



## Evaluating the Effect of Aerosol Optical Depth (AOD) on the Health of Vegetation (Case Study: Maharlo Lake Catchment)

Document Type  
Research Paper

Mehdi Asadi\*<sup>1</sup>

Received 2024/09/01

\*Assistant Professor, Department of Geography Education, Farhangian University, Tehran, Iran.

Accepted 2024/09/23

DOI: 10.22034/eiap.2025.217510



### Abstract

Maharlo Lake consists of the current lake, salt cover, and mud cover. The drying of these parts can directly affect the amount of dust and vegetation. Therefore, this research investigates the relationship between Aerosol Optical Depth (AOD) and vegetation in the catchment area of Maharlo Lake. To achieve this, AOD data from the MERRA-2 database for 2010 to 2023 were obtained, along with images from 5 different Rows and Paths of Landsat 8 to evaluate vegetation indicators (NDVI, ARVI, CRI2). Geographically weighted regression (GWR) and Pearson's correlation coefficient ( $r^2$ ,  $r^2$  Adjusted, and AICc values) were calculated to assess the correlation between vegetation indices and AOD for the four seasons: winter, spring, summer, and fall. The results demonstrate a negative correlation between AOD and vegetation indices mentioned in all seasons. The strongest negative correlation (-0.430) was observed in the summer, while the weakest correlation (-0.134) was found in the winter. GWR results indicate that the NDVI index has the highest  $r^2$  and  $r^2$  Adjusted values (0.819 and 0.627, respectively), while the CRI2 index has the lowest values (0.454 and 0.195, respectively). The lowest AICc value (272.25) was associated with the NDVI index, indicating a better fit between aerosols and the investigated vegetation indices. Conversely, the CRI2 index had the highest AICc value (377.75), suggesting a less appropriate fit.

**Keywords:** AOD, Vegetation, Landsat, MODIS, MERRA-2, Maharlo Lake.

\* Corresponding author:

Email: [Asadi.m@cfu.ac.ir](mailto:Asadi.m@cfu.ac.ir)

## Introduction

Aerosols, with a diameter of 0.001 to 100  $\mu\text{m}$ , are solid or liquid particles emitted from anthropogenic or natural sources and suspended in the Earth's atmosphere they affect ecosystems, air quality, atmospheric chemistry, visibility, and vegetation (Valsaraj et al., 2009; Streets et al., 2009; IPCC, 2013; Han et al., 2013; Allen, 2015; Del Aguila et al., 2018; Obregon et al., 2018; Yang et al., 2019), and play a key role in the degradation Health and climate system plays (Butt et al., 2017; Froehlich-Nowoisky et al., 2016; Gutierrez-Avila et al., 2018; Pacitto et al., 2018; Tariq et al., 2018). In recent years, the vegetation cover of the country's watersheds has declined due to the development of commercial lands the construction of dams, and excessive exploitation of water resources, especially underground water resources, and has caused the surfaces to protrude and the beds of rivers and lakes to dry up. As a result, the levels and the areas around the watersheds have provided dry and dusty conditions, which can be seen widely and clearly in Lake Hamon and Lake Urmia in Iran (Behrooz et al., 2017; Rashki et al., 2012). So far, many studies have been conducted on dust and vegetation in Iran and the world, some of which are mentioned below. Tariq et al. (2021) in Pakistan investigated the relationship between airborne particles and increased vegetation index and meteorological parameters. The results showed that the coefficients of determination ( $r^2$ ) between Aqua-AOD and AERONET-AOD in Lahore were 0.67 and 0.76 in Karachi. The values obtained from Aqua-AOD were also validated using AOD data from Terra, MISR, and SeaWiFS. The results also showed high AOD and low AE in south and southwest Pakistan, indicating the presence of airborne particles. In northeast Pakistan, EVI negatively correlates with AOD. Zhang et al. (2023) used satellite images to assess the impact of aerosol changes on vegetation. The results indicated a direct relationship between vegetation cover and changes in aerosol levels, and the results also showed that the EVI and NIRv vegetation indices have a high ability to monitor and supervise aerosol changes directly. Pippal et al. (2024) studied the spatio-temporal changes in the optical properties of aerosols in northwest India by integrating satellite and modeled data. The results showed that the decadal averages of aerosol values in the post-monsoon period based on images from the Aqua satellite increased by 0.35 and 0.34, and aerosol values based on the Angstrom Power Index (AE) increased by 1.20 on the Aqua satellite and 1.10 on the Terra satellite. Therefore, considering the research background and the issues raised, the main goal of the present study is to evaluate the effect of aerosol optical depth (AOD) on vegetation health in the Maharloo Lake watershed in Fars Province, using dust data (AOD) obtained from the MERRA-2 database.

## Methodology

The study aimed to analyze the changes and trends in Aerosol Optical Depth (AOD) and its relationship with vegetation health over from 2010 to 2023. The AOD data was obtained from the NASA Modern Evaluation Center for Research and Applications (MERRA) version 2 (MERRA-2) database. To evaluate vegetation indices (NDVI, ARVI, CRI2), Landsat 8 images were used. To cover the entire surface of the study area with Landsat 8 images, 5 images were used, and a Mosaic of the images was created in ArcGIS software to perform calculations and analyze the indices. The values of the coefficient of explanation ( $r^2$ ),  $r^2$  Adjusted, and AICc were then calculated using geographically weighted regression (GWR) and Pearson's correlation coefficient for the four seasons of winter, spring, summer, and autumn between the mentioned vegetation indicators and AOD.

## The MERRA database

The MERRA database is a NASA Center for Modern Research and Applications (CREA) atmospheric reanalysis dataset (Rienecker, 2011) developed by NASA's Global Modeling and Assimilation Office (GMAO). The reanalysis dataset uses the Goddard Earth Observation System (GEOS-5) version 5, a general circulation model of the atmosphere, and the Data Assimilation System (DAS) (Molod et al., 2015), which simulates and optimizes observations, combines model data with spatially and temporally irregular observations and produces gridded datasets with appropriate accuracy and establishes a historical data analysis system. The second version of the model and dataset was released in 2014. This version uses new shortwave and infrared data and has advantages over the previous version, including numerous improvements and updates in data simulation, making aerosol, sulfate, and dust observations available (Real-Rangel et al., 2017). In the present study, the analyzed aerosol optical depth (AOD) in the statistical period from 2010 to 2023 from the

MERRA-2 database, with an accuracy of  $0.625 \times 0.5$  degrees, within the Maharloo Lake basin in the NC format was used.

### Results and Discussion

Throughout all seasons studied, there is a negative correlation between AOD (5% confidence level) and three vegetation indices: CRI2, NDVI, and ARVI. This means that when vegetation decreases, the amount of dust increases, and when vegetation increases, the amount of dust decreases. Only in the winter season is there a weak correlation of 0.022 with the ARVI index, which can be ignored due to its low value. The strongest negative correlation is found in the summer season, with an average of -0.430, and the lowest correlation is observed in the winter season, with an average of -0.134, indicating low dust activity during this period. Geographically weighted regression (GWR) was used to investigate the correlation between AOD and the vegetation indices. The NDVI index had the highest  $r^2$  value of 0.819, while the CRI2 index had the lowest  $r^2$  value of 0.454. The adjusted coefficient of determination, which shows the real effect of independent variables on the dependent model, revealed the strongest correlation between AOD and the NDVI index, with a numerical value of 0.627, and the weakest correlation with the CRI2 index, with a numerical value of 0.195. Finally, AICc was examined, and the results indicated that the NDVI index had the most appropriate fit with an AICc value of 272.25, while the CRI2 index had the least appropriate fit with an AICc value of 377.75. This investigation sheds light on the relationship between aerosols and vegetation indices.

### Conclusion

Based on the obtained results, except for the ARVI index in the winter season with a correlation of 0.022, there is a negative correlation between AOD and vegetation indices CRI2, NDVI, and ARVI in all the studied seasons, which indicates the direct impact of dust on the health and greenness and distribution of vegetation. And conversely. The highest negative correlation among all investigated vegetation is in the summer season - 0.430 and the lowest correlation -0.134 is related to the winter season, which shows the low dust activity in this period. The average minimum and maximum AOD in the studied area are 0.161 and 0.199, respectively. The lowest and highest AOD values are in winter 0.087 and spring 0.261, respectively. Also, the lowest standard deviation with a numerical value of 0.011 occurred in the autumn season, where the average AOD is 0.149, which indicates the lowest variability of AOD in the studied seasons in the catchment area of Maharloo Lake. The results obtained from GWR showed that the highest  $r^2$  value was related to the NDVI index with a numerical value of 0.819 and the lowest  $r^2$  value was related to the CRI2 index with a numerical value of 0.454. Also, based on the adjusted coefficient of determination ( $r^2$  Adjusted), the highest correlation between AOD and the NDVI index was 0.627, and the lowest correlation with the CRI2 index was 0.195. Finally, in this study, the AICc value was also examined, in which the lowest value, with a numerical value of 272.25, was related to the NDVI index (the AICc value related to the ARVI index was 341.75), and the highest value, with a numerical value of 377.75, was related to the CRI2 index, which respectively indicates the most appropriate and inappropriate fit between aerosols and the vegetation indices under study. The plant health study revealed that the lowest CRI2 value of 0.131 occurred in autumn, while the highest value of 0.981 was observed in summer. The lowest standard deviation was in the winter season numerical value of 0.98, and the highest deviation was in the summer season numerical value of 1.7, indicating reduced chlorophyll variability in the winter and more variability in the summer. The high CRI2 value in the summer indicates a high chlorophyll concentration in plants and gardens. The NDVI study also showed that the lowest and highest NDVI values were related to the autumn season numerical values of -0.754 and 0.998, respectively. Since the standard deviation of the autumn season also has the highest deviation from the standard (0.138) among the four seasons in the NDVI study, it indicates greater variability of NDVI values in this season. Finally, the ARVI index study showed that the highest and lowest standard deviations were related to the winter and autumn seasons with numerical values of 0.067 and 0.038, respectively, which indicates the highest and lowest variability of the ARVI index in the study area as an index sensitive to aerosols and a modifier of the NDVI index. Also, the minimum of the ARVI index was related to the winter season with a numerical value of -0.805, and its maximum was related to the summer season with a numerical value of 0.998, and the average of the aforementioned index varied from 0.058 in the winter season to 0.112 in the spring season.

**Reference**

- Allen, B. 2015. Atmospheric aerosols: What are they, and why are they so important? National Aeronautics and Space Administration, 6.
- Behrooz, R. D., Esmaili-Sari, A., Bahramifar, N., Kaskaoutis, D. G., Saeb, K., & Rajaei, F. 2017. Trace-element concentrations and water-soluble ions in size-segregated dust-borne and soil samples in Sistan, southeast Iran. *Aeolian Research*, 25, 87-105.
- Butt, E. W., Turnock, S. T., Rigby, R., Reddington, C. L., Yoshioka, M., & Johnson, J. S. 2017. Global and regional trends in particulate air pollution and attributable health burden over the past 50 years. *Environmental Research Letters*, 12.
- del Aguila, A., Sorribas, M., Lyamani, H., Titos, G., Olmo, F. J., & Arruda-Moreira, G. 2018. Sources and physicochemical characteristics of submicron aerosols during three intensive campaigns in Granada (Spain). *Atmospheric Research*, 213, 398–410.
- Froehlich-Nowoisky, J., Kampf, C. J., Weber, B., Huffman, J. A., Poehlker, C., & Andreae, M. O. 2016. Bioaerosols in the earth system: Climate, health, and ecosystem interactions. *Atmospheric Research*, 182, 346–376.
- Gutierrez-Avila, I., Rojas-Bracho, L., Riojas-Rodriguez, H., Kloog, I., Just, A. C., & Rothenberg, S. J. 2018. Cardiovascular and cerebrovascular mortality associated with acute exposure to PM<sub>2.5</sub> in Mexico City. *Stroke*, 49(7): 1734–1736.
- Han, X., Zhang, M., Zhu, L., & Xu, L. 2013. Model analysis of influences of aerosol mixing state upon its optical properties in East Asia. *Advances in Atmospheric Sciences*, 30, 1201-1212.
- IPCC (The Intergovernmental Panel on Climate Change)-Fifth Assessment Report–Climate Change. 2013. [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch).
- Molod, A., Takacs, L., Suarez, M., & Bacmeister, J. 2015. Development of the GEOS-5 atmospheric general circulation model: Evolution from MERRA to MERRA2. *Geoscientific Model Development*, 8(5): 1339-1356.
- Obregón, M. D. L. A., Costa, M. J., Silva, A. M., & Serrano, A. 2018. Impact of aerosol and water vapour on SW radiation at the surface: Sensitivity study and applications. *Atmospheric research*, 213, 252-263.
- Pacitto, A., Stabile, L., Viana, M., Scungio, M., Reche, C., & Querol, X. 2018. Particle-related exposure, dose and lung cancer risk of primary school children in two European countries. *Science of the Total Environment*, 616, 720–729.
- Pippal, P. S., Kumar, R., Kumar, R., & Singh, A. 2024. Integrating satellite and model data to explore spatial-temporal changes in aerosol optical properties and their meteorological relationships in northwest India. *Science of the Total Environment*, 922, 170835.
- Rashki, A., Kaskaoutis, D. G., Rautenbach, C. D., Eriksson, P. G., Qiang, M., & Gupta, P. 2012. Dust storms and their horizontal dust loading in the Sistan region, Iran. *Aeolian Research*, 5, 51-62.
- Real-Rangel, R., Pedrozo-Acuña, A., Breña-Naranjo, J. A., & Alcocer-Yamanaka, V. 2017. Evaluation of the hydroclimatological variables derived from GLDAS-1, GLDAS-2 and MERRA-2 in Mexico, E-proceedings of the 37th IAHR World Congress August 13–18, Kuala Lumpur, Malaysia.
- Rienecker, M. M., Suarez, M. J., Gelaro, R., Todling, R., Bacmeister, J., Liu, E., & Bloom, S. 2011. MERRA: NASA's modern-era retrospective analysis for research and applications. *Journal of climate*, 24(14): 3624-3648.
- Streets, D. G., Yan, F., Chin, M., Diehl, T., Mahowald, N., Schultz, M., & Yu, C. 2009. Anthropogenic and natural contributions to regional trends in aerosol optical depth, 1980–2006. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D10).
- Tariq, S., Nawaz, H., Ul-Haq, Z., & Mehmood, U. 2021. Investigating the relationship of aerosols with enhanced vegetation index and meteorological parameters over Pakistan. *Atmospheric Pollution Research*, 12(6): 101080.
- Tariq, S., Ul-Haq, Z., Mahmood, K., & Rana, A. D. 2018. Spatio-temporal distributions and trends of aerosol parameters over Pakistan using remote sensing. *Applied Ecology & Environmental Research*, 16(3).
- Valsaraj, K. T., Kommalapati, R. R., & Kommalapati, R.R. 2009. *Atmospheric aerosols: Characterization, chemistry, modeling, and climate*, (Vol. 1005). USA: Oxford University Press.
- Yang, Y., Zhao, C., Dong, X., Fan, G., Zhou, Y., & Wang, Y. 2019. Toward understanding the process-level impacts of aerosols on microphysical properties of shallow cumulus cloud using aircraft observations. *Atmospheric Research*, 221, 27–33.
- Zhang, W., He, Q., Wang, H., Cao, K., & He, S. 2018. Factor analysis for aerosol optical depth and its prediction from the perspective of land-use change. *Ecological indicators*, 93, 458-469.

## ارزیابی تأثیر عمق اپتیکی آئروسول (AOD) بر سلامت پوشش گیاهی (مطالعه موردی: حوضه آبریز دریاچه مهارلو)

مهدی اسدی\*

استادیار، گروه آموزش جغرافیا، دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۷/۰۲

تاریخ وصول مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۱۱

### چکیده

دریاچه مهارلو از سه بخش دریاچه فعلی، پوشش نمکی و پوشش گلی تشکیل شده که خشک شدن آن می‌تواند تأثیر مستقیمی بر میزان گردوغبار و پوشش گیاهی بگذارد. لذا در این پژوهش به بررسی ارتباط عمق نوری هواویزها (AOD) و پوشش گیاهی در حوضه آبریز دریاچه مهارلو پرداخته شد. برای این منظور داده‌های (AOD) در بازه آماری ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۳ از پایگاه داده MERRA-2 و تصاویر ۵ مسیر و گذر متفاوت لندست ۸ برای ارزیابی شاخص‌های پوشش گیاهی (CRI2، ARVI، NDVI) اخذ گردید. در ادامه با استفاده از رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی (GWR) و ضریب همبستگی پیرسون، برای چهار فصل زمستان، بهار، تابستان و پاییز مقادیر  $r^2$  Adjusted و AICc بین شاخص‌های پوشش گیاهی و AOD محاسبه گردید. نتایج بیانگر همبستگی منفی بین AOD و شاخص‌های پوشش گیاهی مذکور در تمام فصول مورد بررسی بود. بیشترین همبستگی منفی در بین تمام پوشش‌های گیاهی مورد بررسی در فصل تابستان (-۰/۴۳۰) و کمترین میزان همبستگی (-۰/۱۳۴) مربوط به فصل زمستان است. همچنین نتایج به‌دست‌آمده از GWR بیانگر بیشترین میزان  $r^2$  Adjusted و به ترتیب مربوط به شاخص NDVI با مقدار عددی ۰/۸۱۹ و ۰/۶۲۷ و کمترین شاخص NDVI و بیشترین میزان با مقدار عددی ۳۷۷/۷۵ مربوط به شاخص CRI2 بود که به ترتیب نشان‌دهنده مناسب و نامناسب‌ترین برازش بین آئروسول‌ها با شاخص‌های پوشش گیاهی موردبررسی می‌باشد.

**کلیدواژه‌ها:** AOD، پوشش گیاهی، لندست، مودیس، MERRA-2، دریاچه مهارلو.

## سرآغاز

آئروسول‌ها با قطر ۰/۰۰۱ تا ۱۰۰ میکرومتر، ذرات جامد یا مایعی هستند که از منابع انسانی یا طبیعی ساطع شده و در جو زمین معلق مانده‌اند که بر اکوسیستم، کیفیت هوا، شیمی اتمسفر، دید و پوشش گیاهی تاثیر می‌گذارد (Valsaraj et al., 2009; Streets et al., 2009; IPCC, 2013; Han et al., 2013; Allen, 2015; Del Aguila et al., 2018; Obregon et al., 2018; Yang et al., 2019) و نقش کلیدی در تخریب سلامت و سیستم آب‌وهوا بازی می‌کند (Butt et al., 2017; Froehlich-Nowoisky et al., 2016; Gutierrez-Avila et al., 2018; Pacitto et al., 2018; Tariq et al., 2018). در سال‌های اخیر پوشش گیاهی حوضه‌های آبریز کشور به دلیل توسعه زمین‌های تجاری و احداث سدها و بهره‌برداری بی‌رویه از منابع آب و بالأخص منابع آب زیرزمینی رو به افول نهاده و باعث رخنمون شدن سطوح و خشک شدن بستر رودخانه‌ها و دریاچه‌ها گشته است در نتیجه سطوح و مناطق اطراف حوضه‌های آبریز خشک و موجبات گردوغبار را فراهم آورده است که نمونه این مورد را می‌توان در دریاچه هامون و دریاچه ارومیه در ایران (Behrooz et al., 2017; Rashki et al., 2012) به صورت وسیع و واضح مشاهده نمود. تا به حال تحقیقات زیادی در ارتباط با گردوغبار و پوشش گیاهی در سطح ایران و جهان انجام گرفته که در ادامه به چند مورد از آن‌ها اشاره می‌شود. (Sofue et al., 2018) به بررسی تاثیر بارش و طوفان‌های گردوغبار بر عملکرد پوشش گیاهی در مناطق کویری گبی با استفاده از تصاویر سنجنده AVHRR پرداخته‌اند. تحلیل همبستگی بین بارش و ناهنجاری‌های شاخص پوشش گیاهی (NDVI) نشان داد که در منطقه شرقی بیابان گبی، تغییرات NDVI با ناهنجاری‌های بارش همخوانی دارد. با این حال، در منطقه جنوب‌غربی، صرف‌نظر مقدار بارش، میزان NDVI از سال ۲۰۱۰ به‌طور مداوم کاهش یافته، که این امر نشان‌دهنده تخریب بیشتر پوشش گیاهی در این منطقه است. (Wang et al., 2019) با استفاده از شاخص NDVI و تغییرات زاویه‌ای روابط بازتابی قطبی شده طیفی سطحی به بهبود ارزیابی مقادیر آئروسول پرداختند. نتایج به‌دست آمده از ضریب همبستگی بین AOD‌های شبکه رباتیک بازیابی شده و آئروسول از ۰/۷۲۳ به ۰/۸۳۶ افزایش یافت و خطای ریشه میانگین مربع پس از در نظر گرفتن رابطه متمایز شده از ۰/۳۴۸ به ۰/۲۴۵ کاهش یافت که نشان‌دهنده بهبود دقت مقادیر AOD بازیابی شده است.

(Ebrahimi Khusfi et al., 2020) در ایران مرکزی با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس به بررسی رابطه بین شاخص طوفان گردوغبار (DSI)، پارامترهای اقلیمی و شاخص تفاوت نرمال شده پوشش گیاهی با استفاده از روش رگرسیون لجستیک پرداختند. نتایج پژوهش بر کارایی رگرسیون لجستیک در ارزیابی طوفان گردوغبار تأکید داشت و نشان که بیشترین میزان گردوغبار در ایران شمال‌شرقی، غربی و شرق ایران مرکزی بود. (Tariq et al., 2021) در پاکستان به بررسی ارتباط ذرات معلق هوا با افزایش شاخص پوشش گیاهی و پارامترهای هواشناسی پرداختند. نتایج نشانگر این بود که ضرایب تعیین ( $r^2$ ) بین Aqua-AOD و AERONET-AOD در لاهور ۰/۶۷ و در کراچی ۰/۷۶ است. همچنین مقادیر به‌دست‌آمده از Aqua-AOD با داده‌های AOD از Terra، MISR و SeaWiFS اعتبارسنجی شد. همچنین نتایج بیانگر AOD بالا و AE پایین در جنوب و جنوب‌غربی پاکستان بود که نشان‌دهنده وجود ذرات معلق در هوا است. در شمال شرقی پاکستان، AE با AOD همبستگی منفی دارد. (Zhang et al., 2023) با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به ارزیابی تاثیر تغییرات آئروسول‌ها بر روی پوشش گیاهی پرداختند. نتایج بیانگر آن بود که بین پوشش گیاهی و تغییرات میزان آئروسول‌های ارتباط مستقیمی وجود دارد و همچنین نتایج نشان داد که شاخص‌های پوشش گیاهی EVI و NIRv از قابلیت بالایی برای پایش و نظارت مستقیم بر تغییرات آئروسول‌ها برخوردار هستند. (Pippal et al., 2024) در شمال‌غربی هند با ادغام داده‌های ماهواره‌ای و مدل شده به بررسی تغییرات مکانی-زمانی خواص نوری آئروسول‌ها پرداختند. نتایج نشان داد که میانگین‌های دهه‌ای مقادیر آئروسول در دوره پس از موسمی‌ها بر اساس تصاویر ماهواره Aqua ۰/۳۵، ماهواره ۰/۳۴ و مقادیر آئروسول بر اساس شاخص توان آنگستروم (AE) در ماهواره Aqua ۱/۲۰ و در ماهواره Terra ۱/۱۰ افزایش داشته است. (Bahrami et al., 2012) در استان خوزستان با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس مقادیر شاخص NDVI را از ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۸ برای مدل‌سازی زمانی مکانی وقوع طوفان‌های گردوغبار مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج نشان داد که فراوانی طوفان‌های گردوغبار در استان خوزستان ارتباط مستقیمی با تخریب پوشش گیاهی دارد. (Asadi & Karami, 2019) به بررسی توزیع مکانی و زمانی گردوغبار در ایران در ایران پرداختند. نتایج نشان داد که مناطق جنوب و جنوب‌شرقی و جنوب‌غربی یا

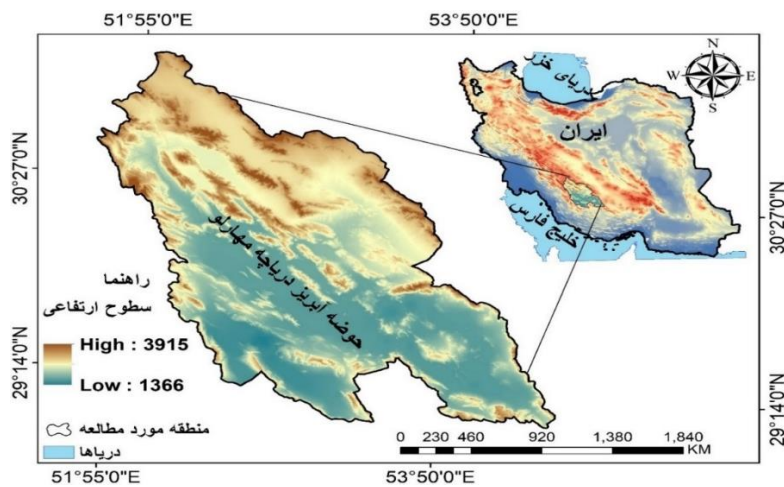
به دست آمده از پایگاه MERRA-2 به ارزیابی تاثیر عمق اپتیک آئروسول (AOD) بر سلامت پوشش گیاهی در حوضه آبریز دریاچه مهارلو در استان فارس پردازد.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

حوضه آبریز دریاچه مهارلو در استان فارس و وسعت آن ۴۲۷۰ کیلومترمربع است. همچنین محدوده مطالعاتی در حوضه آبریز فلات مرکزی و در تقسیمات حوضه آبریز دریاچه‌های طشک، بختگان و مهارلو قرار دارد. این حوضه بین عرض‌های جغرافیایی ۲۹ درجه و یک دقیقه تا ۳۰ درجه و ۶ دقیقه شمالی و طول‌های ۵۲ درجه و ۱۲ دقیقه تا ۵۳ درجه و ۲۸ دقیقه شرقی واقع شده است (شکل ۱). متوسط بارش منطقه از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۲۳ برابر ۳۵۴ میلی‌متر و دمای متوسط این منطقه ۱۸/۶ درجه سلسیوس می‌باشد.

به عبارتی نیمه جنوبی کشور با توجه به موقعیت نسبی خود مانند عرض جغرافیایی پایین و قرار گرفتن مناطق بیابانی در این مناطق در تمام فصول سال دارای گردوغبار هستند. حتی در فصل زمستان که پدیده گردوغبار در تمام کشور به حداقل خود می‌رسد در جنوب شرق کشور که شامل مناطق جنوبی استان سیستان و بلوچستان است گردوغبار با شدت‌های متفاوت وجود دارد. (Golreyhan et al., 2024) به بررسی تاثیر طوفان‌های گردوغبار نمکی در سلامت گیاهان در حوضه شرقی دریاچه ارومیه پرداختند. نتایج نشان‌دهنده این بود که میانگین NDVI، در منطقه مورد مطالعه، از روندی ثابت با میانگین کلی ۰/۲۹۵۷ پیروی می‌کند و گاه بر اثر تأثیرگذاری برخی عوامل بیرونی، مانند گردوغبار، بر میزان آن افزوده و یا از آن کاسته می‌شود. بر این اساس بیشترین میزان (۰/۳۴۹۵) میانگین NDVI به سال ۲۰۱۸ و کمترین میزان (۰/۲۵۷۹) به سال ۲۰۱۳ تعلق دارد. لذا با توجه به پیشینه پژوهش و مباحث مطرح شده، هدف اصلی پژوهش حاضر این است که با استفاده از داده‌های گردوغبار (AOD)



شکل (۱): منطقه مورد مطالعه

در پژوهش حاضر تغییرات فضایی - زمانی و روند عمق نوری هواویزاها (AOD) و ارتباط آن با سلامت پوشش گیاهی مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور داده‌های (AOD) در بازه آماری ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۳ از پایگاه داده مرکز ارزیابی نوین ناسا برای پژوهش‌ها و برنامه‌های کاربردی (MERRA) نسخه ۲ (MERRA-2) اخذ گردید. همچنین برای ارزیابی شاخص‌های پوشش گیاهی (CRI2، ARVI، NDVI) از تصاویر لندست ۸ (لازم به ذکر است که برای پوشش کل سطح منطقه مورد مطالعه با تصاویر لندست ۸ از تصاویر ۵ مسیبر و گذر ۱۶۱:۴۰، ۱۶۲:۳۹،

۱۶۳:۴۰، ۱۶۳:۳۸ و ۱۶۳:۴۰ استفاده گردید و برای انجام محاسبات، ابتدا تصاویر در نرم‌افزار ArcGIS موزاییک شده و سپس اقدام به محاسبه شاخص‌ها گردید) استفاده شد. سپس تصاویر با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. در ادامه با استفاده از رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی (GWR) و ضریب همبستگی پیرسون، به‌طور میانگین برای چهار فصل زمستان، بهار، تابستان و پاییز مقادیر ضریب تبیین ( $r^2$ )،  $r^2$  Adjusted و AICc بین شاخص‌های پوشش گیاهی مذکور و AOD محاسبه گردید.

### شاخص NDVI

در فتوسنتز ضروری است. گیاهان بیمار معمولاً کارتنوئید تجمعی کمتری دارند. مقدار بالای این شاخص نشان‌دهنده کارتنوئید زیاد در گیاه است (Gitelson et al., 2005). مقدار زیاد CRI2 به معنی غلظت بالای کارتنوئید در قیاس با کلروفیل است.

$$CRI2 = \frac{1}{P660} - \frac{1}{P730} \quad (۳)$$

### پایگاه داده MERRA

مرکز تجزیه و باز تحلیل نوین ناسا برای پژوهش‌ها و برنامه‌های کاربردی، یک مجموعه داده‌ای اتمسفری باز تحلیل است (Rienecker, 2011) که دفتر جهانی هماهنگ‌سازی و مدل‌سازی ناسا (GMAO) ایجاد کرده است. این پایگاه داده باز تحلیل که از نسخه ۵ سامانه مشاهدات زمین (GEOS-5) Goddard که یک مدل گردش عمومی جو است و سامانه داده‌گذاری داده‌ها (Data Assimilation System (DAS)) استفاده می‌کند (Molod et al., 2015) و به شبیه‌سازی و بهینه‌سازی مشاهدات می‌پردازد و با ترکیب داده‌های مدل به کار گرفته شده و مشاهدات نامنظم مکانی و زمانی، مجموعه داده‌های شبکه‌بندی را با دقت مناسب تولید و سامانه تجزیه و تحلیل داده‌های تاریخی را تاسیس می‌کند. نسخه دوم این مدل و مجموعه داده در سال ۲۰۱۴ منتشر شد. این نسخه از اطلاعات جدید طول موج کوتاه و اشعه مادون قرمز استفاده کرده است و مزایایی نسبت به نسخه قبلی دارد که شامل بهبود و به‌روزرسانی‌های متعدد در خصوص شبیه‌سازی داده‌ها، در دسترس قرار دادن مشاهدات آئروسول، سولفات و گردوغبار است (Real-Rangel et al., 2017). در پژوهش حاضر داده‌های باز تحلیل شده (AOD) در بازه آماری ۲۰۱۰ تا ۲۰۲۳ از پایگاه MERRA 2 با دقت ۰/۵\*۰/۶۲۵ درجه در محدوده حوضه آبریز دریاچه مهارلو در قالب NC استفاده گردید.

### رگرسیون وزن دار جغرافیایی (GWR)

روشی آماری می‌باشد که توجه زیادی به مدل‌سازی ایجاد شده در فضاهای متفاوت دارد (Ranjan et al., 2021). روش مذکور مزایای فراوانی نسبت به رگرسیون‌های خطی داشته و امکان بررسی ناپایداری مکانی پدیده‌ها را دارا بوده و با دادن ارتباط وزنی بیشتر به مشاهدات جغرافیایی توجه ویژه‌ای به اختلاف محلی ضرایب متغیرهای تعیین شده دارد (Yoo, 2019). رگرسیون وزن دار جغرافیایی به صورت رابطه (۴) محاسبه می‌گردد.

شاخص نرمال شده پوشش گیاهی (NDVI) در سال ۱۹۷۹ برای اولین بار توسط (Tucker, 1979) به عنوان شاخصی برای بررسی و سنجش سلامت پوشش گیاهی ارائه شده است. این شاخص، رایج‌ترین شاخص برای بررسی پوشش گیاهی می‌باشد که در حالت عادی، امواج باند مادون قرمز را به خوبی انعکاس می‌دهد. دامنه تغییرات هر پیکسل بین +۱ و -۱ متغیر می‌باشد. به طور معمول مقدار آن برای مناطق دارای پوشش گیاهی تنک ۰/۱ و برای مناطق با پوشش گیاهی متراکم ۰/۸ می‌باشد (Asadi & Valizade Kamran, 2022; 2023). در کل این شاخص، پتانسیل گیاهی (Teillet et al., 1997)، درصد پوشش سبز گیاهی، شاخص درصد نواحی برگ‌دار و انبوه‌های گیاهی (Thenkabail et al., 2002) را انعکاس می‌دهد و به صورت رابطه (۱) بیان می‌گردد.

$$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{Red}}{R_{NIR} + R_{Red}} \quad (۱)$$

که در آن  $R_{NIR}$  بازتاب طیفی مادون قرمز نزدیک و  $R_{Red}$  بازتاب طیفی قرمز می‌باشد.

### شاخص ARVI

شاخص مذکور، یک شاخص مبتنی بر نسبت بوده و حساس به عوامل جوی مانند آئروسول است (رابطه ۲) و توسط (Kaufman & Tanre, 1982) ارائه شده که خطوط هم‌مقدار پوشش گیاهی و خاک و دامنه‌ی مقادیر آن همانند NDVI است. فرمول شاخص ARVI در اصل NDVI اصلاح شده است که برای اثرات پراکندگی جوی در طیف بازتاب قرمز با استفاده از اندازه‌گیری در طول موج آبی می‌باشد (Kaufman & Tanre, 1992; 1996).

$$ARVI = \frac{NIR - (2*Red - Blue)}{NIR + (2*Red - Blue)} \quad (۲)$$

### شاخص CRI2

شاخص بازتابندگی کارتنوئید (CRI2) به استرس گیاهان، هنگام کمبود آب اشاره دارد. افزایش تجمع کارتنوئید در ارتباط با کاهش تجمع کلروفیل در بافت گیاه است؛ بنابراین شاخص موردنظر تفاوت بازتاب گیاهان در ارتباط با کلروفیل و کارتنوئید را بیان می‌کند (Gitelson et al., 2005). بازتاب شاخص کارتنوئید به رنگ‌دانه‌های کارتنوئید موجود در شاخ و برگ گیاهان حساس است. کارتنوئید در جذب انرژی نور به گیاهان کمک می‌کند که

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_k \beta_k(u_i, v_i) X_{ik} + \varepsilon_i \quad (4)$$

که در آن  $y$  متغیر وابسته،  $X_i$  متغیر مستقل،  $\beta_0$  ضرایب تخمینی،  $\varepsilon$  جزء خطا،  $u_i, v_i$  طول عرض جغرافیایی نقطه نام می‌باشد و  $\beta_k(u_i, v_i)$  پیاده‌سازی فاکتور مورد بررسی روی یک سطح پیوسته است (Fotheringham et al., 2015). همچنین برای بررسی بهینه بودن مدل از معیار اطلاعاتی (AIC) استفاده گردید (Charlton et al., 2009).

### نتایج

بعد از پردازش و آماده‌سازی تصاویر و داده‌های برگرفته شده از پایگاه داده MERRA-2 (مقادیر AOD) و ماهواره لندست ۸ (مقادیر  $ARVI, NDVI, CRI2$ )، محاسبات آماری بر روی آن‌ها انجام (جدول ۱ و ۲) و پراکنش آن‌ها در سطح منطقه مورد مطالعه در شکل‌های (۲ الی ۵) آورده شد.

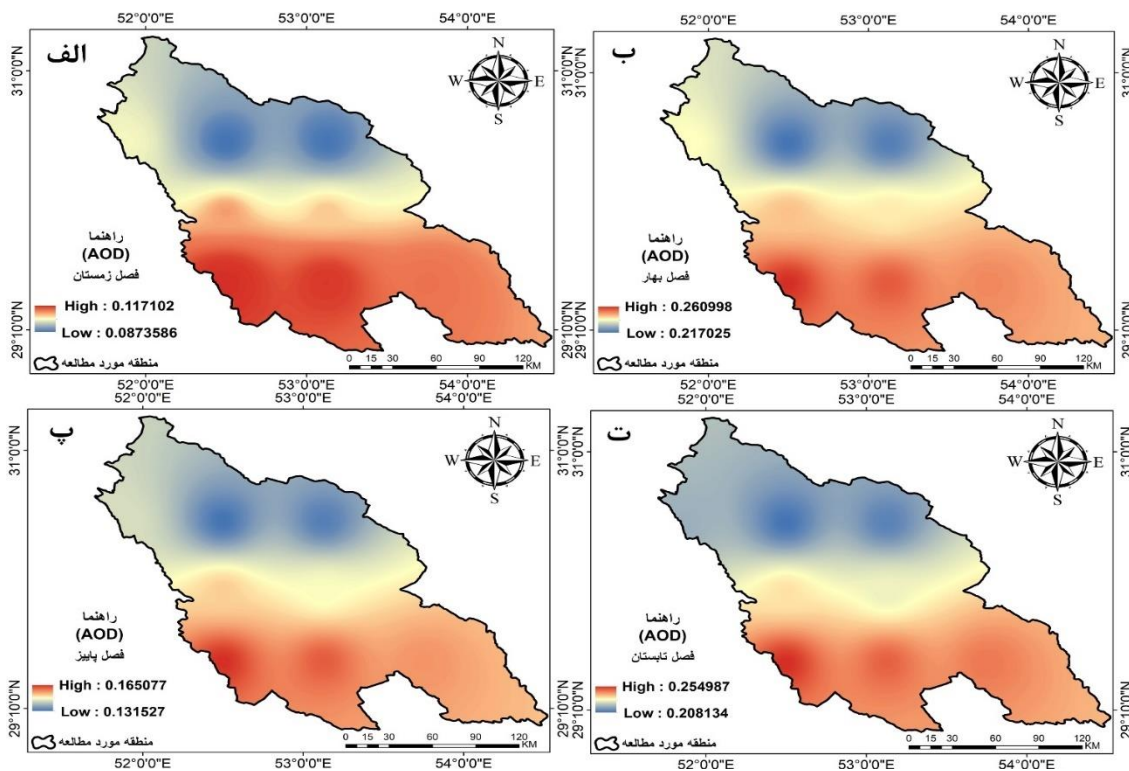
بر اساس جدول (۱) میانگین AOD در منطقه مورد مطالعه از ۰/۰۹۸ در فصل زمستان تا ۰/۲۳۱ در فصل بهار متغیر می‌باشد. کمترین و بیشترین میزان AOD نیز به ترتیب در فصل زمستان با مقدار عددی ۰/۰۸۷ و بهار با مقدار ۰/۲۶۱ می‌باشد. بالا بودن میزان AOD در فصل بهار نشان‌دهنده افزایش فعالیت چشمه‌های غبار و کاهش رطوبت خاک در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. نتایج این بخش از پژوهش با پژوهش‌های (Asadi & Karami, 2019) و (Nasr Azadani, 2014) که دریافتند میزان رطوبت خاک در بهار کاهش می‌یابد همخوانی دارد. همچنین کمترین میزان انحراف معیار با مقدار عددی ۰/۰۱۱ در فصل پاییز که میانگین AOD آن ۰/۱۴۹ است اتفاق افتاده است که نشان‌دهنده کمترین تغییرپذیری میزان AOD در فصل‌های مورد مطالعه در حوضه آبریز دریاچه مهارلو است. شکل (۲) نشان‌دهنده پراکنش AOD در منطقه مورد مطالعه می‌باشد که در آن نیمه جنوبی منطقه مورد بررسی غلظت بیشتری از گردوغبار را نسبت به نیمه شمالی دارا است که دلیل آن کاهش بیشتر رطوبت خاک در نیمه جنوبی است. در ادامه برای بررسی سلامت گیاهان، شاخص‌های پوشش گیاهی  $NDVI, CRI2, ARVI$  نیز مورد ارزیابی قرار گرفتند (جدول ۱) که بر این اساس میانگین شاخص  $CRI2$  در منطقه مورد مطالعه بین ۱۱/۷۲۳ در فصل زمستان تا ۱۴/۱۱۷ در فصل تابستان متغیر است. کمترین و بیشترین میزان  $CRI2$  به ترتیب مربوط به فصول پاییز با مقدار عددی ۰/۱۳۱ و تابستان با مقدار عددی ۰/۹۸۱ می‌باشد. کمترین میزان انحراف معیار در

فصل زمستان با مقدار عددی ۰/۹۸ و بیشترین میزان انحراف با مقدار عددی ۱/۷ در فصل تابستان می‌باشد که نشان‌دهنده تغییرپذیری کمتر کلروفیل در زمستان و تغییرپذیری بیشتر آن در تابستان است. بالا بودن میزان  $CRI2$  در تابستان نشان‌دهنده غلظت بالای کلروفیل در گیاهان و باغات است همان‌طور که در شکل (۳) نیز مشخص است مقادیر عددی کمتر بیشترین میزان پوشش گیاهی را به خود اختصاص دادند که نشان از سبزیگی بالای گیاهان است. نتایج این بخش از پژوهش با پژوهش (Golreyhan et al., 2024) که در آن به ارزیابی طوفان‌های نمکی پرداخته بودند همخوانی دارد. بررسی  $NDVI$  نیز نشان داد که میانگین آن بین ۰/۱۱۸ در فصل بهار و ۰/۱۶۹ در فصل بهار متغیر می‌باشد. کمترین و بیشترین میزان  $NDVI$  به ترتیب با مقدار عددی ۰/۷۵۴- و ۰/۹۹۸ هر دو مربوط به فصل پاییز می‌باشد و از آنجا که انحراف معیار فصل پاییز نیز بیشترین میزان انحراف از معیار (۰/۱۳۸) را در بین فصول چهارگانه در بررسی  $NDVI$  دارا می‌باشد، نشان‌دهنده تغییرپذیری بیشتر مقادیر  $NDVI$  در این فصل می‌باشد. نتیجه این بخش از پژوهش با پژوهش (Behrang Manesh et al., 2020) که به ارزیابی روند تغییرات پوشش گیاهی در استان فارس پرداخته بودند همخوانی دارد. شکل (۴) نشان‌دهنده پراکنش پوشش گیاهی بر اساس شاخص  $NDVI$  در منطقه مورد مطالعه می‌باشد که بر این اساس مناطق جنوب، جنوب‌شرق، شمال‌شرق و شرق از نظر پوشش گیاهی فقیر و مناطق مرکزی حوضه آبریز دریاچه مهارلو به دلیل نزدیکی به دریاچه دارای پوشش گیاهی زیاد می‌باشند. در نهایت بررسی شاخص  $ARVI$  نشان داد که بیشترین و کمترین میزان انحراف معیار مربوط به فصل‌های زمستان و پاییز به ترتیب با مقادیر عددی ۰/۰۶۷ و ۰/۰۳۸ می‌باشد که نشان‌دهنده بیشترین و کمترین میزان تغییرپذیری شاخص  $ARVI$  در منطقه مورد مطالعه به‌عنوان شاخص حساس به آئروسول‌ها و تعدیل‌کننده شاخص  $NDVI$  می‌باشد. همچنین کمینه شاخص  $ARVI$  مربوط به فصل زمستان با مقدار عددی ۰/۸۰۵- و بیشینه آن مربوط به فصل تابستان با مقدار عددی ۰/۹۹۸ می‌باشد و میانگین شاخص مذکور از ۰/۰۵۸ در فصل زمستان تا ۰/۱۱۲ در فصل بهار متغیر است. نتایج این بخش از پژوهش با نتایج پژوهش (Eshghizadeh & Esmaeilian, 2020) که با استفاده از شاخص‌های گیاهی متعدد از جمله  $ARVI$  به بررسی بیوماس مراتع با استفاده از تصاویر لندست ۸ پرداخته بودند همخوانی دارد. شکل

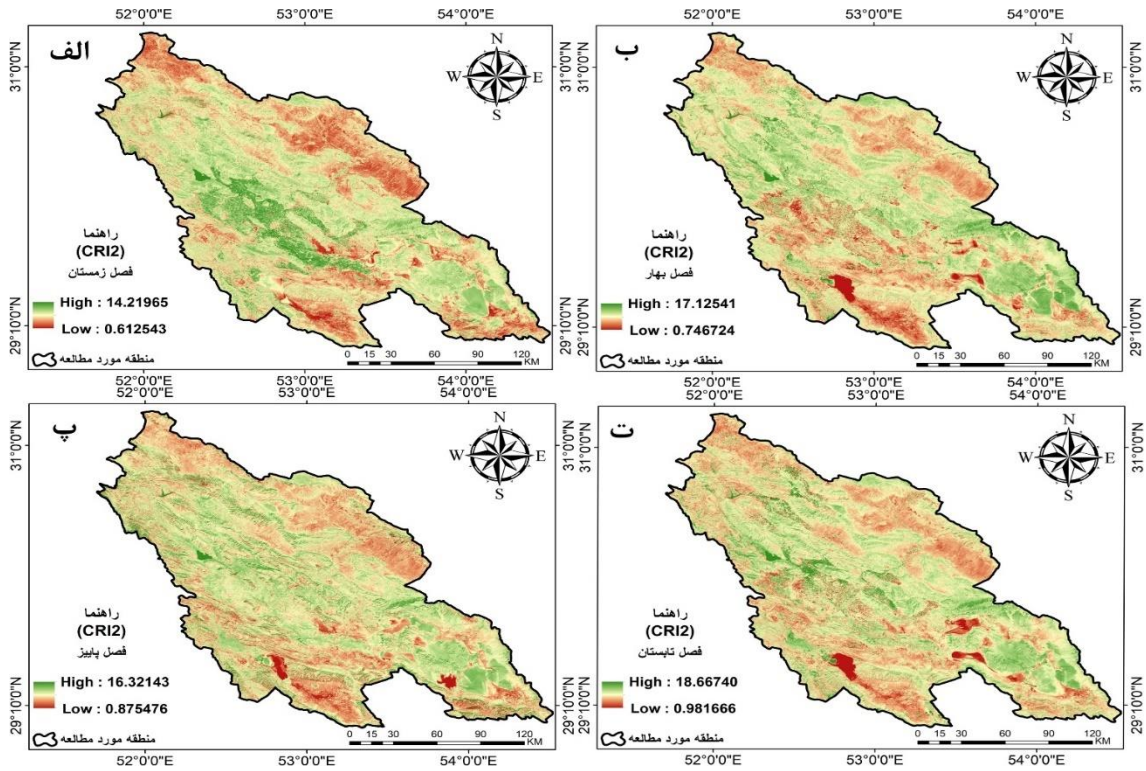
(۵) نشان‌دهنده پراکنش پوشش گیاهی بر اساس شاخص ARVI در منطقه مورد مطالعه می‌باشد.

جدول (۱): مقادیر محاسباتی شاخص‌های AOD، CRI2، NDVI، ARVI

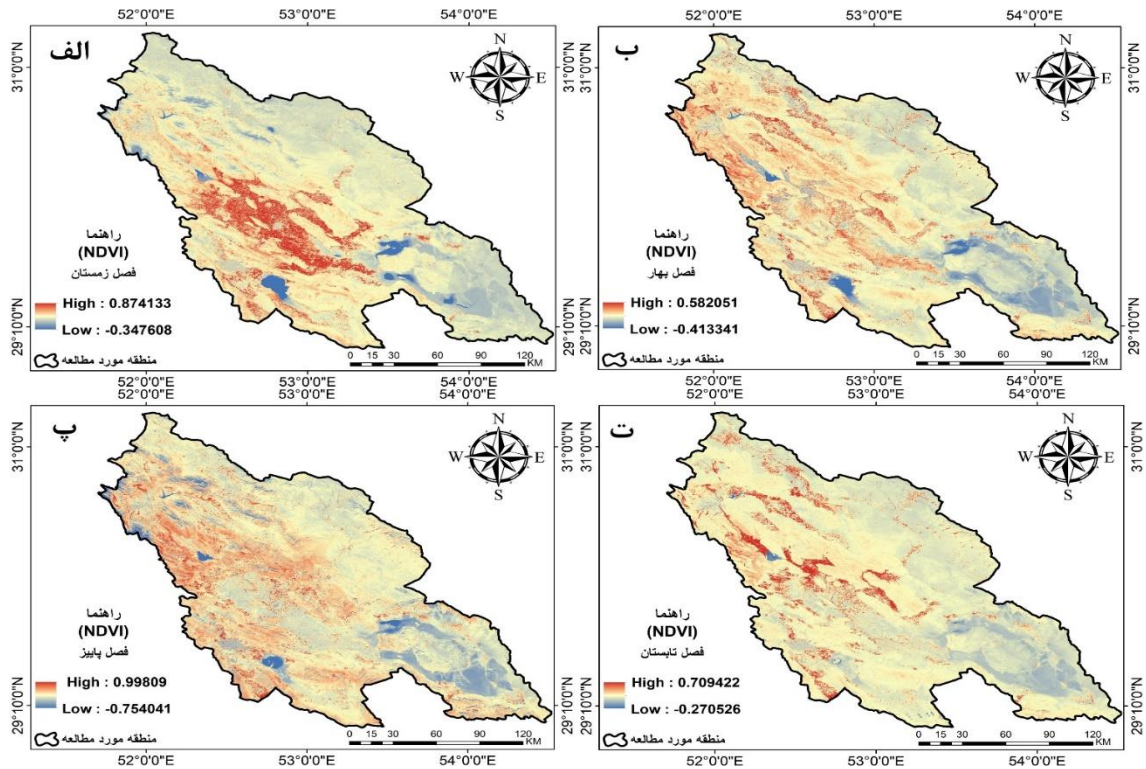
پارامتر	فصل	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف از معیار
AOD	زمستان	۰/۰۸۷	۰/۱۱۷	۰/۰۹۸	۰/۰۱۲
	بهار	۰/۲۱۷	۰/۲۶۱	۰/۲۳۱	۰/۰۱۵
	تابستان	۰/۲۰۸	۰/۲۵۵	۰/۲۲۷	۰/۰۱۷
	پاییز	۰/۱۳۱	۰/۱۶۵	۰/۱۴۹	۰/۰۱۱
CRI2	زمستان	۰/۶۱۲	۱۴/۲۱۹	۱۱/۷۲۳	۰/۹۸
	بهار	۰/۷۴۶	۱۷/۱۲۵	۱۳/۴۱۴	۱/۴۳
	تابستان	۰/۹۸۱	۱۸/۶۶۷	۱۴/۱۱۷	۱/۷۱
	پاییز	۰/۱۳۱	۱۶/۳۲۱	۱۲/۹۰۱	۱/۱۵
NDVI	زمستان	--/۳۴۷	۰/۸۷۴	۰/۱۱۸	۰/۰۷۴
	بهار	--/۴۱۳	۰/۵۸۲	۰/۱۶۹	۰/۰۶۵
	تابستان	--/۲۷۰	۰/۷۰۹	۰/۱۵۲	۰/۱۱۳
	پاییز	--/۷۵۴	۰/۹۹۸	۰/۱۳۳	۰/۱۳۸
ARVI	زمستان	--/۸۰۵	۰/۹۴۴	۰/۰۵۸	۰/۰۶۷
	بهار	--/۹۷۴	۰/۵۸۳	۰/۱۱۲	۰/۰۴۲
	تابستان	--/۵۰۰	۰/۹۹۸	۰/۰۸۷	۰/۰۵۲
	پاییز	--/۷۲۰	۰/۵۶۲	۰/۰۶۵	۰/۰۳۸



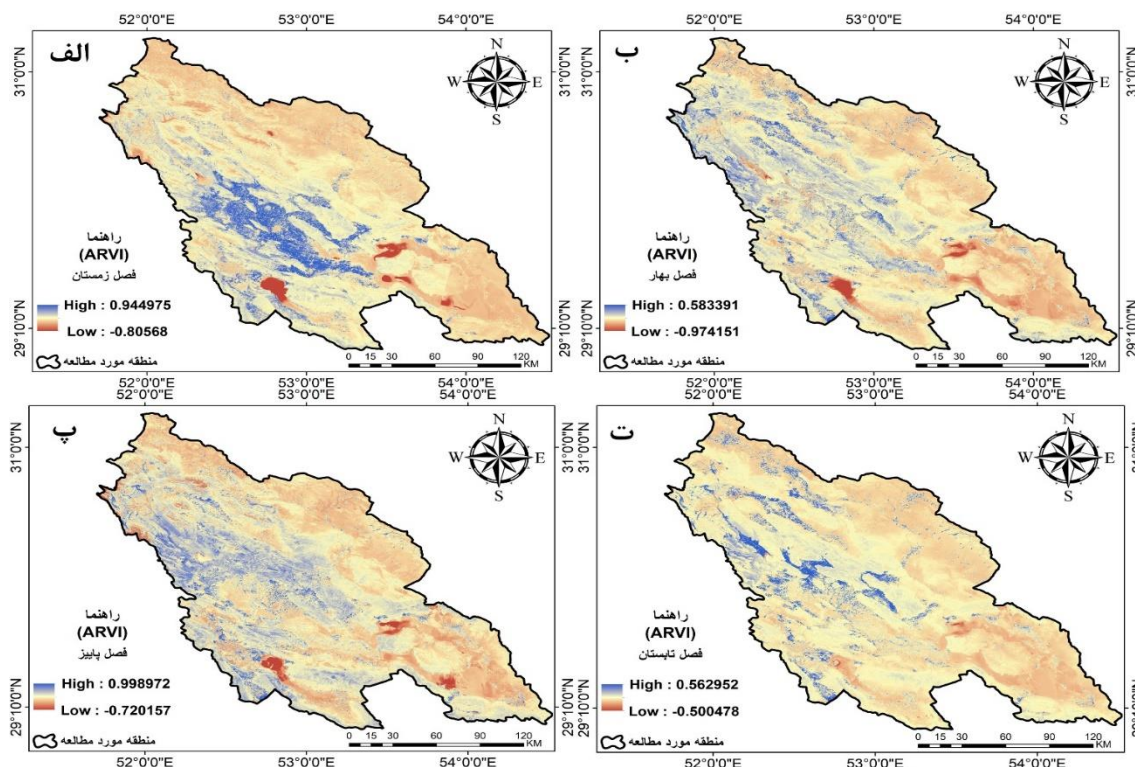
شکل (۲): شاخص AOD در منطقه مورد مطالعه الف: زمستان، ب: بهار، پ: پاییز، ت: تابستان



شکل (۳): شاخص CR2I در منطقه مورد مطالعه الف: زمستان، ب: بهار، پ: پاییز، ت: تابستان



شکل (۴): شاخص NDVI در منطقه مورد مطالعه الف: زمستان، ب: بهار، پ: پاییز، ت: تابستان



شکل (۵): شاخص ARVI در منطقه مورد مطالعه الف: زمستان، ب: بهار، پ: پاییز، ت: تابستان

فعالیت کم گردوغبار در این دوره می‌باشد. همچنین در ادامه همبستگی بین AOD با شاخص‌های پوشش گیاهی CRI2، NDVI، ARVI با استفاده از رگرسیون وزن‌دار جغرافیایی (GWR) مورد بررسی قرار گرفت (جدول ۲) که بر این اساس بیشترین میزان  $r^2$  مربوط به شاخص NDVI با مقدار عددی ۰/۶۴۱ (میزان  $r^2$  مربوط به شاخص ARVI برابر ۰/۸۱۹ می‌باشد) و کمترین میزان  $r^2$  نیز مربوط به شاخص CRI2 با مقدار عددی ۰/۴۵۴ می‌باشد. همچنین ضریب تعیین تعدیل‌شده نیز که فقط حاصل از تاثیر واقعی متغیرهای مستقل مدل بر وابسته است نشان‌دهنده بیشترین میزان همبستگی بین AOD و شاخص NDVI با مقدار عددی ۰/۶۲۷ (میزان  $r^2$  Adjusted مربوط به شاخص ARVI برابر ۰/۴۶۹ می‌باشد) و کمترین میزان همبستگی با شاخص CRI2 با مقدار عددی ۰/۱۹۵ می‌باشد. در نهایت در این پژوهش میزان اکائیک (AICc) نیز مورد بررسی قرار گرفت که در آن نیز کمترین میزان با مقدار عددی ۲۷۲/۲۵ مربوط به شاخص NDVI (میزان AICc مربوط به شاخص ARVI برابر ۳۷۷/۷۵ می‌باشد) و بیشترین میزان با مقدار عددی ۳۷۷/۷۵ مربوط به شاخص CRI2 بود که به ترتیب نشان‌دهنده مناسب و نامناسب‌ترین برازش بین آتروسل‌ها با شاخص‌های پوشش گیاهی

جدول (۲) نشان‌دهنده همبستگی بین AOD با شاخص‌های پوشش گیاهی CRI2، NDVI، ARVI می‌باشد. همان‌طور که از همبستگی پیرسون مشخص است بیشترین میزان  $r^2$  با NDVI با میانگین ۰/۱۳۹ و کمترین میزان  $r^2$  با ARVI با میانگین ۰/۴۳۵ می‌باشد. همچنین در تمام فصول مورد بررسی همبستگی منفی (در سطح اطمینان ۵ درصد) بین AOD و شاخص‌های پوشش گیاهی CRI2، NDVI، ARVI وجود دارد به عبارتی با کاهش پوشش گیاهی میزان گردوغبار افزایش و بر عکس با افزایش پوشش گیاهی میزان گردوغبار کاهش می‌باشد (نتایج این بخش از پژوهش با پژوهش گائو و همکاران (۲۰۱۲) که به بررسی توزیع فضایی و زمانی تغییرات آتروسل‌های موجود در جو پرداخته است، همخوانی دارد (Guo et al., 2012) و تنها در شاخص ARVI در فصل زمستان همبستگی ۰/۰۲۲ وجود دارد که می‌توان آن را به دلیل پایین بودن همبستگی نادیده گرفت. همان‌طور که از جدول مذکور نیز پیداست بیشترین همبستگی منفی در بین تمام پوشش‌های گیاهی مورد بررسی در فصل تابستان با میانگین ۰/۴۳۰ (فصول بهار و پاییز به ترتیب با میانگین ۰/۴۱۸ و ۰/۳۹۰ در رده‌های بعدی قرار دارند) و کمترین میزان همبستگی با میانگین ۰/۱۳۴ - مربوط به فصل زمستان است که نشان از

مورد بررسی می‌باشد. نتایج این بخش از پژوهش با پژوهش زنانگ و همکاران (۲۰۱۸) که به بررسی ارتباط عمق نوری آئروسول و از منظر تغییر کاربری زمین پرداخته بودند، همخوانی دارد (Zhang et al., 2018).

جدول (۲): همبستگی AOD با شاخص‌های پوشش گیاهی مورد بررسی بر اساس همبستگی پیرسون و GWR

پارامتر	فصل	همبستگی پیرسون				رگرسیون وزن دار جغرافیایی (GWR)	
		همبستگی	p-value	r <sup>2</sup>	r <sup>2</sup> Adjusted	AICc	
CRI2	زمستان	-۰/۳۷۱	۰/۰۰۰	۰/۰۰۲	۰/۳۴۱	-۴۰۱	
	بهار	-۰/۵۸۹	۰/۰۰۰	۰/۰۸۳	۰/۵۲۷	-۳۷۶	
	تابستان	-۰/۶۴۵	۰/۰۰۰	۰/۰۷۲	۰/۵۱۱	-۳۲۳	
	پاییز	-۰/۷۸۳	۰/۰۰۰	۰/۰۲۳	۰/۴۳۷	-۴۱۱	
NDVI	زمستان	-۰/۰۵۴	۰/۰۱۴	۰/۰۹۸	۰/۸۰۱	-۳۹۲	
	بهار	-۰/۳۰۱	۰/۰۰۷	۰/۱۰۷	۰/۸۷۳	-۲۵۱	
	تابستان	-۰/۲۹۷	۰/۰۰۴	۰/۱۸۷	۰/۷۴۶	-۲۰۷	
	پاییز	-۰/۱۷۴	۰/۰۳۲	۰/۱۶۴	۰/۸۵۷	-۲۳۹	
ARVI	زمستان	۰/۰۲۲	۰/۰۷۸	۰/۰۱۱	۰/۴۹۸	-۲۸۲	
	بهار	-۰/۳۶۳	۰/۰۰۳	۰/۰۶۹	۰/۷۹۱	-۳۷۴	
	تابستان	-۰/۳۴۹	۰/۰۰۳	۰/۰۷۵	۰/۶۷۰	-۳۶۱	
	پاییز	-۰/۲۱۳	۰/۰۱۳	۰/۰۱۹	۰/۶۰۳	-۳۵۰	

### بحث و نتیجه‌گیری

AOD آن ۰/۱۴۹ است اتفاق افتاده است که نشان‌دهنده کمترین تغییرپذیری میزان AOD در فصل‌های مورد مطالعه در حوضه آبریز دریاچه مهارلو است. نتایج به‌دست آمده از GWR نشان داد که بیشترین میزان  $r^2$  مربوط به شاخص NDVI با مقدار عددی ۰/۸۱۹ و کمترین میزان  $r^2$  نیز مربوط به شاخص CRI2 با مقدار عددی ۰/۴۵۴ می‌باشد. همچنین براساس ضریب تعیین تعدیل‌شده ( $r^2$  Adjusted) بیشترین میزان همبستگی بین AOD و شاخص NDVI با مقدار عددی ۰/۶۲۷ و کمترین میزان همبستگی با شاخص CRI2 با مقدار عددی ۰/۱۹۵ می‌باشد. در نهایت در این پژوهش میزان اکائیک (AICc) نیز مورد بررسی قرار گرفت که در آن نیز کمترین میزان با مقدار عددی ۲۷۲/۲۵ مربوط به شاخص NDVI (میزان AICc مربوط به شاخص ARVI برابر ۳۴۱/۷۵ می‌باشد) و بیشترین میزان با مقدار عددی ۳۷۷/۷۵ مربوط به شاخص CRI2 بود که به ترتیب نشان‌دهنده مناسب و نامناسب‌ترین برآزش بین آئروسول‌ها با شاخص‌های پوشش گیاهی مورد بررسی می‌باشد. در بررسی سلامت گیاهان مشخص گردید که کمترین و بیشترین میزان CRI2 به ترتیب مربوط به فصول پاییز با مقدار عددی ۰/۱۳۱ و تابستان با مقدار عددی ۰/۹۸۱ می‌باشد. کمترین میزان انحراف معیار در فصل

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده به‌جز شاخص ARVI در فصل زمستان با همبستگی ۰/۰۲۲، یک همبستگی منفی (در سطح اطمینان ۵ درصد) بین AOD و شاخص‌های پوشش گیاهی CRI2، NDVI، ARVI در تمام فصول مورد بررسی وجود دارد که نشان‌دهنده تاثیر مستقیم گردوغبار بر سلامت و سبزیگی و پراکنش پوشش گیاهی است و بر عکس. بیشترین همبستگی منفی در بین تمام پوشش‌های گیاهی مورد بررسی در فصل تابستان با میانگین -۰/۴۳۰ (فصول بهار و پاییز به ترتیب با میانگین -۰/۴۱۸ و -۰/۳۹۰ در رده‌های بعدی قرار دارند) و کمترین میزان همبستگی با میانگین -۰/۱۳۴ مربوط به فصل زمستان است که نشان از فعالیت کم گردوغبار در این دوره می‌باشد. میانگین کمینه و بیشینه AOD در منطقه مورد مطالعه به ترتیب ۰/۱۶۱ و ۰/۱۹۹ می‌باشد. کمترین و بیشترین میزان AOD نیز به ترتیب در فصل زمستان با مقدار عددی ۰/۰۸۷ و بهار با مقدار ۰/۲۶۱ می‌باشد. بالا بودن میزان AOD در فصل بهار نشان‌دهنده افزایش فعالیت چشمه‌های غبار و کاهش رطوبت خاک در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. همچنین کمترین میزان انحراف معیار با مقدار عددی ۰/۰۱۱ در فصل پاییز که میانگین

۰/۱۱۲ در فصل بهار متغیر است. نتایج پژوهش حاضر با پژوهش بویا و همکاران (۲۰۲۴) که در کشور تایلند به بررسی اثرات گردوغبار بر روی شاخص پوشش گیاهی NDVI پرداختند و به این نتیجه رسیدند که بین ذرات PM2.5 و NDVI همبستگی وجود دارد، همخوانی بالایی دارد (Buya et al., 2024). همچنین در پژوهشی ساهک و کارسلی (۲۰۲۴) در شهر هرات افغانستان به بررسی تاثیر PM2.5 و AOD بر روی پوشش گیاهی پرداختند و نتایج نشان‌دهنده همبستگی منفی بین پارامترهای مذکور با شاخص NDVI بود که با نتایج پژوهش حاضر همخوانی بالایی دارد (Sahak & Karsli, 2024). با توجه به مباحث بیان شده و نتایج تحقیق و همچنین در پی کاهش آب و پوشش گیاهی اطراف دریاچه مهارلو و به وجود آمدن اراضی لخت در حاشیه آن و بروز غبارزدایی در این مناطق که خطرات بسیار زیادی را برای حاشیه‌نشینان دریاچه و کل جمعیت ساکن در اطراف آن، از بابت تهدید گردوغبار و مشکلات تنفسی و نیز تهدید غبار نمک و نابودی اراضی کشاورزی و در کل حیات طبیعی وجود دارد، لذا لازم است مسئولان امر با اتخاذ تصمیماتی به‌موقع و درست از وقوع بحران‌های بعدی در منطقه جلوگیری به عمل آورند.

زمستان با مقدار عددی ۰/۹۸ و بیشترین میزان انحراف با مقدار عددی ۱/۷ در فصل تابستان می‌باشد که نشان‌دهنده تغییرپذیری کمتر کلروفیل در زمستان و تغییرپذیری بیشتر آن در تابستان است. بالا بودن میزان CRI2 در تابستان نشان‌دهنده غلظت بالای کلروفیل در گیاهان و باغات است. بررسی NDVI نیز نشان داد که کمترین و بیشترین میزان NDVI به ترتیب با مقدار عددی ۰/۷۵۴- و ۰/۹۹۸ هر دو مربوط به فصل پاییز می‌باشد و از آنجا که انحراف معیار فصل پاییز نیز بیشترین میزان انحراف از معیار (۰/۱۳۸) را در بین فصول چهارگانه در بررسی NDVI دارا می‌باشد، نشان‌دهنده تغییرپذیری بیشتر مقادیر NDVI در این فصل می‌باشد. در نهایت بررسی شاخص ARVI نشان داد که بیشترین و کمترین میزان انحراف معیار مربوط به فصل‌های زمستان و پاییز به ترتیب با مقادیر عددی ۰/۰۶۷ و ۰/۰۳۸ می‌باشد که نشان‌دهنده بیشترین و کمترین میزان تغییرپذیری شاخص ARVI در منطقه مورد مطالعه به‌عنوان شاخص حساس به آتروسول‌ها و تعدیل‌کننده شاخص NDVI می‌باشد. همچنین کمینه شاخص ARVI مربوط به فصل زمستان با مقدار عددی ۰/۸۰۵- و بیشینه آن مربوط به فصل تابستان با مقدار عددی ۰/۹۹۸ می‌باشد و میانگین شاخص مذکور از ۰/۰۵۸ در فصل زمستان تا

## منابع

- Allen, B. 2015. Atmospheric aerosols: What are they, and why are they so important? National Aeronautics and Space Administration, 6.
- Asadi, M., & Kamran, K. V. 2022. Comparison of SEBAL, METRIC, and ALARM algorithms for estimating actual evapotranspiration of wheat crop. *Theoretical and Applied Climatology*, 149(1): 327-337.
- Asadi, M., & Kamran, K. V. 2023. Estimating selected cultivated crop water requirement-based surface energy balance algorithm. *Arabian Journal of Geosciences*, 16(5): 298.
- Asadi, M., & Karami, M. 2019. Spatial and Temporal Distribution of Dust in Iran. *Environmental Researches*, 10(19), 293-300. (In Persian).
- Asadi, M., & Karami, M. 2022. Modeling of relative humidity trends in Iran. *Model. Earth Syst. Environ.* 8, 1035-1045.
- Bahrami, H.A., Jalali, M., Darvishi Balorani, A., & Azizi, R. 2012. Spatial-temporal modeling of dust storms in Khuzestan province, *Iranian Journal of Remote Sensing & GIS*, 5(2), 95-114. (In Persian).
- Behrang Manesh M, Khosravi H, Azarnivand H, & Senatore A. 2020. Quantifying the trend of vegetation changes using remote sensing (Case study: Fars Province), *Journal of Plant Ecosystem Conservation*, 7 (15): 295-318. (In Persian).
- Behrooz, R. D., Esmaili-Sari, A., Bahramifar, N., Kaskaoutis, D. G., Saeb, K., & Rajaei, F. 2017. Trace-element concentrations and water-soluble ions in size-segregated dust-borne and soil samples in Sistan, southeast Iran. *Aeolian Research*, 25, 87-105.
- Butt, E. W., Turnock, S. T., Rigby, R., Reddington, C. L., Yoshioka, M., & Johnson, J. S. 2017. Global and regional trends in particulate air pollution and attributable health burden over the past 50 years. *Environmental Research Letters*, 12.

- Buya, S., Gokon, H., Dam, H. C., Usanavasin, S., & Karnjana, J. 2024. Estimating Ground-level Hourly PM 2.5 Concentrations in Thailand using Satellite Data: A Log-linear Model with Sum Contrast Analysis. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*.
- Charlton, M., Fotheringham, S., & Brunson, C. 2009. Geographically weighted regression. White paper. National Centre for Geocomputation. National University of Ireland Maynooth, 2.
- Del Aguila, A., Sorribas, M., Lyamani, H., Titos, G., Olmo, F. J., & Arruda-Moreira, G. 2018. Sources and physicochemical characteristics of submicron aerosols during three intensive campaigns in Granada (Spain). *Atmospheric Research*, 213, 398–410.
- Ebrahimi Khusfi, Z., Roustaei, F., Ebrahimi Khusfi, M., & Naghavi, S. 2020. Investigation of the relationship between dust storm index, climatic parameters, and normalized difference vegetation index using the ridge regression method in arid regions of Central Iran. *Arid land research and management*, 34(3): 239-263.
- Eshghizadeh, M., & Esmailian, Y. 2020. Evaluation possibility of rangelands biomass estimation using Landsat 8 satellite data. *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 27(1): 159-176.
- Fotheringham, A. S., Crespo, R., & Yao, J. 2015. Geographical and temporal weighted regression (GTWR). *Geographical Analysis*, 47(4): 431-452.
- Froehlich-Nowoisky, J., Kampf, C. J., Weber, B., Huffman, J. A., Poehlker, C., & Andreae, M. O. 2016. Bioaerosols in the earth system: Climate, health, and ecosystem interactions. *Atmospheric Research*, 182, 346–376.
- Gitelson, A.A., Viña, A., Ciganda, V., Rundquist, D. & Arkebauer, T.J. 2005. Remote Estimation of Canopy Chlorophyll Content in Crops, *Geophysical Research Letter*, 32, P. L08403.
- Golreyhan, F., Valizadeh Kamran, K., Mokhtari, D., & Rasouli, A. A. 2024. The Effect of Salt Dust Storms on the Health of Plants in the Eastern Basin of Urmia Lake. *Iranian Journal of Remote Sensing & GIS*, 15(4): 101-118.
- Guo, Y., Hong, S., Feng, N., Zhuang, Y., & Zhang, L. 2012. Spatial distributions and temporal variations of atmospheric aerosols and the affecting factors: a case study for a region in central China, *International journal of remote sensing*, 33(12): 3672-3692.
- Gutierrez-Avila, I., Rojas-Bracho, L., Riojas-Rodriguez, H., Kloog, I., Just, A. C., & Rothenberg, S. J. 2018. Cardiovascular and cerebrovascular mortality associated with acute exposure to PM2.5 in Mexico City. *Stroke*, 49(7): 1734–1736.
- Han, X., Zhang, M., Zhu, L., & Xu, L. 2013. Model analysis of influences of aerosol mixing state upon its optical properties in East Asia. *Advances in Atmospheric Sciences*, 30, 1201-1212.
- IPCC (The Intergovernmental Panel on Climate Change)-Fifth Assessment Report—Climate Change. 2013. [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch).
- Kaufman, Y. J., & Tanre, D. 1992. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(2): 261-270.
- Kaufman, Y. J., & Tanre, D. 1996. Strategy for direct and indirect methods for correcting the aerosol effect on remote sensing: from AVHRR to EOS-MODIS. *Remote sensing of Environment*, 55(1): 65-79.
- Molod, A., Takacs, L., Suarez, M., & Bacmeister, J. 2015. Development of the GEOS-5 atmospheric general circulation model: Evolution from MERRA to MERRA2. *Geoscientific Model Development*, 8(5): 1339-1356.
- Nasr Azadani, A. 2014. Investigation of changes in soil moisture and rainfall and their effect on dust production in the Inter-Nahrain region using MODIS system and TRMM satellite data from 2001 to 2014, thesis Senior Science, Faculty of Basic Sciences, Zanzan University of Basic Sciences. (In Persian).
- Obregón, M. D. L. A., Costa, M. J., Silva, A. M., & Serrano, A. 2018. Impact of aerosol and water vapour on SW radiation at the surface: Sensitivity study and applications. *Atmospheric research*, 213, 252-263.
- Pacitto, A., Stabile, L., Viana, M., Scungio, M., Reche, C., & Querol, X. 2018. Particle-related exposure, dose and lung cancer risk of primary school children in two European countries. *Science of the Total Environment*, 616, 720–729.

- Pippal, P. S., Kumar, R., Kumar, R., & Singh, A. 2024. Integrating satellite and model data to explore spatial-temporal changes in aerosol optical properties and their meteorological relationships in northwest India. *Science of the Total Environment*, 922, 170835.
- Ranjan, A. K., Patra, A. K., & Gorai, A. K. 2021. A review on estimation of particulate matter from satellite-based aerosol optical depth: Data, methods, and challenges. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 57, 679-699.
- Rashki, A., Kaskaoutis, D. G., Rautenbach, C. D., Eriksson, P. G., Qiang, M., & Gupta, P. 2012. Dust storms and their horizontal dust loading in the Sistan region, Iran. *Aeolian Research*, 5, 51-62.
- Real-Rangel, R., Pedrozo-Acuña, A., Breña-Naranjo, J. A., & Alcocer-Yamanaka, V. 2017. Evaluation of the hydroclimatological variables derived from GLDAS-1, GLDAS-2 and MERRA-2 in Mexico, E-proceedings of the 37th IAHR World Congress August 13–18, Kuala Lumpur, Malaysia.
- Rienecker, M. M., Suarez, M. J., Gelaro, R., Todling, R., Bacmeister, J., Liu, E., & Bloom, S. 2011. MERRA: NASA's modern-era retrospective analysis for research and applications. *Journal of climate*, 24(14): 3624-3648.
- Sahak, A. S., & Karsli, F. 2024. A new approach for the assessment of urban eco-environmental quality based on remote sensing: a case study of Herat City, Afghanistan. *Journal of Spatial Science*, 1-26.
- Sofue, Y., Hoshino, B., Demura, Y., Kai, K., Baba, K., Nduati, E., Kondoh, A. and Sternberg, T. 2018. Satellite monitoring of vegetation response to precipitation and dust storm outbreaks in Gobi Desert Regions. *Land*, 7(1): 19.
- Streets, D. G., Yan, F., Chin, M., Diehl, T., Mahowald, N., Schultz, M., & Yu, C. 2009. Anthropogenic and natural contributions to regional trends in aerosol optical depth, 1980–2006. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 114(D10).
- Tariq, S., Nawaz, H., Ul-Haq, Z., & Mehmood, U. 2021. Investigating the relationship of aerosols with enhanced vegetation index and meteorological parameters over Pakistan. *Atmospheric Pollution Research*, 12(6): 101080.
- Tariq, S., Ul-Haq, Z., Mahmood, K., & Rana, A. D. 2018. Spatio-temporal distributions and trends of aerosol parameters over Pakistan using remote sensing. *Applied Ecology & Environmental Research*, 16(3).
- Teillet, P. M., Staenz, K., & William, D. J. 1997. Effects of spectral, spatial, and radiometric characteristics on remote sensing vegetation indices of forested regions. *Remote Sensing of Environment*, 61(1): 139-149.
- Thenkabail, P. S., Smith, R. B., & De Pauw, E. 2002. Evaluation of narrowband and broadband vegetation indices for determining optimal hyperspectral wavebands for agricultural crop characterization. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 68(6): 607-622.
- Tucker, C.J. 1979. Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation, *Remote Sensing of Environment*, 8, 127-150.
- Valsaraj, K. T., Kommalapati, R. R., & Kommalapati, R.R. 2009. *Atmospheric aerosols: Characterization, chemistry, modeling, and climate*, (Vol. 1005). USA: Oxford University Press.
- Wang, H., Yang, L., Zhao, M., Du, W., Liu, P., & Sun, X. 2019. The normalized difference vegetation index and angular variation of surface spectral polarized reflectance relationships: Improvements on aerosol remote sensing over land. *Earth and Space Science*, 6(6): 982-989.
- Yang, Y., Zhao, C., Dong, X., Fan, G., Zhou, Y., & Wang, Y. 2019. Toward understanding the process-level impacts of aerosols on microphysical properties of shallow cumulus cloud using aircraft observations. *Atmospheric Research*, 221, 27–33.
- Yoo, D. 2019. Geographically Weighted Regression: A Method for Spatial Analysis in Socio-Historical Research. *Arch Iran Med*, 22(3): 155-160.
- Zhang, W., He, Q., Wang, H., Cao, K., & He, S. 2018. Factor analysis for aerosol optical depth and its prediction from the perspective of land-use change. *Ecological indicators*, 93, 458-469.
- Zhang, Z., Xiong, J., Fan, M., Tao, M., Wang, Q., & Bai, Y. 2023. Satellite-observed vegetation responses to aerosols variability. *Agricultural and Forest Meteorology*, 329, 109278.