



The Role of Summer and Winter Shamal Winds in the Occurrence of Dust Storms in Western Iran

Azar Beyranvand¹✉, Ghasem Azizi² , Omid Alizadeh³

1. (Corresponding Author) Department of Physical Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

Email: beyranvandazar@ut.ac.ir

2. Department of Physical Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

Email: ghazizi@ut.ac.ir

3. Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

Email: omid.alizadeh@ut.ac.ir

Article Info

Article type:
[Research Article](#)

Article History:
[Received:](#)
3 August 2024
[Received in revised form:](#)
17 October 2024
[Accepted:](#)
23 November 2024
[Available online:](#)
26 December 2024

Keywords:
Dust Storm,
Iran,
Low-Level Jet,
Shamal Winds,
Visibility.

ABSTRACT

We analyzed meteorological data from 33 synoptic stations spanning 1987-2022 to investigate dust storms in western Iran. Dusty days were defined as instances where suspended dust coincided with horizontal visibility below 1 km at a minimum of three nearby synoptic stations. We employed ERA-Interim data to identify synoptic patterns associated with dust storms. By analyzing surface pressure and geopotential height maps at lower atmospheric levels, we distinguished the summer and winter Shamal Wind patterns, both of which play a crucial role in dust transport to western Iran. Of the 229 recorded dust events, 70 were linked to summer Shamal Winds and 25 to winter Shamal Winds. Summer Shamal Wind storms predominantly originated from dust sources in northern Iraq, particularly around Lake Tharthar, Nineveh Province, and Kirkuk Province. In contrast, winter Shamal Wind storms showed a reduced contribution from central Iraqi lakes (15%), with dust primarily sourced from eastern and southeastern Iraq, northern Saudi Arabia, Kuwait, and southwestern Iran.

Cite this article: Beyranvand, A., Azizi, G., & Alizadeh, O. (2024). The Role of Summer and Winter Shamal Winds in the Occurrence of Dust Storms in Western Iran. *Physical Geography Research Quarterly*, 56 (4), 1-19. <http://doi.org/10.22059/jphgr.2025.372219.1007809>



© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press

Extended Abstract

Introduction

Dust storms are among the most significant climatic phenomena affecting arid and semi-arid regions worldwide. The interannual variability of atmospheric general circulation patterns (Kaskaoutis et al., 2012; Jin et al., 2018) plays a crucial role in determining the frequency and intensity of dust events, making this relationship a subject of interest for researchers (Yu et al., 2015; Alizadeh-Choobari et al., 2016; Mashat et al., 2017; Beyranvand et al., 2019, 2023). One of the primary meteorological drivers of dust activity in the Middle East is the Shamal Wind. Walters (1990) categorizes Shamal Wind events into two types: short-term events lasting 24 to 36 hours with wind speeds of approximately 15.5 m s⁻¹, and long-term events persisting for 3 to 5 days with wind speeds reaching 25.7 m s⁻¹. Winds between 9 and 11.2 m s⁻¹ can lift dust into the atmosphere. The impact of summer Shamal Winds on dust events has been emphasized in prior research (e.g., Yu et al., 2015; Francis et al., 2017; Ranjbar Saadat Abadi et al., 2022). Meanwhile, the winter Shamal Wind, a northwesterly wind lasting between 3 and 7 days from December to early March (Pakhirehzan et al., 2018), is categorized based on duration as one type lasting 1 to 3 days and another lasting 3 to 5 days. During winter Shamal events, strong frontal winds develop due to interactions between the polar frontal jet stream and the subtropical jet stream, with surface wind speeds in the central Persian Gulf reaching 15 to 20 m s⁻¹.

Methodology

We analyzed horizontal visibility and present weather from 33 synoptic stations across Iran to identify dust storms in western Iran from 1987-2022. Dust events are where suspended dust coincides with horizontal visibility below 1 km in at least three synoptic stations. To assess the contribution of Shamal Winds, we utilized the hourly European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) reanalysis Interim (ERA-Interim) data. The variables analyzed included sea-level pressure, geopotential height, temperature, horizontal (u) and meridional (v) wind components,

vertical wind speed, divergence, convergence, and relative humidity across multiple atmospheric levels.

Results and discussion

Our analysis indicates that the highest frequency of dust events in Iran occurred between 2008 and 2012. Seasonal distribution analysis revealed that 37.2% of dust events occurred in spring, 36.3% in summer, 18.8% in winter, and 7.7% in autumn. The Shamal Wind is a dominant meteorological pattern responsible for dust storms in Southwest Asia. Over half of the summer Shamal Wind events occurred in 2000, 2005, 2008, 2009, 2010, and 2012. In fewer than 15% of cases, low-level jet streams (winds exceeding 15 m s⁻¹) were observed at 850 hPa. However, in more than 80% of cases, near-surface wind speeds at latitudes 35°N or 31°N exceeded 10 m s⁻¹. Approximately 65% of Shamal Wind cases were associated with frontal systems, low-pressure tongues, and low-pressure centers with pressures below 1000 hPa extending from central to northwestern Iraq. Analysis of geopotential heights at upper levels suggests that the development of subtropical high pressure plays a key role in the occurrence of summer Shamal Winds. Convergence between this ridge and the monsoon trough, particularly at 700 hPa, contributes to summer Shamal wind formation. Of the 20 dust storms linked to winter Shamal Winds, 75% lasted one day, while 25% persisted for two to three days. These storms occurred between October and May. In over 70% of cases, the development of the Siberian High extending into Turkey generated a strong pressure gradient, facilitating Shamal Wind formation. Dust events associated with the winter Shamal Wind were most frequent in 2008, 2011, and 2012.

Conclusion

Our analysis of the Pakistan-Afghanistan low-pressure system during dust events caused by summer Shamal Winds revealed that in 35.7% of cases, pressures in both locations were nearly similar, while in 37.5% of cases, pressures were lower in southwestern Afghanistan, and in 26.8% of cases, pressures were lower in Pakistan.

Khosravi et al. (2015) found that the low pressure in Pakistan has increased over time, though this trend has weakened between 1980 and 2015. Our findings suggest that during dust events triggered by summer Shamal Winds, the low-pressure system over Afghanistan was slightly stronger and more influential than that over Pakistan. Comparing dust events driven by summer and winter Shamal Winds, we found that tilting vorticity was stronger in winter, and wind speeds during winter Shamal events exceeded those of summer Shamal events. In dust storms caused by the summer Shamal Wind, the primary dust sources were in the northern half of Iraq, particularly around Sarsar Lake, Nineveh Province, and Kirkuk Province. In contrast, dust storms driven by winter Shamal Winds exhibited a reduced role of central Iraqi lakes as dust sources (contributing only 15% of emitted dust), with eastern and southeastern Iraq, northern Saudi Arabia, Kuwait, and southwestern Iran playing a more prominent role.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

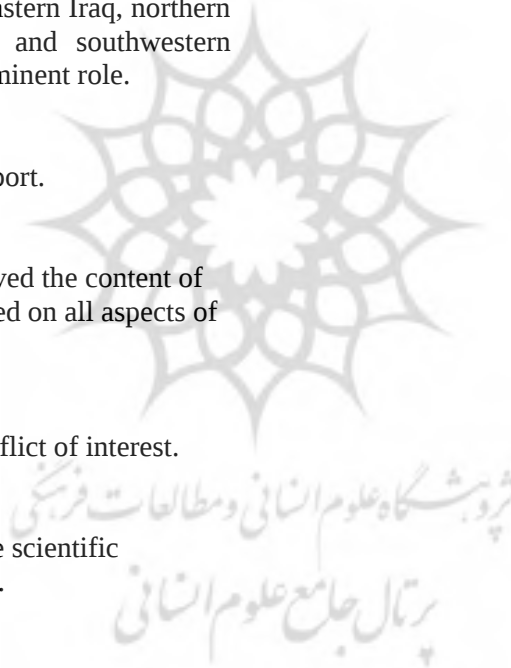
All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to all the scientific consultants of this paper.



نقش باد شمال تابستانه و زمستانه در رخداد توفان‌های گردوغبار در غرب ایران

آذر بیرانوند^۱ ✉، قاسم عزیزی^۲ , امید علیزاده^۳ ^۱ - نویسنده مسئول، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: beyranvandazar@ut.ac.ir^۲ - گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: ghazizi@ut.ac.ir^۳ - گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: omid.alizadeh@ut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۳/۰۵/۱۳

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۳/۰۷/۲۶

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۳/۰۹/۰۳

تاریخ چاپ:

۱۴۰۳/۱۰/۰۶

واژگان کلیدی:

ایران،

باد شمال،

توفان گردوغبار،

دید افقی،

رود باد تراز زیرین.

به‌منظور شناسایی توفان‌های گردوغبار در غرب ایران، داده‌های هواشناسی ۳۳ ایستگاه همدیدی طی دوره زمانی ۱۹۸۷-۲۰۲۲ استفاده شد. روزهایی که پدیده تعلیق با دید افقی کمتر یا مساوی یک کیلومتر حداقل در سه ایستگاه مشاهده‌شده باشد به‌عنوان رویداد گردوغبار در نظر گرفته شد. به‌منظور استخراج الگوهای همدیدی از داده‌های ERA-Interim استفاده شد. با بهره‌گیری از نقشه فشار سطح و نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل در سطوح پایین جو الگوی باد شمال تابستانه و زمستانه که از مهم‌ترین الگوهای جوی انتقال و انتشار گردوغبار به غرب ایران هستند، جداسازی شدند. از ۲۲۹ رخداد بررسی‌شده، ۷۰ مورد توفان ناشی از باد شمال تابستانه و ۲۵ مورد ناشی از باد شمال زمستانه بودند. در توفان‌های ناشی از وزش باد شمال تابستانه، بیشترین میزان خیزش گردوغبار از کانون‌های گردوغبار نیمه شمالی کشور عراق بوده است. به عبارتی نقش کانون‌های اطراف دریاچه ثرثار، استان نینوا و استان کرکوک در توفان‌های ناشی از باد شمال تابستانه قابل توجه است. در توفان‌های ناشی از باد شمال زمستانه نقش دریاچه‌های مرکزی عراق در خیزش گردوغبار کمتر و در حدود ۱۵ درصد و نقش کانون‌های واقع در شرق و جنوب شرق عراق، شمال عربستان، کویت و جنوب غرب ایران نسبت به توفان‌های ناشی از باد شمال تابستانه بیشتر است.

استناد: بیرانوند، آذر؛ عزیزی، قاسم و علیزاده، امید. (۱۴۰۳). نقش باد شمال تابستانه و زمستانه در رخداد توفان‌های گردوغبار در غرب ایران. مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، ۵۶ (۳)، ۱۹-۱.

<http://doi.org/10.22059/jphgr.2025.372219.1007809>

مقدمه

یکی از پدیده‌های اقلیمی مهم و تأثیرگذار در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان رخداد توفان‌های گردوغبار است. مطالعات انجام‌شده بیانگر این است که حدود ۱۰ تا ۳۰ درصد گردوغبار جهان از منطقه غرب آسیا سرچشمه می‌گیرد، به‌طوری‌که زندر و همکاران (Zender et al., 2003) مقدار ۴۱۵ میلیون تن در سال، گینو و همکاران (Ginoux et al., 2004) مقدار ۴۹۶ میلیون تن در سال و تاناکا و همکاران (Tanaka et al., 2006) مقدار ۲۲۱ میلیون تن در سال از گردوغبار منتشرشده در جهان را ناشی از کانون‌های گردوغبار این منطقه می‌دانند. یکی از تبعات این مهم مرگ زودرس حدود ۱۰۰ هزار نفر در سال در این منطقه بر اثر این پدیده است (Klingmüller et al., 2016).

وجود ارتباط قوی بین پدیده‌های هواشناسی و تغییر بین سالانه در الگوهای گردش کلی جو (Kaskaoutis et al., 2018; Jin et al., 2012) سبب تغییرپذیری سالانه این پدیده‌ها می‌شود. ارتباط بین تغییرات بین سالانه الگوهای گردش جو با انتشار، انتقال و فرونشست گردوغبار همواره موردتوجه پژوهشگران بوده است (Alizadeh-Yu et al., 2015; Choobari et al., 2016; Mashat et al., 2017; Beyranvand et al., 2019; Beyranvand et al., 2023). در این میان باد شمال یکی از محرک‌های عمده در فعالیتهای گردوغبار در منطقه خاورمیانه به شمار می‌رود (Middleton, 1986; Goudie et al., 2006; Shao et al., 2013; Notaro et al., 2013, 2015; Karami-Yu et al., 2013, 2016; Yu et al., 2021). یو و همکاران (Yu et al., 2015) تغییرپذیری بین سالانه فراوانی رخدادهای گردوغبار در خاورمیانه را از شدت باد شمال متأثر دانسته‌اند، به‌طوری‌که افزایش یک متر بر ثانیه در سرعت باد شمال ۵ روز بر روزهای گردوغباری افزوده است. فعالیت باد شمال در ماه‌های می تا آگوست در مطالعات مختلف مورد اشاره قرار گرفته است (Perrone, 1979; Barth, 2001; Rao et al., 2003; Hamidi et al., 2017). البته در برخی موارد در ماه آوریل هم نمود فعالیت این باد در رخدادهای گردوغبار دیده‌شده است (بیرانوند و همکاران، ۱۳۹۸). میزان سرعت این باد در مطالعات مختلف متفاوت ذکر شده است. (Clements et al., 1963; Abdi Vishkaee et al., 2012; Rao et al., 2001; Walters, 1990). بر اساس سرعت و مدت زمان وقوع، رخدادهای باد شمال را به دو نوع کوتاه‌مدت و بلندمدت متمایز کرده است. در برخی مطالعات برای خیزش گردوغبار توسط این باد یک دامنه سرعتی بین ۸/۹۵ تا ۱۱/۱۸ متر بر ثانیه تعیین شده است (UNEP, 2013). همراهی رود باد تراز زیرین با رخدادهای گردوغباری که به سبب باد شمال تابستانه رخ می‌دهند مورد تأکید محققان بوده است (Francis et al., 2017; Yu et al., 2015; Ranjbar Saadat Abadi et al., 2022). در مقابل، باد شمال زمستانه بادی با جهت شمال غربی است که بین ۳ تا ۷ روز تداوم دارد و در ماه دسامبر تا اوایل مارس می‌وزد (Pakhirehzan et al., 2018).

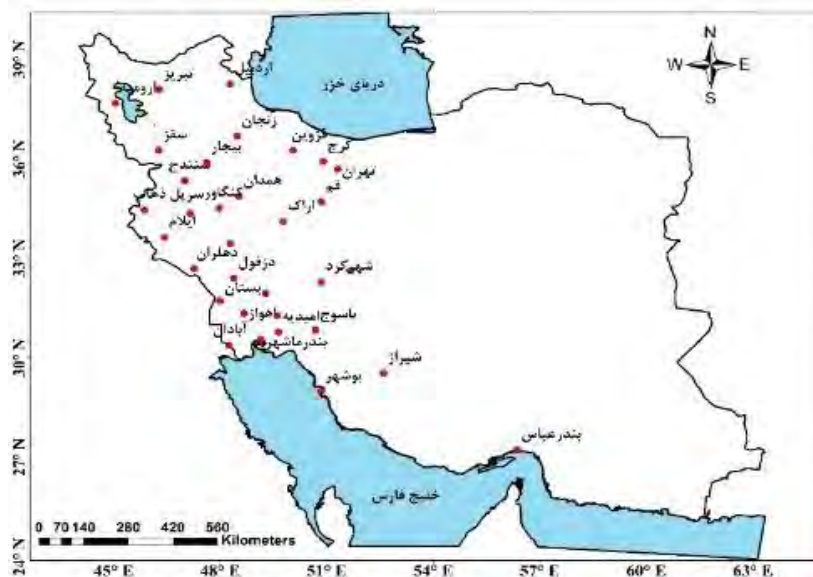
اهمیت وجود سامانه‌های فشاری در منطقه و تأثیر شدت و ضعف آن‌ها بر رخدادهای گردوغبار در منطقه کانون مطالعات اقلیم‌شناسی مرتبط با این موضوع بوده است. عوض و مشاط (Awad & Mashat, 2013) انتقال گردوغبار عظیم از شمال شرق آفریقا به آسیا را مرتبط با شیو فشار ناشی از پرفشار آזור و کم‌فشار حرارتی شبه‌جزیره عربستان می‌دانند. همچنین ایشان توفان‌های گسترده عربستان در بهار را به وجود سامانه‌های کم‌فشار قوی در شرق منطقه یا سامانه‌های پرفشار قوی در غرب منطقه نسبت می‌دهد و باد شمال را باد غالب در رخداد توفان‌های گردوغبار شدید در شرق شبه‌جزیره عربستان در فصل بهار برمی‌شمارند. در ایران نیز نجفی و همکاران (Najafi et al., 2017) رخدادهای گردوغبار را در دوره گرم سال وابسته به باد شمال می‌دانند. در بررسی رخداد توفان‌های گردوغبار در عربستان، مطالعات دیگر مثل بیگم و همکاران (Beegum et al., 2018) نیز باد شمال تابستانه را یکی از الگوهای مهم برمی‌شمارند. راشکی و همکاران (Rashki et al., 2019) باد شمال را یک باد محلی قوی توسعه‌یافته در مناطق بیابانی منطقه می‌دانند. در مطالعه انجام‌شده توسط

ایشان نیز به اهمیت وجود سامانه کم‌فشار حرارتی هند-پاکستان، که در جنوب ایران، شمال دریای عرب و شبه‌جزیره عربستان با ایجاد هسته ثانویه توسعه می‌یابد، اشاره شده است. بر اساس مطالعه محمدپور و همکاران (Mohammadpour et al., 2021) یکی از مهم‌ترین الگوهای خیزش و انتقال گردوغبار به ایران مربوط به باد شمال است که آن را ناشی از شیو فشاری بین پرفشار شمال آفریقا-مدیترانه و کم‌فشار موسمی جنوب شرق ایران می‌دانند. ایشان رژیم بادهای غالب را نتیجه‌ای از الگوهای جوی و شیو فشاری می‌دانند که عامل اصلی در انتشار و انتقال گردوغبار است. علاوه بر سامانه‌های فشاری در مقیاس همدیدی و منطقه‌ای، وجود ناهمواری زاگرس در سازوکار ایجاد باد شمال به‌خوبی در کار مفیدی و زرین (Mofidi & Zarrin, 2022) تشریح شده است.

یکی از مهم‌ترین عوامل در تمام مراحل انتشار، انتقال و فرونشست گردوغبار، نقش الگوهای جوی و به‌ویژه باد است، مطالعات خوبی نیز در این زمینه به سرانجام رسیده است، اما سهم الگویی خاص در رخداد گردوغبار نسبت به سایر الگوها و نیز نگرش جزئی‌تر به اینکه هر الگو در انتشار و انتقال گردوغبار از کدام کانون گردوغبار منطقه به ایران مؤثرتر واقع می‌شود مورد مناقشه است. بنابراین در این مطالعه هدف در گام اول بررسی سهم باد شمال به‌عنوان یکی از مهم‌ترین الگوها در انتشار و انتقال گردوغبار خاورمیانه به ایران است. در گام بعد تحلیلی کلی از اثرگذاری کانون‌های تغذیه‌کننده گردوغبار در این الگو پرداخته خواهد شد.

روش پژوهش

در راستای شناسایی توفان‌های گرد غبار منطقه‌ای در این مطالعه از داده‌های مربوط به دید افقی و کد پدیده‌ها در هوای حال حاضر برای دوره زمانی ۲۰۲۲-۱۹۸۷ در ۳۳ ایستگاه همدید کشور ایران استفاده شده است. داده‌های فوق از سازمان هواشناسی ایران گرفته شده است. توزیع مکانی ایستگاه‌های همدیدی بکار گرفته شده در این مطالعه در شکل ۱ ارائه شده است. روزهایی که از میان ۸ دیدبانی در روز حداقل یک دیدبانی کد هوای حال حاضر را ۰۶ و دید افقی را کمتر یا مساوی ۱۰۰۰ متر به ثبت رسانده باشد و در این روز حداقل سه ایستگاه (با فاصله افقی حداقل ۱۰۰ کیلومتر) این شرایط را داشته باشد به‌عنوان توفان گردوغبار منطقه‌ای در نظر گرفته شده است. با در نظر گرفتن شرایط فوق در سی‌وشش سال اخیر (۱۹۸۷-۲۰۲۲)، در مجموع ۲۲۹ رخداد توفان گردوغبار (۳۹۱ روز دارای توفان گردوغبار) موردتوجه قرار گرفت. به‌منظور ایجاد نگرشی کلی از کانون‌های متأثرکننده ایران برای تمامی رخدادها در این مطالعه تصاویر رنگی واقعی سنجنده مادیس موردبررسی قرار گرفت. این تصاویر برای تمام ۳۹۱ روز توفانی مورد تحلیل قرار گرفت. این تصاویر در تحلیل همدیدی نیز به‌منظور شناسایی بهتر سامانه اثرگذار در زمان گسیل و انتقال توده گردوغبار کمک شایان توجهی نمودند.



شکل ۱. توزیع مکانی ایستگاه‌های همید مورد استفاده در شناسایی توفان‌های گردوغبار

در ادامه داده‌های ERA-Interim مربوط به فشار سطح دریا، ارتفاع ژئوپتانسیل، دما، مؤلفه مداری (u) و نصف‌النهاری (v) باد، سرعت قائم، واگرایی، همگرایی و تاوایی نسبی در سطوح مختلف جو در مقیاس ساعتی (۴ بار در روز) و داده‌های ماهانه فشار سطح دریا مربوط به ERA5 گرفته شد. سپس الگوهای باد شمال در روزهای توفانی شناسایی شده با بهره‌گیری از نقشه فشار سطح دریا و نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل سطوح پایین جو در ساعت‌های ۰۰، ۰۶، ۱۲ و ۱۸ جهانی استخراج و بررسی شد.

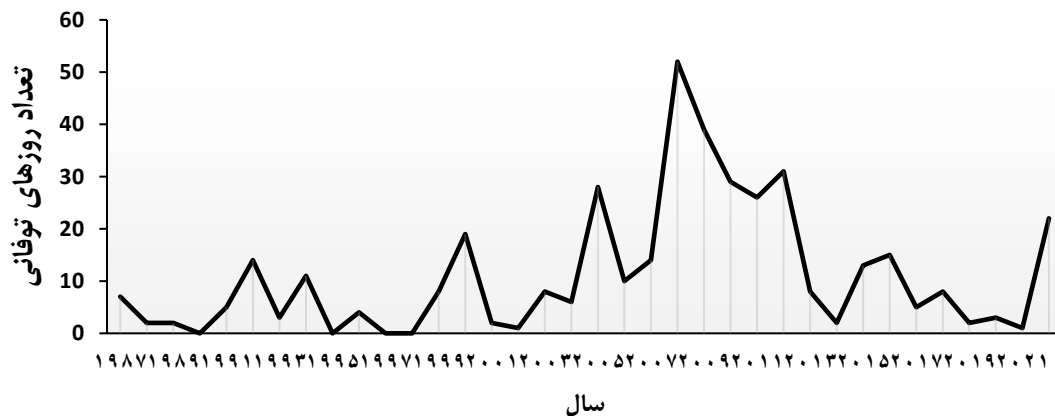
الگوهای باد شمال حاصل از شارش هوا به سمت کم‌فشار سطحی است که جهت شمال غربی و شمالی دارد. الگوی همیدی که پتانسیل ایجاد باد شمال در تابستان را در این منطقه به وجود می‌آورد همگرایی بین پشته جنب حاره‌ای که از دریای مدیترانه به سمت شمال شبه‌جزیره عربستان و عراق گسترش می‌یابد و ناوه موسمی روی جنوب عراق و جنوب شبه‌جزیره عربستان است (Hamidi et al., 2017). در شمال زمستانه سازوکار تعداد زیادی از توفان‌های گردوغبار از نظر رخداد شبیه به جبهه سرد است و تعداد کمی از این توفان‌ها که با سامانه‌های جبهه‌ای همراهی نمی‌کنند به علت قیف شدگی توده‌های هوای خیلی سرد از ترکیه و سوریه به سمت جنوب دره دجله و فرات در عراق و روی خلیج فارس ایجاد می‌شوند. همچنین وضعیت فشار و دما، تاوایی نسبی، سرعت و جهت باد و جریان جتی، چگونگی فعالیت مراکز واگرایی و همگرایی و امگا در ترازهای مختلف جو برای دستیابی به چگونگی شرایط همیدی مورد توجه قرار گرفت. به علاوه، جبهه‌زایی در سطح زمین و سطوح فوقانی بررسی شد. به منظور بررسی شرایط جبهه‌زایی و جبهه‌زدایی در منطقه از تابع جبهه‌زایی مارتین (۱۳۸۸) به شکل زیر استفاده شد:

$$\mathcal{J}_{2D} = \frac{1}{|\nabla\theta|} \left\{ -\frac{\partial\theta}{\partial x} \left(\frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial\theta}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial\theta}{\partial y} \right) - \left(\frac{\partial\theta}{\partial y} \right) \left(\frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial\theta}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial\theta}{\partial y} \right) \right\} \quad (1)$$

یافته‌ها

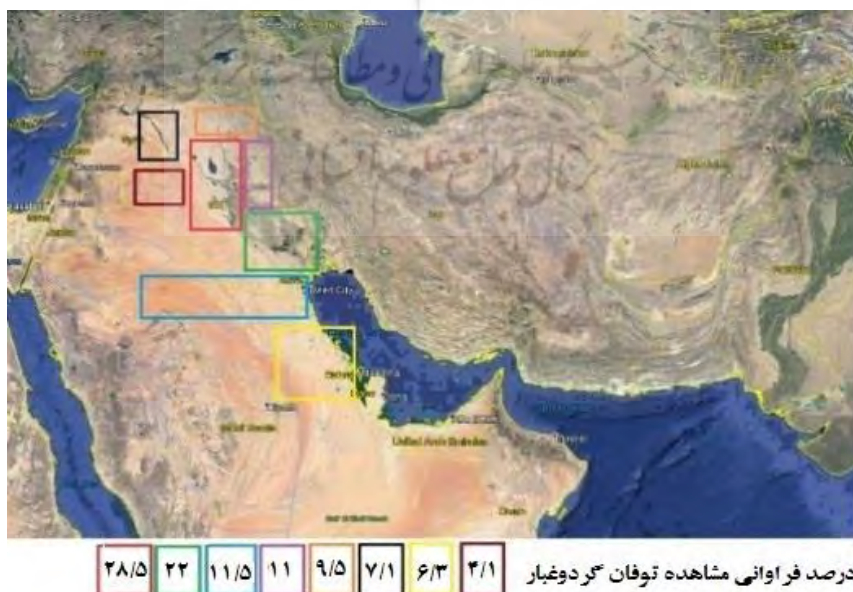
رخداد پدیده توفان گردوغبار منطقه‌ای در ۳۹۱ روز (۲۲۹ رخداد) مورد بررسی قرار گرفت. مطابق سری زمانی فراوانی سالانه پدیده توفان گردوغبار در غرب ایران (شکل ۲)، بین سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۲ بیشینه رخداد این پدیده مشاهده

می‌شود. بررسی پیشروی توفان در ایستگاه‌های مختلف نشان داد که فراگیری این پدیده در سال ۲۰۰۹ و ۲۰۱۲ چشمگیر و بی‌سابقه بوده است. سال‌های ۱۹۹۰، ۱۹۹۵، ۱۹۹۷ و ۱۹۹۸ فاقد رخداد این پدیده بوده‌اند.



شکل ۲. فراوانی بین سالانه روزهای همراه با توفان گردوغبار در غرب ایران در دوره ۱۹۸۷-۲۰۲۲

بیشترین درصد اثرپذیری ایران از توفان‌های ایجادشده در نواحی مرکزی عراق از جمله سواحل خشک دریاچه‌های این منطقه و سپس جنوب شرق عراق (نواحی تالابی) بوده است (شکل ۳). از رخدادهای موردبررسی، ۳۷/۲ درصد در فصل بهار، ۳۶/۳ درصد در فصل تابستان، ۱۸/۸ درصد در فصل زمستان و ۷/۷ درصد در فصل پاییز رخ داده است. تحلیل الگوهای مشابه تفکیک‌شده نشان داد که یکی از الگوهای اصلی که بر رخدادهای موردبررسی حاکم بوده است، حاصل از شارش هوا به سمت کم‌فشار سطحی است که با نام محلی باد شمال از آن یاد می‌شود. با توجه به فصل اثرگذاری این باد و نحوه شکل‌گیری و گسترش آن، بین دو نوع باد شمال تابستانه و زمستانه تمایز قائل شده است و جداگانه تحلیل شده‌اند. برای باد شمال تابستانه ۷۰ رخداد که در فصل گرم (جون تا آگوست) رخ داده بود موردبررسی قرار گرفت، اما برای باد شمال زمستانه ۲۵ رخداد در فصل سرد (اکتبر تا مه) بررسی شد.



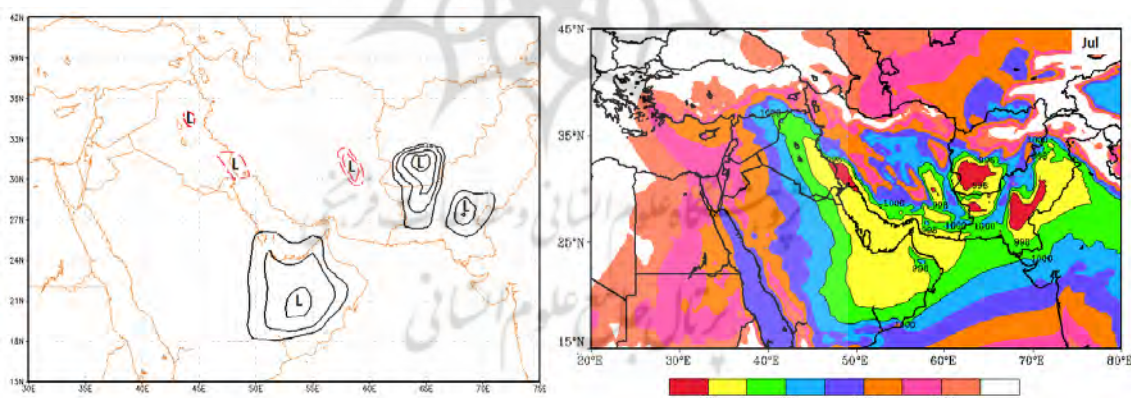
شکل ۳. توزیع فضایی درصد اثرگذاری کانون‌ها بر توفان‌های گردوغبار غرب ایران در سال‌های ۱۹۸۷ تا ۲۰۲۲

باد شمال تابستانه

توفان گردوغبار ناشی از باد شمال در عراق، کویت، قسمت غربی دشت خوزستان در جنوب غرب ایران و برخی قسمت‌های شبه‌جزیره عربستان رخ می‌دهد. این باد تقریباً در طول روزهای ماه‌های جون تا آگوست در تابستان می‌وزد. باد شمال تابستانه در مرکز و جنوب عراق می‌وزد و گردوغبار را از حوضه آبریز رودخانه‌های دجله و فرات با خود حمل می‌کند. شکل همدیدی که پتانسیل ایجاد باد شمال را در این منطقه به وجود می‌آورد همگرایی بین پشته جنب حاره‌ای که از دریای مدیترانه به سمت شمال شبه‌جزیره عربستان و عراق گسترش می‌یابد و ناوه موسمی روی جنوب عراق و جنوب شبه‌جزیره عربستان است.

بیش از نیمی از رخدادهای باد شمال تابستانه در سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۵، ۲۰۰۸، ۲۰۰۹، ۲۰۱۰ و ۲۰۱۲ اتفاق افتاده است. ماه جولای ۲۰۰۹ با ثبت ۳ توفان ۳، ۴ و ۷ روزه که به ترتیب ۱۱، ۱۳ و ۲۳ ایستگاه را با این پدیده مواجه کرده است یکی از بارزترین موارد مشاهده شده است. در کمتر از ۱۵ درصد از موارد (۸ مورد)، سرعت باد بیش از ۱۵ متر بر ثانیه در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال (تندباد قشری) مشاهده شده است. در حدود ۶۵ درصد از موارد رخداد باد شمال که عموماً موارد جبهه‌دار را هم شامل می‌شود، زبانه کم‌فشار یا حتی هسته کم‌فشار با میزان فشار کمتر از ۱۰۰۰ هکتوپاسکال در نواحی مرکزی عراق تا نواحی شمال غربی آن شکل گرفته است.

بررسی متوسط فشار سطح دریا نشان می‌دهد که در ماه جولای هسته‌های کم‌فشار با فشار بین ۹۹۴ تا ۹۹۶ هکتوپاسکال در پاکستان، جنوب غرب افغانستان، جنوب شرق و جنوب غرب ایران در جلگه خوزستان ایجاد شده است (شکل ۴-الف). در ماه‌های جون و آگوست نیز الگوی فوق با میزان فشار مرکزی کمتر در هسته‌های کم‌فشار در منطقه و نیز گستره محدودتر قابل مشاهده است (نشان داده نشده است). از طرف دیگر، نقش هسته‌های کم‌فشار روی شرق ایران (استان کرمان و کویر لوت)، جنوب غرب ایران (استان خوزستان) و حوالی دریاچه ثرثار در کشور عراق قابل توجه است (شکل ۴-ب).



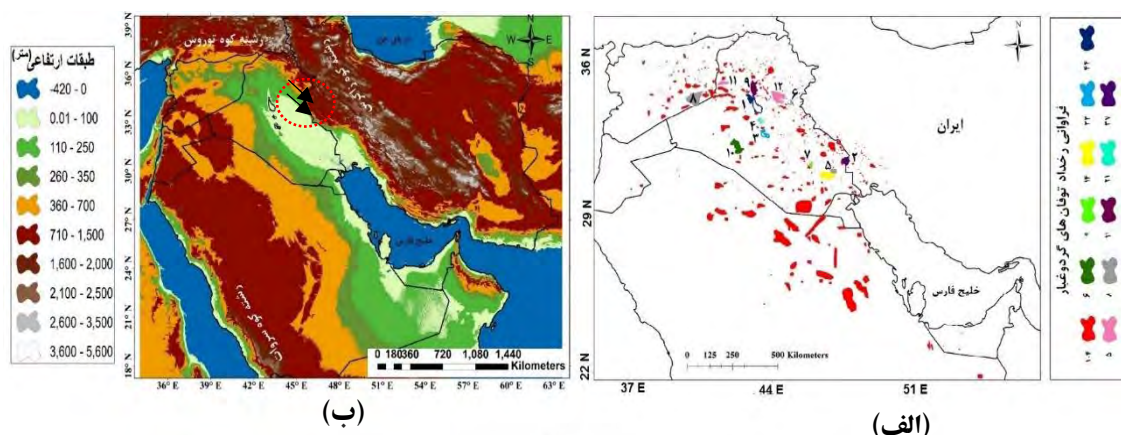
(ب)

(الف)

شکل ۴. الف) متوسط فشار سطح دریا در ماه جولای برای دوره زمانی ۱۹۸۷ تا ۲۰۲۲؛ ب) توزیع فضایی مراکز کم‌فشار مؤثر در توفان‌های گردوغبار در غرب آسیا. خطوط منحنی ممتد مشکی مراکز کم‌فشار با فراوانی بیشتر و خطوط منحنی قرمز نشانگر مراکز کم‌فشاری است که با گسترش زبانه سایر مراکز کم‌فشار شکل گرفته است. این شکل یک طرحواره است که در راستای نمایان ساختن وضعیت مراکز کم‌فشار موجود در زمان رخداد توفان‌های گردوغبار ترسیم شده است.

در توفان‌های رخ داده ناشی از وزش باد شمال تابستانه در منطقه، بیشترین میزان خیزش گردوغبار از کانون‌های گردوغبار نیمه شمالی کشور عراق بوده است. به عبارتی نقش کانون‌های اطراف دریاچه ثرثار، استان نینوا و استان کرکوک قابل توجه است. اثرگذاری کانون‌های نیمه جنوبی کشور عراق محدود به حوالی تالاب حمار غربی در استان ذی‌قار و نیز تالاب

هورالعظیم است. در سوریه نیز کانون‌های شرق این کشور اثرگذارتر بوده است (شکل ۵-الف). با توجه به اهمیت ایجاد الگوی متوسط فشاری در ماه‌های گرم در منطقه و اثرگذاری غیرقابل‌انکار این الگو بر وزش باد شمال تابستانه و تأثیر مستقیم و قابل‌توجه باد شمال در توفان‌های گردوغبار غرب آسیا، به‌منظور تحلیل بهتر این الگو و شناخت بهتر منطقه، نقشه توپوگرافی منطقه در شکل ۵-ب نشان داده شده است.



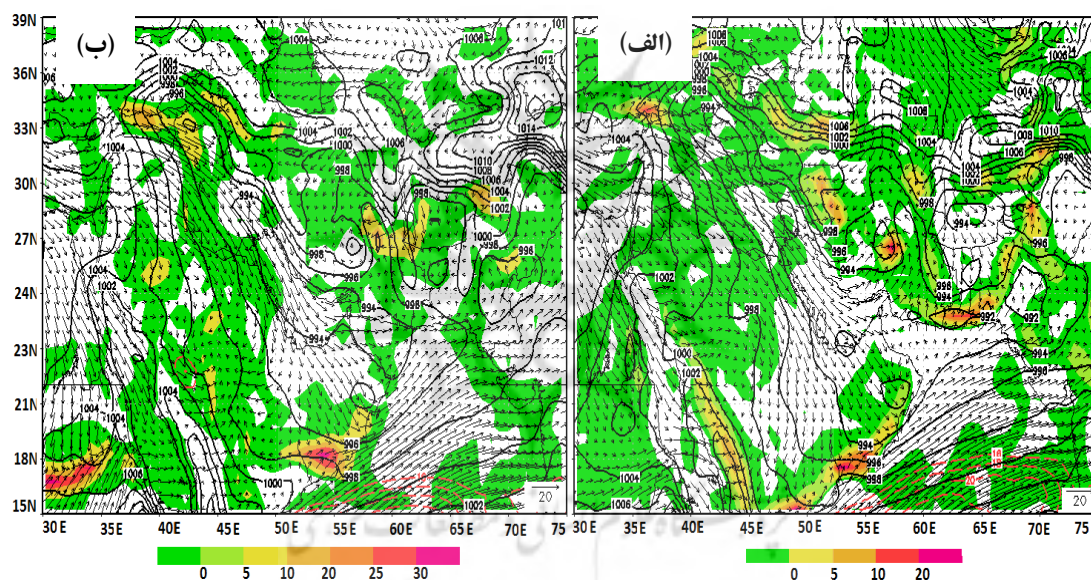
شکل ۵. الف) کانون‌های گردوغبار غرب آسیا در دوره زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶. از ۵۳۶ کانون شناسایی شده، نقش ۱۲ کانون بیشتر بوده است. کانون‌هایی که در بیش از ۵ توفان گردوغبار نقش داشته‌اند با شماره به ترتیب فراوانی نقش مشخص شده است (بیرانوند، ب، ۱۴۰۰: ۵۵) نقشه توپوگرافی منطقه غرب آسیا. این نقشه بر اساس لایه رقومی ارتفاعی SRTM (تفکیک مکانی ۳۰ متر) ترسیم شده است. بیضی ترسیمی با خط چین قرمز در نقشه موقعیتی را نشان می‌دهد که در بیشتر موارد باد شمال (پیکان‌های مشکی رنگ) یا از آنجا آغاز گشته یا بیشترین سرعت را در آنجا داشته است. این موقعیت تقریبی و مطابق بررسی نیمرخ‌های باد در الگوی باد شمال تابستانه می‌باشد.

در غرب عراق در نزدیکی کانون شماره ۱ که در شمال غرب دریاچه ثرثار (شکل ۵-الف) واقع شده است، در وسعت کم اختلاف ارتفاعی حدود ۷۰۰ متر وجود دارد که قادر است بر شدت جریان‌های افقی بیفزاید و می‌تواند یکی از علل وجود بادهای با سرعت بالا در این منطقه باشد. در نیمرخ‌های باد که برای رخداد‌های مختلف ترسیم شده و در ادامه برخی از آن‌ها ارائه شده است (شکل ۹)، بادهای با سرعت بالا در این محدوده قابل‌توجه است.

در ادامه توفان مربوط به ۱ تا ۷ جولای سال ۲۰۰۹ که ۲۳ ایستگاه در کشور در ۵ جولای با این پدیده مواجه شده‌اند مورد بررسی قرار گرفته است. علت انتخاب این توفان، گستره قابل‌توجه و شدت بالای این رخداد بوده است. در توفان فوق ۱۶ استان کشور حتی استان‌های تهران، اصفهان و فارس تحت تأثیر قرار گرفتند. این رخداد ۷ روز به طول انجامید که اوج بروز آن در کشور مربوط به روزهای ۴، ۵ و ۶ ام این توفان بوده است.

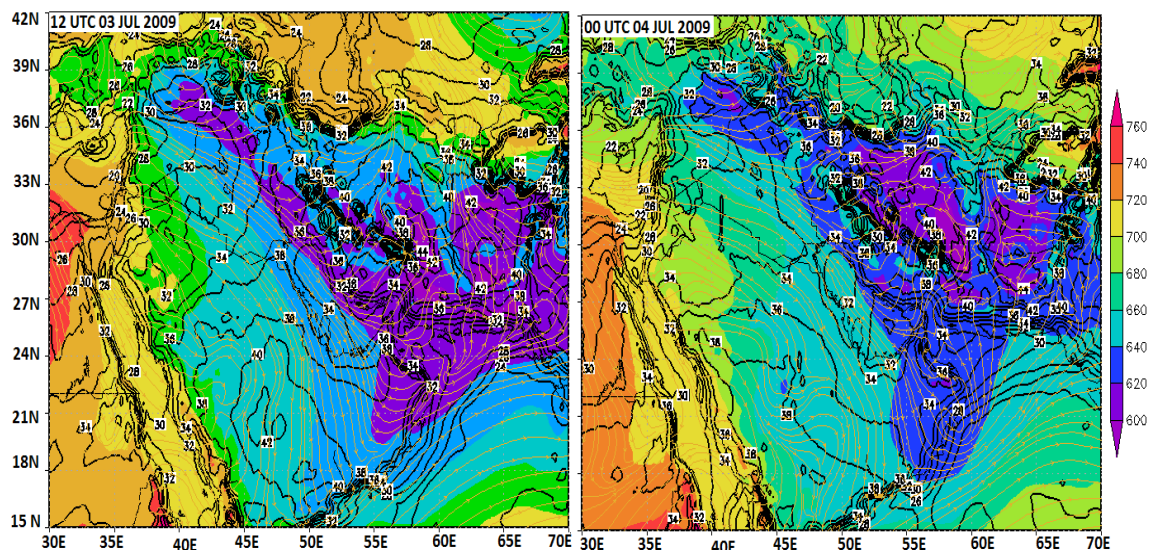


شکل ۶. تصویر ماهواره‌ای رنگی واقعی (الف) روز سوم جولای ۲۰۰۹ (ب) روز چهارم جولای ۲۰۰۹



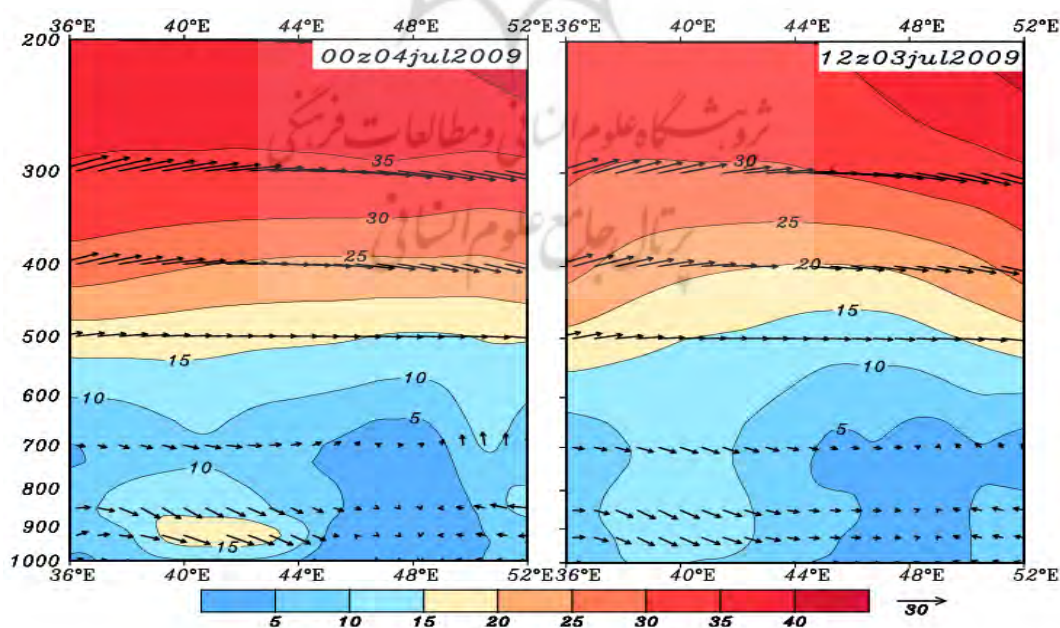
شکل ۷. وضعیت همدیدی در سطح زمین. تابع جبهه‌زایی (پس‌زمینه رنگی)، فشار سطح دریا (پربندها، هکتوپاسکال) و بردار باد (متر بر ثانیه). (الف) ساعت ۱۲ زولو روز ۰۳ جولای ۲۰۰۹. (ب) ساعت ۰۰ زولو روز ۰۴ جولای ۲۰۰۹.

در ساعت ۱۲ روز ۰۳ جولای سال ۲۰۰۹، زبانه کم‌فشاری با فشار مرکزی ۹۹۴ هکتوپاسکال تا شمال عراق گسترش یافته است و باد شمال با سرعت بیشینه در نواحی مرکزی این کشور مشاهده می‌شود. در ۱۲ ساعت بعد در ابتدای روز چهارم جولای، با ایجاد منطقه جبهه‌زایی در شمال غرب عراق و بسته شدن مرکز فشار ۹۹۴ هکتوپاسکالی در آن منطقه و افزایش سرعت باد، شرایط تشدید توفان گردوغبار در منطقه مهیا شده است.

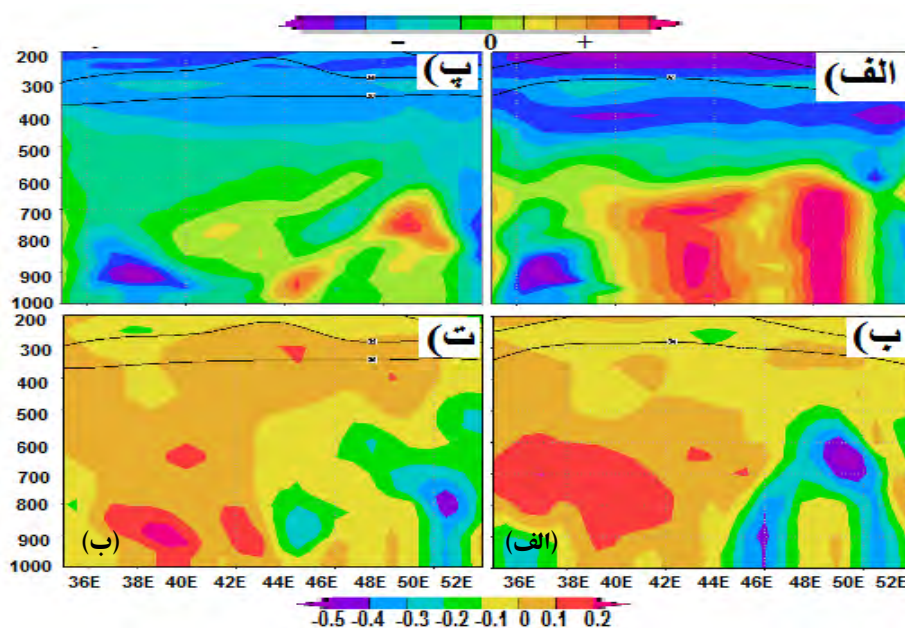


شکل ۸. وضعیت همدیدی در تراز ۹۲۵ هکتوپاسکال. ارتفاع ژئوپتانسیل (زمینه رنگی، متر)، دما (پریندهای ممتد، درجه سانتی گراد) و خطوط جریان

در ساعت ۰۰ روز چهارم، یک فرارفت سرد در پشت جبهه سرد اتفاق افتاده است. فرارفت رخ داده موجب ایجاد یک کم ارتفاع بریده در ترازهای ۹۲۵ و ۸۵۰ هکتوپاسکال و ناوهای نسبتاً عمیق در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال شده است که در ایجاد آشفته گی هوا، خیزش و انتقال گردوغبار در منطقه اثرگذار بوده اند (شکل ۸). در این ساعت در حوالی تراز ۹۰۰ هکتوپاسکال یک هسته بیشینه سرعت با سرعتی بین ۱۵ تا ۲۰ متر در محدوده طول های جغرافیایی ۳۹ تا ۴۱ شرقی شکل گرفته است. این الگو به خوبی مفهوم تندباد قشری در این سطح را نشان می دهد (شکل ۹). در روز چهارم جولای ۲۰۰۹ محدوده تاوایی صفر به صورت اریب با جهت شمال غرب-جنوب شرق از طول ۳۷ درجه در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال به سمت ۴۲ درجه شرقی در سطح زمین کشیده شده است، به عبارتی گستره افقی بیشتری را درگیر نموده است (شکل ۱۰).



شکل ۹. نیمرخ بردار و سرعت باد در سطوح مختلف جو در عرض ۳۵ درجه شمالی.

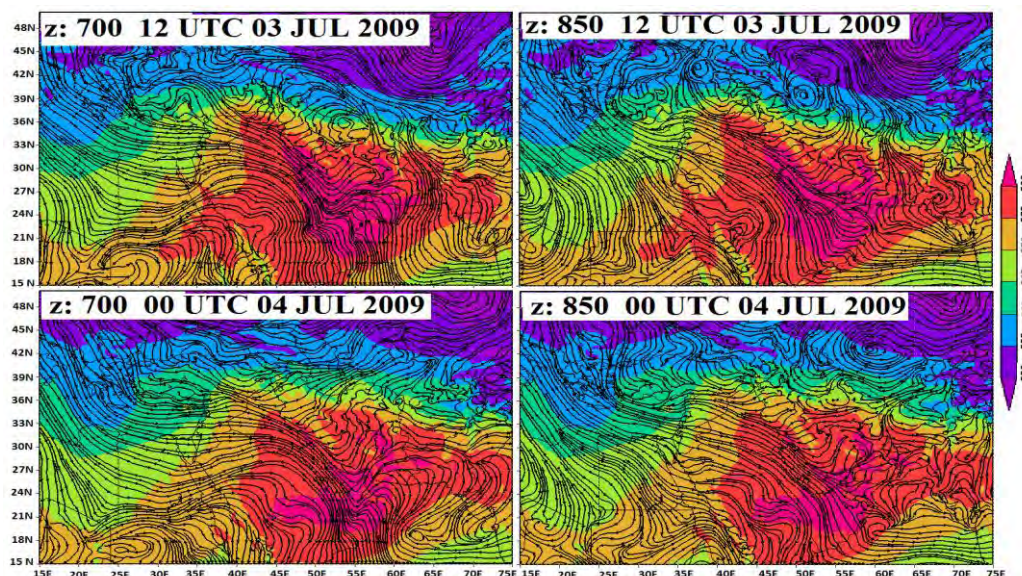


شکل ۱۰. وضعیت همدیدی در الف و ب) ساعت ۱۲ روز ۳ جولای ۲۰۰۹ و پ و ت) ساعت ۰۰ روز ۴ جولای. الف و پ: تلاوایی نسبی ($10^{-5} s^{-1}$)، ب و ت: نمایه قائم امگا (پاسکال بر ثانیه)، در تمام پل‌ها جریان جتی (متر بر ثانیه) به صورت خطوط ممتد رسم شده است. برش مربوط به مقطع عرض جغرافیایی ۳۵ درجه شمالی است. محور عمودی ترازهای جو و محور افقی طول جغرافیایی را نشان می‌دهد.

در روز سوم جولای ۲۰۰۹ گسترش زبانه کم فشار موسمی تا شمال عراق و رخداد بیشینه دما (شکل ۱۱) سبب ایجاد منطقه‌ای با ضخامت بالا بین ترازهای ۱۰۰۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال شده است. خطوط جریان در ترازهای ۷۰۰ و ۸۵۰ هکتوپاسکال نیز همانند ترازهای پایین تر رخداد جریان باد شمال را نشان می‌دهد جریان چرخندی در شمال عراق و ترکیه و جریان و اچرخندی در شبه جزیره عربستان و شمال آفریقا سبب شارش شدید هوا روی عراق شده است. بررسی سرعت باد در منطقه نشان از وقوع بیشینه سرعت باد در شمال شرق عربستان دارد (نشان داده نشده است). به نظر می‌رسد رخداد بیشینه دما در بیابان ربع الخالی و کانالیزه شدن جریان باد شمال در مناطق پست مابین ارتفاعات رشته کوه زاگرس در ایران و سراوات در عربستان سبب سرازیر شدن جریان از مناطق شمالی عراق به مناطق جنوب خلیج فارس شده است.

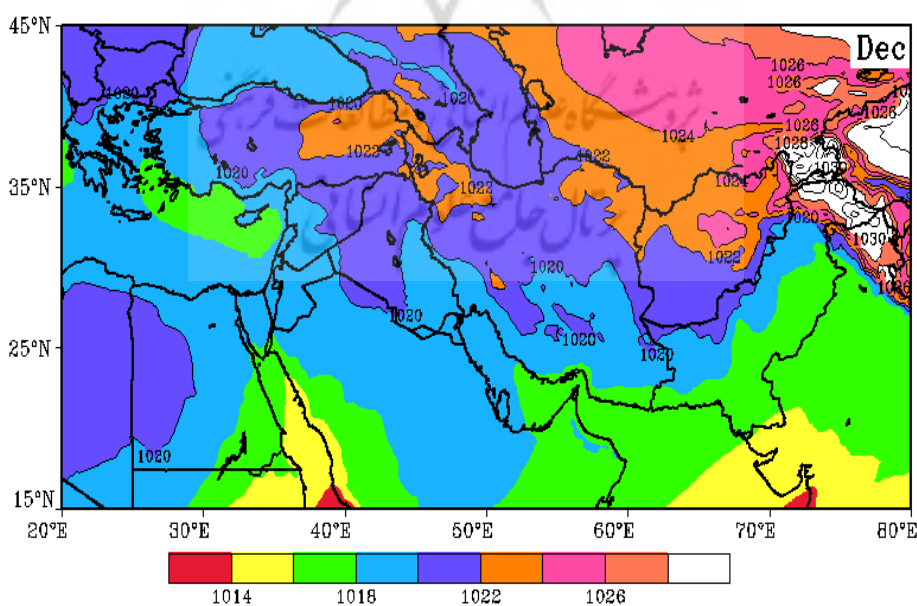
باد شمال زمستانه

سازوکار تعداد زیادی از توفان‌های گردوغبار شمال زمستانه از نظر رخداد شبیه به جبهه سرد است. تعداد کمی از این توفان‌ها که با سامانه‌های جبهه‌ای همراهی نمی‌کنند به علت قیف شدگی توده‌های هوای خیلی سرد از ترکیه و سوریه به سمت جنوب دره دجله و فرات در عراق و روی خلیج فارس ایجاد می‌شوند. در این سامانه‌ها توده‌های هوا آن چنان سرد هستند که نزول و فرونشینی نمی‌تواند موجب گرمایش بی‌درروی آن‌ها در محیط اطرافشان شود. بادهای ریزشی موجب یک ناپیوستگی حرارتی و همچنین زبانه باریکی از سرما، خشکی و بادهای جستی می‌شوند.



شکل ۱۱. نقشه ضخامت جو (زمینه رنگی-۱۰۰۰ تا ۵۰۰ هکتوپاسکال) و خطوط جریان ترازهای ۷۰۰ و ۸۵۰ هکتوپاسکال برای روزهای سوم و چهارم جولای ۲۰۰۹.

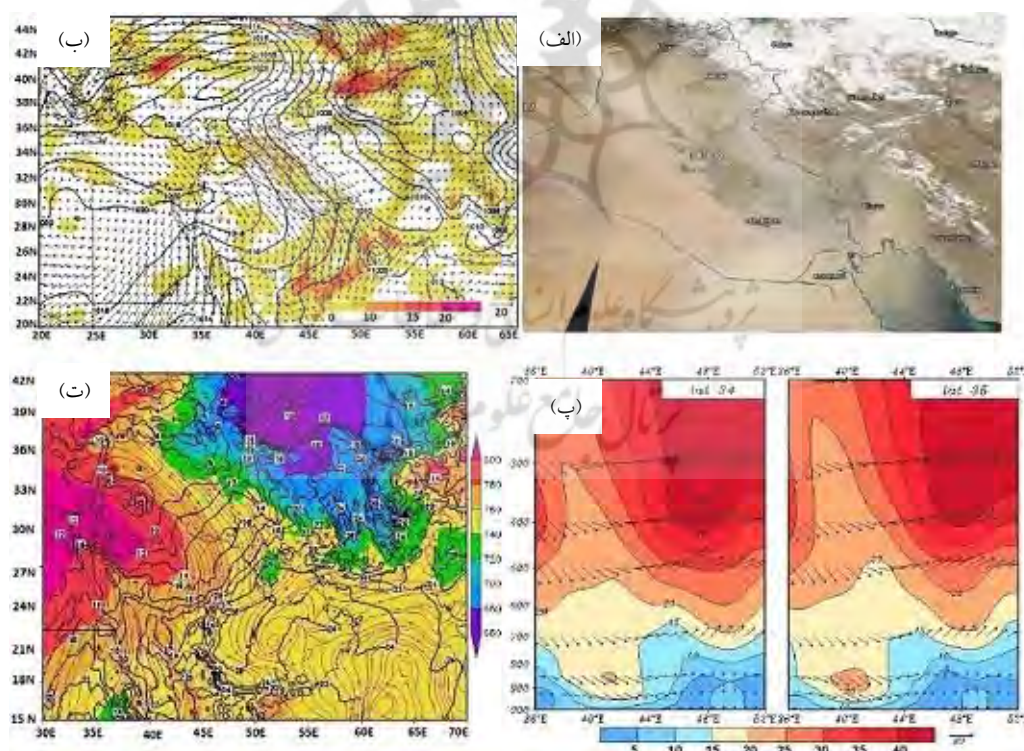
هوای چگال‌تر به سمت سرازیری جریان می‌یابد و هر چیزی که در مسیرش باشد را تحت تأثیر قرار می‌دهد. از طرفی همانند یک جریان پسگرد، هوای گرم‌تر مجبور به صعود می‌شود و گردو خاک را به بالا منتقل می‌کند (میهن‌پرست، ۱۳۸۸). این نوع از باد شمال تا وقتی که درون شارش جرمی (هوای سرد) متوقف شود ادامه می‌یابد. شروع (هجوم) باد شمال هر ساعتی ممکن است اتفاق افتد. این رخداد وابسته به جبهه‌های سرد یا انتقال ناوه کم‌فشارهای عرض میانی به شمال منطقه خلیج فارس است. مطابق شکل ۱۲، مرکز (یا مراکز) از پرفشار سبیری روی ترکیه در ماه دسامبر شکل گرفته است. در ماه ژانویه و فوریه نیز الگویی مشابه با شدت و گستره محدودتر در منطقه حاکم است، شکل نشان داده نشده است.



شکل ۱۲. متوسط فشار سطح دریا در ماه دسامبر برای دوره زمانی ۱۹۸۷ تا ۲۰۲۲.

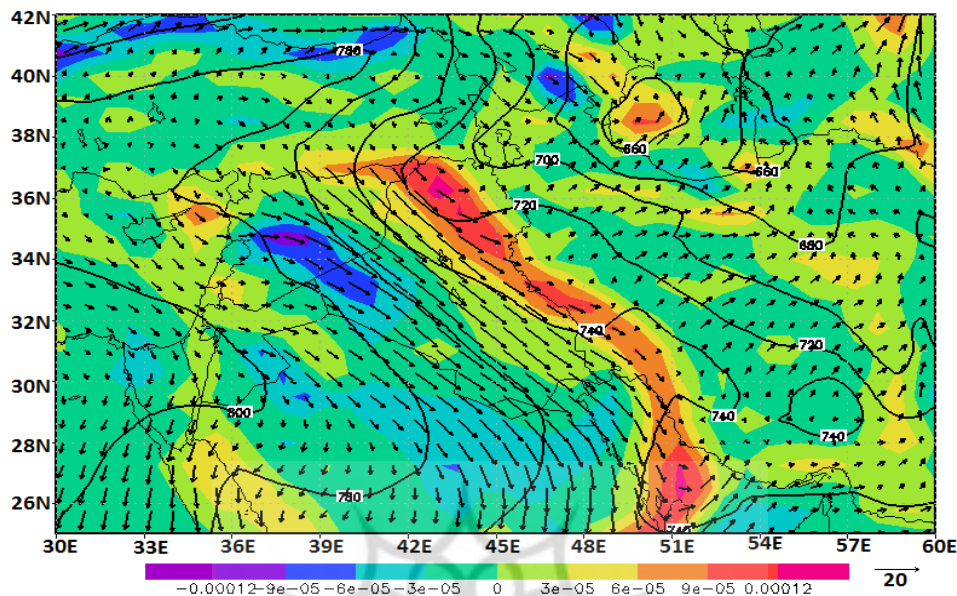
در بیش از ۷۰ درصد موارد رخداد باد شمال ناشی از پرفشار سیبری بوده است که در ترکیه شکل گرفته است. شکل‌گیری این پرفشار و ایجاد شیو فشاری در منطقه وزش باد شمال را سبب شده است. در مواردی هم گسترش زبانه پرفشاری که روی اقیانوس اطلس-دریای مدیترانه یا اروپا شکل گرفته سبب شده است در غرب تا مرکز ترکیه پرفشار دیده شود و عامل ایجاد باد شمال زمستانه بوده است. رخدادهای ناشی از باد شمال زمستانه در سال‌های ۲۰۰۸، ۲۰۱۱ و ۲۰۱۲ بیشترین فراوانی را داشته است.

در توفان‌های ناشی از وزش باد شمال در فصول سرد نقش دریاچه‌های مرکزی عراق در خیزش گردوغبار کمتر شده و تقریباً در ۱۵ درصد موارد کانون خیزش گردوغبار بوده‌اند. در این نوع توفان‌ها، نقش کانون‌های واقع در شرق و جنوب شرق عراق، شمال عربستان، کویت و جنوب غرب ایران نسبت به توفان‌های ناشی از باد شمال تابستانه بیشتر شده است. همچنین در این توفان‌ها، شدت، گستره و طول دوره توفان‌ها نسبت به توفان‌های ناشی از باد شمال تابستانه کمتر شده است (شکل ۵-الف). توفان ۴ مارس ۲۰۰۸ به‌عنوان نمونه‌ای از توفان‌های ناشی از باد شمال در فصول سرد در ادامه مورد بررسی قرار گرفته است. شکل ۱۳-الف تصویر ماهواره‌ای رنگی واقعی در روز ۴ مارس ۲۰۰۸ است. بررسی وضعیت همدیدی (شکل ۱۳-ب) در ساعت ۰۰ روز ۴ مارس ۲۰۰۸ وجود یک مرکز پرفشار روی ترکیه و یک مرکز کم‌فشار روی خلیج فارس را نشان می‌دهد. جریان باد ایجادشده بین دو مرکز فشاری فوق وزش بادی را در پی داشته است که در بخش‌هایی از شرق سوریه و غرب عراق سرعت آن به نزدیک ۲۰ متر بر ثانیه در ترازهای ۹۲۵ و ۸۵۰ هکتوپاسکال رسیده است. مطابق شکل ۱۳-پ، قطع شدن خطوط هم‌دما توسط پرندهای هم‌ارتفاع تراز ۹۲۵ هکتوپاسکال در ساعت ۰۰ نشان از جوی کژفشار در منطقه دارد که سبب شده است بردار باد با زاویه‌ای شدید خطوط هم‌دما را قطع نماید.



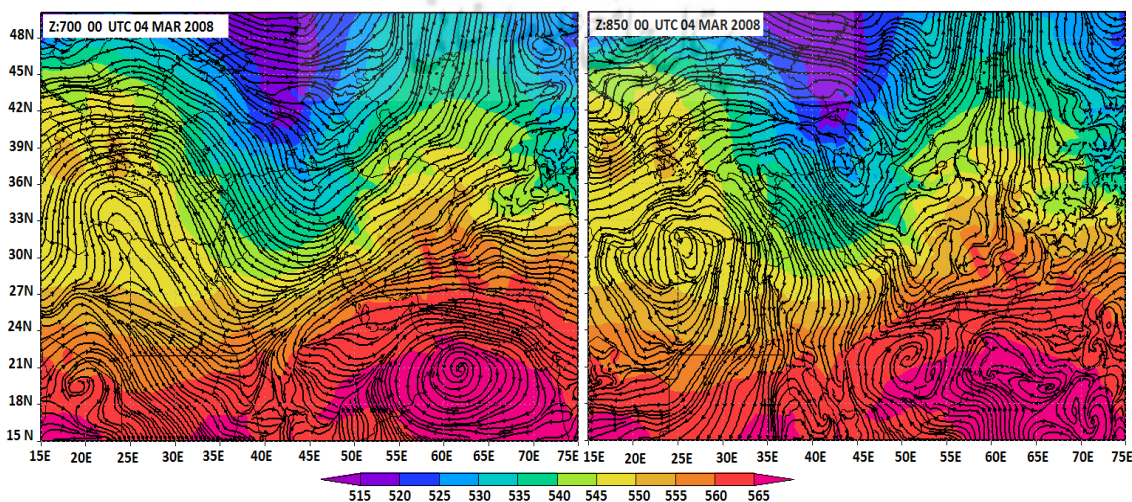
شکل ۱۳. وضعیت جوی در روز ۴ مارس ۲۰۰۸. (الف) تصویر ماهواره‌ای رنگی واقعی. (ب) وضعیت همدیدی در سطح زمین. تابع جبهه‌زایی (پس‌زمینه رنگی)، فشار سطح دریا (پرندهای ممتد، هکتوپاسکال)، جت تراز زیرین در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال (پرندهای خطچین قرمز) و بردار باد (متر بر ثانیه)؛ (پ) وضعیت همدیدی در تراز ۹۲۵ هکتوپاسکال. ارتفاع ژئوپتانسیل (زمینه رنگی، متر)، دما (پرندهای ممتد، درجه سانتی‌گراد) و خطوط جریان؛ (ت) نیمرخ بردار و سرعت باد در سطوح مختلف جو.

وجود تندبادهای قشری در محدوده با توجه به وضعیت جوی منطقه در ساعت ۰۰ روز ۴ مارس ۲۰۰۸ امکان خیزش گردوغبار از منطقه را فراهم آورده است (شکل ۱۳-ت). مطابق شکل ۱۴، منطقه تاوایی صفر منطبق بر بیشینه سرعت وزش باد و نیز منطقه خیزش گردوغبار می‌باشد.

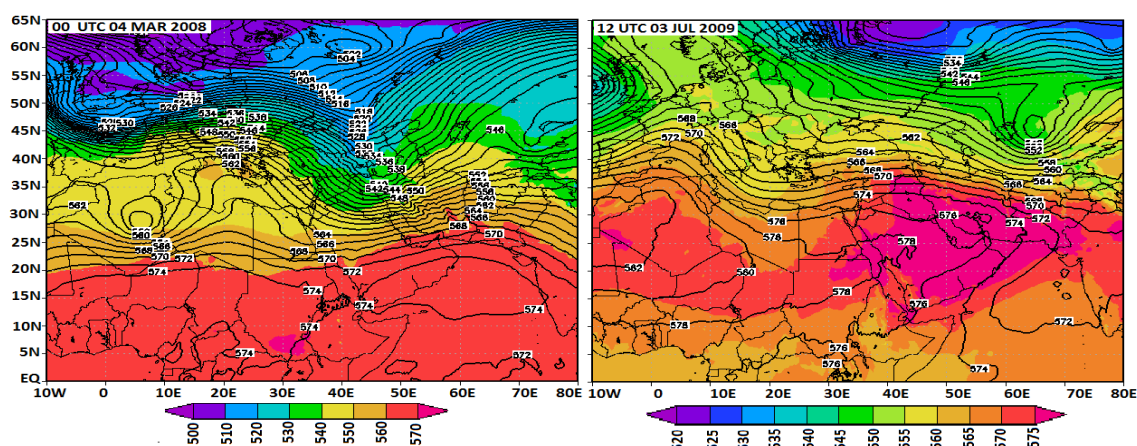


شکل ۱۴. وضعیت همدیدی در تراز ۹۲۵ هکتوپاسکال در ساعت ۰۰ روز ۴ مارس ۲۰۰۸. تاوایی نسبی ($10^{-5} s^{-1}$)، (پس‌زمینه رنگی)، ارتفاع ژئوپتانسیل (پریندها، متر) و بردار باد (متر بر ثانیه)

در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال خطوط جریان منطبق بر ناوه عمیق شده روی شمال عراق، ریزش هوای سرد عرض‌های شمالی به این منطقه را نشان می‌دهد (شکل ۱۵). بیشینه ضخامت جو در این روز روی دریای عرب مشاهده می‌شود، جایی که پرفشار عظیم جنب حاره در سطوح میانی و بالایی جو این منطقه قرار گرفته است. نفوذ هوای سرد عرض‌های شمالی تا دریای سیاه و شمال عراق سبب شکل‌گیری منطقه‌ای با ضخامت بسیار کم در این مناطق شده است، درحالی‌که در دریای عرب و شمال آفریقا بیشینه ضخامت دیده می‌شود.



شکل ۱۵. نقشه ضخامت جو (زمینه رنگی -۱۰۰۰ تا ۵۰۰ هکتوپاسکال) و خطوط جریان ترازهای ۷۰۰ و ۸۵۰ هکتوپاسکال.



شکل ۱۶. نقشه ضخامت جو (زمینه رنگی -۱۰۰۰ تا ۵۰۰ هکتوپاسکال) و ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال (پررنگ‌های ممتد، دکامتر).

بررسی ناهموازی تراز میانی جو در دو رخداد باد شمال تابستانه و زمستانه (شکل ۱۶) نشان می‌دهد که در روز سوم جولای ۲۰۰۹ که باد شمال تابستانه منجر به شکل‌گیری رخداد گردوغبار شده است پشته پرفشار جنب حاره بر منطقه سیطره داشته است. در روز چهارم مارس ۲۰۰۸ که باد شمال زمستانه فعالیت گردوغبار را تحت تأثیر قرار داده است، عمق یافتن ناوه عرض‌های شمالی به‌عنوان عاملی تقویت‌کننده برای وزش شدید باد شمال دخالت داشته است.

بحث

وجود روند افزایشی معنی‌دار فراوانی وقوع پدیده‌های گردوغبار در ایران در دهه‌های اخیر در مطالعات مختلف موردتوجه قرار گرفته است (برای مثال، رسولی و همکاران، ۱۳۹۰؛ طاووسی و همکاران، ۱۳۹۲؛ رئیس‌پور و همکاران، ۱۳۹۳؛ Alizadeh-Choobari et al., 2016). از این‌رو شناخت عوامل تأثیرگذار بر چرخه گردوغبار از انتشار و انتقال گرفته تا فرونشست اهمیت مضاعف می‌یابد. در این مطالعه نقش یکی از مهم‌ترین الگوها حاصل شارش هوا به سمت کم‌فشار سطحی معروف به باد شمال در رخداد گردوغبارهای غرب ایران موردبررسی قرار گرفته است.

در بررسی وضعیت توزیع افقی فشار سطح دریا در توفان‌های گردوغبار ناشی از الگوی باد شمال تابستانه در نزدیک به ۹۰ درصد موارد نقش سامانه دوقطبی کم‌فشار پاکستان - افغانستان و در حدود ۵۰ درصد (در کنار هسته‌های دیگر) نقش سامانه کم‌فشاری که روی کشورهای عمان و امارات متحده عربی قرار گرفته است، مشهود بود. راشکی و همکاران (Rashki et al., 2019) نیز به اهمیت وجود سامانه کم‌فشار حرارتی هند-پاکستان که در جنوب ایران، شمال دریای عرب و نیز شبه‌جزیره عربستان با ایجاد هسته ثانویه توسعه‌یافته اشاره نموده‌اند. آنچه از بررسی فعالیت سامانه دوقطبی کم‌فشار پاکستان - افغانستان در رخداد توفان‌های گردوغبار به دست آمد نشان داد که فشار این سامانه در ۳۵/۷ درصد در هر دو مرکز کم‌فشار برابر، در ۳۷/۵ درصد در هسته فعال در جنوب غرب افغانستان فشار کمتر و در ۲۶/۸ درصد موارد در هسته فعال روی دره سند پاکستان فشار کمتر بوده است. مطالعه خسروی و همکاران (۱۳۹۵) روی کم‌فشار پاکستان مؤید روند افزایشی فشار این هسته (هسته اولیه) و تضعیف تدریجی آن در سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۵ است. آن‌ها همچنین دو هسته‌ای بودن این کم‌فشار را بیان داشته‌اند. در این مطالعه نتایج نشان داد که گرچه با اختلاف کم، اما هسته ثانویه این کم‌فشار روی افغانستان در زمان رخدادهای گردوغبار تأثیرگذارتر بوده است.

فراوانی رخداد مخاطرات طبیعی نظیر خشک‌سالی‌ها و امواج گرمایی به دلیل افزایش دمای هوا، می‌تواند در آینده افزایش یابد (Meehl & Tebaldi, 2004). روندیابی پارامترهای اقلیمی ماه‌های سرد خاورمیانه در شش دهه اخیر توسط مرادی

(۱۴۰۳) حاکی از روند افزایشی دما و افزایش ارتفاع ترازهای مختلف فشاری و روند کاهشی نم ویژه در ترازهای زیرین می‌باشد. مطابق یافته‌های ایشان افزایش دمای پیش‌آمده سبب افزایش حرکات بالاسو و افزایش فراوانی پدیده‌های همرفتی خرد و متوسط مقیاس می‌شود. شرایطی که به نظر می‌رسد قادر خواهد بود رخدادهای گردوغباری در منطقه را تشدید نماید. کاهش سطح آب دریاچه‌های مرکزی عراق یکی از مهم‌ترین دلایل تشدید رخدادهای گردوغباری در سال‌های اخیر برشمرده می‌شود (اسدی و همکاران، ۱۴۰۳؛ Beyranvand et al., 2023). در توفان‌های رخ داده ناشی از وزش باد شمال تابستانه در منطقه، بیشترین میزان خیزش گردوغبار از کانون‌های گردوغبار نیمه شمالی کشور عراق بوده است. به عبارتی، نقش کانون‌های اطراف دریاچه ثرثار، استان نینوا و استان کرکوک قابل توجه است.

نتیجه‌گیری

رخداد گردوغبار در منطقه موضوعی چندجانبه و پیچیده است. اینکه در سال‌های خاص فراوانی رخدادهای با شدت خاص بیشتر شده از دو وجه قابل بررسی و علت‌یابی است: یکی شرایط محیطی کانون‌های گردوغبار و دیگری تغییر در شدت الگوهای همدیدی و نحوه وقوع آن‌ها. وقوع دو خشک‌سالی بزرگ مقیاس در منطقه خاورمیانه (Barlow et al., 2016) در سال‌های ۲۰۰۱-۱۹۹۹ و ۲۰۰۸-۲۰۰۷ و نیز خشک‌سالی‌های محلی که در سری زمانی شاخص‌های VCI و TCI در کانون‌های مختلف گردوغبار در منطقه غرب آسیا در سال‌های ۲۰۰۵، ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۲ و ۲۰۱۵ به صورت خشک‌سالی حدی در ماه‌های متعدد رخ داده است به عنوان عاملی در تسهیل شرایط خیزش گردوغبار می‌باشد که امری بسیار مهم در وقوع توفان‌ها و شدت آن‌ها می‌باشد (بیرانوند، ۱۴۰۰). در زمینه اینکه تا چه میزان تغییر در اقلیم یا الگوهای همدید باعث این توفان‌ها بوده کمتر بررسی صورت گرفته است و خود می‌تواند محور مطالعاتی مختلف در آینده باشد.

در بیش از ۸۰ درصد موارد سرعت باد در عرض‌های جغرافیایی تأثیرگذار در رخدادهای گردوغبار، بیش از ۱۰ متر بر ثانیه بوده است. همراهی رود باد تراز زیرین با رخدادهای گردوغباری که به سبب باد شمال تابستانه رخ می‌دهند مورد تأکید محققان بوده است (Yu et al., 2015؛ Francis et al., 2017؛ Ranjbar Saadat Abadi et al., 2022) که تصدیق بر نتایج این مطالعه می‌باشد.

محدوده زمانی رخداد شمال زمستانه ماه اکتبر تا ماه می است. گرچه منابع موجود ماه‌های وزش شمال زمستانه را بین نوامبر تا مارس ذکر می‌کنند (Pakhirehzan et al., 2018)، اما آنچه در ماه‌های دیگر هم در این دسته بشمار آورده شده است الگویی کاملاً مشابه دارد. در بیش از ۷۰ درصد موارد رخداد باد شمال ناشی از پرفشاری بوده است که در ترکیه شکل گرفته است. رخدادهای ناشی از باد شمال زمستانه در سال‌های ۲۰۰۸، ۲۰۱۱ و ۲۰۱۲ بیشترین فراوانی را داشته است. در این نوع توفان‌ها نقش کانون‌های واقع در شرق و جنوب شرق عراق، شمال عربستان، کویت و جنوب غرب ایران نسبت به توفان‌های ناشی از باد شمال تابستانه بیشتر شده است.

مقایسه توفان گردوغبار رخ داده در فصل تابستان و زمستان ناشی از باد شمال نشان داد که از نظر همدیدی شیب تاوایی در شمال زمستانه شدیدتر از شمال تابستانه بوده است. همچنین سرعت باد در شمال زمستانه بیشتر از شمال تابستانه است. بررسی الگوهای مربوط به سطوح مختلف جو در هنگام رخداد باد شمال تابستانه و زمستانه نشان داد که در شمال تابستانه پرفشار جنب حاره حاکم است و همگرایی میان این پشته با ناوه موسمی به خصوص در تراز ۷۰۰ هکتوپاسکال منجر به وزش باد شمال تابستانه شده است. در باد شمال زمستانه در سطوح بالا عمده‌تاً قرارگیری ناوه عرض‌های بالا با مورفولوژی خاص در منطقه به وقوع توفان گردوغبار کمک کرده است.

حامی مالی

این مقاله حامی مالی نداشته است.

سهم نویسندگان

نویسندگان در تمام مراحل و بخش‌های انجام پژوهش سهم برابر داشتند.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافی در ارتباط با نویسندگی یا انتشار مقاله ندارند.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از تمامی کسانی که در انجام پژوهش حاضر یاری‌رسان بوده‌اند، به‌ویژه کسانی که کار ارزیابی کیفیت مقاله را انجام دادند، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

منابع

- افسری، رسول؛ برهانی، کاظم و جعفری، شاهین. (۱۴۰۳). ارزیابی تغییرات پهنه‌های آبی حوضه دجله و فرات مبتنی بر تحلیل سری زمانی عوامل محیطی مختلف. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۶(۲)، ۱۷-۳۲. <https://doi.org/10.22059/jphgr.2024.370358.1007804>
- بیرانوند، آذر. (۱۴۰۰). نقش تغییر پوشش/کاربری زمین و الگوهای همدیدی بر رفتار کانون‌های گردوغبار در غرب آسیا. رساله دکتری، به راهنمایی قاسم عزیزی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران.
- بیرانوند، آذر؛ عزیزی، قاسم؛ علیزاده، امید و درویشی بلورانی، علی. (۱۳۹۸). تحلیل همدیدی فراگیرترین توفان منطقه‌ای گردوغبار بهاره ایران در دو دهه گذشته. *کنفرانس بین‌المللی گردوغبار در جنوب غرب آسیا*، زابل.
- جاناناتان ای. مارتین. (۱۳۸۸). دینامیک جو در عرض‌های میانه. ترجمه: سید ابوالفضل مسعودیان، تهران: انتشارات سمت.
- خسروی، محمود؛ حمیدیان‌پور، محسن و کردی‌تمین، صالح. (۱۳۹۵). بررسی تغییرات زمانی-مکانی کم‌فشار پاکستان. *پژوهش‌های اقلیم‌شناسی*، ۷(۲۷)، ۴۲-۲۵.
- رسولی، علی‌اکبر؛ ساری صراف، بهروز و محمدی، غلام‌حسن. (۱۳۹۰). تحلیل روند وقوع پدیده اقلیمی گردوغبار در غرب کشور در ۵۵ سال اخیر با به‌کارگیری روش‌های آماری ناپارامتری، *جغرافیای طبیعی*، ۴(۱۱)، ۱۶-۱.
- رئیس‌پور، کوهزاد. (۱۳۹۳). *اقلیم‌شناسی سینوپتیکی، ماهواره‌ای گردوغبارهای غرب و جنوب غرب ایران*. رساله دکتری اقلیم‌شناسی، دانشکده جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، دانشگاه سیستان و بلوچستان.
- طاوسی، تقی و زهرایی اکبر. (۱۳۹۲). مدل‌سازی سری‌های زمانی پدیده گردوغبار شهر اهواز. *تحقیقات جغرافیایی*، ۲۸(۲)، ۱۷۰-۱۵۹.
- مرادی، محمد. (۱۴۰۳). بررسی اثر گرمایش جهانی بر روند گردش‌های و ردسپهری در خاورمیانه در دوره آماری ۲۰۲۰-۱۹۶۱. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۶(۳)، ۱۷-۱. <https://doi.org/10.22059/jphgr.2024.366330.1007791>
- میهن‌پرست، مجتبی. (۱۳۸۸). مطالعه وضعیت آب و هوایی مؤثر در وقوع پدیده گردوغبار مه در ایلام و شبیه‌سازی آن با استفاده از مدل MM5. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، به راهنمایی امیرحسین مشکوتی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران.

References

- Abdi Vishkaee, F., Flamant, C., Cuesta, J., Oolman, L., Flamant, P., & Khalesifard, H. R. (2012). Dust transport over Iraq and northwest Iran associated with winter Shamal: A case study. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117, D03021. <https://doi.org/10.1029/2011JD016339>

- Afsari, R., Borhani, K., & Jafari, S. (2024). Evaluation of the changes in water areas of the Tigris and Euphrates basin based on time series analysis of various environmental factors. *Physical Geography Research*, 56(2), 17-32. <https://doi.org/10.22059/jphgr.2024.370358.1007804> [in persian]
- Ai, N. & Polenske, K. R. (2008). Socioeconomic Impact Analysis of Yellow-dust Storms: An Approach and case Study for Beijing. *Economic Systems Research*, 20, 187-203. <https://doi.org/10.1080/09535310802075364>
- Alizadeh-Choobari, O., Ghafarianb, P., & Owlad, E. (2016). Temporal variation in the frequency and concentration of dust event over Iran based on surface observation. *International Journal of Climatology*, 36, 2050-2062. <https://doi.org/10.1002/joc.4479> i:10.1002/joc.4479
- Awad, A. M., & Mashat, A. W. S. (2013). Synoptic features associated with dust transition processes from North Africa to Asia. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(6), 2451-2467. <https://doi.org/10.1007/s12517-013-0923-4>
- Awad, A., & Mashat, A. W. (2014). The synoptic patterns associated with spring widespread dusty days in central and eastern Saudi Arabia. *Atmosphere*, 5(4), 889-913. <https://doi.org/10.3390/atmos5040889>.
- Barlow M., Zaitchik B., Paz S., Black E., Evans J., Hoell A., (2016). A Review of Drought in the Middle East and Southwest Asia. *Journal of Climate*, 29(23), 8547-8574. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00692.1>
- Barth, H.-J. (2001), Characteristics of the wind regimes north of Jubail, Saudi Arabia, based on high resolution wind data, *J. Arid Environ.*, 47(3), 387–402. <https://doi.org/10.1006/jare.2000.0668>
- Beegum S. N., Gherboudj I., Chaouch N., Temimi M., & Ghedira H., (2018), Simulation and analysis of synoptic scale dust storms over the Arabian Peninsula. *Atmospheric Research*, 199, 62–81. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.09.003>
- Beyranvand A., Azizi Gh., Alizadeh-Choobari O., & Darvishi Boloorani A. (2019). Spatial and temporal variations in the incidence of dust events over Iran. *Nat Hazards*. 97, 229–241. <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03637-w>
- Beyranvand A., Azizi Gh., Alizadeh-Choobari O., & Darvishi Boloorani A. (2019). Synopsis analysis of the most widespread regional dust storm in Iran in the last two decades. *International Conference on Dust in Southwest Asia, Zabul* [in persian]
- Beyranvand, A. (2021). *The impact of land-use/land cover and synoptic patterns changes on the dust Sources in West Asia*. Supervisor: Gh. Azizi, PhD Thesis, Department of Geography, University of Thenran. [in persian]
- Beyranvand, A., Azizi, G., Alizadeh, O., & Darvishi Boloorani A. (2023). Dust in Western Iran: the emergence of new sources in response to shrinking water bodies. *Sci Rep*, 13, 16158. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-42173-3>
- Clements, T., Stone, R. O., Mann, J. F., & Eymann, J. L. (1963). *A study of windborne sand and dust in desert areas* (p. 0077). Headquarters, US Marine Corps.
- Francis, D., Flamant, C., Chaboureaud, J.P., Banks, J., Cuesta, J., Brindley, H., & Oolman, L. (2017). Dust emission and transport over Iraq associated with the summer Shamal winds. *Aeol. Res.*, 24, 15–31. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2016.11.001>
- Ginoux, P., J. M., Prospero, O., & Torres, Chin, M. (2004). Long-term simulation of global dust distribution with the GOCART model: correlation with North Atlantic Oscillation. *Environ. Model. Software*, 19, 113-128. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(03\)00114-2](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(03)00114-2)
- Goudie, A.S., & Middleton, N.J. (2006). *Desert Dust in the Global System*. Springer Berlin Heidelberg New York.
- Hamidi, M., Kavianpour, M. R., & Shao, Y. (2013). Synoptic analysis of dust storms in the Middle East. *Asia-Pacific Journal of atmospheric sciences*, 49, 279-286. <https://doi.org/10.1007/s13143-013-0027-9>
- Hamidi, M., Kavianpour, M. R., & Shao, Y. (2017). A quantitative evaluation of the 3–8 July 2009 Shamal dust storm. *Aeolian research*, 24, 133-143. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2016.12.004>
- Jin, Q., Wei, J., Pu, B., Yang, Z. L., Parajuli, S. P. (2018). High summertime aerosol loadings over the Arabian Sea and their transport pathways. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(18), 10-568. <https://doi.org/10.1029/2018JD028588>

- Karami, S., Kaskaoutis, D. G., Kashani, S. S., Rahnema, M., & Rashki, A. (2021). Evaluation of nine operational models in forecasting different types of synoptic dust events in the Middle East. *Geosciences*, 11(11), 458. <https://doi.org/10.3390/geosciences11110458>
- Kaskaoutis, D. G., Singh, R. P., Gautam, R., Sharma, M., Kosmopoulos, P. G., & Tripathi, S. N. (2012). Variability and trends of aerosol properties over Kanpur, northern India using AERONET data (2001–10). *Environmental Research Letters*, 7(2), 024003. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/2/024003>
- Khosravi, M., Hamidianpour, M., & Kordi Tamin, S. (2016). A Study of Tempo Spatial Variation of Pakistan Low Pressure. *Journal of Climate Research*, 7(27), 25-42. [in persian]
- Klingmüller K., Pozzer A., Metzger S., Stenchikov G. L., & Lelieveld J. (2016). Aerosol optical depth trend over the Middle East. *Atmos. Chem. Phys.*, 16. <https://doi.org/10.5194/acp-16-5063-2016>
- Martin J.E., (2009). Translation: S.A. Masoodian, *Mid-Latitude Atmospheric Dynamics*, Samt Publications, first edition [in persian]
- Mashat, A-W.S, Alamoudi, A. O., Awad, A. M., Assiri ME. (2017). Synoptic characteristics of dusty spring days over central and eastern Saudi Arabia, *Air Qual. Atmos. Health*. doi: <https://doi.org/10.1007/s11869-016-0420-5>
- Meehl, G.A., & Tebaldi, C. (2004). More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century. *Science*, 305, 994–997. <https://doi.org/10.1126/science.1098704>.
- Membery, D. A. (1983). Low level wind profiles during the Gulf Shamal. *Weather*, 38(1), 18-24.
- Middleton, N. (1986). A geography of dust storms in Southwest Asia, *J. Climatol.*, 6, 183–196.
- Mihanparast, M. (2009). *the study of the weather conditions affecting the phenomenon of dust fog in Ilam and its simulation using the MM5 model*. master's thesis, under the guidance of Amirhossein Meshkouti, Tehran: Islamic Azad University, Faculty of Sciences and Research in Tehran [in persian]
- Mofidi, A., & Zarrin, A. (2022). On the existence of summer Shamal wind induced by the Zagros Mountains in the Middle East. *Geophysical Research Letters*, 49(18), e2022GL100151. <https://doi.org/10.1029/2022GL100151>
- Mohammadpour, K., Sciortino, M., Saligheh, M., Raziei, T., & Darvishi Boloorani, A. (2021). Spatiotemporal regionalization of atmospheric dust based on multivariate analysis of MACC model over Iran. *Atmospheric Research*, 249, 105322. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105322>
- Moradi, M. (2024). Investigation the Role of Global Warming on the Tropospheric Circulation in the Middle East from 1961 to 2020. *Physical Geography Research*, 56(3), 1-17. <https://doi.org/10.22059/jphgr.2024.366330.1007791> [in persian]
- Najafi M.S., Sarraf B.S., Zarrin A., Rasouli A.A., (2017), *Environ Monit Assess*, 189: 473 <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6196-8>.
- Notaro, M., Alkolibi F., Fadda E., and Bakhrijy F. (2013). Trajectory analysis of Saudi Arabia dust storms, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118, 6028–6043. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50346>
- Pakhirehzan, M., Rahbani, M., Malakooti, H. (2018). Numerical Study of Winter Shamal Wind Forcing on the Surface Current and Wave Field in Bushehr's Offshore Using MIKE21. *International Journal of Coastal, Offshore and Environmental Engineering*, 3(2), 57-65. <https://doi.org/10.29252/ijcoe.2.2.57>
- Perrone, T. (1979). Winter Shamal in the Persian Gulf, Technical report 79–06. Tech. Rep., *Naval Environmental Prediction Research Facility*, Monterey, Calif.
- Raispour, K. (2014), synoptic, satellite climatology of dust storms in the west and southwest of Iran, doctoral dissertation in climatology, University of Sistan and Baluchistan [in persian]
- Ranjbar Saadat Abadi, A., Hamzeh, N. H., Chel Gee Ooi, M., Kong, S. S. K., & Opp, C. (2022). Investigation of Two Severe Shamal Dust Storms and the Highest Dust Frequencies in the South and Southwest of Iran. *Atmosphere*, 13(12), 1990. <https://doi.org/10.3390/atmos13121990>
- Rao, P. G., Al- Sulaiti, M., & Al- Mulla, A. H. (2001). Winter Shamals in Qatar, Arabian Gulf. *Weather*, 56(12), 444-451.
- Rao, P. G., Hatwar, H. R., Al- Sulaiti, M. H., & Al- Mulla, A. H. (2003). Summer shamals over the Arabian Gulf. *Weather*, 58(12), 471-478. <https://doi.org/10.1002/wea.6080581207>
- Rashki, A., Kaskaoutis, D. G., Mofidi, A., Minvielle, F., Chiapello, I., Legrand, M., ... & Francois, P. (2019). Effects of Monsoon, Shamal and Levar winds on dust accumulation over the

- Arabian Sea during summer-The July 2016 case. *Aeolian Research*, 36, 27-44. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2018.11.002>
- Rasouli, A.A., Sari Saraf, B., & Mohammadi, G.H. (2011), analysis of the occurrence of dust climatic phenomenon in the west of the country in the last 55 years by using non-parametric statistical methods. *Natural Geography*, 4(11), 16-16 [in persian]
- Shao Y., Klose M., & Wyrwoll K.H. (2013). Recent global dust trend and connections to climate forcing, *Nat Hazards*. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50836>
- Tanaka, T. Y., and M. Chiba, (2006). A numerical study of the contributions of dust source regions to the global dust budget, *Global Planet. Change*, 52, 88-104. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.02.002>
- Tavousi, T., & Zahrai A. (2013) Time series modeling of Ahvaz city dust phenomenon. *Geographical Research*, 28(2), 159-170 [in persian]
- Thoppil, P.G., & Hogan, P.J. (2010). Persian Gulf response to a wintertime Shamal wind event. *Deep-Sea Res. I Oceanogr. Res. Pap.* 57(8), 946-955. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2010.03.002>
- UNEP, WMO, UNCCD, (2016). Global Assessment of Sand and Dust Storms. *United Nations Environment Programmed, Nairobi*.
- UNEP. (2013). Forecasting and early warning of dust storms, Retrieved from <http://www.unep.org/geas>.
- Walters, k. (1990). The Persian Gulf region, a climatological study (Tech. Rep.), *Asheville: United States Air Force*.
- Yu, Y., Notaro, M., Liu, Z., Kalashnikova, O., Alkolibi, F., Fadda, E., & Bakhrjy, F. (2013). Assessing temporal and spatial variations in atmospheric dust over Saudi Arabia through satellite, radiometric, and station data, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118(13), 253-13. <https://doi.org/10.1002/2013JD020677>
- Yu, Y., Notaro, M., Liu, Z., Wang, F., Alkolibi, F., Fadda, E., & Bakhrjy, F. (2015). Climatic controls on the interannual to decadal variability in Saudi Arabian dust activity: toward the development of a seasonal dust prediction model. *J. Geophys. Res.* 120, 1739-1758. <https://doi.org/10.1002/2014JD022611>
- Zender, C. S., Bian, H., & Newman, D. (2003). Mineral Dust Entrainment and Deposition (DEAD) model: description and 1990s dust climatology. *J. Geophys. Res.*, 108 (D14), 4416. <https://doi.org/10.1029/2002JD002775>