



Publisher: Soil and Water Research Institute of Iran

Journal of Land Management

<https://lmj.areeo.ac.ir>

Temporal analysis of the origin of trans-regional dust in Golestan Province using the NOAA HYSPLIT model (A case study of the dust event of September 12-16, 2025)

Mohseni, B.*  Roshani, Gh. and Jejozadeh, M.

Research Assistant Professor; Natural Resources Research Department; Golestan Province Agricultural and Natural Resources Research and Education Center; Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO); Gorgan; Iran.

b.mohseni@areeo.ac.ir

Research Associate Professor; Soil and Water Research Department, Golestan Province Agricultural and Natural Resources Research and Education Center; Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO); Gorgan; Iran.

ghroshani69@gmail.com

Researcher, Natural Resources Research Department; Golestan Province Agricultural and Natural Resources Research and Education Center; Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO); Gorgan; Iran.

mohammad.jejo@gmail.com

Article Info

Article Type: Research Article

Received: January 22, 2026

Accepted: June 09, 2026

Keywords: Absorbing aerosol index, Satellite imagery, PM values, Back-trajectories

Corresponding author's email address:

b.mohseni@areeo.ac.ir

Extended Abstract

Objectives

It was the objective of this study to identify the temporal origin and transport pathways of extra-regional dust storms affecting Golestan Province in northeastern Iran, during the period 12–16 September 2025. For this purpose, the NOAA HYSPLIT backward trajectory model and the Sentinel-5P satellite observations were integrated to determine dust source regions, transport dynamics, and atmospheric conditions at different temporal scales (12, 24, and 72 hours). In addition, the study endeavored to evaluate the aerosol layer height and the Absorbing Aerosol Index (AAI) to verify dust occurrence and assess its spatial distribution. Satellite-derived information was further validated using ground-based PM₁₀, PM_{2.5}, and horizontal visibility measurements. The findings help yield a deeper understanding of the transboundary dust transport from Central Asia to northern Iran and provide scientific evidence to support air quality management, environmental monitoring, and developing early warning systems for dust-related hazards in Golestan Province.

Material and Methods

An integrated remote sensing and atmospheric trajectory analysis approach was employed to investigate the origin and transport pathways of extra-regional dust events affecting Golestan Province, in northeastern Iran, during the above-mentioned study period. Backward air-mass trajectories were simulated using the NOAA Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT) model together with GDAS meteorological data. Trajectories were calculated for 12, 24, and 72-hour intervals at an arrival height of 100 m above ground level to identify potential dust source regions and atmospheric transport routes. Satellite observations from the Sentinel-5P platform were used to characterize aerosol conditions during the study period. Aerosol Layer Height (ALH) products were analyzed to determine the vertical distribution of aerosol plumes while the Absorbing Aerosol Index (AAI) was employed both to detect UV-absorbing aerosols associated with mineral dust and to evaluate their spatial extent and intensity. The combined interpretation of HYSPLIT trajectories and satellite-derived aerosol products allowed not only the probable dust source regions but also the long-range transport mechanisms to be identified. To validate the remote sensing and trajectory modeling results, use was made of the ground-based meteorological and air quality observations collected from the synoptic stations in Golestan Province. Daily PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations together with horizontal visibility records were analyzed to confirm the occurrence and severity of dust events. Finally, spatial and temporal comparisons were performed among the trajectory outputs, satellite observations, and surface measurements to evaluate the consistency of the results and to improve the reliability of dust source identification and transport pathway analysis.

Results

The integrated analysis of HYSPLIT backward trajectories, Sentinel-5P satellite observations, and ground-based measurements revealed the occurrence of significant extra-regional dust events over Golestan Province during the study period. The 72-hour backward trajectory analysis indicated that the principal dust air masses originated from Central Asia, particularly Kazakhstan, Uzbekistan, and Turkmenistan, and were transported toward northeastern Iran by the prevailing northeasterly atmospheric circulation. Trajectories at higher altitudes (2–4 km) suggested that part of the dust transport occurred within the middle troposphere before descending over the study area. The 24-hour trajectory analysis demonstrated that shorter-range transports were dominated by air masses moving from the Caspian Sea region and southern Caucasus, whereas the 12-hour trajectories indicated that local and regional winds from Turkmen Sahara and northern Khorasan contributed to near-surface dust accumulation. These findings suggest that the observed events resulted from the combined influence of long-range transboundary transport and local atmospheric circulation. Sentinel-5P Aerosol Layer Height (ALH) products showed elevated aerosol layers over eastern Iran and Turkmenistan prior to the event, supporting the hypothesis of long-distance aerosol transport. Moreover, the Absorbing Aerosol Index (AAI) identified high aerosol concentrations over eastern Caspian coastal areas and Golestan Province, with values indicating intense mineral dust loading. Spatial correspondence between satellite observations and model trajectories confirmed Central Asia as the dominant source region of dust air masses. Ground observations further validated these findings as evidenced by the PM_{10} concentrations reaching approximately $110 \mu g m^{-3}$ on 15 September 2025 accompanied by a substantial reduction in horizontal visibility, all of which confirm severe dust conditions. The consistency observed among trajectory simulations, satellite-derived aerosol products, and surface observations demonstrates the reliability of the integrated methodology proposed herein for identifying dust sources and transport pathways affecting Golestan Province.

Conclusion

The results of the present study demonstrated the effectiveness of integrating the NOAA HYSPLIT trajectory model, Sentinel-5P satellite observations, and ground-based air quality measurements in identifying the origin and transport pathways of extra-regional dust events affecting Golestan Province. Furthermore, the combined analyses revealed that the dust episode investigated was primarily associated with long-range atmospheric transport from Central Asian source regions, particularly Turkmenistan, Uzbekistan, and Kazakhstan. Backward trajectory simulations at different temporal scales showed that regional and local atmospheric circulation also contributed to the final distribution and accumulation of dust over the study area. Meanwhile, satellite-derived Aerosol Layer Height and Absorbing Aerosol Index products confirmed the presence of elevated aerosol concentrations over northeastern Iran and the eastern Caspian region before and during the event. These observations were consistent with HYSPLIT simulations and were further supported by increased PM_{10} concentrations and reduced horizontal visibility recorded at synoptic stations, confirming the occurrence of a severe transboundary dust episode. Overall, the results highlight the Central Asian deserts as dominant external dust sources influencing northern Iran and reiterate the importance of atmospheric circulation patterns in controlling dust transport. Hence, the integrated methodology adopted in this study provides a reliable framework for identifying dust source regions and validating transport mechanisms through multiple independent datasets. Clearly, the findings contribute to a better understanding of transboundary dust dynamics in northeastern Iran that can be exploited toward developing early warning systems, air quality management strategies, and regional environmental policies. Future studies are recommended to investigate long-term dust variability using multi-year datasets, higher-resolution atmospheric models, and additional satellite products to improve the prediction and mitigation of dust-related environmental hazards.

Cite this Article: Mohseni, B., Roshani, Gh. and Jejozadeh, M., 2026. Temporal analysis of the origin of trans-regional dust in Golestan Province using the NOAA HYSPLIT model (A case study of the dust event of September 12-16, 2025). *Journal of Land Management*, 14(1), pp. 13-27.



DOI: <https://doi.org/10.22092/lmj.2026.372066.399>

تحلیل زمانی منشأ گردوغبارهای فرا منطقه‌ای استان گلستان با استفاده از مدل NOAA HYSPLIT (در بازه ۲۱ تا ۲۵ شهریور ۱۴۰۴)

بهروز محسنی* , قربانعلی روشنی و محمد ججوزاده

استادیار پژوهشی، بخش تحقیقات منابع طبیعی مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج

کشاورزی، گرگان، ایران. b.mohseni@areeo.ac.ir

دانشیار پژوهشی، بخش تحقیقات خاک و آب مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج

کشاورزی، گرگان، ایران. ghroshani69@gmail.com

محقق بخش تحقیقات منابع طبیعی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان گلستان، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی،

گرگان، ایران. mohammad.jejo@gmail.com

اطلاعات مقاله

چکیده

نوع مقاله: پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲

پذیرش: ۱۴۰۵/۳/۱۹

واژه‌های کلیدی:

آئروسول‌های جاذب نور، تصاویر ماهواره‌ای، مقادیر PM، مسیرهای ردیابی شده

آدرس ایمیل نویسنده مسئول:

b.mohseni@areeo.ac.ir

رویداد گردوغبار یک فرآیند پیچیده بوده که به ترکیبی از عوامل زمینی و جوی، از جمله زمان، مکان، مدت و بزرگی شیوع گردوغبار بستگی دارد. در شمال ایران و مخصوصاً استان گلستان این پدیده رایج است. هدف از این مطالعه، شناسایی منشأ توده‌های گردوغبار فرا منطقه‌ای به استان گلستان در بازه زمانی ۲۱ تا ۲۵ شهریور ۱۴۰۴ با استفاده از مدل NOAA HYSPLIT و داده‌های ماهواره‌ای بوده است. برای تعیین میزان آلودگی هوا و تشخیص توده‌های گردوغبار از شاخص آئروسول‌های جاذب نور (AAI) بهره گرفته شد. مسیرهای ردیابی شده بازه زمانی ۷۲ ساعته، نشان داد که منشأ گردوغبار در روز ۲۱ شهریور از کشورهای ازبکستان و ترکمنستان بوده است. در مقابل، بازه زمانی ۲۴ ساعته نشان داد که منشأ گردوغبار در روز ۲۴ شهریور قزاقستان و ازبکستان است. همچنین، تحلیل بازه زمانی ۱۲ ساعته نشان داد که توده گردوغبار در این بازه از سمت شمال شرق (ترکمنستان و شمال خراسان) وارد منطقه شده است. تصاویر ماهواره‌ای نیز نشان داد که در تاریخ ۲۵ شهریور ۱۴۰۴، شمال شرق ایران و به‌ویژه منطقه اطراف دریای خزر تحت تأثیر یک توده گردوغبار با غلظت بالا قرار داشته است. شاخص AAI در شرق دریای خزر تا استان گلستان نشان‌دهنده آلودگی هوای قابل‌توجه ناشی از گردوغبار بوده است. درمجموع، تحلیل مدل HYSPLIT و تصاویر ماهواره‌ای نشان می‌دهد که منشأ و جریان گردوغبار فرا منطقه‌ای وارد شده به استان گلستان در بازه‌های زمانی ذکر شده، عمدتاً از سمت شمال شرق و سه کشور ترکمنستان، ازبکستان و قزاقستان بوده و نشان می‌دهد که شرایط جوی و جریان‌های باد در این بازه نقش مهمی در انتقال این توده‌ها داشته‌اند. همچنین، تأیید این یافته‌ها در تطابق با داده‌های ماهواره‌ای و زمینی (مقادیر PM و دید افقی) نشان می‌دهد که این پدیده یک رویداد واقعی و قابل ردیابی است.

استناد: محسنی، بهروز، روشنی، قربانعلی، و ججوزاده، محمد، ۱۴۰۵. تحلیل زمانی منشأ گردوغبارهای فرا منطقه‌ای استان گلستان با استفاده از مدل NOAA

HYSPLIT (در بازه ۲۱ تا ۲۵ شهریور ۱۴۰۴). نشریه مدیریت اراضی، ۱۴(۱)، صص. ۲۷-۱۳.



DOI: <https://doi.org/10.22092/lmj.2026.372066.399>

مقدمه

امروزه پدیده گردوغبار یکی از زیان‌بارترین بلایای طبیعی و از بزرگ‌ترین مشکلات جوی محیطی در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان به‌ویژه در سال‌های اخیر است. ذرات موجود در گردوغبار می‌توانند بر آب‌وهوای زمین تأثیر بسزایی داشته باشند (Zhiyuan et al., 2019). چهار تعریف از پدیده گردوغبار مورد تأیید استانداردهای جهانی WMO، توسط سازمان هواشناسی استرالیا استفاده می‌شود که تعریف کدهای سینوپتیکی این پدیده شامل طوفان گردوغبار (کد سینوپتیکی ۰۹)؛ وزش گردوغبار (کد سینوپتیکی ۰۷)؛ غبار ناشی از گردوغبار (کد سینوپتیکی ۰۶) و گردباد گردوغبار (کد سینوپتیکی ۰۸) است. بررسی فراوانی وقوع گردوغبار در ایران نشان می‌دهد، زمان اوج تعداد روزهای گردوغبار متعلق به ماه جولای بوده و پس از آن به‌ترتیب این وضعیت در ماه ژوئن، می و اوت قابل مشاهده است (Boroughani, 2022). درعین‌حال کمترین مقدار گردوغبار متعلق به دسامبر بوده و سپس متعلق به نوامبر، ژانویه و فوریه است و همچنین گرم‌ترین ماه‌های سال مصادف با حداکثر مقدار گردوغبار و سردترین ماه‌های سال نیز مصادف با حداقل مقدار روزهای همراه با گردوغبار است (Boroughani, 2022). در این فراوانی وقوع، عواملی همچون؛ وضعیت زمین (نوع خاک، رطوبت خاک، پوشش گیاهی)، مهار آب‌های سطحی (ایجاد سد، انحراف مسیر رودخانه، برداشت بی‌رویه از منابع آب به‌ویژه آب‌های زیرسطحی)، شرایط جوی (کم‌بارشی و خشک‌سالی)، کمبود چسبندگی بین ذرات، وزش بادهای به نسبت شدید (تندبادها) روی بیابان‌های با خاک نرم و خشک، انتقال عمودی ذرات گردوغبار معلق توسط حرکت صعودی هوا به ترازهای بالاتر جو و انتقال ذرات معلق توسط جریانات سطوح فوقانی جو به نقاط دورتر نقش بسزایی دارند.

فراوانی طوفان گردوغبار در آسیای میانه، هم در سلامت انسان و هم در فعالیت‌های کشاورزی آثار مخربی به‌وجود آورده است (Tiangang, 2019). پارامترهای محیطی مختلف مانند سرعت باد، تبخیر و تعرق، بارش،

خواص فیزیکی و شیمیایی خاک (رطوبت خاک، بافت و مواد آلی)، پوشش گیاهی و توپوگرافی به‌عنوان محرک‌های مؤثر بر طوفان‌های گردوغبار شناخته می‌شوند که این گردوغبار نقش مهمی در توسعه اجتماعی و اقتصادی ایفا می‌کنند. از سوی دیگر، چنین عارضه‌ای نیز می‌تواند تأثیر منفی در محیط‌زیست و جنگل داشته باشد (Narayan, 2019). وقوع طوفان‌های گردوغبار اساساً تابعی از شرایط جغرافیایی و اقلیمی است؛ بنابراین، منابع گردوغبار واقع در مناطق جغرافیایی مختلف، ممکن است منشأ و انواع متفاوتی داشته باشند (Papi et al., 2022). بیشتر مناطق آسیای مرکزی و شرقی یک منبع اصلی گردوغبار جهانی است که به‌طور قابل‌توجهی بر منطقه آسیا و اقیانوسیه تأثیر می‌گذارد. بااین‌حال، کمی‌سازی سهم گردوغبار همچنان محدود است. میزان انتشار ساعتی گردوغبار در طول ۱۳۶ رویداد بزرگ گردوغبار در آسیای مرکزی و شرقی از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۲۳ اندازه‌گیری و نتایج نشان داد که از ابتدای قرن بیست و یکم، فراوانی سالانه رویدادهای گردوغبار از نه مورد در اوایل دهه ۲۰۰۰، به ۳ مورد در سال‌های اخیر کاهش‌یافته است که مربوط به کاهش متوسط $۱۰^۶ \times ۰/۱۷۳$ تَن در سال در انتشار گردوغبار است و نشان‌دهنده کاهش کلی فعالیت گردوغبار است. با این حال، انتشار گردوغبار پس از سال ۲۰۲۰ دوباره افزایش یافت و از $۱۰^۶ \times ۵/۷۰$ تَن در سال ۲۰۲۰ به $۱۰^۶ \times ۴۰/۳$ تَن در سال ۲۰۲۳ رسید (Xing et al., 2025).

طی پژوهشی در استان گلستان، به مطالعه پدیده گردوغبار و روند تغییرات سالانه و فصلی آن با استفاده از فنون سنجش از دور و گل‌غبارهای منطقه‌ای، در یک بازه زمانی ۱۸ ساله پرداخته شد. این پژوهش نشان داد که به لحاظ تغییرات فصلی، دو فصل پاییز و زمستان سهم کمی از غلظت گردوغبار را داراست و بیشترین غلظت گردوغبار استان گلستان مربوط به فصل تابستان و به‌ویژه ماه‌های تیر و مرداد است. نمودارهای گل‌غبار فصلی به‌دست‌آمده نیز نشان داد که جهت گردوغبار، غالباً غربی و جنوب‌غربی بوده و نقش بادهای شمالی در تولید گردوغبار ناچیز است؛

کشور به صورت مستقیم بر معیشت ساکنان شمال و شرق استان تأثیر می‌گذارد تا جاییکه ۶۵۰ هزار هکتار از اراضی کشاورزی گلستان به صورت مستقیم تحت تأثیر مخرب این گردوغبارها قرار دارد (Statistics and Information, office of Goernorate of Golestan, 2020).

مرور مجموع مطالعات انجام شده در بررسی پدیده گردوغبار، تغییرات فصلی و سالانه آن و منشأیابی مناطق برداشت و مسیر حرکت و مناطق تحت تأثیر آن، نشان می‌دهد که در سال‌های اخیر با توجه به ابزارها و تکنیک‌های سنجش‌ازدور نوین، امکان این مطالعات با دقت بالا تسهیل شده است. لذا با توجه به ضرورت موضوع، قبل از تبدیل شدن آن به یک بحران، این تحلیل با مطالعه جهت باد غالب در استان گلستان (با وجود بخش بیابانی در شمال استان و همچنین پیوسته بودن آن با بیابان‌های کشور ترکمنستان) به شناسایی منشأ گردوغبارهای فرا منطقه‌ای وارد شده به استان گلستان، بر اساس ابزار و فنون سنجش‌ازدور در دسترس می‌پردازد. از این رو پدیده گردوغبار یکی از بحران‌های اقلیمی است که شناخت دقیق و تحلیل زمانی و مکانی آن اهمیت فراوانی در برنامه‌ریزی‌ها دارد. مطالعه این نوع پدیده‌ها در شناخت و فهم فرآیندهای کنترل‌کننده بهبود وضعیت پیش‌بینی، بسیار مفید است و با این کار تا حدود زیادی از میزان خسارات احتمالی می‌توان کاست. لذا با توجه به خسارات و مشکلات ناشی از پدیده گردوغبار در استان گلستان و لزوم شناخت دقیق آن از نظر شرایط ایجاد این پدیده و آنالیز آن، جهت برنامه‌ریزی برای کاهش خسارات و مقابله با این بحران محیطی، ضرورتی انکارناپذیر است. این تحقیق با هدف تحلیل و تشخیص منبع رخدادهای شاخص گردوغبار در جهت بررسی، پایش و تحلیل شدت رخداد، روند زمانی، الگوهای مکانی و منشأ طوفان‌های گردوغبار در استان گلستان؛ پیش‌بینی و تعیین مسیر حرکت ریزگردها با تکیه بر تحلیل‌های مکانی-زمانی؛ کمک به برنامه‌ریزی، مدیریت بحران و کاهش خسارات ناشی از طوفان‌های گردوغبار برای استان گلستان انجام شده است.

ضمن اینکه، بر خلاف تصورات عمومی مبنی بر اینکه منشأ گردوغبارهای خارجی استان گلستان غالباً کشور ترکمنستان است، نقش کشور ترکمنستان در گردوغبارهای استان کم‌رنگ بوده و توده غبار از غرب وارد ایران و از بخش‌های شمالی کشور نیز به استان گلستان وارد شده است (Razavizadeh et al., 2021).

تحلیل آماری تغییرات زمانی-مکانی رخدادهای گردوغبار در استان گلستان نیز طی بازه زمانی ۱۰ ساله (۱۳۹۲-۱۴۰۱) مورد بررسی قرار گرفت. در این تحلیل، بیشترین فراوانی وقوع گردوغبار در گلستان در ماه‌های می، ژوئن و ژوئیه و کمترین آن در ماه نوامبر و دسامبر بوده است. همچنین نتایج درصد فراوانی گردوغبار محلی و فرامحلی طی دوره آماری نشان داد که ۲۶/۲۱ درصد و ۷۳/۷۹ درصد روزهای گردوغبار به ترتیب دارای منشأ فرامحلی و محلی بوده‌اند (Arab-Ameri et al., 2024).

نتایج بررسی آماری و همدیدی خراسان بزرگ طی دوره ۲۰۱۷-۲۰۰۰، نشان داد روند تغییرات میانگین روزهای گردوغبار در استان خراسان جنوبی نسب به خراسان رضوی و شمالی متفاوت بوده است. بیشترین گردوغبار در خراسان رضوی و شمالی در ژوئن و در خراسان جنوبی در می و ژوئیه رخ داده است (Mubarak-Hasan et al., 2021).

نحوه توزیع سالانه و فصلی گردوغبار در استان گلستان طی سال‌های ۱۳۷۹-۱۳۹۹ نیز بررسی شد. نتایج بررسی فصلی نشان داد بیشترین تعداد روزهای همراه با گردوغبار در فصل تابستان و کمترین آن در فصل زمستان به وقوع پیوسته است (Khansalari et al., 2023).

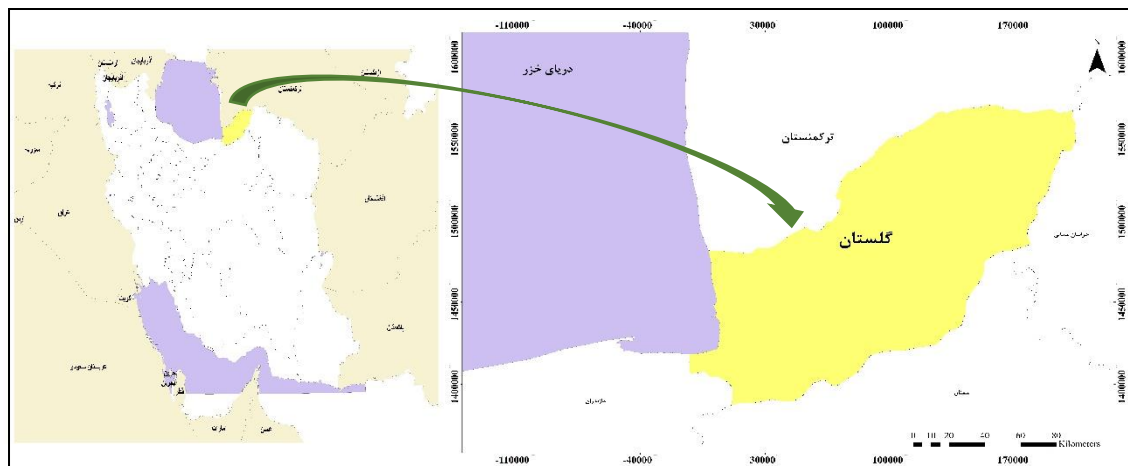
در استان گلستان نیز یکی از مهم‌ترین کانون‌های گردوغبار، حوزه آبخیز اترک است. این حوزه با حدود ۸ هزار کیلومتر مربع وسعت، به عنوان منطقه‌ای مستعد بیابانی شدن مطرح است که ۱۳۰۰ کیلومتر مربع آن می‌تواند در زمان‌های خاص و در اثر وزش بادهای شدید شمال به جنوب، گردوغبار ایجاد کند. همچنین گردوغبار با منشأ قره قوم به عنوان بزرگ‌ترین منشأ گردوغبار فعال در شمال

مواد و روش‌ها

معرفی منطقه مورد مطالعه

استان گلستان با مساحت ۲۰۳۶۷ کیلومتر مربع، بین طول‌های جغرافیایی ۵۳ درجه و ۵۰ دقیقه تا ۵۶ درجه و ۲۱ دقیقه شرقی و عرض‌های جغرافیایی ۳۶ درجه و ۲۸ دقیقه تا ۳۸ درجه و ۷ دقیقه شمالی واقع شده است. این

استان از شمال به کشور ترکمنستان، از شرق به استان خراسان شمالی، از جنوب به استان سمنان و از غرب به استان مازندران و دریای خزر محدود می‌شود (شکل - ۱). از ۱۳ اقلیم شناخته‌شده در جهان، استان گلستان از اقلیم متعدد معتدل، مرطوب و مدیترانه‌ای گرفته تا اقلیم خشک، نیمه‌خشک و بیابانی و سرد کوهستانی برخوردار است.



شکل ۱- نقشه موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران و استان

Figure 1- Location map of the case study in Iran and province

استان گلستان از نظر ناهمواری نیز به سه ناحیه کوهستانی (شامل ارتفاع ۵۰۰ متری تا بیش از ۳۰۰۰ متری و پوشیده از گونه‌های جنگلی و مرتعی)، ناحیه کوهپایه‌ای (شامل تپه‌های کوچک بادزفت، تپه‌ماهورها و بدبوم یا بدلندهای پوشیده از اراضی جنگلی) و ناحیه جلگه‌ای و اراضی پست (دارای ارتفاع پایین‌تر از سطح دریای آزاد در

حاشیه دریاچه کاسپین و خلیج گرگان و افزایش تدریجی ارتفاع آن به سمت شرق) تقسیم می‌شود. کدهای هواشناسی مورد استفاده در این تحلیل یعنی کدهای ۰۶ و ۰۷ شامل ایستگاه‌های هاشم‌آباد گرگان، مراوه‌تپه و گنبدکاووس بوده است. مشخصات کدهای استفاده‌شده در جدول ذیل ارائه شده است.

جدول ۱- معرفی کدهای مربوط به گردوغبار سازمان هواشناسی کشور

Table 1- Introducing of codes related to the country's meteorological organization dust

توضیحات	پدیده	کد*
Description	Phenomenon	Code
گردوغبار معلق در هوا و گسترده که به وسیله باد در ایستگاه یا نزدیکی ایستگاه بلند نشده است. Suspended dust in the air that is not lifted by the wind in or near the station	گردوغبار معلق Suspended dust	06
گردوغبار یا ماسه‌ای که در ساعت دیده‌بانی در اثر وزش باد در ایستگاه یا اطراف آن به هوا بلند شده باشد. Rise dust or sand that has risen in the air at or around the station during the watchtower	گردوغبار برخاسته Rising dust	07

* گردوغبارهای فرامنطقه‌ای؛ گردوغبارهای با منشأ خارجی و با کدهای گردوغباری ۰۶ و گردوغبارهای منطقه‌ای؛ گردوغبارهای داخل ایران و با کدهای گردوغباری ۰۷ هستند
Transboundary dust storms are those with an external origin and are coded as 06, while regional dust storms are those originating within Iran and are coded as 07

مسیریابی گردوغبار با استفاده از مدل HYSPLIT و تصاویر ماهواره‌ای

مدل HYSPLIT، مدلی دوگانه کامل برای محاسبات خط سیر حرکت گردوغبار، پراکندگی و شبیه سازی ته‌نشست با استفاده از رویکردهای PUFF (در این حالت، اندازه ذرات گسترش می‌یابد تا به اندازه سوراخ‌های مربعی شکل شبکه‌های مشبک برسد و سپس به چندین پُف دیگر تقسیم می‌شود و این روند همچنان تا پایان مدل‌سازی ادامه می‌یابد) و Particle یا ذرات (تعداد ثابتی از ذره در فضا پخش می‌شود و به وسیله سرعت متوسط باد در میدان مدل‌سازی می‌شوند) بوده که در این مدل محاسبه مسیر و غلظت آلاینده با استفاده از حداقل پارامترهای هواشناسی انجام می‌گیرد (Arami et al., 2020). این مدل توسط آزمایشگاه منابع هوا (ARL) در اداره ملی جو و اقیانوس آمریکا تهیه گردیده است. روش محاسبه مدل، ترکیبی میان دیدگاه‌های اویلری و الگرنژی است و به همین دلیل HYSPLIT را مدلی دوگانه یا هیبرید می‌نامند. دو دیدگاه اساسی زیر بر مدل حاکم است:

دیدگاه لاگرانژی: در این حالت، قضیه از دید فردی که با بسته‌ی هوای در حال حرکت، بررسی می‌شود. به این ترتیب، مجموع غلظت ذرات در هر شبکه در طول مسیر حرکت تعیین می‌شود.

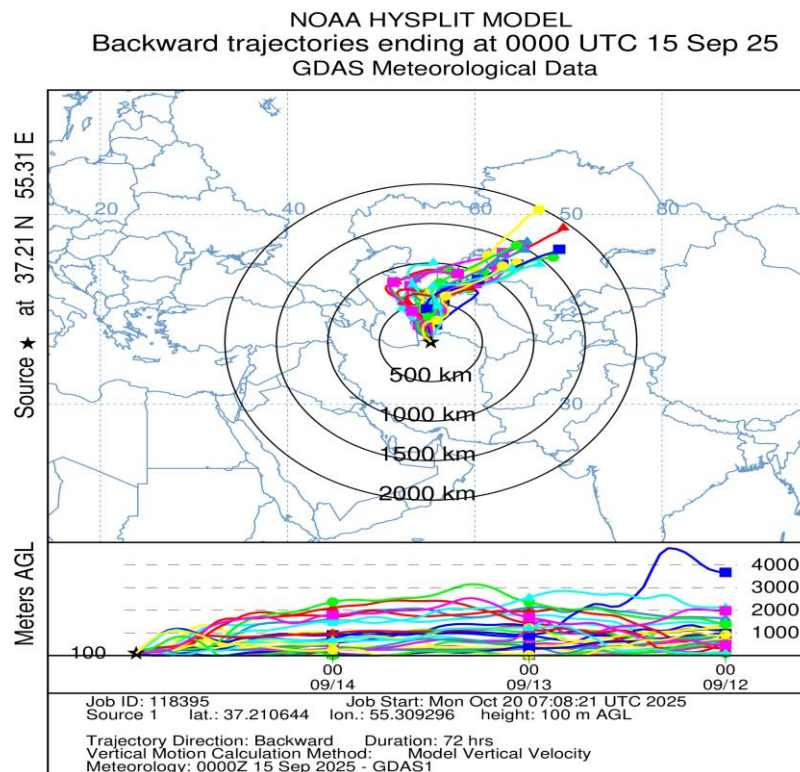
دیدگاه اویلری: در این حالت، قضیه از دید فردی که در مکان ثابت ایستاده است، بررسی می‌شود. غلظت ذرات برای هر شبکه با استفاده از حرکات پخش و انتقال ذرات تعیین می‌گردد.

برای شناسایی پدیده‌های گردوغبار، نیازمند تصاویر ماهواره‌ای با پوشش مناسب و تکرار بالا با باندهای طیفی بالا است. ماهواره ترا و آکوا به دلیل اینکه بازه طولانی از انرژی تابشی محدوده مرئی و نامرئی را پوشش می‌دهند، توان تفکیک رادیومتریکی بالایی دارند و برای بررسی گردوغبار استفاده می‌شوند (Arami et al., 2020). روش‌های گوناگونی برای پایش گردوغبار ارائه و ارزیابی شده‌اند. این روش‌ها شامل مشاهدات زمینی مدل‌های شبیه‌سازی مانند اداره ملی اقیانوسی و جو (NOAA)، مدل دوگانه مسیریابی لاگرانژی تک‌ذره‌ای هیبریدی (HYSPLIT) و سنجش‌ازدور است. در مقایسه با سایر روش‌ها، سنجش‌ازدور به دلیل توانایی پوشش جهانی مؤثر، در حال تبدیل شدن به یکی از روش‌های پایه برای شناسایی گردوغبار در مقیاس‌های وسیع است. به خصوص استفاده از تصاویر MODIS به دلیل قدرت تفکیک طیفی و زمانی بالا، به طور گسترده‌ای برای تشخیص گردوغبار مورد توجه قرار گرفته است (Jafari & Malekian, 2015). در این تحقیق نیز از تصاویر ماهواره‌ای مودیس و سنتینل بهره گرفته شده است.

نتایج و بحث

تحلیل نتایج ۷۲ ساعته مدل NOAA- HYSPLIT

نتایج حاصل از کاربرد مدل فوق مطابق شکل شماره ۲ که نمایانگر تحلیل و تفسیر نتایج مدل در چارچوب اهداف پژوهش است، به شرح ذیل ارائه شده است:



شکل ۲- خروجی ۷۲ ساعته مدل
Figure 2- 72-hour output of model

نواحی شمال شرق و از سه کشور قزاقستان، ازبکستان و ترکمنستان به منطقه منبع رسیده‌اند.

نمودار پایینی (ارتفاع بر حسب زمان): در این بخش، محور افقی زمان گذشته (از ۷۲ ساعت قبل تا حال) و محور عمودی ارتفاع از سطح زمین (AGL) را نشان می‌دهند. طبق نمودار ملاحظه می‌شود که مسیرها از ارتفاع گوناگون شروع شده‌اند و در طول مسیر دچار نوسانات جزئی ارتفاعی شده‌اند. این بدان معنی است که در بازه زمانی (۲۱ تا ۲۵ شهریور ۱۴۰۴)، توده هوای نزدیک سطح زمین که گردوغبار را به منطقه منبع آورده، از نواحی شمالی و شمال شرقی سرچشمه گرفته است. به عبارت دیگر، مسیرهای در ارتفاع بالاتر (آبی و بنفش در نمودار پایین) نشان می‌دهند که بخشی از جریان‌های هوا در ارتفاع حدود ۲-۴ کیلومتری هم از همان سمت حرکت کرده‌اند، یعنی انتقال گردوغبار نه فقط سطحی بلکه احتمالاً در ترازهای میانی جو نیز رخ داده است.

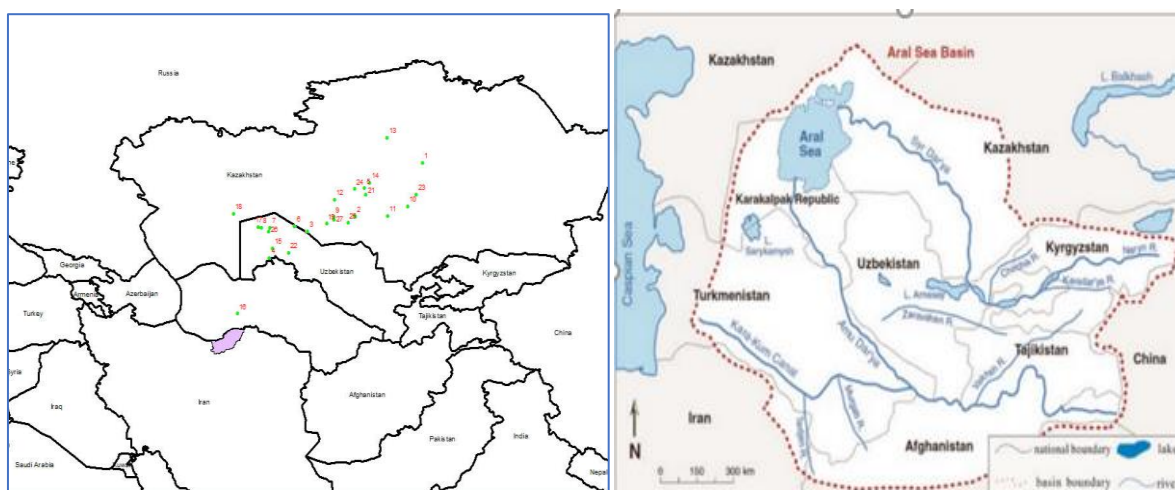
بر اساس جهت خطوط روی نقشه توده‌های هوایی که به منطقه گلستان (شمال ایران) رسیده‌اند،

شعاع‌های دایره‌ای: در مسیریابی ۷۲ ساعته گردوغبار ورودی به استان گلستان، دایره‌های هم‌مرکز روی نقشه فاصله‌های افقی را از نقطه منبع نشان می‌دهند (۵۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ کیلومتر). بر اساس این شکل می‌توان اذعان داشت که منشأ گردوغبارهای تاریخ ۲۴ شهریور ۱۴۰۴، از کشور قزاقستان در فاصله ۲۰۰۰ کیلومتری است. با توجه به شکل فوق می‌توان مسیر جغرافیایی حرکت هوا را در طول سه روز گذشته نیز مشاهده کرد.

خطوط رنگی روی نقشه: هر مسیر رنگی نشان‌دهنده مسیر حرکت یک ذره هوا در ارتفاع مشخصی از سطح زمین (AGL) است. در قسمت پایین تصویر، نمودار نشان می‌دهد هر خط با چه ارتفاعی مطابقت دارد. رنگ‌های آبی و بنفش: مسیرهای در ارتفاع بالاتر (۳۰۰۰ تا ۴۰۰۰ متر) و رنگ‌های سبز و قرمز: مسیرهای در ارتفاع پایین‌تر (زیر ۱۰۰۰ متر) را ارائه می‌دهند. همان‌طور که در شکل فوق مشاهده می‌شود، بیشتر مسیرها (خطوط رنگی) از سمت شرق و شمال شرق به ایران می‌آیند؛ یعنی طی سه روز گذشته (۲۱ شهریور یا ۱۲ سپتامبر)، جریان‌های هوا از

گردوغبارها در کشور قزاقستان و تعدادی از نقاط منشأ، در کشور ازبکستان و ترکمنستان قرار دارد. این منطقه جزو مناطق به‌جامانده از دریای آرال خشک‌شده است (شکل شماره ۳- راست). این نتایج نیز با یافته‌های Khansalari et al., (2023) مبنی بر منشأ عمده گردوغبار از مناطق بیابانی ترکمنستان و خصوصاً بیابان‌های بالکان استان گلستان تطابق دارد.

گردوغبارها عمدتاً از سمت شمال‌شرق و شمال وارد شده‌اند (از بیابان‌های قزاقستان، ازبکستان و ترکمنستان). همچنین الگوی فوق نشان می‌دهد که در این بازه زمانی، جریانات جوی غالب، از شرق به غرب بوده است. شکل شماره ۳ (چپ) که توسط نویسندگان جهت ارائه منشأ وقوع در استان گلستان ترسیم شده است، با استفاده از شکل شماره ۲ (مسیریابی ۷۲ ساعته) نشان می‌دهد که منشأ



شکل ۳- موقعیت منشأ گردوغبار ورودی به گلستان
Figure 3- Location of input dust source to Golestan

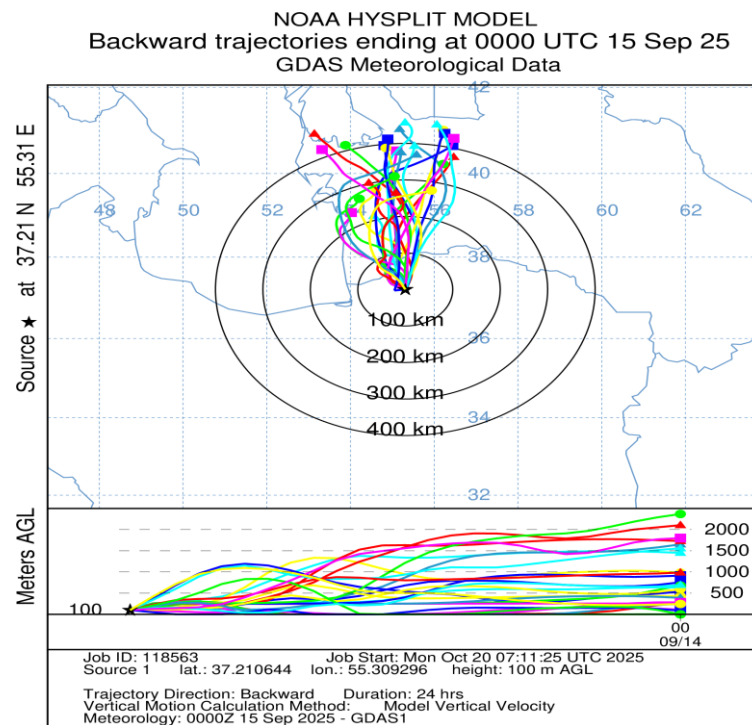
با پدیده‌های متداول انتقال غبار تابستانه در ایران سازگار است.

تحلیل نتایج ۲۴ ساعته مدل

تصویر ذیل نیز خروجی مدل NOAA HYSPLIT است، اما در مقایسه با تصویر قبلی، تفاوت مهمی دارد که در تفسیر منشأ گردوغبار (توده‌های هوا) اثر زیادی می‌گذارد. مدت زمان مسیر، ۲۴ ساعته (در تصویر قبلی ۷۲ ساعت بود) و با همان منبع (منطقه شمال‌شرق و ایران یعنی گرگان) که در ارتفاع ۱۰۰ متری نزدیک سطح زمین است. تفاوت با تصویر قبلی در این است که در این تصویر، مدل تنها ۲۴ ساعت گذشته را ردیابی کرده است؛ بنابراین مسیرهای نشان‌داده‌شده مربوط به حرکت کوتاه‌مدت‌تر و محلی‌تر توده‌های هوا هستند.

چنین خروجی‌هایی معمولاً برای بررسی منبع آلودگی هوا یا گردوغبار، مطالعه مسیر انتقال آلاینده‌ها یا مواد رادیواکتیو و تحلیل منشأ رطوبت یا ابرها در هواشناسی استفاده می‌شوند.

در تحلیل مسیر گردوغبار با استفاده از مدل مذکور این نکته قابل ذکر است که در این حالت، Backward trajectory (مسیر برگشتی) برای تعیین این است که گردوغبار مشاهده‌شده در محل منبع (ستاره سیاه) در ۲۴ شهریور ۱۴۰۴، طی ۷۲ ساعت گذشته از کجا آمده است؛ بنابراین، در تاریخ یادشده، گردوغبار مشاهده‌شده در شمال ایران از بیابان‌ها و اراضی باقی‌مانده از دریای خشک‌شده آرال منشأ گرفته و با جریان‌های شرقی-شمال‌شرق‌وز به منطقه منتقل شده است. این الگو



شکل ۴- خروجی ۲۴ ساعته مدل
Figure 4- 24-hour output of model

توده‌های هوا در این بازه کوتاه در ۲۴ ساعت منتهی به ۲۴ شهریور ۱۴۰۴؛ از سمت شمال و شمال شرق (دریای خزر و قفقاز جنوبی) به‌ویژه مناطق بیابانی قزاقستان و ازبکستان بوده است. در این حالت، منبع اصلی هوای مرطوب‌تر و نسبتاً تمیزتر از شمال است، اما اگر در همین زمان پدیده گردوغبار مشاهده شده باشد، این غبار به‌صورت محلی یا از نواحی غربی شمالی (ترکمن‌صحرا) برخاسته است، نه از عراق و سوریه.

بنابراین می‌توان بیان کرد، در بازه زمانی ۲۱ تا ۲۴ شهریور ۱۴۰۴، هوای شمال ایران دو منبع جریان‌های بلندبرد گردوغبار از عراق و سوریه و جریان‌های محلی از شمال و خزر که در ۲۴ ساعت آخر غالب شده‌اند را شامل بود.

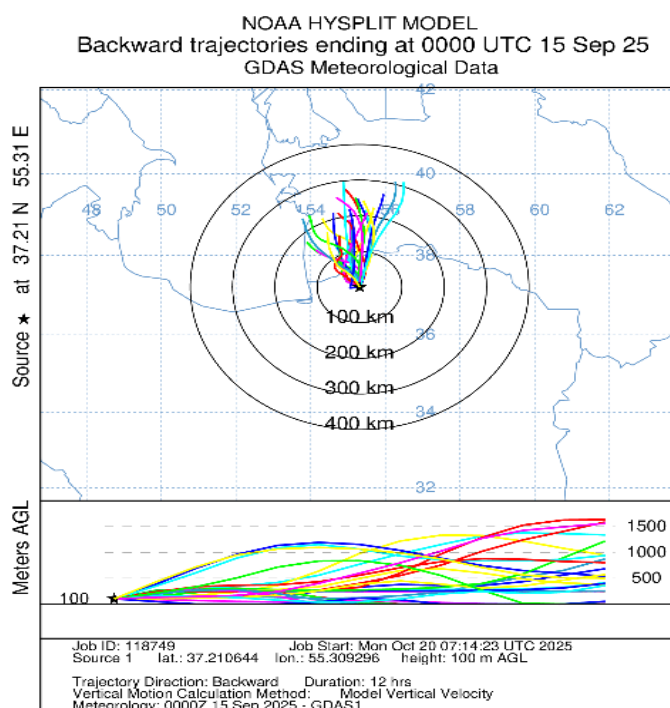
تحلیل مسیرها در نقشه: در تصویر مشاهده می‌شود که بیشتر مسیرها از سمت شمال و شمال غرب به منبع می‌رسند. برخی از خطوط کمی از غرب و جنوب غرب تمایل دارند، اما عمدتاً مسیر غالب از سواحل جنوبی دریای خزر و قفقاز جنوبی است. فاصله‌ی طی‌شده در ۲۴ ساعت، کمتر از ۵۰۰-۴۰۰ کیلومتر، یعنی جریاناتی با سرعت متوسط و نه خیلی شدید است.

تحلیل عمودی (نمودار پایین): ارتفاع توده‌ها عمدتاً بین ۵۰۰ تا ۲۰۰۰ متر است. در این بازه زمانی، توده‌ها تغییرات شدید ارتفاعی ندارند؛ یعنی جریان نسبتاً پایدار و افقی است. توده‌های نزدیک سطح زمین (زیر ۱۰۰۰ متر) مسیر مستقیم‌تری دارند و حامل گردوغبار سطحی هستند؛ بنابراین به‌طورکلی می‌توان اذعان داشت که منشأ اصلی

جدول ۲- مقایسه نقشه ۷۲ ساعته و ۲۴ ساعته مدل

Table 2- Comparison of 72-hours and 24-hours model maps

نقشه ۷۲ ساعته 72-hours map	نقشه ۲۴ ساعته 24-hours map	ویژگی Feature
۳ روز 3 days	۱ روز 1 day	بازه زمانی Timeframe
غرب و شمال غرب (از عراق و سوریه) West and northwest (from Iraq and Syria)	شمال و شمال غرب (از خزر و قفقاز) North and Northwest (from the Caspian Sea and the Caucasus)	جهت باد غالب Direction of prevailing wind
بیابان های عراق - سوریه Deserts of Iraq-Syria	محلی یا نواحی نزدیک ترکمن صحرا Local or near the Turkmen Sahara	منبع اصلی گردوغبار Main source of dust
فرا منطقه ای و بلندبرد Extra-regional and long-range	محلی و کوتاه برد Local and short-range current	نوع جریان Type of stream



شکل ۵- خروجی ۱۲ ساعته مدل

Figure 4- 12-hours output of model

تحلیل مسیرها (نقشه بالا): بر اساس شکل شماره ۵، همه مسیرها از شمال تا شمال غرب وارد منطقه منبع می شوند. طول مسیرها کوتاه است (زیر ۵۰۰-۴۰۰ کیلومتر)، یعنی جریان های محلی یا ناحیه ای ضعیف هستند. منبع هوا نیز در این بازه بیشتر از دریای خزر و نواحی جنوبی آن (قفقاز جنوبی و ترکمن صحرا) است.

تحلیل عمودی (نمودار پایین): ارتفاع مسیرها بین ۱۰۰ تا حدود ۱۵۰۰ متر تغییر می کند. بخشی از مسیرها (قرمز و زرد) در طول مسیر بالا می روند که بیانگر ناپایداری محلی و صعود هوای گرم سطحی است. مسیرهای آبی و سبز

تحلیل نتایج ۱۲ ساعته مدل

این سومین خروجی مدل NOAA HYSPLIT

است و مانند دو تصویر قبلی، نشان دهنده مسیرهای برگشتی (Trajectories Backward) برای توده های هوایی است که در تاریخ ۲۴ شهریور ۱۴۰۴ و فقط ۱۲ ساعت گذشته در بازه زمانی مربوطه توسط مدل بررسی و به منطقه شمال شرق ایران وارد شده اند. مدت زمان مسیر، ۱۲ ساعته و با همان منبع (منطقه شمال شرق ایران یعنی گرگان که در ارتفاع ۱۰۰ متری نزدیک سطح زمین و با داده ورودی هواشناسی GDAS1 (مدل جوی جهانی NOAA) است.

گزارش شده باشد منبع آن داخلی یا ناحیه‌ای نزدیک (مثل دشت گرگان، ترکمن صحرا، یا بیابان‌های کوچک اطراف سمنان و خراسان شمالی) بوده است. این نوع غبار معمولاً ناشی از بادهای شمالی خشک پس از عبور سامانه یا وزش بادهای سطحی محلی (مثلاً باد گرگان) و نه انتقال بلندبرد از عراق یا سوریه است.

پایدارترند و در ارتفاع پایین باقی می‌مانند → جریان‌های سطحی.

تحلیل و تفسیر جوی: با توجه به اینکه مدت زمان فقط ۱۲ ساعت است، مسیرها کوتاه‌اند و جهت غالب، شمالی است. می‌توان گفت در این بازه، توده‌های هوا محلی یا نزدیک منبع هستند؛ بنابراین، اگر در این زمان پدیده گردوغبار

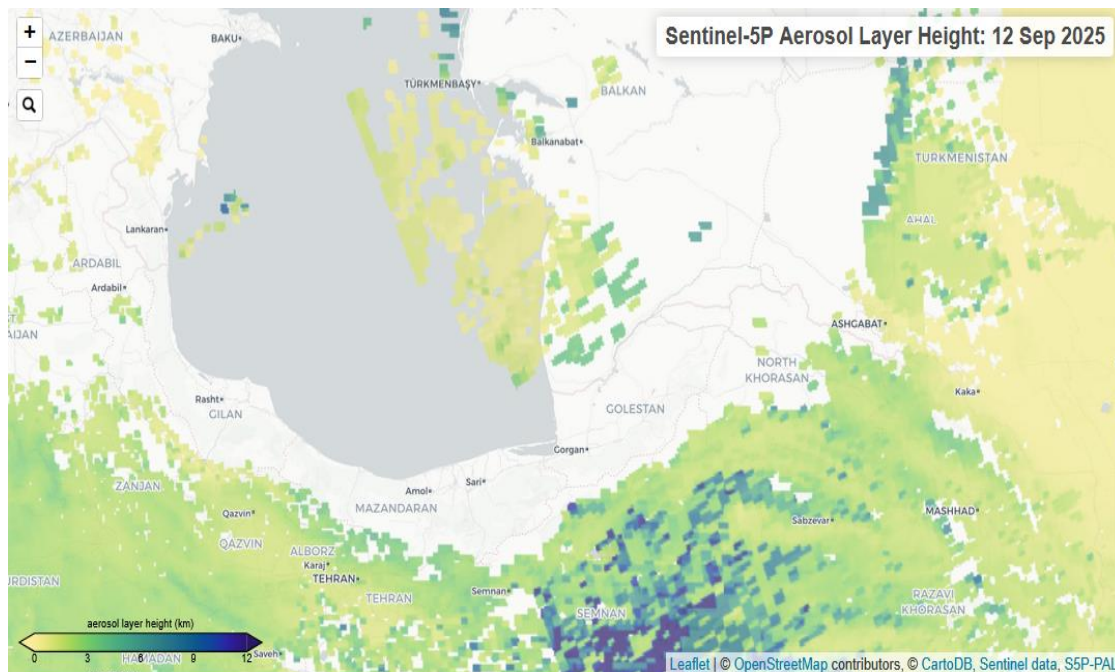
جدول ۳- مقایسه نقشه‌های ۷۲، ۲۴ و ۱۲ ساعته مدل

Table 3- Comparison of 72, 24 and 12- hours model maps

منبع محتمل توده هوا Source of air mass probably	نوع گردوغبار Type of dust	جهت باد غالب Direction of prevailing wind	مدت مسیر / ساعت Travel time/hr
عراق و شرق سوریه Iraq & east of Syria	بلندبرد Long-rang	غرب و شمال غرب East and northeast	72
قفقاز جنوبی و خزر Caspian Sea and southern Caucasus	هوای خنک‌تر با احتمال رسوب گردوغبار قدیمی Cooler air with the possibility of old dust deposition	شمال و شمال غرب North and northeast	24
ترکمن صحرا و مناطق محلی Turkmen Sahara & local area	گردوغبار محلی (باد سطحی) Local dust (surface wind)	شمال و شمال شرق North and northwest	12

روزهای قبل، از سمت عراق- سوریه و منشأ محلی و نزدیک (شمال و شمال شرق ایران) در ۱۲ ساعت پایانی.

بر این اساس می‌توان اظهار داشت که در بازه زمانی منتهی به ۲۴ شهریور ۱۴۰۴، منبع اصلی گردوغبار ترکیبی از دو منشأ بوده است؛ یعنی بلندبرد (غربی) در



شکل ۶- داده‌های ماهواره سنتینل در تاریخ ۲۱ شهریور ۱۴۰۴

Figure 6- Sentinel-5P data on September 12, 2025

نتایج حاصل از تصاویر ماهواره‌ای

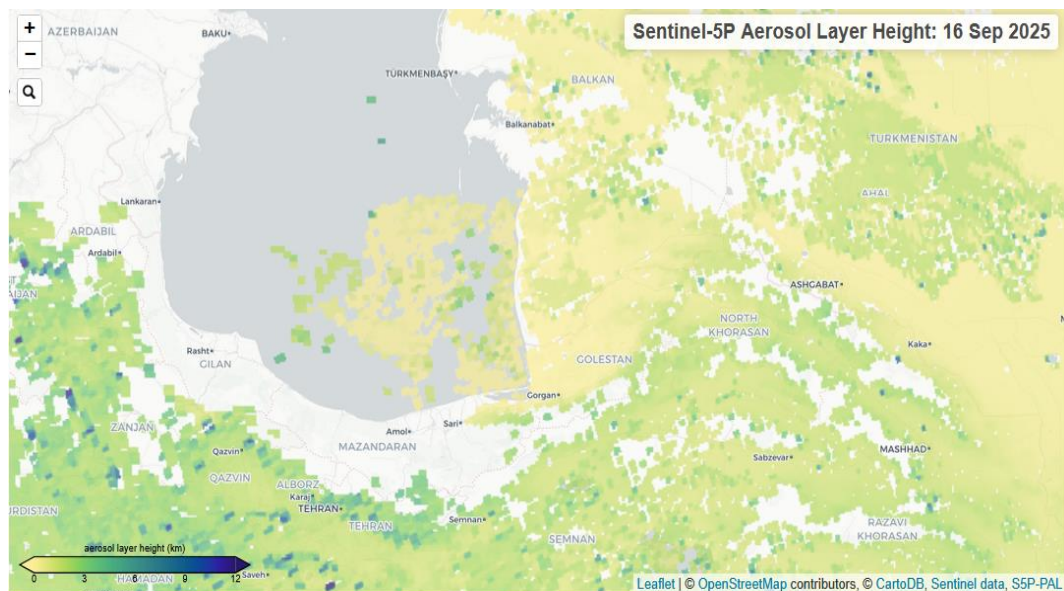
تحلیل داده‌های ماهواره‌ای در ۲۱ شهریور (۱۲ سپتامبر)

تصویر فوق (شکل شماره ۶)، مربوط به داده‌های ماهواره‌ای Sentinel-5P در تاریخ ۲۱ شهریور ۱۴۰۴ از ارتفاع لایه آئروسول‌ها (Aerosol Layer Height) یعنی ارتفاع متوسط لایه‌ای که بیشترین تراکم ذرات معلق (گردوغبار، دود، یا آلاینده‌ها) در آن قرار دارد، است. در این تصویر، نوار رنگی زرد تا سبز روشن پایین نقشه، بیانگر ارتفاع‌های پایین‌تر (حدود ۳-۶ کیلومتر)، سبز تا آبی، بیانگر ارتفاع‌های متوسط (۶-۹ کیلومتر) و رنگ‌های آبی تیره تا بنفش نیز ارتفاع‌های زیادتر (۹-۱۲ کیلومتر یا بالاتر) را نشان می‌دهند.

تحلیل مکانی و فضایی: بر اساس آنچه از تصویر فوق استنباط می‌شود این است که مناطق غرب و شمال غرب ایران (آذربایجان، اردبیل، کردستان) به‌عنوان بخشی از پهنه جغرافیایی محدوده مورد بررسی در تحقیق بوده که وضعیت لایه‌های آئروسول و کیفیت هوا در آن‌ها با سایر مناطق (مانند حاشیه دریای خزر و نواحی شرقی) مقایسه شده است. هدف از این مقایسه، درک بهتر الگوهای پراکندگی آئروسول‌ها و تمایز بین منابع آلودگی محلی و منابع با انتقال بلندمدت بوده است. لذا این مناطق با رنگ سبز روشن تا زرد و ارتفاع سه تا شش کیلومتری لایه آئروسول‌ها نشان‌دهنده وضعیت متفاوتی نسبت به مناطق شرقی و شمالی در این تحقیق است. همچنین این تصویر نشان می‌دهد که هوا در این نواحی نسبتاً تمیزتر بوده یا لایه ذرات در ارتفاع پایین‌تری قرار داشته است (ناشی از آلودگی محلی یا گردوغبار خفیف). در مقابل، نواحی شمالی و حاشیه دریای خزر (گیلان، مازندران، گلستان) و به رنگ عمدتاً سبز روشن تا سبز متوسط (چهار تا هفت کیلومتر)

هستند. به‌خصوص در شرق مازندران و گلستان، مقداری سبز پررنگ‌تر دیده می‌شود که نشان از لایه آئروسولی در ارتفاع شش تا هشت کیلومتر دارد؛ یعنی در این منطقه، احتمال وجود توده گردوغبار یا آئروسول با منشأ خارجی (مثلاً از شرق یا شمال شرق) زیاد است. همچنین، نواحی شرقی (خراسان شمالی، رضوی و بخش‌هایی از سمنان)، به سمت رنگ آبی و بنفش در ارتفاع‌های ۹ تا ۱۲ کیلومتر یا بالاتر می‌روند. این امر بسیار مهم است، چون ارتفاع زیاد آئروسول معمولاً نشانه ورود توده‌های بزرگ گردوغبار یا انتقال بلندمدت (long-range transport) است، نه آلودگی سطحی محلی. منشأ احتمالی این آئروسول‌ها می‌تواند بیابان‌های ترکمنستان، افغانستان یا حتی آسیای مرکزی باشد؛ بنابراین، توده‌ی آئروسول مشاهده‌شده در استان گلستان در تاریخ ۲۴ شهریور منشأیی در شرق یا شمال شرق (ترکمنستان یا شمال خراسان) داشته که در ۲۱ شهریور و در ارتفاع بالا (حدود ۱۰-۶ کیلومتری) وجود داشته و در روزهای بعدی با فرونشینی و انتقال افقی به منطقه‌ی منبع HYSPLIT رسیده است.

تحلیل نهایی: در تاریخ ۲۱ شهریور ۱۴۰۴، لایه‌ی ضخیم آئروسول در شرق ایران و ترکمنستان تا ارتفاع‌های زیاد (۹-۱۲ کیلومتری) وجود داشته است. در روزهای بعد (۲۲-۲۴ شهریور)، بادهای شمال شرقی و شرقی این توده را به سمت گلستان و شمال ایران انتقال داده‌اند. در نهایت، در تاریخ ۲۴ شهریور، داده HYSPLIT نشان می‌دهد که هوا در ارتفاع ۱۵۰۰-۵۰۰ متری از سطح زمین در گلستان از همان سمت (شمال شرق) آمده است؛ بنابراین ترکیب این دو منبع داده، بیانگر یک رویداد انتقال آئروسول از آسیای مرکزی به شمال ایران است.



شکل ۷- داده‌های ماهواره سنتینل در تاریخ ۲۵ شهریور ۱۴۰۴ مربوط به ارتفاع لایه آئروسولها
Figure 7- Sentinel-5P data on September 16, 2025 related to Aerosol layer height

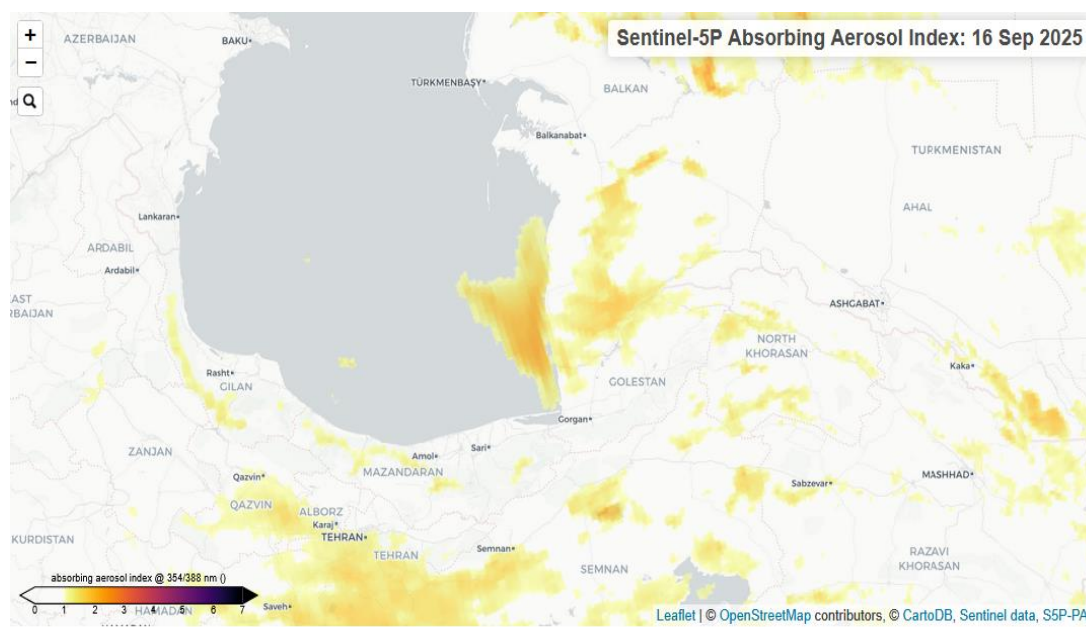
(لکه‌های آبی). شرق کشور و در خراسان شمالی و رضوی، آلودگی و گردوغبار در ارتفاع پایین، پدیده‌های محلی و بادهای شرقی را ارائه می‌دهد (رنگ‌های روشن‌تر). به عبارت دیگر، مناطق یادشده از طریق برجسته‌سازی تفاوت‌ها و شباهت‌های احتمالی در ویژگی‌های آئروسول (ارتفاع، غلظت، منشأ) با استان گلستان مقایسه شدند تا درک عمیق‌تری از پدیده‌های جوی در استان گلستان و مناطق اطراف آن به دست آید.

تحلیل نهایی: توزیع غباری در کل شمال ایران نسبتاً یکنواخت است، اما کانونی از آئروسول در مرکز دریای خزر دیده می‌شود (ناشی از جریان باد و تبخیر). ارتفاع‌های زیاد در زاگرس و غرب کشور نشانه وجود "لایه‌های بالایی آئروسول" مربوط به انتقال افقی غبار از عراق است. ترکیب داده‌ها با شاخص‌های دیگر (مثل AAI یا Aerosol Optical Depth) می‌تواند به درک بهتر منشأ و تراکم ذرات کمک کند؛ بنابراین، این نقشه نشان می‌دهد که در تاریخ ۲۵ شهریور ۱۴۰۴، لایه‌های آئروسول در شمال ایران بیشتر در ارتفاع پایین متمرکز بوده، در حالی‌که در غرب کشور ارتفاع بیشتری دارد. چنین الگوهایی معمولاً با سامانه‌های هواشناسی و بادهای فصلی خزر-زاگرس در ارتباط هستند.

تحلیل داده‌های ماهواره‌ای در ۲۵ شهریور (۱۶ سپتامبر)

شکل شماره ۷ (تصویر فوق) که شمال و شمال شرق ایران، دریای خزر و بخش‌هایی از ترکمنستان را پوشش داده است، مربوط به داده‌های ماهواره‌ای Sentinel-5P در تاریخ ۲۵ شهریور ۱۴۰۴ از ارتفاع لایه آئروسولها (Aerosol Layer Height) از حدود ۰ تا بیش از ۱۲ کیلومتر است. در این تصویر، نوار رنگی زرد تا سبز روشن پایین نقشه، بیانگر نشان‌دهنده ذرات معلق نزدیک سطح زمین در ارتفاع پایین (کمتر از ۳-۵ کیلومتر)، ارتفاع متوسط ۵-۹ کیلومتری (رنگ سبز تا آبی) و رنگ‌های آبی تیره تا بنفش نیز ارتفاع‌های زیادت‌ر (۹-۱۲ کیلومتر یا بالاتر) را نشان می‌دهند.

تحلیل منطقه‌ای: بر اساس تصویر ارائه‌شده در بالا، در دریای خزر و استان گلستان، غلظت آئروسول در ارتفاع پایین (مه یا آلودگی خفیف) است (ناحیه زرد و روشن). در مقابل استان‌های شمال غربی (گیلان، اردبیل، زنجان) ارتفاع آئروسول بیشتر که ناشی از رطوبت و انتقال ذرات از بادهای غربی است (سبز تا آبی). در مرکز ایران (تهران، قم، قزوین) نیز ارتفاع متوسط و شرایط نسبتاً نرمال (رنگ سبز مایل به زرد) است. غرب ایران (کردستان، همدان)، ارتفاع زیاد آئروسول، طوفان گردوغبار در ارتفاعات را نشان می‌دهد



شکل ۸- داده‌های ماهواره سنتینل در تاریخ ۲۵ شهریور ۱۴۰۴ مربوط به شاخص آئروسول‌های جذب نور
Figure 8- Sentinel-5P data on September 16, 2025 related to Absorbing Aerosol Index (AAI)

آئروسول‌های جذب‌کننده است و دقیقاً مطابق با شرق دریای خزر و شمال استان گلستان است. این امر نشان می‌دهد که در ۲۵ شهریور ۱۴۰۴، طوفان گردوغبار از ترکمنستان یا صحرای قره‌قوم به سمت ایران حرکت کرده است. در مقابل، شاخص AAI در شمال خراسان رضوی و آخال ترکمنستان (رنگ زرد متمایل به نارنجی)، در محدوده سه تا پنج قرار گرفته و بیانگر آلودگی هوای ناشی از انتقال غبار در تراز پایین‌تر است. بطوریکه، غرب و مرکز ایران (گیلان، قزوین، تهران)، با شاخص AAI نزدیک به صفر (رنگ تقریباً سفید تا زرد بسیار کم‌رنگ)، دارای شرایط نسبتاً پاک با کمترین میزان جذب فرابنفش یا آلودگی جوی اندک است.

بر این اساس مقایسه دو تصویر در اشکال شماره ۷ و ۸ نشان می‌دهند که در تاریخ ۲۵ شهریور ۱۴۰۴، شمال شرق ایران درگیر طوفان گرد و بار با چگالی بالا در نزدیکی سطح زمین بوده که از سمت ترکمنستان و شرق خزر وارد شده است. این یافته نیز با یافته‌های Arab-ameri et al., (2024) مبنی بر تدام چند روزه اکثر طوفان‌های گردوغبار در استان گلستان در تطابق است. همچنین این تحلیل به دلیل اینکه بیشترین غلظت گردوغبار را در چند روز از ایام

شکل شماره ۸ (تصویر فوق) که شمال و شمال شرق ایران، دریای خزر و جنوب ترکمنستان را پوشش داده است، مربوط به داده‌های ماهواره‌ای Sentinel-5P در تاریخ ۲۵ شهریور ۱۴۰۴ و مربوط به شاخص آئروسول‌های جذب نور (Absorbing Aerosol Index) یا AAI (شاخصی بدون بُعد که نشان می‌دهد چه مقدار از نور فرابنفش خورشید توسط ذرات معلق یعنی گردوغبار معدنی، دود آتش‌سوزی‌ها و یا سیاه‌دود حاصل از سوخت ناقص در جو جذب می‌شود) است. در این تصویر، مقدار شاخص AAI برابر ۰ تا ۱، بیانگر هوای تمیز یا آئروسول‌های پخش‌کننده روشن (مانند مه)؛ AAI برابر دو تا سه، نیز بیانگر وجود آئروسول جذب‌کننده ضعیف (دود سبک یا گردوغبار کم)؛ AAI برابر چهار تا شش و شش تا هشت و بالاتر به ترتیب آلودگی قابل توجه یا طوفان گردوغبار و غلظت زیاد آئروسول‌های جذب‌کننده (گسترده گردوغبار یا دود) را نشان می‌دهند.

تحلیل فضایی نقشه: بر اساس تصویر ارائه‌شده در شکل شماره ۸، شرق دریای خزر تا گلستان و ترکمن صحرا ناحیه بحرانی است. بطوریکه شاخص AAI آن پنج تا هفت (رنگ نارنجی تا قرمز روشن) و بیانگر مقدار بالایی از

سال ۱۴۰۴ داشته، با یافته‌های Razavizadeh et al., (2021) به لحاظ اینکه دو فصل پاییز و زمستان سهم کمی از غلظت گردوغبار را داراست و بیشترین آن مربوط به فصل تابستان (شهریور) است؛ در تطابق است.

تأیید نتایج در تطابق با داده‌های زمینی

بر اساس داده‌های سازمان هواشناسی کشور (جدول ۴) مشخص گردید که در بازه زمانی موردنظر رخداد گردوغبار با منشأ فرا منطقه‌ای در استان گلستان حادث شده است. داده‌ها به‌وضوح نشان‌دهنده یک دوره پر

نوسان در کیفیت هوا به‌دلیل گردوغبار در شهریور ۱۴۰۴ هستند. روز ۲۴ شهریور به‌طور مشخص روزی با آلودگی شدید (ناسالم) بوده است که عمدتاً ناشی از ذرات PM10 بوده و تأثیر چشمگیری بر کاهش دید افقی داشته است. روز ۲۲ شهریور بهترین وضعیت را از نظر کیفیت هوا و دید داشته است. پس از اوج آلودگی در روز ۲۴م، روند کاهش آلودگی آغاز شده، اما کیفیت هوا و دید افقی همچنان تحت تأثیر ذرات معلق باقی مانده است. لذا این نتایج در تطابق داده‌های زمینی حاکی از وقوع پدیده گردوغبار در بازه زمانی مورد نظر در این تحقیق است.

جدول ۴- مقادیر داده‌های زمینی ایستگاه‌های همدید (سینوپتیک)

Table 4- Ground Data Values from Synoptic Stations

روز (شهریور ۱۴۰۴) Day	PM10($\mu\text{g}/\text{m}^3$) * (میکروگرم/مترمکعب)	PM2.5($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ** (میکروگرم/مترمکعب)	دید افقی/کیلومتر Vertical view/km
21	31	15	8.36
22	14	8.5	10
23	48	17	9.26
24	110	12	6.66
25	72	17	10

PM10* (خوب؛ ۰-۴۰، متوسط؛ ۴۰-۷۰، ناسالم گروه‌های حساس؛ ۷۰-۹۰، ناسالم؛ ۹۰-۱۸۰، خیلی ناسالم؛ بیشتر از ۱۸۰)

PM2.5** (خوب؛ ۰-۲۰، متوسط؛ ۲۰-۳۵، ناسالم گروه‌های حساس؛ ۳۵-۴۵، ناسالم؛ ۴۵-۹۰، خیلی ناسالم؛ بیشتر از ۹۰)

PM10* (Good; 0-40, Moderate; 40-70, Unhealthy for Sensitive Groups; 70-90, Unhealthy; 90-180, Very Unhealthy; more than 180)

PM2.5** (Good; 0-20, Moderate; 20-35, Unhealthy for Sensitive Groups; 35-45, Unhealthy; 45-90, Very Unhealthy; more than 90)

نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر مباحث زیادی در رابطه با علل و منشأ پدیده گردوغبار در استان گلستان مطرح شده است که یکی از علل اصلی آن بیابان‌های ترکمنستان مطرح شده است؛ بنابراین با هدف تحلیل زمانی منشأ گردوغبارهای فرا منطقه‌ای استان گلستان با استفاده از مدل NOAA HYSPLIT (در بازه ۲۱ تا ۲۵ شهریور ۱۴۰۴) و تصاویر ماهواره‌ای در استان گلستان، ارائه داده‌شده است. این تحلیل با توجه به تأثیر زیاد گردوغبار در سه بازه زمانی ۷۲، ۲۴ و ۱۲ ساعته طی روزهای ۲۱ الی ۲۵ شهریور ۱۴۰۴ در استان گلستان، مورد بررسی قرار گرفت. استان گلستان به سبب قرار گرفتن در موقعیت جغرافیایی خاص دارای تنوع زیاد آب و هوایی است که از پدیده خشک‌سالی در امان نبوده و خسارت‌های فراوانی را در این زمینه متحمل شده است. در مناطق شمالی استان به سبب قرار گرفتن در کنار بیابان‌های

بالکان و قره‌قوم در شمال آن و همچنین خشک‌سالی‌های متعدد در این بخش از استان، رخداد پدیده گردوغبار بسیار مشاهده می‌شود. برای برآورد این رخدادهای می‌توان از داده‌های ماهواره‌ای بهره برد. این تحلیل بر مبنای بررسی تصاویر ماهواره‌ای و مدل HYSPLIT انتخاب‌شده در استان گلستان انجام شد. نتایج تحلیل بازه‌های زمانی سه ساعته (۱۲، ۲۴ و ۷۲ ساعت) نشان داد به غیر از بازه ۱۲ ساعته، در دو بازه زمانی دیگر گردوغبارهای ورودی به استان گلستان و با جهت باد غالب شمال غربی، منشأ فرا منطقه‌ای داشته است. به‌طوری‌که مسیریابی ۷۲ ساعته، منشأ را کشورهای ازبکستان و ترکمنستان، در مقابل مسیریابی ۲۴ ساعته این منشأ را قزاقستان و ازبکستان نشان می‌دهند. تحلیل تصاویر ماهواره‌ای سنتینل نیز حکایت از وجود توده گردوغبار یا آئروسول با منشأ خارجی (از شرق یا شمال شرق) داشتند؛ بنابراین، توده‌ی آئروسول مشاهده‌شده در استان گلستان در تاریخ ۲۴ شهریور منشأی در شرق یا

تعارض منافع

در این مقاله تعارض منافی وجود ندارد و این مسئله مورد تأیید نویسندگان مقاله است.

شمال شرق (ترکمنستان یا شمال خراسان) داشته که در ۲۱ شهرپور و در ارتفاع بالا (حدود ۱۰-۶ کیلومتری) وجود داشته و در روزهای بعدی با فرونشینی و انتقال افقی به منطقه‌ی منبع HYSPLIT رسیده است.

References

1. Arab-Ameri, F., Mohammadian Behbahani, A., Ownegh, M. and Arami, S.H., 2024. Statistical Analysis of Spatio-Temporal Variations of Dust Occurrences in Golestan Province. *Journal of Desert Ecosystem Engineering*, 12 (40), 59-72. (in Persian)
2. Arami, S.A., Ownegh, M. Mohammadian Behbahani, A., Akbari, M. and Zarasvandi, A., 2020. Research Article Investigating the Performance of BADI Index: An Improved Approach to Detect Dust Storms using MODIS Imagery in West of Middle East. *Journal of Natural Environmental Hazards*, 8(22), 75-94. (in Persian)
doi.org/10.22111/jneh.2018.25420.1414
3. Boroughani, M., 2022. Investigating the Trend of Changes and Correlation between the Occurrences of Dust in Iran. *Applied Soil Research*, 10 (1), 69-81.
4. Jafari, R. and Malekian, M., 2015. Comparison and evaluation of dust detection algorithms using MODIS Aqua/Terra Level 1B data and MODIS/OMI dust products in the Middle East. *International Journal of Remote Sensing*, 36 (2), 597-617
5. Khansalari, S., Majidi Dashli Brun, O., Nikzadfar, M. and Mollaaarazi, A., 2023. Temporal and spatial changes of dust in Golestan province using AOD (Aerosol Optical Depth) and the affectability of this province from the deserts of Turkmenistan. *Journal of Earth and Space Physics*, 49 (2), 517-540. (in Persian)
6. Mubarak-Hassan, A., Ranjbar Saadat-Abadi, A., Fattahi, A. and Nouri, F., 2021. Investigating the characteristics of the dust phenomenon in the Great Khorasan region during the hot period of the year and simulating its path by the HYSPLIT model (statistical period 2000-2017). *Natural Geography Research*, 53 (2), pp. 268-249.
7. Narayan, K., Khanindra, P., Abhisek, C., Subodh, K., Chowdary, V.M., Satiprasad, C.P., Singh, S. and Samrat, B., 2019. Assessment of foliar dust using Hyperion and Landsat satellite imagery for mine environmental monitoring in an open cast iron ore mining area. *Journal of Cleaner Production*, 4 (19), 30-33. **doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.305**
8. Papi, R., Attarchi, S., Darvishi Bolorani, A. and Neysani Samany, N., 2022. Characterization of Hydrologic Sand and Dust Storm Sources in the Middle East. *Sustainability*, 14 (22).
9. Razavizadeh, S., Abbasi, H., and Dargahian, F., 2021. Investigating the phenomenon of dust in Golestan province, with emphasis on optical depth index and wind direction and speed. *Iranian Journal of Watershed Management Science and Engineering*, 15 (53), 58-67. (in persian)
10. Tiangang, Y., Siyu, C., Jianping, H., Xiaorui, Z., Yuan, L., Xiaojun, M. and Guolon, Z., 2019. Sensitivity of simulating a dust storm over Central Asia to different dust schemes using the WRFChem model. *Atmospheric Environment*, 15 (207), 16-29.
doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.03.014
11. Xing, Y., Liu, B., Wagner, L. E. and Qu, J., 2025. Source shifting and contributions to Central East Asia dust events during 2000–2023. *Science China Earth Sciences*, 68 (11), 3804–3816. **doi.org/10.1007/s11430-024-1706-5**
12. Zhiyuan, H., Jianping, H., Chun, Z., Jiangrong, B., Qinjian, J., Yun, Q., Ruby, L., Taichen, F., Siyu, C. and Jianmin, M., 2019. Modeling the contributions of Northern Hemisphere dust sources to dust outflow from East Asia. *Atmospheric Environment*, 6 (14), 1352-2310.
doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.01.022