




Spatiotemporal Patterns of Atmospheric Aerosol Distribution in Khuzestan Province Based on MODIS AOD Data Using the Google Earth Engine Platform (2018–2023)

Atefeh Bosak¹, Zahra Hejazizadeh² , Mostafa Kabolizadeh³

1. PhD candidate of Climatology, Department of Natural Geography, Faculty of Geographic Sciences, Kharazmi University of Tehran, Tehran, Iran. E: std_bosak.a.97@khu.ac.ir

2. full Professor, Department of Climatology, Faculty of Geographical Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran). (Corresponding author) E: hejazizadeh@khu.ac.ir

3. Associate Professor of Remote Sensing and GIS, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz Iran. E: m.kabolizade@scu.ac.ir.

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Keywords

Aerosol Optical Depth (AOD), Atmospheric Aerosols
Dust Storms
MODIS Satellite Data
Google Earth Engine (GEE)

Air pollution has emerged as a critical environmental challenge in recent decades, posing serious threats to human health, driving climate change, and contributing to ecosystem degradation. Aerosols, as key constituents of this pollution, originate from both natural and anthropogenic sources and exert a significant impact on air quality. This study investigates the spatiotemporal patterns of aerosol distribution in Khuzestan Province, Iran, and analyzes their optical depth variations over the period from July 2018 to July 2023. MODIS-derived aerosol optical depth (AOD) data were processed using Java programming within the Google Earth Engine platform, and analyses were conducted at monthly, seasonal, and annual scales. Temporal trends were assessed using second-order polynomial regression, which revealed an inverted U-shaped pattern in annual AOD variation, with a coefficient of determination (R^2) of 0.82 and an adjusted R^2 of 0.78. Peak AOD values were observed during the warm seasons, particularly in June 2023 (8.5) and August 2020 (7.9) in the southern parts of the province, while the lowest values occurred in winter, especially in December 2018 and 2020, ranging from 0 to 0.14. Monthly averages indicated that May 2022 recorded a provincial mean AOD of 0.7, whereas the minimum monthly mean of 0.16 occurred in February 2021. The results highlight that although aerosols affect all regions of Khuzestan, the southern areas are most vulnerable due to their proximity to arid zones, vegetation decline, and wetland desiccation. These findings demonstrate the potential of MODIS data for monitoring dust phenomena and underscore the importance of remote sensing technologies for regional environmental management. Furthermore, the study emphasizes the need for targeted environmental policies, including vegetation restoration, water resource rehabilitation, and air pollution control in the southern province.

Article History:

Received:

20 Au 2025

Received in revised form:

14 Oc 2025

Accepted:

11 No 2025

Available online:

22 No 2025

Citation: Bosak, A., Hejazizadeh, Z. & Kabolizadeh, M. (2025). Spatiotemporal Patterns of Atmospheric Aerosol Distribution in Khuzestan Province Based on MODIS AOD Data Using the Google Earth Engine Platform (2018–2023). *Journal of Geography*, 23 (86), 1-24.

 <http://10.22034/jiga.2025.2062892.1431>



© The Author (s).

Publisher: Iranian Geographical Associati This is an open

access article under the CC BY NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Extended Abstract

Introduction

Air pollution has emerged as one of the most critical environmental and public health challenges in recent decades, with profound impacts on human health, climate change, and ecosystem degradation. Among the primary components of air pollution are atmospheric aerosols and suspended particulate matter, which significantly reduce air quality and contribute to various adverse phenomena such as horizontal visibility reduction, increased ambient temperature, disruption of precipitation cycles, and respiratory and cardiovascular disorders. Aerosols are classified into two categories based on their origin: natural and anthropogenic. Natural sources include desert dust storms, wildfires, and volcanic activity, while anthropogenic sources mainly consist of emissions from industries, transportation, and agricultural activities. Khuzestan Province, located in southwestern Iran, has been increasingly affected by dust storms and elevated aerosol concentrations in recent years. This is primarily due to its geographical location, proximity to vast deserts in Iraq and Saudi Arabia, reduced vegetation cover, wetland desiccation, and regional climate change. These conditions not only threaten human health but also create significant socio-economic and environmental consequences. Therefore, identifying and analyzing the temporal and spatial patterns of aerosol distribution and dust events is crucial for risk management, urban and regional planning, and the development of effective environmental policies.

Methodology

The primary objective of this study is to analyze the spatiotemporal variations of Aerosol Optical Depth (AOD) in Khuzestan Province over a five-year period from July 2018 to July 2023. To achieve this, MODIS satellite data were employed, and AOD maps were processed and extracted using the Java programming language within the Google Earth Engine (GEE) platform. Analyses were conducted at three temporal scales—monthly, seasonal, and annual—to provide a comprehensive understanding of both short-term and long-term variations and to identify the dominant spatial and temporal distribution patterns of aerosols. In addition, a second-degree polynomial nonlinear regression model was applied to examine the temporal trends of AOD, as it demonstrated better adaptability to the fluctuations in aerosol concentrations compared to linear models.

Results and Discussion

The findings of this study indicate that the temporal distribution of AOD in Khuzestan Province exhibits an inverted U-shaped pattern, with peak values occurring during the warm seasons and the lowest values recorded during the cold seasons. The maximum AOD values were observed in June 2023 (8.5) and August 2020 (7.9) in the southern parts of the province, particularly in areas adjacent to desiccated wetlands and arid desert regions. Conversely, the minimum AOD values occurred during winter, especially in December 2018 and December 2020, with values ranging between 0 and 0.14. Monthly mean analysis further revealed that the highest mean AOD was recorded in May 2022 (0.7), whereas the lowest mean occurred in February 2021 (0.16). These patterns clearly demonstrate that dust storm activity and aerosol concentration in Khuzestan Province are highly dependent on seasonal and climatic conditions. Southern regions are the most affected due to their proximity to dust hotspots, wetland desiccation, and the reduction in vegetation cover caused by both climatic factors and human activities.

Conclusion

This study highlights the significant potential of MODIS satellite data and the GEE platform for monitoring and analyzing dust phenomena and atmospheric aerosols in arid and semi-arid regions. The results emphasize the importance of utilizing remote sensing technologies for environmental monitoring and management, particularly in areas prone to dust events. Furthermore, the spatial and temporal analyses of aerosol distribution can assist policymakers and environmental authorities in designing targeted mitigation strategies. Based on the findings of this research, recommended actions include the restoration of wetlands and water resources, the expansion of vegetation cover using drought-resistant species, the management of anthropogenic dust sources, and the establishment of early warning and prediction systems for dust storms. Implementing these measures can play a critical role in reducing the environmental and public health impacts of dust and aerosol pollution in Khuzestan Province.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

The share of the first and second author is 80% and the share of the third and seventh author is 20%.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

According to the responsible author, this article is an extract from a doctoral thesis and has no financial support.

References

- 1) Ahmadi, M., Dadashirodbari, A. & Jafari, M. (2019). The effect of boundary layer height height on dust storm in southwest of iran (case study: february 21-24, 2016). *Journal of Natural Environmental Hazards*, 8(19), 151-174. [persian]
- 2) Entezari, A. & Sarvestan, R. (2018). Dust and its prediction in cities of Khuzestan province using time series models. *Journal of Environmental Science Studies*, 2(4), 535-545. [persian]
- 3) Basak, A., Arabi Moghadam, H., Hejazizadeh, Z. & Toolabinejad, M. (2018). The effects of water transfer projects of Karun tributaries in creating or intensifying dust centers in Khuzestan using Gis & Rs technologies. *Geography*, 16(56), 20-35. [persian]
- 4) Basak, A., Hejazizadeh, Z. & Heydari Tasheh Kabood, A. (2023). Time- series analysis of the atmospheric pollutant PM10 in the World- Heritage city of Shushtar using statistical methods (2014–2023). In *Proceedings of the 2nd National & 1st International Conference on Future Day, Future City: Focus on Sustainable Smart Cities*. Tehran, Iran. [persian] <https://civilica.com/doc/2061324>
- 5) Maleki, A., Ghojadi, P., Kahforoushan, D., Sarbazan, M. H. & Mansouri, H. (2022). Analysis of the spatial distribution of air pollutants in center of the city of Tabriz (District 8) and its relation with man-made environment. *Journal of Urban Sustainable Development*, 3(6), 69-83. [persian] <https://doi.org/10.22034/usd.2022.696894>
- 6) Pourahmad, M., Karampour, M. & Nasiri, B. (2023). Optical depth changes of dust in connection with land use changes in Central Zagros. *Journal of Geography and Planning*, 27(85), 13-25. <https://doi.org/10.22034/gp.2022.51303.2994>
- 7) Tamassoki, E., Tamassoki, E. & Asadi Meyabadi, A. (2022). Climatic analysis, routing and simulation of extreme dust storms in the west of Iran (Case study: Kermanshah Synoptic station). *Integrated Watershed Management*, 2(1), 33-47. [persian] <https://dx.doi.org/10.22034/iwm.2022.545938.1023>
- 8) Hejazizadeh, Z. & Pagooh, F. (2022). Analyzing the relationship between synoptic patterns and the amount of pervasive pollutant suspended particles in Tehran province. *Geography*, 15(53), 21-36. [persian]
- 9) Ranjbar, M. & Mahak, B. (2019). Temporal and spatial changes of air pollutants using GIS (Case study: Northern half of Tehran). *Geography*, 17(60), 72-85. [persian]
- 10) Rangzan, K., Zarasvandi, A., Kabolizadeh, M., Mohammadi, S. & Mayahi, J. (2022). Spatiotemporal evaluation of PM2.5 concentration in Khuzestan province and examining the factors affecting it. *Advanced Environmental Sciences*, 20(2), 199-222. [persian] <https://doi.org/10.52547/envs.2022.33613>
- 11) Saniee, R., Zangiabadi, A. & Sharifikia, M. (2017). Analyzing the daily process of Tehran metropolitan air pollutants. *Geography*, 15(54), 217-228. [persian]
- 12) Taei Samiromi, S., Moradi, H., Khadagholi, M. & Ahmadi, M. (2013). Study of factors affecting dust phenomenon in west of Iran. *Human & Environment*, 11(27), 1-10. [persian]
- 13) Faryabi, A., Matinfar, H. R., Alavi Panah, S. K. & Norouzi, A. A. (2019). Dust detection in western

- and southwestern Iran based on DAI index algorithm and Modis spectral data. *Environmental Sciences*, 17(3), 151-162. [persian] <https://doi.org/10.29252/envs.17.3.151>
- 14) lashkari H, Mohammadi, Z. (2022). Comparison and analysis of the temporal and spatial distribution of dust storms with visibility of fewer than 200 meters in western and southwestern Iran. *Journal of Spatial Analysis Environmental hazarts*, 9(1), 129-150. [persian] <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.24237892.1401.9.1.8.4>
 - 15) Andreae, M. O., Jones, C. D. & Cox, P. M. (2005). Strong present-day aerosol cooling implies a hot future. *Nature*, 435(7046), 1187-1190.
 - 16) Anitha, M., & Kumar, L. S. (2024). An analysis of atmospheric aerosol characteristics using remote sensing data in the Indian region. *Pure and Applied Geophysics*, 181(2), 625-654.
 - 17) Banks, J. R., Heinold, B. & Schepanski, K. (2022). Impacts of the desiccation of the Aral Sea on the Central Asian dust life-cycle. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127(21), e2022JD036618.
 - 18) Berhane, S. A., Althaf, P., Kumar, K. R., Bu, L. & Yao, M. (2024). A Comprehensive Analysis of AOD and its Species from Reanalysis Data over the Middle East and North Africa Regions: Evaluation of Model Performance Using Machine Learning Techniques. *Earth Systems and Environment*, 1-26.
 - 19) Chen Y, Li D, Karimian H, Wang S, Fang S. The relationship between air quality and MODIS aerosol optical depth in major cities of the Yangtze River Delta. *Chemosphere* 2022; 308: 136301.
 - 20) Chen, L., Liu, C., Wang, J., Chen, G., Zhao, Y., Jin, Y. & Jin, H. (2025). How is the spatiotemporal representativeness of ground-and satellite-based aerosol optical depth (AOD) measurements over Asia?. *Atmospheric Research*, 315, 107857.
 - 21) Huang, M., Peng, G., Zhang, J. & Zhang, S. (2006). Application of artificial neural networks to the prediction of dust storms in Northwest China. *Global and Planetary change*, 52(1-4), 216-224.
 - 22) Indoitu, R., Orlovsky, L. & Orlovsky, N. (2012). Dust storms in Central Asia: Spatial and temporal variations. *Journal of Arid Environments*, 85, 62-70.
 - 23) Mei, D., Xiushan, L., Lin, S. & Ping, W. A. N. G. (2008). A dust-storm process dynamic monitoring with multi-temporal MODIS data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37, 965-970.
 - 24) Pelucchi, P., Servera, J. V., Stier, P. & Camps-Valls, G. (2025). Invertible Neural Networks for Probabilistic Aerosol Optical Depth Retrieval. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*.
 - 25) Pozzer, A., De Meij, A., Yoon, J., Tost, H., Georgoulias, A. K. & Astitha, M. (2015). AOD trends during 2001–2010 from observations and model simulations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(10), 5521-5535.
 - 26) Qu, J. J., Hao, X., Kafatos, M. & Wang, L. (2006). Asian dust storm monitoring combining Terra and Aqua MODIS SRB measurements. *IEEE Geoscience and remote sensing letters*, 3(4), 484-486.
 - 27) Ramanathan, V., Crutzen, P. J., Lelieveld, J., Mitra, A. P., Althausen, D., Anderson, J., ... & Valero, F. P. J. (2001). Indian Ocean Experiment: An integrated analysis of the climate forcing and effects of the great Indo- Asian haze. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D22), 28371-28398.
 - 28) Wang, J., Zhang, B., Zhang, H., Hua, C., An, L. & Gui, H. (2022). Simulation of a severe sand and dust storm event in March 2021 in Northern China: Dust emission schemes comparison and the role of gusty wind. *Atmosphere*, 13(1), 108.
 - 29) Yang, Y. Q., Hou, Q., Zhou, C. H., Liu, H. L., Wang, Y. Q. & Niu, T. (2008). Sand/dust storm processes in Northeast Asia and associated large-scale circulations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8(1), 25-33.



تحلیل الگوهای زمانی و مکانی پراکنش عمق اپتیکی آئروسول (AOD) در استان خوزستان با استفاده از داده‌های MODIS در سامانه GEE (۲۰۱۸-۲۰۲۳)

عاطفه بساک^۱، زهرا حجازی زاده^۲، مصطفی کابلی زاده^۳

۱. دانشجوی دکتری آب‌هواشناسی، گروه جغرافیا طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی تهران، تهران، ایران. E: std_bosak.a.97@khu.ac.ir

۲. استاد آب‌هواشناسی، گروه جغرافیا طبیعی، دانشکده علوم جغرافیایی، دانشگاه خوارزمی تهران، تهران، ایران (نویسنده مسئول).

E: hejazizadeh@khu.ac.ir

۳. دانشیار، گروه سنجش‌ازدور GIS، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. E: m.kabolizade@scu.ac.ir

اطلاعات مقاله چکیده

واژگان کلیدی:

عمق اپتیکی
آئروسول (AOD)
گردوغبار
MODIS
Google Earth
Engine
خوزستان

آلودگی هوا یکی از مهم‌ترین چالش‌های زیست‌محیطی در دهه‌های اخیر است که تهدیدی جدی برای سلامت انسان، تغییرات اقلیمی و تخریب اکوسیستم‌ها محسوب می‌شود. آئروسول‌ها و ذرات معلق، به عنوان مؤلفه‌های اصلی این آلودگی، می‌توانند از منابع طبیعی یا انسانی ناشی شوند و تأثیر چشمگیری بر کیفیت هوا داشته باشند. این پژوهش با هدف بررسی الگوهای مکانی و زمانی پراکنش آئروسول‌ها در استان خوزستان و تحلیل تغییرات عمق اپتیکی آن‌ها طی دوره‌ی جولای ۲۰۱۸ تا جولای ۲۰۲۳ انجام شد. برای این منظور از داده‌های ماهواره‌ای سنجنده MODIS و نقشه‌های عمق اپتیکی آئروسول (AOD) که با استفاده از زبان برنامه‌نویسی جاوا در بستر Google Earth Engine استخراج شدند، بهره گرفته شد. تحلیل‌ها در مقیاس‌های ماهانه، فصلی و سالانه انجام گرفت. روند تغییرات زمانی با رگرسیون غیرخطی چندجمله‌ای درجه دوم بررسی شد که با ضریب تعیین ۰۰۸۲ و ضریب تعیین تعدیل شده ۰۰۷۸، الگوی U وارونه‌ای را در توزیع سالانه AOD نشان داد. بیشترین مقادیر AOD در فصول گرم، به‌ویژه ژوئن ۲۰۲۳ با مقدار ۸۰۵ و آگوست ۲۰۲۰ با مقدار ۷۰۹ در شهرهای جنوبی استان ثبت شد، در حالی که کمترین مقادیر در فصل زمستان، به‌ویژه دسامبر ۲۰۱۸ و ۲۰۲۰، با بازه ۰ تا ۰۱۴ مشاهده گردید. میانگین ماهانه نیز نشان داد بیشترین مقدار در می ۲۰۲۲ با ۰۰۷ و کمترین در فوریه ۲۰۲۱ با ۰۰۱۶ ثبت شده است. نتایج بیانگر آن است که اگرچه تمامی نواحی استان تحت‌تأثیر آئروسول‌ها قرار دارند، مناطق جنوبی به دلیل مجاورت با نواحی خشک، کاهش پوشش گیاهی و خشکی تالاب‌ها بیشترین تأثیرپذیری را نشان می‌دهند. این یافته‌ها ظرفیت بالای داده‌های MODIS را در پایش پدیده‌های گردوغبار و اهمیت بهره‌گیری از سنجش‌ازدور در مدیریت محیط‌زیست نمایان کرده و بر ضرورت سیاست‌های هدفمند شامل تقویت پوشش گیاهی، احیای منابع آبی و کنترل آلودگی هوا در جنوب استان تأکید دارد.

تاریخ دریافت

۱۴۰۴/۰۵/۲۹

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۴/۰۷/۲۲

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۸/۳۰

تاریخ چاپ:

۱۴۰۴/۰۹/۰۱

استناد: بساک، عاطفه؛ حجازی زاده، زهرا و کابلی زاده، مصطفی. (۱۴۰۴). تحلیل الگوهای زمانی و مکانی پراکنش عمق اپتیکی آئروسول (AOD) در استان خوزستان با استفاده از داده‌های MODIS در سامانه GEE (۲۰۱۸-۲۰۲۳)، نشریه جغرافیا، (۸۶) ۲۳، ۲۴-۰۱.

<http://10.22034/jiga.2025.2062892.1431>

صاحب امتیاز: انجمن جغرافیایی ایران

© نویسندگان



مقدمه و پیشینه

کیفیت هوا و میزان آلودگی آن از مهم‌ترین موضوعاتی است که در مطالعات آب‌وهواشناسی و محیط‌زیست مورد توجه قرار می‌گیرد (پناهی، ۱۳۹۷)؛ از عواملی که منجر به ایجاد آلودگی هوا می‌شوند می‌توان به آلاینده‌های اصلی غلظت گازهای مونوکسید کربن (CO، دی‌اکسید گوگرد (SO₂)، دی‌اکسید نیتروژن (NO₂)، ازن (O₃)، میانگین غلظت ذرات معلق کمتر از ۱۰ میکرون (PM₁₀) و میانگین غلظت ذرات معلق کمتر از ۲٫۵ میکرون (PM_{2.5}) اشاره کرد (بساک و همکاران، ۱۴۰۲). پدیده گردوغبار به‌عنوان یکی از آلاینده‌های جو، از مهم‌ترین مخاطرات آب‌وهوایی محسوب می‌شود و به ذرات بسیار کوچک و سبک سیلتی و رسی یا ماسه‌ای اطلاق می‌شود که در اثر فرسایش بادی و بیابان‌زایی توسط باد تا مسافت بسیار طولانی جابجا و انتقال می‌یابند (سازمان حفاظت محیط‌زیست، ۱۳۹۰)؛ عمده‌ترین محل وقوع آن در نواحی معتدله، حاره و جنب حاره اطراف عرض جغرافیایی ۴۰ درجه‌ی شمالی و جنوبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک که دارای میانگین بارش سالانه ۲۰۰ تا ۳۰۰ میلی‌متر است؛ رخ می‌دهد (یانگ و همکاران^۱ (۲۰۰۸)، ایندویتو و همکاران^۲ (۲۰۱۲)). عوامل متعددی از جمله شکل توپوگرافی در جهت بادهای مساعد برای کانالیزه کردن جریان‌ها، بار بستری معلق کافی، وزش بادهای شدید و ناگهانی، خشک شدن بسترهای آبی و رودخانه‌ها با دخالت انسان و یا سیکل طبیعی اقلیم، فرسایش شدید بستر بیابانی و یا کویری خشک و وسیع، (طائمی سمیرمی و همکاران، ۱۳۹۲)؛ و خاک بدون پوشش، شرایط هوایی خشک (می و همکاران، ۲۰۰۸)؛ رطوبت خاک، پوشش گیاهی (هیونگ و همکاران، ۲۰۰۶)؛ سیستم هوای محلی و بیرونی، بارش کوتاه‌مدت، وسعت جنگل‌زدایی، خشک‌سالی‌های بلندمدت، تغییرات کاربری زمین و فعالیت‌های انسانی (جان و همکاران، ۲۰۰۶) در ایجاد و یا تشدید این رخداد مؤثرند. آئروسول‌های جوی به‌عنوان عنصری حیاتی، مستقیماً بر ویژگی‌های ابرها، توازن تابشی زمین، سلامتی انسان، محیط‌زیست و کیفیت هوا تأثیر می‌گذارند (آیتا و کومار، ۲۰۲۴). افزایش گازهای گلخانه‌ای که منجر به تغییرات اقلیمی می‌شود تا حدودی تحت تأثیر تغییرات تشعشعات آئروسول قرار گرفته و ممکن است تضعیف یا تقویت شود (اندرو و همکاران، ۲۰۰۵). ذرات معلق در هوا قادر به تغییر خواص ابرها می‌باشند (راماناتان و همکاران، ۲۰۰۱). همچنین قرار گرفتن کوتاه‌مدت در معرض آلودگی هوا با بستری شدن روزانه در بیمارستان و مرگ‌ومیر ناشی از سندرم حاد کرونری (ACS) مرتبط بوده است (رنجی چن و همکاران، ۲۰۲۲). با توجه به موقعیت جغرافیایی ایران که در کمربند خشک و نیمه‌خشک جهان واقع شده و همجواری با بیابان‌های مستعد گردوغبار از جمله عربستان عراق و سوریه تحت تأثیر سامانه‌های گردوغبار قرار گرفته است (احمدی و همکاران، ۱۳۹۸)؛ و همچنین وقوع خشک‌سالی‌های متعدد در سال‌های اخیر منجر به رخداد و تشدید پدیده گردوغبار در سطح وسیعی از کشور، خصوصاً مناطق غربی ایران شده است. استان خوزستان به دلیل قرار داشتن در نواحی جنوب غربی ایران و نزدیک بودن به سرزمین‌های گردوغبار خیز عربستان و عراق سالانه شاهد وقوع گردوغبارهای فراوانی بوده است. با توجه به تأثیر بسیار زیاد پدیده گردوغبار بر سلامت، محیط‌زیست و تغییرات اقلیمی، مطالعه و بررسی رخداد گردوغبار حائز اهمیت می‌باشد. ضخامت نوری آئروسول^۳ (AOD) یکی از شاخص‌های مهم در مطالعات گردوغبار به شمار می‌رود این شاخص میزان تضعیف نور خورشید در اثر برخورد با ذرات معلق را نشان می‌دهد و از طریق داده‌های سنجش‌ازدور و

^۱ Ozone^۲ Particulate matter^۳ Yang et al^۴ Indoitu et al^۵ Aerosol Optical Depth

ماهواره‌ای قابل سنجش و محاسبه می‌شود. بررسی تغییرات AOD در طول زمان و مکان، اطلاعات ارزشمندی در مورد شدت و توزیع آئروسول‌ها ارائه می‌دهد و می‌تواند به درک بهتر مکانیزم‌های مؤثر در تشکیل و انتشار گردوغبار کمک کند. مطالعات گوناگونی در این زمینه صورت گرفته است از جمله آن‌ها می‌توان به این مطالعات اشاره کرد: پوزر و همکاران (۲۰۱۵) در پژوهشی درباره روند AOD طی سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۰، با استفاده از مشاهدات و شبیه‌سازی مدل، دریافتند که کاهش روند AOD در ایالات متحده و اروپا به دلیل کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای بوده است. در حالی که در مناطق صحرای بزرگ آفریقا و خاورمیانه، تغییرات هواشناسی نقش مهم‌تری ایفا کرده است؛ اما در جنوب شرقی آسیا، هر دو عامل تغییرات هواشناسی و انتشار گازهای گلخانه‌ای به یک اندازه در تعریف روند AOD تأثیرگذار بوده‌اند. فاریابی و همکاران (۱۳۹۸) با شناسایی پدیده گردوغبار در نواحی غرب و جنوب غرب ایران بر مبنای الگوریتم سنجه DAI و داده‌های طیفی سنجنده مودیس دریافتند که تمام نقشه‌های AOD با استفاده از روش مستقیم، توزیع مکانی بسیار خوب الگوی آئروسول محلی در مقایسه با روش‌های دیگر است که الگوریتم سنجه DAI استفاده از وابستگی طیفی پراکندگی ریلی، بازتاب سطح و جذب گردوغبار موجود در هوا برای تشخیص گردوغبار می‌باشد. تمسکی و همکاران (۱۴۰۱) با تحلیل، رهگیری و شبیه‌سازی مسیر گردوغبار در غرب ایران دریافتند که شاخص NDDI حاصل از تصاویر ماهواره‌ای مودیس و همچنین مدل رهگیری جریان باد و بررسی‌های جوی به‌منظور تشخیص و پایش مسیر حرکت گردوغبار مناسب هستند و نتایج بیانگر این بود که با ادغام داده‌های زمینی، مدل رهگیری جریان باد و بررسی‌های جوی و شاخص‌های ماهواره‌ای منجر به شناخت رفتاری توفان‌های گردوغباری می‌شود. بنکس و همکاران (۲۰۲۲) در پژوهشی اثرات خشک شدن دریای آرال بر چرخه حیات گردوغبار آسیای مرکزی را ارزیابی کردند نتایج آن‌ها نشان داد که استفاده از مجموعه داده‌های آب‌های سطحی جهانی برای در نظر گرفتن حساسیت به تغییرات پوشش آب‌های سطحی در منطقه بین دهه ۱۹۸۰ (گذشته) و دهه ۲۰۱۰ (حال). در طی یک دوره مطالعه موردی ۱ ساله، انتشار گردوغبار شبیه‌سازی شده از منطقه آرالکوم از ۱۴٫۳ به ۲۷٫۱ Tg در سال بین گذشته و حال افزایش یافته است، افزایشی که صرفاً ناشی از تغییرات در محیط آب‌های سطحی است. از این انتشارات شبیه‌سازی شده مدرن، ۱۴٫۵ Tg توسط بادهای غربی هدایت می‌شود که نشان می‌دهد مناطقی که در جهت باد به سمت شرق هستند، ممکن است بدترین آسیب را از گردوغبار آرالکوم ببینند. برهان و همکاران (۲۰۲۴) در پژوهشی به تجزیه و تحلیل جامع AOD در خاورمیانه و شمال آفریقا پرداختند نتایج آن‌ها نشان داد که نوسانات AOD در منطقه منا توسط عوامل هواشناسی و انتشار گردوغبار ناشی از خشک‌سالی هدایت می‌شود. همچنین محققان دیگری نیز پژوهش‌هایی در زمینه آلودگی هوا و پدیده گردوغبار داشته‌اند از جمله آن‌ها می‌توان به انتظاری و سروستان (۱۳۹۶)؛ صنیعی و همکاران (۱۳۹۶)؛ بساک و همکاران (۱۳۹۷)؛ رنجبر و ماهک (۱۳۹۸)؛ لشکری و محمدی (۱۴۰۱)؛ رنگزن و همکاران (۱۴۰۱)؛ حجازی زاده و پژوه (۱۴۰۱)؛ چن و همکاران (۲۰۲۵)؛ پلوچی و همکاران (۲۰۲۵)؛ وانگ و همکاران (۲۰۲۲) ... اشاره کرد. از این رو، با توجه به اهمیت مطالعه و پایش آلودگی هوا و پدیده گردوغبار در استان خوزستان، این پژوهش به بررسی تغییرات زمانی و مکانی ضخامت نوری آئروسول (AOD) با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای مودیس و روش‌های آماری طی سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳ می‌پردازد. نتایج این مطالعه می‌تواند به سیاست‌گذاران و برنامه‌ریزان محیط‌زیستی در تدوین راهکارهای مؤثر برای کاهش اثرات مخرب

۱ Chen et al

۲ Pelucchi et al

۳ Wang et al

گردوغبار و بهبود کیفیت هوا کمک کند.

روش پژوهش

تصاویر ماهواره‌ای مودیس^۱

سنجنده مودیس یک طیف‌سنج با وضوح تصویربرداری سطح متوسط، بر روی ماهواره‌های ترا و آکوا نصب شده است. این سنجنده هر یک تا دو روز تمام سطح زمین را مشاهده و برداشت می‌کند و داده‌های دریافتی از آن در ۳۶ باند طیفی از طول‌موج‌های گوناگون به دست می‌آیند. یکی از محصولات موردبررسی توسط این سنجنده، پروداکت عمق اپتیکی آئروسول می‌باشد. به‌گونه‌ای که پروداکت آئروسول سنجنده مودیس ضخامت نوری آئروسول را در سطوح اقیانوس‌ها و قاره‌ها نظارت و ثبت می‌کند.

پراکندگی زمانی - مکانی عمق اپتیکی آئروسول

برای مطالعه و بررسی پراکندگی زمانی - مکانی عمق اپتیکی آئروسول‌های اتمسفر استان خوزستان در دوره مطالعاتی (جولای ۲۰۱۸ - ژوئن ۲۰۲۳) از داده‌های ماهواره‌ای سنجنده MODIS پروداکت MCD19A2.061 بهره گرفته شد. این پروداکت یک محصول شبکه‌ای سطح ۲ با طیف‌سنجی تصویربرداری متوسط و عمق اپتیکی آئروسول در نوار آبی ۰.۴۷ میکرومتر^۳ می‌باشد. با استفاده از برنامه‌نویسی در محیط گوگل ارث انجین، تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های ساعتی عمق اپتیکی آئروسول با تفکیک مکانی ۹۲۷ متر استخراج شدند. خروجی این پردازش ۴۳۸۰۰ تصویر ساعتی بود که با پردازش و تبدیل به میانگین روزانه، ۱۸۲۵ تصویر به دست آمد. در نهایت، خروجی نهایی به‌صورت میانگین ماهانه با ۶۰ تصویر تهیه گردید؛ سپس با استفاده از داده‌های دریافتی از آن، در محیط نرم‌افزارهای Arc Map 10.8 و Origin 2024 نقشه‌ها و نمودارهای موردنظر ترسیم شدند. نقشه‌های ترسیمی با استفاده از الگوریتم Jenks در ۶ طبقه (از کمترین تا بیشترین مقدار AOD) طبقه‌بندی می‌گردد. به‌گونه‌ای که رنگ سبز پررنگ کمترین و رنگ قرمز حداکثر عمق اپتیکی آئروسول موجود در اتمسفر استان خوزستان را نشان می‌دهد. همچنین با دریافت داده‌های میانگین ماهانه‌ی آن‌ها نمودارهای مربوطه‌ی آن‌ها نیز ارائه می‌شود. شایان ذکر است که در این پژوهش از محصولات سطح ۳ مودیس استفاده شده است.

جدول (۱). مراحل کلی اجرای کد برای دریافت داده‌های ماهواره‌ای عمق اپتیکی آئروسول (AOD) از مجموعه داده‌های MODIS در Google Earth Engine

ردیف	مرحله	توضیحات
۱	وارد کردن داده‌ها	دریافت مجموعه تصاویر AOD از MODIS (MCD19A2_GRANULES) و داده‌های مرزی استان‌ها (FAO/GAUL/2015/level2)
۲	تعریف منطقه مطالعاتی	استخراج منطقه خوزستان از داده‌های FAO و نمایش آن بر روی نقشه.
۳	تعیین بازه زمانی	مشخص کردن تاریخ شروع (۲۰۰۰-۳۱-۱۲) و پایان (۲۰۰۱-۰۷-۰۱) برای فیلتر کردن تصاویر ماهواره‌ای.
۴	تعیین مقیاس داده‌ها	استخراج مقیاس مکانی اولین تصویر AOD برای پردازش‌های بعدی.
۵	تعریف توابع پردازش داده‌ها	شامل توابع برش منطقه‌ای (clip)، ماسک کردن پیکسل‌های ابری (mask)، مقیاس‌دهی (scalefactor) AOD و محاسبه میانگین بر اساس واحد زمانی (mean).
۶	استخراج تصاویر ساعتی	فیلتر کردن تصاویر AOD بر اساس منطقه مطالعه و بازه زمانی، حذف داده‌های ابری و نامعتبر، مقیاس‌دهی AOD و فیلتر کردن داده‌های AOD کمتر از ۱۰۰۰.

^۱ Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)

^۲ MCD19A2.061: Terra & Aqua MAIAC Land Aerosol Optical Depth Daily 1km

^۳ Optical_Depth_047

۵	بساک و همکاران / تحلیل الگوهای زمانی و مکانی	
۷	محاسبه و نمایش میانگین روزانه AOD	تولید مجموعه تصاویر روزانه و نمایش نمودار تغییرات زمانی آن.
۸	محاسبه و نمایش میانگین ماهانه AOD	تولید مجموعه تصاویر ماهانه و نمایش نمودار تغییرات زمانی آن.
۹	تنظیم پارامترهای بصری سازی AOD	تعیین حداقل، حداکثر و پالت رنگی برای نمایش نقشه‌های AOD.
۱۰	نمایش و خروجی گرفتن از تصاویر ماهانه	افزودن تصاویر ماهانه به نقشه، ذخیره آن‌ها در Google Drive و رسم نمودار هیستوگرام برای تحلیل توزیع مقادیر AOD.

به منظور تحلیل دقیق‌تر و بررسی اثرات AOD بر کیفیت هوای منطقه‌ی مطالعاتی، بر اساس بررسی‌های انجام‌شده، از جدول (۲) استفاده گردید. این جدول با توجه به استفاده از داده‌های سنجنده MODIS برای محاسبه‌ی عمق اپتیکی آئروسول، بر اساس راهنمای رسمی NOAA برای سنجنده VIIRS تهیه شده است. طبقه‌بندی ارائه‌شده در راهنمای VIIRS Aerosol Optical Depth Quick Guide، به دلیل شباهت عملکرد و طول موج‌های مشابه بین سنجنده‌های MODIS و VIIRS، قابلیت تطبیق دارد. همچنین این طبقه‌بندی، توصیف کیفی روشنی از وضعیت هوا و تأثیرات آن بر سلامت عمومی ارائه می‌دهد، که در ادامه در جدول (۲) نمایش داده شده است.

جدول (۲). طبقه‌بندی عمق اپتیکی آئروسول و وضعیت کیفیت هوا

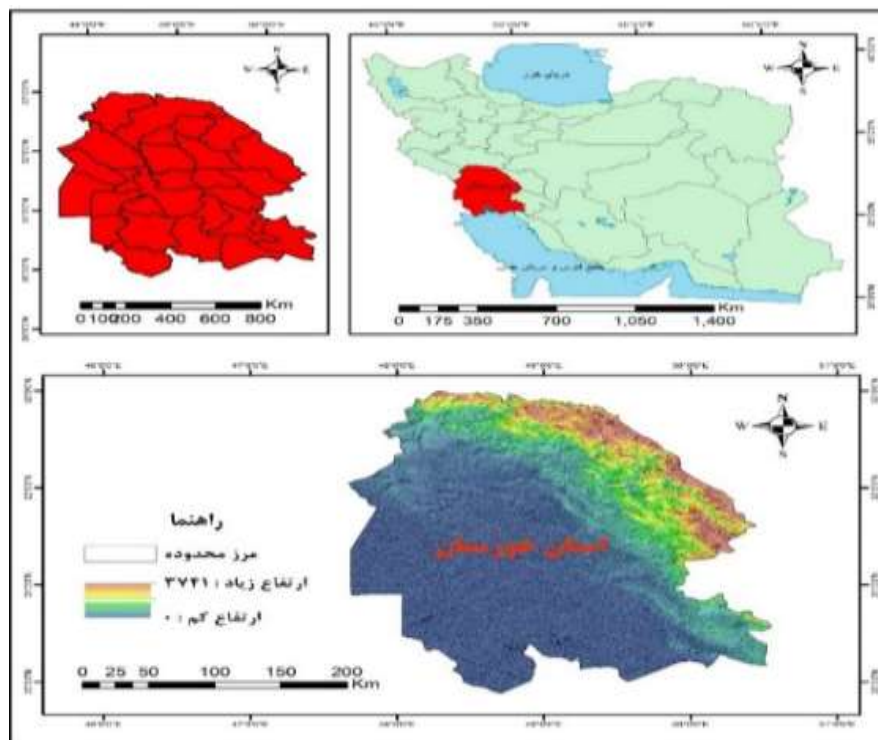
مقدار AOD	وضعیت کیفی جو / دید افقی	طبقه‌بندی ضخامت آئروسول‌ها
$AOD < 0.2$	هوای بسیار تمیز با دید عالی	جو پاک
$0.2 < AOD \leq 0.4$	کمی کدری، تأثیر ناچیز بر کیفیت هوا	آئروسول نازک
$0.4 < AOD \leq 0.6$	کاهش متوسط دیده، احتمال تأثیر بر افراد حساس	آئروسول متوسط
$0.6 < AOD \leq 1.0$	دید کم، کیفیت هوا ضعیف، ناسالم برای گروه‌های حساس	آئروسول ضخیم
$AOD > 1.0$	آلودگی شدید، خطر برای سلامت عمومی و کاهش شدید دید	آئروسول بسیار ضخیم

منبع: NOAA/NESDIS/STAR. (n.d.). VIIRS Aerosol Optical Depth Quick Guide.

محدوده مورد مطالعه

استان خوزستان با مساحتی حدود ۶۴،۲۳۶ کیلومترمربع حدود ۴ درصد از کل مساحت کشور را به خود اختصاص داده است که از این حیث دهمین استان کشور محسوب می‌شود، بین ۴۷ درجه و ۴۱ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۳۹ دقیقه طول شرقی از نصف‌النهار گرینویچ و ۲۹ درجه و ۵۸ دقیقه تا ۳۳ درجه و ۴ دقیقه عرض شمالی از خط استوا، در جنوب غربی ایران واقع شده است. این استان از شمال غربی با استان ایلام، از شمال با استان لرستان، از شمال شرقی و شرق با استان‌های چهارمحال و بختیاری و کهگیلویه و بویراحمد، از جنوب با خلیج فارس و از غرب با کشور عراق هم‌مرز است. مطابق سرشماری مرکز آمار ایران در سال ۱۳۹۵ جمعیت این استان برابر با ۴۷۱۰۵۰۹ نفر بوده است (سایت مرکز آمار ایران). استان خوزستان دارای ۲۴ شهرستان و ۵۴ شهر و ۵۲ بخش و ۱۱۲ دهستان و ۳۸۸۰ آبادی مسکونی و ۲۵۱۴ آبادی غیرمسکونی می‌باشد و این استان به‌عنوان پنجمین استان پرجمعیت ایران است. فاصله مرکز استان (اهواز) تا تهران ۸۷۴ کیلومتر است. استان خوزستان از سمت شمال و شرق به رشته‌کوه‌های زاگرس منتهی می‌شود. ارتفاعات این استان در جهت جنوب غربی کاهش یافته و در نواحی جنوب‌تر به صورت تپه‌های ماهوری نمایان می‌شود. این سرزمین از نظر پستی و بلندی به ۲ منطقه کوهستانی و جلگه‌ای تقسیم می‌شود. منطقه کوهستانی قسمت‌های شمال و شرق استان

را در برمی‌گیرد؛ و منطقه جلگه‌ای از جنوب دزفول، مسجدسلیمان، رامهرمز و بهبهان شروع شده و تا کرانه‌های خلیج فارس و اروندرود ادامه می‌یابد شکل (۱).



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه
منبع: (نگارندگان، ۱۴۰۴)

بحث و یافته‌ها

پراکندگی زمانی - مکانی میانگین ماهانه عمق اپتیکی آئروسول (AOD) در اتمسفر استان خوزستان با استفاده از تصاویر مودیس

یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر بر کیفیت آب‌وهوا، ذرات معلق در هوا می‌باشند. شاخص عمق اپتیکی آئروسول یک پارامتر بدون بعد می‌باشد که میزان ذرات معلق موجود در جو را تعیین می‌کند که می‌توانند باعث جذب یا پراکنده کردن نور خورشید شده و مانع از ورود نور خورشید به زمین می‌شوند (دانیالی و کریمی، ۲۰۱۹).

به‌منظور درک بهتر شرایط آلودگی هوا در استان خوزستان، نقشه‌های زمانی-مکانی میانگین ماهانه عمق اپتیکی آئروسول (AOD) در طول موج ۴۷۰ نانومتر برای دوره‌ی پنج‌ساله (جولای ۲۰۱۸ تا جولای ۲۰۲۳) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای سنجنده MODIS تهیه شدند؛ که در ادامه به تحلیل و تفسیر این نقشه‌ها پرداخته می‌شود.

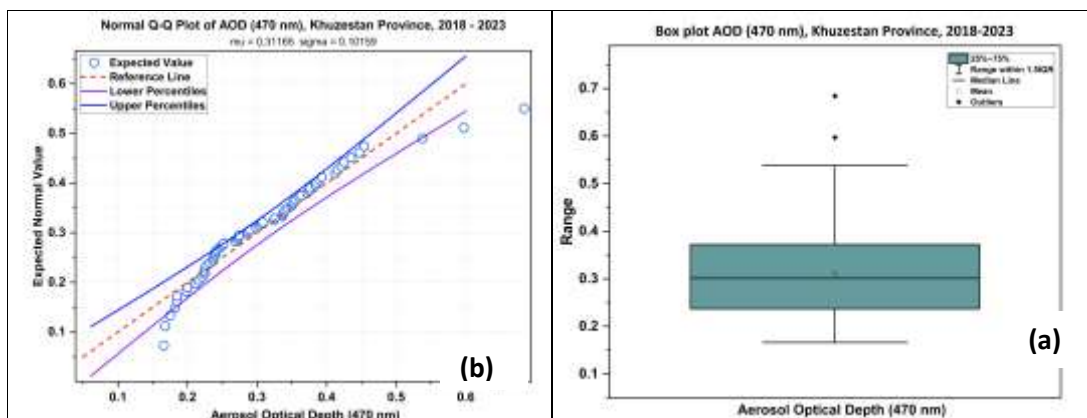
تحلیل آماری داده‌های عمق اپتیکی آئروسول (AOD) استان خوزستان طی دوره ۲۰۱۸ - ۲۰۲۳

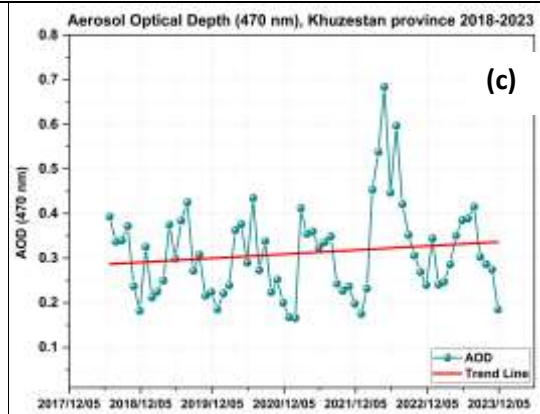
در ابتدای امر به‌منظور بررسی نرمال بودن داده‌های عمق اپتیکی آئروسول دریافتی از تصاویر ماهواره‌ای مودیس نمودار

Q-Q پلات آن‌ها ترسیم شد. همان‌طور که در شکل (۲ a) مشاهده می‌شود داده‌های مورد استفاده از توزیع نرمال تبعیت می‌کنند و در محدوده‌ی ۰,۱۶۶ تا ۰,۶۸۴ می‌باشند. در وسط نمودار نقاط داده‌های AOD بر روی خط مرجع قرار گرفته‌اند که نشان‌دهنده‌ی مطابقت داده‌ها با توزیع نرمال می‌باشد. باین‌حال داده‌های ابتدا و انتهای نمودار دارای انحراف می‌باشند. همان‌طور که در شکل (۲ a) ارائه شده است میانگین داده‌ها برابر با ۰,۳۱ و انحراف از معیارشان ۰,۱ می‌باشد که بیانگر پراکندگی داده‌ها در اطراف میانگین می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۲ a) آورده شده است انحرافات درصدهای بالا و پایین نمودار با رنگ‌های آبی و بنفش نشان داده شده‌اند.

به‌منظور بررسی اطلاعات آماری، توزیع داده‌ها و شناسایی داده‌های پرت، نمودار جعبه‌ای (Box Plot) آن‌ها ترسیم شد. مطابق با نمودار جعبه‌ای در شکل (۲ b) میانگین داده‌ها در محدوده‌ی ۰,۳۱ و میانه در حدود ۰,۳ می‌باشد. با توجه به نمودار باکس پلات چارک اول حدود ۰,۲۵ و چارک سوم نیز حدود ۰,۴ می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۲ b) نمایان می‌باشد فاصله‌ی بین چارک اول و چارک سوم تقریباً ۰,۱۵ می‌باشد که بیانگر تراکم نسبی داده‌ها و پراکندگی کم داده‌ها در محدوده‌ی چارک‌ها می‌باشد. به‌صورت کلی با توجه به اینکه میانگین کمی از میانه بالاتر می‌باشد بیانگر چوله به راست بودن داده‌ها می‌باشد. همچنین وجود نقاطی بالاتر از خطاگیرها بیانگر وجود داده‌های پرت می‌باشد که فراتر از حد طبیعی داده‌ها می‌باشند و نشان‌دهنده‌ی وقوع روزهایی با حداکثر میزان AOD است.

برای بررسی تغییرات عمق اپتیکی آئروسول در بازه زمانی پنج ساله نمودار (c) شکل (۲) ارائه شده است. مطابق این نمودار محدوده تغییرات مقادیر AOD در بازه ۰,۱۶ تا ۰,۷ می‌باشد که بیانگر نوسانات زیاد در میزان رخداد آن می‌باشد. باتوجه به خط روند ترسیم شده تغییرات AOD در طی زمان دارای روند تدریجی صعودی می‌باشد. نوسانات مشاهده شده در نمودار، به شکل افزایش و کاهش، نشان‌دهنده‌ی تأثیر فصول مختلف بر AOD می‌باشد. به‌صورت کلی در فصول سرد شاهد کاهش و در فصول گرم افزایش آن را شاهد هستیم. به‌طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که روند تغییرات غلظت آلاینده AOD در بازه زمانی مطالعاتی روند افزایشی و صعودی دارد که بیانگر افزایش آن در جو استان خوزستان خصوصاً در شهرهای جنوبی می‌باشد.



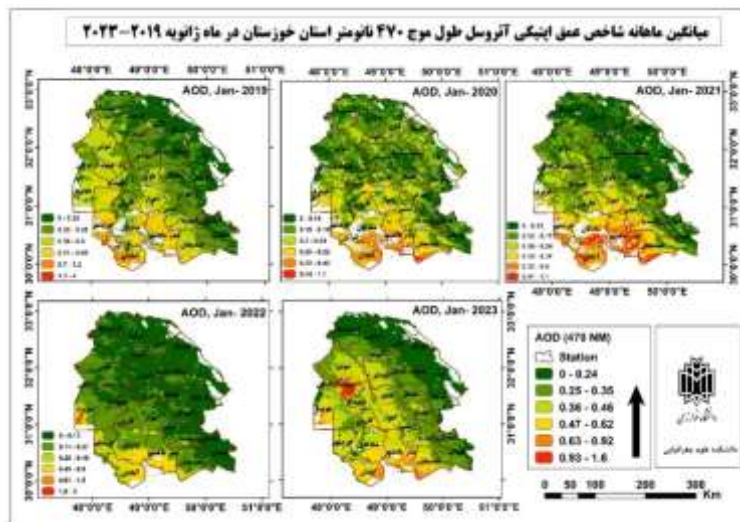


شکل ۲. اطلاعات آماری داده‌های دریافتی از سنجنده مودیس آلاینده عمق اپتیکی آئروسول استان خوزستان ۲۰۲۳-۲۰۱۸

پراکندگی زمانی - مکانی عمق اپتیکی آئروسول فصل زمستان استان خوزستان در دوره مورد مطالعه (جولای ۲۰۱۸ - ژوئن ۲۰۲۳)

پراکندگی زمانی - مکانی غلظت AOD در ماه ژانویه (۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳)

در ماه ژانویه سال ۲۰۱۹، شهرهای جنوبی استان خوزستان بیشترین مقادیر عمق اپتیکی آئروسول را در کل دوره مطالعاتی (۲۰۱۹-۲۰۲۳) ثبت کردند. در این ماه، بیشینه‌ی AOD با مقدار ۴ در شهرهای نوار جنوبی استان از جمله آبادان، خرمشهر، شادگان و بندر ماهشهر مشاهده شد. در مقابل، کمترین مقدار AOD نیز با محدوده‌ی ۰ تا ۰٫۱۲ در ژانویه‌ی ۲۰۲۱ و به‌صورت پراکنده در پهنه‌ی استان رخ داده است. شایان‌ذکر است که ماه ژانویه‌ی تمامی دوره‌ی مورد مطالعه بخش‌هایی از استان دارای مقادیر فراتر از مقدار استاندارد می‌باشند که نشان‌دهنده‌ی حجم زیاد ذرات معلق در جو استان حتی در فصل سرد سال می‌باشد شکل (۳).

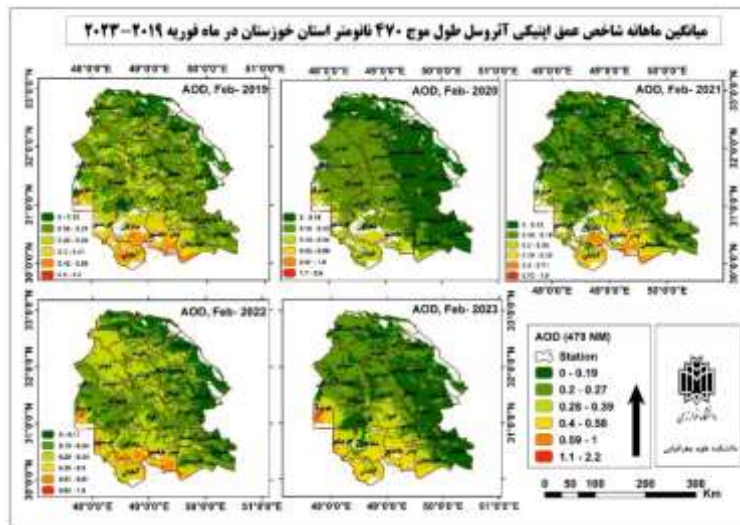


شکل ۳. پراکندگی زمانی - مکانی میانگین ماهانه AOD ماه ژانویه استان خوزستان (۲۰۱۹-۲۰۲۳)

پراکندگی زمانی - مکانی غلظت AOD در ماه فوریه (۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳)

بررسی نقشه‌های مربوط به ماه فوریه دوره مطالعاتی، ارائه شده در شکل (۴) نشان می‌دهد که سال ۲۰۲۰ بیشترین مقادیر آئروسول در این دوره در استان خوزستان ثبت شده است؛ و همچنین کمترین مقدار نیز با ۰٫۱۳ مربوط به سال ۲۰۲۱ می‌باشد. براساس نقشه‌های آئروسول دریافتی از تصاویر ماهواره‌ای مودیس در تمامی نقشه‌های مربوط به ماه

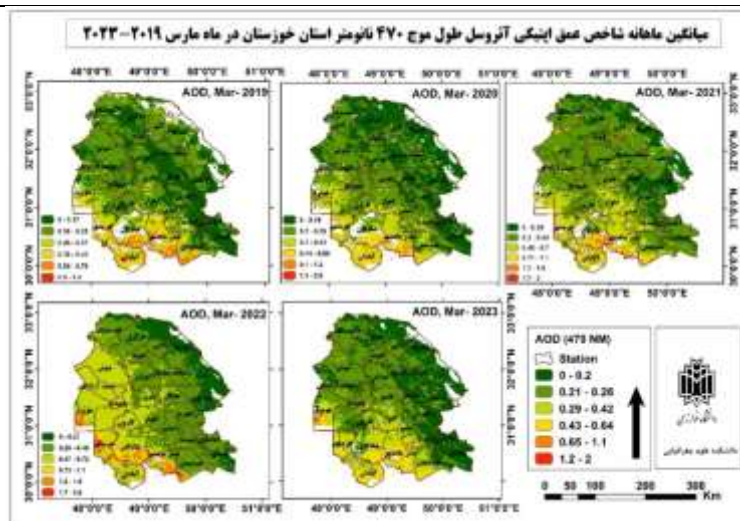
فوریه، شهرهای جنوبی و غربی استان از نظر پارامتر عمق اپتیکی آئروسول دارای بیشترین مقادیر AOD می‌باشند. به‌نحوی که بیشترین مقادیر رخ داده با مقدار ۲٫۶ در فوریه سال ۲۰۲۰ و در شهرهای قسمت‌های جنوبی منطقه مطالعاتی از قبیل شهرهای آبادان، خرمشهر، شادگان، بندر ماهشهر، هندیجان و هویزه بوده است. همچنین کمترین مقدار نیز با محدوده‌ی ۰ تا ۰٫۱۳، در فوریه‌ی ۲۰۲۱ و به‌صورت پراکنده در بخش‌های مختلف استان ثبت شده است. شایان‌ذکر است که ماه فوریه در تمامی دوره‌ی مورد مطالعه بخش‌هایی از استان با توجه به جدول (۲) دارای مقادیر فراتر از استاندارد می‌باشند که نشان‌دهنده‌ی حجم زیاد ذرات معلق در جو استان می‌باشد.



شکل ۴. پراکندگی زمانی - مکانی میانگین ماهانه AOD ماه فوریه استان خوزستان (۲۰۱۹-۲۰۲۳)

پراکندگی زمانی - مکانی غلظت AOD در ماه مارس (۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳)

بررسی نقشه‌های مربوط به ماه مارس دوره مطالعاتی، ارائه شده در شکل (۵) نشان می‌دهد که سال ۲۰۲۱ بیشترین مقادیر آئروسول در این دوره در استان خوزستان ثبت شده است؛ و همچنین کمترین مقدار نیز در سال ۲۰۱۹ می‌باشد. براساس نقشه‌های آئروسول دریافتی از تصاویر ماهواره‌ای مودیس در تمامی نقشه‌های مربوط به ماه مارس، شهرهای صنعتی استان واقع در جنوب و غرب از نظر پارامتر عمق اپتیکی آئروسول دارای بیشترین مقادیر AOD می‌باشند. به‌نحوی که بیشترین مقادیر رخ داده با مقدار ۳ در مارس سال ۲۰۲۱ و در شهرهای قسمت‌های جنوبی منطقه مطالعاتی از قبیل شهرهای آبادان، خرمشهر، شادگان، بندر ماهشهر، هندیجان و هویزه بوده است. همچنین کمترین مقدار نیز با محدوده‌ی ۰ تا ۰٫۱۷، در مارس ۲۰۱۹ و به‌صورت پراکنده در بخش‌های مختلف استان ثبت شده است. شایان‌ذکر است که ماه مارس در تمامی دوره‌ی مورد مطالعه بخش‌هایی از استان با توجه به جدول (۲) دارای مقادیر فراتر از استاندارد می‌باشند که نشان‌دهنده‌ی حجم زیاد ذرات معلق در جو استان می‌باشد.

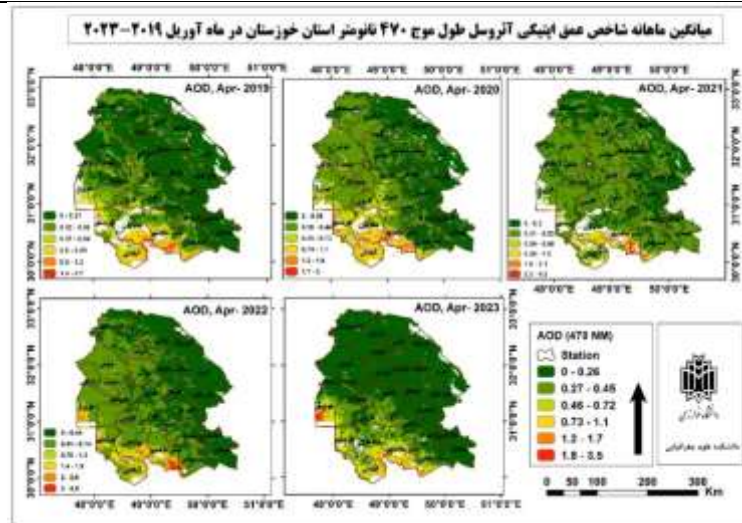


شکل ۵. پراکندگی زمانی - مکانی میانگین ماهانه AOD ماه مارس استان خوزستان (۲۰۱۹-۲۰۲۳)

پراکندگی زمانی - مکانی عمق اپتیکی آئروسول فصل بهار استان خوزستان در دوره مورد مطالعه (اکتبر ۲۰۱۸ - سپتامبر ۲۰۲۳)

پراکندگی زمانی - مکانی غلظت AOD در ماه آوریل (۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳)

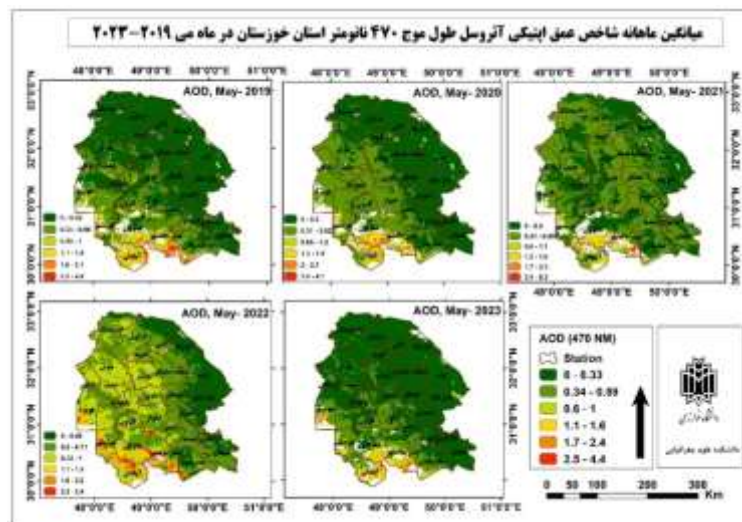
نقشه‌ها و نمودار عمق اپتیکی آئروسول اتمسفر استان خوزستان در فصل بهار در اشکال (۶ تا ۸) ارائه شده است که در ادامه به بررسی و تحلیل آن‌ها می‌پردازیم. بررسی نقشه‌های ماه آوریل استان خوزستان ارائه شده در شکل (۶) در دوره‌ی مطالعاتی نشان می‌دهد که حداکثر میزان آلاینده برابر با ۴٫۵ در محدوده‌ی بخش‌های جنوبی استان خوزستان می‌باشد. همچنین کمترین مقدار عمق اپتیکی آئروسول در ماه آوریل نیز با ۰ تا ۰٫۲۱ می‌باشد. براساس نقشه‌های آئروسول دریافتی از تصاویر ماهواره‌ای مودیس در تمامی نقشه‌های مربوط به ماه آوریل، شهرهای صنعتی استان واقع در غرب و جنوب استان از نظر پارامتر عمق اپتیکی آئروسول دارای بیشترین مقادیر AOD می‌باشند. به‌نحوی که بیشترین مقادیر رخ داده با مقدار ۴٫۵ در آوریل سال ۲۰۲۲ و در شهرهای قسمت‌های جنوبی منطقه از جمله شهرهای بندر ماهشهر، شادگان، آبادان خرمشهر و هویزه بوده است. همچنین کمترین مقدار نیز با محدوده‌ی ۰ تا ۰٫۲۱ در آوریل ۲۰۱۹ و به‌صورت پراکنده در بخش‌های مختلف استان ثبت شده است. شایان ذکر است که ماه آوریل در تمامی دوره‌ی مورد مطالعه بخش‌هایی از استان باتوجه به جدول (۲) دارای مقادیر فراتر از استاندارد می‌باشند که نشان‌دهنده‌ی وجود لایه‌ی آئروسول بسیار ضخیم و حجم زیاد ذرات معلق در جو استان می‌باشد. همچنین مقادیر آئروسول در فصل بهار نسبت به فصل زمستان افزایش را نشان می‌دهد.



شکل ۶. پراکندگی زمانی - مکانی میانگین ماهانه AOD ماه آوریل استان خوزستان (۲۰۲۳-۲۰۱۹)

پراکندگی زمانی - مکانی غلظت AOD در ماه می (۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳)

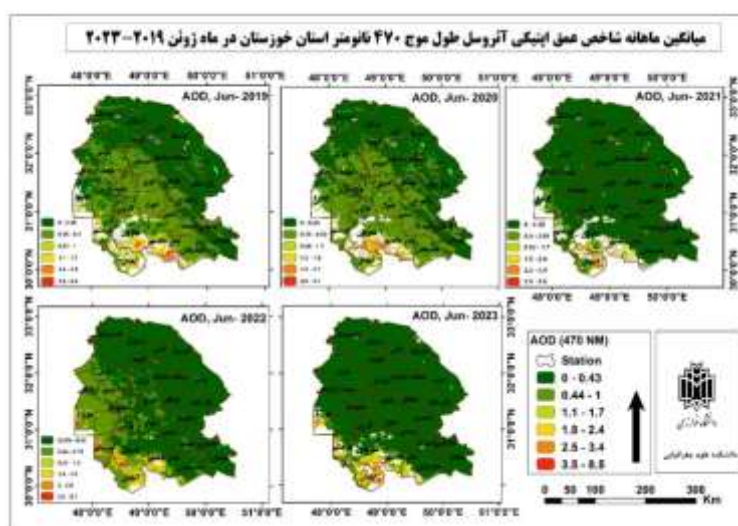
بررسی نقشه‌های مربوط به ماه می ارائه شده در شکل (۷) نشان می‌دهد که سال ۲۰۲۱ بیشترین مقادیر آئروسول در دوره‌ی مطالعاتی در استان خوزستان ثبت شده است؛ و همچنین کمترین مقدار نیز مربوط به سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۲۱ می‌باشد. براساس نقشه‌های آئروسول دریافتی از تصاویر ماهواره‌ای مودیس در تمامی نقشه‌های مربوط به ماه می در شکل (۷)، دوره‌ی مطالعاتی شهرهای جنوبی و غربی استان از نظر پارامتر عمق اپتیکی آئروسول دارای بیشترین مقادیر AOD می‌باشند. به‌نحوی که بیشترین مقادیر رخ داده با مقدار ۵٫۲ در می سال ۲۰۲۱ و در شهرهای قسمت‌های جنوبی منطقه مطالعاتی از قبیل آبادان، شادگان، بندر ماهشهر بوده است. همچنین کمترین مقدار نیز با محدوده‌ی ۰ تا ۰٫۳ در می ۲۰۲۰ و ۲۰۲۱ و به‌صورت پراکنده در بخش‌های مختلف استان ثبت شده است. شایان‌ذکر است که ماه می تمامی دوره‌ی مورد مطالعه بخش‌هایی از استان باتوجه به جدول (۲) دارای مقادیر فراتر از مقدار استاندارد می‌باشند که نشان‌دهنده‌ی حجم زیاد ذرات معلق در جو استان می‌باشد.



شکل ۷. پراکندگی زمانی - مکانی میانگین ماهانه AOD ماه می استان خوزستان (۲۰۲۳-۲۰۱۹)

پراکندگی زمانی - مکانی غلظت AOD در ماه ژوئن (۲۰۱۹ تا ۲۰۲۳)

بررسی نقشه‌های مربوط به ماه ژوئن دوره مطالعاتی، ارائه شده در شکل (۸) نشان می‌دهد که سال ۲۰۲۳ بیشترین مقادیر آئروسول در این دوره در استان خوزستان ثبت شده است. همچنین کمترین مقدار نیز در سال ۲۰۲۰ می‌باشد. براساس نقشه‌های آئروسول دریافتی از تصاویر ماهواره‌ای مودیس در تمامی نقشه‌های مربوط به ماه ژوئن، شهرهای صنعتی استان واقع در جنوب و غرب از نظر پارامتر عمق اپتیکی آئروسول دارای بیشترین مقادیر AOD می‌باشند. به‌نحوی که بیشترین مقادیر رخ داده با مقدار ۸٫۵ در ژوئن سال ۲۰۲۳ و در بخش‌های جنوبی منطقه مطالعاتی از قبیل شهرهای آبادان، خرمشهر، شادگان، بندر ماهشهر و هویزه بوده است. همچنین کمترین مقدار نیز با محدوده‌ی ۰ تا ۰٫۲۴ در ژوئن ۲۰۲۰ و به‌صورت پراکنده در بخش‌های مختلف استان ثبت شده است. شایان‌ذکر است که ماه ژوئن در تمامی دوره‌ی مورد مطالعه بخش‌هایی از استان با توجه به جدول (۲) دارای مقادیر فراتر از استاندارد می‌باشند که نشان‌دهنده‌ی حجم زیاد ذرات معلق در جو استان می‌باشد. که این حجم از آئروسول در جو استان، موجب آسیب به محیط‌زیست و تهدید سلامتی شهروندان می‌شود.



شکل ۸. پراکندگی زمانی - مکانی میانگین ماهانه AOD ماه ژوئن استان خوزستان (۲۰۱۹-۲۰۲۳)

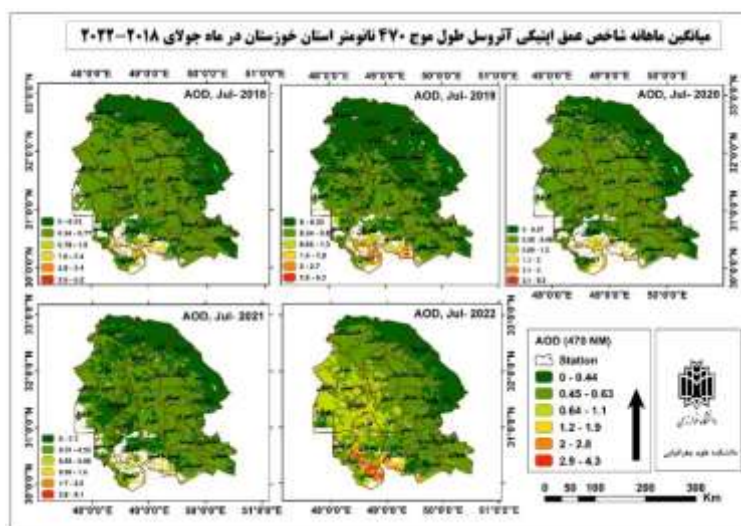
پراکندگی زمانی - مکانی عمق اپتیکی آئروسول فصل تابستان استان خوزستان در دوره مورد مطالعه (اکتبر ۲۰۱۸ - سپتامبر ۲۰۲۳)

نقشه‌ها و نمودار غلظت عمق اپتیکی آئروسول اتمسفر استان خوزستان در فصل تابستان در اشکال (۱۱ تا ۱۴) ارائه شده است که در ادامه به بررسی و تحلیل آن‌ها می‌پردازیم.

پراکندگی زمانی - مکانی غلظت AOD در ماه جولای (۲۰۱۸ تا ۲۰۲۲)

بررسی نقشه‌های مربوط به ماه جولای ارائه شده در شکل (۹) نشان می‌دهد که سال ۲۰۲۰، بیشترین مقادیر عمق اپتیکی آئروسول در دوره‌ی مطالعاتی در استان خوزستان به ثبت رسیده است؛ در حالی که کمترین مقدار مربوط به سال ۲۰۲۱ بوده است. براساس نقشه‌های استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای مودیس، در تمامی نقشه‌های ماه جولای طی دوره‌ی مطالعاتی، شهرهای جنوبی استان از نظر پارامتر عمق اپتیکی آئروسول دارای بیشترین مقادیر AOD بوده‌اند. به‌نحوی که بیشینه مقدار ثبت شده با عدد ۵٫۳ در جولای سال ۲۰۲۰ و در شهرهایی مانند آبادان، شادگان و بندر ماهشهر مشاهده شده است. از سوی دیگر، کمینه مقدار AOD با بازه‌ای بین ۰ تا ۰٫۳ در جولای ۲۰۲۱، به‌صورت پراکنده در نواحی

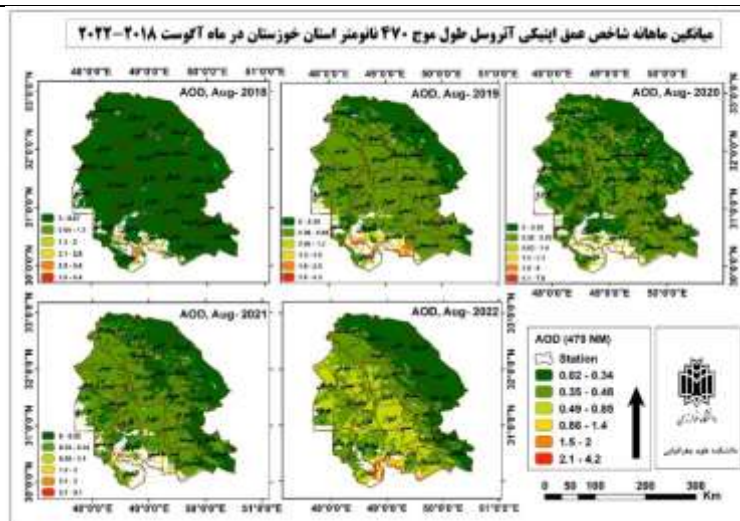
مختلف استان ثبت شده است. شایان ذکر است که براساس جدول (۲)، در ماه جولای طی دوره‌ی مطالعاتی، برخی از نواحی استان مقادیری بالاتر از سطح استاندارد داشته‌اند که این موضوع نشان‌دهنده‌ی حضور حجم بالای ذرات معلق در جو استان است. همان‌طور که در شکل (۹) نیز قابل مشاهده است، در تمامی نقشه‌های جولای طی دوره‌ی مطالعاتی، پهنه‌ی وسیعی از استان در بازه‌ی AOD کمتر از ۱ قرار دارد، در حالی که شهرهای جنوبی و صنعتی استان دارای مقادیری بیش از این مقدار بوده‌اند و در برخی مناطق، حداکثر مقادیر AOD بین ۴,۳ تا ۵,۳ ثبت شده است.



شکل ۹. پراکندگی زمانی - مکانی میانگین ماهانه AOD ماه جولای استان خوزستان (۲۰۱۸-۲۰۲۲)

پراکندگی زمانی - مکانی غلظت AOD در ماه آگوست (۲۰۱۸ تا ۲۰۲۲)

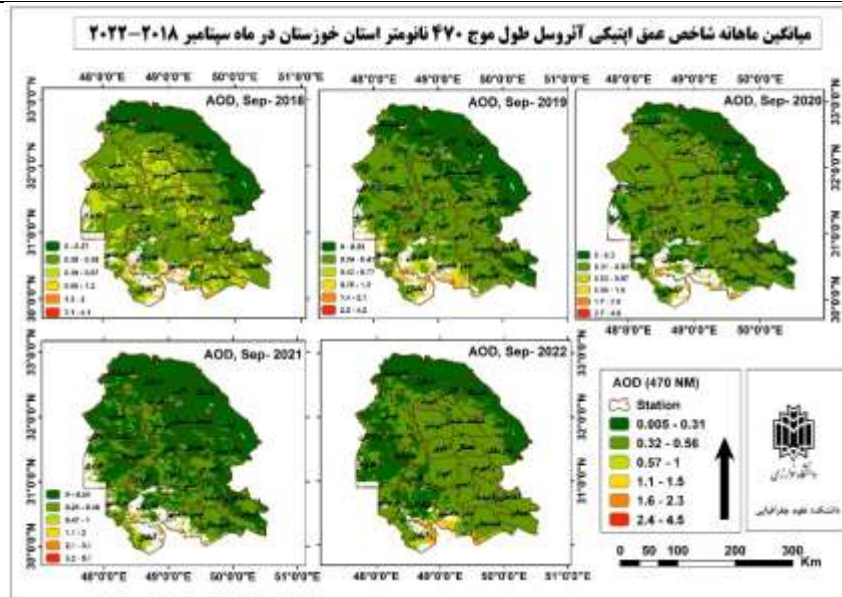
بررسی نقشه‌های مربوط به ماه آگوست ارائه شده در شکل (۱۰) نشان می‌دهد که سال ۲۰۲۰ بیشترین مقادیر آئروسول در دوره‌ی مطالعاتی در استان خوزستان ثبت شده است؛ و همچنین کمترین مقدار نیز مربوط به سال ۲۰۲۳ می‌باشد. براساس نقشه‌های آئروسول دریافتی از تصاویر ماهواره‌ای مودیس در تمامی نقشه‌های مربوط به ماه آگوست دوره‌ی مطالعاتی شهرهای جنوبی استان از نظر پارامتر عمق اپتیکی آئروسول دارای بیشترین مقادیر AOD می‌باشند. به‌نحوی که حداکثر مقادیر رخ داده با مقدار ۷,۹ در آگوست سال ۲۰۲۰ و در قسمت‌های جنوبی منطقه مطالعاتی از قبیل آبادان و خرمشهر، شادگان و بندر ماهشهر بوده است. همچنین حداقل مقدار نیز با محدوده‌ی ۰ تا ۰,۲۵ در آگوست ۲۰۲۰ و به‌صورت پراکنده در بخش‌های مختلف استان ثبت شده است. شایان ذکر است که ماه آگوست تمامی دوره‌ی مورد مطالعه بخش‌هایی از استان با توجه به جدول (۲) دارای مقادیر فراتر از مقدار استاندارد می‌باشند که نشان‌دهنده‌ی حجم زیاد ذرات معلق در جو استان می‌باشد. همان‌طور که نقشه‌های عمق اپتیکی آئروسول ثبت شده در اتمسفر استان خوزستان در دوره‌ی ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۲ نشان می‌دهند در تمامی دوره‌ی مطالعاتی پهنه‌ی وسیعی از استان را مقادیر کمتر از ۱ در بر گرفته است و شهرهای جنوبی استان خوزستان دارای بیشترین مقادیر ثبت شده‌ی عمق اپتیکی آئروسول در ماه آگوست دوره‌ی مورد نظر با حداکثر رخداد ۴,۲ تا ۷,۹ می‌باشند.



شکل ۱۰. پراکندگی زمانی - مکانی میانگین ماهانه AOD ماه آگوست استان خوزستان (۲۰۲۲-۲۰۱۸)

پراکندگی زمانی - مکانی غلظت AOD در ماه سپتامبر (۲۰۲۲ تا ۲۰۱۸)

بررسی نقشه‌های مربوط به ماه سپتامبر ارائه شده در شکل (۱۱) نشان می‌دهد که سال ۲۰۲۱ بیشترین مقادیر آئروسول در دوره‌ی مطالعاتی در استان خوزستان ثبت شده است؛ و همچنین کمترین مقدار نیز مربوط به سال ۲۰۱۹ می‌باشد. براساس نقشه‌های آئروسول دریافتی از تصاویر ماهواره‌ای مودیس در تمامی نقشه‌های مربوط به ماه سپتامبر دوره‌ی مطالعاتی شهرهای جنوبی استان از نظر پارامتر عمق اپتیکی آئروسول دارای بیشترین مقادیر AOD می‌باشند. به‌نحوی که بیشترین مقادیر رخ داده با مقدار ۵٫۱ در سپتامبر سال ۲۰۲۱ و در شهرهای جنوبی و غربی منطقه مطالعاتی از قبیل هویزه، آبادان، شادگان، بندر ماهشهر بوده است. همچنین کمترین مقدار نیز با محدوده‌ی ۰ تا ۲۳٫۰ در سپتامبر ۲۰۱۹ و به‌صورت پراکنده در بخش‌های مختلف استان ثبت شده است. شایان‌ذکر است که ماه سپتامبر تمامی دوره‌ی مورد مطالعه بخش‌هایی از استان باتوجه به جدول (۲) دارای مقادیر فراتر از مقدار استاندارد می‌باشند که نشان‌دهنده‌ی حجم زیاد ذرات معلق در جو استان می‌باشد. همان‌طور که در نقشه‌های ارائه شده در شکل (۱۱) آورده شده است در ماه سپتامبر دوره‌ی مطالعاتی پهنه‌ی وسیعی از استان خوزستان در محدوده‌ی AOD کمتر از ۱ می‌باشد و شهرهای جنوبی استان دارای مقادیری فراتر از آن با حداکثر رخداد ۴٫۱ تا ۵٫۱ می‌باشند.



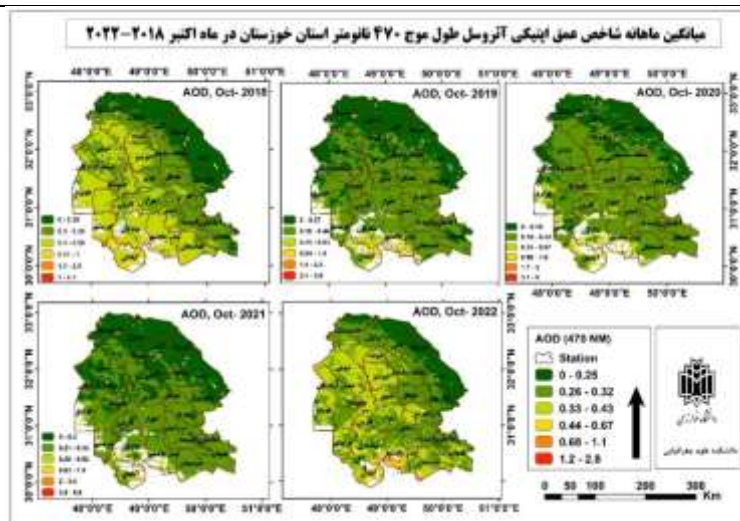
شکل ۱۱. پراکندگی زمانی - مکانی میانگین ماهانه AOD ماه سپتامبر استان خوزستان (۲۰۲۲-۲۰۱۸)
منبع: (نگارندگان، ۱۴۰۴)

پراکندگی زمانی - مکانی عمق اپتیکی آئروسول فصل پاییز استان خوزستان در دوره مورد مطالعه (اکتبر ۲۰۱۸ - سپتامبر ۲۰۲۳)

نقشه‌ها و نمودار میانگین ماهانه عمق اپتیکی آئروسول اتمسفر استان خوزستان در فصل پاییز در شکل (۱۲ تا ۱۴) ارائه شده است که در ادامه به بررسی و تحلیل آن‌ها می‌پردازیم.

پراکندگی زمانی - مکانی غلظت AOD در ماه اکتبر (۲۰۱۸ تا ۲۰۲۲)

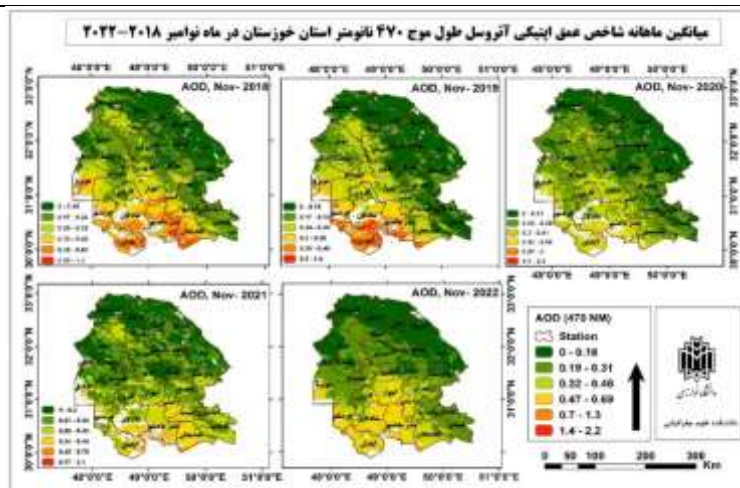
بررسی نقشه‌های مربوط به ماه اکتبر ارائه شده در شکل (۱۲) نشان می‌دهد که سال ۲۰۱۸ بیشترین مقادیر آئروسول در دوره‌ی مطالعاتی در استان خوزستان ثبت شده است؛ و همچنین کمترین مقدار نیز مربوط به سال ۲۰۲۰ می‌باشد. براساس نقشه‌های آئروسول دریافتی از تصاویر ماهواره‌ای مودیس در تمامی نقشه‌های مربوط به ماه اکتبر دوره‌ی مطالعاتی شهرهای جنوبی استان از نظر پارامتر عمق اپتیکی آئروسول دارای بیشترین مقادیر AOD می‌باشند. به‌نحوی که حداکثر مقادیر رخ داده با مقدار ۶٫۳ در اکتبر سال ۲۰۱۸ و در قسمت‌های جنوبی و غربی منطقه مطالعاتی از جمله شهرهای آبادان و خرمشهر، شادگان، بندر ماهشهر و هویزه بوده است. همچنین حداقل مقدار نیز با محدوده‌ی ۰ تا ۰٫۱۸ در اکتبر ۲۰۲۰ و به‌صورت پراکنده در بخش‌های مختلف استان ثبت شده است. شایان‌ذکر است که ماه اکتبر تمامی دوره‌ی مورد مطالعه بخش‌هایی از استان با توجه به جدول (۲) دارای مقادیر فراتر از مقدار استاندارد می‌باشند که نشان‌دهنده‌ی حجم زیاد ذرات معلق در جو استان می‌باشد. همان‌طور که نقشه‌های عمق اپتیکی آئروسول ثبت شده در اتمسفر استان خوزستان در دوره‌ی ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۲ نشان می‌دهند در تمامی دوره‌ی مطالعاتی پهنه‌ی وسیعی از استان را مقادیر کمتر از ۱ در بر گرفته است و شهرهای صنعتی استان خوزستان دارای بیشترین مقادیر ثبت‌شده‌ی عمق اپتیکی آئروسول در ماه اکتبر دوره‌ی مورد نظر با حداکثر رخداد ۲٫۸ تا ۳٫۶ می‌باشند.



شکل ۱۲. پراکندگی زمانی - مکانی میانگین ماهانه AOD ماه اکتبر استان خوزستان (۲۰۲۲-۲۰۱۸)
منبع: (نگارندگان، ۱۴۰۴)

پراکندگی زمانی - مکانی غلظت AOD در ماه نوامبر (۲۰۲۲ تا ۲۰۱۸)

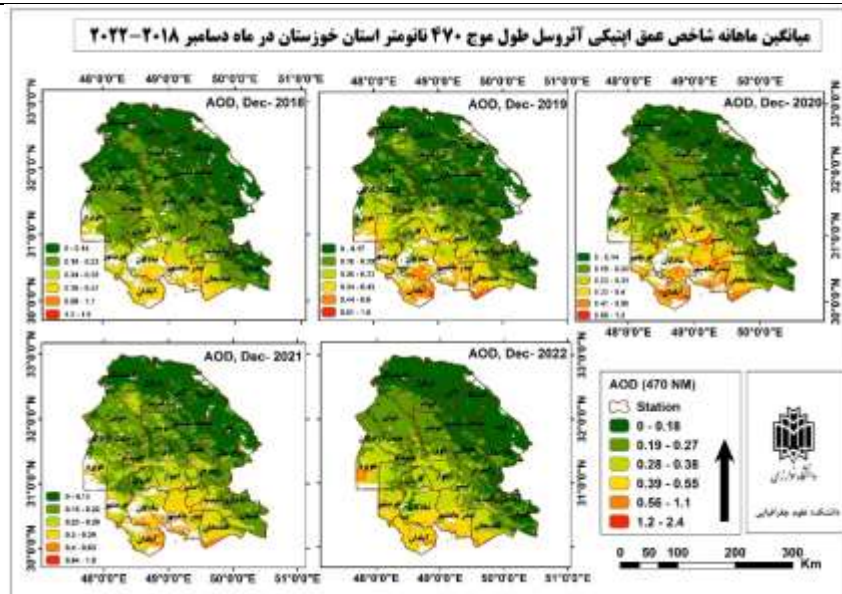
بررسی نقشه‌های مربوط به ماه نوامبر ارائه شده در شکل (۱۳) نشان می‌دهد که سال ۲۰۲۰ بیشترین مقادیر آئروسول در دوره‌ی مطالعاتی در استان خوزستان ثبت شده است؛ و همچنین کمترین مقدار نیز مربوط به سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۱۸ می‌باشد. براساس نقشه‌های آئروسول دریافتی از تصاویر ماهواره‌ای مودیس در تمامی تصاویر مربوط به ماه نوامبر دوره‌ی مطالعاتی شهرهای جنوبی استان از نظر پارامتر عمق اپتیکی آئروسول دارای بیشترین مقادیر AOD می‌باشند. به‌نحوی که بیشترین مقادیر رخ داده با مقدار ۳,۴ در نوامبر سال ۲۰۲۰ و در شهرهای جنوبی و غربی منطقه مطالعاتی از قبیل هویزه، آبادان و خرمشهر، شادگان، بندر ماهشهر و هندیجان بوده است. همچنین کمترین مقدار نیز با محدوده‌ی ۰ تا ۰,۱۶ در نوامبر سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۱۹ به‌صورت پراکنده در بخش‌های مختلف استان ثبت شده است. شایان‌ذکر است که ماه نوامبر تمامی دوره‌ی مورد مطالعه بخش‌هایی از استان باتوجه به جدول (۲) دارای مقادیر فراتر از مقدار استاندارد می‌باشند که نشان‌دهنده‌ی وجود لایه‌ی ضخیم آئروسول و حجم زیاد ذرات معلق در جو استان می‌باشد. همان‌طور که در نقشه‌های ارائه شده در شکل (۱۳) آورده شده است در ماه نوامبر دوره‌ی مطالعاتی پهنه‌ی وسیعی از استان خوزستان در محدوده‌ی AOD کمتر از ۱ می‌باشد و شهرهای جنوبی و صنعتی استان دارای مقادیری فراتر از آن با حداکثر رخداد ۱,۲ تا ۳,۴ می‌باشند.



شکل ۱۳. پراکنندگی زمانی - مکانی میانگین ماهانه AOD ماه نوامبر استان خوزستان (۲۰۲۲-۲۰۱۸)
منبع: (نگارندگان، ۱۴۰۴)

پراکنندگی زمانی - مکانی غلظت AOD در ماه دسامبر (۲۰۲۲ تا ۲۰۱۸)

بررسی نقشه‌های مربوط به ماه دسامبر ارائه شده در شکل (۱۴) نشان می‌دهد که سال ۲۰۲۲ بیشترین مقادیر آتروسول در دوره‌ی مطالعاتی در استان خوزستان ثبت شده است؛ و همچنین کمترین مقدار نیز مربوط به سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۲۰ می‌باشد. براساس نقشه‌های آتروسول استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای مودیس، در تمامی نقشه‌های مربوط به ماه دسامبر طی دوره‌ی مطالعاتی، شهرهای جنوبی استان خوزستان از نظر پارامتر عمق اپتیکی آتروسول (AOD) دارای بیشترین مقادیر بوده‌اند. به نحوی که بیشینه مقدار AOD در دسامبر سال ۲۰۲۲ با عدد ۲,۴ در شهرهای جنوبی و غربی منطقه‌ی مطالعاتی از جمله هویزه، آبادان، خرمشهر، شادگان، بندر ماهشهر و هندیجان مشاهده شده است. در مقابل، کمینه مقدار AOD در محدوده‌ی ۰ تا ۰,۱۴ مربوط به دسامبر سال‌های ۲۰۱۸ و ۲۰۲۰ و به صورت پراکنده در بخش‌های مختلف استان به ثبت رسیده است. شایان ذکر است که طبق جدول (۲)، در تمامی دسامبرهای دوره‌ی مورد مطالعه، بخش‌هایی از استان دارای مقادیری بالاتر از حد استاندارد بوده‌اند، که این امر بیانگر حجم بالای ذرات معلق در جو استان در این ماه است. همان‌طور که در نقشه‌های ارائه شده در شکل (۱۴) مشاهده می‌شود، در تمامی ماه‌های دسامبر دوره‌ی مطالعاتی، بخش وسیعی از استان خوزستان در محدوده‌ی AOD کمتر از ۱ قرار داشته، در حالی که مناطق جنوبی استان دارای مقادیر بالاتری بوده‌اند که در برخی مناطق، حداکثر مقادیر بین ۱,۲ تا ۲,۴ به ثبت رسیده‌اند.

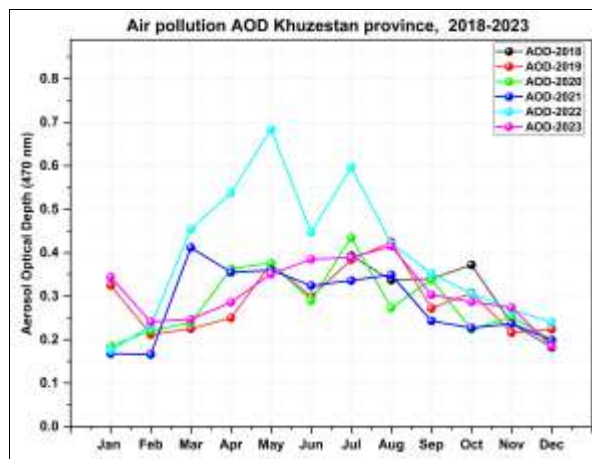


شکل ۱۴. پراکنندگی زمانی - مکانی میانگین ماهانه AOD ماه دسامبر استان خوزستان (۲۰۲۲-۲۰۱۸)
منبع: (نگارندگان، ۱۴۰۴)

تحلیل تغییرات عمق اپتیکی آئروسول (AOD) در استان خوزستان طی دوره‌ی ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳

نمودار میانگین ماهانه تغییرات عمق اپتیکی آئروسول در استان خوزستان طی دوره‌ی ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳ در شکل (۱۵) ارائه شده است. دامنه‌ی تغییرات AOD در کل دوره بین ۰٫۱۷ تا ۰٫۶۸ متغیر بوده که بیانگر نوسانات قابل توجه در سطح آئروسول‌های جوّی استان است. میانگین کلی برابر ۰٫۳۱، به دست آمده است که نشان دهنده‌ی سطح بالای بار آئروسول در جو خوزستان می‌باشد. بیشترین مقدار میانگین ماهانه AOD در ماه می سال ۲۰۲۲ (۰٫۶۸) و کمترین مقدار در سال ۲۰۲۱ (۰٫۱۶۸) ثبت شده است. در مجموع، روند کلی تغییرات طی سال‌های مطالعه، صعودی و افزایشی بوده است. نمودار تغییرات عمق اپتیکی آئروسول در فصل زمستان در شکل (۱۵) نشان داده شده است. بر اساس نتایج، در ماه ژانویه نوساناتی در مقادیر AOD مشاهده می‌شود، به طوری که در سال‌های ۲۰۲۰ تا ۲۰۲۲ مقادیر کمتری نسبت به سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۳ ثبت گردیده است. حداقل مقدار AOD در این ماه ۰٫۱۶۸ در سال ۲۰۲۱ و حداکثر آن ۰٫۳۴۴ در سال ۲۰۲۳ بوده است. در ماه فوریه نیز روندی تقریباً یکنواخت با افزایش تدریجی در بازه‌ی ۰٫۱۶ تا ۰٫۲۴ مشاهده می‌شود؛ به طوری که سال ۲۰۲۱ کمترین و سال ۲۰۲۳ بیشترین مقدار را داشته است. در مجموع، روند کلی فصل زمستان طی دوره‌ی مطالعه صعودی بوده و نقشه‌های مربوط به ماه‌های ژانویه، فوریه و مارس نیز این روند افزایشی را تأیید می‌کنند. نمودار تغییرات AOD در فصل بهار در شکل (۱۵) ارائه شده است. در ماه آوریل کمترین مقدار میانگین ماهانه ۰٫۲۵ در سال ۲۰۱۹ و بیشترین مقدار ۰٫۵۴ در سال ۲۰۲۲ بوده است. در ماه می، مقادیر آئروسول در اکثر سال‌ها تقریباً یکنواخت (حدود ۰٫۳۷) بوده، اما در سال ۲۰۲۲ جهشی قابل توجه تا ۰٫۶۸ داشته است که بیشترین مقدار در کل فصل بهار محسوب می‌شود. در ماه ژوئن نیز حداقل مقدار ۰٫۲۹ در سال ۲۰۲۰ و حداکثر ۰٫۴۵ در سال ۲۰۲۲ ثبت شده است. روند کلی تغییرات در فصل بهار یکنواخت و افزایشی است و سال ۲۰۲۲ در تمام ماه‌های فصل به عنوان اوج فعالیت آئروسول‌ها شناخته می‌شود. در فصل تابستان شکل (۱۵)، ماه جولای کمترین مقدار AOD را در سال ۲۰۲۱ (۰٫۳۴) و بیشترین را در سال ۲۰۲۲ (۰٫۶) داشته است که بالاترین مقدار در کل فصل نیز می‌باشد. در ماه آگوست، کمترین مقدار در سال ۲۰۲۰ (۰٫۲۷) و بیشترین در سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۲ (۰٫۴۲) ثبت شده است. در ماه سپتامبر، نوسانات محدودی در بازه‌ی ۰٫۲۴ تا ۰٫۳۵ دیده می‌شود؛ به گونه‌ای که کمترین مقدار در سال ۲۰۲۱ و بیشترین در ۲۰۲۲ رخ داده است. روند کلی فصل

تابستان نیز مشابه بهار، صعودی و افزایشی است و بیشترین فعالیت آئروسول‌ها در سال ۲۰۲۲ مشاهده شده است. نمودار تغییرات میانگین ماهانه AOD در فصل پاییز شکل (۱۵) نشان می‌دهد که در ماه اکتبر کمترین مقدار ۰,۲۲ در سال ۲۰۲۰ و بیشترین مقدار ۰,۳۷ در سال ۲۰۱۸ ثبت شده است که بیشترین میزان در کل فصل نیز می‌باشد. در ماه نوامبر روندی یکنواخت و افزایشی مشاهده می‌شود؛ به طوری که سال ۲۰۱۹ کمترین (۰,۲۲) و سال ۲۰۲۲ بیشترین مقدار (۰,۲۷) را دارد. در ماه دسامبر نیز مقدار AOD در بازه‌ی ۰,۱۸ تا ۰,۲۴ نوسان داشته است؛ کمترین در سال ۲۰۱۸ و بیشترین در سال ۲۰۲۲. به صورت کلی، روند تغییرات AOD در فصل پاییز طی همه‌ی سال‌ها صعودی و افزایشی بوده است که با نقشه‌های تحلیلی ماه‌های اکتبر، نوامبر و دسامبر نیز مطابقت دارد. به صورت کلی بررسی روندهای فصلی نشان می‌دهد که بیشترین مقادیر عمق اپتیکی آئروسول در فصول گرم (بهار و تابستان) و کمترین آن در فصول سرد (پاییز و زمستان) رخ داده است. این موضوع بیانگر تأثیر مستقیم شرایط اقلیمی و گرمایش فصلی بر افزایش تراکم آئروسول‌ها در جو استان خوزستان است. در مجموع، طی دوره‌ی ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳ روند کلی AOD در استان صعودی و افزایشی بوده و سال ۲۰۲۲ آلوده‌ترین سال با میانگین سالانه‌ی ۰,۳۹ شناخته می‌شود، در حالی که سال‌های ۲۰۲۰ و ۲۰۲۱ کمترین میزان آلودگی را با میانگین ۰,۲۸ داشته‌اند.



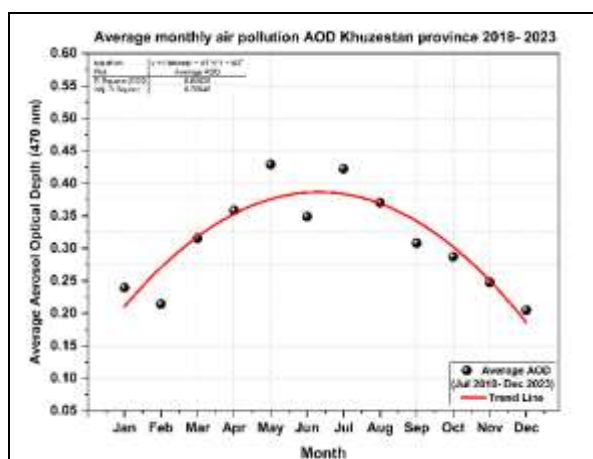
شکل ۱۵. نمودار روند میانگین ماهانه غلظت AOD به تفکیک هر سال در دوره مورد مطالعه استان خوزستان
منبع: (نگارندگان، ۱۴۰۴)

تحلیل غلظت AOD با استفاده از رگرسیون غیرخطی چندجمله‌ای در دوره‌ی جولای ۲۰۱۸ تا ژوئن ۲۰۲۳

نمودار میانگین ماهانه تغییرات عمق اپتیکی آئروسول دوره‌ی مطالعاتی (جولای ۲۰۱۸ تا جولای ۲۰۲۳) استان خوزستان در شکل (۱۶) ارائه شده است. همان‌طور که نمودار نشان می‌دهد ماه‌های فوریه و دسامبر کمترین میزان آئروسول و ماه‌های می و جولای بیشترین مقادیر میانگین ماهانه آئروسول را در دوره‌ی مطالعاتی داشته‌اند. AOD در دوره گرم سال رو به افزایش و در فصل زمستان حداقل میزان آن را شاهد هستیم. غلبه‌ی ذرات معلق در دوره گرم سال به دلیل افزایش پدیده گردوغبار در این فصل می‌باشد که به علت رخداد شرایط توفان‌های گردوغباری و شرایط خشکی در این فصل مهم‌ترین عامل افزایش میزان آئروسول در این بازه زمانی می‌باشد (ساموئل آبراهام برهان و همکاران^۱ ۲۰۲۴).

در ادامه‌ی پژوهش به منظور مدل‌سازی رابطه بین میانگین ماهانه عمق اپتیکی آئروسول در ماه‌های مختلف سال از مدل رگرسیون غیرخطی درجه دوم استفاده شد که تغییرات و روند آئروسول را به خوبی مدل‌سازی و نشان داد؛ نتایج آن در

شکل (۱۶) ارائه شده است علت انتخاب این مدل نیز عملکرد مناسب آن نسبت به سایر مدل‌های رگرسیون برای داده‌های مورد بررسی بوده است. خط روند در مدل به صورت منحنی U وارونه می‌باشد به گونه‌ای که در طول سال در ماه‌های گرم غلظت AOD روندی افزایشی و با حرکت به سمت فصول سرد روندی کاهشی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۱۶) مشاهده می‌شود خط روند بیانگر تغییرات کلی و الگوی غالب آئروسول می‌باشد. با توجه به میزان ضریب تعیین آن ($R^2=0.82$) می‌توان نتیجه گرفت که مدل رگرسیون غیرخطی ۸۲٪ از تغییرات داده‌ها را پوشش می‌دهد که بیانگر تطابق مناسب مدل بوده و از دقت و برازش مناسبی برخوردار می‌باشد. همچنین ضریب تعیین تعدیل‌شده‌ی مدل نیز برابر با ۰,۷۸ می‌باشد که حاکی از دقت بالا و عملکرد مناسب مدل می‌باشد. از این رو در می‌یابیم که تغییرات میانگین ماهانه عمق اپتیکی آئروسول در دوره‌ی مطالعاتی در استان خوزستان دارای روند فصلی می‌باشد. این پارامتر دارای تغییرات و چرخه‌های فصلی می‌باشد که روند افزایشی آن در فصل بهار آغاز و در ماه‌های ژوئن، آگوست، می و جولای به اوج خود می‌رسد و با ورود به دوره‌ی سرد و در فصل پاییز و ماه‌های پایانی سال شاهد کاهش میزان آن در اتمسفر استان خوزستان می‌باشیم. قابل ذکر است که نتایج دریافتی با تحقیقات جینگ لی و همکاران^۱ ۲۰۱۵، لاریسا سوگاجوا و همکاران^۲ ۲۰۱۸، یوستی وانگ و همکاران^۳ ۲۰۱۱ و برهان و همکاران^۴ ۲۰۲۴ همخوانی و مطابقت دارد.



شکل (۱۶). نمودار کلی میانگین ماهانه غلظت AOD تروپوسفری در دوره مورد مطالعه استان خوزستان
منبع: (نگارندگان، ۱۴۰۴)

نتیجه گیری

آئروسول‌ها از مهم‌ترین ذرات معلق در جو هستند که تأثیرات گوناگونی بر اقلیم، شرایط جوی، کیفیت هوا و سلامت عمومی در مناطق مختلف جهان دارند. استان خوزستان به دلیل موقعیت جغرافیایی خاص خود و تأثیرپذیری از عوامل طبیعی و انسانی، نظیر مجاورت با مناطق خشک و بایر کشورهای همسایه، خشک شدن پهنه‌های آبی و تالاب‌ها، تداوم خشک‌سالی‌ها، وقوع پدیده‌های گردوغبار و... به شدت در معرض منابع مختلف تولید آئروسول‌ها قرار دارد. این منابع شامل گردوغبار، آلاینده‌های صنعتی، دود ناشی از آتش‌سوزی‌ها هستند که نقش قابل توجهی در تغییرات اقلیمی، کاهش کیفیت هوا و تهدید سلامت عمومی ایفا می‌کنند.

^۱ Jing Li et al

^۲ Larisa Sogacheva et al

^۳ Yuesi Wang et al

در این پژوهش با بهره‌گیری از داده‌ها و تصاویر ماهواره‌ای MODIS، تغییرات عمق اپتیکی آتروسول (AOD) در استان خوزستان طی سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳ مورد بررسی و واکاوی قرار گرفت. یافته‌های این تحقیق نشان دادند که تغییرات AOD در این استان، روندی افزایشی در فصول گرم و روند کاهشی در فصول سرد سال را دنبال می‌کند. بیشترین مقادیر AOD در ماه‌های می و جولای و کمترین مقادیر در ماه‌های دسامبر، ژانویه و فوریه مشاهده شد. این الگو عمدتاً تحت تأثیر وقوع توفان‌های گردوغبار و شرایط خشکی شدید در فصول گرم سال است. در این میان، سال ۲۰۲۲ دارای بیشترین مقدار AOD (حدود ۰.۸ در ماه می)، آلوده‌ترین سال دوره‌ی مورد بررسی بود. در حالی که سال ۲۰۲۱ با ثبت کمترین مقدار AOD به‌عنوان پاک‌ترین سال این دوره محسوب می‌شود.

به‌طور کلی، AOD در استان خوزستان از یک روند فصلی منظم پیروی می‌کند؛ به‌گونه‌ای که بیشترین مقادیر در بهار و تابستان و کمترین مقادیر در فصل زمستان مشاهده می‌شود. این روند نشان‌دهنده‌ی تأثیر مستقیم شرایط اقلیمی نظیر گرما، خشکی و گردوغبار بر شدت حضور آتروسول‌ها در جو استان است. همچنین روند تغییرات غلظت آلاینده AOD در بازه زمانی مطالعاتی دارای روندی افزایشی و صعودی می‌باشد که بیانگر افزایش آن در جو استان خوزستان در دوره‌ی مطالعاتی خصوصاً در شهرهای جنوبی استان می‌باشد.

در این پژوهش، مدل رگرسیون خطی درجه دوم برای تحلیل تغییرات AOD مورد استفاده قرار گرفت. این مدل با ضریب تعیین ۰.۸۲، توانست روند کلی و تغییرات فصلی AOD را با دقت مناسبی شبیه‌سازی کند. این موضوع نشان‌دهنده‌ی کارایی بالای مدل در تطابق مناسب با داده‌ها و دقت بالا در تحلیل و پیش‌بینی تغییرات آتروسول‌ها در استان می‌باشد.

همچنین مقایسه‌ی نتایج این پژوهش با مطالعات پیشین حاکی از هم‌راستایی تغییرات AOD در استان خوزستان با روندهای جهانی بوده و با یافته‌های سایر محققین از جمله جینگ لی و همکاران^۱، لاریسا سواگاچوا و همکاران^۲ ۲۰۱۸، یوستی وانگ و همکاران^۳ ۲۰۱۳ و ساموئل آبراهام برهان و همکاران^۴ ۲۰۲۴ مطابقت و همخوانی دارد. در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تغییرات AOD در استان خوزستان به‌شدت تحت تأثیر شرایط جوی و اقلیمی منطقه قرار دارد و می‌توان از آن به‌عنوان شاخصی مؤثر برای پایش تغییرات اقلیمی، ارزیابی کیفیت هوا و پیش‌بینی وضعیت سلامت عمومی در این منطقه بهره گرفت.

در جمع‌بندی می‌توان عنوان کرد که اگر چه تمامی نواحی استان خوزستان از نظر پراکندگی آتروسول‌ها تحت تأثیر قرار دارند، اما شهرهای جنوبی نظیر آبادان، خرمشهر، بندر ماهشهر، هندیجان و سایر مناطق مجاور، بیشترین میزان تأثیرپذیری را از تمرکز بالای آتروسول‌ها در جو منطقه نشان می‌دهند. این مسئله احتمالاً به دلیل همجواری این نواحی با مناطق خشک، کاهش پوشش گیاهی و خشکی تالاب‌ها بوده و می‌تواند بیانگر حساسیت بیشتر این مناطق نسبت به پدیده‌های جوی مرتبط با ذرات معلق باشد. بر همین اساس، لزوم اتخاذ سیاست‌گذاری‌های زیست‌محیطی هدفمند و ویژه در این نواحی بیش‌ازپیش احساس می‌شود.

^۱ Jing Li et al

^۲ Larisa Sogacheva et al

^۳ Yuesi Wang et al

حامی مالی

این پژوهش در چارچوب فرصت مطالعاتی داخلی نویسنده اول در دانشگاه شهید چمران اهواز و با پشتیبانی مالی سازمان امور دانشجویان انجام شده است.

سهام نویسندگان

سهام نویسندگان برابر است.

تضاد منافع

نویسندگان اعلام می دارند، هیچ تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله از همه افرادی که در تهیه و انتشار این پژوهش همکاری داشته‌اند، سپاسگزاری می‌کنند.

منابع

- (۱) احمدی، محمود؛ داداشی رودباری، عباسعلی و جعفری، مهناز (۱۳۹۸). تأثیر ارتفاع لایه مرزی در توفان‌های گردوغبار جنوب غرب ایران (مطالعه موردی ۲۱ تا ۲۴ فوریه ۲۰۱۶). *مخاطرات محیط طبیعی*، ۸(۱۹)، ۱۷۴-۱۵۱.
<https://doi.org/10.22111/jneh.2018.21354.1294>
- (۲) انتظاری، علیرضا و سروستان، رسول. (۱۳۹۶). بررسی گردوغبار و پیش‌بینی آن در شهرهای استان خوزستان با استفاده از مدل‌های سری زمانی. *مطالعات علوم محیط‌زیست*، ۲(۴)، ۵۴۵-۵۳۵.
- (۳) بساک، عاطفه، اعرابی مقدم، حوریه، حجازی زاده، زهرا و طولانی نژاد، میثم. (۱۳۹۷). اثرات پروژه‌های انتقال آب سرشاخه‌های کارون در ایجاد یا تشدید کانون‌های گردوغبار خوزستان با بهره‌گیری از فناوری‌های GIS & RS. *جغرافیا*، ۱۶(۵۶)، ۲۱-۲۱.
<https://sid.ir/paper/404248/fa>
- (۴) بساک، عاطفه؛ حجازی زاده، زهرا؛ حیدری تاشه کبود، اکبر (۱۴۰۲). واکاوی سری زمانی آلاینده جوی PM10 در شهر جهانی شوشتر با استفاده از روش‌های آماری (۲۰۱۴-۲۰۲۳). *دومین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس بین‌المللی روز آینده، شهر آینده، تهران*.
- (۵) پناهی علی. بررسی ارتباط بین آلاینده‌های شاخص کیفیت هوا و پارامترهای هواشناسی در اینورژن‌های شدید شهر تبریز. *فضای جغرافیایی*. ۱۳۹۷؛ ۱۸ (۶۲): ۷۶-۶۳
- (۶) پوراحمد، مهدی؛ کریمپور، مصطفی و نصیری، بهروز. (۱۴۰۲). تغییرات عمق اپتیکی گردوغبار در ارتباط با تغییرات کاربری اراضی در زاگرس مرکزی. *جغرافیا و برنامه‌ریزی*، ۲۷(۸۵)، ۲۵-۱۳.
<https://doi.org/10.22034/gp.2022.51303.2994>
- (۷) تمسکی، احسان؛ تمسکی، عرفان و اسدی می‌آبادی، احمد. (۱۴۰۱). تحلیل، ره‌گیری و شبیه‌سازی مسیر گردوغبار فرین غرب ایران (مطالعه موردی: ایستگاه سینوپتیک کرمانشاه). *مدیریت جامع حوزه‌های آبخیز*، ۲(۱)، ۴۷-۳۳.
<https://doi.org/10.22034/iwm.2022.545938.1023>
- (۸) حجازی زاده، زهرا و پژوه، فرشاد. (۱۴۰۱). واکاوی رابطه الگوهای همدید با میزان ذرات معلق آلاینده فراگیر در استان تهران. *جغرافیا (نشریه انجمن جغرافیایی ایران)*، ۱۵(۵۳)، ۳۶-۲۱.
- (۹) رنجبر، محسن و ماهک، بتول. (۱۳۹۸). تغییرات زمانی و مکانی آلاینده‌های هوا با استفاده از GIS (مورد مطالعه: نیمه شمالی شهر تهران). *جغرافیا (نشریه انجمن جغرافیایی ایران)*، ۱۷(۶۰)، ۷۲-۸۵.
- (۱۰) رنگزن، کاظم؛ زراسوندی، علیرضا؛ کابلی زاده، مصطفی؛ محمدی، شاهین و میاحی، جاسم. (۱۴۰۱). ارزیابی مکانی و زمانی غلظت PM2.5 در استان خوزستان و بررسی عوامل مؤثر بر آن. *فصلنامه علوم محیطی*، ۲۰(۲)، ۲۲۲-۱۹۹.
<https://doi.org/10.52547/envs.2022.33613>

- ۱۱) صنیعی، راحله، زنگی آبادی، علی و شریفی کیا، محمد. (۱۳۹۶). تحلیل روند روزانه آلاینده های هوای کلانشهر تهران. جغرافیا (نشریه انجمن جغرافیایی ایران)، ۱۵(۵۴)، ۲۲۸-۲۱۷.
- ۱۲) طائی سمیرمی، مرادی، حمیدرضا؛ خداقلی، مرتضی و احمدی آخوومه، مریم (۱۳۹۲). شناخت و بررسی عوامل مؤثر بر پدیده گردوغبار در غرب ایران. فصلنامه انسان و محیط زیست، ۳۷: زمستان ۱۳۹۲.
- ۱۳) فاریابی، آذر؛ متین فر، حمیدرضا؛ علوی پناه، سید کاظم و نوروزی، علی اکبر. (۱۳۹۸). شناسایی گردوغبار در نواحی غرب و جنوب غرب ایران بر مبنای الگوریتم سنجه DAI و داده های طیفی سنجنده مودیس. فصلنامه علوم محیطی، ۱۷(۳)، ۱۵۱-۱۶۲.

<https://doi.org/10.29252/envs.17.3.151>

- ۱۴) لشکری، حسن و محمدی، زینب (۱۴۰۱). مقایسه و تحلیل پراکنش زمانی و مکانی طوفان های گردوخاک با دید کمتر از ۲۰۰ متر در غرب و جنوب غرب ایران. تحلیل فضایی مخاطرات محیطی. ۱۴۰۱؛ ۹(۱): ۱۵۰-۱۲۹.

<http://dor.org/20.1001.1.24237892.1401.9.1.8.4>

- ۱۵) مرکز آمار ایران. (۱۳۹۵). نتایج سرشماری عمومی نفوس و مسکن ۱۳۹۵. بازیابی شده در ۱۵ مهر ۱۴۰۴، <https://amar.org.ir/population-and-housing-census#21620>

- 16) Ahmadi, M., Dadashirodbari, A. & Jafari, M. (2019). The effect of boundary layer height height on dust storm in southwest of iran (case study: february 21-24, 2016). Journal of Natural Environmental Hazards, 8(19), 151-174. [persian]
- 17) Entezari, A. & Sarvestan, R. (2018). Dust and its prediction in cities of Khuzestan province using time series models. Journal of Environmental Science Studies, 2(4), 535-545. [persian]
- 18) Basak, A., Arabi Moghadam, H., Hejazizadeh, Z. & Toolabinejad, M. (2018). The effects of water transfer projects of Karun tributaries in creating or intensifying dust centers in Khuzestan using Gis & Rs technologies. Geography, 16(56), 20-35. [persian]
- 19) Basak, A., Hejazizadeh, Z. & Heydari Tasheh Kabood, A. (2023). Time- series analysis of the atmospheric pollutant PM10 in the World- Heritage city of Shushtar using statistical methods (2014–2023). In Proceedings of the 2nd National & 1st International Conference on Future Day, Future City: Focus on Sustainable Smart Cities . Tehran, Iran. [persian] <https://civilica.com/doc/2061324>
- 20) Maleki, A., Ghobadi, P., Kahforoushan, D., Sarbazan, M. H. & Mansouri, H. (2022). Analysis of the spatial distribution of air pollutants in center of the city of Tabriz (District 8) and its relation with man-made environment. Journal of Urban Sustainable Development, 3(6), 69-83. [persian] <https://doi.org/10.22034/usd.2022.696894>
- 21) Pourahmad, M., Karampour, M. & Nasiri, B. (2023). Optical depth changes of dust in connection with land use changes in Central Zagros. Journal of Geography and Planning, 27(85), 13-25. <https://doi.org/10.22034/gp.2022.51303.2994>
- 22) Tamassoki, E., Tamassoki, E. & Asadi Meyabadi, A. (2022). Climatic analysis, routing and simulation of extreme dust storms in the west of Iran (Case study: Kermanshah Synoptic station). Integrated Watershed Management, 2(1), 33-47. [persian] <https://dx.doi.org/10.22034/iwm.2022.545938.1023>
- 23) Hejazizadeh, Z. & Pagooh, F. (2022). Analyzing the relationship between synoptic patterns and the amount of pervasive pollutant suspended particles in Tehran province. Geography, 15(53), 21-36. [persian]
- 24) Ranjbar, M. & Mahak, B. (2019). Temporal and spatial changes of air pollutants using GIS (Case study: Northern half of Tehran). Geography, 17(60), 72-85. [persian]
- 25) Rangzan, K., Zarasvandi, A., Kabolizadeh, M., Mohammadi, S. & Mayahi, J. (2022). Spatiotemporal evaluation of PM2. 5 concentration in Khuzestan province and examining the factors affecting it. Advanced Environmental Sciences, 20(2), 199-222. [persian] <https://doi.org/10.52547/envs.2022.33613>
- 26) Saniee, R., Zangiabadi, A. & Sharifikia, M. (2017). Analyzing the daily process of Tehran metropolitan air pollutants. Geography, 15(54), 217-228. [persian]
- 27) Taei Samiromi, S., Moradi, H., Khadagholi, M. & Ahmadi, M. (2013). Study of factors affecting dust phenomenon in west of Iran. Human & Environment, 11(27), 1-10. [persian]
- 28) Faryabi, A., Matinfar, H. R., Alavi Panah, S. K. & Norouzi, A. A. (2019). Dust detection in western

- and southwestern Iran based on DAI index algorithm and Modis spectral data. *Environmental Sciences*, 17(3), 151-162. [persian] <https://doi.org/10.29252/envs.17.3.151>
- 29) lashkari H, Mohammadi, Z. (2022). Comparison and analysis of the temporal and spatial distribution of dust storms with visibility of fewer than 200 meters in western and southwestern Iran. *Journal of Spatial Analysis Environmental hazarts*, 9(1), 129-150. [persian]
- 30) <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.24237892.1401.9.1.8.4>
- 31) Andreae, M. O., Jones, C. D. & Cox, P. M. (2005). Strong present-day aerosol cooling implies a hot future. *Nature*, 435(7046), 1187-1190.
- 32) Anitha, M., & Kumar, L. S. (2024). An analysis of atmospheric aerosol characteristics using remote sensing data in the Indian region. *Pure and Applied Geophysics*, 181(2), 625-654.
- 33) Banks, J. R., Heinold, B. & Schepanski, K. (2022). Impacts of the desiccation of the Aral Sea on the Central Asian dust life- cycle. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127(21), e2022JD036618.
- 34) Berhane, S. A., Althaf, P., Kumar, K. R., Bu, L. & Yao, M. (2024). A Comprehensive Analysis of AOD and its Species from Reanalysis Data over the Middle East and North Africa Regions: Evaluation of Model Performance Using Machine Learning Techniques. *Earth Systems and Environment*, 1-26.
- 35) Chen Y, Li D, Karimian H, Wang S, Fang S. The relationship between air quality and MODIS aerosol optical depth in major cities of the Yangtze River Delta. *Chemosphere* 2022; 308: 136301.
- 36) Chen, L., Liu, C., Wang, J., Chen, G., Zhao, Y., Jin, Y. & Jin, H. (2025). How is the spatiotemporal representativeness of ground-and satellite-based aerosol optical depth (AOD) measurements over Asia?. *Atmospheric Research*, 315, 107857.
- 37) Huang, M., Peng, G., Zhang, J. & Zhang, S. (2006). Application of artificial neural networks to the prediction of dust storms in Northwest China. *Global and Planetary change*, 52(1-4), 216-224.
- 38) Indoitu, R., Orlovsky, L. & Orlovsky, N. (2012). Dust storms in Central Asia: Spatial and temporal variations. *Journal of Arid Environments*, 85, 62-70.
- 39) Mei, D., Xiushan, L., Lin, S. & Ping, W. A. N. G. (2008). A dust-storm process dynamic monitoring with multi-temporal MODIS data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37, 965-970.
- 40) Pelucchi, P., Servera, J. V., Stier, P. & Camps-Valls, G. (2025). Invertible Neural Networks for Probabilistic Aerosol Optical Depth Retrieval. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*.
- 41) Pozzer, A., De Meij, A., Yoon, J., Tost, H., Georgoulias, A. K. & Astitha, M. (2015). AOD trends during 2001–2010 from observations and model simulations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(10), 5521-5535.
- 42) Qu, J. J., Hao, X., Kafatos, M. & Wang, L. (2006). Asian dust storm monitoring combining Terra and Aqua MODIS SRB measurements. *IEEE Geoscience and remote sensing letters*, 3(4), 484-486.
- 43) Ramanathan, V., Crutzen, P. J., Lelieveld, J., Mitra, A. P., Althausen, D., Anderson, J., ... & Valero, F. P. J. (2001). Indian Ocean Experiment: An integrated analysis of the climate forcing and effects of the great Indo- Asian haze. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 106(D22), 28371-28398.
- 44) Wang, J., Zhang, B., Zhang, H., Hua, C., An, L. & Gui, H. (2022). Simulation of a severe sand and dust storm event in March 2021 in Northern China: Dust emission schemes comparison and the role of gusty wind. *Atmosphere*, 13(1), 108.
- 45) Yang, Y. Q., Hou, Q., Zhou, C. H., Liu, H. L., Wang, Y. Q. & Niu, T. (2008). Sand/dust storm processes in Northeast Asia and associated large-scale circulations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8(1), 25-33.