

Original Research Article

Investigating the atmospheric mechanism of severe dust events in southeast Iran

Tahmina Chehrehara Ziabri¹, Somayeh Hajivand paydari^{2*}

¹Assistant professor, Department of Geography, Payam Noor University, Iran

²PhD student, Department of Geography, Kharazmi University, Tehran, Iran



10.22034/grd.2025.22104.1632

Received:

September 11, 2024

Accepted:

June 03, 2025

Keywords:

Severe dust, Atmospheric patterns, Northern flow, Southeast Iran

Abstract

In a study aimed at examining the atmospheric conditions influencing severe dust storms in southeastern Iran, the data collected from 12 satellite stations in the region from 2000 to 2020 were analyzed. The periods with severe dust were identified based on the horizontal visibility thresholds of 200 and 100 meters for each station. Subsequently, the atmospheric conditions were analyzed using the data from the European Center for Medium-term Weather Forecasts (ECMWF) ERA5, focusing on wind components, geopotential height, and sea level pressure.

The analysis of the synoptic maps revealed three dominant meteorological patterns influencing the weather conditions during severe dust occurrences in the region. The patterns included the presence of a northern current, increased wind speeds in central, eastern, and northeastern Iran, strengthening of the middle-level pressure in Iran, and the formation of a negative convection core. Additionally, the formation of a low-altitude cell in southern Afghanistan and northern Pakistan contributed to the movement of dust particles to the region.

The interaction of gyre and eddy currents in the region, along with the dominance of a southerly current, facilitated the transport of dust particles from the Strait of Hormuz to the region. The study identified three primary dust control centers in southeastern Iran, located in western Afghanistan, the Desert Plain, and the eastern Arabian Peninsula.

In conclusion, the study highlights the importance of understanding atmospheric patterns and currents in predicting and managing severe dust events in the region. Key factors such as wind patterns, pressure systems, and the geographical features of the neighboring countries play a significant role in the transportation and distribution of dust particles in southeastern Iran.

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:** Somayeh Hajivand paydari

Address: Department of Geography, Kharazmi University, Tehran

Email: Sayeh9294@gmail.com

Extended Abstract

1. Introduction

Dust is one of the common phenomena in arid and semi-arid regions. This phenomenon annually introduces several million tons of soil into the atmosphere (Broumandi & Bakhtiarpour, 2015). It has an important role in the climate system, atmospheric radiation and hydrological cycle (Choobari et al., 2014; Shao et al., 2011).

A dust storm is a complex process that is under the interaction of atmospheric systems and is basically caused by conditions such as high wind speed, bare soil and dry air (Broghani et al., 2016). In recent years, pollution caused by dust particles has become one of the environmental problems, especially in developing countries.

Investigations of the meteorological statistics of Zabul, Zahedan, Mirjaveh and Khash stations, which are located in the northern half of Sistan and Baluchistan Province, showed that, whenever there is a thermal low pressure system in the Sistan plain region, it leads to dust storms. Also, sand has increased rapidly, and dust particles from the dry and clay soils of Sistan region remain suspended for hours in the skies of the cities of Zahedan, Mirjaveh and Khash (Shahriari & Mohammadi, 2014).

2. Research Methodology

In order to investigate the dusty days in the southeast of Iran, the data of 12 synoptic stations located in the region in the period of 2000-2020 were used. The World Meteorological Organization definition was used to determine the dusty days. According to the definition proposed by this organization, the occurrence of dust in terms of horizontal visibility is divided into four categories: weak dust with visibility less than 10 km, moderate dust with visibility between 1 and 10 km, severe storm with visibility between 200 and 1000 meters, and very severe storm with less visibility (Kaskautis, 2007).

Since the data collected in the mentioned stations were monitored for three hours and eight times a day, first, in general, in all hours in the mentioned time period, the frequency of all the dust particles reported by the meteorological stations was recorded and then the storm. The winds in which the horizontal visibility was below 200 and 100 meters and were reported in more than 70% of the stations were classified.

3. Results and discussion

The obtained results have shown that, in the first pattern, a deep trough with a northeast-southwest axis has been formed over central Iran. At the same time, a strong positive eddy current has covered the east and center of Iran. The existence of such strong instability in the region has caused a strong pressure gradient to occur at the lower levels of the atmosphere, and, as a result, it has led to the rise of dust from the dry areas and its flow into the hole of central Iran.

In the second model, a ridge with a height of 5,760 geopotential meters is located on central Iran, which caused the negative flow to occur from the southern slopes of Alborz to the southern Oman Sea. The support of this eddy current in the region is associated with the eddy current located in the eastern half of the country, which continues from the east of Razavi Khorasan to the northeast of Sistan and Baluchistan. On the western side of the mentioned ridge, a 15-degree geographical trough has been created, which covers western Iran with a north-south axis. This situation plays an important role in intensifying the counterclockwise flow over central Iran. The third pattern can also be recognized by the high ridge formed on the country. In this system, the dominance of negative convection flow has caused dust particles to move from areas with maximum negative convection. Thus, with the increase of negative convection, which is associated with a small core over the northeast of

Kerman, the currents entering the Jazmurian hole have become northeast, and this has played a key role in the transfer of particles from desert areas to the region. Also, by examining the wind vector, it was observed that most of the currents are from north to south, which affects most of the western areas of Pakistan.

On the west side of Khorasan, a core of maximum velocity has been formed, which is determined by checking the direction of the air flow. This is associated with the intensity of the wind and its convergence in the central Iran region and the Jazmorian crater with periodic dust clouds with low horizontal visibility.

4. Conclusion

Dust centers can be divided into four areas based on AOD values and air mass tracking. Thus, in the first pattern, the main dust transferred to the region can be attributed to the deserts of central Iran and the southern regions of Khorasan and the desert plain. In the second pattern, most of the dust enters the region from the north and northwest of Afghanistan. The third pattern is a pair, so there are two northerly currents that originate from Afghanistan and its northern regions, and the other that enters the region from the Arabian Peninsula and in the southeastern parts of Iran. These two air masses converge, and dust flows and accumulates. Based on the research of Lotfi Nesab et al. (1400) and Soleimani Sardo et al. (1400), the dust in the southeast of Iran has a different atmospheric structure such as northern currents. It also has a border and cross-border origin, which has been mentioned in the present research.

مقاله پژوهشی

بررسی سازوکار جوی حاکم بر رخداد گردوغبارهای شدید جنوب شرق ایران

تهمینه چهره‌آرا ضیابری^۱، سمیه حاجی‌وندپایداری^{۲*}

^۱ استادیار گروه جغرافیا دانشگاه پیام نور، ایران.

^۲ دانشجوی دکتری گروه علوم جغرافیای دانشگاه خوارزمی تهران، ایران.

doi 10.22034/grd.2025.22104.1632

چکیده

طوفان‌های گردوغبار یکی از پدیده‌های جوی شدید هستند که در مناطق خشک و نیمه‌خشک جنوب شرق ایران به‌طور مکرر رخ می‌دهند. این پدیده‌ها علاوه بر تأثیرات منفی بر کیفیت هوا و سلامت عمومی، موجب اختلال در فعالیت‌های اقتصادی و زندگی روزمره مردم می‌شوند. هدف از این مطالعه، بررسی سازوکارهای جوی حاکم بر رخداد گردوغبارهای شدید در این منطقه و شناسایی الگوهای غالب هواشناسی و کانون‌های اصلی تولید و انتقال ذرات است. برای این منظور، از داده‌های ۱۲ ایستگاه همدیدی واقع در منطقه طی بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۰ میلادی استفاده شد. دوره‌های همراه با گردوغبار شدید بر اساس دید افقی زیر ۲۰۰ و ۱۰۰ متر شناسایی شدند. داده‌های جوی از مرکز میان‌مدت پیش‌بینی‌های جو اروپا (ECMWF) بخش ERA5 با تفکیک افقی ۰٫۲۵×۰٫۲۵ درجه جغرافیایی اخذ شدند و نقشه‌های همدیدی مربوط به این دوره‌ها تحلیل شدند. همچنین، برای شناسایی مراکز و مسیر انتقال گردوغبار از مقادیر AOD سنجنده MODIS و مدل لاگرانژی پسگرد ذرات معلق (HYSPLIT) استفاده شد. نتایج نشان داد که سه الگوی هواشناسی غالب در زمان رخداد این پدیده وجود دارند. این الگوها شامل جریان شمالی، تقویت پراارتفاع تراز میانی ایران، تشکیل هسته‌های تاوایی منفی و وجود یک جریان زوجی چرخندی-واچرخندی هستند که با حاکمیت جریان جنوبی، ذرات گردوغبار را از روی تنگه هرمز به منطقه منتقل می‌کنند. همچنین، سه کانون اصلی تولید گردوغبار شناسایی شدند که در غرب افغانستان، دشت کویر و شرق شبه‌جزیره عربستان قرار دارند. این مطالعه نه‌تنها به درک بهتر سازوکارهای جوی حاکم بر رخداد گردوغبارهای شدید کمک می‌کند، بلکه می‌تواند در برنامه‌ریزی‌های مدیریتی برای کاهش اثرات این پدیده و ارتقاء سیستم‌های هشدار زودهنگام مورد استفاده قرار گیرد.

تاریخ دریافت:

۲۱ شهریور ۱۴۰۳

تاریخ پذیرش:

۱۳ خرداد ۱۴۰۴

کلیدواژه‌ها:

گردوغبار شدید،
الگوهای جوی،
جریان شمالی،
جنوب شرق ایران،
طوفان

۱ مقدمه

گردوغبار یکی از پدیده‌های معمول و در گروه بزرگ‌ترین مشکلات جوی محیطی در مناطق خشک و نیمه‌خشک است. در سال‌های اخیر آلودگی ناشی از ذرات گردوغبار به یکی از مشکلات زیست‌محیطی مخصوصاً در کشورهای درحال توسعه است. از طرفی این پدیده هرساله آثار مخربی برای ساکنان این مناطق در پی دارد (برومندی و بختیارپور، ۱۳۹۵). گردوغبار در مناطق خشک و نیمه‌خشک سالانه چندین میلیون تن خاک را به اتمسفر وارد می‌کند که نقش مهمی در سیستم آب و هوایی، میزان تابش اتمسفری و چرخه هیدرولوژیکی دارد (علیزاده چوباری و همکاران، ۱۳۹۳؛ شاو و همکاران، ۲۰۱۱).

Email: Sayeh9294@gmail.com

* نویسنده مسئول: سمیه حاجی‌وندپایداری

آدرس: گروه علوم جغرافیای دانشگاه خوارزمی تهران.

¹ (AlizadehChoobari et al., 2014; Shao et al., 2011).

طوفان گردوغبار فرایند پیچیده‌ای است که تحت فعل‌وانفعالات سامانه‌های اتمسفری بوده و اساساً شرایطی مانند سرعت زیاد باد، خاک برهنه و هوای خشک باعث به وجود آمدن آن می‌شود (بروغنی و همکاران، ۱۳۹۶). با توجه به این‌که ایران نیز در منطقه خشک و نیمه‌خشک قرار دارد، مطالعه این پدیده ضرورت دارد. شهریار و محمدی (۱۳۹۴) در تحقیقی به بررسی روند سری‌های زمانی پدیده گردوغبار در استان سیستان و بلوچستان با استفاده از روش‌های آماری ناپارامتری با استفاده از آمار هفت ایستگاه بالای ۲۰ سال دوره آماری (۲۰۰۸-۱۹۸۶) پرداختند. نتایج حاصل نشان داد که همه ایستگاه‌ها دارای روند صعودی می‌باشند؛ اما در ماه‌های گرم و خشک در تمامی ایستگاه‌ها روند صعودی بیشتر از ماه‌های دیگر سال بود. همچنین نتایج پژوهش نشان داد که حداکثر روند صعودی در فصل تابستان و پاییز با میزان سطح اطمینان ۹۹ درصد بود. بررسی‌های به‌عمل‌آمده از آمار هواشناسی ایستگاه‌های زابل، زاهدان، میرجاوه و خاش که در نیمه شمالی استان سیستان و بلوچستان واقع گردیده‌اند، این نکته مشخص شد که هرگاه در منطقه دشت سیستان یک سامانه کم‌فشار حرارتی ساکن باشد منجر به بروز طوفان‌های گردوخاک و شن با سرعت زیاد گردیده و ذرات گردوغبار حاصل از زمین‌های خشک و رسی منطقه سیستان در آسمان‌های شهرهای زاهدان، میرجاوه و خاش تا ساعت‌ها به‌صورت معلق باقی می‌ماند.

بررسی‌ها بیانگر این نکته بود که به دلیل کوهستانی بودن منطقه سیستان سامانه کم‌فشار در سیستان و پرفشار بر روی نواحی جنوبی‌تر شکل‌گرفته و این سامانه‌های مجاور هم باعث تشدید وضعیت معلق ماندن گردوغبار در منطقه گردیده است. نتایج بررسی روند و جهت آن برای فصول مختلف نشان داد که در سطح استان تنها بخش شرقی در محدوده ایستگاه‌های خاش و سراوان دارای روند معنی‌دار نبودند و سایر بخش‌ها استان دارای روند معنی‌دار بودند. کارگر و همکاران (۱۳۹۵) به شبیه‌سازی و تحلیل عددی طوفان گردوغبار شرق ایران پرداختند. نتایج مدل نشان داد که منطقه سیستان بخصوص بستر خشک تالاب هامون، چشمه اصلی طوفان گردوغبار است. همچنین در طول رخداد، با همگرا شدن جریانات شمالی و جنوبی بر روی شرق ایران، ایجاد بادهای شدید در ترازهای زیرین جو انتشار و افزایش غلظت گردوغبار و انتقال آن‌ها به نواحی جنوبی تا دریای عمان را در پی داشته است. به‌طورکلی سامانه‌های جوی و وضعیت ساختار سطح زمین (ساختار واقعی زمین و ساختاری که بر اثر دست‌کاری بشر حاصل‌شده است) از عوامل مؤثر در رخداد پدیده گردوغبار هستند.

خشک و نیمه‌خشک بودن ایران و قرارگیری در کمربند خشک و نزدیکی به پرفشار جنب حاره موجب کاهش بارش و کمبود رطوبت خاک خواهد شد که یکی از عوامل مؤثر در انتشار گردوغبار است. وزش باد و افزایش دما و شرایط توپوگرافیک محلی نیز از عوامل تشدیدکننده این پدیده مخرب می‌شود. بخش‌های وسیعی از کشور ازجمله که مناطق مرکزی ایران مانند یزد و همچنین جنوب شرق کشور مانند زابل واقع در سیستان و بلوچستان نیز تحت تأثیر طوفان شن و گردوغبار هستند، اما طوفان‌های این مناطق با گردوغبارهای مناطق غربی از نظر ذاتی و ساختاری متفاوت است. مناطق مرکزی و جنوب شرقی کشور عموماً دارای بافت کویری و خشک از منظر خاکشناسی بوده از نظر بارندگی نیز دارای میانگین سالانه به‌مراتب کمتر از میانگین کشور دارد و بیشتر تحت تأثیر بادهای موسمی یا به عبارتی بادهای ۱۲۰ روزه سیستان قرار دارند. نوع طوفان شن در این مناطق بیشتر است (سعادت‌آبادی و همکاران، ۱۳۹۵).

ابعاد طوفان‌های ناشی از بادهای ۱۲۰ روزه سیستان که ماسه و گردوغبارهای هامون صابری را در فصل خشک در مسیرهای طولانی تا صدها کیلومتر جابه‌جا می‌کنند تقریباً مشخص است؛ اما طوفان‌های سال‌های اخیر در جنوب غرب ایران، از طوفان‌های هستند که تبعات آن‌ها به‌تدریج نمود پیدا می‌کنند و نیاز به شناخت بیشتری دارند (جلالی و همکاران، ۱۳۹۶).

مطالعاتی که در ارتباط با فراوانی روزهای گردوغباری ایران انجام گرفته، نشان می‌دهد که چاله‌های مرکزی بیشترین تعداد روزهای گردوغباری را دارند، به طوری که در مناطق وزش بادهای ۱۲۰ روزه سیستان، فراوانی وقوع روزهای مذکور به بیش از ۱۵۰ روز در سال می‌رسد. در مناطق جنوب غربی و غرب کشور که در مجاورت بیابان‌های بزرگی همچون عراق، عربستان، سوریه و ... می‌باشند، میانگین روزهای گردوغباری نیز قابل توجه است که فراوانی وقوع آن در تیر و خرداد بیش از ماه‌های دیگر است (رئیس پور و همکاران، ۱۳۸۷). از تحقیقات بین‌المللی اخیر که در زمینه گردوغبار صورت گرفته می‌توان به موارد زیر اشاره نمود.

مالیا و همکاران^۱ (۲۰۱۷) با استفاده از مدل لاگرانژی گردوغبار که در یک محیط پیش‌بینی شده، استفاده شده است، به این نتیجه رسیدند که این مدل قادر به اندازه‌گیری یک رویداد گردوغبار بزرگ با یک تأخیر ۲ ساعته است. این نتایج نشان می‌دهد که چارچوب مدل‌سازی گردوغبار ارائه شده دارای پتانسیل تکرار رویدادهای گردوغبار گذشته، شناسایی مناطق منبع گردوغبار است و برای برنامه‌های پیش‌بینی کوتاه‌مدت استفاده می‌شود.

از تحقیقات اخیر که در زمینه گردوغبار در خارج از ایران صورت گرفته می‌توان به گاروفالید^۲ و همکاران (۲۰۲۲) اشاره نمود. آن‌ها به بررسی طوفان‌های گردوغبار صحرای شمال آفریقا پرداختند. نتایج حاکی از آن بود که انتقال گردوغبار از این منطقه زندگی جوامع انسانی مخصوصاً در بخش‌های کشاورزی را متأثر ساخته است. تان^۳ و همکاران (۲۰۲۲) طی یک بررسی بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۱ به بررسی خصوصیات گردوغبارهای آسیای شرقی پرداختند. نتایج نشان داد که خصوصیات گردوغبار شکل گرفته طی دوره مطالعاتی متأثر از گردش عمومی جو در غالب تغییرات آب و هوایی قرار گرفته است. در ایران نیز، در دوره‌ی سرد سال، فروندهای حاصل از بادهای غربی و دوره‌ی گرم سال سیستم‌های فشار سطح زمین و به خصوص کم‌فشار خلیج فارس مهم‌ترین عامل ایجاد گردوغبار در جنوب غرب ایران می‌باشند (رئیس پور و همکاران، ۱۳۸۹).

حیدری (۱۳۸۶) با استفاده از تحلیل همدیدی، سیکلون‌های بسته روی عراق و شمال عربستان را عامل اصلی ایجاد گردوغبار در استان کرمانشاه بیان می‌کند. خسروی و سلیقه (۱۳۸۴) علت شکل‌گیری طوفان‌های سریع با سرعت حدود ۸۰ نات در ثانیه در منطقه‌ی سیستان را، مجاورت منطقه‌ی چرخندگی مثبت بادهای غربی با زبانه‌ی کم‌فشار فرعی موسمی بیان نمودند. بادهای ۱۲۰ روزه تا سطوح بالای اتمسفر را با ذرات میکرونی غبارآلوده نموده و در موارد استثنایی تمرکز گردوغبار حتی تا ارتفاع ۲۰۰ هکتوپاسکالی مشاهده می‌شود (خسروی، ۱۳۸۹).

رئیس پور و علیجانی (۱۳۹۰) با استفاده از تحلیل همدیدی دست یافتند که هنگام بروز طوفان گردوغبار در دوره‌ی گرم سال، بر روی نقشه‌ی فشار تزار دریا، با تقویت کم‌فشار موسمی هند، دو مرکز کم‌فشار فرعی‌تری در محدوده‌ی جنوب پاکستان و جنوب افغانستان با فشار مرکزی کمتر از ۱۰۰۰ هکتوپاسکال بسته می‌شوند. در مقابل مرکز پرفشاری بر روی دریای خزر که عموماً فشار مرکزی آن بیش از ۱۰۲۰ هکتوپاسکال است مستقر می‌شود. در همین زمان تفاوت دمای سطح زمین منطقه‌ی سیستان و دریای خزر حدود ۲۰ درجه سانتی‌گراد است. اختلاف فشار و دمای شدید بین دو منطقه، منجر به بادهای شدید و گردوغبار می‌شود. آن‌ها همچنین بر اساس پردازش تصاویر ماهواره‌ای دریافتند، مهم‌ترین منابع گردوغبار، بسترهای خشکیده‌ی هامون‌های پوز، صابری و شرق هامون هیرمند هستند.

از تحقیقات اخیر در ایران نیز می‌توان به حاجی محمدی و همکاران (۱۳۹۸) اشاره نمود که با بررسی مکانیسم جوی حاکم بر رخداد گردوغبارهای شدید جنوب شرق ایران دریافتند نتیجه رخداد این پدیده حاصل تشکیل پر

¹ Mallia

² Garofalide

³ Tan

ارتفاع تراز میانی وردسپهر بر روی ایران و تشکیل هسته کم ارتفاع بر روی پاکستان بوده که سبب گسترش جنوب سوی رگه منفی تاوایی با جهتی شمال به جنوب در مرزهای شرقی ایران را در بر داشته است. از سایر مطالعات نیز می‌توان به پژوهش نامداری و همکاران (۱۳۹۹) اشاره کرد. ایشان به تحلیل تغییرات کانون‌های گردوغبار داخلی ایران در بیست سال اخیر پرداختند. نتایج تحقیق نشان داد علی‌رغم وضعیت اقلیمی نسبتاً یکسان، روند تغییرات در این کانون‌ها از الگوی مشابهی تبعیت نمی‌کند و روند تغییرات غبار خیزی در کانون‌های داخلی کشور تحت تأثیر عوامل پیچیده انسانی و غیرانسانی متغیر است. با استفاده از نتایج این تحقیق این امکان فراهم می‌گردد اطلاعات نسبتاً جامعی از روند تغییرات کانون‌های داخلی فراهم آید و وضعیت غبارخیزی کانون‌ها در آینده قابل پیش‌بینی گردد.

لطفی نسب و همکاران (۱۴۰۰) به مطالعه و تحلیل بادهای توأم با گردوغبار و فرساینده در استان کرمان باهدف ارائه تقویم پیش‌بینی و مدیریت کنترل گردوغبار پرداختند. نتایج نشان داد منشأ احتمالی گردوغبار فرامحلی همراه با بادهای با سرعت شش متر بر ثانیه و بیشتر در داخل استان و فرامحلی کمتر از شش متر بر ثانیه در خارج از استان (محل برداشت) شناسایی شد. باقرآبادی و معین‌آبادی (۱۴۰۰) به منشأیابی جهتی طوفان‌های گردوغبار شهر کرج پرداختند. نتایج حاکی از آن بود که جهت عمده ورود گردوغبار به شهر کرج از جهت‌های شمال غرب غربی، شمال غرب و غرب است و کشورهای عراق، سوریه و عربستان مبدأهای اصلی تشکیل گردوغبار ورودی به شهر کرج هستند. سلیمانی ساردو و همکاران (۱۴۰۰) گسیل و انتقال ذرات گردوغبار در منطقه جازموریان را موردبررسی قرار دادند. گردید نتایج نشان داد که گسیل گردوغبار حوزه جازموریان تحت تأثیر جریان‌های غربی به سمت مرز پاکستان و استان‌های سیستان و بلوچستان حرکت می‌کند و تالاب جازموریان به‌عنوان مهم‌ترین کانون گردوغبار در حوزه مورد مطالعه شناسایی شد. بروغنی و همکاران (۱۴۰۱) به پهنه‌بندی آسیب‌پذیری گردوغبار با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای و مدل‌های یادگیری ماشین پرداختند. نتایج نشان داد کاربری اراضی و خاک‌شناسی به‌عنوان مؤثرترین عوامل بر آسیب‌پذیری گردوغبار شناسایی شد.

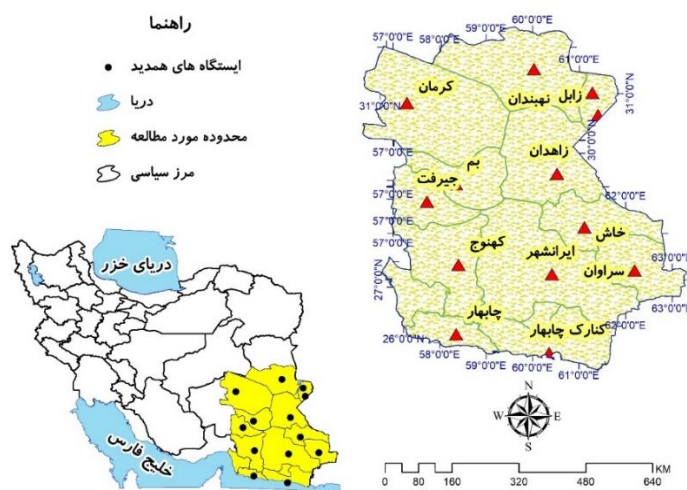
این مطالعه بر اهمیت تحلیل پدیده گردوخاک در مناطق حساس جغرافیایی مانند جنوب شرق ایران تأکید می‌کند و کاربردهای عملی متعددی از قبیل توسعه سیستم‌های هشدار زودهنگام، برنامه‌ریزی مدیریتی برای کاهش فرسایش خاک و بهبود کیفیت هوا را برجسته می‌کند. طوفان‌های گردوخاک علاوه بر آسیب به فعالیت‌های اقتصادی مانند کشاورزی و حمل‌ونقل، تأثیرات سلامتی جدی نیز دارند که شامل مشکلات تنفسی، آلرژی و فشار بر سیستم بهداشتی است. استفاده از داده‌های ECMWF، تصاویر ماهواره‌ای MODIS و مدل HYSPLIT در این تحقیق، امکان تحلیل دقیق‌تر الگوهای جوی، شناسایی کانون‌های گردوخاک و مسیر انتقال ذرات را فراهم می‌کند؛ بنابراین این مطالعه ضمن افزایش درک علمی از مکانیسم‌های گردوخاک، نقش مهمی در مدیریت اثرات این پدیده بر محیط‌زیست، اقتصاد و سلامت عمومی ایفا می‌کند.

۲ مواد و روش‌ها

به‌منظور بررسی روزهای گردوغباری در جنوب شرق ایران از داده‌های ۱۲ ایستگاه سینوپتیک واقع در منطقه در بازه زمانی ۲۰۲۰-۲۰۰۰ میلادی استفاده شد. برای تعیین روزهای غبارآلود از تعریف سازمان هواشناسی جهانی استفاده شد. بر اساس تعریف این سازمان وقوع گردوغبار از نظر میزان دید افقی به چهار طبقه گردوغبار ضعیف با دید کمتر از ۱۰ کیلومتر، گردوغبار متوسط با دید بین ۱ تا ۱۰ کیلومتر، طوفان شدید با دید بین ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ متر و طوفان خیلی شدید با دید کمتر از ۲۰۰ متر تقسیم‌بندی می‌شود (کاسکاووتیس^۱، ۲۰۰۷). از آنجایی که داده‌های

¹ Kaskaoutis33

برداشت شده در ایستگاه‌های مذکور به صورت ۳ ساعته و ۸ بار در روز پایش می‌شوند، ابتدا به صورت کلی در تمامی ساعات در بازه زمانی یادشده فراوانی تمامی گردوغبارهای گزارش شده از سوی ایستگاه‌های هواشناسی ثبت و در ادامه طوفان‌هایی که دید افقی زیر ۲۰۰ و ۱۰۰ متر بوده و به صورت فراگیر در بیش از ۷۰ درصد ایستگاه‌ها گزارش شده بود طبقه‌بندی شدند.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

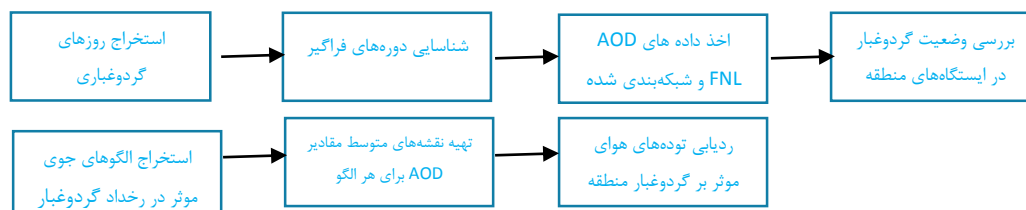
جدول ۱. کدهای هواشناسی مربوط به ثبت و گزارش رخداد پدیده گردوغبار

کد پدیده	پدیده گردوغبار	شرح پدیده
۶	گردوخاک معلق	گردوخاک معلق در هوا که در اثر طوفان شن و خاک نقاط خارج از ایستگاه به ایستگاه آمده است.
۷	گردوخاک	گردوخاک یا شنی که به وسیله باد در ایستگاه و یا در نزدیکی آن در ساعت دیدبانی بلند شده است.
۸	گردباد	گردبادهای تکامل یافته در خود ایستگاه یا اطراف آن
۹	طوفان ملایم یا متوسط	طوفان گردوخاک در ساعت دیدبانی در اطراف ایستگاه
۳۰	طوفان گردوخاک ملایم	طوفان ملایم یا متوسط گردوخاک یا شن - طی ساعت گذشته از شدت طوفان کاسته شده است.
۳۱	طوفان گردوخاک با ماسه ملایم	طوفان ملایم یا متوسط گردوخاک یا شن - طی ساعت گذشته شدت طوفان تغییری نکرده است.
۳۲	طوفان گردوخاک با ماسه ملایم	طوفان ملایم یا متوسط گردوخاک یا شن - طی ساعت گذشته بر شدت طوفان افزوده شده است.
۳۳	طوفان گردوخاک با ماسه شدید	طوفان شدید گردوخاک یا شن - طی ساعت گذشته از شدت طوفان کاسته شده است.
۳۴	طوفان گردوخاک با ماسه شدید	طوفان شدید گردوخاک یا شن - طی ساعت گذشته شدت طوفان تغییری نکرده است.
۳۵	طوفان گردوخاک با ماسه شدید	طوفان شدید گردوخاک یا شن - طی ساعت گذشته بر شدت طوفان افزوده شده است.

در ادامه برای تعیین حجم انتقالی گردوغبار به منطقه از مقادیر AOD ماهواره‌ای سنجنده MODIS نیز استفاده گردید. برای شناسایی الگوهای همدید از روش تحلیل خوشه‌ای برای شناسایی الگوهای غالب در زمان رخداد طوفان گردوغبار در منطقه استفاده شد. در این راستا روزهای توأم با گردوغبار شدید در منطقه بود استخراج شد

و در ادامه مقادیر ارتفاع ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ برای هر دوره گردوغباری دسته‌بندی شد. در ادامه با استفاده از تحلیل خوشه‌ای اقدام به الگوبندی جریان‌ات جوی در منطقه شد.

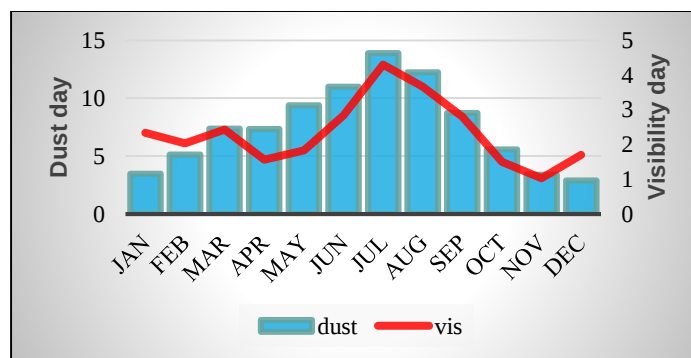
برای شناسایی الگوهای همدیدی از روش تحلیل خوشه‌ای برای شناسایی الگوهای غالب در زمان رخداد طوفان گردوغبار در منطقه استفاده شد. برای تحلیل‌های همدیدی نیز از داده‌های رقومی بازتحلیل، شامل؛ ارتفاع ژئوپتانسیل (Hgt)، مؤلفه باد مداری (u) و نصف‌النهاری (v) و فشار تراز دریا (SLP) برای سطوح استاندارد از مرکز اروپایی پیش‌بینی میان‌مدت جوی (ECMWF)^۱ بخش ERA5 با تفکیک ۰٫۲۵×۰٫۲۵ درجه جغرافیایی استفاده شد.



شکل ۲. نمودار مراحل انجام تحقیق

۳ بحث و نتایج

با استفاده از کدهای هواشناسی ثبت شده در ایستگاه واقع در منطقه، تعداد روزهای گردوغباری و دید افقی زیر ۲ کیلومتر استخراج شد. بررسی‌ها حاکی از آن بود که بیشترین تعداد روزهای گردوغبار همراه با گردوغبار متعلق به فصل تابستان و ماه جولای بوده و کمترین آن مربوط به دوره سرد سال و ماه دسامبر است. با توجه به شکل ۳ مشاهده شد که با افزایش تعداد روزهای گردوغباری بر تعداد روزهای همراه با دید افقی زیر ۲۰۰ متر افزوده شده است.

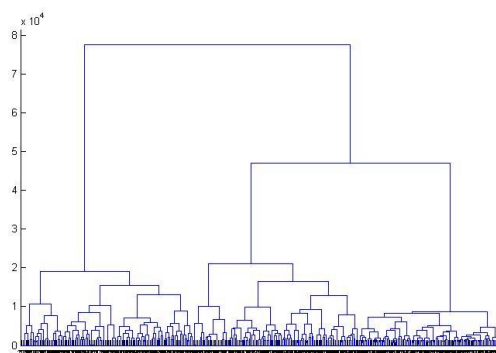
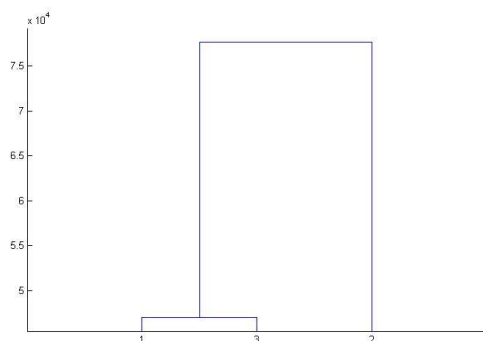


شکل ۳. متوسط روزهای همراه با گردوغبار و دید افقی زیر ۲ کیلومتر در منطقه

نتایج حاصل از تحلیل خوشه‌ای نشان داد که ۳ الگوی غالب هواشناختی در رخداد گردوغبارهای شدید منطقه حاکمیت دارند (شکل ۴). بدین منظور سعی بر آن شد تا پارامترهای جوی به صورت متوسط گیری شده برای هر الگو تهیه گردد. در همین راستا در بخش‌های مختلف سازوکار جوی حاکم در منطقه در بخش‌های گوناگون بررسی شد. بررسی توزیع ماهانه رخداد هر یک از الگوهای گردشی نیز نشان داد بیشینه درصد وقوع این نوع طوفان‌های گردوغبار در منطقه جنوب شرق ایران در الگوی نخست ماه‌های مارس، آوریل، ژوئن از درصد فراوانی بالاتری نسبت به سایر ماه‌ها برخوردارند. در الگوی دوم مشاهده شد که بیشینه درصد فراوانی به ترتیب مربوط به

¹ European Center for Medium – Range Weather Forecasts

ماه‌های آوریل، مارس و جولای است. در الگوی سوم نیز به ترتیب ماه‌های مارس، آوریل و جولای از بالاترین درصد وقوع این الگو حکایت دارد (جدول ۱).



الف: دارنمای کلی

ب: دارنمای مربوط به ۳ الگوی گردشی

شکل ۴. نمودار درختی تحلیل خوشه‌ای روزهای همراه با طوفان گردوغبار شدید در منطقه

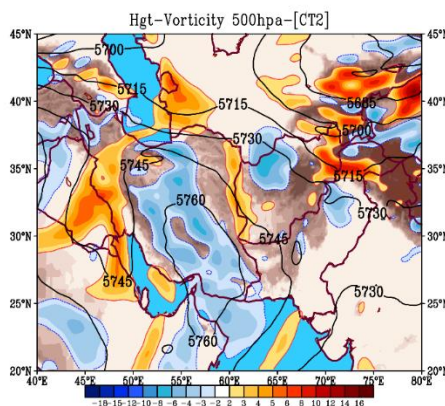
جدول ۱. توزیع ماهانه تعداد و درصد وقوع هریک از الگوهای گردشی در زمان رخداد طوفان گردوغبار شدید در منطقه

Month	Frequency Type 1(Day)	Percent Type 1(%)	Frequency Type 2(Day)	Percent Type 2(%)	Frequency Type 3(Day)	Percent Type 3(%)
Jan	۸	۶.۷	۸.۰	۶.۵	۱۰	۹.۹
Feb	۴	۳.۴	۳.۰	۲.۴	۲	۲.۰
Mar	۲۴	۲۰.۲	۲۰.۰	۱۶.۳	۱۹	۱۸.۸
Apr	۱۵	۱۲.۶	۲۱.۰	۱۷.۱	۱۷	۱۶.۸
May	۱۴	۱۱.۸	۱۵.۰	۱۲.۲	۹	۸.۹
Jun	۱۵	۱۲.۶	۱۰.۰	۸.۱	۶	۵.۹
Jul	۹	۷.۶	۱۶.۰	۱۳.۰	۱۴	۱۳.۹
Aug	۷	۵.۹	۸.۰	۶.۵	۸	۷.۹
Sep	۷	۵.۹	۹.۰	۷.۳	۶	۵.۹
Oct	۲	۱.۷	۳.۰	۲.۴	۱	۱.۰
Nov	۹	۷.۶	۷.۰	۵.۷	۵	۵.۰
Dec	۵	۴.۲	۳.۰	۲.۴	۴	۴.۰
Total	۱۱۹	۱۰۰.۰	۱۲۳.۰	۱۰۰	۱۰۱	۱۰۰.۰

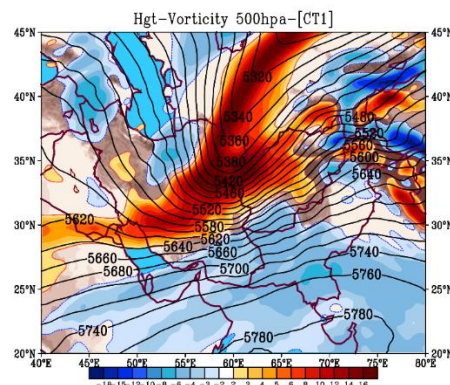
۳/۱ وضعیت ارتفاع ژئوپتانسیل و تاوایی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال

پس از استخراج روزهای همراه با گردوغبار شدید در منطقه، اقدام به شناسایی الگوهای غالب جوی در ترازهای مختلف در زمان رخداد این پدیده شد (شکل ۴). بررسی‌ها نشان داد ۳ الگوی گردشی به‌عنوان تیپ غالب در منطقه در ترازهای مختلف جوی حاکمیت دارند. در ابتدا به تحلیل وضعیت تراز میانی جوی پرداخته شد. بررسی‌ها نشان داد در الگوی اول ناه عمیقی با محور شمال شرق-جنوب غرب بر روی ایران مرکزی مستقرشده که ضمن آن جریان قوی تاوایی مثبت شرق و مرکز ایران را در بر گرفته است. وجود چنین ناپایداری قوی در منطقه سبب شده تا گرادیان شدید فشاری در ترازهای زیرین جو رخ داده و در نتیجه به خیزش گردوغبار از روی مناطق خشک و سرازیر شدن آن به چاله ایران مرکزی منجر گردد (شکل ۵ الف). در الگوی دوم پشته‌ای با ارتفاع ۵۷۶۰ ژئوپتانسیل متر بر روی ایران مرکزی مستقرشده که این شرایط سبب شده تا جریان تاوایی منفی از دامنه‌های جنوب البرز تا جنوب دریای عمان به وجود آید. حامیت این جریان واچرخندی بر روی منطقه با جریان چرخندی

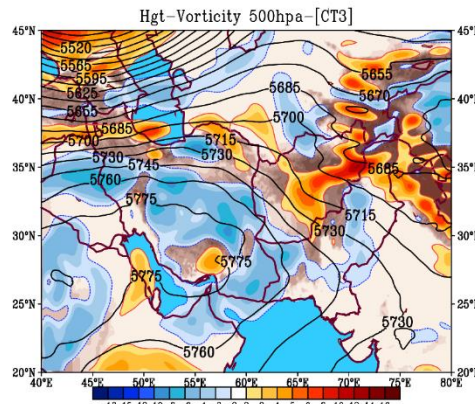
واقع در نیمه شرقی کشور همراه بوده که از شرق خراسان رضوی تا شمال شرق سیستان و بلوچستان ادامه دارد. در جانب غربی پشته مذکور نیز ناوه ۱۵ درجه جغرافیایی به وجود آمده که با محوری شمالی-جنوبی غرب ایران را در بر گرفته است. این وضعیت در تشدید جریان پادساعتگردی بر روی ایران مرکزی نقش مهمی را ایفا می‌کند (شکل ۵ ب). الگوی سوم نیز با پر ارتفاعی که بر روی کشور تشکیل شده قابل تشخیص است. در دل این سامانه حاکمیت جریان تاوایی منفی سبب شده تا انتقال ذرات گردوغبار از مناطق با بیشینه تاوایی منفی فراهم گردد. بدین‌صورت که با افزایش تاوایی منفی که با هسته کوچکی بر روی شمال شرق کرمان همراه است، جریانات وارد شده به چاله جازموریان شمال شرقی شده و این امر در انتقال ذرات از مناطق کویری به منطقه نقش کلیدی را ایفا کرده است (شکل ۵ ج).



ب: وضعیت ارتفاع و تاوایی ژئوپتانسیل تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال برای الگوی دوم



الف: وضعیت ارتفاع ژئوپتانسیل و تاوایی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال برای الگوی اول

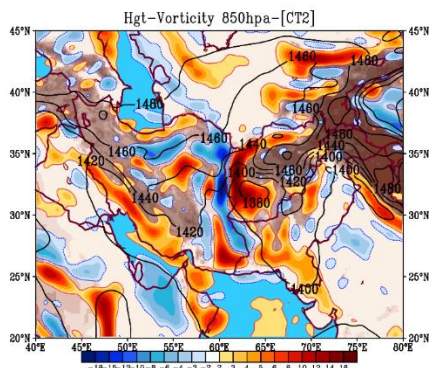


ج: ارتفاع ژئوپتانسیل و تاوایی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال برای الگوی سوم
شکل ۵. ارتفاع ژئوپتانسیل و تاوایی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در دوره‌های گردوغباری جنوب شرق ایران

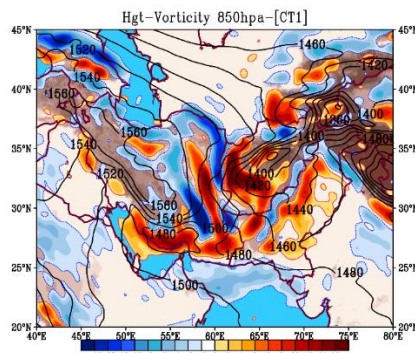
۳،۲ وضعیت ارتفاع ژئوپتانسیل و تاوایی تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال

در بررسی تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال مشخص شد که پر ارتفاعی در الگوی نخست مناطق غرب تا شرق و شمال تا جنوب استان فارس را در بر گرفته است. از طرفی در شرق این سامانه و بر روی افغانستان کم ارتفاعی با ارتفاع مرکزی کمتر از ۱۴۰۰ ژئوپتانسیل تشکیل شده است. با قدرت گرفتن سامانه کم ارتفاع و نفوذ آن به دل هسته پر ارتفاع شرق ایران جریان بسیار قوی تاوایی نسبی ایجاد گشته است. در شرق هسته پر ارتفاع نیز به موازات جریان تاوایی نسبی، جریان منفی تاوایی حاکم شده که بیشینه آن منطبق بر چاله جازموریان است. ایجاد و تشکیل چنین گرادیان فشارقوی در منطقه سبب شده تا وزش بادهای شدید که به همراه خود گردوغبار را از

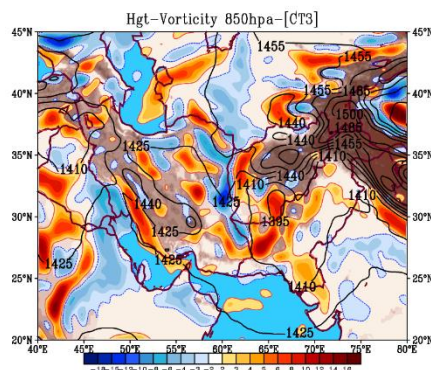
مناطق مستعد جابجا و به منطقه مورد مطالعه انتقال داده است (شکل ۶ الف). در الگوی دوم کم ارتفاع بسیار قوی در غرب افغانستان تشکیل شده که از ویژگی بارز آن بالا بودن جریان چرخندگی مثبت و از طرفی در طرف مقابل در مرزهای شرقی ایران به دلیل حرکت جنوب سوی پر ارتفاع واقع در عرضهای بالاتر، جریان پاد ساعت گرد قوی منطبق بر مرزهای شرقی شده که این وضعیت در دوره‌های اوج باد سیستان قابل مشاهده می‌باشد (شکل ۶ ب). در الگوی سوم با ورود پر ارتفاعی از شمال شرق به کشور و نفوذ آن تا شمال سیستان، جریان تاوایی منفی منطبق بر پربند ۱۴۲۵ ژئوپتانسیل متر در منطقه فوق‌الذکر شده است. از طرفی وجود کانون‌های چرخندگی مثبت در محدوده‌های کوچک در شمال چاله جازموریان سبب شده تا با قرارگیری منطقه در زیر چرخندگی مثبت شرایط را برای انتقال گردوغبار از مناطق ایران مرکزی به منطقه را فراهم کند (شکل ۶ ج).



ب: وضعیت ارتفاع و تاوایی ژئوپتانسیل تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال برای الگوی دوم



الف: وضعیت ارتفاع ژئوپتانسیل و تاوایی تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال برای الگوی اول



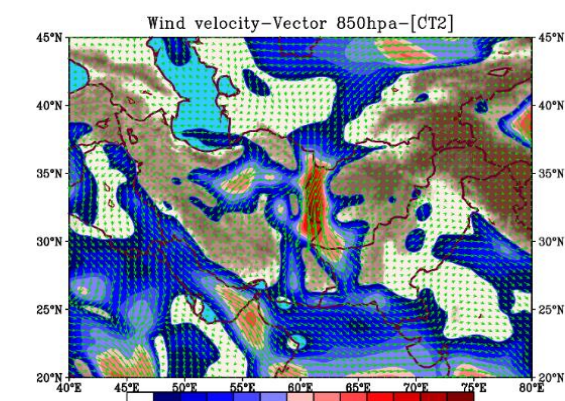
ج: وضعیت ارتفاع ژئوپتانسیل و تاوایی تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال برای الگوی سوم

شکل ۶. وضعیت ارتفاع ژئوپتانسیل و تاوایی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در دوره‌های گرد و غباری جنوب شرق ایران

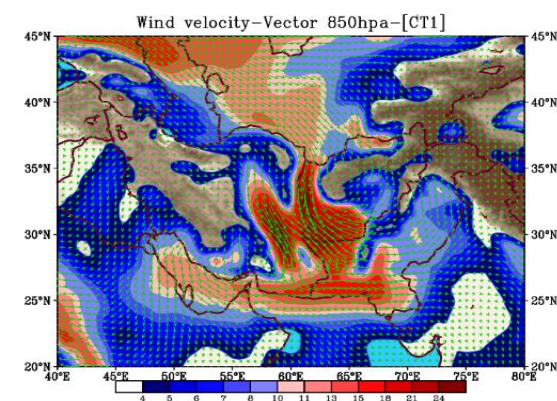
۳/۳ وضعیت سرعت و بردار باد تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال

در بررسی وضعیت سرعت و بردار باد مشخص شد که در الگوی نخست به دلیل حاکمیت عوامل جوی مقیاس منطقه‌ای، جریان بسیار قوی سرعت باد با جهتی شمالی در محدوده شرق تا جنوب شرق کشور به وجود آمده که وزش چنین تندبادهایی با بیش از ۲۴ متر بر ثانیه سبب وقوع طوفان‌های گردوغبار در منطقه می‌باشد. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود به قدری سامانه وارد شده در منطقه قوی می‌باشد که سبب شده تا به موازات هسته پر سرعت در داخل مرزهای ایران هسته پیشینه دیگری در محدوده غرب تا جنوب غرب افغانستان به وجود آید که این وضعیت تاثیر پذیرفته از جریان واقع در شمال دریای خزر می‌باشد. در شکل ۱۲ با شدت گرفتن بادهای ۱۲۰ روزه سیستان در شرق ایران، تندبادهای شدیدی در منطقه به وجود آورده که از لحاظ شدت به مانند الگوی نخست بوده ولی از نظر دایره گستره مکانی در محدوده میان مقیاسی قرار می‌گیرد. از طرفی در

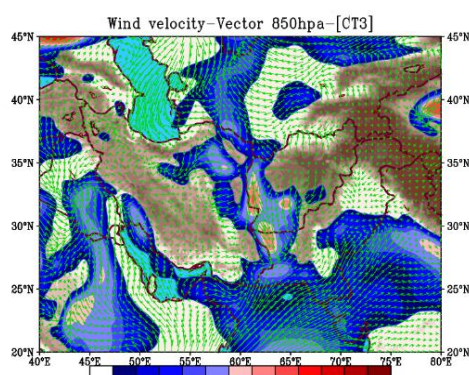
داخل کشور در محدوده‌های دشت کویر و شمال دشت لوت جریان تندبادی نیز بوقوع پیوسته که این جریانات سبب شده تا شرایط برای برداشت و انتقال گردوغبار از مناطق ذکرشده فراهم گردد. در شکل ۱۳ جریان هوا به گونه ای است که در غرب افغانستان همچنان بیشینه سرعتی معادل ۱۵ متر بر ثانیه مشاهده می‌شود؛ اما با بررسی بردار باد متوجه این امر می‌شویم که جریانات بشتر شمال به جنوب بوده که بیشتر مناطق غرب پاکستان را متأثر می‌سازد. از طرف در محدوده غرب خراسان هسته بیشینه سرعتی تشکیل شده که با بررسی جهت جریان هوا مشخص می‌شود که با شدت گرفت این باد و همگرا شدن در منطقه ایران مرکزی، چاله جازموریان با دوره‌ای گردوغبارهای با دید افقی پایین همراه است (شکل ۷).



ب: وضعیت سرعت و بردار باد تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال برای الگوی دوم



الف: وضعیت سرعت و بردار باد تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال برای الگوی اول



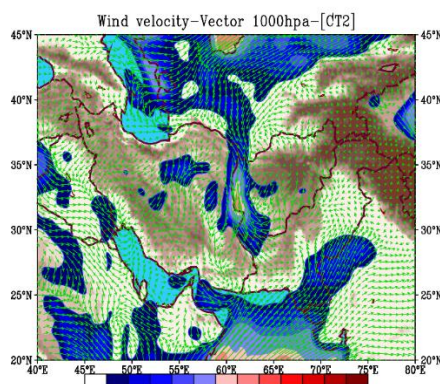
ج: وضعیت سرعت و بردار باد تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال برای الگوی سوم

شکل ۷. وضعیت سرعت و بردار باد تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال در دوره‌های گرد و غباری جنوب شرق ایران

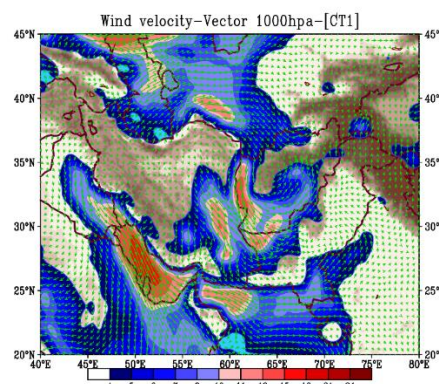
۳،۴ وضعیت سرعت و بردار باد تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال

در سطح ۱۰۰۰ هکتوپاسکال نیز شرایط به‌مانند تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال بوده بطوریکه در الگوی اول دو هسته بیشینه سرعت واقع در ایران مرکزی و غرب افغانستان مشاهده می‌شود ولی از شدت آن نسبت به تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال کاسته شده است. در الگوی دوم نیز باد سیستان قابل مشاهده بوده که بیشینه سرعت در هسته آن به بیش از ۱۱ متر بر ثانیه می‌رسد (شکل ۸ الف). از طرفی در محدوده شمال دشت کویر نیز هسته سرعتی با بیش از ۶ متر برثانیه فعالیت می‌کند. بردار باد نیز نشان می‌دهد جریانات واردشده به منطقه جازموریان هم جهتی شرق و هم شمال دارد (شکل ۸ ب). در شکل ۸ ج نیز به تاثیر هسته سرعتی که به‌صورت نواری از غرب خراسان تا جنوب آن کشیده شده پی می‌بریم که برخورد بردار باد در محدوده چاله جازموریان با جریان‌ها غربی

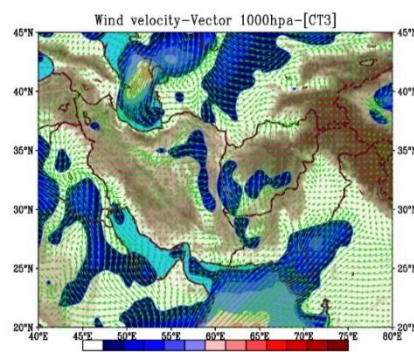
وارد شده به منطقه از الگوهای غالب سرعت و جهت باد در منطقه مورد مطالعه نام برد. در نهایت مشخص شد که وقوع طوفان‌های گردوغبار شدید در منطقه جازموریان حاصل از اندرکنش سیستم‌ها با مقیاس منطقه‌ای (الگوی اول)، مقیاس میانی (الگوی دوم) و مقیاس محلی (الگوی سوم) است.



ب: وضعیت سرعت و بردار باد تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال برای الگوی دوم



الف: وضعیت سرعت و بردار باد تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال برای الگوی اول



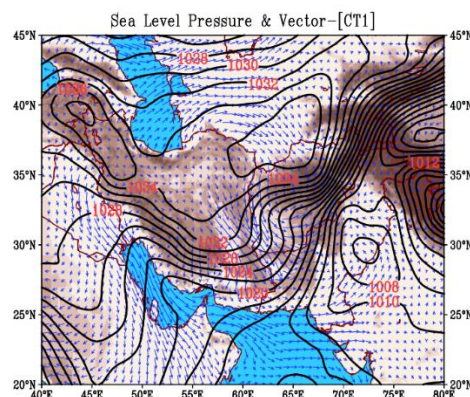
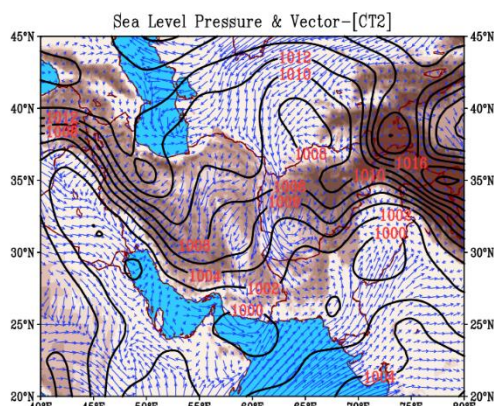
ج: وضعیت سرعت و بردار باد تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال برای الگوی سوم

شکل ۸. وضعیت سرعت و بردار باد تراز ۱۰۰۰ هکتوپاسکال در دوره‌های گرد و غباری جنوب شرق ایران

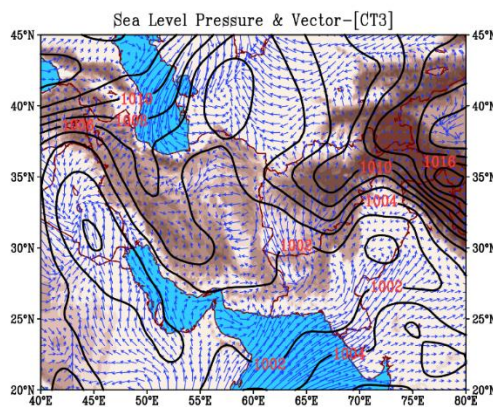
۳/۵ وضعیت الگوی فشار تراز دریا و بردار باد

در الگوی اول سلول پرفشاری منطبق بر جنوب ترکمنستان ایجاد شده که فشار مرکزی آن بیش از ۱۰۳۶ هکتوپاسکال می‌رسد. در قسمت شمال غرب ایران نیز سلول پرفشار دیگری نیز با فشار مرکزی بیش از ۱۰۳۸ هکتوپاسکال به وجود آمده که در محدوده ایران مرکزی این دو سلول با یکدیگر ادغام گشته اند. در قسمت شرقی پاکستان مرکز سیکلون قوی با فشار کمتر از ۱۰۰۶ هکتوپاسکال به وجود آمده که مجاورت این سیکلون با جریان آنتی سیکلون واقع در شمال شرق ایران، گرادیان شدید فشاری در قسمت‌های غرب کوه‌های هندوکش شروع و تا ایران مرکزی ادامه دارد. طی این فرآیند و در جنوب شرق کشور سرعت باد افزایش یافته و یک جریان شمالی را برای منطقه به وجود آورده است (شکل ۹ الف). در الگوی دوم دو سلول کمفشار بسیار قوی با فشار مرکزی ۱۰۰۰ هکتوپاسکال یکی بر روی دریای عمان و دیگری در شرق پاکستان به وجود آمده است. این هسته کمفشار به صورت نواری از شرق پاکستان شروع و تا جنوب غرب ایران کشیده شده است. از طرفی در عرض‌های بالاتر به دلیل افزایش فشار بخصوص در نیمه شمالی ایران، جریان شمال سویی به طرف عرض‌های پایین سرازیر شده است. در محدوده شرقی ایران به دلیل شکستگی در خطوط فشار جریان سرعت باد به شدت افزوده شده و شاخه از این سرعت بیشینه به شرق فلات ایران و دیگری به داخل کشور هدایت شده که طی این وضعیت شرایط برای انتقال گردوغبار به داخل چاله جازموریان فراهم شده است (شکل ۹ ب). در الگوی سوم با تشکیل

سلول کمفشار همگرایی سطحی به وجود آمده و جریانات به داخل این سلول مکیده شده است. بر روی عراق نیز چنین شرایطی حکمفرما بوده که از قسمت‌های شمال عربستان و مناطق غربی ایران جریان هوا به داخل سلول کمفشار سلول سرایز شده است. بر روی رشته کوه زاگرس خطوط هم‌فشار دچار شکستگی شده و خطوط با فشار بالا از محدوده شمال غرب تا جنوب شرق کشیده شده است. از سویی پرند فشار ۱۰۰۴ هکتوپاسکال که از سلول کمفشار واقع در غرب منطقه و دیگری در شرق پاکستان تا مناطق شمال شرقی به جز محدوده زاگرس وارد شده که این امر سبب شده تا از دو سو، یعنی از شرق و غرب منطقه ایران مرکزی مورد هجوم بادهای شدید قرار گیرد. به گونه ای که در ایران مرکزی کاملاً جریانات به یکدیگر رسیده خط جبهه‌ای به وجود آمده است (شکل ۹ ج).



الف: وضعیت فشار تراز دریا و بردار باد برای الگوی اول ب: وضعیت فشار تراز دریا و بردار باد برای الگوی دوم



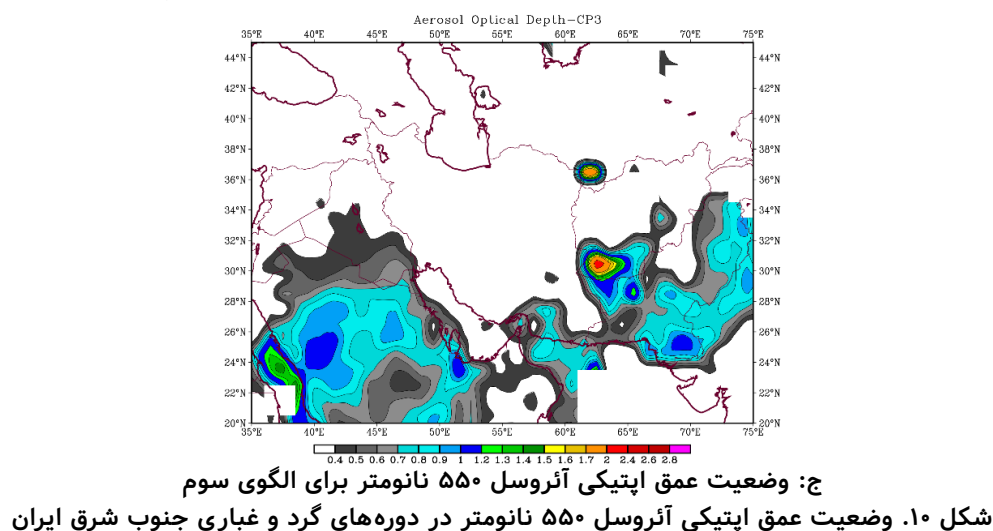
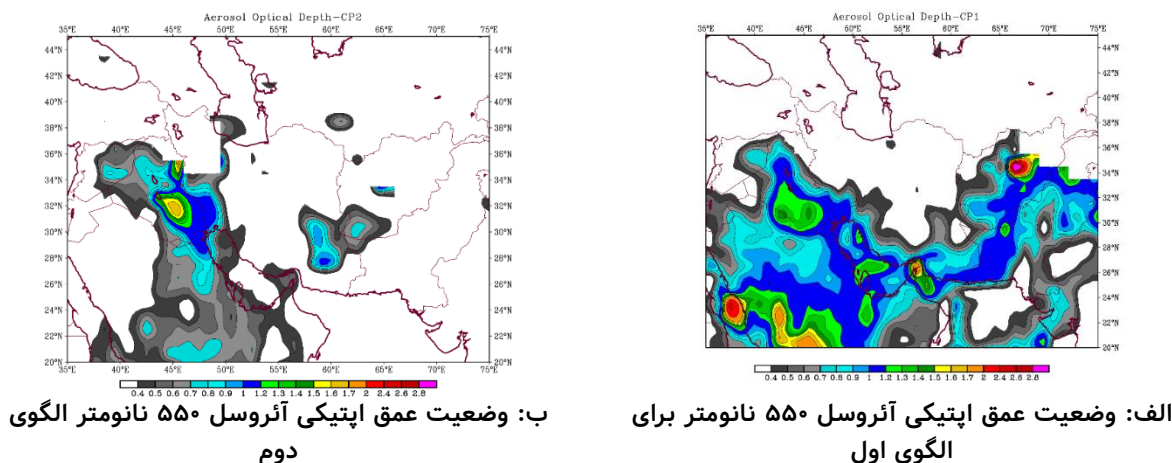
ج: وضعیت فشار تراز دریا و بردار باد برای الگوی سوم

شکل ۹. وضعیت فشار تراز دریا و بردار باد در دوره‌های گرد و غباری جنوب شرق ایران

۳،۶ وضعیت عمق اپتیکی آتروسول ۵۵۰ نانومتر

در الگوی اول قسمت اعظم گرد و غبارهایی که به جنوب شرق ایران رسیده‌اند از سوی افغانستان بوده که بیشترین غلظت در خارج از کشور در شمال شرق افغانستان مشاهده می‌شود و در داخل کشور هم بیشترین غلظت گردوغبار متعلق به بخش‌های شرق و جنوب شرق استان سیستان و بلوچستان بوده و هرچه که به بخش مرکز نزدیک‌تر می‌شویم از این غلظت کاسته می‌شود (شکل ۱۰ الف). در الگوی دوم، با توجه به این که یک هسته سرعتی در بخش شمال محدوده دشت کویر تشکیل شده و به سمت جنوب حرکت دارد و این باد با عبور از بخش‌های خشک ایران مرکزی باعث برداشت بیشتر گردوغبار شده و توسط جریان شمالی به منطقه شارش

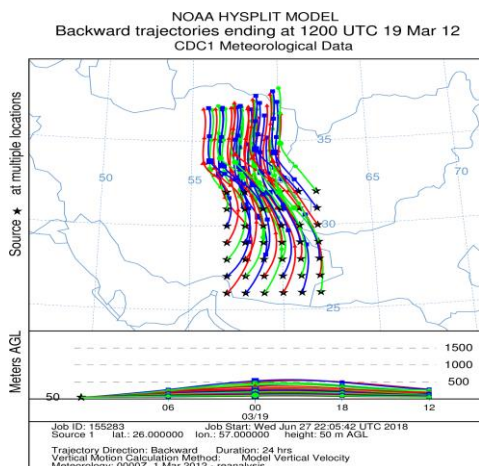
یابد (شکل ۱۰ ب). در الگوی سوم، وجود دو جریان که یکی از آن‌ها از نواحی جنوبی با عبور جریان هوا از تنگه‌ی هرمز به داخل کشور که منشأ آن شرق و شمال شرق عربستان می‌باشند و همچنین جریان دیگری که از شرق کشور با منشأ جنوب شرق افغانستان، باعث وقوع گردوغبار و همچنین تشدید آن در بخش جنوب شرق کشور می‌شوند. بیشترین غلظت گردوغبار در جنوب شرق افغانستان و در مرز ایران قرار دارد (شکل ۱۰ ج).



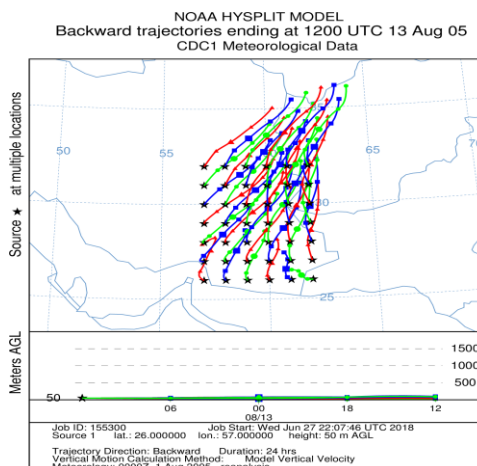
۳٫۷ ردیابی توده‌های هوا موثر در رخداد گردوغبار

در الگوی اول، توده‌های هوایی موثر بر رخداد گردوغبار منطقه از سوی شمال غرب افغانستان و همچنین به میزان بسیار کمی از جنوب غرب ترکمنستان می‌باشد که تاثیر مستقیم بر تمامی استان سیستان گذاشته و این منطقه را فراگرفته است (شکل ۱۱ الف). در الگوی دوم، منشأ توده‌های هوا از سوی بخش‌های شمالی کشور و همچنین حجم بسیار ناچیزی از جنوب غرب ترکمنستان می‌باشد که پس از گذر از کویرهای مرکزی که قسمت اعظم مناطق خشک و فراخشک کشور را تشکیل می‌دهند، به استان سیستان رسیده و گرد و غبارهای خود را به این منطقه حمل می‌کنند (شکل ۱۱ ب). از طرفی در الگوی سوم، منطقه تحت تاثیر دو توده‌ی هوایی قرار دارد که منشأ یکی از آن‌ها شمال شرق عربستان بوده که بخش‌های جنوبی استان سیستان را فراگرفته و منشأ دیگری غرب افغانستان می‌باشد که بخش‌های شمالی منطقه را در برمی‌گیرد و با توجه به مناطق برداشت گردوغبار هر

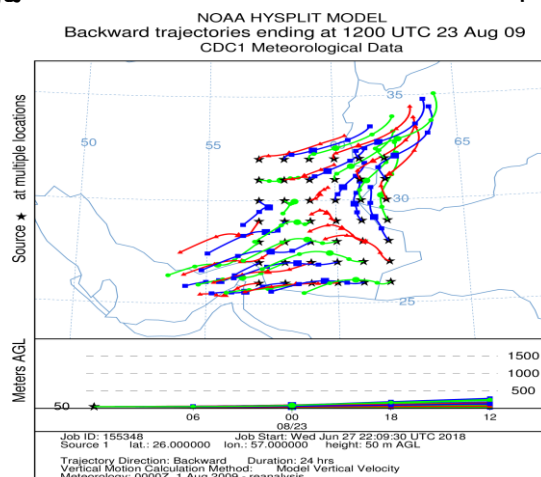
یک از این توده‌ها، جریان‌ها دارای حجم وسیعی از گردوغبار می‌باشند و می‌توانند باعث رخدادهای شدید گرد و غباری در استان سیستان شوند (شکل ۱۱ ج).



ب: ردیابی توده هوا برای الگوی دوم-روز نماینده ۱۹ مارس ۲۰۱۲



الف: ردیابی توده هوا برای الگوی اول-روز نماینده ۱۳ آگوست ۲۰۰۵



ج: ردیابی توده هوا برای الگوی سوم-روز نماینده ۲۳ آگوست ۲۰۰۹
شکل ۱۱. ردیابی توده هوا در دوره‌های گرد و غباری جنوب شرق ایران

۴ نتیجه‌گیری

نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش نشان می‌دهند که سه الگوی غالب هواشناسی در زمان رخداد طوفان‌های گردوغبار در جنوب شرق ایران وجود دارند. در ادامه، به شرح این الگوها و مقایسه آن‌ها با مطالعات قبلی پرداخته می‌شود:

الگوی اول: در این الگو، ناوه عمیقی با محور شمال شرق-جنوب غرب بر روی ایران مرکزی مستقر شده است که باعث ایجاد جریان قوی تاوایی مثبت در شرق و مرکز ایران می‌شود. این شرایط منجر به شکل‌گیری گرادیان شدید فشاری در ترازهای زیرین جو و به دنبال آن، برداشت و انتقال ذرات گردوغبار از مناطق خشک به چاله ایران مرکزی می‌شود. مقایسه با مطالعات قبلی: در تحقیقات لطفی نسب و همکاران (۱۴۰۰) نیز به اهمیت ناوه‌های عمیق در ایجاد شرایط ناپایدار برای رخداد گردوغبار اشاره شده است؛ اما در این پژوهش، نقش دقیق‌تر

جریان تاوایی مثبت در تقویت این پدیده و ارتباط آن با شرایط محلی (مانند چاله جازموریان) بررسی شده است که به عنوان یکی از نوآوری‌های این مطالعه محسوب می‌شود.

الگوی دوم: این الگو با حضور پشته‌ای با ارتفاع ۵۷۶۰ ژئوپتانسیل متر بر روی ایران مرکزی مشخص می‌شود. این شرایط باعث ایجاد جریان واچرخندی در دامنه‌های جنوب البرز تا جنوب دریای عمان می‌شود که با جریان چرخندی در نیمه شرقی کشور همراه است. مقایسه با مطالعات قبلی: سلیمانی ساردو و همکاران (۱۴۰۰) نیز به اهمیت پشته‌های میانی جو در ایجاد جریان واچرخندی اشاره کرده‌اند؛ اما در این پژوهش، نقش دقیق‌تر ناوه جانبی (با محور شمالی-جنوبی) در تشدید جریان پادساعتگردی بر روی ایران مرکزی بررسی شده است که به درک بهتر سازوکارهای جوی کمک می‌کند.

الگوی سوم: این الگو با حضور پراارتفاعی بر روی کشور مشخص می‌شود که باعث ایجاد جریان تاوایی منفی در مناطق شمال شرق کرمان می‌شود. این جریان نقش کلیدی در انتقال ذرات گردوغبار از مناطق کویری به منطقه مورد مطالعه دارد. مقایسه با مطالعات قبلی: در مطالعات قبلی به ندرت به نقش پراارتفاع‌ها در ایجاد جریان‌ات تاوایی منفی اشاره شده است. این پژوهش با تحلیل دقیق این الگو، نوآوری مهمی در شناسایی مکانیسم‌های انتقال گردوغبار ارائه می‌دهد.

کانون‌های گردوغبار: بر اساس مقادیر AOD و ردیابی توده هوا، کانون‌های گردوغبار به چهار منطقه تقسیم‌بندی شده‌اند: الگوی اول: مناطق مرکزی ایران، جنوبی خراسان و دشت کویر. الگوی دوم: مناطق شمال و شمال غرب افغانستان.

الگوی سوم: مناطق شمالی افغانستان و شبه‌جزیره عربستان. مقایسه با مطالعات قبلی: در تحقیقات قبلی، بیشتر به کانون‌های داخلی اشاره شده است؛ اما در این پژوهش، نقش مناطق فرامرزی (مانند شبه‌جزیره عربستان) نیز بررسی شده که به درک جامع‌تری از منابع گردوغبار منجر می‌شود.

این پژوهش با ترکیب داده‌های ECMWF و تصاویر ماهواره‌ای (MODIS)، به علاوه استفاده از مدل لاگرانژی HYSPLIT، دید جامع‌تری از سازوکارهای جوی و کانون‌های گردوغبار ارائه می‌دهد. نوآوری‌های اصلی این پژوهش عبارت‌اند از: شناسایی دقیق‌تر نقش جریان‌ات تاوایی مثبت و منفی در ایجاد و انتقال گردوغبار. بررسی نقش مناطق فرامرزی (مانند شبه‌جزیره عربستان) در تأمین ذرات گردوغبار. تحلیل دقیق‌تر الگوهای جوی و ارتباط آن‌ها با شرایط محلی (مانند چاله جازموریان). این نوآوری‌ها نه تنها به درک بهتر سازوکارهای جوی حاکم بر رخداد گردوغبار کمک می‌کنند، بلکه می‌توانند در توسعه سیستم‌های هشدار زودهنگام و برنامه‌ریزی‌های مدیریتی مؤثر باشند. نتایج تحقیق فعلی با مطالعات قبلی (مانند لطفی نسب و سلیمانی ساردو) مقایسه شده‌اند. تفاوت‌ها و شباهت‌ها به صورت واضح توضیح داده شده‌اند. نوآوری‌های اصلی پژوهش (مانند استفاده از داده‌های ECMWF و HYSPLIT، بررسی نقش مناطق فرامرزی و تحلیل دقیق‌تر الگوهای جوی) به صورت جداگانه بیان شده‌اند.

References

- Alijan, B; raispoor, K. (2011). Statistical, Synoptical analysis of Sand Storms in SE Iran (Study Case: Region of Sistan). Arid Regions Geographic Studies; 2 (5):107-130. [In persian]
- AlizadehChoobari, O., Zawar-Reza, P., Sturman, A., (2014). The global distribution of mineral dust and its impacts on the climate system: A review. Atmospheric Research 138(1), 152-165.

- Bagherabadi, R., & Moeinaddini, M. (2021). Dust storms directional source identification of Karaj. *Journal of Climate Research*, 140(47), 141-155. [In persian]
- Boroghani, M., pourhashemi, S., zanganeh Asadi, M., & Moradi, H. (2017). Dust Source Identification in the Middle East by Using Remote Sensing. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 6(11), 101-118. [doi: 10.22111/jneh.2017.2959](https://doi.org/10.22111/jneh.2017.2959). [In persian]
- Boroughani M, Mirchooli F, Mohammadi M. (2022) Dust source mapping using satellite imagery and machine learning models. *Arid Regions Geographic Studies*; 12 (47):1-13. [In persian]
- Boroughani, M, Pourhashemi, S, Hashemi, H, Salehi, M, Amirahmadi, A, Asadi, M. A. Z, & Berndtsson, R. (2020). Application of remote sensing techniques and machine learning algorithms in dust source detection and dust source susceptibility mapping. *Ecological Informatics*, 56, 101059
- Broomandi P, Bakhtiar Pour A. Dust Source Identification Using Physical- Chemical Characterization and Numerical Modeling in Masjed Soleyman. *ijhe* 2017; 9 (4):517-526. [In persian]
- Dayan, Koch.J, (1986), A Synoptic analysis of the meteorological conditions affecting dispersion of pollutants emitted from tallstacksin the coastal plain of Israel, pp: 537 – 543.
- Draxler, R. Gillette, A. Kirkpatrick, S. Heller, J. 2001. Estimating PM10 air concentrations from dust storms in Iraq, Kuwait and Saudi Arabia. *Atmospheric Environment* Vol. 35. Pp: 4315-4330.
- Draxler, R. Hess, G. D. An overview of the HYSPLIT_4 modeling system for trajectories, dispersion and Deposition. 1998. *Australian Meteorological Magazine*. Vol. 47. Pp: 295-308.
- Draxler, R. Stunder, B. Rolph, G. Stein, A. Taylor, A. 2009. Hybrid single-particle Lagrangian integrated trajectories 4 user's guide. NOAA Tech. Memo, ERL-ARL.
- Draxler, R.R., G.D.Hess. (1997). Description of the HYSPLIT_4 Modeling System. NOAA Technical Memorandum.ERL ARL. 224: 1-25.
- Garofalide, S., Postolachi, C., Cocean, A., Cocean, G., Motrescu, I., Cocean, I., ... & Leontie, L. (2022). Saharan Dust Storm Aerosol Characterization of the Event (9 to 13 May 2020) over European AERONET Sites. *Atmosphere*, 13(3), 493.
- Gholami, H, Mohamadifar, A, Rahimi, S, Kaskaoutis, D. G, & Collins, A. L. (2021). Predicting land susceptibility to atmospheric dust emissions in central Iran by combining integrated data mining and a regional climate model. *Atmospheric Pollution Research*, 12 (4), 172-187.
- Goudie and Middleton, (2002), Saharan dust storms, nature and consequences, *Earth science review*, pp: 56.
- Hamish. A, Grant.M, tanish A, (2001), Inter-regional transport of Australian dust storms *Soil erosion reSearch for the 21th century*, pp: 28.

- Jalali, N., Iranmanesh, F., & Davoodi, M. (2017). Identification on dust storm sources and their affecting areas in south-west provinces of Iran, using MODIS image. *Watershed Engineering and Management*, 9(3), 318-331. [doi: 10.22092/ijwmse.2017.112374](https://doi.org/10.22092/ijwmse.2017.112374). [In persian]
- Jin, Q., Yang, Z. L., & Wei, J. (2016). Seasonal responses of Indian summer monsoon to dust aerosols in the Middle East, India, and China. *Journal of Climate*, 29(17), 6329-6349.
- Kang, L.; Huang, J.; Chen, S.; & Wang, X.; "Long-term trends of dust events over Tibetan Plateau during 1961–2010". *Atmospheric Environment*, 125, 188-198, 2016.
- karegar M E, Bodagh Jamali J, Ranjbar Saadat Abadi A, Moeenoddini M, Goshtasb H. (2017). Simulation and Numerical Analysis of severe dust storms Iran East. *Journal of Spatial Analysis Environmental hazards*; 3 (4):101-119. [In persian]
- Kaskaoutis, D.G., Kosmopoulos, P., Kambezidis, H.D., Nastos, P.T., 2007. Aerosol climatology and discrimination of different types over Athens, Greece based on MODIS data. *Atmos. Environ.* 41, 7315–7329.
- Khosravi, M. (2005). Research project: ecological and environmental effects of 120-day winds in Sistan. Research Institute of Earth Sciences and Geography. [In persian]
- Khosravi, M. (2010). Investigating the vertical distribution of dust caused by storms in the Middle East using the NAAPS model, case: Sistan, Iran. 4th International Congress of The Islamic World Geographers. [In persian]
- Kutiel, H., Alpert, P. (2005), Synoptic of dust transportation days from Africa toward Italy and central Europe, pp: 1 – 1.۴
- Lotfinasabasl, S., Gohardoust, A., Dargahian, F., & Khosroshahi, M. (2022). Analysis of dusty and erosive winds in Kerman province in order to provide a calendar for forecasting and managing dust control. *Iranian Journal of Forest and Range Protection Research*, 19(2), 179-211. [doi: 10.22092/ijfrpr.2021.352899.1458](https://doi.org/10.22092/ijfrpr.2021.352899.1458). [In persian]
- Mallia, D. V., Kochanski, A., Wu, D., Pennell, C., Oswald, W., & Lin, J. C. (2017). Wind-blown dust modeling using a backward-Lagrangian particle dispersion model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 56(10), 2845-2867.
- Mofidi, A; Kamali, S; Zarrin, A. (2013). Evaluation of the RegCM4 model coupled with Dust module on identification of dust storm features over the Sistan region. *Quarterly of Geography (Regional Planning)* Vol 3, No 3, Summer 2013. [In persian]
- Namdari, S; hajibeiglo, A; abazari, gh. (2021). Analysis of changes in Iran's internal dust centers in the last twenty years. *Scientific Journal of Geography and Planning*. Volume 25, Number 78, February 2021, page 345-361. [In persian]
- Shahriary, A. (2016). Trend Analysis the Number of Dusty Days in The Sistan and Baluchistan Province (IRAN) Using Non-Parametric Statistics. *Journal of Water and Soil Conservation*, 22(4), 253-260. [In persian]

- Shao, Y., Wyrwoll, K.H., Chappell, A., Huang, J., Lin, Z., McTainsh, G.H., (2011). Dust cycle: an emerging core theme in Earth system science. *Aeolian Research* 2(4), 181-204.
- Soleimani Sardoo, F., Hosein Hamzeh, N., Karami, S., Nateghi, S., & Hashemi nezhad, M. (2022). Emission and transport of dust particles in Jazmourian basin (Case study: Dust storm 24 to 26 November 2016). *Journal of Climate Research*, 1400(48), 41-54. [In persian]
- Tan, S., Chen, B., Wang, H., Che, H., Yu, H., & Shi, G. (2022). Variations in Aerosol Optical Properties over East Asian Dust Storm Source Regions and Their Climatic Factors during 2000-2021. *Atmosphere*, 13(6), 992.
- Wang W, (2005), a synoptic model on East Asian dust emission and transport, *Atmospheric science and air quality conferences china*, pp: 13.
- Weihong. Q. and Shaoyinshi, (2001), Variations of the dust storm in china and its climate control, *journal of climate*, pp: 15.