ۱ تا ۱۰ کیلومتر، ۳) طوفان گردوغبار (DS[3]) وزش به‌همراه بادهای قوی و قدرت دید ۱۰۰۰ متر و ۴) طوفان شدید گردوغبار (SDS[4]) صعود حجم بسیار بزرگی از ذرات گردوغبار به هوا و قدرت دید کمتر از ۲۰۰ متر هستند. اگرچه به‌منظور پایش طوفان‌های گردوغبار و چشمه‌های فعال، می‌توان از داده‌های سنجش‌ازدور کمک گرفت (لی و همکاران، ۲۰۲۱؛ رایگانی و همکاران، ۲۰۲۰؛ البرکات و لاکشمی، ۲۰۱۹). اولونگسای و همکاران (۲۰۱۴) در مطالعات خود نشان دادند که محاسبه شاخص طوفان گردوغبار (DSI[5]) را می‌توان به‌عنوان روشی مناسب و دقیق برای پایش فرسایش بادی با استفاده از داده‌های روزانه در بلندمدت درنظر گرفت. ابراهیمی خوسفی و همکاران (۲۰۲۱) سرعت باد در فصل زمستان، پوشش گیاهی در فصل بهار، بیشینه تندی باد در فصل تابستان و پاییز را مهم‌ترین عوامل مؤثر در پیش‌بینی DSI برشمردند. میری و همکاران (۲۰۲۱) با محاسبه DSI در منطقه سیستان نشان دادند که در دوره ۲۰۰۴-۲۰۰۰ بیشترین مقادیر این شاخص مشاهده شد که به‌طور همزمان میانگین سرعت باد بیشتر بوده است. همچنین، در این دوره مقادیر بارش، رطوبت، پوشش گیاهی و آبی نسبت به سایر دوره‌های زمانی کمتر بوده‌اند. در سال‌های اخیر، کشور ایران به‌ویژه نیمه شرقی آن، در معرض چالش‌های زیست‌محیطی شدید مانند طوفان گردوغبار قرارگرفته است (شمسی‌پور، ۱۳۹۱). از پیامدهای این رخداد می‌توان به افزایش مهاجرت جمعیت روستایی در جنوب استان خراسان جنوبی و منطقه سیستان اشاره نمود (حسینی و جعفری‌زاده، ۱۴۰۲؛ اسمعیل‌نژاد و پودینه، ۱۳۹۶). از دهه ۷۰ پدیده گردوغبار با روش‌های مختلفی در کشور مورد بررسی قرارگرفته است که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. ارزیابی و پهنه‌بندی تغییرات مکانی- زمانی طوفان‌های گردوغبار با استفاده از شاخص طوفان گردوغبار در استان خوزستان (اصغری پوده و همکاران، ۱۳۹۴) نشان داد که شاخص طوفان گردوغبار (DSI) در استان خوزستان دارای روند کاهشی بوده است. همچنین، بیشترین پراکنش مقادیر DSI در نواحی شرقی تالاب شادگان و هورالعظیم مشاهده شد. اقلیم‌شناسی

1 Dust-in-Suspension
2 Blowing Dust
3 Dust Storm
4 Severe Dust Storm
5 Dust Storm Index

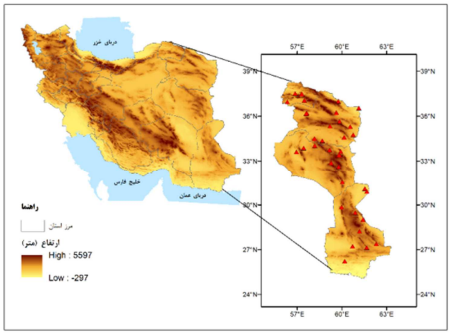
رخدادهای طوفان گردوغبار در فصل تابستان در استان سیستان و بلوچستان در دوره ۳۰ ساله (خدام و همکاران، ۱۳۹۸) نیز حاکی از آن بود که مقادیر DSI در بازه زمانی موردمطالعه در ایستگاه‌های این استان روند معنی‌داری نداشته است. پیش‌بینی احتمال روزهای گردوغباری در مناطق شرقی ایران نشان داد که ایستگاه‌های سرخس و فریمان در استان خراسان رضوی و ایستگاه‌های زابل، زهک، میرجاوه، نصرت آباد، زاهدان و خاش در استان سیستان و بلوچستان دارای بیشترین احتمال وقوع روز گردوغباری بودند (حسینی و همکاران، ۱۳۹۸). تحلیل طوفان‌های گردوغبار سیستان با استفاده از شاخص‌های DDI[1] و DSI و کمیت‌های سرعت باد، دید افقی و غلظت PM_{10}[2] (میری، ۱۳۹۹) نشان داد شدت طوفان‌های گردوغبار در این منطقه نسبت به سایر مناطق بیشتر است. همچنین، با محاسبه ضرایب همبستگی بین غلظت PM10 و DSI و DDI مشاهده شده که ارتباط معنی‌دار بین آن‌ها برقرار است. علاوه‌براین، با توجه به وجود ارتباط معنی‌دار بین متوسط سالانه سرعت باد با کمیت‌های یادشده، مشخص شد که تغییرات آن‌ها به‌شدت به تغییرات سرعت باد وابسته است. نتایج تحلیل روند تغییرات شاخص گردوغبار و ارزیابی ارتباط آن با خشک‌سالی در دامنه‌ی جنوبی البرز (جنت رستمی و همکاران، ۱۴۰۰) نشان داد که روند تغییرات DSI در بازه بلندمدت در مناطق غربی و مرکزی منطقه موردمطالعه معنی‌دار بوده است. بااین‌حال ارتباط معنی‌داری بین DSI با شاخص خشکسالی وجود نداشت. تحلیل DSI، بسامد رخدادهای گردوغبار و دید افقی در منطقه غرب آسیا (رهنما و همکاران، ۱۴۰۰) نیز نشان داد که رخدادهای محلی گردوغبار بیشتر کشورهای خاورمیانه را تحت تأثیر قرار می‌دهند. هرچند نیمه غربی و جنوب غربی ایران متأثر از رخدادهای گردوغبار فرامحلی هستند که از کشورهای مجاور منتقل می‌شود. مطالعه پهنه‌بندی خشک‌سالی با استفاده از شاخص‌های اقلیمی و روش‌های زمین‌آمار در دشت سرخس (آرا و همکاران، ۱۴۰۲) نیز نشان داد که در بازه زمانی ۱۵ ساله (۲۰۱۵-۲۰۰۰) تعداد طوفان‌های گردوغبار با وقوع رخداد خشکسالی در این منطقه افزایش داشته است. با توجه به بررسی انجام‌شده، مشخص شد در مطالعات قبلی تنها مقادیر شاخص طوفان گردوغبار در استان ها بررسی شده است و به شناسایی الگوهای جوی موثر در شکل-گیری طوفان گردوغبار پرداخته نشده است. این مطالعه با درنظرگرفتن یک دوره آماری جدید در کل نیمه شرقی کشور انجام شده است و علاوه بر پهنه‌بندی و مشخص نمودن روند بلندمدت شاخص طوفان گردوغبار، الگوهای همدیدی و تصاویر ماهواره از سنجنده‌های مختلف و عمق نوری هواویزها نیز مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است.

داده‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه موردمطالعه در این پژوهش شامل استان‌های خراسان شمالی، خراسان رضوی، خراسان جنوبی و سیستان بلوچستان است (شکل ۱). این استان‌ها که در بخش گرم و کم ارتفاع شرقی کشور قرار دارند، به‌دلیل دوری از منابع رطوبتی داری اقلیمی متفاوت نسبت به کل کشور هستند. بخش‌های شمال شرقی، شرق و جنوب شرقی کشور با کشورهای افغانستان، پاکستان و ترکمنستان که به‌عنوان منشأ گردوغبار واردشده به این استان‌ها شناسایی‌شده‌اند (حسینی و همکاران، ۱۳۹۸؛ صحت و همکاران، ۱۴۰۱)، مرز مشترک دارند.

1 Dusty Days Index
2 Particulate Matter



شکل ۱: توزیع مکانی ایستگاه‌های همدیدی مورداستفاده در سطح منطقه موردمطالعه. *(منبع: نویسندگان)*

داده‌های پژوهش:

در این پژوهش، برای محاسبه DSI، از داده‌های دیدبانی شامل کد پدیده حاضر که به‌صورت ۳ ساعته ثبت شده‌اند (مطابق با دستورالعمل‌های WMO[1])، در ۳۵ ایستگاه همدیدی در منطقه موردمطالعه استفاده شده است. کدهای استفاده‌شده در این پژوهش مرتبط با گزارش وقوع گردوغبار در ایستگاه است که در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: معرفی کدهای پدیده گردوغبار (WMO, 2019).

شماره کد	نام کد	توضیحات
۰۷	گردوغبار برخاسته[2]	گردوغبار یا ماسه که در ساعت دیدبانی در اثر وزش باد در ایستگاه یا اطراف آن به هوا بلند شده است.
۰۸	تنوره دیو[3]	گردبادهای تکامل‌یافته که در زمان دیدبانی یا طی یک ساعت گذشته در ایستگاه یا اطراف آن مشاهده شده است.
۰۹	طوفان گردوغبار یا طوفان ماسه[4]	طوفان گردوغبار یا ماسه که در ساعت دیدبانی در اطراف ایستگاه وجود داشته یا در ساعت گذشته در خود ایستگاه وجود داشته است.
۳۰	طوفان ملایم یا متوسط گردوغبار یا ماسه	طی ساعت گذشته از شدت طوفان کاسته شده است.
۳۱	طوفان ملایم یا متوسط گردوغبار یا ماسه	طی ساعت گذشته شدت طوفان تغییری نکرده است.
۳۲	طوفان ملایم یا متوسط گردوغبار یا ماسه	طی ساعت گذشته بر شدت طوفان افزوده شده است.
۳۳	طوفان شدید گردوغبار یا ماسه	طی ساعت گذشته از شدت طوفان کاسته شده است.
۳۴	طوفان شدید گردوغبار یا ماسه	طی ساعت گذشته شدت طوفان تغییری نکرده است.
۳۵	طوفان شدید گردوغبار یا ماسه	طی ساعت گذشته بر شدت طوفان افزوده شده است.
۹۸	رعدوبرق توأم با طوفان گردوغبار یا طوفان ماسه	_

بازه زمانی موردمطالعه از سال ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۳ بوده که DSI در این بازه به‌صورت سالانه، فصلی و ماهانه محاسبه و بررسی شده است. مشخصات ایستگاه‌های انتخاب‌شده در جدول ۲ ارائه شده است.

1 World Meteorology Organization
2 Rising Dust
3 Dust Devil
4 Dust Storm or Sand Storm

جدول ۲: مشخصات ایستگاه‌های منتخب منطقه موردمطالعه.

نام استان	نام ایستگاه	کد ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی
سیستان و بلوچستان	ایرانشهر	۴۰۸۷۹	۶۰.۷	۲۷.۲
سیستان و بلوچستان	خاش	۴۰۸۷۰	۶۱.۲	۲۸.۲
سیستان و بلوچستان	میرجاوه	۹۹۶۰۸	۶۱.۴	۲۹.۰
سیستان و بلوچستان	نیکشهر	۴۰۸۹۵	۶۰.۲	۲۶.۲
سیستان و بلوچستان	نصرت آباد	۹۹۵۸۶	۶۰.۰	۲۹.۹
سیستان و بلوچستان	سراوان	۴۰۸۷۸	۶۲.۳	۲۷.۴
سیستان و بلوچستان	زابل	۴۰۸۲۹	۶۱.۵	۳۱.۱
سیستان و بلوچستان	زابلی	۴۰۸۷۴	۶۱.۷	۲۷.۱
سیستان و بلوچستان	ضحاک	۹۹۶۲۳	۶۱.۷	۳۰.۹
سیستان و بلوچستان	زاهدان	۴۰۸۵۶	۶۰.۹	۲۹.۵
خراسان شمالی	بجنورد	۴۰۷۲۳	۵۷.۳	۳۷.۵
خراسان شمالی	اسفراین	۹۹۲۸۷	۵۷.۵	۳۷.۰
خراسان شمالی	جاجرم	۹۹۲۹۵	۵۶.۳	۳۷.۰
خراسان شمالی	مانه و سملقان	۹۹۲۶۲	۵۶.۹	۳۷.۵
خراسان جنوبی	بیرجند	۴۰۸۰۹	۵۹.۳	۳۲.۹
خراسان جنوبی	بشرویه	۹۹۴۰۷	۵۷.۴	۳۳.۹
خراسان جنوبی	فردوس	۴۰۷۹۲	۵۸.۲	۳۴.۰
خراسان جنوبی	حاجی آباد (خراسان جنوبی)	۹۹۴۰۲	۵۹.۹	۳۳.۶
خراسان جنوبی	نهبندان	۴۰۸۲۷	۶۰.۰	۳۱.۵
خراسان جنوبی	قاین	۴۰۷۹۳	۵۹.۲	۳۳.۷
خراسان جنوبی	سربیشه	۹۹۴۹۹	۵۹.۸	۳۲.۶
خراسان جنوبی	طبس	۴۰۷۹۱	۵۷.۰	۳۳.۶
خراسان جنوبی	زهان	۹۹۴۴۸	۵۹.۸	۳۳.۴
خراسان رضوی	بجستان	۹۹۴۳۶	۵۸.۲	۳۴.۵
خراسان رضوی	فریمان	۴۰۸۲۵	۵۹.۸	۳۵.۶
خراسان رضوی	گناباد	۴۰۷۷۸	۵۸.۷	۳۴.۴
خراسان رضوی	کلات نادر	۹۹۲۸۹	۵۹.۸	۳۷.۰
خراسان رضوی	خواف	۴۰۸۳۷	۶۰.۱	۳۴.۶
خراسان رضوی	مشهد	۴۰۷۴۵	۵۹.۶	۳۶.۲
خراسان رضوی	سبزوار	۴۰۷۴۳	۵۷.۶	۳۶.۲
خراسان رضوی	سبزوار (فرودگاه)	۸۸۱۲۲	۵۷.۶	۳۶.۲
خراسان رضوی	سرخس	۴۰۷۴۱	۶۱.۱	۳۶.۵
خراسان رضوی	تایباد	۹۹۴۳۴	۶۰.۸	۳۴.۸
خراسان رضوی	تربت حیدریه	۴۰۷۶۲	۵۹.۲	۳۵.۳
خراسان رضوی	تربت جام	۴۰۸۰۶	۶۰.۶	۳۵.۳

به‌منظور پایش رخداد گردوغبار در مطالعه موردی (۱۹ ژوئیه و ۵ اوت ۲۰۲۳)، از محصولات سنجنده AIRS[1] برای مشاهده چشمه گردوغبار و سنجنده MODIS[2] برای مشاهده پراکنش عمق نوری هواویزها (AOD) از ماهواره AQUA استفاده شد. همچنین، از تصاویر تصویر زملن واقعی برای Dust RGB از ماهواره سری Meteosat صفر درجه برای آشکارسازی رخدادهای گردوغبار استفاده شد. برای تحلیل همدیدی رخدادهای گردوغبار نیز داده‌های باز تحلیل‌شده ERA5 پایگاه داده‌های ECMWF[3] (CDS, 2017) با تفکیک ۰/۲۵ به‌صورت ساعتی در محدوده جغرافیایی ۴۵ تا ۷۰ درجه شرقی و ۲۵ تا ۴۵ درجه شمالی استخراج شد. این داده‌ها شامل میانگین فشار سطح دریا، باد ۱۰ متری، ارتفاع ژئوپتانسیلی تراز ۸۵۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال، باد ترازهای ۸۵۰، ۵۰۰ و ۲۰۰ هکتوپاسکال هستند که برای ساعت ۱۲:۰۰ روزهای گردوغباری تحلیل شده‌اند.

روش انجام پژوهش

هدف اصلی این پژوهش، بررسی تغییرات طوفان‌های گردوغبار با منشأ خارجی به تفکیک تغییرات مکانی و تغییرات زمانی است. برای این منظور، روند زمانی و مکانی طوفان‌ها مشخص و بر اساس بیشترین و کمترین طول زمانی وقوع آن و نیز مکان‌های تحت تأثیر طوفان‌های رخداده با منشأ خارجی موردبررسی و تحلیل قرارگرفته است. در پایان، نتایج در قالب نقشه‌های پهنه‌بندی تغییرات زمانی (ماهانه و فصلی) و مکانی شاخص طوفان گردوغبار در نیمه شرقی کشور ارائه شده است.

به‌منظور مطالعه بسامد و شدت پدیده گردوغبار، از شاخص طوفان‌های گردوغبار (DSI) استفاده شده است (مک‌تاینش و تیوز، ۲۰۰۷). رابطه DSI از دهه ۹۰ میلادی برای تعیین شدت و بسامد طوفان گردوغبار به‌کار گرفته شده است. این شاخص روشی مناسب برای پایش فرسایش بادی در مقیاس وسیع با استفاده از سوابق هواشناسی است که نمایه‌ای از بسامد و شدت طوفان گردوغبار در منطقه را محاسبه می‌کند (ولی و همکاران، ۱۳۹۶؛ لونگسین و همکاران، ۲۰۱۴). این شاخص ترکیبی از سه نمایه روزهای طوفانی با گردوغبار محلی (LDE[4])، روزهای طوفانی با گردوغبار متوسط (MDS[5]) و روزهای طوفانی با گردوغبار شدید (SDS) است که بر مبنای تعداد دفعات ثبت کدهای پدیده گردوغبار در ایستگاه‌های همدیدی محاسبه می‌شوند. باتوجه به اینکه در محاسبه DSI از تمام کدهای تعریف‌شده توسط سازمان جهانی هواشناسی مرتبط با پدیده گردوغبار (۷ تا ۹، ۳۰ تا ۳۵ و ۹۸) استفاده‌شده است و همچنین، با درنظرگرفتن هر دو مورد گردوغبار با منشأ محلی و منشاء فرامحلی در این شاخص، می‌توان گفت DSI نمایه‌ای جامع از روند تغییرات گردوغبار را در منطقه به‌دنبال دارد. مقادیر نمایه‌های موجود بر اساس کدهای گزارش‌شده از محل ایستگاه‌های همدیدی منتخب منطقه موردمطالعه بر اساس تعاریف زیر استخراج و محاسبه شده است:

SDS: روزهای طوفانی با گردوغبار شدید، مجموع مشاهدات کدهای گردوغبار حداکثر روزانه کدهای ۳۵-۳۳

MDS: روزهای طوفانی با گردوغبار متوسط، مجموع مشاهدات کدهای گردوغبار حداکثر روزانه کدهای ۳۰، ۳۲ و ۹۸

1 Atmospheric Infrared Sounder
2 Moderate resolution Imaging Spectroradiometer
3 European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
4 Local Dust Events
5 Moderate Dust Storms

LDE: روزهای با گردوغبار محلی، مجموع مشاهدات کدهای گردوغبار حداکثر روزانه کدهای ۰۷ و ۰۹

درنهایت برای محاسبه DSI از رابطه ذیل استفاده به‌عمل آمده است:

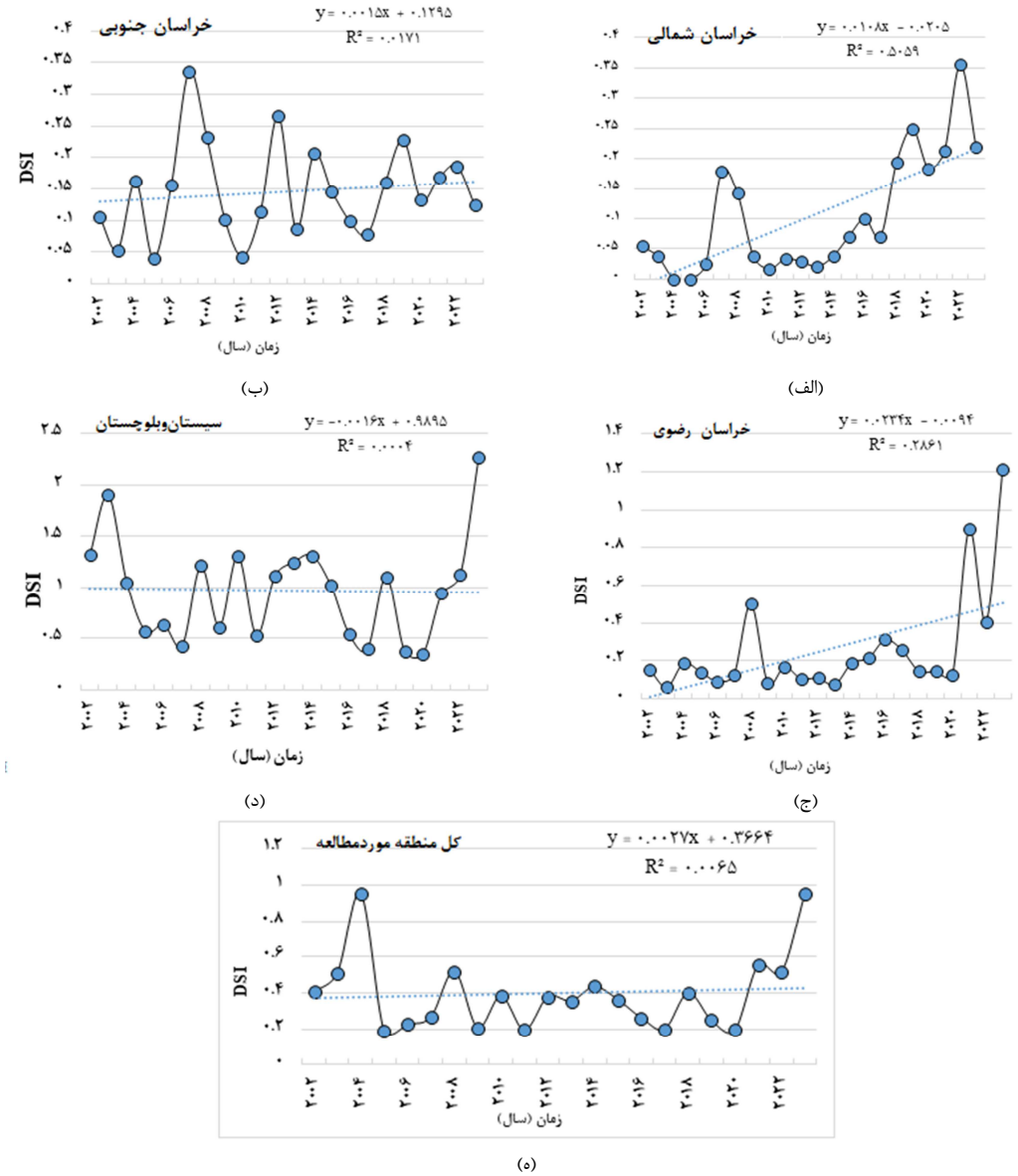
$$DSI = \sum_{i=1}^{n} [(5 \times SDS) + MDS + (0.05 \times LDE)] \quad (۱)$$

که در آن DSI شاخص طوفان گردوغبار در n ایستگاه همدیدی منتخب است که در آن‌ها رویداد گردوغبار در یک بازه زمانی مشخص ضبط و مشاهده شده است. مدت‌زمان موردنظر یک دوره معمول، یک سال است؛ اما می‌تواند چند ماه در یک سال هم باشد. در این مطالعه مقدار DSI برای ایستگاه‌های مختلف در دوره زمانی موردمطالعه به‌صورت ماهانه و فصلی محاسبه شده و درنهایت کل مقدار شاخص برای محدوده موردمطالعه نیز از مجموع شاخص‌های برآوردشده به‌صورت سالانه محاسبه شد. DSI با درنظرگرفتن هر دو مورد گردوغبارهای محلی و با منشاء فرامرزی، نمایه‌های جامع از روند تغییرات را در منطقه به‌دنبال دارد. در ادامه، دو رخداد گردوغبار در تاریخ ۱۹ ژوئیه و ۵ اوت سال ۲۰۲۳ مورد بررسی قرار گرفت. الگوهای همدیدی از روز قبل تا بعد از وقوع طوفان گردوغبار تحلیل شده است.

نتایج و بحث

سری زمانی تغییرات DSI در استان‌های واقع در نیمه شرقی کشور (خراسان شمالی، خراسان جنوبی، خراسان رضوی و سیستان و بلوچستان) طی دوره آماری ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۳ در شکل ۲ نشان داده شده است. روند تغییرات بلندمدت DSI برای هر استان با آزمون من - کندال مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که روند تغییرات سالانه ایستگاه‌های منتخب در استان خراسان شمالی از روند افزایشی با شیب مثبت برخوردار است. باتوجه به مقدار P-Value محاسبه‌شده از آزمون من - کندال، روند افزایشی در این ایستگاه در سطح ۰/۰۵ از نظر آماری معنی‌دار بود (P-Value=۰/۰۰۰۲۵۴). در استان خراسان جنوبی نیز روند افزایشی بلندمدت DSI را مشاهده می‌کنیم؛ اما باتوجه به اینکه از نظر آماری معنی‌دار نیست (P-Value=۰/۲۱۴۸۹۸)، این روند افزایشی تصادفی بوده و در برخی سال‌ها روند کاهش آن نیز مشاهده شده است. شیب این تغییرات در استان خراسان جنوبی نسبت به استان خراسان شمالی کمتر است. مقدار DSI در استان خراسان رضوی نشان داد که این شاخص طی دوره آماری موردمطالعه افزایشی بوده و در سال‌های اخیر افزایش چشمگیری داشته که با توجه به آزمون من - کندال از نظر آماری معنی‌دار است (P-Value=۰/۰۱۲۹۲۳). نتایج بررسی روند تغییرات DSI در سیستان و بلوچستان روند معنی‌دار نشان نداد (P-Value=۰/۱۸۳۴۴). این تغییرات تا سال ۲۰۲۰ دارای نوسان و فراز و نشیب بوده و پس‌ازآن تا سال ۲۰۲۳ با شیب تندی رو به افزایش بوده است. بررسی‌ها نشان داد که مقادیر این شاخص در استان سیستان و بلوچستان نسبت به سایر استان‌ها بزرگ‌تر بوده است. همچنین، در سال‌های اخیر در دو استان سیستان و بلوچستان و خراسان رضوی افزایش یافته است. علاوه‌براین، از مجموع بررسی نتایج تمام نمودارها و نیز محاسبه شاخص در کل منطقه

موردمطالعه، مشخص شد که این شاخص با وجود اینکه روند افزایشی داشته، اما با توجه به آزمون من - کندال از نظر آماری معنی‌دار نبوده است (P-Value=۰/۳۸۸۹۸۰).

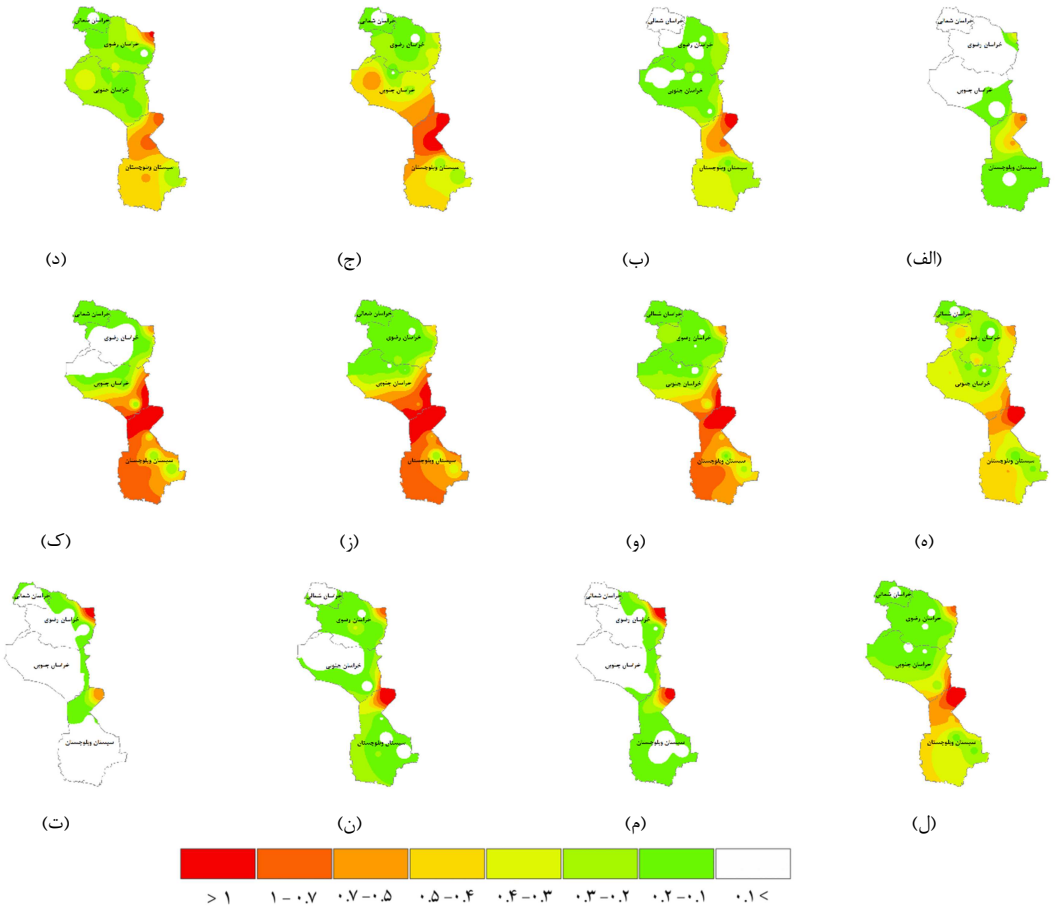


شکل ۱: میانگین روند تغییرات زمانی DSI در استان‌های الف) خراسان شمالی، ب) خراسان جنوبی، ج) خراسان رضوی، د) سیستان و بلوچستان و ه) کل منطقه طی دوره آماری ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۳ ***(منبع: نویسندگان)***.

نقشه‌های پهنه‌بندی ماهانه DSI در نیمه شرقی کشور طی دوره آماری ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۳ با استفاده از روش درون‌یابی IDW[1] به‌دست آمد (شکل ۳). مطابق شکل ۳ (الف) در ماه ژانویه DSI از شمال شرقی به جنوب شرقی افزایش‌یافته

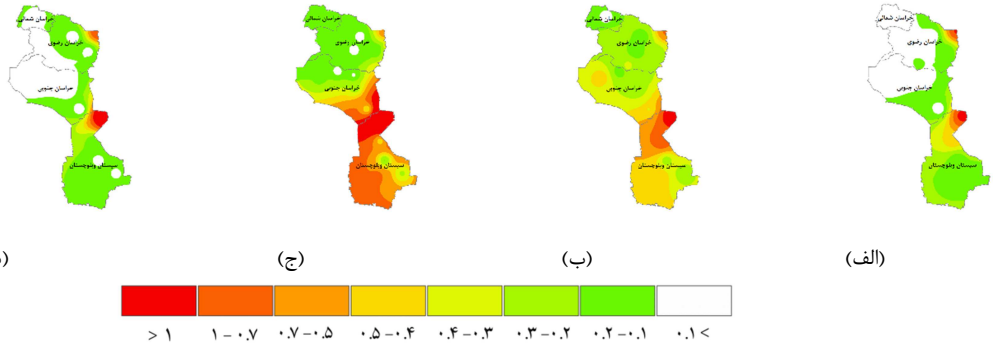
[1] Inverse distance weighting

است. همچنین، می‌توان نتیجه گرفت در شمال شرقی استان سیستان و بلوچستان فراوانی و شدت رخدادهای گردوغبار به‌مراتب بیشتر از سایر نقاط بوده است. در ماه فوریه، شدت DSI نسبت به ماه ژانویه در استان‌های خراسان شمالی و خراسان رضوی افزایش یافته است. این افزایش در شمال شرقی استان سیستان و بلوچستان نسبت به ماه قبل هم مشاهده می‌شود. پهنه‌بندی DSI در ماه مارس نشان داد که این شاخص در نیمه جنوبی خراسان جنوبی و بخش‌های شمالی استان سیستان و بلوچستان به بیشینه مقدار خود می‌رسد. در ماه آوریل نسبت به ماه‌های قبل DSI در شهرستان سرخس افزایش قابل‌توجهی داشته است. در ماه مه هم الگویی مشابه با ماه قبل مشاهده می‌شود. با شروع فصل تابستان در ماه‌های ژوئن، ژوئیه و اوت بیشترین مقادیر این شاخص در استان‌های سیستان و بلوچستان و خراسان جنوبی مشاهده شد. استان‌های خراسان رضوی و خراسان شمالی به‌ترتیب در اولویت‌های بعدی قرار دارند. روند کاهشی DSI در نیمه شرقی کشور در ماه های سپتامبر تا دسامبر رخ داده است.. بااین‌وجود، در کل ماه‌های سال طی دوره آماری بلندمدت بیشترین مقدار این شاخص در زابل و سرخس مشاهده شد.



شکل ۲: توزیع فضایی ماهانه DSI در نیمه شرقی کشور الف) ژانویه، ب) فوریه، ج) مارس، د) آوریل، ه) مه، و) ژوئن، ز) ژوئیه، ک) اوت، ل) سپتامبر، م) اکتبر، ن) نوامبر، ت) دسامبر طی دوره آماری ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۳ *(منبع: نویسندگان).*

شکل ۴ توزیع فضایی DSI فصلی را نشان می‌دهد. شدت شاخص در فصل تابستان نسبت به فصل‌های دیگر به بیشینه مقدار خود رسیده است. این شاخص در فصل‌های پاییز و بهار در نیمه غربی استان‌های خراسان رضوی و خراسان جنوبی و بخش‌های زیادی از خراسان شمالی کمترین مقدار را داراست. به‌طورکلی، پهنه‌بندی فصلی DSI نشان داد که از بخش‌های شرقی به سمت جنوب شرقی منطقه موردمطالعه برشدت گردوغبار افزوده می‌شود.

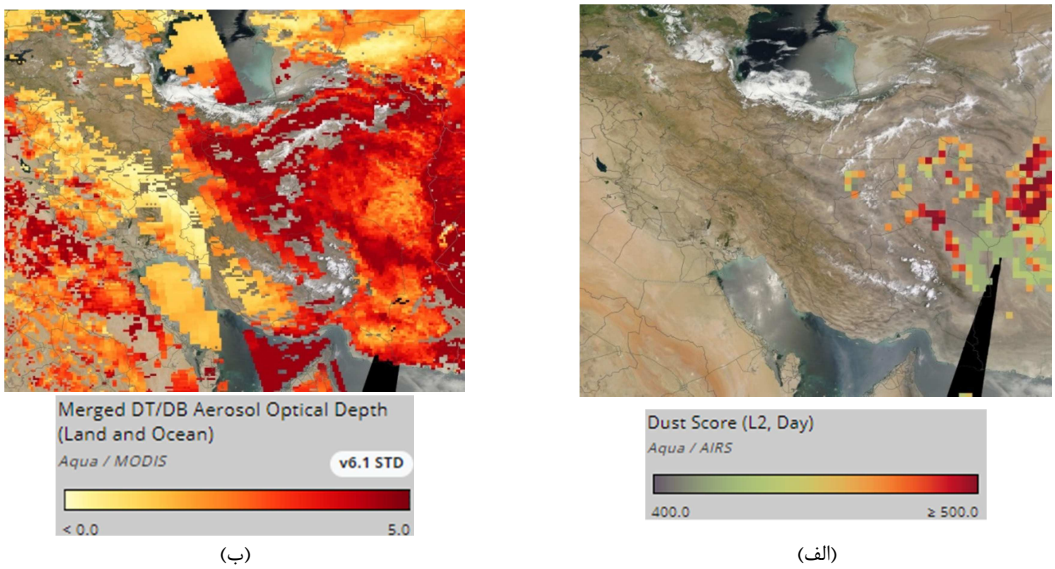


شکل ۳: توزیع فضایی فصلی DSI در نیمه شرقی کشور الف) زمستان، ب) بهار، ج) تابستان، د) پاییز طی دوره آماری ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۳

(منبع: نویسندگان).

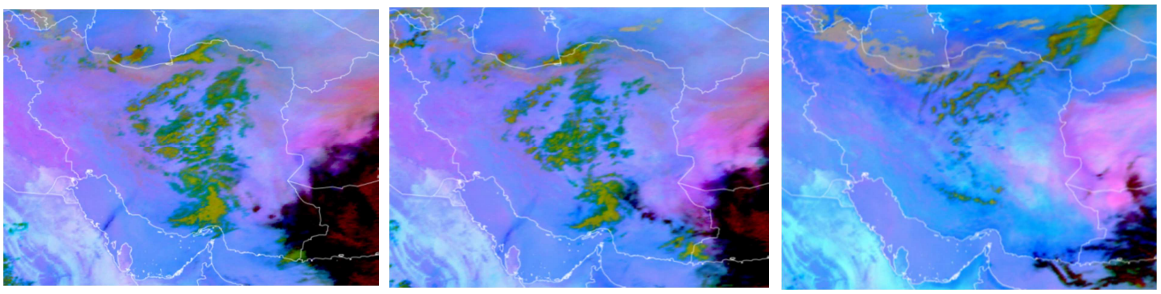
مطالعه موردی: ۱۹ ژوئیه ۲۰۲۳

تصویر ماهواره Aqua مربوط به Dust Score –Day و عمق نوری هواویزها برای روز ۱۹ ژوئیه در شکل ۵ نشان داده شده است. همچنین، تصویر زمان واقعی برای Dust RGB از ماهواره سری Meteosat صفر درجه برای روز ۱۹ ژوئیه در ساعات UTC ۰۶، ۱۸ و ۲۱ در شکل ۶ ارائه شده است. افزایش مقادیر گردوغبار در نواحی شرقی ایران و مرز افغانستان به‌خوبی مشاهده می‌شود.



شکل ۴: تصویر ماهواره Aqua مربوط به الف) Dust Score –Day و ب) عمق نوری هواویزها برای روز ۱۹ ژوئیه ۲۰۲۳ ساعت UTC ۰۰:۰۰

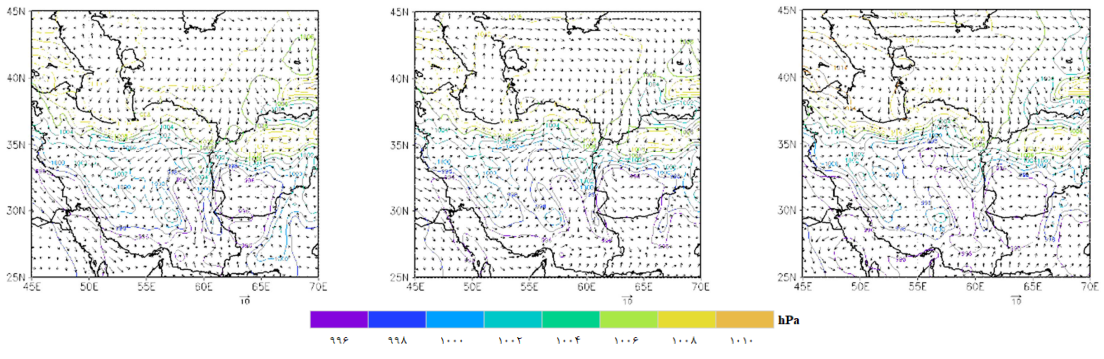
(منبع: https://worldview.earthdata.nasa.gov/).



(ج) (ب) (الف)

شکل ۵: تصویر زمان واقعی برای Dust RGB از ماهواره سری Meteosat صفر درجه برای روز ۱۹ ژوئیه ۲۰۲۳ در ساعات الف) UTC ۰۶:۰۰، ب) UTC ۱۸:۰۰ و ج) UTC ۲۱:۰۰، نواحی صورتی نشان‌دهنده حضور گردوغبار است *(منبع: https://view.eumetsat.int/).*

الگوی فشار سطح دریا و بردارهای باد ۱۰ متری در روز ۱۸ تا ۲۰ ژوئیه ۲۰۲۳ در شکل ۷ نشان داده شده است. حضور مرکز کم‌فشار در جنوب غرب افغانستان و جنوب شرق و برخی نواحی مرکزی ایران که بخشی از کم‌فشار پاکستان است، در فصل گرم در جنوب آسیا شکل می‌گیرد (راشکی و همکاران، ۲۰۱۲؛ خسروی و همکاران، ۱۳۹۵)، همزمان با نفوذ زبانه پرفشار از شمال شرقی کشور که در امتداد مرکز پرفشار مستقر در جنوب شرقی خزر و ترکمنستان است (مفیدی و زرین، ۱۳۹۱)، سبب ایجاد شیوهای فشاری نسبتاً قوی روز مرز ایران و افغانستان شده است. بنابراین، جریان‌های شمالی از شمال شرقی وارد ایران شده و در نواحی جنوبی خراسان رضوی با توجه به ناهمواری‌های این مناطق به سمت غرب منحرف شده است. شاخه دیگری از این جریان به‌صورت کانالیزه‌شده به سمت شرق منحرف شده و به‌صورت بادهای شمال غربی بر روی سیستان می‌وزد که رودباد تراز پایین[1] را (علیزاده چوبری و همکاران، ۲۰۱۴) در این مناطق شکل می‌دهد. افزایش بادهای سطحی در نواحی مرزی ایران و افغانستان چشمه‌های گردوغبار واقع در این نواحی را فعال کرده و سبب گسیل گردوغبار و انتقال آن شده است. این الگو با مطالعات انجام‌شده توسط کرمی و همکاران (۲۰۲۱)، راشکی و همکاران (۲۰۱۲) و کاسکائوتیس و همکاران (۲۰۱۵) همسو است.

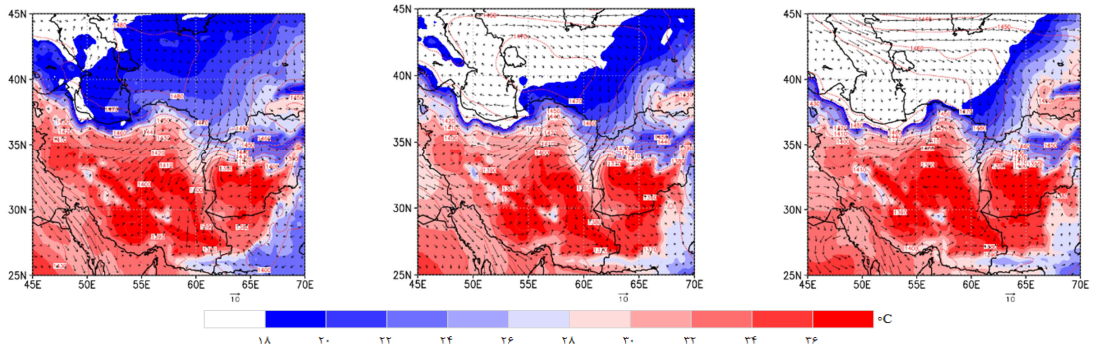


(ج) (ب) (الف)

شکل ۶: الگوی میانگین فشار سطح دریا و بردارهای باد ۱۰ متری در روز الف) ۱۸، ب) ۱۹ و ج) ۲۰ ژوئیه ۲۰۲۳ ساعت UTC ۱۲:۰۰ *(منبع: نویسندگان).*

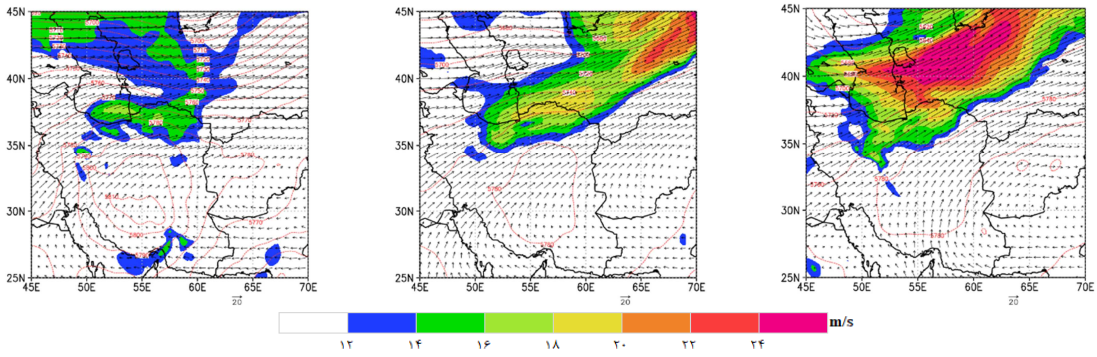
[1] Low Level Jet

در شکل ۸ الگوی ارتفاع ژئوپتانسیلی، دما و بردار باد در تراز ۸۵۰ برای روزهای ۲۰-۱۸ ژوئیه ۲۰۲۳ ساعت ۱۲:۰۰ ارائه شده است. با استقرار یک مرکز کم ارتفاع در غرب افغانستان همراه با افزایش دما و نیز ورود یک پشته ارتفاعی از نواحی شمال شرقی و قرار گرفتن آن در نوار شرقی کشور، یک شیو فشاری نسبتاً قوی در این نواحی شکل گرفته که طی روزهای ۲۰-۱۸ تقویت شده است. بنابراین، باتوجه به موقعیت محور پشته که از خراسان رضوی تا جنوبی کشیده شده است و سبب تقویت الگوهای سطح زمین شده که درنتیجه افزایش تندی بادهای شمالی و شمال شرقی سبب فعال شدن چشمه‌های گردوغبار فرامرزی و داخلی شده است. با شرقی شدن جهت باد، به‌ویژه در نواحی جنوبی استان خراسان رضوی که منطبق با چشمه‌های گردوغبار در این منطقه است، رخداد گردوغبار در طی این روزها به‌وقوع پیوسته است. الگوهای ارتفاع ژئوپتانسیلی در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال نیز (شکل ۹) حاکمیت پرفشار در بیشتر نواحی موردمطالعه را نشان می‌دهد. همچنین، با توجه به موقعیت رودباد جنب حاره در تراز ۲۰۰ هکتوپاسکال در مناطق شمال شرقی ایران تا عرض‌های شمالی و قرارگیری منطقه مورد مطالعه در بخش جنوبی ورودی رودباد، جریان‌ها در ترازهای زیرین در این نواحی تقویت و شرایط مناسب برای گسیل و انتقال گردوغبار فراهم شده است.



(ج) (ب) (الف)

شکل ۷: الگوی ارتفاع ژئوپتانسیلی (خطوط سیاه)، دما (نواحی رنگی) و بردار باد (بردارهای آبی) در تراز hPa ۸۵۰ برای روز الف) ۱۸، ب) ۱۹ و ج) ۲۰ ژوئیه ۲۰۲۳ ساعت UTC ۱۲:۰۰ *(منبع: نویسندگان).*

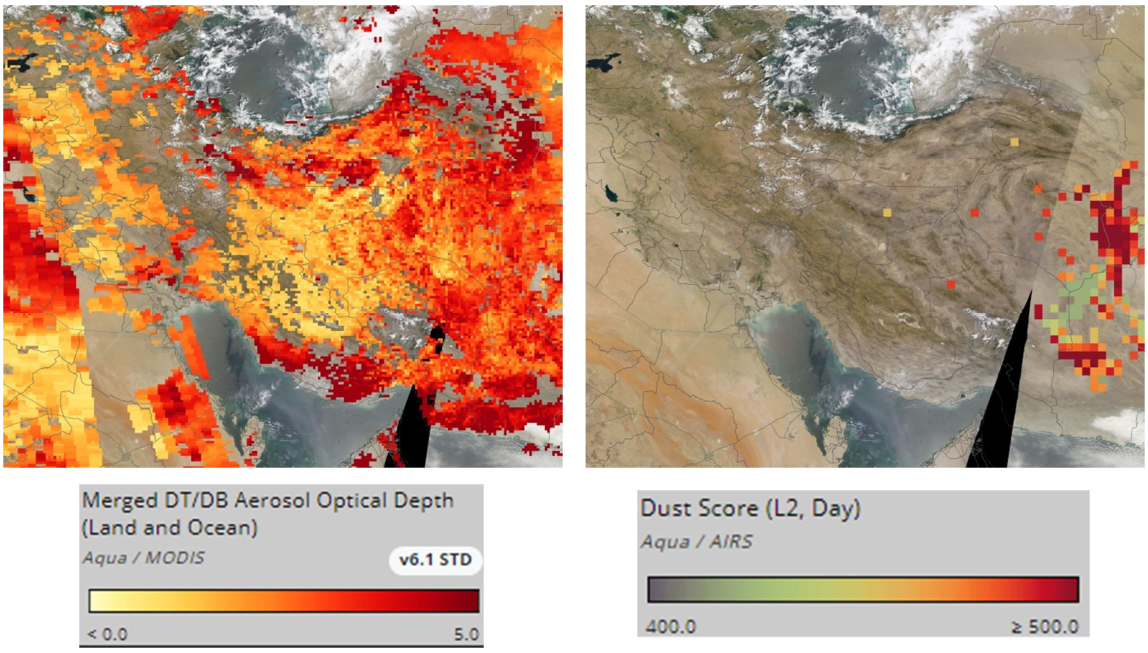


(ج) (ب) (الف)

شکل ۸: الگوی ارتفاع ژئوپتانسیلی (خطوط نقطه‌چین قرمز) در تراز hPa ۵۰۰، تندی باد (نواحی رنگی) و بردار باد (بردارهای سیاه) در تراز hPa ۲۰۰ برای روز الف) ۱۸، ب) ۱۹ و ج) ۲۰ ژوئیه ۲۰۲۳ ساعت UTC ۱۲:۰۰ (مرجع: نویسندگان).

مطالعه موردی: ۵ اوت ۲۰۲۳

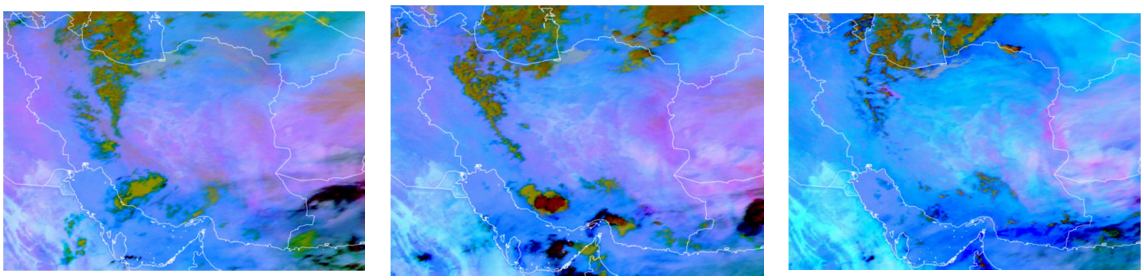
تصویر ماهواره Aqua مربوط به Dust Score –Day و عمق نوری ذرات برای روز ۵ اوت در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همچنین، تصویر زمان واقعی برای Dust RGB از ماهواره سری Meteosat صفر درجه برای روز ۵ اوت در ساعات UTC ۰۶، ۱۸ و ۲۱ در شکل ۱۱ ارائه شده است. فعال شدن چشمه‌های گردوغبار در مرزهای شرقی ایران و همچنین جنوب خراسان رضوی همراه با افزایش مقادیر عمق نوری هواویزها به‌خوبی در تصاویر ماهواره‌ای قابل‌مشاهده است. تصاویر ماهواره سری Meteosat صفر درجه نیز گسیل و انتقال گردوغبار در روز ۵ اوت طی ساعات ۹:۰۰ تا ۲۱:۰۰ را از مرزهای شرقی ایران به سمت استان‌های نیمه شرقی کشور نشان داده است.



(ب) (الف)

شکل ۹: تصویر ماهواره Aqua مربوط به الف) Dust Score –Day و ب) عمق نوری هواویزها برای روز ۵ اوت ۲۰۲۳ ساعت UTC ۰۰:۰۰

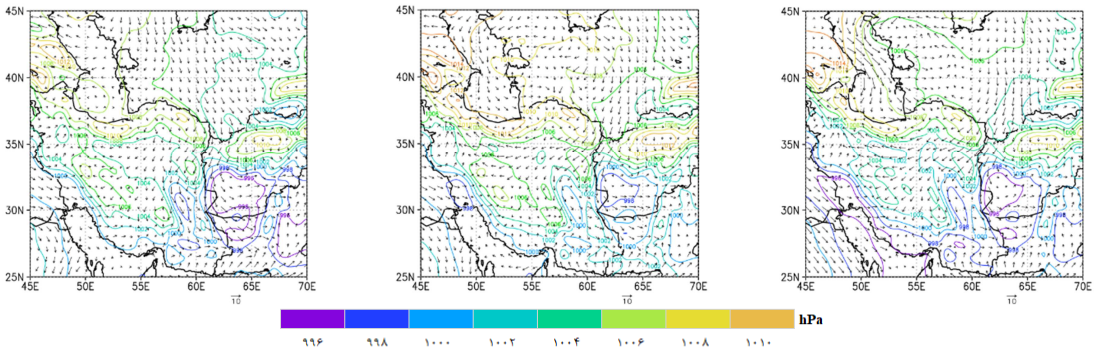
(منبع: https://worldview.earthdata.nasa.gov/).



(ج) (ب) (الف)

شکل ۱۰: تصویر زمان واقعی برای Dust RGB از ماهواره سری Meteosat صفر درجه برای روز ۵ اوت ۲۰۲۳ در ساعات الف) UTC ۰۹:۰۰، ب) UTC ۱۵:۰۰ و ج) UTC ۲۱:۰۰، نواحی صورتی نشان‌دهنده حضور گردوغبار است *(منبع: https://view.eumetsat.int/).*

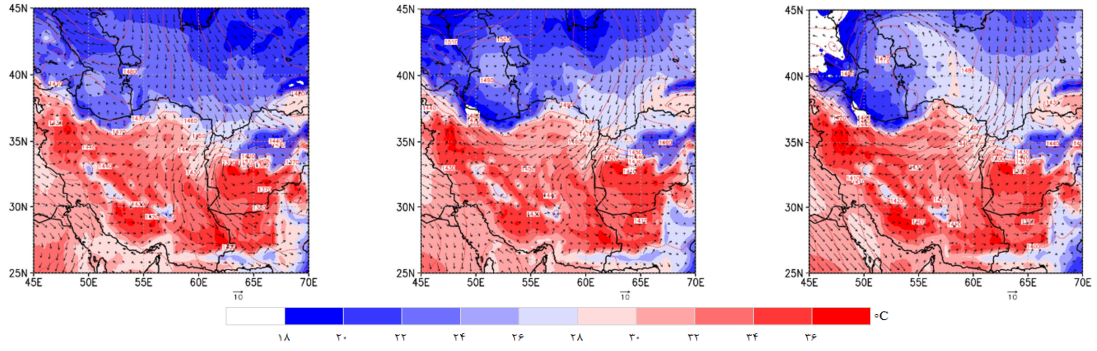
الگوی فشار سطح دریا و بردارهای باد ۱۰ متری در روز ۶-۴ اوت ۲۰۲۳ در شکل ۱۲ نشان داده شده است. شکل‌گیری و تقویت مراکز کم‌فشار در جنوب غربی افغانستان و جنوب شرقی ایران که در امتداد کم‌فشار پاکستان (خسروی و همکاران، ۱۳۹۵) هستند، همزمان با استقرار مراکز پرفشار در شمال افغانستان و شمال شرقی ایران شرایط را برای ایجاد شیو فشاری و تقویت بادهای سطحی به‌صورت بادهای شمال شرقی و شمالی نسبتاً قوی در مرز ایران و افغانستان فراهم کرده است. این جریان‌ها باتوجه به موقعیت ناهمواری و وضعیت زمین‌شناختی در جنوب استان خراسان رضوی تا خراسان جنوبی در این مناطق شرقی شده و گسیل و انتقال گردوغبار را از چشمه‌های فعال در مرز ایران و افغانستان به‌همراه داشته است. این جریان‌ها در مسیر خود به سمت جنوب نیز با توجه به وضعیت زمین‌شناختی کانالیزه شده و به‌صورت بادهای شمال غربی وارد سیستان شده (عالم و همکاران، ۲۰۱۱؛ راشکی و همکاران، ۲۰۱۲؛ ۲۰۱۳b) و می‌تواند با تقویت بادهای سطحی (رودباد تراز پایین) انتقال گردوغبار (راشکی و همکاران، ۲۰۱۲) به این نواحی را نیز به‌همراه داشته باشد.



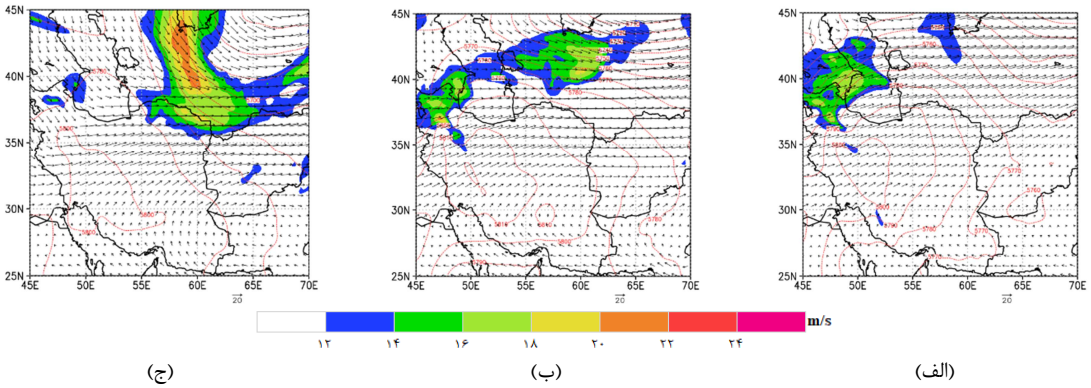
(ج) (ب) (الف)

شکل ۱۱: الگوی میانگین فشار سطح دریا و بردارهای باد ۱۰ متری در روز الف) ۴، ب) ۵ و ج) ۶ اوت ۲۰۲۳ ساعت UTC ۱۲:۰۰ *(منبع: نویسندگان).*

در شکل ۱۳ الگوی ارتفاع ژئوپتانسیلی، دما و بردار باد در تراز ۸۵۰ برای روزهای ۶-۴ اوت ۲۰۲۳ ساعت ۱۲:۰۰ ارائه شده است. با توجه به افزایش دما در نواحی جنوب غربی افغانستان، شمال غربی پاکستان و جنوب شرقی ایران طی روزهای ۶-۴، مرکز کم ارتفاع مستقر در این نواحی تقویت شده است. همزمان با آن حضور یک مرکز پرارتفاع در نیمه شمالی افغانستان سبب ریزش هوای نسبتاً خنک از عرض‌های شمالی به روی این مناطق و مرز ایران و افغانستان شده است که سبب افزایش ارتفاع ژئوپتانسیلی در این نواحی شده است. این وضعیت شرایط را برای تقویت بادهای شمالی و شمال شرقی فراهم کرده که با تقویت بادهای سطحی، سبب فعال شدن چشمه‌های گردوغبار در نواحی مرزی ایران و افغانستان شده است. حاکمیت بادهای شمال شرقی در استان خراسان رضوی سبب ورود مقادیر قابل‌توجهی به این استان، به‌ویژه در بخش‌های شرقی و جنوبی آن شده است. در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (شکل ۱۴) نیز استقرار مرکز پرارتفاع جنب حاره روی ایران به‌خوبی مشاهده می‌شود که با کشیده شدن زبانه‌های آن به سمت شرق طی روز ۵ اوت سبب تقویت الگوهای ترازهای زیرین جو شده و شرایط برای گسیل و انتقال گردوغبار در نواحی مستعد فراهم شده است.



شکل ۱۲: الگوی ارتفاع ژئوپتانسیلی (خطوط نقطه‌چین قرمز)، دما (نواحی رنگی) و بردار باد (بردارهای آبی) در تراز hPa ۸۵۰ برای روز الف) ۴، ب) ۵ و ج) ۶ اوت ۲۰۲۳ ساعت UTC ۱۲:۰۰ *(منبع: نویسندگان)*.



شکل ۱۳: الگوی ارتفاع ژئوپتانسیلی (خطوط نقطه‌چین قرمز) در تراز hPa ۵۰۰، تندی باد (نواحی رنگی) و بردار باد (بردارهای سیاه) در تراز hPa ۲۰۰ برای روز الف) ۴، ب) ۵ و ج) ۶ اوت ۲۰۲۳ ساعت UTC ۱۲:۰۰ *(منبع: نویسندگان)*.

نتیجه‌گیری

کشور ایران به‌دلیل قرار گرفتن در کمربند خشک و نیمه‌خشک در سال‌های اخیر در معرض طوفان‌های گردوغبار قرارگرفته است. ازآنجاکه بررسی‌های پهنه‌ای به‌منظور تعیین مناطق حساس و مستعد گردوغبار به شمار می‌رود، به‌عنوان روش تحقیق در این پژوهش انتخاب شد. به‌طورکلی، سری زمانی DSI طی دوره آماری ۲۰۰۲ تا ۲۰۲۳ نشان‌دهنده روند افزایشی معنی‌داری در سه استان خراسان رضوی، خراسان جنوبی و خراسان شمالی است. در استان سیستان و بلوچستان شاهد تغییرات نامنظم‌تر و فاقد روند معنی‌دار بود که با مطالعات پیشین هماهنگ است (خدام و همکاران، ۱۳۹۸). از بین ایستگاه‌های موردبررسی، ایستگاه‌های زابل و سرخس بیشترین مقدار شاخص طوفان گردوغبار را دارا هستند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که تغییرات میانگین ماهانه DSI در دوره ۲۱ ساله در ۸ ماه نخست سال میلادی یعنی ماه‌های ژانویه تا اوت به‌طورکلی افزایشی است. بیشینه آن در ماه ژوئیه است. در ماه‌های بعد تا ماه دسامبر مقدار DSI کاهشی است.

ازنظر توزیع جغرافیایی DSI در مناطق شرق و جنوب شرق مقادیر بالاتری را نشان می‌دهد و در نواحی شمال شرقی دارای کمترین مقدار است که با نتایج مطالعه یارمرادی و همکاران(۱۳۹۷) همسو است. یکی از دلایل ممکن برای کاهش مقدار DSI می‌تواند نوع پوشش گیاهی و ناهمواری‌های آن باشد (تن، ۲۰۱۶)؛ اما در نقشه‌های میانگین فصلی کل دوره آماری از سال ۲۰۰۲ تا سال ۲۰۲۳ بیشینه مقادیر DSI در بخش‌های شمال استان سیستان و بلوچستان به‌ترتیب در فصل تابستان و فصل بهار مشاهده می‌شود. در فصل پاییز نیز مقادیر بیشتری نسبت به فصل زمستان در سطح محدوده موردمطالعه محاسبه شده است. بررسی روند تغییرات این شاخص در شرق، شمال شرق و جنوب شرق کشور مشخص نمود علاوه بر قسمت‌های جنوب شرقی کشور، در سال‌های اخیر بخش‌های شرقی استان خراسان رضوی نیز درگیر این پدیده شده است. این نتایج با مطالعات آرا و همکاران (۱۴۰۲) و حسینی و همکاران (۱۳۹۸) همسو هستند.

در بررسی دو رخداد گردوغبار در نیمه شرقی ایران مشاهده شد با شکل‌گیری مراکز کم‌فشار در نواحی جنوب غرب افغانستان، شمال غرب پاکستان و شرق ایران که در امتداد کم‌فشار موسوم به کم‌فشار پاکستان هستند، همراه با نفوذ زبانه پرفشار از شمال شرق ایران شیو فشاری در این نواحی، به‌ویژه مرزهای ایران و افغانستان شکل‌گرفته که سبب تقویت جریان‌های شمالی و شمال شرقی نسبتاً قوی روی مرز ایران و افغانستان می‌شود. این جریان با توجه به ناهمواری و وضعیت زمین‌شناختی منطقه موردمطالعه به دو شاخه تقسیم می‌شود: شاخه اول با انحراف به سمت غرب به نواحی شرقی کشور وارد شده و استان‌های خراسان رضوی و جنوبی را تحت تأثیر قرار می‌دهد و شاخه دوم به سمت شرق منحرف شده و با کانالیزه‌شدن به‌صورت جریان جتی تراز پایین وارد سیستان می‌شود. وزش بادهای سطحی شدید روی نواحی مستعد در محدوده موردمطالعه مانند بستر خشک دریاچه هامون (علیزاده چوبری و همکاران، ۲۰۱۴) سبب فعال‌شدن چشمه‌های گردوغبار شده و گسیل و انتقال آن به شهرهای مجاور را به‌همراه دارد. همچنین، با بررسی ترازهای میانی و فوقانی جو نیز مشاهده شد استقرار و تقویت الگوی پرارتفاع جنب حاره روی ایران و امتداد زبانه آن به سمت شرق و نیز استقرا رودباد در شمال شرقی ایران و عرض‌های بالاتر سبب تقویت جریان‌های سطحی شده و شرایط را برای گسیل و انتقال گردوغبار فراهم می‌نماید. نتایج به‌دست‌آمده با مطالعات

انجام‌شده توسط صحت و همکاران (۱۴۰۱) مطابقت دارد. نتایج این پژوهش می‌تواند در بحث مدیریت و آمادگی در برابر طوفان‌های گردوغبار مفید واقع شود.

منابع

آراء، هایده؛ گوهری، زهرا؛ معماریان، هادی. (۱۴۰۲). پهنه‌بندی خشک‌سالی با استفاده از شاخص‌های اقلیمی و روش‌های زمین‌آمار (مطالعه موردی: دشت سرخس). شانزدهمین همایش ملی آبیاری و کاهش. کرمان، ایران. https://civilica.com/doc/1804731/

اسمعیل نژاد، مرتضی؛ پودینه، محمدرضا. (۱۳۹۶). ارزیابی سازگاری با تغییرات اقلیمی در مناطق روستایی جنوب خراسان جنوبی. مجله مخاطرات محیط طبیعی، ۶ (۱۱)، ۱۰۰-۸۵. doi: 10.22111/jneh.2017.3052

اصغری پوده، زهرا؛ شفیعی زاده، محمد؛ فاخران، سیما؛ گیلانی، علیرضا. (۱۳۹۴). ارزیابی و پهنه‌بندی تغییرات مکانی - زمانی طوفان‌های گردوغبار با استفاده از شاخص DSI در استان خوزستان. دومین همایش ملی تغییرات اقلیم و مهندسی توسعه پایدار کشاورزی و منابع طبیعی، تهران، ایران. https://civilica.com/doc/437359/

جنت رستمی، مجتبی؛ رحیمی، محمد؛ کابلی، سید حسن. (۱۴۰۰). تحلیل روند تغییرات شاخص گردوغبار و ارزیابی ارتباط آن با خشک‌سالی در دامنه جنوبی ایران، مطالعات جغرافیایی مناطق خشک، ۱۱ (۴۳)، ۱۹-۴۰.

حسینی، احمد؛ جعفری زاده، علی. (۱۴۰۲). بررسی اثرات طوفان‌های گردوغباری حاصله از سرعت باد در مهاجرت جمعیت روستایی منطقه سیستان. مجله مخاطرات محیط طبیعی، ۱۲ (۳۶)، ۷۸-۶۱. doi: 10.22111/jneh.2022.41858.1885

حسینی، احمد؛ علیجانی، بهلول؛ واقعی، یدالله. (۱۳۹۸). پیش‌بینی احتمال روزهای گردوغبار در مناطق شرقی ایران با روش کریجینگ نشانگر فضایی - زمانی. مجله مخاطرات محیط طبیعی، ۸ (۲۰)، ۲۱۶-۱۹۷.

خدام، نوشین؛ تاجبخش، سحر؛ علی اکبری بیدختی، عباسعلی؛ صحت کاشانی، ساویز؛ رنجبر سعادت آبادی، عباس. (۱۳۹۸). اقلیم‌شناسی رخدادهای توفان گردوخاک در فصل تابستان در استان سیستان و بلوچستان در دوره ۳۰ ساله (۱۹۸۷-۲۰۱۶). مجله پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، ۱۰ (۴۰)، ۸۹-۸۱.

خسروی، محمود؛ حمیدیان پور، محسن؛ کردی تمین، صالح. (۱۳۹۵). بررسی تغییرات زمانی و مکانی کم‌فشار پاکستان. مجله پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، ۲۷، ۴۲-۲۵.

رهنما، مهدی؛ صحت، ساویز؛ خدام، نوشین؛ کرمی، سارا؛ تاجبخش، سحر؛ رنجبر، عباس. (۱۴۰۰). تحلیل شاخص توفان گردوخاک (DSI)، بسامد رخدادهای گردوغبار و دید افقی در منطقه غرب آسیا. مجله پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، ۱۲ (۴۷): ۷۰-۵۷.

شمسی پور، علی؛ صفرراد، طاهر. (۱۳۹۱). تحلیلِ ماهواره‌ای ـ همدیدی پدیده‌ی گردوغبار (گردوغبار تیرماه ۱۳۸۸). مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۴۴ (۱)، ۱۲۶-۱۱۱. doi: 10.22059/jphgr.2012.24737

صحت کاشانی، ساویز؛ رهنما، مهدی؛ کرمی، سارا؛ رنجبر، عباس؛ خدام، نوشین. (۱۴۰۱). بررسی نقش پوشش گیاهی در شکل‌گیری گردوخاک جنوب شرق ایران. مجله نیوار، ۴۶ (۱۱۶). ۱۰۰-۸۶.

مفیدی، عبّاس؛ زرّین، آذر. (۱۳۹۱). بررسی ماهیت، ساختار و وردایی زمانی گردش بزرگ مقیاس جو تابستانه بر روی جنوب غرب آسیا. مجله پژوهش‌های اقلیم‌شناسی، ۳(۱۱)، ۴۰-۱۵.

میری، عباس. (۱۳۹۹). تحلیل طوفان‌های گردوغبار سیستان با استفاده از شاخص‌های DDI و DSI و پارامترهای سرعت باد، دید افقی و غلظتPM10 . مجله پژوهش‌های حفاظت آب‌وخاک (علوم کشاورزی و منابع طبیعی)، ۲۷ (۱)، ۲۳-۱.

ولی، عباسعلی؛ روستایی، فاطمه. (۱۳۹۶). بررسی روند فرسایش بادی در ایران مرکزی با استفاده از شاخص طوفان گردوغبار در پنجاه سال اخیر. نشریه علوم آب و خاک، ۲۱(۴)، ۱۸۹-۲۰۰.

یارمرادی، زهرا؛ نصیری، بهروز؛ کرمپور، مصطفی؛ محمدی، غلامحسن. (۱۳۹۷). تحلیل و پهنه‌بندی طوفان‌های گردوغبار در شرق ایران. نشریه مدیریت بیابان، ۶(۱۲)، ۷۵ تا ۸۷.

Alam, K., Qureshi, S., Blaschke, T. (2011). Monitoring Spatiotemporal aerosol patterns over Pakistan based on MODIS, TOMS, and MISR satellite data and a HYSPLIT model. Atmos Environ 45, pp 4641–4651.

Alizadeh-Choobari, O., Zawar-Reza, P., Sturman, A. (2014). The “wind of 120 days” and dust storm activity over the Sistan Basin. Atmos. Res. 143, pp 328–341.

Albarakat, R., Lakshmi, V. (2019). Monitoring Dust Storms in Iraq Using Satellite Data. Sensors, 19(17), 3687. https://doi.org/10.3390/s19173687.

Copernicus Climate Change Service (C3S) (2017). ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate. Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS), date of access. https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home

Ebrahimi-Khusfi, Z., Taghizadeh-Mehrjardi, R., Mirakbari, M., (2021). Evaluation of machine learning models for predicting the temporal variation of dust storm index in arid regions of Iran. Atmospheric Pollution Research, 12 (1), pp 134-147. https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.08.029

Furman, H. K. H. (2003). Dust storms in the Middle East: Sources of origin and their temporal characteristics. Indoor and Built Environment, 12(6), pp 419–426. https://doi.org/10.1177/1420326X030371

Goudie, A.S. (2014). Desert Dust and Human Health Disorders. Environment International, 63, pp 101-113. https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.10.011

Kok, J. F., Adebiyi, A. A., Albani, S., Balkanski, Y., Checa-Garcia, R., Chin, M., Colarco, P. R., Hamilton, D. S., Huang, Y., Ito, A., Klose, M., Li, L., Mahowald, N. M., Miller, R. L., Obiso, V., Pérez García-Pando, C., Rocha-Lima, A., and Wan, J. S. (2021). Contribution of the world’s main dust source regions to the global cycle of desert dust, Atmospheric Chemistry and Physics, 21, 8169–8193, https://doi.org/10.5194/acp-21-8169-2021.

Karami, S., Hoddein Hamzeh, N., Kaskaoutis, D.G., Rashki, A., Alam, K., Ramjbar, A. (2012). Numerical simulations of dust storms originated from dried lakes in central and southwest Asia: the case of the Aral Sea and Sistan basin. Aeolian Research, 50(1), pp 100679. doi.org/10.1016/j.aeolia.2021.100679.

Kaskaoutis, D.G., Rashki, A., Houssos, E.E., Mofidi, A., Goto, D., Bartzokas, A., Francois, P., Legrand, M., (2015). Meteorological aspects associated with dust storms in the Sistan region, southeastern Iran. Clim. Dyn. 45 (1–2), pp 407–424.

Li, J., Wang, M.S., Lee, K.H., Nichol, J., Chan, P.W. (2020). Review of dust storm detection algorithms for multispectral satellite sensors. Atmospheric Research, 250, 105398. doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105398.

McTainsh, G., and K., Tews (2007). Soil erosion by wind - Dust Storm Index (DSI): National Monitoring and Evaluation Framework, prepared for the National Land & Water Resources Audit, Canberra. 12, pp 29-40.

Middleton, N. (2019). Variability and trends in dust storm frequency on decadal timescales: Climatic drivers and human impacts. Geosciences, 9(6), pp 261. https://doi.org/10.3390/geosciences9060261

Miri, A.; Maleki, S., Middleton, N., (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.

O’Loingsigh, T., McTainsh, GH. Tews, EK. Strong, CL., Leys, JF., Shinkfield, P., Tapper, NJ. (2014b). The Dust Storm Index (DSI): a method for monitoring broad-scale wind erosion using meteorological records. Aeolian Research, 12, pp 29-40. https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2013.10.004.

Rayegani, B., Barati, S., Goshtasab, H., Gachpaz, S., Ramezani, J., Sarkheil, H., (2020). Sand and dust storm sources identification: A remote sensing approach. Ecological Indicators, 112, 106099. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106099.

Rashki A, Eriksson PG, de W. Rautenbach CJ, Kaskaoutis DG, Grote W, Dykstra J., (2013b) Assessment of chemical and mineralogical characteristics of airborne dust in the Sistan region, Iran. Chemosphere 90, pp 227–236.

Rashki, A., Kaskaoutis, DG., de W. Rautenbach CJ., Eriksson PG, Giang M, Gupta P., (2012). Dust storms and their horizontal dust loading in the Sistan region, Iran. Aeolian Res 5, pp 51–62.

Shao, Y., Dong, C.H. (2006). A review on East Asian dust storm climate, modeling and monitoring. Global and Planetary Change, 25(1-4), pp1-22. doi:10.1016/j.gloplacha.2006.02.011.

Tan, M., Li, X., Xin, L. (2014). Intensity of dust storms in China from 1980 to 2007: A new definition. Atmospheric Environment, 85, pp 215–222. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.12.010.

Tan, M.; (2016). Exploring the relationship between vegetation and dust-storm intensity (DSI) in China. J. Geogr. Sci. 26, pp 387–396. https://doi.org/10.1007/s11442-016-1275-2.

WorldBank, (2019). Sand and Dust Storms in the Middle East and North Africa Region – Sources, Costs, and Solutions, World Bank, https://doi.org/10.1596/33036.

WMO, Annex II, (2019). Manual on Codes.

University of Sistan and Baluchestan
Journal of Natural Environment Hazards
Print ISSN: 2676 - 4377 Online ISSN: 2676 - 4385
Homepage: https://jneh.usb.ac.ir

References

References (in Persian)

Ara, H., Gohari, Z., Memarian, H. (2023). Drought zoning using climatic indicators and geostatistical methods (case study: Sarakhs Plain). The 16th National Conference on Irrigation and Evaporation Reduction papers, Kerman, Iran. [in Persian]

Asghari Podeh, Z., Shafiee Zadeh, M., Fakheran, S., Gilani, Alireza. (2015). Evaluation and zoning of spatial-temporal changes of dust storms using DSI in Khuzestan province. 2nd National conference on climate change and engineering sustainable agriculture and natural resources, Tehran, Iran. [in Persian]

Esmaeilnejad, M., Podineh, M.R. (2017). Evaluation of adaptation to climate change in rural areas south of South Khorasan. Journal of Natural Environmental Hazards, 6(11), 85-100. doi: 10.22111/jneh.2017.3052[in Persian].

Hosseini, A., & Jafarizadeh, A. (2023). Investigation of the effects of dust storms caused by wind speed on the migration of the rural population in the Sistan region. Journal of Natural Environmental Hazards, 12(36), 61-78. doi: 10.22111/jneh.2022.41858.1885[in Persian].

Hosseini, A., Alijani, B., & Waghei, Y. (2019). Probability of SDS Days Prediction in Iran's Eastern Region Using Spatio-Temporal Indicator Kriging model. Journal of Natural Environmental Hazards, 8(20), 197-216. doi: 10.22111/jneh.2018.23205.1358[in Persian].

Jannat rostami, M., rahimi, M., & kaboli, S. H. (2021). Analysis of Trend Dust Index Changes (DSI) and Evaluation of its Relationship with Drought in the Southern Slope of Alborz. Journal of Arid Regions Geographic Studies, 12(43), 19-40. [in Persian]

Khoddam, N., Tajbakhsh, S., Beydokhti, A., Sehat, S., & Ranjbar, A. (2020). Dust Storm Climatology in Sistan and Baluchestan Province over 30 years (1987-2016). Journal of Climate Research, 1398(40), 81-89. [in Persian].

Khosravi, M., Hamidianpour, M., & Kordi Tamin, S. (2016). A Study of Tempo Spatial Variation of Pakistan Low Pressure. Journal of Climate Research. ,1395)27 ,(25-42)[in Persian].

Miri, A., (2020). Dust storms analysis in the Sistan region using DDI and DSI indices and wind speed, visibility, and PM10 parameters. Journal of Water and Soil Conservation, 27(1), 1-23. doi: 10.22069/jwsc.2020.16883.3225[in Persian].

Mofidi, A., A. Zarrin. (2012). Investigating the Nature, Structure and Temporal Variation of Summertime Large-scale Atmospheric Circulation over Southwest Asia. Journal of Climate Research. 11: 15-40. [in Persian].

Rahnama, M.,Y Sehatkashani, S., Khoddam, N., Karami, S., tajbakhsh, S., & Ranjbar, A. (2021). The analysis of the Dust Storm Index (DSI), Frequency of dust events, and horizontal visibility in the West Asian. Journal of Climate Research, 1400(47), 57-70. [in Persian]

Sehat Kashani, S., Rahnama, M., Karami, S., Ranjbar, A., & Khoddam, N. (2022). Investigating the Wind Erosion Affecting the Activation of Dust Genesis over South-Eastern Iran. Nivar, 46(116-117), 86-100. Doi: 10.30467/nivar.2022.338531.1218[in Persian]

Shamsipour, A., & Safarrad, T. (2012). Satellite and Synoptic Analysis of Duststorm in Western Half of Iran (Case Study: July 2009). Physical Geography Research, 44(1), 111-126. doi: 10.22059/jphgr.2012.24737[in Persian]

Vali, A., & Roustaei, F. (2018). Investigation of the Wind Erosion Trend in Central Iran Using Dust Storm Index in the Last Fifty Years. Journal of Water and Soil Science, 21(4), 189-200. doi: 10.29252/jstnar.21.4.189[in Persian].

Yarmoradi, Z.; Nasiri, B., Karampour, M., & Mohamadi, G. (2019). Analysis and Clustering of Dust Storms in Eastern Iran. Desert Management, 6(12), 75-88. doi: 10.22034/jdmal.2019.34758[in Persian].

References (in English)

Alam, K., Qureshi, S., Blaschke, T. (2011). Monitoring Spatiotemporal aerosol patterns over Pakistan based on MODIS, TOMS, and MISR satellite data and a HYSPLIT model. Atmos Environ 45, pp 4641–4651.

Alizadeh-Choobari, O., Zawar-Reza, P., Sturman, A. (2014). The "wind of 120 days" and dust storm activity over the Sistan Basin. Atmos. Res. 143, pp 328–341.

Albarakat, R., Lakshmi, V. (2019). Monitoring Dust Storms in Iraq Using Satellite Data. Sensors, 19(17), 3687. https://doi.org/10.3390/s19173687.

Copernicus Climate Change Service (C3S) (2017). ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate. Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS), date of
access. https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home

Ebrahimi-Khusfi, Z., Taghizadeh-Mehrjardi, R., Mirakbari, M., (2021). Evaluation of machine learning models for predicting the temporal variation of dust storm index in arid regions of Iran. Atmospheric Pollution Research, 12 (1), pp 134-147. https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.08.029

Furman, H. K. H. (2003). Dust storms in the Middle East: Sources of origin and their temporal characteristics. Indoor and Built Environment, 12(6), pp 419–426. https://doi.org/10.1177/1420326X030371

Goudie, A.S. (2014). Desert Dust and Human Health Disorders. Environment International, 63, pp 101-113. https://doi.org/10.1016/j.envint.2013.10.011

Kok, J. F., Adebiyi, A. A., Albani, S., Balkanski, Y., Checa-Garcia, R., Chin, M., Colarco, P. R., Hamilton, D. S., Huang, Y., Ito, A., Klose, M., Li, L., Mahowald, N. M., Miller, R. L., Obiso, V., Pérez García-Pando, C., Rocha-Lima, A., and Wan, J.

S. (2021). Contribution of the world's main dust source regions to the global cycle of desert dust, Atmospheric Chemistry and Physics, 21, 8169–8193, https://doi.org/10.5194/acp-21-8169-2021.
Karami, S., Hoddein Hamzeh, N., Kaskaoutis, D.G., Rashki, A., Alam, K., Ramjbar, A. (2012). Numerical simulations of dust storms originated from dried lakes in central and southwest Asia: the case of the Aral Sea and Sistan basin. Aeolian Research, 50(1), pp 100679. doi.org/10.1016/j.aeolia.2021.100679.
Kaskaoutis, D.G., Rashki, A., Houssos, E.E., Mofidi, A., Goto, D., Bartzokas, A., Francois, P., Legrand, M., (2015). Meteorological aspects associated with dust storms in the Sistan region, southeastern Iran. Clim. Dyn. 45 (1–2), pp 407–424.
Li, J., Wang, M.S., Lee, K.H., Nichol, J., Chan, P.W. (2020). Review of dust storm detection algorithms for multispectral satellite sensors. Atmospheric Research, 250, 105398. doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105398.
McTainsh, G., and K., Tews (2007). Soil erosion by wind - Dust Storm Index (DSI): National Monitoring and Evaluation Framework, prepared for the National Land & Water Resources Audit, Canberra. 12, pp 29-40.
Middleton, N. (2019). Variability and trends in dust storm frequency on decadal timescales: Climatic drivers and human impacts. Geosciences, 9(6), pp 261. https://doi.org/10.3390/geosciences9060261
Miri, A.; Maleki, S., Middleton, N., (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.
O'Loingsigh, T., McTainsh, GH. Tews, EK. Strong, CL., Leys, JF., Shinkfield, P., Tapper, NJ. (2014b). The Dust Storm Index (DSI): a method for monitoring broad-scale wind erosion using meteorological records. Aeolian Research, 12, pp 29-40. https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2013.10.004.
Rayegani, B., Barati, S., Goshtasab, H., Gachpaz, S., Ramezani, J., Sarkheil, H., (2020). Sand and dust storm sources identification: A remote sensing approach. Ecological Indicators, 112, 106099. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106099.
Rashki A, Eriksson PG, de W. Rautenbach CJ, Kaskaoutis DG, Grote W, Dykstra J., (2013b) Assessment of chemical and mineralogical characteristics of airborne dust in the Sistan region, Iran. Chemosphere 90, pp 227–236.
Rashki, A., Kaskaoutis, DG., de W. Rautenbach CJ., Eriksson PG, Giang M, Gupta P., (2012). Dust storms and their horizontal dust loading in the Sistan region, Iran. Aeolian Res 5, pp 51–62.
Shao, Y., Dong, C.H. (2006). A review on East Asian dust storm climate, modeling and monitoring. Global and Planetary Change, 25(1-4), pp1-22. doi:10.1016/j.gloplacha.2006.02.011.
Tan, M., Li, X., Xin, L. (2014). Intensity of dust storms in China from 1980 to 2007: A new definition. Atmospheric Environment, 85, pp 215–222. https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.12.010.
Tan, M.; (2016). Exploring the relationship between vegetation and dust-storm intensity (DSI) in China. J. Geogr. Sci. 26, pp 387–396. https://doi.org/10.1007/s11442-016-1275-2.
WorldBank, (2019). Sand and Dust Storms in the Middle East and North Africa Region – Sources, Costs, and Solutions, World Bank, https://doi.org/10.1596/33036.
WMO, Annex II, (2019). Manual on Codes.