

Original Research Article

# Analyzing the role of thermal and dynamic cyclone in dust storms in western Iran

Azar Beyranvand<sup>1\*</sup>, Ghasem Azizi<sup>2</sup>, Omid Alizadeh<sup>3</sup>

<sup>1</sup> PhD of synoptic climatology, Department of Natural Geography, University of Tehran, Tehran, Iran.

<sup>2</sup> Professor, Department of Natural Geography, University of Tehran, Tehran, Iran.

<sup>3</sup> Associate Professor, Department of Space Physics, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran.



10.22034/GRD.2024.21230.1609

Received:

February 6, 2024

Accepted:

July 2, 2024

Keywords:

Iran, Horizontal visibility, Frontogenesis, Cut-off low

## Abstract

In this research, dust storms in the west of Iran have been investigated, which include days when the dust suspension brings the horizontal visibility to less than or equal to one kilometer in at least three meteorological stations. In order to extract synoptic patterns, the data were obtained on sea level pressure, geopotential height, temperature, zonal (u) and meridional (v) components of wind at different levels of the atmosphere related to ERA-Interim. Using the visual analysis of the maps, the maps were categorized based on the similarity between the pressure patterns. The analysis of synoptic patterns showed that the dynamic and thermal cyclone patterns are the most important patterns of the dust cycle in Iran. In the storms caused by a dynamic cyclone, according to the location of the cyclone in the region, the most dust rise was found to be from the western and southwestern cyclone in Iraq, so about 40% of these storms came from the central lakes and especially from Lake Tharthar. The storms caused by thermal cyclones in the region have lower intensity than those caused by dynamic cyclones. The sources located in the southern half of Iraq, northern Arabia, Kuwait and southwestern Iran have been more effective in the occurrence of dust than the other parts in the region.

E-ISSN: 2588-7009 /© 2023. Published by Yazd University. This is an open access article under the CC BY 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).



\* **Corresponding Author:** Azar Beyranvand

**Address:** Department of Natural Geography, University of Tehran.

**Email:** beyranvandazar@ut.ac.ir

## Extended Abstract

### 1. Introduction

The connection between interannual changes in atmospheric circulation patterns and the dust cycle is undeniable. One of the most important atmospheric patterns in the dust cycle, especially in the early stages of dust storms, is the activity of cyclones. In the Middle East and the Mediterranean region, studies indicate the effects of climatic variables (such as wind, pressure, temperature, cloudiness, precipitation, thunderstorms, floods, waves, dust storms, and avalanches) on the formation and passage of cyclones and their disturbances. The studies on cyclogenesis in the Mediterranean region date back to the middle of the 20th century. There have been discussions on the affectability of Syria, Iraq, Iran and other countries in the region from the cyclones of Mediterranean. In case there is not enough moisture to cause precipitation, the cyclone mechanism acts as a determining factor in collecting and transporting dust from susceptible areas. Sometimes they create big and historic storms that, depending on their path, can severely affect areas even far away from the dust sources.

### 2. Research Methodology

In order to identify dust storms, in this study, the data related to horizontal visibility and the code of phenomena in the current weather for the time period of 1987-2022 were used in 33 synoptic stations in Iran. The data were taken from Iran Meteorological Organization. An event of dust storm is considered a dusty day if at least once a day the horizontal visibility at a station becomes less than or equal to 1 km due to dust in suspension (the synoptic code 06 represents dust in suspension). Then, considering the conditions in the last three decades (1987-2022), a total of 229 dust storm events (391 dust storm days) were identified. In order to achieve the circulation patterns of the identified days, the sea level pressure maps at 00, 06, 12, and 18 hours of global coordination, as well as the geopotential height map at the level of 500 hpa, were drawn and analyzed.

### 3. Results and discussion

Among all the investigated events, 47 events were caused by dynamic cyclones that occurred in all seasons. Of them, 18 occurrences were the result of the formation of thermal cyclones in all seasons, although with a very low frequency in autumn. Analysis of the dynamic cyclones indicated that, in terms of the time of occurrence in a year, only seven cases occurred in the hot season, six in the cold season, and the rest in spring and autumn. So, about 70% of the events related to dynamic cyclones occurred from March to June, of which half were related to April.

Out of the 47 cases of storms caused by dynamic cyclones, about 45% were one-day events, which covered less than 10 stations in the west and southwest of Iran. Almost 40% of the incidents lasted for two days, and four storms in 2010-2012 reached a significant extent. In 10% of the cases, the duration of the dust storm was three days, and two three-day storms in 2009 and 2012 covered a larger area of Iran. Storms with longer durations were observed only once in the studied period. Most of the dynamic whirlwinds occurred in 1994, 2007, 2008 and 2010.

In the thermal cyclone, the maximum frequency was for 2008. In nearly 60% of the cases, the thermal cyclones formed in the southeast of Iraq, southwest of Iran, Kuwait, northeast of Arabia and the north of the Persian Gulf. In the other cases, a thermal cyclone appeared on the border between Iraq and Saudi Arabia. The storms caused by thermal cyclones in the region have lower intensity than those caused by dynamic cyclones. The centers located in the southern half of Iraq, northern Saudi Arabia, Kuwait and southwestern Iran have been more effective in the occurrence of dust than the other parts in the region.

#### 4. Conclusion

The most occurrences of dynamic cyclone were in 1994, 2007, 2008 and 2010. In half of the cases, the cyclones created in the central areas of Iraq, especially the central lakes of Tharthar, Rezazah and Habaniyya, caused dust storms in the region. In 25% of the storms, the cyclones formed in northwestern Iraq-northeastern Syria were the main cause of dust. In about 17% of the cases, the cyclones formed in the southeast of Iraq, southwest of Iran, and Kuwait caused dust storms. In the remaining 7%, dynamic cyclones in northern Iraq or northern Arabia caused dust storms. In the storms caused by the occurrence of dynamic cyclones in the region, the most dust rose from the western and southwestern centers in Iraq. Around the central lakes and especially Lake Tharthar, 40% of the dust storms were under this effect. In addition to the important role of the pattern of the upper levels on the strengthening of surface cyclones, the mechanism of dust rising in the surface swirl facilitates the entry of dust to the upper levels, results in more dust transfer through these levels.

In the thermal cycle, the maximum frequency was in 2008. In nearly 60% of the cases, the thermal cyclones formed in the southeast of Iraq, southwest of Iran, Kuwait, northeast of Arabia and the north of the Persian Gulf. The storms caused by the thermal cyclones in the region have lower intensity compared to the storms caused by dynamic cyclones. The sources located in the southern half of Iraq, northern Arabia, Kuwait, and southwestern Iran have been more effective in raising dust than in other regions.

## مقاله پژوهشی

## واکاوی نقش چرخندهای حرارتی و دینامیکی در توفانهای گردوغبار غرب ایران

آذر بیرانوند<sup>۱\*</sup>، قاسم عزیزی<sup>۲</sup>، امید علیزاده<sup>۳</sup><sup>۱</sup> دکتری آب و هواشناسی سینوپتیک، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.<sup>۲</sup> استاد، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه تهران، تهران، ایران.<sup>۳</sup> دانشیار، گروه فیزیک فضا، مؤسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

doi 10.22034/GRD.2024.21230.1609

## چکیده

در این تحقیق توفانهای گردوغبار در غرب ایران برای دوره زمانی ۲۰۲۲-۱۹۸۷ مورد بررسی قرار گرفته است که شامل روزهایی است که تعلیق گردوخاک دید افقی را حداقل در سه ایستگاه هواشناسی به کمتر یا مساوی یک کیلومتر می‌رساند. با استفاده از تحلیل چشمی داده‌های فشار سطح دریا، ارتفاع ژئوپتانسیل، دما، مؤلفه مداری (U) و نصف‌النهاری (V) باد در سطوح مختلف جو مربوط به ERA-Interim، الگوی چرخند دینامیکی و حرارتی که از مهم‌ترین الگوهای چرخه گردوغبار غرب ایران هستند، جداسازی شدند. بررسی توزیع زمانی چرخندهای تفکیک‌شده نشان داد که چرخندهای حرارتی در ژانویه تا مه و چرخندهای دینامیکی در فصول گذار بیشینه رخداد را داشته‌اند. از نظر طول دوره چرخند حرارتی ۳۵ درصد و چرخند دینامیکی ۶۵ درصد بیش از ۱ روز گردوغبار ایجاد نموده‌اند. توفانهای ناشی از وقوع چرخند حرارتی نسبت به توفانهای ناشی از چرخند دینامیکی از شدت پایین‌تری برخوردارند، طول دوره کمتر و شدت پایین‌تر توفانهای ناشی از چرخندهای حرارتی به ماهیت شکل‌گیری و اثرگذاری آنها مربوط می‌شود که به حرارت سطحی وابسته بوده و در مکان شکل‌گیری باقی می‌مانند. در توفانهای ناشی از وقوع چرخند دینامیکی با توجه به موقعیت ایجاد چرخند در منطقه، بیشترین خیزش گردوغبار از کانونهای غربی و جنوب غربی در کشور عراق بوده است، به‌نحوی که حدود ۴۰ درصد از این توفانها از دریاچه‌های مرکزی و مخصوصاً دریاچه ثرثار نشأت گرفته‌اند. درحالی‌که در چرخند حرارتی کانونهای واقع در نیمه جنوبی کشور عراق، شمال عربستان، کویت و جنوب غرب ایران در وقوع گردوغبار اثرگذارتر از سایر بخشها در منطقه بوده است.

تاریخ دریافت:

۱۷ بهمن ۱۴۰۲

تاریخ پذیرش:

۱۲ تیر ۱۴۰۳

کلیدواژه‌ها:

ایران،

دید افقی،

جبهه‌زایی،

کم ارتفاع بریده،

## ۱ مقدمه

در مناطق خشک توفانهای گردوغبار هرساله سهم بالایی از ذرات ریز را وارد جو می‌کنند که این ذرات قادرند تا صدها کیلومتر انتقال یابند (فو و همکاران، ۲۰۰۸). ذرات گردوغبار اثرات قابل‌توجهی را در محیط‌زیست برجای می‌گذارند که می‌توانند جوانب مختلفی از جمله آشفستگی در سامانه‌های اقلیمی، اختلال در تعادل تابش و حتی اثرات نامطلوب بصری را شامل شود (تیگن و فان، ۱۹۹۴). همچنین طیف وسیعی از تأثیرات مهم را بر روی سامانه زمین از جمله روی ابرها، ترازینه انرژی و آب زمین و چرخه‌های بیوژئوشیمیایی ایجاد می‌کند (شائو و همکاران، ۲۰۱۱؛

Email: beyranvandazar@ut.ac.ir

\* نویسنده مسئول: آذر بیرانوند

آدرس: گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه تهران

ماهوالد و همکاران، ۲۰۱۴؛ میلر و همکاران، ۲۰۱۴). این در حالی است که مطالعات اخیر سهم ورود گردوغبار با قطر هندسی تا ۲۰ میکرومتر از مناطق آسیایی به جو را حدود ۴۰ درصد از کل گردوغبار وارد شده به جو در سطح جهان تخمین می‌زند (کوک و همکاران، ۲۰۲۱). این امر ناشی از قرارگیری کانون‌های مهم گردوغبار جهان در منطقه غرب آسیا است (عزیزی و همکاران، ۲۰۱۲؛ ذوالجودی و همکاران، ۲۰۱۳؛ درویشی و همکاران، ۲۰۱۴، مریدنژاد و همکاران، ۲۰۱۵؛ کائو و همکاران، ۲۰۱۵؛ علیزاده و همکاران، ۲۰۱۶، نبوی و همکاران، ۲۰۱۶، درویشی و همکاران، ۲۰۲۰، بیرانوند و همکاران، ۲۰۲۳). ارتباط انکارناپذیر بین تغییرات بین‌سالانه الگوهای گردش جو با چرخه گردوغبار امری روشن است (یو و همکاران، ۲۰۱۵؛ علیزاده و همکاران، ۲۰۱۶؛ ماشت و همکاران، ۲۰۱۷، بیرانوند و همکاران، ۲۰۱۹، بیرانوند و همکاران، ۲۰۲۳). یکی از مهم‌ترین الگوهای جوی در چرخه گردوغبار و بخصوص در امر خیزش و مراحل اولیه توفان‌های گردوغباری فعالیت مراکز چرخندی است.

در انتشار سالانه گردوغبار در شمال آفریقا در ۵۵ درصد موارد همراهی مراکز چرخندی مشاهده شده است (فیدلر و همکاران، ۲۰۱۳). در منطقه خاورمیانه و بخصوص مدیترانه نیز مطالعات حاکی از اثرپذیری متغیرهای اقلیمی (از قبیل باد، فشار، دما، ابرناکی، بارش، توفان‌های تندی، سیلاب‌ها، امواج، توفان‌های گردوغباری، ریزش بهمن، زمین‌لغزش و انواع پدیده‌های منجر به کاهش کیفی هوا از جمله مه و گردوغباری که دید افقی را متأثر می‌نماید) از شکل‌گیری و عبور اغتشاشات چرخندی است (لاینولو<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۰۵؛ جانسا<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۰۱؛ گومز<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۰۲؛ سولوموس<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۱۷). قدمت مطالعات مربوط به بحث چرخندزایی در منطقه مدیترانه به اواسط قرن بیستم برمی‌گردد (پیترسن، ۱۹۵۶؛ کلین، ۱۹۵۷) و تأثیرپذیری کشورهای سوریه، عراق، ایران و سایر کشورهای منطقه از مراکز چرخندی مدیترانه امری روشن است (رادینوویچ، ۱۹۸۷). در مواردی که رطوبت کافی برای ایجاد بارش وجود نداشته باشد، سازوکار چرخندی به‌عنوان عاملی تعیین‌کننده در برداشت و انتقال گردوغبار از مناطق مستعد عمل می‌کند و گاهی توفان‌هایی بزرگ و تاریخی می‌آفریند که بسته به مسیر گذر خود می‌توانند مناطقی حتی بسیار دورتر از کانون‌های گردوغبار را به‌شدت تحت تأثیر قرار دهند (سولوموس و همکاران، ۲۰۱۷).

در توفان گردوغباری که در تاریخ‌های ۷ تا ۱۱ سپتامبر ۲۰۱۵ در خاورمیانه و شرق مدیترانه به وقوع پیوست، ایجاد جریان‌های چرخندی و شکل‌گیری توفان گردوغبار هیوب سبب انتشار و انتقال توده گردوغبار از سوریه و شمال عراق به خاورمیانه و شرق مدیترانه شد. علل اولیه ایجاد این توفان عظیم شکل‌گیری یک کم‌فشار حرارتی روی سوریه بود که جریان چرخندی ناشی از آن تا ۴ کیلومتر گردوغبار را بلند نمود و سپس حرکت غرب‌سوی آن سبب رخداد توفان کم‌نظیر در قبرس و شبه‌جزیره سینا شد (پرولاری و همکاران، ۲۰۱۶؛ سولوموس و همکاران، ۲۰۱۷؛ العربی و شربا<sup>۵</sup>، ۲۰۱۹). نقش مراکز چرخندی در رخداد توفان‌های گردوغبار در ایران نیز در مطالعات مختلف موردتوجه قرار گرفته است (ذوالفقاری و عابدزاده، ۱۳۸۴؛ طاووسی و همکاران، ۱۳۸۹؛ ذوالفقاری و همکاران، ۱۳۹۰؛ عزیزی و همکاران، ۱۳۹۱؛ خوش‌اخلاق و همکاران، ۱۳۹۱؛ رئیس‌پور و همکاران، ۱۳۹۲؛ لشکری و صبوئی، ۱۳۹۲؛ میری و همکاران، ۱۳۹۳؛ علیزاده و همکاران، ۱۴۰۰)؛ اما در هیچ‌یک از مطالعات مزبور تمرکز مطالعه به این سامانه به‌تنهایی معطوف نبوده و به‌عنوان یکی از دلایل یا الگوهای خیزش و انتقال گردوغبار به ایران در کنار

<sup>1</sup> Lionello

<sup>2</sup> Jansa

<sup>3</sup> Gomez

<sup>4</sup> Solomos

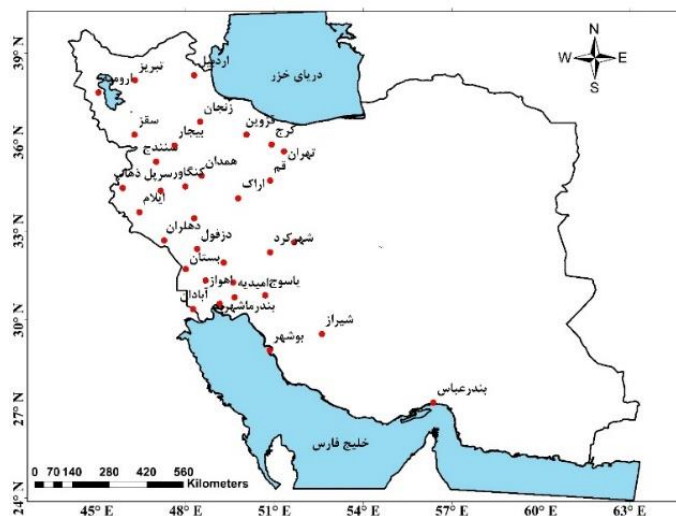
<sup>5</sup> Al-Ourabi & Sharba

سایر الگوها موردتوجه قرار گرفته است. با توجه به افزایش فراوانی رخدادهای گردوغبار در ایران در دهه‌های اخیر (رسولی و همکاران، ۱۳۹۰؛ طاووسی و همکاران، ۱۳۹۲؛ رئیس‌پور و همکاران، ۱۳۹۳؛ علیزاده و همکاران، ۲۰۱۶؛ بیرانوند و همکاران، ۲۰۱۹) و با توجه به روشن بودن نقش چرخندها در این پدیده، در این مطالعه به‌منظور بررسی الگوهای همدیدی مؤثر بر خیزش و انتقال گردوغبار سال‌های اخیر به غرب ایران، توفان‌هایی از گردوغبار که مسبب آن چرخندها بوده جداشده و مورد تحلیل قرارگرفته است. همچنین سازوکار اثرگذاری این الگو در انتشار گردوغبار از کانون‌های منطقه موردتوجه قرار گرفته است.

## ۲ داده و روش تحقیق

در راستای شناسایی توفان‌های گردوغبار در این مطالعه از داده‌های مربوط به دید افقی و کد پدیده‌ها در هوای حال حاضر برای دوره زمانی ۲۰۲۲-۱۹۸۷ در ۳۳ ایستگاه همدیدی کشور ایران استفاده شده است. داده‌های فوق از سازمان هواشناسی ایران گرفته شده است. توزیع مکانی ایستگاه‌های همدید بکار گرفته‌شده در این مطالعه در شکل ۱ ارائه‌شده است. به‌منظور شناسایی روزهای دارای توفان گردوغبار منطقه‌ای، روزهایی که از میان ۸ دیده‌بانی در روز حتی یک دیده‌بانی کد هوای حال حاضر را ۰۶ و دید افقی را کمتر یا مساوی ۱۰۰۰ متر به ثبت رسانیده باشد و در این روز حداقل سه ایستگاه (بافاصله افقی حداقل ۱۰۰ کیلومتر) این شرایط را داشته است به‌عنوان توفان گردوغبار منطقه‌ای در نظر گرفته‌شده است (بیرانوند و همکاران، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۳).

ابتدا این پایش بر روی داده‌های کل کشور برای بیش از ۵۰ ایستگاه انجام شد و سپس با توجه به اینکه توفان‌های منطقه‌ای با خصایص تعریف‌شده در بالا محدود به نیمه غربی ایران بود و ایستگاهی نظیر بندرعباس هم در توفان‌های با منشأ عربستان حائز شرایط تعریف‌شده در روش این مطالعه بود در ایستگاه‌های موردبررسی قرار داده شد. با در نظر گرفتن شرایط فوق در سی‌وشش سال اخیر (۲۰۲۲-۱۹۸۷) 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.



شکل ۱. توزیع مکانی ایستگاه‌های همدید مورداستفاده در شناسایی توفان‌های گردوغبار.

در ادامه داده‌های ERA-Interim مربوط به فشار سطح دریا، ارتفاع ژئوپتانسیل، دما، مؤلفه مداری (u) و نصف‌النهاری باد (v)، در سطوح مختلف جو در مقیاس ساعتی (۴ بار در روز) از مرکز اروپایی پیش‌بینی میان‌مدت جوی (ECMWF) گرفته شد. سپس در راستای دستیابی به الگوهای گردشی روزهای شناسایی‌شده نقشه فشار

سطح دریا در ساعت‌های ۰۰، ۰۶، ۱۲ و ۱۸ هماهنگ جهانی و همچنین نقشه ارتفاع ژئوپتانسیل در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در ساعت‌ها مزبور ترسیم و مورد تحلیل قرار گرفت. تحلیل چشمی نقشه‌ها نشان داد که یکی از الگوهای اصلی که بر رخدادهای موردبررسی حاکم بوده است، حاصل از چرخندزایی بوده است. با توجه به سازوکار تشکیل و فعالیت چرخندها بین آنها تمایز قائل شده و به تحلیل جداگانه آنها پرداخته‌ایم.

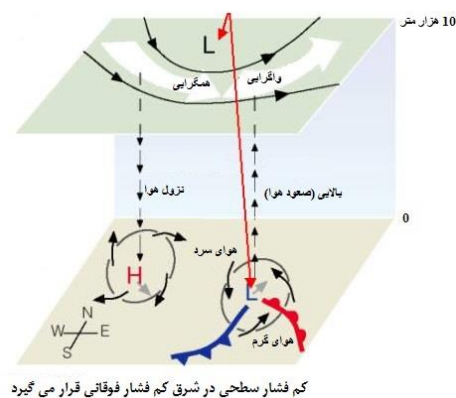
همچنین برای تحلیل بهتر، جبهه‌زایی در سطح زمین و سطوح فوقانی بررسی شد. به‌منظور بررسی شرایط جبهه‌زایی و جبهه‌زدایی در منطقه از تابع جبهه‌زایی مارتین (۱۳۸۸) به شکل زیر استفاده شد:

$$\{I_2 D = 1/|\nabla\theta| \{-\partial\theta/\partial x\}(\partial u/\partial x - \partial\theta/\partial x + \partial v/\partial x - \partial\theta/\partial y) - (\partial\theta/\partial y)(\partial u/\partial x - \partial\theta/\partial x + \partial v/\partial x - \partial\theta/\partial y)\} \quad (1)$$

به‌منظور تفکیک چرخندهای حرارتی و دینامیکی در این مطالعه خصایص متفاوت آنها در نظر گرفته شده است. همان‌طور که میدانیم کم‌فشارهای حرارتی سطح زمین که متأثر از تغییر حرارتی شکل می‌گیرند، در محل تشکیل خود باقی می‌مانند تا اینکه بر اثر تغییر شرایط حرارتی از بین بروند. کم‌فشارهای سطحی گسترش عمودی کمی داشته و محدود به ارتفاعی می‌شوند که حرکات دینامیکی اتمسفر به آنها اجازه می‌دهد. از سوی دیگر شدت فعالیت آنها به ضخامت لایه ناپایدار بستگی دارد. سیستم‌های فشار حرارتی ویژگی کامل یک سیستم همید را ندارند.

حال آنکه کم‌فشارهای دینامیک حاصل صعود دینامیک اتمسفر هستند و با نام چرخند (سیکلون) شناخته می‌شوند و سیستم‌هایی همید به حساب می‌آیند. از ملزومات ایجاد آنها قوی بودن موج کوتاه بادهای غربی و فراهم شدن وضعیت ناپایداری شدید است. باید توجه نمود که وجود موج کوتاه عمیق و دارای هسته رودباد در سطح بالا گرچه برای تشکیل چرخند لازم است اما کافی نیست. از شرایط ادامه و تقویت چرخند، وجود منطقه جبهه است. آنچه به انحطاط و انقراض این سیستم می‌انجامد از بین رفتن تضاد حرارتی است (علیچانی، ۱۳۸۸).

علاوه بر کاهش فشار و افزایش حرکات بالاسو تغییر و افزایش تاوایی نیز برای چرخندهای دینامیکی نیاز است (فلاح قالهری، ۱۳۹۰). واگرایی بادهای سطح فوقانی در شرق ناوه یا تراف باند گسترده‌ای از حرکات بالاسو در آنجا ایجاد می‌کند، این حرکات بالاسو به تقویت چرخند کمک می‌کند (شکل ۲).



شکل ۲. وضعیت سیستم کم‌فشار سطحی به نسبت کم‌فشار یا کم ارتفاع سطح فوقانی در چرخند دینامیکی.

### ۳ نتایج و بحث

با انطباق شرایط تعریف‌شده در بخش روش‌شناسی بر روی داده‌های سی‌وشش‌ساله (۱۹۸۷ تا ۲۰۲۲) ۳۹۱ روز (۲۲۹ رخداد) دارای توفان گردوغبار در غرب ایران شناسایی گردید؛ که در این بین سال‌های ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۲ بیشینه

رخداد این پدیده در غرب ایران را به ثبت رسانیده‌اند. می‌توان اذعان داشت که فراگیری این پدیده در سال‌های فوق و بالأخص در سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۲ چشمگیر و بی‌سابقه بوده است (بیرانوند و همکاران، ۲۰۱۹).

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، اما کمترین میزان اثرگذاری کانون‌ها مربوط به غرب عراق است. این نتایج بر اساس بررسی صورت گرفته برای هر رخداد با تصاویر ماهواره‌ای به صورت چشمی به دست آمده است. با توجه به سازوکار تشکیل و فعالیت چرخندها بین آنها تمایز قائل شده و به تحلیل جداگانه آنها پرداخته‌ایم. خصایص توصیفی دو چرخند دینامیکی و حرارتی در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. خصایص توصیفی چرخندهای دینامیکی و حرارتی مورد مطالعه در ارتباط با ایجاد توفان گردوغبار.

حرارتی		دینامیکی		نوع چرخند
۲۶		۴۷		تعداد اثرگذاری در وقوع توفان گردوغبار
۸۰ درصد	ژانویه تا مه	۱۵/۲ درصد	تابستان	فصل وقوع
۲۳ درصد	ژوئن تا سپتامبر	۱۲/۸ درصد	زمستان	
۶۵/۴	یک‌روزه	۷۲ درصد	بهار و پاییز	
۳۰/۸	دوروزه	۴۵ درصد	یک‌روزه	طول دوره توفان گردوغبار ناشی از آن
۳/۸	سه‌روزه یا بیشتر	۴۰ درصد	دوروزه	
۳/۸	سه‌روزه یا بیشتر	۱۵ درصد	سه‌روزه یا بیشتر	
۶۰ درصد	جنوب شرق عراق/جنوب غرب ایران/کویت /شمال شرق عربستان/ شمال خلیج فارس	۵۰ درصد	نواحی مرکزی عراق	مکان شکل‌گیری چرخند
		۲۵ درصد	شمال غرب عراق/شمال شرق سوریه	
		۱۷ درصد	جنوب شرق عراق/جنوب غرب عربستان	
۴۰ درصد	مرز عراق و عربستان	۷ درصد	شمال عراق/شمال عربستان	الگوی تراز میانی در زمان حاکمیت چرخند
		۴۲ درصد	کم ارتفاع بریده محور یا یال راست ناوه تراز میانی	
عدم وجود کم ارتفاع متناظر در سطوح بالا/تنوع در سیستم‌های موجود در سطوح بالا		۳۷/۵ درصد		
عدم فعالیت تندباد قشری به صورت غالب یا حتی چشمگیر		۵۳ درصد موارد در تراز ۸۵۰ دیده شده است		شکل‌گیری تندباد قشری
شدت پایین		شدت نسبتاً بالا		شدت توفان گردوغبار ناشی از آن

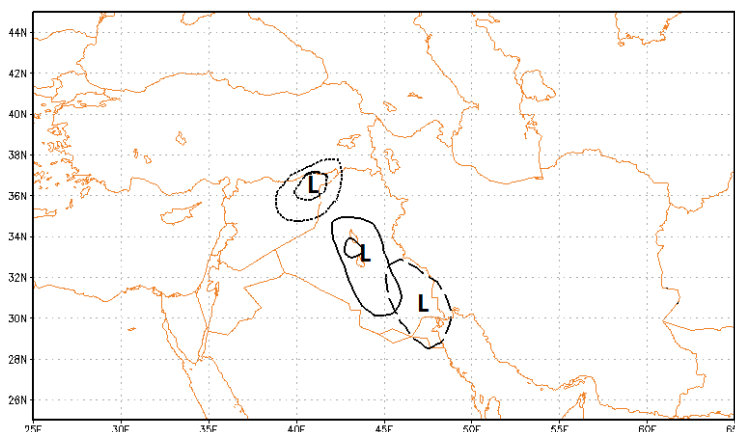
## ۴ چرخند دینامیکی

حدود ۷۰ درصد از رخداد‌های مرتبط با چرخند دینامیکی در ماه‌های مارس تا ژوئن بوده است که از این درصد نیمی مربوط به ماه آوریل است. از تعداد ۴۷ مورد توفان ناشی از چرخند دینامیکی، حدود ۴۵ درصد توفان‌ها رخداد‌های یک‌روزه بوده است که کمتر از ۱۰ ایستگاه از غرب و جنوب غرب کشور را در برگرفته است. تقریباً ۴۰ درصد رخدادها ۲ روز به طول انجامیده‌اند که ۴ توفان در سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۲ گستره قابل توجهی پیدا کرده است. در ۱۰ درصد موارد، طول دوره وقوع توفان ۳ روز بوده است که دو توفان سه‌روزه در سال‌های ۲۰۰۹ و ۲۰۱۲ سطح بیشتری از کشور را در برگرفته است. توفان‌های با دوره زمانی بلندتر شامل ۴ و ۵ روز تنها یک‌بار در دوره



مورد بررسی مشاهده شده‌اند. در وقوع چرخند دینامیک سال‌های ۱۹۹۴، ۲۰۰۷، ۲۰۰۸ و ۲۰۱۰ بیشترین رخداد را داشته است.

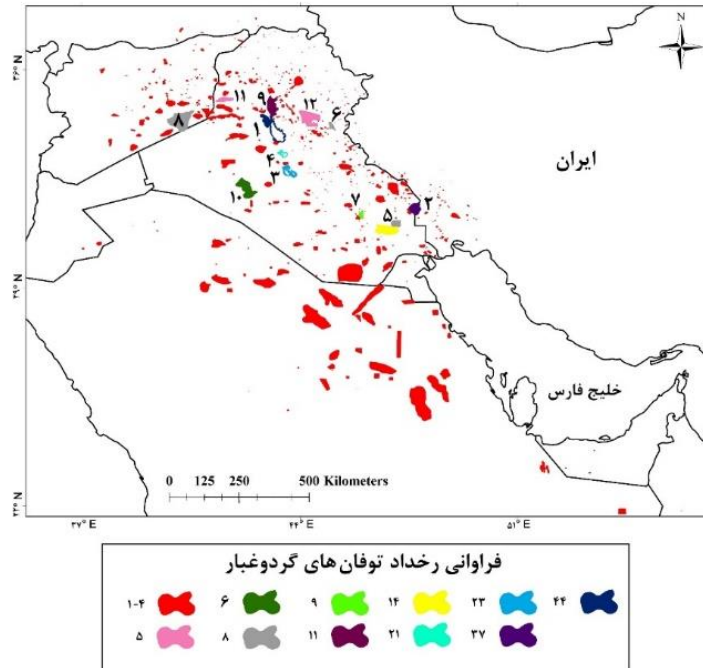
موقعیت مکانی چرخندهای دینامیکی (شکل ۳) منجر به توفان گردوغبار متفاوت بوده است. در نیمی از موارد، چرخند ایجاد شده در نواحی مرکزی عراق و بالأخص دریاچه‌های مرکزی ژنرال، رزازه و حبانیه باعث ایجاد توفان گردوغبار در منطقه شده است. در ۲۵ درصد از توفان‌های رخ داده ناشی از چرخند دینامیکی، چرخند شکل گرفته در شمال غرب عراق- شمال شرق سوریه (در مواردی جنوب ترکیه نیز نقش داشته است) دلیل اصلی خیزش گردوغبار بوده است. در حدود ۱۷ درصد موارد، چرخند شکل گرفته در جنوب شرق عراق- جنوب غرب ایران- کویت باعث ایجاد یک توفان گردوغباری بوده است. در ۷ درصد باقی‌مانده، چرخندهای دینامیکی در شمال عراق یا شمال عربستان باعث به وجود آمدن یک توفان گردوغبار بوده است.



شکل ۳. موقعیت شکل‌گیری چرخندهای دینامیکی در منطقه غرب آسیا. چرخند نواحی مرکزی عراق (منحنی ممتد مشکی)، چرخند شمال غرب عراق- شمال شرق سوریه (منحنی نقطه‌چین)، چرخند جنوب شرق عراق- جنوب غرب ایران- کویت (منحنی منقطع). این شکل یک طرح‌واره است که در راستای نمایان ساختن موقعیت نسبی چرخندهای دینامیکی شکل گرفته در زمان رخداد توفان‌های گردوغبار ترسیم شده است.

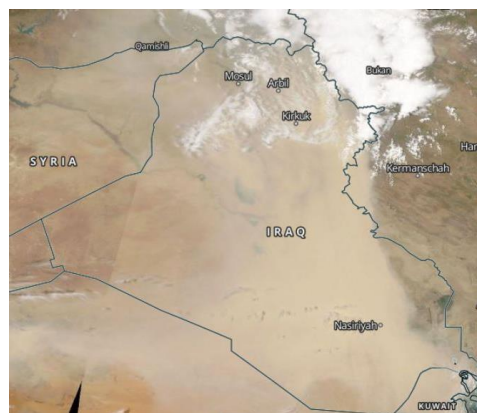
در توفان‌های ناشی از وقوع چرخند دینامیکی در منطقه، بیشترین خیزش گردوغبار از کانون‌های غربی و جنوب غربی در کشور عراق بوده است. حوالی دریاچه‌های مرکزی و مخصوصاً دریاچه ژنرال در ۴۰ درصد از توفان‌های رخ داده از این نوع مؤثر بوده است (شکل ۴).

در الگوی تراز میانی، در ۴۲ درصد موارد کم ارتفاع بریده یا هسته کم ارتفاع در بندال‌های امگا، رکس یا دوقطبی تأثیر مستقیم (۱۰ درصد در عراق یا نزدیک منطقه خیزش) یا غیرمستقیم (ناوهای که هسته کم ارتفاع در آن قرار گرفته است تأثیرگذار بوده است) در چرخند سطحی داشته است. در ۳۷/۵ درصد هم قرارگیری محور یا یال راست ناوه در غرب چرخند سطحی باعث ریزش هوای سرد عرض‌های بالاتر به عرض‌های پایین‌تر و تقویت چرخند سطحی شده است. علاوه بر اهمیت نقش الگوی ترازهای فوقانی بر تقویت چرخند سطحی، سازوکار خیزش گردوغبار در چرخند سطحی سبب تسهیل ورود گردوغبار به سطوح فوقانی می‌شود و انتقال بیشتر گردوغبار از طریق این سطوح را در پی دارد. یکی از دلایل این است که در بخش جنوبی چرخند دینامیکی به علت کاهش میزان نیروی کوریولیس، تندی باد افزایش می‌یابد؛ بنابراین، جرم ورودی در این منطقه بیش از جرم خروجی در قسمت بالادست است (لشکری، ۱۳۹۳).



شکل ۴. 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 گردوغباری نقش داشته‌اند با شماره به ترتیب فراوانی نقش مشخص شده است (بیرانوند، ۱۴۰۰).

در ۶ توفان رخ داده در سال‌های ۲۰۰۸، ۲۰۰۹، ۲۰۱۱ و ۲۰۱۲، گستره مکانی و دوره زمانی توفان رخ داده قابل توجه بود. با توجه به شدت بالاتر در توفان ۱۷ تا ۱۹ ژوئن سال ۲۰۰۹ این مورد برای بررسی موردی انتخاب شد. گرچه در توفان‌های دیگر از این نوع، سرعت باد در سطح زمین بیشتر بوده و حتی در ۵۳/۵ درصد موارد تندباد قشری تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال مشاهده شده است، اما در توفان انتخاب شده با وجود سرعت پایین‌تر باد، شدت توفان بیشتر بوده است. با توجه به شکل ۵ که تصویر ماهواره‌ای رنگی واقعی در روز ۱۸ ژوئن ۲۰۰۹ را نشان می‌دهد، بیشینه خیزش گردوغبار از تالاب‌های حمار غربی در استان ذی‌قار کشور عراق و مناطق زراعی استان‌های ذی‌قار، واسط و دیاله رخ داده است.



شکل ۵. تصویر ماهواره‌ای رنگی واقعی در روز ۱۸ ژوئن ۲۰۰۹

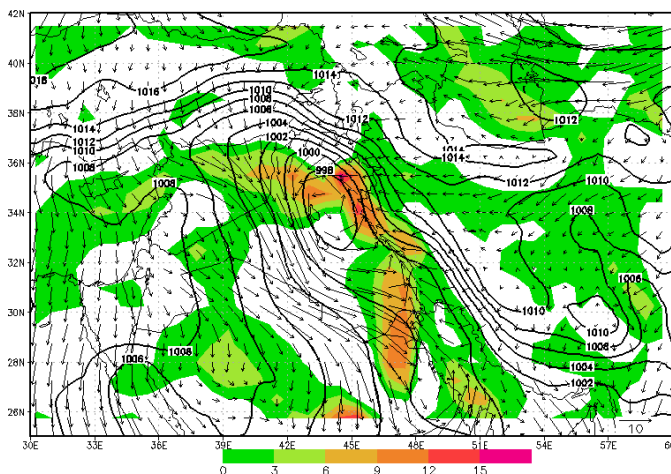
طبق جدول ۲، شروع این توفان سه‌روزه از ساعت‌های اولیه روز ۱۷ ژوئن ۲۰۰۹ بوده است که طی آن ایستگاه‌های آبادان، بستان، ایلام و سرپل ذهاب دید افقی کمتر از یک کیلومتر را به ثبت رسانیده‌اند. در روز ۱۸ ژوئن ۲۰۰۹ که شدت توفان به بیشترین میزان خود رسیده است، ۱۱ ایستگاه هم‌دیدگی کشور شاهد وقوع این

توفان بوده است. شدت توفان فوق به اندازه‌ای بوده است که ۵ ایستگاه همید آبادان، بندرماشهر، مسجدسلیمان، دهلران و سرپل ذهاب دید افقی ۱۰۰ متر را ثبت کرده‌اند. در روز ۱۹ ژوئن ۲۰۰۹ نیز انتقال و جابجایی گردوغبار حاصل از توفان رخ داده برخی ایستگاه‌های شرقی‌تر نظیر کنگاور، خرم‌آباد و اراک و ایستگاه جنوبی بوشهر را نیز درگیر نموده است.

جدول ۲. حداقل دید افقی در ایستگاه‌های درگیر در توفان ۱۷ تا ۱۹ ژوئن سال ۲۰۰۹

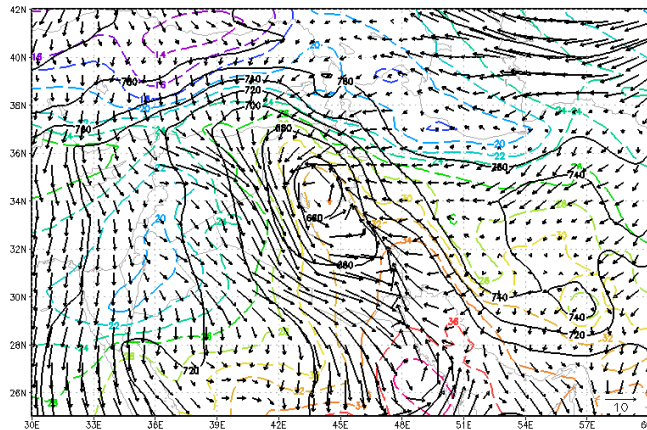
۱۹ ژوئن ۲۰۰۹		۱۸ ژوئن ۲۰۰۹		۱۷ ژوئن ۲۰۰۹		نام ایستگاه
دید افقی (متر)	ساعت	دید افقی (متر)	ساعت	دید افقی (متر)	ساعت	
۱۰۰۰	۰۳	۵۰۰	۱۲	۸۰۰	۰۰	ایلام
۵۰۰	۰۶	۱۰۰	۱۲	۴۰۰	۰۳	آبادان
		۱۰۰	۰۳			بندرماشهر
۱۰۰۰	۰۰	۲۰۰	۱۵	۸۰۰	۰۶	بستان
		۱۰۰	۰۹	۱۰۰	۰۳	سرپل ذهاب
۱۰۰۰	۰۳	۴۰۰	۱۵			اهواز
۸۰۰	۱۲	۸۰۰	۱۵			کرمانشاه
۵۰۰	۰۰	۱۰۰	۱۵			دهلران
		۵۰۰	۱۸			دزفول
۸۰۰	۰۳	۱۰۰	۱۸			مسجدسلیمان
۱۰۰۰	۱۲					اراک
۸۰۰	۰۶					بوشهر
۵۰۰	۰۶					خرم‌آباد
۸۰۰	۱۵					کنگاور
۱۰۰۰	۱۲	۵۰۰	۲۱			امیدیه

همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، وجود یک چرخند با هسته ۹۹۸ هکتوپاسکال در شمال شرق عراق و روی دریاچه‌های مرکزی موجب حرکت پادساعت‌گرد هوا در روی این کشور شده است. در بخش شرقی این چرخند و نیز در جنوب شرق عراق جبهه ایجادشده بر ناپایداری افزوده است. گردوغبار به پا خواسته از دریاچه‌های مرکزی با گردوغبار به پاخواسته از تالاب حمار غربی و مناطق زراعی حوالی آن تجمیع یافته و با چرخش هوا در چرخند به نواحی مرزی بین عراق و ایران انتقال یافته است.



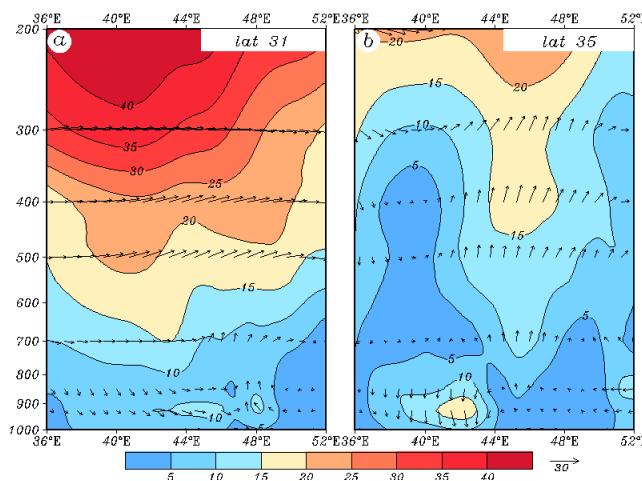
شکل ۶. وضعیت همیدی در سطح زمین. تابع جبهه‌زایی (پس‌زمینه رنگی)، فشار سطح دریا (کنتورهای ممتد، هکتوپاسکال و بردار باد (متر بر ثانیه) در ساعت ۰۰ هماهنگ جهانی در روز ۱۸ ژوئن ۲۰۰۹

بر اساس شکل ۷، تقاطع ایجادشده بین خطوط هم‌دما و پربندهای هم‌ارتفاع تراز ۹۲۵ هکتوپاسکال در حوالی عرض ۳۱ درجه شمالی در عراق (تقریباً همان حوالی تالاب حمار غربی) و سرعت گرفتن بیشتر باد در این منطقه، ضمن ایجاد جوی کژ فشار سبب پیشینه وقوع گردوغبار از این منطقه شده است.



شکل ۷. وضعیت همدیدی در تراز ۹۲۵ هکتوپاسکال. ارتفاع ژئوپتانسیل (کنتورهای ممتد، متر)، دما (کنتورهای خطچین، درجه سانتی‌گراد) و بردار باد (متر بر ثانیه) در ساعت ۰۰ هماهنگ جهانی در روز ۱۸ ژوئن ۲۰۰۹

همان‌طور که در شکل ۸ مشخص است، در عرض ۳۱ درجه شمالی در ساعت ۰۰ هماهنگ جهانی در روز ۱۸ ژوئن ۲۰۰۹ بین طول‌های ۴۳ تا ۴۶ شرقی، هسته‌ای از باد پرسرعت با سرعتی بین ۱۰ تا ۱۵ متر بر ثانیه وجود داشته است، همچنین در ساعت ۰۶ هماهنگ جهانی در روز ۱۸ ژوئن ۲۰۰۹، در عرض ۳۵ درجه شمالی بین طول‌های ۴۱ تا ۴۳ شرقی هسته پرسرعت باد با سرعت ۱۵ تا ۲۰ متر بر ثانیه وجود داشته و این هسته‌های سرعت در جنوب و غرب چرخند موجود در منطقه باعث تشدید خیزش گردوغبار از کانون‌های این نواحی شده است.

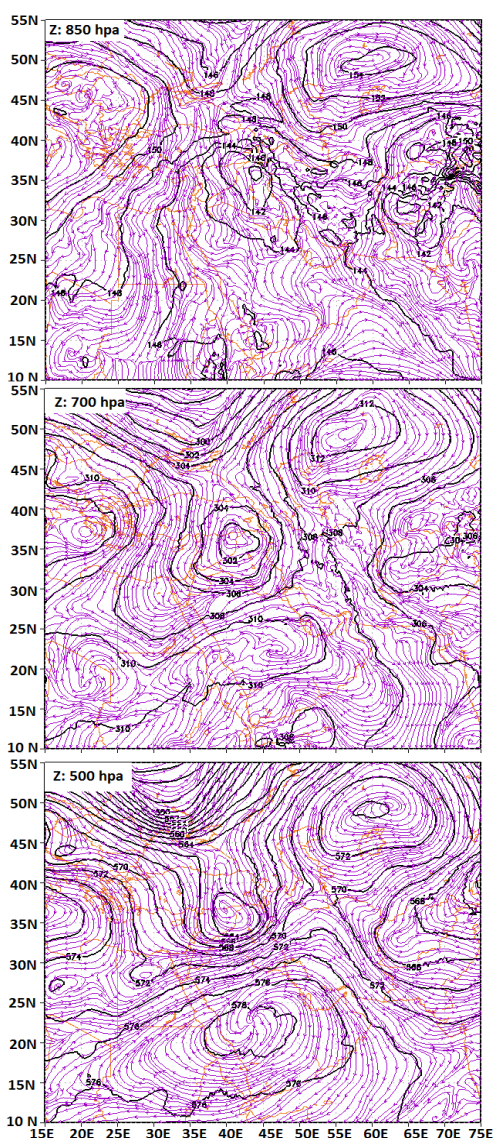


شکل ۸. نیمرخ بردار و سرعت باد در سطوح مختلف جو در (a) عرض ۳۱ درجه شمالی برای ساعت ۰۰ هماهنگ جهانی و (b) عرض ۳۵ درجه شمالی برای ساعت ۰۶ هماهنگ جهانی در روز ۱۸ ژوئن ۲۰۰۹

به‌منظور حصول اطمینان از فعالیت این چرخند به‌عنوان یک چرخند دینامیکی، سطوح ۷۰۰، ۸۵۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال نیز مورد بررسی قرار گرفت. هسته کم ارتفاع مربوط به این چرخند در سطوح فشاری فوق نیز قابل مشاهده است. وجود کم ارتفاع بریده در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در غرب این چرخند سبب تقویت آن شده است.

از دیدگاه لشکری (۱۳۹۳) بهترین نیمرخ قائم جو برای تقویت یک چرخند سطح زمین این است که مرکز کم ارتفاع بسته در هر تراز در لایه‌ی بالاتر نسبت به مرکز کم فشار یا کم ارتفاع زیر خود کمی غربی‌تر و شمالی‌تر قرار گرفته باشد، به طوری که اگر تراز کم فشار یا کم ارتفاع بسته را از سطح زمین تا بالای وردسپهر به هم متصل کنیم این محور امتداد جنوب شرقی-شمال غربی پیدا کند. این نیمرخ در مورد انتخاب شده در این مطالعه به خوبی با مقایسه نقشه‌ها مشهود است.

از طرفی همگرایی هوای بین کم ارتفاع فوق و هسته پرفشار جنب‌حاره که بر روی عربستان قرار داشته است، موجب شده است که در تراز میانی در حدفاصل این دو مرکز جریانات پادساعت‌گرد این کم ارتفاع با جریانات ساعت‌گرد پرفشار جنب‌حاره در بخش جنوبی عراق باهم اختلاط یافته و جریانی قوی را در این بخش حاکم نمایند که سبب انتقال توفان خیزش یافته از عراق به سمت ایران گشته است. همان‌طور که در شکل ۹ نیز دیده می‌شود سرعت باد در تراز میانی در جنوب عراق به بیش از ۲۰ متر در ثانیه رسیده است.



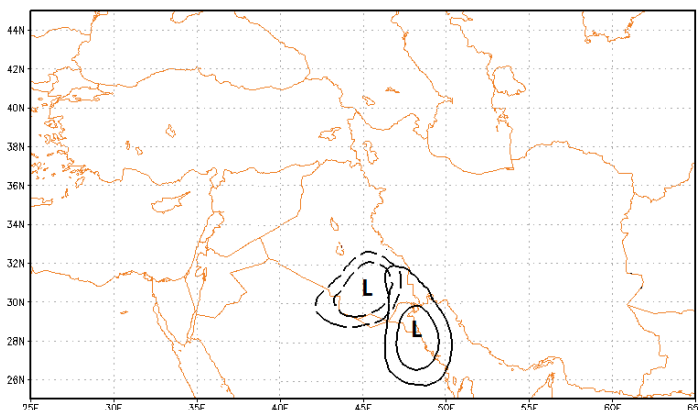
شکل ۹. وضعیت همدیدی در ترازهای زیرین جو. ارتفاع ژئوپتانسیل (کنتورهای ممتد، دکامتر) و خطوط جریان در ساعت ۰۰ هماهنگ جهانی در روز ۱۸ ژوئن ۲۰۰۹

## ۵ چرخند حرارتی

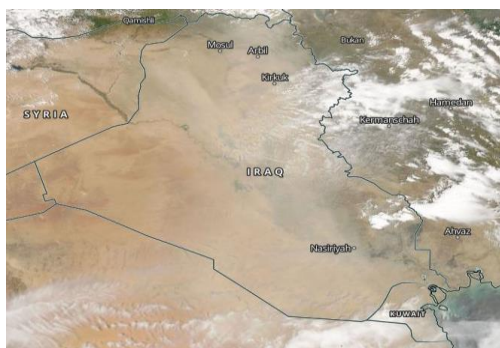
در چرخند حرارتی بیشینه فراوانی مربوط به سال ۲۰۰۸ بوده است. موقعیت مکانی شکل‌گیری چرخندهای گرمایی مسبب توفان‌های گردوغباری در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. در نزدیک به ۶۰ درصد موارد، چرخند حرارتی در جنوب شرق عراق- جنوب غرب ایران- کویت-شمال شرق عربستان و شمال خلیج فارس شکل گرفته است. موقعیت این چرخند در شکل با منحنی ممتد مشکی رنگ مشخص شده است. در بقیه موارد هم چرخند حرارتی در مرز عراق با عربستان پیدایش یافته است (شکل ۱۰).

توفان‌های ناشی از وقوع چرخند حرارتی در منطقه به نسبت توفان‌های ناشی از چرخند دینامیکی از شدت پایین‌تری برخوردارند. کانون‌های واقع در نیمه جنوبی کشور عراق، شمال عربستان، کویت و جنوب غرب ایران در وقوع گردوغبار در این مراکز اثرگذارتر از سایر بخش‌ها در منطقه بوده است (شکل ۴). توفان دوروزه ۶ و ۷ ماه مه سال ۲۰۰۹ به‌عنوان نمونه‌ای از این توفان موردبررسی قرار گرفته است.

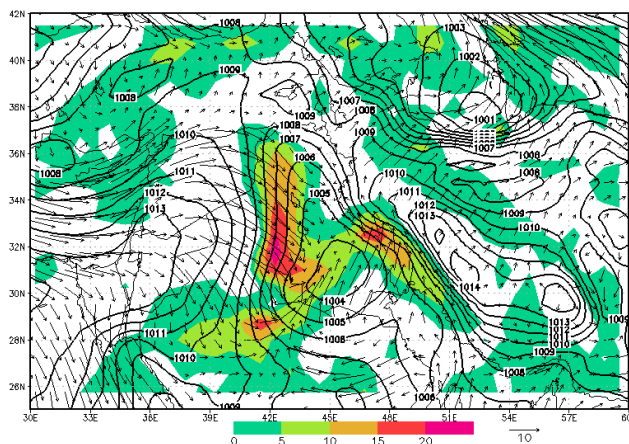
این توفان در روز ۶ مه ۲۰۰۹ در ایستگاه‌های آبادان، ایلام و سرپل ذهاب دید افقی را به کمتر از یک کیلومتر رسانده است. شدت توفان در ایستگاه سرپل ذهاب بسیار بالا بوده و در ساعت‌های اولیه این روز دید افقی به ۲۰۰ متر کاهش یافته است. در ایستگاه‌های اهواز، بندرماشهر و بستان در روز ۷ ماه مه وقوع این توفان گزارش شده است که در ایستگاه بستان دید افقی به ۶۰۰ متر کاهش یافته است. شکل ۱۱ تصویر ماهواره‌ای رنگی واقعی در روز ۶ مه ۲۰۰۹ را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰. موقعیت نسبی چرخندهای حرارتی اثرگذار در توفان‌های گردوغبار. این شکل یک طرحواره است که در راستای نمایان ساختن موقعیت چرخندهای حرارتی شکل گرفته روی منطقه در زمان رخداد توفان‌های گردوغبار ترسیم شده است.



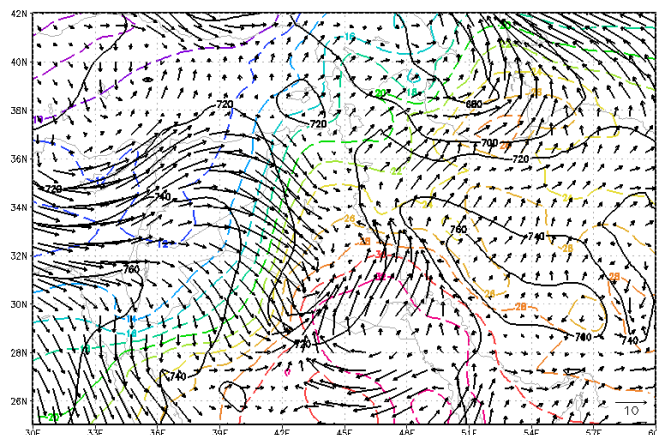
شکل ۱۱. تصویر ماهواره‌ای رنگی واقعی در روز ۶ مه ۲۰۰۹



شکل ۱۲. وضعیت همدیدی در سطح زمین. تابع جبهه‌زایی (پس‌زمینه رنگی)، فشار سطح دریا (کنتورهای ممتد، هکتوپاسکال) و بردار باد (متر بر ثانیه) در ساعت ۰۰ هماهنگ جهانی در روز ۰۶ مه ۲۰۰۹

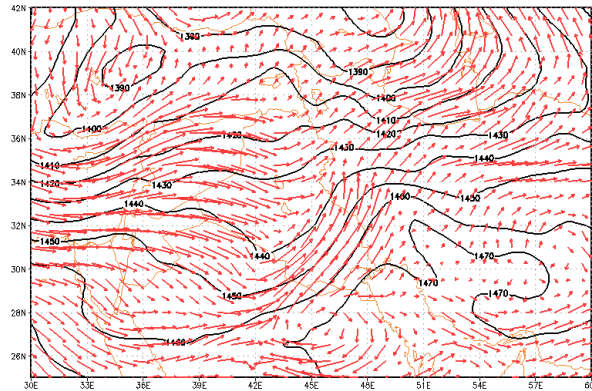
مطابق شکل ۱۲، یک چرخند با فشار مرکزی ۱۰۰۴ هکتوپاسکال در ساعت ۰۰ هماهنگ جهانی در روز ۶ ماه مه سال ۲۰۰۹ در جنوب شرق عراق شکل گرفته است. جبهه سرد گسترده مربوط به این چرخند در غرب عراق، امکان ناپایداری و خیزش گردوغبار را فراهم آورده است.

در تراز ۹۲۵ هکتوپاسکال، ناوه مربوط به پربند ۷۲۰ متر تا شمال عربستان کشیده شده است (شکل ۱۳). پربند فوق خطوط هم‌دما در شرق و غرب عراق را قطع نموده است که جو کژفشار در این ساعت و ایجاد جبهه سرد و گرم نتیجه‌ای از همین کژفشاری بوده است. بردار باد در غرب عراق مخصوصاً در حوالی طول ۴۲ درجه شرقی با زاویه بالا خطوط هم‌دما و پربند هم‌ارتفاع را قطع کرده است که نشان‌دهنده فرا رفت هوای سرد است، فرا رفتی که با انتقال هوای خنک به عرض‌های جنوبی ایجاد جبهه را در پی داشته است.



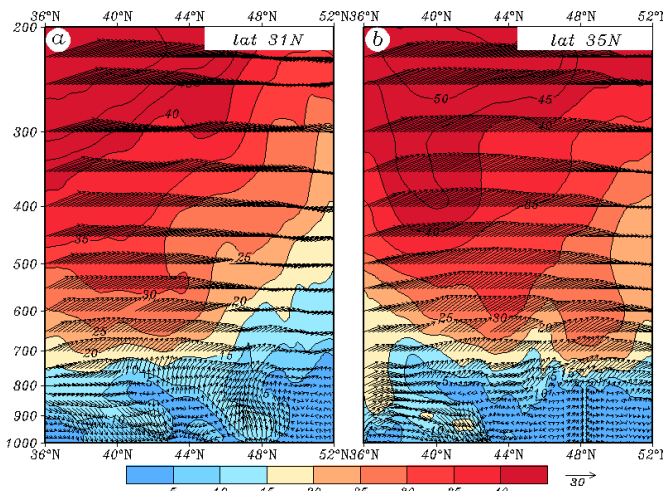
شکل ۱۳. وضعیت همدیدی در تراز ۹۲۵ هکتوپاسکال. ارتفاع ژئوپتانسیل (کنتورهای ممتد، متر)، دما (کنتورهای خط‌چین، دما) و بردار باد (متر بر ثانیه) در ساعت ۰۰ هماهنگ جهانی در روز ۰۶ مه ۲۰۰۹.

مطابق شکل ۱۴، یال راست ناوه مربوط به پربندهای ۱۴۴۰ و ۱۴۵۰ متر در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال روی منطقه چرخندی سطح زمین واقع شده است که به تقویت این چرخند کمک کرده است؛ اما همتایی برای این چرخند در تراز فوق وجود ندارد، یا به عبارتی این چرخند در ترازهای بالا حضور نداشته است.



شکل ۱۴. ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال به همراه بردار باد برای ساعت ۰۰ هماهنگ جهانی در روز ۶ مه ۲۰۰۹.

طبق شکل ۱۵، نفوذ رودباد جنب‌حاره به سطوح پایین جو سبب شده است در برخی نواحی مثل حوالی طول ۴۲ درجه شرقی بیشینه سرعت باد در عرض ۳۵ درجه شمالی در ساعت ۰۰ هماهنگ جهانی در روز ۶ ماه مه سال ۲۰۰۹ به بیش از ۱۵ متر بر ثانیه برسد.



شکل ۱۵. نیمرخ بردار و سرعت باد در سطوح مختلف جو برای ساعت ۰۰ هماهنگ جهانی در روز ۶ مه ۲۰۰۹ در عرض جغرافیایی (a) ۳۱ و (b) ۳۵ درجه شمالی.

## ۶ نتیجه‌گیری

در مورد توزیع زمانی رخداد توفان‌های گردوغبار ناشی از چرخندهای دینامیکی، می‌توان گفت که تنها ۷ مورد (از ۴۷ مورد کل) در فصل گرم، ۶ مورد در فصل سرد و بقیه موارد در فصول بهار و پاییز رخ داده است، به طوری که حدود ۷۰ درصد از رخدادها مرتبط با چرخند دینامیکی در ماه‌های مارس تا ژوئن بوده است. از این درصد نیمی مربوط به ماه آوریل بوده است. وقوع بیشینه رخدادها مربوط به ماه آوریل با یافته‌های الخلفاوی و آیوشیا (۲۰۲۴) مبنی بر مهیا بودن شرایط جوی عراق در ماه‌های آوریل و مارس برای وقوع توفان‌های تندری همخوانی دارد، ایشان بر این باورند که در ده سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۹ میلادی حدود ۵۰ درصد توفان‌های تندری (در سه بخش شمال شرق عراق، مرکز و جنوب شرق آن) در این دو ماه به وقوع پیوسته است، بااینکه مطالعه فوق توفان‌های تندری را بررسی نموده به فعالیت سیستم‌های کم‌فشار در ماه‌های فوق و اثرگذاری آنها در سایر پدیده‌های جوی تأکید نموده است. از نظر مکانی ۵۰ درصد توفان‌های تندری بررسی‌شده مربوط به مرکز و جنوب شرق عراق بوده



که از این بعد نیز بین نتایج پژوهش حاضر با این مطالعه همخوانی و انطباق وجود دارد. بیشترین رخداد وقوع چرخند دینامیکی در سال‌های ۱۹۹۴، ۲۰۰۷، ۲۰۰۸ و ۲۰۱۰ بوده است. در نیمی از موارد، چرخند ایجاد شده در نواحی مرکزی عراق و بالأخص دریاچه‌های مرکزی ثرثار، رزازه و حبابیه باعث ایجاد توفان گردوغبار در منطقه شده است. در ۲۵ درصد از توفان‌های رخ داده ناشی از چرخند دینامیکی، چرخند شکل‌گرفته در شمال غرب عراق-شمال شرق سوریه (در مواردی جنوب ترکیه نیز نقش داشته است) دلیل اصلی خیزش گردوغبار بوده است. در حدود ۱۷ درصد موارد، چرخند شکل‌گرفته در جنوب شرق عراق- جنوب غرب ایران- کویت باعث ایجاد یک توفان گردوغباری بوده است. قابل‌ذکر است که در مطالعه الخلفاوی و آیوشیا (۲۰۲۴) نیز از موارد مربوط به توفان تندی در دوره موردبررسی ایشان ۱۷ درصد در فرودگاه بصره به ثبت رسیده بوده است، اینکه سهم جنوب شرق عراق در این نوع اغتشاشات جوی با سهم کم‌فشارهای شکل‌گرفته در این منطقه و اثر آن در فعالیت توفان‌های گردوغباری منطقه مشابه است، تصدیقی بر نتایج این مطالعه (تأکید بر سهم کمتر جنوب شرق عراق نسبت به مرکز عراق) است. در ۷ درصد باقی‌مانده، چرخندهای دینامیکی در شمال عراق یا شمال عربستان باعث به وجود آمدن یک توفان گردوغبار بوده است. در توفان‌های ناشی از وقوع چرخند دینامیکی در منطقه، بیشترین خیزش گردوغبار از کانون‌های غربی و جنوب غربی در کشور عراق بوده است. حوالی دریاچه‌های مرکزی و مخصوصاً دریاچه ثرثار در ۴۰ درصد از توفان‌های رخ داده از این نوع اثر داشته است. در الگوی تراز میانی جو در ۴۲ درصد موارد کم ارتفاع بریده یا هسته کم ارتفاع در بندال‌های امگا، رکس یا دوقطبی تأثیر مستقیم (۱۰ درصد در عراق یا نزدیک منطقه خیزش) یا غیرمستقیم (ناوهای که هسته کم ارتفاع در آن قرار گرفته است) در چرخند سطحی داشته است. در ۳۷/۵ درصد موارد، قرارگیری محور یا یال راست ناوه در غرب چرخند سطحی باعث ریزش هوای سرد عرض‌های بالاتر به عرض‌های پایین‌تر و تقویت چرخند سطحی شده است. علاوه بر اهمیت نقش الگوی ترازهای فوقانی بر تقویت چرخند سطحی، سازوکار خیزش گردوغبار در چرخند سطحی سبب تسهیل ورود گردوغبار به سطوح فوقانی می‌شود و انتقال بیشتر گردوغبار از طریق این سطوح را در پی دارد. المطیری و همکاران (۲۰۲۳) نیز بر اثرگذاری الگوهای سطح بالا بخصوص اثر قوی ناوهای عمیق در تشدید سازوکار توفان‌های گردوغبار شکل‌گرفته در منطقه تأکید نموده‌اند. رئیس‌پور و همکاران (۱۳۹۲) معتقدند که در بازه ۱۵ ساله (۱۹۹۷-۲۰۱۱) از بررسی ۳۳۳ مورد توفان گردوغباری مت‌اثرکننده جنوب غرب ایران در ۱۷ درصد نقش کم ارتفاع بریده غالب بوده است و بیشترین اثرگذاری الگوی فوق در ماه آوریل رخ داده است. نتایج مطالعه حاضر در راستای مطالعه ایشان و تأییدی بر نتایج آن است.

الگوی چرخند حرارتی ۲۶ مورد توفان گردوغباری را شامل شده است که مربوط به ماه‌های ژانویه تا مه بوده است و تنها ۲۳ درصد در فصل گرم (ماه ژوئن و سپتامبر) به وقوع پیوسته‌اند. در چرخند حرارتی، بیشینه فراوانی مربوط به سال ۲۰۰۸ بوده است. در نزدیک به ۶۰ درصد موارد، چرخند حرارتی در جنوب شرق عراق- جنوب غرب ایران- کویت-شمال شرق عربستان و شمال خلیج فارس شکل‌گرفته است. اهمیت کم‌فشار حرارتی سطح زمین در چرخه گردوغبار، چهارچوب مکانی آن در نزدیک خلیج فارس و نحوه فعالیت آن در فصل گرم در مطالعه طاووسی و همکاران (۱۳۸۹) نیز موردبررسی و تأکید قرار گرفته است که با نتایج این مطالعه همخوانی دارد. همچنین العباسی و همکاران (۲۰۲۳) نیز کم‌فشارهای حرارتی در شمال عربستان را سیستم جوی غالب در چرخه گردوغبار بهاره این منطقه برشمارده‌اند. توفان‌های ناشی از وقوع چرخند حرارتی در منطقه در مقایسه با توفان‌های ناشی از چرخند دینامیکی از شدت پایین‌تری برخوردار می‌باشند، این امر به ماهیت و خصوصیات نهادی متفاوت این دو سیستم برمی‌گردد، در چرخند دینامیکی حرکات بالاسو و تقویت تاوایی حجم بیشتری از گردوغبار را برداشت نموده و علاوه بر آن انتقال گردوغبار به‌صورت عمودی تسهیل شده و با ورود به لایه‌های فوقانی جو امکان گسترش

در مناطق بیشتری را دارد اما در چرخند حرارتی این گونه نیست. کانون‌های واقع در نیمه جنوبی کشور عراق، شمال عربستان، کویت و جنوب غرب ایران در خیزش گردوغبار در این مراکز اثرگذارتر از بقیه مناطق بوده است.

## تقدیر و تشکر

این مقاله حامی مالی نداشته است.

## References

- Al-Abbasi, K. A., Labban, A. H., & Awad, A. M. (2023). Synoptic characteristics of the spatial variability of spring dust storms over Saudi Arabia. *Atmosfera*, 37.
- Alijani, B., (2009). Synoptic Climatology, SAMT Publication. [In persian]
- Alizadeh, T. and Rezai Banafsheh, M. and Sharifi, R. (1400). Tracking and simulating dust storms at different levels of Kermanshah atmosphere using HYSPLIT and WRF-chem model, case study: dust storm October 26-28, 2018. *Environmental Science Studies*, 6(4), 4266-4279. [In persian]
- Alizadeh-Choobari O, Ghafarian P, Oowlad E. (2016). Temporal variations in the frequency and concentration of dust events over Iran based on surface observations. *International Journal of Climatology*. 36, 2050-206.
- Al-Khulaifawi, I.A., Ioshpa, A., (2024), Monitoring of monthly dynamics of thunderstorm activity in Iraq. *Izvestiya of Saratov University. Earth Sciences*, 24(1), 4-10.
- Al-Mutairi, M., Abdulhaleem L., Abdeldym, A., Alkhoully, A., Abdel Basset, H., Morsy, M., (2023), Diagnostic Study of a Severe Dust Storm over North Africa and the Arabian Peninsula, *Atmosphere* 14(2): 196.
- Al-Ourabi, H., & Sharba, H. (2019). Synoptic study of dust storm over Middle East during September 2015. *Damascus University Journal for the Basic Sciences*, 35(1), 111-132.
- Azizi Gh., Shamsipour A.A., Miri M., Safarrad T. (2012). Synoptic and remote sensing analysis of dust events in southwestern Iran. *Nat Hazards*. 64, 1625-163 .
- Azizi, GH. and Shamsipour, A.A. and Miri, M. and Safarrad, T. (2011). Statistical -synopsis analysis of the dust phenomenon in the western half of Iran. *Ecology*, 38(63), 123-134. [In persian]
- Beyranvand A., Azizi Gh., Alizadeh-Choobari O., Darvishi Bolorani A. (2019). Spatial and temporal variations in the incidence of dust events over Iran. *Nat Hazards*. 97, 229-241.
- 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 Geograghy, University of Thenran. [In persian]

- Beyranvand, A., Azizi, G., Alizadeh, O., Darvishi Bolorani 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>
- Cao H., Amiraslani F., Liu J., Zhou N. (2015). Identification of dust storm source areas in West Asia using multiple environmental datasets. *Science of the Total Environment*. 502, 224-235 .
- Darvishi Bolorani A., Kazemi Y., Sadeghi A., Nadizadeh Shorabeh S., Argany M. (2020). Identification of dust sources using long term satellite and climatic data: A case study of Tigris and Euphrates basin. *Atmospheric Environment*, 224, 117299.
- Darvishi Bolorani A., Nabavi S.O, Bahrami H.A., Mirzapour F., Kavosi M., Abasi E., Azizi R. ( 2014). Investigation of dust storms entering western Iran using remotely sensed data and synoptic analysis. *Journal of Environmental Health Science & Engineering*. 12, 1-12.
- Fallah Ghalhori, GH. A., (2011), Essentials and fundamentals of meteorology, Climatology Research Institute Publication. [In persian]
- Fiedler, S., Schepanski, K., Knippertz, P., Heinold, B., & Tegen, I. (2013). How important are cyclones for emitting mineral dust aerosol in North Africa? *Atmospheric Chemistry & Physics Discussions*, 13(12).
- Fu, P., Huang, J., Li, C., Zhong, S., (2008). The properties of dust aerosol and reducing tendency of the dust storms in northwest China. *Atmospheric Environment* 42, 5896e5904.
- Gómez, M., Álvarez, E., Carretero, J. C., Pérez, B., Rodríguez, I., Serrano, O., & Sotillo, M. G. (2002). Oceanographic and atmospheric analysis of the 10-16 November 2001 Storm in the Western Mediterranean. *4th EGS*, 85, 5.
- Jansa, A., Alpert, P., Buzzi, A., Arbogast, P., Doyle, J., Hoinka, K. P. & Speranza, A. (2001). Cyclones that Produce High Impact Weather In The Mediterranean, *MEDEX* (Phase 1).
- Khoshakhlagh, F., Najafi, M. S., & Samadi, M. (2012). An Analysis on Synoptic Patterns of Springtime Dust Occurrence in West of Iran. *Physical Geography Research Quarterly*, 44(2), 99-124. [In persian]
- Klein, W. H. (1957). Principal tracks and mean frequencies of cyclones and anticyclones in the Northern Hemisphere. *US Weather Bureau Research Paper*.
- Kok, J. F., Adebijyi, A. A., Albani, S., Balkanski, Y., Checa-Garcia, R., Chin, M., ... & 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(10), 8169-8193.
- Lashkari, H. (2014). *Dynamic Climatology*, Shahid Beheshti University Publications, first edition. [In persian]

- Lashkari, H. and Saboui, M. (2012). Synoptic analysis of dust storm patterns in Khuzestan province. *Scientific-Research Quarterly of Geographical Information "Sephar"*, 22 (87), 32-38. [In persian]
- Lionello, P., Bhend, J., Buzzi, A., Della-Marta, P. M., Krichak, S. O., Jansa, A., ... & Trigo, R. (2006). Cyclones in the Mediterranean region: climatology and effects on the environment. In *Developments in earth and environmental sciences (Vol. 4, pp. 325-372). Elsevier.*
- Mahowald, N., Albani, S., Kok, J.F., Engelstaeder, S., Scanza, R., Ward, D.S., Flanner, M.G., (2014). The size distribution of desert dust aerosols and its impact on the Earth system. *Aeolian Res.* 15, 53-71.
- 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.*
- Miller, R.L., Knippertz, P., Pérez García-Pando, C., Perlwitz, J.P., Tegen, I., (2014). Impact of Dust Radiative Forcing upon Climate, in: Knippertz, P., Stuut, J.-B.W. (Eds.), *Mineral Dust: A Key Player in the Earth System.* Springer Netherlands ,*Dordrecht*, pp. 327-357.
- Miri, M. and Azizi, Gh. and Shamsipour, A.A. (2013). Identification of summer and winter patterns of dust entering western Iran. *Geography and environmental planning.* 25(4). 203-220. [In persian]
- Moridnejad, A., Karimi, N., Ariya, P.A. Newly desertified regions in Iraq and its surrounding areas: Significant novel sources of global dust particles. *Journal of Arid Environments*, 116, 1-10.
- Nabavi, S.O., Haimberger, L., Samimi, C. (2016). Climatology of dust distribution over West Asia from homogenized remote sensing data. *Aeolian Res.* 21, 93-107.
- Parolari, A. J., Li, D., Bou-Zeid, E., Katul, G. G., & Assouline, S. (2016). Climate, not conflict, explains extreme Middle East dust storm. *Environmental Research Letters*, 11(11), 114013.
- Pettersen, S. (1956). *Weather analysis and forecasting.* Mac Graw Hill, New York.
- Radinović, D. (1987). Mediterranean cyclones and their influence on the weather and climate. *World Meteorological Organization.*
- Raispour, K. (2013). Synoptic, satellite climatology of dust storms in the west and southwest of Iran, doctoral dissertation in climatology, Supervisor: Mahmoud Khosravi, University of Sistan and Baluchistan. [In persian]
- Raispour, K. and Khosravi, M. and Taosi, T. and SharifiKia, M. (2012). Investigating the role of cut off low pressure systems in the formation of widespread dusts in the southwest of Iran, *the first national hydrometeorological conference*, Kerman. [In persian]

- Raispour, K., Khosravi, M., Tavosi, T., Sharifikiya, M., (2013). Studying the role of cut off low systems information of broad dusts in weastern south of Iran. The first national climatology conference of Iran. Kerman. Iran. [In persian]
- Rasouli, A.A. and Sari Saraf, b. and Mohammadi, G.H. (1390). Trend Analysis of climatic phenomenon of dust in the west of the country in the last 55 years by using non-parametric statistical methods, *Natural Geography*, fourth year, number 11-16. [In persian]
- Shao, Y.P., et al., (2011). Dust cycle: An emerging core theme in Earth system science. *Aeolian Research* 2, 181-204.
- Solomos, S., Ansmann, A., Mamouri, R. E., Biniotoglou, I., Patlakas, P., Marinou, E., & Amiridis, V. (2017). Remote sensing and modelling analysis of the extreme dust storm hitting the Middle East and eastern Mediterranean in September 2015. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(6), 4063-4079.
- Tavosi, T., Khosravi, M., Raispour, K., (2010). Synoptic analysis of dust storms at Khozestan. *Geography and Development*, 8(20), 98-117. doi: 10.22111/gdij.2010.600. [In persian]
- Tavousi, T. and Khosravi, M. and Raispour, K. (1389). Synoptic analysis of dust systems in Khuzestan province. *Geography and Development*, 8(20), 97-118. [In persian]
- Tavousi, T. and Zahrai A. (2012). Time series modeling of dust phenomenon in Ahvaz city. *Geographical Research*, 28(2): 159-170. [In persian]
- Tegen, I., Fung, I., (1994). Modeling of mineral dust in the atmosphere: sources, transport, and optical thickness. *Journal of Geophysical Research* 99, 897e914.
- Yu, Y., Notaro, M., Liu, Z., Wang, F., Alkolibi, F., Fadda, E., Bakhryj, 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 .
- Zoljoodi M., Didevarasl A., Ranjbar Saadatabadi A. (2013). Dust Events in the Western Parts of Iran and the Relationship with Drought Expansion over the Dust-Source Areas in Iraq and Syria. *Atmospheric and Climate Sciences*. 3, 321-336.
- Zulfighari, H. and Abedzadeh, H., (2004). Synoptic analysis of dust systems in western Iran, *Geography and Development*, No. 6, 173-187. [In persian]
- Zulfighari, H. and Masumpour Samakosh, J. and Shaygan Mehr, sh. and Ahmadi, M. (2016). Synoptic analysis of dust storms in the western regions of Iran during the years 1384 to 1388 (case study: the widespread wave of July 1388). *Geography and Environmental Planning*, (3)22, 3-17. [In persian]