

Dynamic-climatic study of dust storms in Southwest Iran

Davood Pishdar ^a, Maryam Rezazadeh ^{*b}, Vahid Salamati Hormozi ^c

^aDavood Pishdar, Master of Meteorology, Marine and Atmospheric Science Department, Faculty of Marine Science and Technology, University of Hormozgan, BandarAbbas, Iran

^bAssociate Professor, Marine and Atmospheric Science Department, Faculty of Marine Science and Technology, University of Hormozgan, BandarAbbas, Iran

^cPhD in Meteorology, Hormozgan Meteorological Administration, BandarAbbas, Iran

Research Full Paper

Article History (Received: 2025/04/15

Accepted: 2025/05/21

Extended abstract

1- Introduction

Dust storms are prominent atmospheric phenomena involving the uplift of large volumes of dust particles from desert and arid surfaces into the atmosphere. The transport and dispersion of these particles over long distances are largely governed by prevailing meteorological conditions. This study investigates the dynamic and climatic drivers of dust storms in southwestern Iran. The research area includes selected synoptic stations located in the provinces of Khuzestan, Bushehr, Fars, and Kohgiluyeh and Boyer-Ahmad.

To analyze the spatiotemporal patterns of dust storms, hourly meteorological data, including sea level pressure, wind direction and speed, temperature, and relative humidity, were obtained from national synoptic stations and analyzed using statistical and synoptic-dynamic methods. In addition, reanalysis data from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) for the period 1985–2019 were employed to extract variables such as sea level pressure, geopotential height, zonal and meridional wind components, vertical velocity, streamlines, surface incoming shortwave radiation, and boundary layer height. Aerosol Optical Depth (AOD) data for the same period were acquired from the MODIS satellite platform.

Iran's location within the global dry and semi-arid belt, coupled with its proximity to arid neighboring countries such as Saudi Arabia, Iraq, and Syria, regions characterized by limited vegetation cover, has led to the development of vast desert areas highly prone to dust emissions. These conditions, driven by low precipitation and high temperatures, create an environment conducive to frequent dust activity. Recurrent droughts, along with atmospheric turbulence and strong winds, further intensify dust uplift, particularly in southwestern Iran. Additionally, unsustainable land use practices and ongoing environmental degradation both within Iran and across its borders have contributed to the increasing frequency and severity of dust storms in the region.

Although numerous studies have investigated dust phenomena in Iran, and several have examined the mechanisms underlying dust storms in the western and southwestern regions, a comprehensive analysis of the dominant dynamic processes and regional atmospheric circulation patterns driving dust storm formation in southwestern Iran remains lacking. This study aims to address this gap by analyzing the regional atmospheric circulation and identifying the key dynamic and climatic mechanisms that contribute to the development and intensification of dust storms in the area.

2- Results

Trend analysis using the Mann-Kendall test revealed a statistically significant increase in the annual frequency of dust storms at most meteorological stations in southwestern Iran, with the exception of Dezful Airport, Omidiyeh Airport, Bushehr Coastal Shiraz, and Velar Airport in Bushehr. Sen's slope estimator further confirmed significant upward trends at the 95% confidence level in stations such as Bostan, Abadan, Bandar Mahshahr, Omidiyeh, Aghajari, Dogonbadan, Khark Island, Zarghan, and Fasa. Notably, Dezful Airport and Bushehr Airport showed increases at the 95% and 99% confidence levels,

respectively. Seasonal analysis for the period 1985–2019 also indicated consistent upward trends in dust storm occurrences across most stations and during all seasons.

3- Discussion & Conclusions

Synoptic and dynamic analyses revealed the presence of persistent low-pressure systems over Iran, Iraq, and Saudi Arabia during dust storm events, significantly influencing the weather patterns in southwestern Iran. Prominent low-pressure centers were identified at both the 850 hPa and 500 hPa atmospheric levels over Iran. Additionally, a jet stream core with wind speeds ranging from 40 to 60 m/s was observed at the 200 hPa level, facilitating the transport of dust from Iraq into southwestern Iran.

Dynamic analysis revealed significant vorticity at the 500 hPa level during dust storm events, indicating atmospheric rotational patterns conducive to dust uplift and long-range transport. MODIS satellite imagery, supported by HYSPLIT trajectory modeling, identified the primary sources of dust in Iraq, Sudan, and Saudi Arabia, with dust plumes intensifying while traveling toward southwestern Iran.

Examination of boundary layer dynamics showed that dust events were accompanied by an increase in boundary layer height, which strongly correlated with elevated AOD in the region. Additionally, analysis of surface-level incoming shortwave radiation demonstrated a marked decrease during dust storms, with higher dust concentrations causing more substantial reductions in solar radiation reaching the Earth's surface.

Overall, this study advances the understanding of the dynamic and climatic factors driving dust storm formation in southwestern Iran, providing valuable insights for improving forecasting and mitigating the environmental and health impacts of dust events in the region.

Key Words: Dust storms, spatial-temporal patterns, trends, trends, southwest Iran.

Cite this article: Pishdar, D., Rezazadeh, M., & Salamati Hormozi, V. (2025). Dynamic-climatic study of dust storms in Southwest Iran. *Journal of Environmental Erosion Research*. 2025; 15 (3) :1-23. <http://doi.org/10.61186/jeer.15.3.1>



© The Author(s).

DOI: <http://doi.org/10.61186/jeer.15.3.1>

Published by Hormozgan University Press.

URL: <http://magazine.hormozgan.ac.ir>

بررسی دینامیکی - اقلیمی طوفان‌های گردوغبار در جنوب غرب ایران

داود پیش‌دار: دانش‌آموخته کارشناسی ارشد هواشناسی، گروه علوم غیرزیستی جوی و اقیانوسی، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس

مریم رضازاده*: دانشیار، گروه علوم غیرزیستی جوی و اقیانوسی، دانشکده علوم و فنون دریایی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس

وحید سلامتی هرمزی: دکتری آب و هواشناسی، اداره هواشناسی استان هرمزگان، بندرعباس

نوع مقاله: پژوهشی

تاریخچه مقاله (تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۱۹)

DOI: <http://doi.org/10.61186/jeer.15.3.1>

چکیده

طوفان‌های گردوغبار هر ساله مقادیر عظیمی از ذرات را از سطوح بیابانی و خشک وارد جو می‌کنند و سبب فرسایش مناطق مختلف می‌شوند. در این تحقیق به بررسی دینامیکی - اقلیمی طوفان‌های گردوغبار در جنوب غرب ایران پرداخته شده است. منطقه مورد مطالعه جنوب غرب ایران شامل ایستگاه‌های منتخب استان‌های خوزستان، بوشهر، فارس و کهگیلویه و بویراحمد می‌باشد. برای تحلیل، از داده‌های ساعتی ایستگاه همدیدی شامل فشار سطح دریا، سمت و سرعت باد، دما، رطوبت نسبی و دید افقی اخذ شده از سازمان هواشناسی و همچنین داده‌های مربوط فشار سطح دریا، ارتفاع ژئوپتانسیل، مؤلفه‌ی باد مداری و باد نصف‌النهاری، تاوایی و سرعت قائم، خطوط جریان، تابش موج کوتاه ورودی سطحی، ارتفاع لایه‌مرزی از مجموعه داده‌های دوباره واکاوی شده مرکز پیش‌بینی‌های میان‌مدت اروپا طی سال‌های ۱۹۸۵-۲۰۱۹ و عمق نوری ذرات از سنجنده ماهواره آکوا و ترا اخذ شد. بررسی تغییرات گردوغبار سالانه با استفاده از آزمون من - کندال نشان داد که روند گردوغبار سالانه در اکثر ایستگاه‌های جنوب غرب ایران روند افزایشی داشته است. بررسی فصلی تغییرات گردوغبار با استفاده از آزمون‌های مذکور نشان داد که روند گردوغبار در غالب ایستگاه‌ها و در همه فصل‌ها افزایشی می‌باشد. نتایج حاکی از وجود هسته‌های کم‌فشار محدوده ایران، کشور عراق و عربستان بوده که در روز وقوع طوفان گرد غبار زبانه‌های کم‌فشار ایران را خصوصاً در منطقه جنوب و جنوب غرب تحت تأثیر قرار داده است. نقشه‌های دینامیکی طوفان‌های گردوغبار در روزهای منتخب بیان می‌کند که مکان‌گزینی چرخندگی مثبت (منفی) در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال هم‌زمان با رخداد توفان گردوخاک در نقشه‌های مذکور مشهود است. مشاهدات تصاویر ماهواره‌ای از سنجنده مودیس، منشأ رخداد گردوخاک را کشورهای عراق، سودان و عربستان نشان می‌دهد که پس از تقویت، جنوب غرب ایران را تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. در بررسی ارتباط لایه‌مرزی با عمق نوری آئروسول مشخص شد که بانفوذ پدیده گردوغبار عمق لایه‌مرزی و همچنین عمق نوری ذرات در منطقه مورد مطالعه هم‌افزایش می‌یابد.

واژگان کلیدی: طوفان‌های گردوغبار، الگوهای فضایی-زمانی، تاوایی، روند، جنوب غرب ایران.

۱- مقدمه

امروزه معضل افزایش فرسایش بادی و طوفان‌های گردوغبار به علت تغییرات اقلیمی و خشکسالی‌های متوالی، به بحرانی منطقه‌ای - جهانی تبدیل شده است. آثار زیان‌بار گردوغبار را نمی‌توان مختص اقلیم خاصی دانست؛ زیرا ذرات ناشی از طوفان‌های گردوغبار می‌توانند تا کیلومترها دورتر از منطقه چشمه رفته و آثار زیستی و زمین‌شناختی و آب‌وهوایی روی آن منطقه بگذارند. یکی از پیامدهای زیست‌محیطی طوفان‌های گردوغبار، اثراتی است که روی پخش و جذب تابش خورشیدی می‌گذارد که در درازمدت پیامدهای اقلیمی را به دنبال دارد؛ اما اینکه گردوغبار باعث گرم‌شدن یا سرد شدن منطقه می‌شود، بستگی به اندازه و خواص شیمیایی ذرات دارد (Goudie & Midelton, 2001). طوفان‌های گردوغبار یکی از مخاطرات مهم آب‌وهوایی است که هر ساله باعث به وجود آمدن خسارات زیان‌باری در سراسر جهان می‌شود. رویداد طوفان گردوغبار یا طوفان ماسه‌ای تحت تأثیر الگوهای گردش همدید جو در مقیاس منطقه‌ای و جهانی قرار دارد. باد عامل اصلی حرکت و جابه‌جایی خاک به حساب می‌آید. در اثر برخورد باد با سطح زمین به دلیل ناهمواری‌های سطحی، پیچک‌هایی تولید می‌شود و علاوه بر جریانات افقی، حرکات عمودی بالاسو و پایین‌سو به وجود می‌آید که موجب بلندشدن ذرات خاک به هوا می‌شود. به بادهایی که با سرعت زیاد در مدت کوتاهی می‌وزند طوفان می‌گویند. طوفان‌ها معمولاً با هوای ناپایدار همراه هستند اگر هوای ناپایدار رطوبت داشته باشد طوفان رعدوبرق یا تندری و اگر خشک باشد طوفان گردوغبار نامیده می‌شود. بر اساس تعریف سازمان هواشناسی جهانی (WMO) هرگاه در ایستگاهی سرعت باد از ۱۵ متر بر ثانیه (حدود ۳۰ نات) تجاوز کند و دید افقی به علت گردوغبار به کمتر از یک کیلومتر برسد طوفان گردوغبار گزارش می‌شود. از عوامل اصلی و مؤثر در رخداد پدیده گردوغبار، موقعیت جغرافیایی و شرایط اقلیمی مناطق منشأ و مناطق تحت تأثیر این پدیده است (Salamati Hormozi et al, 2017). بر اساس تعریف سازمان هواشناسی جهانی، شدت گردوغبار از نظر میدان دید افقی به چهار طبقه تقسیم‌بندی می‌شود که عبارت‌اند از: گردوغبار ضعیف با میدان دید افقی بیشتر از ۱۰ کیلومتر، گردوغبار متوسط با میدان دید بین ۱ تا ۱۰ کیلومتر، طوفان شدید با میدان دید بین ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ متر و طوفان خیلی شدید با میدان دید کمتر از ۲۰۰ متر (Tan et al, 2014). طوفان‌های گردوغبار معمولاً در مناطق خشک و نیمه‌خشک عرض‌های معتدله، حاره و جنب‌حاره جایی که میانگین بارش سالانه ۲۰۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر است (Indoitu et al, 2012)، در نتیجه سرعت زیاد باد و تلاطم آن بر روی سطح خاک بدون پوشش و مستعد فرسایش رخ می‌دهد (Goudie, 2009). پدیده گردوغبار به‌عنوان یکی از مهم‌ترین اشکال آلودگی‌های جوی در ابعاد مختلف مورد توجه محققان قرار گرفته است. قرارگیری ایران در کمربند خشک و نیمه‌خشک جهان و از طرف دیگر مجاورت با کشورهایی چون عربستان، عراق و سوریه که دارای فقر پوشش گیاهی بوده و به دلیل بارش اندک و دمای بالا اغلب مساحت این کشورها از بیابان تشکیل شده است و تحت تأثیر شرایط بیابانی، ناپایداری هوا و جریان باد در این مناطق که معمولاً شدید می‌باشد باعث بلندشدن گردوغبار از این نواحی می‌گردد. خشکسالی‌های متناوب در این مناطق سبب رخداد متناوب پدیده گردوغبار در نواحی غرب و جنوب غربی ایران شده است. از طرف دیگر استفاده نامطلوب از منابع طبیعی و محیط‌زیست توسط انسان در داخل ایران و کشورهای همسایه سبب تشدید رخداد پدیده گردوغبار گردیده است (Salamati Hormozi et al, 2017). در پژوهشی مناطق مرزی بین ایران، پاکستان و افغانستان به‌عنوان منطقه اصلی منبع گردوغبار در جنوب غربی آسیا که سالانه حدود ۸۱

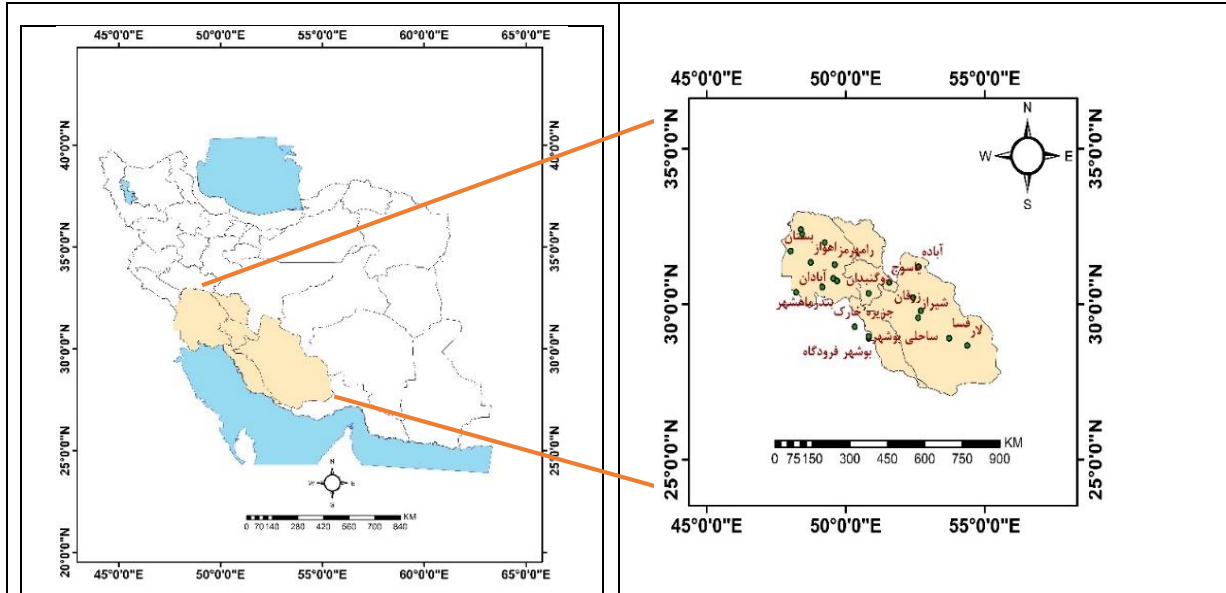
طوفان گردوغبار ایجاد می‌کند، معرفی شده است که از این تعداد بیش از ۳۰ مورد در سیستان گزارش شده است (Middleton, 1986b). در بررسی گردوغبار واقع در غرب دریاهای جنوب چین که از عربستان حمل می‌شود، نتیجه گرفته شد که همه گردوغباری که موجب غبار در جو خاورمیانه می‌شود، لزوماً از منابع محلی نشأت نگرفته است. بلکه از صحرای بزرگ آفریقا و از بیابان‌های شمال غربی هند و پاکستان و احتمالاً از جنوب آمریکا حمل می‌شوند (Prospero et al, 1981). با استفاده از مدل HYSPLIT طوفان‌های گردوغبار سال ۲۰۰۸ بررسی و چهار منطقه آفریقای شمالی، خاورمیانه، مغولستان و شمال غرب چین با فراوانی بالای رخداد گردوغبار بیان شده است (Wang et al, 2011). در پژوهشی به تحلیل آماری سینوپتیکی پدیده‌ی گردوغبار و ارتباط آن با عناصر اقلیمی ایستگاه‌های ایلام و دهلران در طول دوره‌ی آماری ۲۰ ساله پرداخته شده است و نتایج نشان داد که در ایستگاه ایلام بالاترین همبستگی مربوط به متغیر سرعت باد با ۸۹ درصد و در ایستگاه دهلران متوسط دما با ۹۲ درصد، بیشترین همبستگی را با پدیده طوفان‌های گردوغبار دارند (Boheiraei et al, 2011). چشمه‌های اصلی گردوغبار در خاورمیانه به وسیله تحلیل اطلاعات هواشناسی ثبت شده در ایستگاه‌های زمینی از ۱۹۹۸ تا ۲۰۰۳، ۴ منطقه سودان و قسمت‌هایی از عربستان سعودی و عراق، پاکستان، قسمت‌هایی از ایران و افغانستان معرفی شده است (Rezazadeh et al, 2013). همچنین به نوع پدیده گردوغبار با توجه به الگوی باد در مناطق یادشده پرداخته شده است. در پژوهشی دیگر مشاهدات گردوغبار / طوفان‌های شن و غبار / طوفان‌های شن شدید با هم به عنوان موارد طوفان گردوغبار در نظر گرفته شدند (Rashki et al, 2015). توزیع تعداد طوفان‌های گردوغبار مشاهده شده نشان داد که بیشتر ایستگاه‌ها مشاهدات کمتری نسبت به تعداد میانگین مشاهدات دارند. علاوه بر این، ایستگاه‌های با تعداد زیاد طوفان‌های گردوغبار مشاهده شده در منطقه شرقی یعنی نزدیک به بیابان‌های سوریه و عراق واقع شده‌اند. همچنین، میانگین ماهانه تعداد طوفان‌های گردوغبار مشاهده شده نشان داد که تعداد آن‌ها از ماه مارس، یک ماه نسبتاً سرد، تا ماه می، یک ماه نسبتاً گرم دوبرابر شده است. روند توزیع سالانه طوفان‌های گردوغبار نشان داد که دوره مطالعه می‌تواند به دو دوره تقسیم شود: از سال ۱۹۷۸ تا ۱۹۹۴، با نرخ افزایش بالا، و از سال ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۸، با نرخ کاهش پایین. ویژگی‌های سینوپتیکی و دینامیکی رخداد طوفان گردوغبار در شمال عربستان در فصل بهار از ۱۹۷۸ تا ۲۰۰۸ با استفاده از مشاهدات طوفان گردوغبار سطحی از ۱۱ ایستگاه و داده‌های هواشناسی از مجموعه داده‌های تجزیه و تحلیل مجدد NCEP / NCAR مطالعه شده است (Mashat et al, 2020). نتایج نشان داد که در این مطالعه، دو سیستم سینوپتیکی مرتبط با حوادث گردوغبار شناسایی شد و این سیستم‌ها با افزایش فشار و گرادیان دما بر روی شبه‌جزیره عربستان شمالی و تغییر جهت شرق در حداکثر باد به‌عنوان یک رویداد طوفان گردوغبار از مراحل قبل و بعد از رویداد رخ می‌دهد. مطالعه دینامیکی همچنین نشان داد که در طول مرحله قبل از رویداد، جو باروکلینیک بود و دارای اختلالات دینامیکی توسط سیستم‌های جبهه‌ای بود. علاوه بر این، سیستم‌های جبهه‌ای منجر به تشدید کمی بیشتر از سیستم‌های شمالی می‌شوند. علاوه بر این، مطالعه دینامیکی نشان داد که انرژی جنبشی (KE) به سمت شرق و انرژی پتانسیل موجود (APE) از طریق مجموعه‌ای از مناطق واردکننده و صادرکننده KE و APE به سمت شمال منتقل شده است. نمای عمودی منطقه متوسط انرژی نشان می‌دهد که لایه اصلی که در آن گرمای محسوس به KE تبدیل می‌شود، در بالای ابر گردوغبار قرار دارد. برای مطالعه ساختار و ابعاد سه‌بعدی طوفان‌های گردوغبار در تابستان ۲۰۱۸ روی شبه‌جزیره عربستان از محصولات پیشرفته ماهواره‌ای مانند AEROIASI, SEVIRI

و CALIPSO استفاده شده است (Francis et al, 2021). دینامیک و ترمودینامیک لایه‌مرزی در طول این رویداد با استفاده از تجزیه و تحلیل مجدد ERA5 و مشاهدات زمینی به طور کامل تجزیه و تحلیل شد. نتایج نشان داد یک طوفان بزرگ گردوغبار توسط بادهای شمال، منجر به توسعه طوفان در کویر و انتشار گردوغبار و توسعه ابرهای همرفت و باران می‌شود. سیکلون‌زایی بر روی این منطقه طوفان گردوغبار شدید دوم را ایجاد کرده و به مدت ۳ روز متوالی شبه‌جزیره عربستان را تحت تأثیر قرار می‌دهد. گردوغبار بلند شده توسط طوفان که به ارتفاع ۵ کیلومتر رسیده و بودجه تابشی را در سطح تغییر می‌دهد، باعث گرم شدن قابل توجه در شب و خنک شدن در روز می‌شود. دینامیک جوی شیوع گردوغبار صحرا در میندلو، جزایر کیپ ورد را مطالعه شده است. تجزیه و تحلیل نشان می‌دهد که طوفان گردوغبار در سمت کوه‌های اطلس صحرا (SAM) در الجزایر در ۱۰ نوامبر ۲۰۱۷ آغاز شده است. این طوفان گردوغبار با وقفه مضاعف موج راسبی در ارتباط با بازتاب موج غیرخطی همراه بود. دو وقفه متوالی موج راسبی به تقویت موج در اقیانوس اطلس شمالی شرقی کمک کرد که هوایی را با پتانسیل سرعت بزرگی (potential vorticity) به قاره آفریقای شمالی منتقل می‌کند (Cosentino et al, 2020). علت تشکیل گردوغبار در بیابان‌ها ناشی از ناپایداری هوا است در حالی که جو بالای سطح بیابان‌ها از نظر همرفتی بسیار ناپایدار بوده و شرایط تکوین پدیده‌های ناپایداری مثل پیچانه‌های کوچک گردوغباری را دارند (Kaviani, 2001). بررسی طوفان‌های گردوغباری استان خوزستان طی سال‌های ۱۳۷۴ تا ۱۳۷۸ نشان می‌دهد که طی دوره گرم سال، همگرایی مداری سامانه کم‌فشار ایران و پاکستانی از سمت شرق و سامانه پرفشار آزور از سمت غرب و در نتیجه افزایش شیب فشار روی خوزستان طی روزهای اوج طوفان‌های گردوغباری باعث انتقال و انتشار پدیده گردوغبار در استان خوزستان و استان‌های اطراف می‌شود (karami, 2009). جریان هوای آلوده به ریزگردها از بیابان‌های عراق و عربستان در این طوفان‌ها عامل اصلی قلمداد شده است. نتایج تحلیل آماری و اقلیمی طوفان‌های گردوغبار در ایران نشان داد که زابل دارای بیشترین رخداد گردوغبار در سال ۲۰۱۵ بوده است. بیشترین سرعت باد و شدیدترین کاهش دید در ایستگاه زابل در ۶ جولای ۲۰۱۵ مشاهده شده است. توده‌های گردوغباری در اراک و فسا از غرب و شمال غرب عراق و در زابل از افغانستان وارد ایران شده است. نتایج نشان داد که در ۲۱ جولای ۲۰۱۵ که شدیدترین کاهش دید در فسا روی داده، بیانگر حضور یک کم ارتفاع بر روی روسیه و یک پرفشار بر روی شمال دریای سیاه است. یک سامانه کم‌فشار نیز روی پاکستان مشاهده شده است که زبانه‌های آن تا مناطق شرقی و جنوبی ایران کشیده شده است. همچنین نتایج نشان داد که بیشترین رویداد تعلیق در شهرهای فسا و اراک با سرعت‌های کم‌تر باد همراه است. بادهای شمال شرقی در دوره سرد سال می‌تواند به سبب بادهای ۱۲۰ روزه سیستان باشد که تأثیر آن در شهر زابل بیشتر خواهد بود. در روزی که بیشترین کاهش دید مشاهده می‌شود اکثر مناطق کشور تحت تأثیر زبانه‌های مرکز پرفشار واقع روی غرب عراق که در حرکت شرق سوی خود به مرکز ایران رسیده است، قرار گرفته‌اند (Fatahi Masrouf & Rezazadeh, 2020). در پژوهشی دیگر (Ahmadi et al, 2019) به بررسی ارتباط لایه‌مرزی در طوفان‌های گردوغبار جنوب غرب ایران (مطالعه موردی ۲۱ تا ۲۴ فوریه ۲۰۱۶) پرداخته شده است. نتایج نشان داد لایه‌مرزی هواسپهر در ایجاد تلاطم و انتقال گردوغبار به کشور نقش مهم و غیرقابل انکاری را دارا می‌باشد. به طوری که در هر ۴ روز مورد مطالعه همبستگی بین ارتفاع لایه‌مرزی و عمق نوری ذرات بیشتر از ۷۰ درصد بوده است. هرچند مطالعات فراوانی در مورد جنبه‌های مختلف پدیده گردوغبار بر روی ایران

صورت گرفته و در برخی از آن‌ها به طور خاص سازوکارهای حاکم بر وقوع طوفان‌های غرب و جنوب غرب کشور نیز مورد بررسی قرار گرفته است؛ اما به نظر می‌رسد که هنوز سازوکار اصلی حاکم در زمان وقوع طوفان‌های گردوغباری در منطقه جنوب غرب کشور، روند پدیده گردوغبار، ساختار دینامیکی جو و همچنین گردش جو در مقیاس منطقه‌ای که نقش مهمی در ایجاد طوفان‌های گردوغباری دارد مورد توجه دقیق قرار نگرفته است؛ لذا در این پژوهش سعی می‌گردد ساختار منطقه‌ای گردش جو و سازوکارهای اصلی حاکم بر وقوع طوفان‌های گردوغباری در جنوب غرب ایران مورد بررسی قرار گرفته و الگوهای دینامیکی- اقلیمی به وجود آورنده طوفان‌های گردوغبار تعیین گردد. از جمله آثار زیان‌بار دیگر ناشی از طوفان‌های گردوغبار، می‌توان به فرسایش و ویرانی خاک در مناطق چشمه و انتقال ذرات گردوغبار و مواد معدنی به مناطق مسکونی و مناطق کشاورزی که باعث ایجاد آلودگی در آن منطقه می‌شود اشاره کرد. هدف از انجام این تحقیق شناخت تغییرات روند زمانی گردوغبار طی دوره آماری مشخص و همچنین تحلیل دینامیکی طوفان‌های گردوغبار جنوب غرب ایران، در راستای آگاهی از وجود یا عدم وجود روند تغییرات در طوفان‌های گردوغبار می‌باشد تا ضمن شناخت این تغییرات، نتایج حاصل از تحقیق در امور مختلف محیطی جهت تدوین برنامه‌های منطقه‌ای مورد استفاده قرار گیرد.

۲- منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه ایستگاه بندرعباس با مختصات $27/21$ درجه عرض شمالی و $56/37$ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ واقع شده است. شهرستان بندرعباس از جهت شمال با ارتفاعات کوه گنو و از جهت جنوب با آب‌های گرم خلیج فارس و دریای عمان محصور شده است.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

جدول ۱: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

نام استان	نام ایستگاه	عرض جغرافیایی (درجه)	طول جغرافیایی (درجه)	ارتفاع از سطح دریا (متر)
خوزستان	صفی‌آباد دزفول	۳۲/۲۵	۴۸/۴۳	۸۲/۹
	فرودگاه دزفول	۳۲/۴	۴۸/۳۸	۱۴۳
	بستان	۳۱/۷۱	۴۸/۰۱	۷/۸
	اهواز	۳۱/۳۴	۴۸/۷۴	۲۲/۵
	مسجد سلیمان	۳۱/۹۸	۴۹/۲۴	۳۲۰/۵
	رامهرمز	۳۱/۲۷	۴۹/۶۰	۱۵۰/۵
	فرودگاه امیدیه	۳۰/۸۳	۴۹/۵۵	۳۴/۹
	آبادان	۳۰/۳۸	۴۸/۲۱	۶/۶
	بندر ماهشهر	۳۰/۵۵	۴۹/۱۶	۶/۲
	امیدیه (آقاجاری)	۳۰/۷۴	۴۹/۶۹	۲۷
کهگیلویه و بویراحمد	دوگنبدان	۳۰/۳۵	۵۰/۸۲	۷۲۶
	یاسوج	۳۰/۷۰	۵۱/۵۶	۱۸۱۶/۳
بوشهر	جزیره خارک	۲۹/۲۷	۵۰/۳۲	-۱/۲
	ساحلی بوشهر	۲۸/۹۰	۵۰/۸۲	۸/۴
	بوشهر فرودگاه	۲۸/۹۶	۵۰/۸۲	۹
فارس	فسا	۲۸/۹۰	۵۳/۷۲	۱۲۶۸
	لار	۲۸/۶۷	۵۴/۳۷	۷۹۲
	آباده	۳۱/۲۰	۵۲/۶۲	۲۰۳۰
	درودزن	۳۰/۲۱	۵۲/۴۲	۱۶۴۲
	زرقان	۲۹/۷۸	۵۲/۷۰	۱۵۹۶
	شیراز	۲۹/۵۶	۵۲/۶۰	۱۴۸۸

۳- مواد و روش

۱-۳- داده‌ها و مراحل اجرای پژوهش

تهیه پایگاه داده‌ای مناسب یکی از اصول صحیح انجام یک پژوهش می‌باشد. منطقه‌ی مورد مطالعه در این پژوهش جنوب غرب ایران شامل ایستگاه‌های منتخب استان‌های خوزستان، بوشهر، فارس و کهگیلویه و بویراحمد در این تحقیق رویدادهای پدیده‌های گردوغبار بر اساس تعاریف سازمان هواشناسی جهانی و باتوجه به کدهای سینوپتیکی استخراج می‌شوند. بدین منظور از کدهای پدیده‌های گردوغبار شامل ۹۸، ۳۵، ۳۴، ۳۳، ۳۲، ۳۱، ۳۰، ۲۹، ۲۸، ۲۷، ۲۶، ۲۵، ۲۴، ۲۳، ۲۲، ۲۱، ۲۰، ۱۹، ۱۸، ۱۷، ۱۶، ۱۵، ۱۴، ۱۳، ۱۲، ۱۱، ۱۰، ۹، ۸، ۷، ۶، ۵ مربوط به داده‌های استخراج‌شده از ایستگاه‌های همدیدی منتخب جنوب غرب طی سال‌های ۱۹۸۵-۲۰۱۹ ایران استفاده می‌شود. برای تحلیل آماری و همچنین دینامیکی - سینوپتیکی برای شناسایی الگوهای فضایی - زمانی طوفان‌های گردوغبار از داده‌های ساعتی ایستگاه همدیدی شامل فشار سطح دریا، سمت و سرعت باد، دما، رطوبت نسبی و دید افقی اخذ شده از سازمان هواشناسی و همچنین داده‌های مربوط فشار سطح دریا، ارتفاع ژئوپتانسیل، مؤلفه‌ی باد مداری (wd) و باد نصف‌النهاری (vwnd) (متر بر ثانیه) شامل داده‌های دوباره واکاوی شده ERA5 مرکز پیش‌بینی‌های میان‌مدت

اروپا (ECMWF) با تفکیک مکانی ۰/۱۱۱ درجه قوسی و زمانی ۶ ساعت قابل دریافت از تارنمای www.ecmwf.int مورد استفاده قرار خواهد گرفت. برای بررسی بزرگ‌مقیاس شرایط همیدید پدیده مذکور از داده‌های واکاوی شده (بازتخلیل) مرکز اروپایی پیش‌بینی آب‌وهوا در محدوده میان‌مدت در ترازهای مختلف اتمسفری به صورت برنامه‌نویسی در گرس انجام پذیرفت. در این پژوهش از فراسنج‌های فشار تراز دریا، ارتفاع ژئوپتانسیل، باد مداری، باد نصف‌النهاری، دما و مؤلفه عمودی باد در سطوح مختلف و همچنین تاوایی، سرعت قائم و خطوط جریان استفاده شده است. محدوده مورد بررسی بین مختصات ۲۷/۶۷ تا ۳۲/۴۰ عرض شمالی و ۴۸/۰۱ تا ۵۴/۳۷ طول شرقی را دربرمی‌گیرد.

۲-۳- روند طوفان‌های گردوغبار جنوب غرب کشور با استفاده از روش من کندال و شیب خط سن

روش‌های پارامتریک عمدتاً بر اساس رابطه رگرسیونی بین سری داده‌ها با زمان استوار می‌باشند. روش‌های ناپارامتریک از کاربرد نسبتاً وسیع‌تر و چشمگیرتری نسبت به روش‌های پارامتریک برخوردارند. برای سری‌هایی که توزیع آماری خاصی بر آن‌ها قابل برآزش نیست و چولگی یا کشیدگی زیادی دارند استفاده از روش‌های ناپارامتریک مناسب‌تر است. آزمون من-کندال جزء متداول-ترین و پرکاربردترین روش‌های ناپارامتریک تحلیل روند سری‌های زمانی به شمار می‌رود با استفاده از روش من-کندال تغییرات داده‌ها شناسایی، نوع و زمان آن مشخص می‌شود. آزمون ناپارامتری من-کندال بر پایه رتبه داده‌ها در یک سری زمانی بسط و توسعه یافت (Mann, 1945; Kendall, 1975). این روش به طور متداول و گسترده‌ای در تحلیل روند سری‌های هیدرولوژیکی و هواشناسی به کار گرفته می‌شود. از نقاط قوت این روش می‌توان به مناسب بودن کاربرد آن برای سری‌های زمانی که از توزیع آماری خاصی پیروی نمی‌کنند اشاره نمود. اثرپذیری ناچیز این روش از مقادیر حدی که در برخی از سری‌های زمانی مشاهده می‌گردند نیز از دیگر مزایای استفاده از این روش است. فرض صفر این آزمون بر تصادفی بودن و عدم وجود روند در سری داده‌ها دلالت دارد و پذیرش فرض یک (رد فرض صفر) دال بر وجود روند در سری داده‌ها می‌باشد.

این آزمون در سال ۱۹۸۸ به وسیله سازمان جهانی هواشناسی پیشنهاد شد و در بررسی معنی‌داری روند سری‌های اقلیمی به کرات و در موارد مختلف استفاده شده است. مراحل محاسبه آماره این آزمون به شرح زیر است:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad \text{رابطه ۱}$$

که با قبول فرض H_0 توزیع S در حد $n \rightarrow \infty$ نرمال است.

n ، مدت سری زمانی داده‌ها؛ x_k و x_j نیز داده‌های متوالی k ام و j ام سری است. که در این رابطه $k, j \leq n$ و $k \neq j$ است Sgn ، تابع علامت است؛ و تابع علامت نیز از روابط زیر مشخص می‌شود:

$$\text{gn}(x_j - x_k) = \begin{cases} +1 & \text{if } (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & \text{if } (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & \text{if } (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad \text{رابطه ۲}$$

آزمون آماره‌ی S میانگین صفر دارد و واریانس آن نیز از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2t+5) - \sum t(t-1)(2t+5)}{18} \quad \text{رابطه ۳}$$

در رابطه بالا t اندازه یک بازه زمانی در سری داده‌ها است و $\sum t$ نیز مجموع بازه‌ها (سری زمانی داده‌ها) است. برای مواردی که مدت سری زمانی داده‌های بیشتر از ۱۰ باشد ($n > 10$) آماره Z استاندارد شده را باید به کمک رابطه زیر محاسبه کرد.

$$Z = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{\text{Var}(s)}} & \text{if } s > 0 \\ 0 & \text{if } s = 0 \\ \frac{s-1}{\sqrt{\text{Var}(s)}} & \text{if } s < 0 \end{cases} \quad \text{رابطه ۴}$$

بنابراین، در آزمون دوطرفه روند، اگر رابطه $|Z| \leq Z_{\frac{\alpha}{2}}$ در سطح اطمینان ۰/۰۹۵ برقرار باشد، باید فرضیه H_0 (قبول تصادفی بودن سری داده‌ها) را پذیرفت و در غیر این صورت باید فرضیه H_1 (وجود روند) را قبول کرد. اگر معنی‌داری در سطح $\alpha = 0/01$ (سطح ۹۹ درصد اطمینان) آزمون شد، فرضیه صفر H_0 در صورتی رد می‌شود که $|Z| > Z_{0.995} = 2.575$ برقرار باشد. مقادیر مثبت روند Z روند صعودی و مقادیر منفی Z روند نزولی سری داده‌ها را نشان می‌دهند (Vivekanandan, 2007).

اگر روند در سری داده‌ها مشاهده شد، شیب واقعی (میزان تغییر در واحد زمان) را می‌توان با استفاده از روش ناپارامتری ساده‌ای که توسط سن توسعه داده شده برآورد نمود. ابتدا باید شیب هر جفت داده‌ی متوالی سری را از رابطه زیر به دست آورد:

$$Q_1 = \frac{(x_i - x_k)}{j - k} \text{ for } i = 1, 2, \dots, n \quad \text{رابطه ۵}$$

که در این رابطه x_i و x_k به ترتیب مقادیر داده‌ها در زمان‌های j و k است که با هم یک واحد زمانی اختلاف دارند. Q_1 مقدار میانه‌ی n برآورد شده شیب نمودار سن است. اگر n فرد باشد، برآورد کننده شیب سن به این صورت محاسبه خواهد شد:

$$Q_{med} = Q_{(n+2)/2} \quad \text{رابطه ۶}$$

و اگر n زوج باشد، برآورد کننده شیب سن از این رابطه به دست می‌آید:

$$Q_{med} = (Q_{(n)/2} + Q_{(n+2)})/2 \quad \text{رابطه ۷}$$

اگر مقدار Q_{med} را با آزمون دوطرفه در سطح اطمینان $100(1-\alpha)$ درصد بررسی شود شیب واقعی نمودار روند را می‌توان به دست آورد (Vivekanandan, 2007). اگر عدد صفر در دامنه بین دو شیب استخراج شده قرار بگیرد فرض صفر تأیید شده و در نتیجه بر سری زمانی مورد آزمون نمی‌توان هیچ روندی را در سطح اطمینان مورد نظر نسبت داد. در

غیر این صورت فرض صفر رد شده و می‌توان پذیرفت که سری زمانی دارای روند معنی‌داری در سطح اطمینان مورد آزمون است.

بررسی مسیرهای انتشار گردوغبار با استفاده از مدل HYSPLIT، بررسی تصاویر سنجنده موریس^۱، بررسی ارتباط لایه‌مرزی^۲ و بررسی تابش موج کوتاه ورودی سطحی از دیگر روش‌های بکار رفته در این تحقیق می‌باشد. ارتفاع لایه‌مرزی مبتنی بر برونداد پایگاه مرکز پیش‌بینی هوا سپهر اروپایی می‌باشد. داده‌های مرکز مذکور نتیجه برهم‌کنش پیچیده‌ای میان داده‌های موجود و نتایج الگوهای هوا سپهری بوده که به‌صورت داده‌های شبکه‌بندی عرضه شده است.

جدیدترین محصول عرضه شده این محصول داده نسخه ERA5 می‌باشد. ERA5 نسل پنجم تجزیه و تحلیل مجدد ECMWF برای اقلیم و آب‌وهوای جهانی در ۴ تا ۷ دهه گذشته است. در حال حاضر داده‌ها از سال ۱۹۵۰ در دسترس هستند، به ورودی‌های Climate Data Store برای سال‌های ۱۹۵۰-۱۹۷۸ (توسعه اولیه) و از سال ۱۹۷۹ به بعد (نسخه نهایی به همراه به‌روزرسانی‌های به‌موقع، این صفحه) در دسترس هستند. ERA5 جایگزین تحلیل مجدد ERA-Interim شده است. در این مطالعه ارتفاع لایه‌مرزی برای روزهای مورد مطالعه به‌صورت میانگین روزانه با تفکیک مکانی می‌باشد. این پارامتر عمق هوای سطح زمین است که بیشترین تأثیر را از مقاومت در برابر انتقال تکانه، گرما یا رطوبت در سطح زمین می‌گیرد. ارتفاع لایه‌مرزی می‌تواند تا چند ده متر کم شود، مثلاً در هوای خنک در شب، یا بیابان در وسط یک روز آفتابی گرم تا چندین کیلومتر ارتفاع داشته باشد. هنگامی که ارتفاع لایه‌مرزی کم باشد، غلظت‌های بالاتری از آلاینده‌ها (ساطع شده از سطح زمین) می‌تواند ایجاد شود. محاسبه ارتفاع لایه‌مرزی بر اساس عدد ریچاردسون (معیار شرایط جوی) می‌باشد (<https://cds.climate.copernicus.eu>).

۴- یافته‌ها

۴-۱- روند سالانه گردوغبار به تفکیک ایستگاه‌های جنوب غرب ایران

در بررسی تغییرات گردوغبار سالانه با استفاده از آزمون من - کندال مشاهده شد که روند گردوغبار سالانه در اکثر ایستگاه‌های جنوب غرب ایران (به‌جز فرودگاهی دزفول، فرودگاهی امیدیه، شیراز ساحلی بوشهر و بوشهر فرودگاهی و لار) روند افزایشی داشته که این روند در ایستگاه‌های جزیره خارک، زرقان و فسا در سطح ۹۹/۹ درصد و در ایستگاه‌های بستان، آبادان، بندر ماهشهر، امیدیه آقاجاری، دو گنبدان و فرودگاهی بوشهر در سطح ۹۹ درصد و در ایستگاه‌های مسجدسلیمان و یاسوج در سطح ۹۵ درصد و در ایستگاه اهواز در سطح ۹۰ درصد معنی‌دار و افزایشی است. آماره‌های آزمون تخمین شیب سن در سطوح اطمینان مورد بررسی نشان دادند که در ایستگاه‌های بستان، آبادان، بندر ماهشهر، امیدیه آقاجاری، دو گنبدان، جزیره خارک، زرقان و فسا ۹۹ درصد در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار افزایشی بوده، و همچنین ایستگاه‌های فرودگاهی دزفول و فرودگاهی بوشهر در سطح اطمینان ۹۹ درصد کاهش می‌باشد. به این دلیل که عدد صفر بین دو شیب استخراج شده قرار نمی‌گیرد فرض صفر رد شده و می‌توان پذیرفت که در ایستگاه‌های مذکور سری زمانی دارای روند معنی‌داری در سطوح اطمینان مورد آزمون می‌باشد. از طرف دیگر در سایر ایستگاه‌ها چون عدد صفر بین دو شیب تخمین سن استخراج شده قرار می‌گیرد بنابراین می‌توان پذیرفت که سری زمانی‌های مورد نظر دارای روند معنی‌داری در سطوح اعتماد مورد آزمون نیست.

1 Modis

2 Boundary layer height

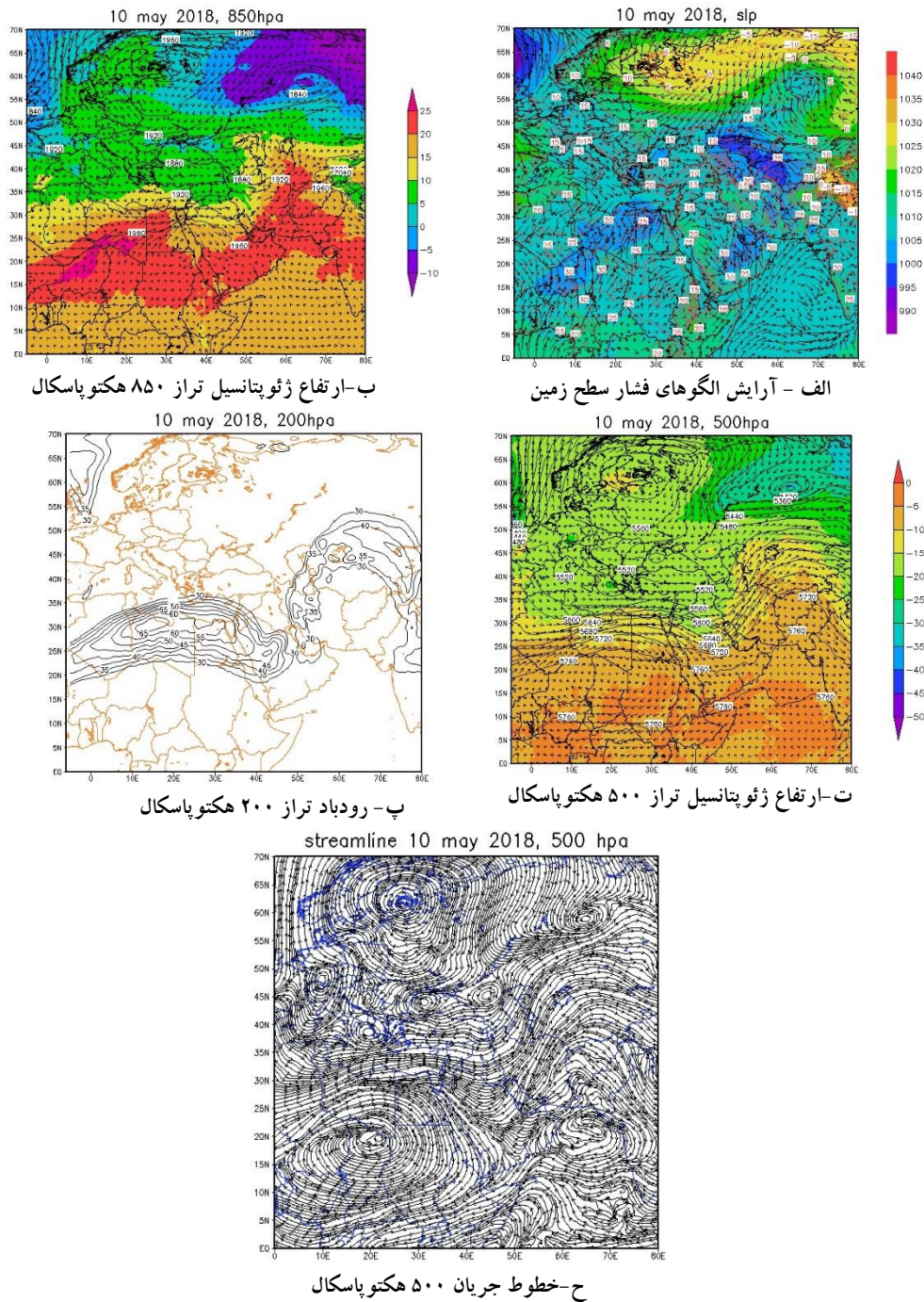
جدول ۲: آماره من-کندال و شیب خط سن روند گردوغبار سالانه (کد ۰۶) جنوب غرب ایران دوره ۲۰۱۹-۱۹۸۵

سری زمانی	روند من کندال		تخمین شیب سن			Test Z	signific.
	Q	Q	Qmax95	Qmin95	Qmax99		
صفی آباد	۰/۰۰۰	۱/۲۲	۲/۷۲۶	-۰/۵۲۳	۳/۲۸۸		
فرودگاهی دزفول	-۱/۸۳۳	-۳/۲۷	-۰/۸۰۰	-۳/۰۰۰	-۰/۴۵۸	**	
بستان	۱/۱۳	۳/۱۵	۳/۲۲۵	۰/۷۶۰	۳/۵۷۱	**	
اهواز	۱/۲۰۰	۱/۶۶	۲/۴۵۶	-۰/۱۸۶	۲/۸۵۷	+	
مسجد سلیمان	۱/۲۹۴	۲/۰۷	۲/۵۵۰	۰/۱۰۵	۳/۰۰۰	*	
رامهرمز	۰/۲۸۶	۰/۵۳	۱/۳۱۷	-۰/۶۶۷	۱/۶۵۶		
آباده	۰/۲۷۳	۱/۳۱	۰/۶۰۰	-۰/۰۹۱	۰/۶۶۷		
فرودگاهی امیدیه	-۰/۵۰۰	-۰/۶۷	۰/۹۰۰	-۱/۸۷۴	۱/۳۴۲		
آبادان	۱/۶۲۵	۲/۹۶	۲/۷۵۰	۰/۶۳۸	۳/۱۰۱	**	
بندر ماهشهر	۱/۱۷۶	۲/۸۰	۲/۰۲۴	۰/۳۷۷	۲/۳۷۵	**	
امیدیه آقا جاری	۱/۴۵۰	۲/۷۶	۲/۳۵۳	۰/۳۹۶	۲/۷۱۴	**	
دوگنبدان	۱/۰۷۷	۲/۹۱	۲/۱۵۸	۰/۲۹۴	۲/۴۵۸	**	
یاسوج	۰/۷۷۳	۱/۹۹	۱/۵۴۳	۰/۰۰۰	۲/۰۰۰	*	
درودزن	۰/۰۰۰	۰/۰۷	۰/۵۳۸	-۰/۴۰۰	۰/۷۰۶		
جزیره خارک	۰/۳۹۴	۳/۴۰	۰/۶۰۰	۰/۲۲۲	۰/۷۶۵	***	
زرقان	۰/۵۷۹	۳/۵۹	۰/۸۴۷	۰/۲۲۰	۱/۰۰۰	***	
شیراز	-۰/۴۷۸	-۰/۶۵	۰/۹۲۱	-۱/۵۸۲	۱/۲۸۸		
بوشهر ساحلی	-۰/۵۰۰	-۰/۶۱	۰/۸۰۳	-۲/۰۰۰	۱/۱۶۷		
بوشهر فرودگاهی	-۲/۹۲۹	-۲/۹۳	-۱/۱۱۳	-۴/۳۸۶	-۰/۲۷۴	**	
فسا	۲/۰۰۰	۴/۵۱	۲/۸۰۴	۱/۱۵۴	۳/۲۰۰	***	
لار	-۰/۲۷۸	-۰/۵۰	۰/۹۷۹	-۲/۱۵۶	۱/۵۵۱		

۲-۴- تحلیل و بررسی نقشه‌های سینوپتیکی و دینامیکی طوفان‌های گردوغبار جنوب غرب ایران

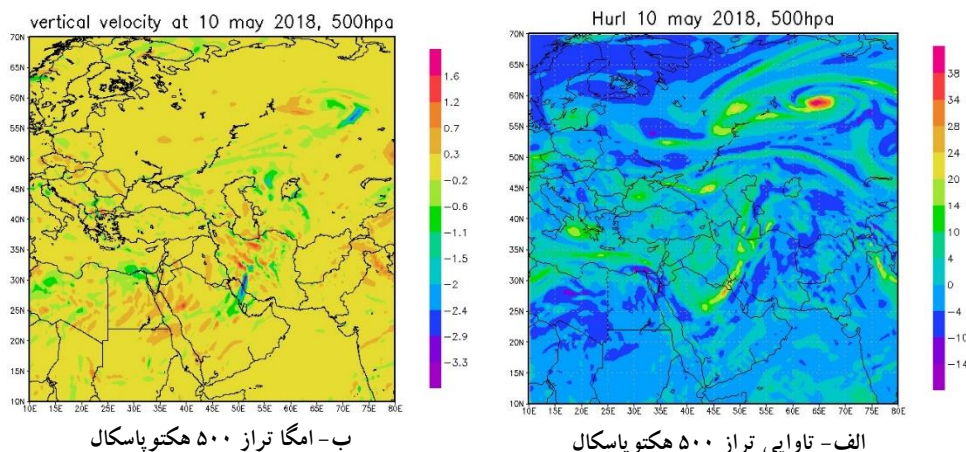
انتخاب رویداد طوفان‌های گردوغبار جهت تحلیل دینامیکی طوفان‌های گردوغبار جنوب غرب ایران بر اساس نوع پدیده گردوغبار و فراگیر بودن طوفان گردوغبار (بیشترین ایستگاه‌های منطقه مورد مطالعه مواجه با پدیده گردوغبار در یک روز) انجام گردید. بر این اساس روز ۱۰ تا ۱۲ می ۲۰۱۸ برای بررسی طوفان‌های گرد و غبار انتخاب شد. در روز ۱۰ می ۲۰۱۸ یک پرفشار با هسته ۱۰۲۵ هکتوپاسکال با دمای ۰ درجه سلسیوس در منطقه شرق اروپا و کم‌فشار دیگری با هسته ۱۰۰۰ هکتوپاسکال و دمای ۲۵+ درجه سلسیوس بر روی ایران (شمال شرق ایران) که زبانه‌های این کم‌فشار ایران و کشورهای همسایه (عراق و سوریه) را تحت شعاع قرار داده است. بر روی کشور عراق و سوریه زبانه کم‌فشار ۱۰۰۰ هکتوپاسکال با دمای ۱۵ درجه سلسیوس واقع شده است از طرف کم‌فشاری با هسته ۹۵۵ هکتوپاسکال بر روی کشور امارات و عربستان واقع شده است (شکل ۲- الف). در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکالی یک کم ارتفاع با هسته ۱۶۰۰ با دمای ۵- درجه سلسیوس بر روی سیبری واقع شده است و یک پر ارتفاع با هسته ۲۰۰۰ با دمای ۰ درجه سلسیوس بر روی شرق اروپا قرار گرفته است. زبانه‌های کنتوری ۱۸۸۰ تا ۱۹۶۰ بر روی ایران واقع شده است که بر روی نیمه جنوبی ایران دما ۲۰+ درجه سلسیوس و بر روی نیمه شمالی دما ۱۰+ درجه سلسیوس قرار دارد (شکل ۲- ب). در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال یک کم ارتفاع با هسته ۵۵۰۰ بر روی ترکیه واقع شده است که زبانه‌های ۵۶۰۰ تا ۵۷۲۰ بر روی ایران گذر کرده است که دما بر روی جنوب غرب ایران

۱۵- درجه سلسیوس و بر روی شمال غرب ایران ۲۰- درجه سلسیوس می‌باشد (شکل ۲-ت). از طرفی یک کم ارتفاع با هسته ۵۲۴۰ با دمای ۴۰- درجه سلسیوس بر روی سبیری دیده می‌شود. یک پر ارتفاع با هسته ۵۶۴۰ با دمای ۲۰- درجه سلسیوس بر روی شرق اروپا واقع شده است. جت جنب حاره با هسته سرعت ۶۵ متر بر ثانیه بر روی عرض‌های ۲۵ تا ۳۰ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۱۰ تا ۲۰ درجه شرقی و جت قطبی در جنوب غربی ایران با سرعت ۴۰ متر بر ثانیه به هم نزدیک می‌شوند (شکل ۲-پ). نقشه خطوط جریان نشان می‌دهد که در این روز جریان باد از سمت شمال کشور عربستان و جنوب کشور عراق به سوی منطقه مورد مطالعه است (شکل ۲-ح).



شکل ۲: نقشه‌های سطوح مختلف جو ساعت صفر UTC روز ۱۰ می ۲۰۱۸ (دما: درجه سلسیوس، فشار: هکتوپاسکال و ارتفاع: متر)

شکل نقشه تاوایی (شکل ۳- الف) با گردش چرخندی در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال مطابقت دارد و بر این اساس حداکثر تاوایی با در شمال دریاچه خزر در محدوده جغرافیایی ۶۰ درجه شمالی و ۷۰ درجه شرقی مشاهده می‌شود. در محدوده کشور ایران میزان تاوایی ۱۴ تا ۳۴ بوده و از شمال کشور عربستان و جنوب کشور عراق به سمت جنوب غربی ایران می‌باشد. چون در جنوب غرب ایران تاوایی در روز واقعه نسبت به دور روز قبل آن افزایش یافته نشان‌دهنده عامل رشد گردوغبار در منطقه می‌تواند باشد. در نقشه سرعت قائم (شکل ۳- ب) مشاهده می‌گردد بر روی کشور عراق و غرب ایران سرعت قائم بین ۰/۵ تا ۰/۷ متر بر ثانیه و در مناطق غرب و جنوب غرب ایران بین ۰/۵ تا ۰/۷ متر بر ثانیه نشان می‌دهد.

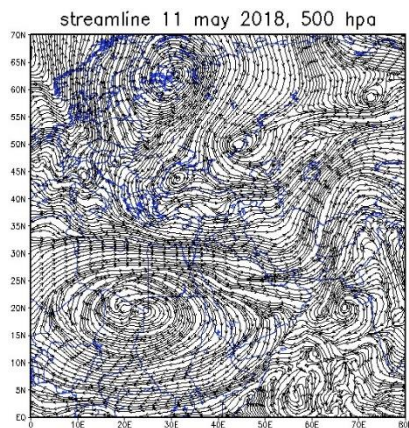
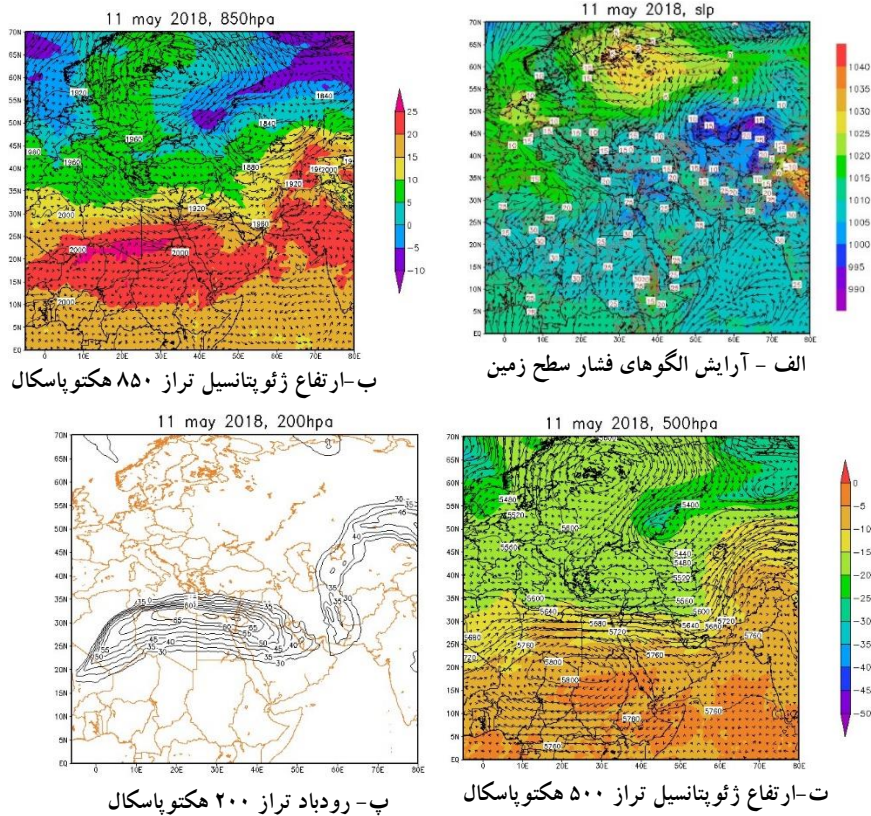


ب- امگا تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال

الف- تاوایی تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال

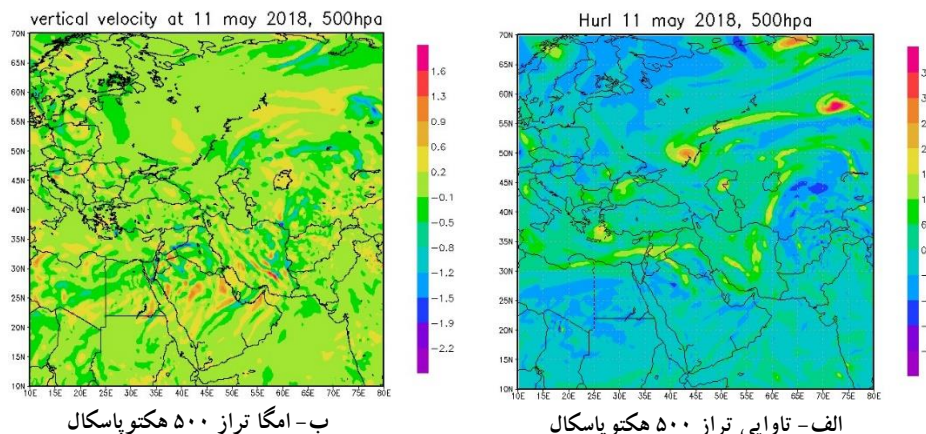
شکل ۳: نقشه‌های تاوایی و امگا سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال ساعت صفر UTC روز ۱۰ می ۲۰۱۸ بررسی وضعیت تاوایی و امگا در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال

در این روز همان هسته فشاری ۱۰۲۵ هکتوپاسکال در محدوده شرق اروپا با دمای ۵ درجه سلسیوس واقع شده است و کم‌فشار با هسته ۹۹۵ هکتوپاسکال و دمای ۱۵ درجه سلسیوس با حرکت شرق سوی خود بر روی ترکمنستان قرار دارد. بر روی کشور عراق و کشور سوریه زبانه کم‌فشار ۱۰۰۵ هکتوپاسکال با دمای ۱۵ درجه سلسیوس واقع شده است (شکل ۴- الف). در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال بر روی سیبری یک کم ارتفاع با هسته ۱۶۴۰ با دمای ۵- بسته شده است و یک پر ارتفاع با هسته ۲۰۰۰ با دمای ۰ درجه سلسیوس بر روی شرق اروپا قرار دارد بر روی ایران زبانه‌های کنتور بین ۱۹۲۰ تا ۱۹۶۰ واقع شده که دمای آن در نیمه جنوبی ۱۵ درجه سلسیوس و در نیمه شمالی ۵ درجه سلسیوس می‌باشد (شکل ۴- ب). در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال یک کم ارتفاع با هسته ۵۳۶۰ با دمای ۳۵- درجه سلسیوس بر روی سیبری واقع شده است که زبانه‌های ۵۵۶۰ تا ۵۷۲۰ بر روی ایران قرار دارد در نیمه جنوبی ایران ۱۵- درجه سلسیوس و در نیمه شمالی ۲۰- درجه سلسیوس می‌باشد و بر روی کشور عراق جریانات مداری است (شکل ۴- ت). نقشه جت نشان می‌دهد که یک جت جنب‌حاره‌ای با هسته سرعت ۶۵ متر بر ثانیه و حرکت شرق سوی خود به مناطق جنوب غربی ایران نزدیک شده و در عرض جغرافیایی ۱۸ تا ۳۵ درجه شمالی و طول جغرافیایی ۰ تا ۵۰ درجه شرقی واقع شده و به جت قطبی در محدوده کشور ایران نزدیک شده است (شکل ۴- پ). نقشه خطوط جریان نشان می‌دهد که در این روز جهت جریان باد از سمت کشور عربستان و عراق به سوی منطقه مورد مطالعه است (شکل ۴- ح).



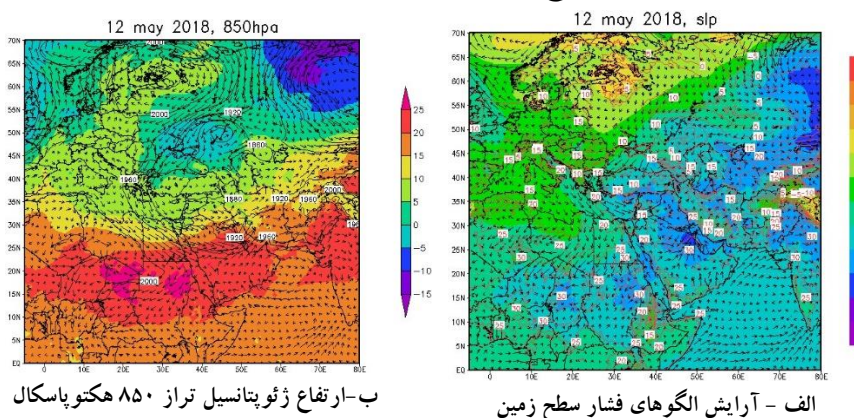
شکل ۵: نقشه‌های سطوح مختلف جو ساعت صفر UTC روز ۱۱ می ۲۰۱۸ (دما برحسب درجه سلسیوس، فشار برحسب هکتوپاسکال و ارتفاع برحسب متر)

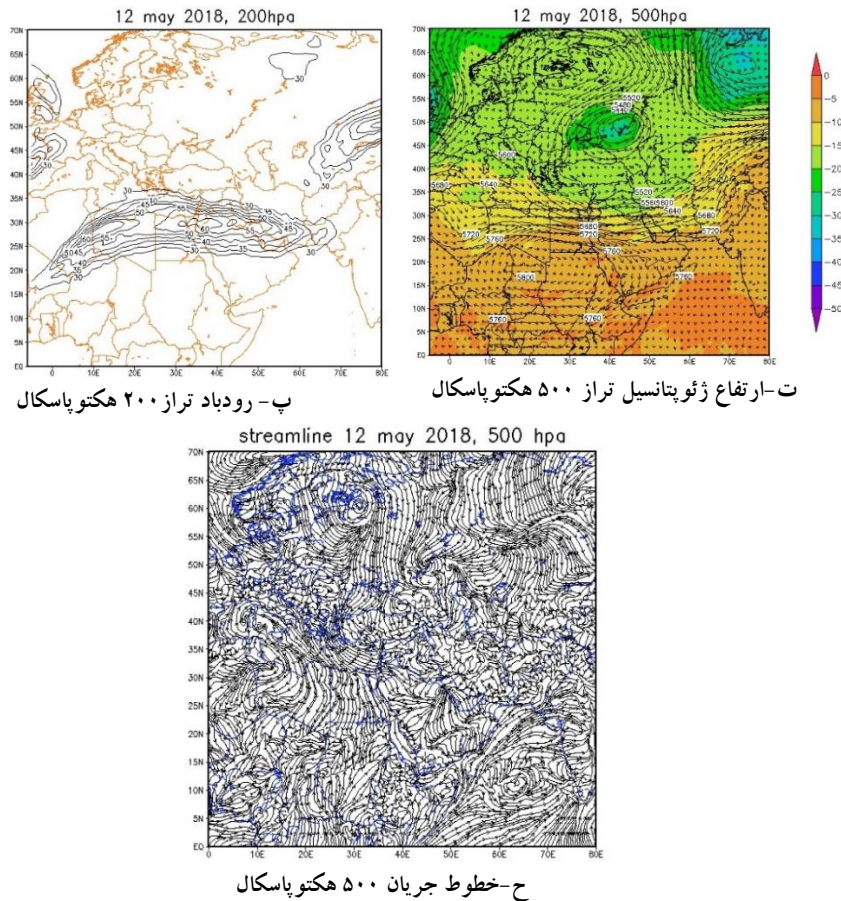
شکل نقشه تاوایی (۵-الف) با گردش چرخندی در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال مطابقت دارد و بر این اساس حداکثر تاوایی با در شمال دریاچه خزر در محدوده جغرافیایی ۵۰ درجه شمالی و ۴۰ درجه شرقی مشاهده می‌شود. بر روی غرب ایران تاوایی بین ۰ تا ۱۰ بوده و در نیمه‌شمالی عراق بین ۱۰ تا ۲۰ و بر روی جنوب غرب ایران ۶ تا ۱۰ مشاهده می‌گردد. در نقشه سرعت قائم مشاهده شد که بر روی کشور عراق و غرب ایران سرعت قائم بین ۰/۵ تا ۲ بوده و در مناطق غرب و جنوب غربی ایران بین ۰/۵ تا ۰/۶ را نشان می‌دهد (شکل ۵-ب).



شکل ۵: نقشه‌های تاوایی و امگا سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال ساعت صفر UTC روز ۱۱ می ۲۰۱۸ بررسی وضعیت تاوایی و امگا در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال

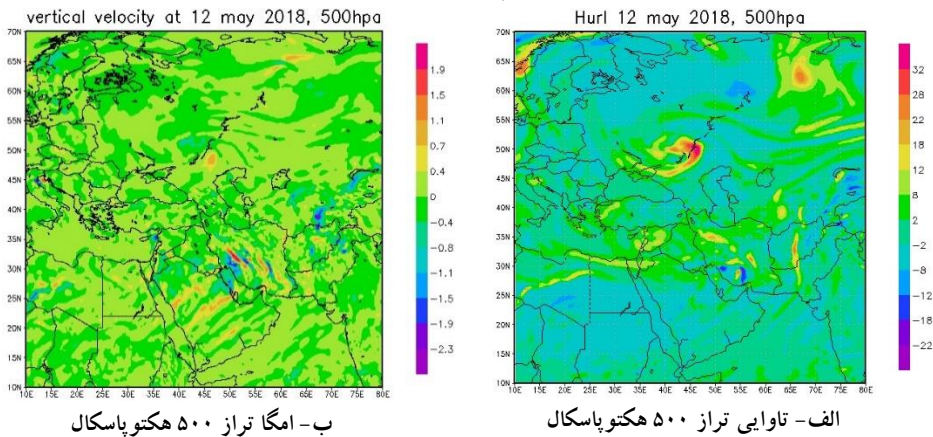
نقشه‌های سینوپتیکی روز ۱۲ می ۲۰۱۸ نشان می‌دهد که همچنان بر روی منطقه شرق اروپا پرفشار با هسته ۱۰۲۵ با دمای ۵ درجه سلسیوس و همچنین یک کم فشار با هسته ۹۹۷٫۵ هکتوپاسکال و دمای ۳۰ درجه سلسیوس بر روی عربستان و غرب خلیج فارس واقع شده است (شکل ۶- الف). در تراز ۸۵۰ هکتوپاسکال یک کم ارتفاع با هسته ۱۸۴۰ با دمای ۵- درجه سلسیوس بر روی شمال ترکیه واقع شده و گرادیان کنتوری بر روی همسایه‌های غربی ایران و ایران با کنتور ۱۹۲۰ تا ۱۹۶۰ دیده می‌شود. دمای آن در نیمه جنوبی منطقه ۲۰+ درجه سلسیوس و در نیمه شمالی بین ۵ تا ۱۵ درجه سلسیوس می‌باشد (شکل ۶- ب). در تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال با تقویت هسته کم ارتفاع ۵۳۶۰ با دمای ۳۵- درجه سلسیوس و حرکت آن به سوی جنوب و واقع شدن بر روی شمال ترکیه، سبب ایجاد گرادیان و تراف (ناوه) بر روی کشور عراق و مناطق غربی ایران شده و خطوط کنتوری از ۵۵۲۰ تا ۵۷۵۰ بر روی همسایه‌های غربی ایران و ایران واقع شده که دمای آن در نیمه جنوبی منطقه ۱۵- درجه سلسیوس و در نیمه شمالی منطقه ۲۰- درجه سلسیوس مشاهده می‌شود (شکل ۶- ت). نقشه جت در این روز حاکی از آن است که جت جنب حاره (بین عرض‌های جغرافیایی ۱۵ تا ۳۵ درجه شمالی و طول ۰ تا ۶۵ درجه شرقی) با هسته سرعت ۴۵ متر بر ثانیه بر روی جنوب غرب ایران قرار گرفته است (شکل ۶- پ). نقشه خطوط جریان نشان می‌دهد که در این روز جهت جریان باد از سمت کشور عربستان و عراق به سوی منطقه مورد مطالعه است (شکل ۶- ح).





شکل ۶: نقشه‌های سطوح مختلف جو ساعت صفر UTC روز ۱۲ می ۲۰۱۸ (دما برحسب درجه سلسیوس، فشار برحسب هکتوپاسکال و ارتفاع برحسب متر)

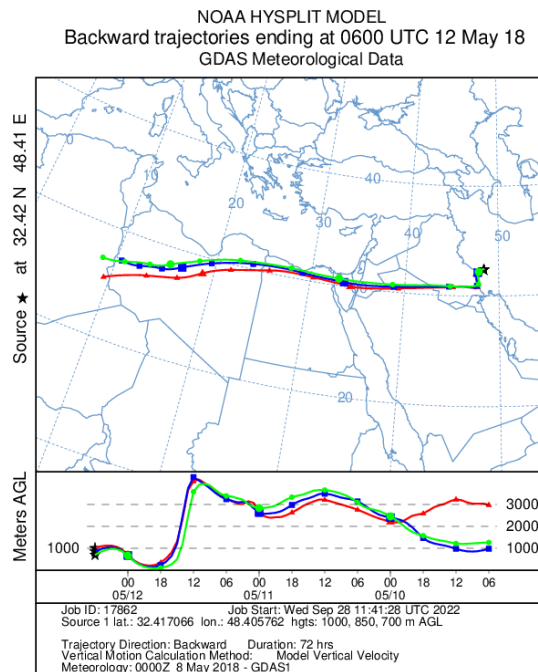
شکل نقشه تاوایی (۷- الف) با گردش چرخندی در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال مطابقت دارد و بر این اساس حداکثر تاوایی با در شمال دریاچه خزر در محدوده جغرافیایی ۵۰ درجه شمالی و ۴۰ درجه شرقی مشاهده می‌شود. بر روی غرب ایران (عراق و سوریه) تاوایی ۸ تا ۱۲ بوده و بر روی جنوب غرب ایران ۱۸- تا ۰ یعنی فرونشینی بوده است. نزول هوا بر روی غرب و جنوب غرب ایران کاملاً مشهود است. در نقشه سرعت قائم (شکل ۷- ب) مشاهده می‌شود که بر روی کشور عراق و غرب ایران سرعت قائم در نیمه جنوبی عراق بین ۰/۴ تا ۱/۱ و در نیمه شمالی عراق ۰/۴- تا ۰/۴+ است و در مناطق غرب و جنوب غربی ایران افت سرعت قائم مشاهده می‌شود و مقدار آن ۰/۸- تا ۱/۹- است.



شکل ۷: نقشه‌های تاوایی و امگا سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال ساعت صفر UTC روز ۱۲ می ۲۰۱۸ بررسی وضعیت تاوایی و امگا در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال

۳-۴- بررسی مسیرهای انتشار گردوغبار با استفاده از مدل HYSPLIT

نتایج اجرای مدل HYSPLIT برای مسیریابی انتشار ذرات گردوغبار با گام زمانی ۷۲ ساعته، بیانگر وجود رخداد پدیده گردوغبار در تعداد قابل توجهی از ایستگاه‌های جنوب غرب ایران می‌باشد. یکی از مهم‌ترین مناطق منشأ تولید گردوغبار کشور عراق و عربستان می‌باشد. همان‌گونه که در شکل ۸ مشاهده می‌شود مسیر باد به صورت مستقیم طول جغرافیایی را طی کرده و پس از گذر از کشورهای عربستان و عراق به جنوب غرب ایران می‌رسد.



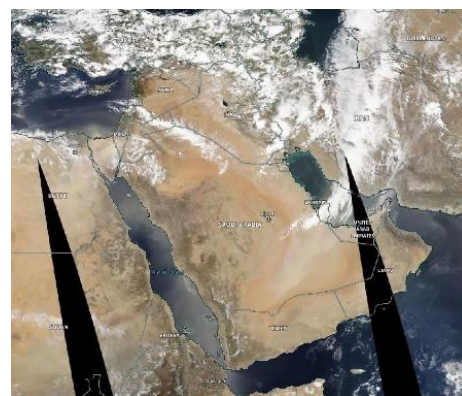
شکل ۸: ردیابی پسگرد مسیر باد با گام زمانی ۷۲ ساعته ۱۲ می ۲۰۱۸

۴-۴- بررسی تصاویر سنجنده مودیس

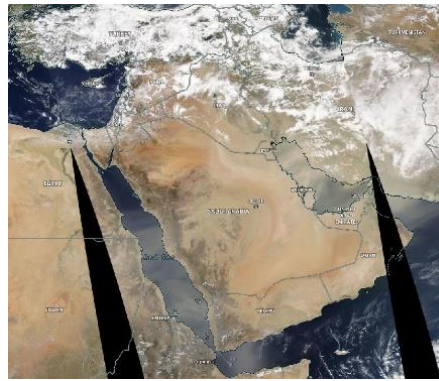
باتوجه به تصاویر دریافتی از سنجنده مودیس، گردوخاک از قاره آفریقا (کشور سودان) پس از عبور از دریای سرخ به کشور عربستان رسیده و با تقویت در کشور عربستان در تاریخ ۱۱ و ۱۲ می ۲۰۱۸ به جنوب غرب ایران می‌رسد.



ب- تصویر ماهواره‌ای سنجنده مودیس ۱۱ می ۲۰۱۸



الف- تصویر ماهواره‌ای سنجنده مودیس ۱۰ می ۲۰۱۸



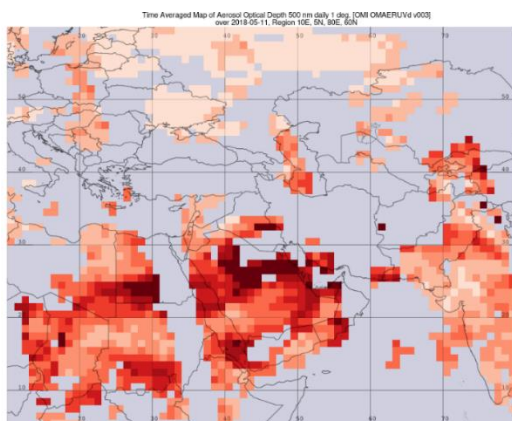
پ- تصویر ماهواره‌ای سنجنده مودیس ۱۲ می ۲۰۱۸

شکل ۹: تصاویر دریافتی از سنجنده مودیس ۰۹ و ۱۰ و ۱۱ و ۱۲ می ۲۰۱۸

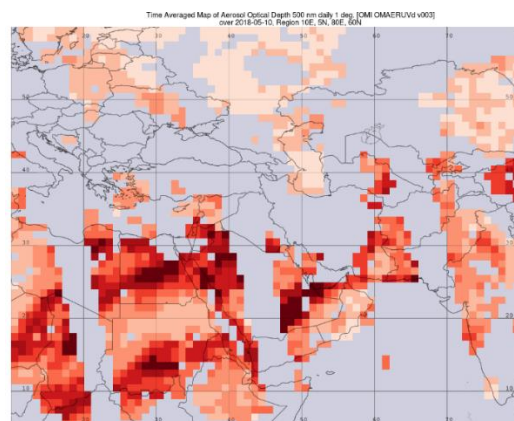
ارتفاع لایه‌مرزی در روزهای ۱۰ تا ۱۲ می ۲۰۱۸ در جدول شماره ۳ آورده شده است. بیشینه و میانگین لایه‌مرزی در روز ۱۲ ژوئن به حداکثر خود در منطقه مورد مطالعه می‌رسد. بانفوذ و گسترش طوفان گردوغبار از سمت غرب کشور (مرز بین کشورهای عراق و عربستان) عمق ذرات نوری افزایش یافته که این تغییرات در شکل ۱۰ نشان داده شده است. در روز اول نفوذ گردوغبار بیشتر از قسمت‌های جنوبی و از سمت کشور عربستان با گذر از خلیج فارس وارد منطقه مورد مطالعه می‌شود.

جدول ۳: ارتفاع لایه‌مرزی روز ۱۰ تا ۱۲ می ۲۰۱۸

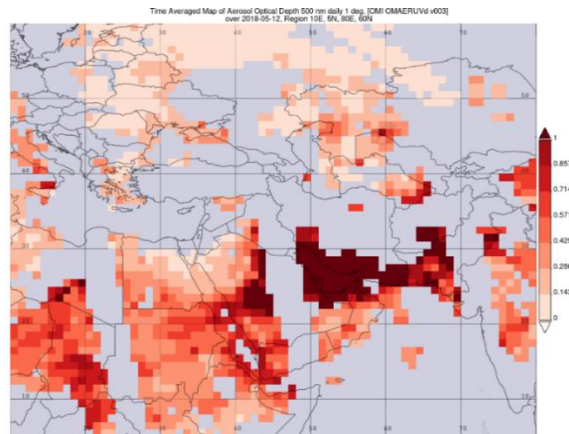
ارتفاع لایه‌مرزی (متر)			روز
میانگین	بیشینه	کمینه	
۸۷۸	۱۴۶۴	۲۹۲	۲۰۱۸-۰۵-۱۰
۹۷۳	۱۸۲۵	۱۲۱	۲۰۱۸-۰۵-۱۱
۹۹۲	۱۷۰۹	۲۷۵	۲۰۱۸-۰۵-۱۲



ب- ۱۱ می ۲۰۱۸

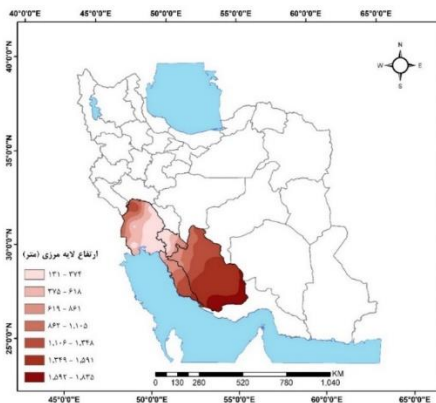


الف- ۱۰ می ۲۰۱۸

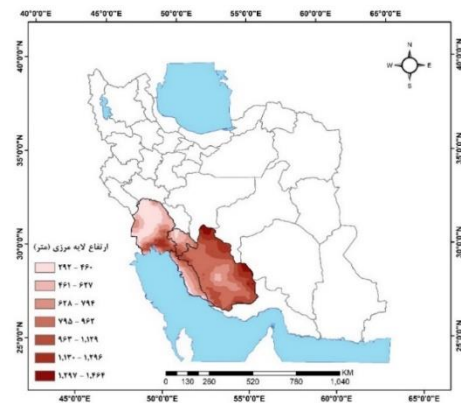


پ- ۱۲ می ۲۰۱۸

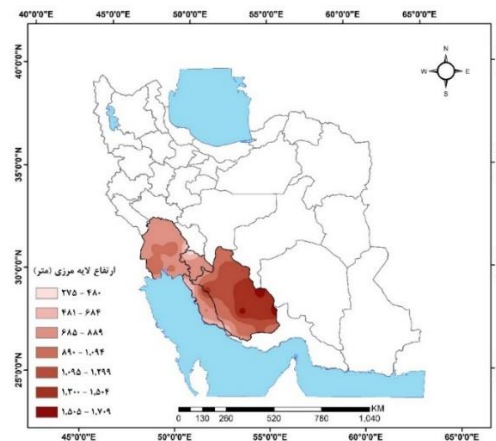
شکل ۱۰: عمق ذرات نوری AOD 500 منطقه مورد مطالعه سنجنده مودیس با تفکیک مکانی ۰/۵ درجه روز ۱۰ می ۲۰۱۸ با توجه به نفوذ گردوغبار ارتفاع لایه مرزی در ایستگاه‌های جنوبی منطقه مورد مطالعه افزایش می‌یابد. در روز ۱۱ می با تداوم گردوغبار از سمت جنوب و غرب (کشورهای عربستان و عراق) عمق نوری ذرات در استان‌های غربی افزایش می‌یابد. با توجه به مسیر ورودی پدیده گردوغبار ارتفاع لایه مرزی در دو ناحیه شمال و جنوب منطقه مورد مطالعه افزایش یافته است. در روز ۱۲ می بیشترین نفوذ گردوغبار از سمت کشور عربستان می‌باشد به نحوی که مناطق جنوبی تر را بیشتر تحت تأثیر قرار داده است. با توجه به مسیر ورودی گردوغبار ارتفاع لایه مرزی در ایستگاه‌های جنوبی افزایش یافته است.



ب- ۱۱ می ۲۰۱۸



الف- ۱۰ می ۲۰۱۸



پ- ۱۲ می ۲۰۱۸

شکل ۱۱: ارتفاع لایه مرزی روز ۱۱ الی ۱۲ می ۲۰۱۸

۵- بحث و نتیجه‌گیری

در بررسی تغییرات گردوغبار سالانه با استفاده از آزمون من - کندال مشاهده شد که روند گردوغبار سالانه در اکثر ایستگاه‌های جنوب غرب ایران (به جز فرودگاهی دزفول، فرودگاهی امیدیه، شیراز ساحلی بوشهر و بوشهر فرودگاهی و لار) روند افزایشی داشته است. آماره‌های آزمون تخمین شیب سن در سطوح اطمینان مورد بررسی نشان دادند که در ایستگاه‌های بستان، آبادان، بندر ماهشهر، امیدیه آقاجاری، دوگنبدان، جزیره خارک، زرقان و فسا در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنی‌دار افزایشی بوده، و همچنین ایستگاه‌های فرودگاهی دزفول و فرودگاهی بوشهر در سطح اطمینان ۹۹ درصد کاهش می‌باشد. در بررسی تغییرات گردوغبار در فصول با استفاده از آزمون من - کندال مشاهده شد که روند گردوغبار همه فصل‌ها در غالب ایستگاه‌های جنوب غرب ایران روند افزایشی دارد و همچنین آماره‌های آزمون تخمین شیب سن در سطوح اطمینان مورد بررسی نشان دادند که روند گردوغبار در اکثر ایستگاه‌ها روند افزایشی در طی دوره ۱۹۸۵ تا ۲۰۱۹ دارند. منابع اصلی گردوغبارهایی که به غرب ایران وارد شده‌اند بیشتر از نواحی بیابانی نسبتاً نزدیک به این منطقه مثل صحرای سوریه، کشور عراق و یا صحرای نفود در شمال شبه‌جزیره عربستان منشأ می‌گیرند. با توجه به روزهای گردوغباری بررسی‌شده، در مواقعی که الگوهای فشار با شرایط زیر آرایش یافته باشند، می‌توان شدیدترین طوفان‌های گردوغباری با حداقل قدرت دید را در غرب ایران به‌ویژه نیمه‌ی جنوبی آن انتظار داشت. در سطح زمین نیز می‌تواند مرکز کم‌فشاری هماهنگ و مرتبط با فرود تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در محدوده‌ی جغرافیایی ۳۵ الی ۴۵ درجه شرقی و پایین‌تر از ۴۵ درجه شمالی و بر روی کشورهای عراق و سوریه و غرب ترکیه مستقر باشد که فشار مرکزی آن حدود ۱۰۰۵ هکتوپاسکال یا کمتر از آن باشد. به‌طور کلی موقعی که کم‌فشارهای حرارتی در قسمت‌های شمالی کشور عراق تا قسمت‌های شمالی شبه‌جزیره عربستان و یا روی خلیج فارس مستقر هستند، به دلیل نزدیکی به منطقه نقش بیشتری در تشدید و فعالیت گردوغبار بازی می‌کند. بیشترین تأثیر کم‌فشارهای حرارتی کشور عراق در تشدید و ازدیاد گردوغبار در منطقه‌ی مورد مطالعه زمانی است که یک فرود تراز ۵۰۰ هکتوپاسکال در موقعیت و فاصله‌ی مناسب از آن‌ها در غرب یا شمال غرب ایران واقع شده باشد تا بتواند با این فروبارهای حرارتی ارتباط پیدا کرده و ضمن حمایت و تقویت آن‌ها باعث تشدید فعالیت آن‌ها نیز بشود. این صورت کم‌فشارهای حرارتی ویژگی حرارتی - دینامیکی پیدا می‌کنند. با توجه به نقشه‌های سطوح مختلف جو، به‌طور کلی می‌توان گفت، وجود کم‌فشار سطح زمین، ناهای عمیق در سطوح ۸۵۰ و ۵۰۰ هکتوپاسکال در محدوده کشور ایران و همچنین قرار گرفتن هسته جت با سرعت ۴۰ تا ۶۰ متر بر ثانیه در سطح ۲۰۰ هکتوپاسکال بر روی غرب و نیمه جنوبی ایران (منطقه مورد مطالعه) در هدایت گردوغبار از سوی کشور عراق به سمت جنوب غربی ایران نقش دارد. مؤلفه‌های مداری و نصف‌النهاری در شکل خطوط جریان سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال حاکی از آن است که جهت جریان باد از سمت شمال عراق تا جنوب عربستان به سمت ایران به‌ویژه جنوب غربی ایران (منطقه مورد مطالعه) می‌باشد. نقشه‌ی تاوایی با گردش چرخندی در سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال مطابقت دارد و براین اساس حداکثر تاوایی در شمال کشور عراق مشاهده می‌شود. خروجی‌های مدل HYSPLIT نشان داد که در طوفان گردوغبار، ذرات غبار از سمت بیابان‌های آفریقا با گذر از شمال عربستان و جنوب عراق وارد جنوب غرب ایران می‌شود. مشاهدات تصاویر ماهواره‌ای از سنجنده مودیس، حاکی از آن است که منشأ رخداد گردوغبار از کشورهای عراق، سودان و کشور عربستان بوده که پس از تقویت، جنوب غرب ایران را

تحت تأثیر خود قرار می‌دهد. در بررسی ارتباط لایه‌مرزی با عمق نوری آئروسول مشخص شد که بانفوذ پدیده گردوغبار عمق لایه‌مرزی افزایش یافته و از طرفی عمق نوری ذرات در منطقه مورد مطالعه هم‌افزایش می‌یابد.

منابع

- Ahmadi, M., Dadashi Roudbari, A. A., & Jafari, M. (2019). The Effect of Boundary Layer Height on Dust Storm in Southwest of Iran (Case Study: February 21-24, 2016). *Journal of Natural Environmental Hazards*, 8 (19). (in Persian)
- Boheiraei, H., Ayazi, S. M., Rajaie, M. A., & Ahmadi, H. (2011). Synoptic statistical analyze dust phenomenon in Ilam. *Quarterly Journal of Human Geography*, 4 (1), 47-67. (in Persian)
- Cosentino, N. J., Gaiero, D. M., Torre, G., Pasquini, A. I., Coppo, R., Arce, J. M., & Vélez, G. (2020). Atmospheric dust dynamics in southern South America: A 14-year modern dust record in the loessic Pampean region. *The Holocene*, 30(4), 575-588. <https://doi.org/10.1177/0959683619875198>
- Fatahi Masrou, P., & Rezazadeh, M. (2020). Statistical and Climate Analysis of Dust Storms in Iran. *The Environmental Science and Technology Journal*, 22 (11). (in Persian)
- Francis, D., Chaboureau, J. P., Nelli, N., Cuesta, J., Alshamsi, N., Temimi, M., Pauluis, O., & Xue, L. (2021). Summertime dust storms over the Arabian Peninsula and impacts on radiation, circulation, cloud development and rain. *Atmospheric Research*, 250 (105364). <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105364>
- Goudie, A. S. (2009). Dust storms: Recent developments. *Journal of environmental management*, 90(1), 89-94. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.07.007>
- Goudie, A., & Midelton, N. J. (2001). Saharan dust storms: nature and consequences. *Earth Science Review*, 56. 179-204. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(01\)00067-8](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(01)00067-8)
- Indoitu, R., Orlovsky, L., & Orlovsky, N. (2012). Dust storms in Central Asia: Spatial and temporal variations. *Journal of Arid Environments*, 85: 62-70. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2012.03.018>
- Karami, F. (2009). *The role of systemic convergence of pressure on the occurrence of dust storms in Khuzestan province*. M.Sc. Thesis. (In Persian)
- Kaviani, M. R. (2001). Climate investigation on aridity and drought indices. *Journal of Geographical Research* 16(1):71-89 (In Persian)
- Kendall, M. G. (1975). *Rank Correlation Methods*. 4th Edition, Charles Griffin, London.
- Mann, H. B. (1945). Non-parametric test against trend. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 13(2), 245-259.
- Mashat, A. W. S., Awad, A. M., Assiri, M. E., & Labban, A. H. (2020). Dynamic and synoptic study of spring dust storms over northern Saudi Arabia. *Theoretical and Applied Climatology*, 140, 619-634. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03095-6>
- Prospero, J. M., Glaccum, R. A., & Nees, R. T. (1981). Atmospheric transport of soil dust from Africa to South America. *Nature*, 289 (5798), 570-572.
- Rashki, A., Kaskaoutis, D. G., Francois, P., Kosmopoulos, P. G., & Legrand, M. (2015). Dust-storm dynamics over Sistan region, Iran: Seasonality, transport characteristics and affected areas. *Aeolian Research*, 16, 35-48. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2014.10.003>
- Rezazadeh, M., Irannejad, P., & Shao, Y. (2013). Climatology of the Middle East dust events. *Aeolian Research*, 10, 103-109. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2013.04.001>
- Salamat Hormozi, V., Hamzehnejad, M., Omidvar, K., & Hosein pour, M. (2017). Synoptic-Remote Sensing Analysis of Dust Storm Hormozgan Province (November 2016). *The Environmental Science and Technology Journal*, 21 (12). (in Persian)
- Tan, M., Li, X., & Xin, L., (2014). Intensity of dust storms in China from 1980 to 2007: A new definition. *Atmospheric environment*. 85, 215-222. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.12.010>

19. Vivekanandan, N. (2007). Analysis of Trend in Rainfall Using Non Parametric Statistical Methods. *International symposium on rainfall rate and radio wave propagation*, P101-113. <https://doi.org/10.1063/1.2767019>
20. Wang, Y., Stein, A. F., Draxler, R. R., Jesús, D., & Zhang, X. (2011). Global sand and dust storms in 2008: observation and HYSPLIT model verification. *Atmospheric Environment*. 45(35), 6368-6381. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.08.035>