



Dust Source Identification Using Spatiotemporal Tensor of Aerosol Optical Depth in Ilam County

Ramin Karami¹ , Hossein Etemadfar^{2*} 

¹ MSc Student of GIS, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

^{2*} Assistant Professor of GIS, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

ARTICLE INFO

Article History:

Received: 17 June 2023

Revised: 23 August 2023

Accepted: 15 October 2023

Available Online: 21 March 2025

Keywords:

AOD

Wind Speed

MODIS

Spatio-Temporal Analysis

ABSTRACT

One of the factors of air pollution is the phenomenon of dust, which has caused a lot of damage to various economic, social and human resources. The phenomenon of dust occurs in parts of the world, including arid and semi-arid regions, which is caused by natural and human factors. This research has identified the origin of dust in Ilam city using spatio-temporal tensor of aerosol optical depth (AOD) with Madis sensor data in the period from March to June 2022. First, dusty days were extracted from meteorological data and the spatio-temporal tensor of aerosol optical depth was produced. The reason for using the tensor was to examine the changes of a large volume of data in a spatial and temporal manner in a study period simultaneously. The results of comparing the relevant tensor with the corresponding meteorological data showed that whenever the aerosol optical depth is higher than 0.5, there is dust in that range. The spatio-temporal dust tensor analysis showed that the amount of dust is directly related to the wind speed and when the wind speed exceeds 15 m/s, dust occurs. Finally, by identifying the spatial changes of AOD, there are four sources of dust (Beld, Mesopotamia, Misan, and Wasit) in the study area, and Mesopotamia was identified as one of the potential dust areas. The analysis of the time pattern of AOD indicates its increasing trend in May. The highest value of AOD with 3.85 in May indicates the amount of dust. By examining the correlation between Ilam dust and the identified centers, the regression model of Ilam city is more related to Wasit region and its correlation coefficient is 82.96%.

*Corresponding author: Dr. Hossein Etemadfar

E-mail address: etemadfar@um.ac.ir

How to cite this Article: Etemadfar, H., & Karami, R. (2025). Dust Source Identification Using Spatiotemporal Tensor of Aerosol Optical Depth in Ilam County. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, ?(?), ??-??. <https://doi.org/10.22067/geoeh.2023.82988.1383>



©2025 The author(s). This is an open access article distributed under Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0)

Extended Abstract

Introduction

Dust storms are among the most significant atmospheric hazards in arid and semi-arid regions, often causing substantial environmental and socio-economic damage. This phenomenon is particularly prevalent along the global dust belt, stretching from the western coasts of North Africa to the Middle East. Dust particles suspended in the atmosphere may originate from natural sources such as soil erosion and volcanic activity, as well as anthropogenic pollutants. In western Iran, especially in Ilam Province, dust storms primarily originate from neighboring Iraq. Due to the region's climatic conditions and lack of adequate infrastructure, Ilam is highly vulnerable to frequent and intense dust storm events. Recent research has demonstrated the growing application of remote sensing data and geospatial information systems (GIS) for monitoring and analyzing dust phenomena across Iran. In this context, several studies have focused on the spatial and temporal analysis of dust events in various parts of the country. The present study specifically investigates the spatiotemporal variability of dust storms in Ilam County. Utilizing MODIS satellite imagery and tensor analysis tools within the Google Earth Engine (GEE) platform, this research aims to assess dust distribution patterns over time and space. The findings help identify primary dust sources and characterize the temporal evolution and spatial extent of dust activity in the region, resulting in the development of detailed spatiotemporal dust distribution maps for Ilam. This section outlines the study area, datasets, proposed methods, and data preprocessing steps undertaken for the analysis. Ilam County is located in the northwest of Ilam Province, Iran. It is bordered by Eyvan County to the north, Sirvan to the east, Mehran to the south, and Iraq to the west. The region features a temperate mountainous climate, with an average annual precipitation of approximately 619 millimeters and absolute temperature extremes ranging from -13°C to 41°C. Geographically, Ilam County holds strategic significance due to its shared border with Iraq, a primary contributor to dust generation in the Middle East. Given the transboundary nature of dust transport in this region, the spatial extent of the study area was expanded to include zones adjacent to the Iraqi border. This allowed for a more comprehensive analysis of the spatiotemporal distribution of dust storms affecting Ilam.

Material and Methods

Satellite Data and Processing Workflow

This study utilizes satellite data acquired from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) sensor, which is mounted on NASA's Terra and Aqua satellites for global atmospheric monitoring. MODIS features 36 spectral bands with varying spatial resolutions. For the retrieval of dust-related parameters, the Deep Blue (DB) algorithm was employed to extract the Aerosol Optical Depth (AOD) index, which quantifies the concentration of airborne particulate matter. The primary dataset used in this research is the MCD19A2 daily AOD product, originally provided at a spatial resolution of 1 kilometer. For analytical purposes, the data were resampled to a 2-kilometer resolution to optimize computational efficiency. Dust storm days were identified and extracted within the Google Earth Engine (GEE) platform, and further processing and visualization were conducted using MATLAB software.

Google Earth Engine

Google Earth Engine (GEE) is a web-based cloud processing platform launched by Google in 2010, providing free and rapid access to remote sensing data. As one of the largest platforms for spatial data analysis, GEE is widely used in climate studies, meteorology, and remote sensing applications. Its use leads

to significant time, cost, and human resource savings, as well as enhanced accuracy in studies due to access to up-to-date and comprehensive data repositories.

Tensor Analysis

To simultaneously analyze spatial and temporal phenomena, multidimensional structures are required, which are provided by tensor analysis. In this study, a third-order (three-dimensional) tensor was employed in the MATLAB environment to model and analyze the data based on geographic latitude, longitude, and time. Unlike traditional statistical methods, the use of tensors enables the examination of complex spatiotemporal phenomena with greater precision and differentiation. Dust storms are not only a nuisance but also have profound environmental and human consequences. Identifying the origins of this phenomenon, particularly in the border regions of western Iran, such as Ilam County, is of critical importance. The majority of these dust storms originate from the deserts of Iraq, Saudi Arabia, and Syria, where poor water management practices and hydraulic construction projects have contributed to land degradation, making it more susceptible to dust production. In this study, we used remote sensing technology and the Google Earth Engine platform to investigate daily dust storm variations during the spring of 2022. Unlike previous studies that primarily focused on periodic or seasonal analyses, we employed daily MODIS satellite data in conjunction with tensor analysis to provide a more precise and visual representation of dust storm events. The tensor-based plots for March revealed two significant dust waves on the 4th and 6th of March, originating from the Wasit region of Iraq, which impacted Ilam County and the Maysan region. The intensity of the first wave was such that horizontal visibility in Ilam dropped to just 800 meters. The second wave, although less intense, was still notably impactful. In April, three distinct dust waves affected Ilam, originating from the Balad and Mesopotamian regions. These storms occasionally reduced horizontal visibility to as low as 500 meters. However, the most severe dust events occurred in May, with five consecutive waves originating from the Al Anbar, Wasit, and Maysan regions. On May 23, visibility in Ilam dropped to zero, marking the worst conditions during the study period. June also saw two waves originating from Balad and Maysan, with visibility in Ilam reduced to 2000 meters. The analysis showed that May recorded the highest Aerosol Optical Depth (AOD) values, indicating the greatest dust density.

Validation of Results

To validate our findings, the AOD data were cross-verified with ground station measurements from the source regions and Ilam. Specifically, a strong correlation was found between AOD variations in the Wasit region of Iraq and Ilam County. Regression modeling confirmed this correlation, indicating that whenever dust storms occur in the Wasit region, Ilam County is likely to be affected as well.

Conclusions

This study, utilizing spatiotemporal tensor analysis, successfully identified the origin and daily pattern of dust storms in Ilam County from March to June 2022. The data used in this research were extracted from the MODIS sensor (MCD19A2 product), and dust storm days were selected based on reports from the Meteorological Organization. A key advantage of applying tensor analysis in this study is its ability to simultaneously represent spatial and temporal variations of dust storms in a three-dimensional space, a feature not available in traditional two-dimensional methods, such as satellite imagery. This approach allowed for a precise examination of the dust storm origins on a daily basis, marking an innovative step in atmospheric monitoring. The results of the analysis revealed that the dust storm situation in the study area

was critical. Four major regions were identified as the primary sources of dust: Balad, Mesopotamia, Maysan, and Wasit. Among these sources, the Mesopotamian region played a dominant role, particularly in May, with an AOD index of 3.85, indicating the highest frequency and intensity of dust storms. Furthermore, correlation matrix analysis showed the most direct and significant relationship between dust storms in Ilam County and the Wasit region of Iraq. This study demonstrated that tensor analysis is a powerful tool for monitoring and forecasting dust storm behavior, offering valuable support for environmental policymakers and disaster management authorities in making informed, scientific decisions. It is recommended that future studies incorporate additional variables such as temperature, vegetation cover, wind patterns, and climate change to develop more comprehensive models for dust storm monitoring.



شناسایی منشأ گردوغبار با استفاده از تنسور مکانی-زمانی عمق اپتیکی آئروسول در محدوده شهرستان ایلام

رامین کرمی^۱، حسین اعتمادفر^{۲*}

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد سیستم اطلاعات مکانی، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

^۲ استادیار سیستم اطلاعات مکانی، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۲۷ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۶/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۷/۲۳	یکی از عوامل آلودگی هوا پدیده گردوغبار می باشد که باعث خسارات زیادی به منابع اقتصادی، اجتماعی و انسانی مختلف شده است. پدیده گردوغبار در بخش هایی از جهان از جمله مناطق خشک و نیمه خشک رخ می دهد که از عوامل طبیعی و انسانی ناشی می شود. این پژوهش به شناسایی منشأ گردوغبار در محدوده شهرستان ایلام با استفاده از تنسور مکانی-زمانی عمق اپتیکی آئروسول (AOD) با داده های سنجنده مادیس در دوره زمانی ماه های مارس تا ژوئن ۲۰۲۲ پرداخته است. ابتدا از داده های هواشناسی، روزهایی پر گردوغبار استخراج شده و تنسور مکانی-زمانی عمق اپتیکی آئروسول تولید شد. دلیل استفاده از تنسور، بررسی تغییرات حجم عمده ای از داده ها به صورت مکانی و زمانی در یک دوره مطالعاتی به طور هم زمان بوده است. نتایج مقایسه تنسور مربوطه با داده های هواشناسی متناظر نشان داد که هرگاه عمق اپتیکی آئروسول از ۰/۵ بالاتر باشد، گردوغبار در آن محدوده وجود دارد. تحلیل تنسور مکانی-زمانی گردوغبار نشان داد که میزان گردوغبار با سرعت باد ارتباط مستقیم دارد و هرگاه سرعت باد از ۱۵ متر بر ثانیه عبور کند، گردوغبار رخ می دهد. در نهایت با شناسایی تغییرات مکانی AOD چهار منبع گردوغبار (بلد، بین النهرین، میسان و واسط) در محدوده مطالعاتی وجود دارد که بین النهرین به عنوان یکی از مناطق بالقوه گردوغبار شناسایی شد. تحلیل الگوی زمانی AOD حاکی از روند افزایشی آن در ماه می است. بیشترین مقدار AOD با ۳/۸۵ در ماه می نشان دهنده میزان گردوغبار زیادی است. با بررسی همبستگی بین گردوغبار ایلام و مراکز شناسایی شده، مدل رگرسیونی شهرستان ایلام ارتباط بیشتری با منطقه واسط دارد و ضریب همبستگی آن ۸۲/۹۶ درصد است.

مقدمه

یکی از مخاطرات جوی، ذرات ریزگردها هستند که در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان رخ می‌دهند (Goudarzi, Shirmardi, Naimabadi, Ghadiri & Sajedifar, 2019; Middleton, 2017; Rezaei Moghaddam, Sedighi, Fasihi & Karimi Firozjaei, 2018). به ذرات معلق به قطر ۱۲ میکرون یا بیشتر، ریزگرد گویند (Chung, Kim, Jugder, Natsagdorj & Chen, 2003). مهم‌ترین مناطق مستعد این رخداد در کمربند جهانی ریزگرد از سواحل غربی شمال آفریقا تا خاورمیانه گسترش یافته است (Formenti et al., 2011; Shi, Zhang, Yao, Zhang & Guo, 2021). ریزگردها باعث خسارات زیادی از جمله آسیب رساندن به محصولات کشاورزی، کاهش دید افقی، آسیب رساندن به حمل‌ونقل زمینی و هوایی و مهاجرت افراد به سایر نقاط کشور شده است (Lee, Kim, Honda, Lim & Yi, 2013). باتوجه به مطالعات انجام شده، طوفان ریزگرد در غرب ایران بیشتر از عراق و سوریه و کمتر از کشورهای عربستان و کویت سرچشمه می‌گیرد (Ashrafi, Shafiepour-Motlagh, Aslemand & Ghader, 2014; Taghavi, Owlad & Ackerman, 2017). ذرات ریزگرد از انواع مختلف ذرات معلق در هوا شامل گردوغبار، خاکستر آتشفشان‌ها و آلاینده‌های انسانی (سوزاندن سوخت فسیلی) تشکیل شده‌اند که تمرکز این پژوهش بر روی بررسی گردوغبار است.

سازمان جهانی هواشناسی (WMO: World Meteorological Organization) وقوع گردوغبار را نتیجه آشفستگی جریان جوی به اتمسفر معرفی می‌کند و در صورتی که دید افقی به کمتر از هزار متر برسد و همچنین سرعت باد از ۱۵ متر بر ثانیه تجاوز کند پدیده گردوغبار رخ خواهد داد (Al-Hemoud et al., 2019). پدیده گردوغبار توسط وزش بادهای شدید در مناطق بیابانی تشدید می‌شود. این پدیده در کشورهای غربی ایران (عراق) با هدایت گرمای شدید هوا و الگوهای همدیدی غرب و جنوب غرب ایران را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. به دلیل فقدان زیرساخت‌های کافی در کشور عراق در زمینه‌های مدیریت بحران‌های زیست محیطی و مخاطرات طبیعی و همچنین وجود مرز مشترک بین استان ایلام با کشور عراق، استان ایلام متأثر از گردوغبارهای ناشی از آن منطقه می‌باشد (Goodarzi, Hoseini & Ahmadi, 2018).

تحقیقات متعددی در زمینه مطالعه پدیده گردوغبار از نظر کمی و کیفی انجام شده است. درصد بالایی از مطالعات پیشین به وسیله قابلیت‌های سنجش‌ازدور، سیستم اطلاعات مکانی و ایستگاه هواشناسی برای بررسی و تشخیص گردوغبار استفاده کرده‌اند. گروهی دیگر نیز سعی در تهیه نقشه پهنه‌بندی گردوغبار در مناطق مختلف کشور داشتند که این بررسی‌ها به صورت فصلی و دوره‌ای صورت گرفته است (Azimzadeh, Montazerghaem, Torabi Mirzaei & Tajalian, 2010; Abedzadeh, 2005).

محمدی و زرگری (Mohammadi & Zargari, 2014) در استان تهران به تحلیل مکان - زمان گردوغبار پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد ایستگاه ابعلی با تعداد ۱۰۹ روز در سال دارای بیشترین تعداد روزهای دارای گردوغبار است. همچنین گودرزی و همکاران (Goodarzi et al., 2018) توزیع زمانی و مکانی روزهای همراه با گردوغبار را در غرب و جنوب غرب ایران و در سطح ایستگاه‌های هواشناسی واقع در سه استان ایلام، خوزستان و کرمانشاه مورد بررسی قرار دادند. چمن‌پیرا و همکاران (Chamanpira, Karimi Sangchini & Norouzi, 2021) به تحلیل زمانی و مکانی گردوغبار جهت کنترل ریسک، در راستای آمایش و توسعه پایدار در یک دوره زمانی ۱۷ ساله از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۶ پرداختند و نتایج آن نشان داد که ایستگاه خرم‌آباد با فراوانی ۴۵ روز در سال بیشترین تعداد روزهای گردوغبار را در کل استان دارد.

کیم (Kim, 2008) منشاء طوفان‌های گردوغبار آسیایی را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در کره جنوبی بررسی نمود و نتایج آن نشان داد که ۸۷ درصد از رخدادهای ریزگرد در فصل بهار بوده است. علم و همکاران (Alam, Qureshi & Blaschke, 2011) از حسگرهای Misr, Toms, Modis برای بررسی تغییرات فضایی در چندین شهر پاکستان استفاده کردند که نتایج نشان داد در فصل‌های زمستان و تابستان بیشترین مقدار گردوغبار را دارند. استفانیسکی و همکاران (Schepanski, Tegen & Macke, 2012) در پژوهشی در جنوب صحرای آفریقا نشان دادند که زمان شروع یک پدیده گردوغبار در توزیع مکانی آن نقش به‌سزایی دارد. نامداری

و همکاران (Namdari, Valizade, Rasuly & Sari Sarraf, 2016) با استفاده از میانگین ماهانه عمق اپتیکی گردوغبار (AOD) به بررسی و توزیع زمانی و مکانی گردوغبار در بخش‌های غربی طی دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۴ پرداختند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد در بیشتر سال‌ها، جولای بیشترین میانگین AOD را دارد.

نامداری و همکاران (Namdari, Karimi, Sorooshian, Mohammadi & Sehatkashani, 2018) رابطه بین غلظت گردوغبار، بارش و دما را در خاورمیانه با استفاده از سنجنده مادیس و ایستگاه‌های سینوپتیک بررسی کردند. کین و همکاران (Qin et al., 2018) تغییرات مکان - زمان AOD در چین با استفاده از سنجنده Merra, Modis از سال ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۷ ارزیابی کردند و نتایج آن‌ها نشان داد که AOD در حال افزایش است. کرمی و همکاران (Karami, Hossein Hamzeh, Alam, Noori & Ranjbar Saadat, 2021) گردوغبار را در سه جزیره ایران شامل قشم، کیش و خارک با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در یک بازه ده‌ساله بررسی کردند که نتایج نشان داد بیشترین مقدار AOD در ماه جولای اتفاق افتاده است.

در سال‌های گذشته گردوغبار به صورت محلی از ایستگاه‌های زمینی که فقط بخش کوچکی را پوشش می‌دهند، پایش شده است؛ اما امروزه از تصاویر ماهواره‌ای برای ارزیابی گردوغبار به صورت مکانی و زمانی استفاده می‌شود.

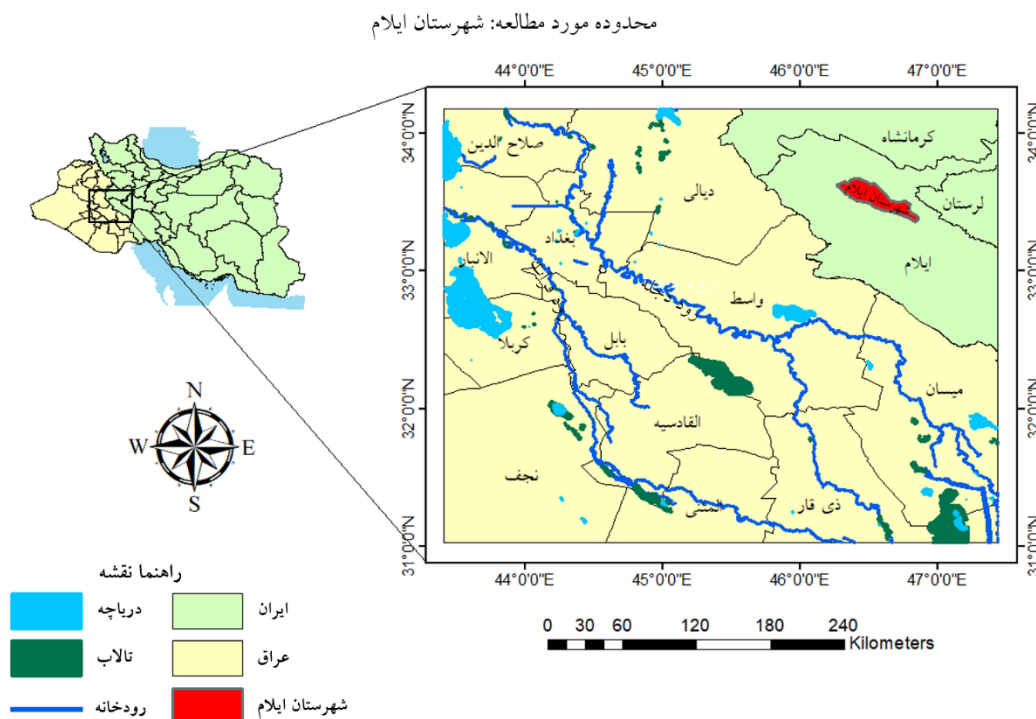
این پژوهش به شناسایی و بررسی روند تغییرات گردوغبار در شهرستان ایلام پرداخته است. ایلام در غرب کشور و هم مرز با کشور عراق است که این کشور به عنوان منشأ گردوغبار شناخته می‌شود. به همین دلیل بررسی تغییرات گردوغبار در این شهرستان امری ضروری است. در پژوهش‌های پیشین جهت بررسی پدیده گردوغبار از ایستگاه‌های هواشناسی و تصاویر ماهواره‌ای استفاده شده است. اما در پژوهش حاضر به بررسی روند تغییرات مکانی-زمانی گردوغبار در شهرستان ایلام با استفاده از سامانه گوگل ارث انجین (GEE) و داده‌های سنجنده مادیس (شاخص AOD) با استفاده از ابزار تنسور، پرداخته شده است. در مطالعات صورت گرفته جهت شناسایی منابع گردوغبار با استفاده از مجموعه داده‌های هواشناسی و تصاویر ماهواره‌ای و رویکردها، هیچ نقشه جامعی از منابع گردوغبار در غرب کشور (شهرستان ایلام) با استفاده از تنسور وجود ندارد. به همین دلیل در این پژوهش از تنسور جهت نمایش هم‌زمان تغییرات مکانی-زمانی گردوغبار استفاده شده است. در این پژوهش روزهای دارای گردوغبار بر اساس آمار اخذ شده از سازمان هواشناسی استان ایلام، مشخص گردید، سپس با استفاده از تنسور منشأ و تغییرات مکانی-زمانی آن طی بازه‌های زمانی مختلف از ماه مارس تا ژوئن ۲۰۲۲ مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش‌ها

در این بخش محدوده مطالعاتی، داده‌های مورد استفاده در این مطالعه، سپس روش‌های پیشنهادی و نیز نحوه آماده‌سازی داده‌ها جهت استفاده، مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

منطقه مورد مطالعه

شهرستان ایلام در شمال غربی استان ایلام قرار دارد که از شمال به شهرستان ایوان، از شرق به سیروان، از جنوب به مهران و از غرب به کشور عراق محدود می‌شود که در 33° و 38° عرض شمالی و 46° و 25° طول شرقی، در ارتفاع ۱۴۴۰ متری از سطح دریا واقع شده است. شهر ایلام با این که در دشت ایلام قرار گرفته، از جمیع جهات به وسیله کوه‌های منفرد و ارتفاعات جنگلی احاطه شده است که دارای آب‌وهوای معتدل کوهستانی با میانگین بارش سالانه ۶۱۹/۵ میلی‌متر و متوسط دمای مطلق آن از $13/6^{\circ}$ - تا $41/2^{\circ}$ درجه سانتی‌گراد در تغییر است. وسعت این شهرستان ۲۱۵۸ کیلومترمربع و جمعیت این شهر که در ۱۳۳۵ شمسی، ۸۳۴۶ نفر بود، در ۱۳۹۵ شمسی، به ۲۲۴۵۹۰ نفر افزایش یافت. در حال حاضر شهرستان ایلام به عنوان مرکز سیاسی-اداری استان ایلام شناخته شده است و از آنجا که هم‌مرز کشور عراق می‌باشد از اهمیت بالایی برای شناسایی و بررسی منشأ گردوغبار برخوردار است. شکل ۱ موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعاتی را نمایش می‌دهد.



شکل ۱- محدوده مطالعاتی پژوهش شهرستان ایلام

Fig. 1. Study area of Ilam county research

همانطور که در شکل ۱ نمایش داده شده است، استان ایلام هم‌مرز با کشور عراق و نزدیک به کشورهای عربستان و کویت می‌باشد که این کشورها منابع اصلی گردوغبار در خاورمیانه هستند. از آنجایی که بیشتر طوفان‌های گردوغبار شهرستان ایلام در مرز استان ایلام قرار دارد (Goudie & Middleton, 2001; Shahsavani et al., 2012; Draxler, Gillette, Kirkpatrick & Heller, 2001)، به همین دلیل برای تحلیل مکانی-زمانی گردوغبار، وسعت منطقه مطالعاتی تا کشور عراق گسترش داده شد.

داده‌ها

در پژوهش حاضر از داده‌های ماهواره‌ای مربوط به سنجنده مادیس (Modis) استفاده شده است که بر روی دو ماهواره ترا در سال ۱۹۹۹ و اکوا در سال ۲۰۰۲ برای پایش ویژگی اتمسفر در مقیاس جهانی طراحی شده است. محصولات این سنجنده از ۳۶ باند طیفی، با قدرت تفکیک مکانی ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ متر تشکیل شده است (Remer, Tanré, Kaufman, Levy & Mattoo, 2006). برای بازیابی گردوغبار، سنجنده مادیس از دو الگوریتم دارک تارگت (DT) و آبی عمیق (DB) استفاده می‌کند که در این تحقیق از الگوریتم DB برای بازیابی مقدار AOD استفاده شده است. شاخص AOD یک پارامتر بدون بُعد است که تراکم ذرات معلق در هوا را مشخص می‌کند؛ به صورتی که هرچه مقدار این شاخص بیشتر باشد، نور خورشید به میزان کمتری به زمین خواهد رسید (Stafoggia et al., 2019; Lyapustin, Wang, Korkin & Huang, 2018). برای پردازش داده‌های مادیس از محصولات توسعه داده شده MCD19A2 (به صورت روزانه و با قدرت تفکیک مکانی یک کیلومتر) استفاده شده است (Wang, Zhou & Dong, 2006) و به منظور کاهش حجم داده‌ها برای پردازش و تحلیل، در این تحقیق از شاخص AOD سنجنده مادیس که قدرت تفکیک مکانی آن به دو کیلومتر تبدیل شده است، استفاده شد. در واقع روش کلی این تحقیق بدین صورت است که بعد از شناسایی روزهای گردوغبار در

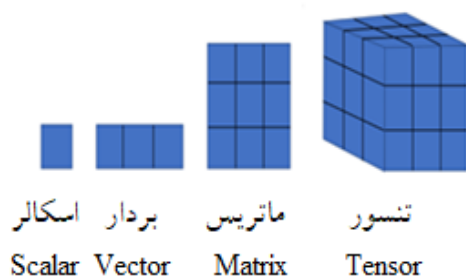
سامانه گوگل ارث انجین، تصاویر (شاخص AOD) از سنجنده مادیس اخذ شد و در محیط برنامه‌نویسی متلب مورد پردازش قرار گرفت و نمایش داده شد.

گوگل ارث انجین

گوگل ارث انجین یک سکوی ابری مبتنی بر وب می‌باشد که در سال ۲۰۱۰ توسط گوگل راه‌اندازی شده است که به صورت متن‌باز از محاسبات گوگل استفاده می‌کند (Gorelick et al., 2017; Soleimany, Grubliauskas & Šreivičienė, 2021). این سامانه یکی از بزرگ‌ترین سکوه‌های پردازش داده‌های سنجش‌ازدور است که به کاربران در دسترسی رایگان به داده‌ها کمک می‌کند (Amani et al., 2020). همچنین این سامانه یک بستر محاسباتی برای پردازش داده‌های بزرگ در مقیاس جهانی می‌باشد. سامانه مذکور برای دریافت اطلاعات و داده جهت بررسی موضوعات مختلف در زمینه‌های اقلیمی، آب‌وهواشناسی و به‌طور کلی سنجش‌ازدور به کار می‌رود. استفاده از این سامانه باعث کاهش زمان پردازش داده‌ها و بهبود دقت مطالعات (به دلیل به‌روز بودن پایگاه داده) شده و در کل باعث صرفه‌جویی در زمان، هزینه و نیروی انسانی می‌شود.

تنسور

تحلیل‌های مکانی و زمانی یک پدیده بر اساس موقعیت جغرافیایی و زمان (اعم از تاریخ و ساعت) آن بررسی می‌شود. اینگونه تحلیل‌ها همواره نیازمند نمایش موقعیت آن پدیده است که متناسب با رفتار آن پدیده در یک، دو و سه بُعد (طول، عرض و ارتفاع) بیان می‌گردد و بررسی یک پدیده در طول زمان نیز نیازمند نمایش یک بُعد دیگر است. به همین دلیل آنالیزها در تحقیقات پیشین؛ مانند تحلیل‌های آماری، امکان بررسی یک پدیده را به طور توأما در طول مکان و زمان میسر نمی‌کند. عناصر مختلف مکان-زمان در تجزیه و تحلیل پدیده‌های مکانی پیچیده و دشوار است (Li et al., 2020) و مستلزم توسعه ساختار چندبُعدی است که استفاده از تنسور این امکان را فراهم می‌کند. در تعاریف پایه مربوط به تنسور، تنسور مرتبه صفر، اول و دوم را به ترتیب اسکالر، بردار و ماتریس شناخته می‌شوند و تنسور مرتبه سوم در این تحقیق با عنوان تنسور نامیده می‌شود که در شکل ۲ فرم نمایشی آنها آورده شده است.



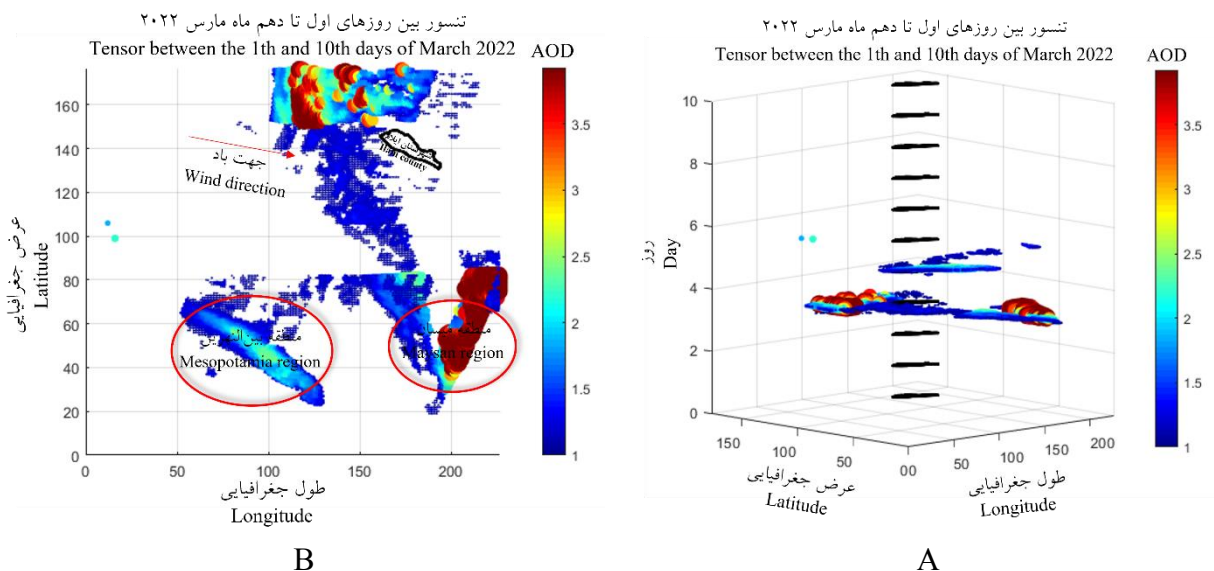
شکل ۲- نمایش ابعاد مختلف جهت ذخیره‌سازی اطلاعات

Fig. 2. Display of different dimensions for storing information

در شکل ۲ اسکالر، بردار، ماتریس و تنسور به ترتیب جهت ذخیره‌سازی اطلاعات در تنسور مرتبه صفر، تنسور مرتبه یک، تنسور مرتبه دو و در تنسور مرتبه سه را تشکیل می‌دهد (Golmohammadi, Etemadfrad & Kharaghani, 2023). در این پژوهش از تنسور مرتبه سه (در محیط برنامه‌نویسی متلب) استفاده شده است. همانطور که اشاره شد با بررسی مطالعات مکان-زمان و با افزایش مؤلفه‌های آن، تنسور این امکان را با افزایش ابعاد میسر می‌کند. همچنین با استفاده از تنسور می‌توان بین پدیده‌ها تمایز قائل شد به نحوی که دو عارضه متفاوت با طول و عرض جغرافیایی یکسان و ارتفاع متفاوت را بررسی نمود.

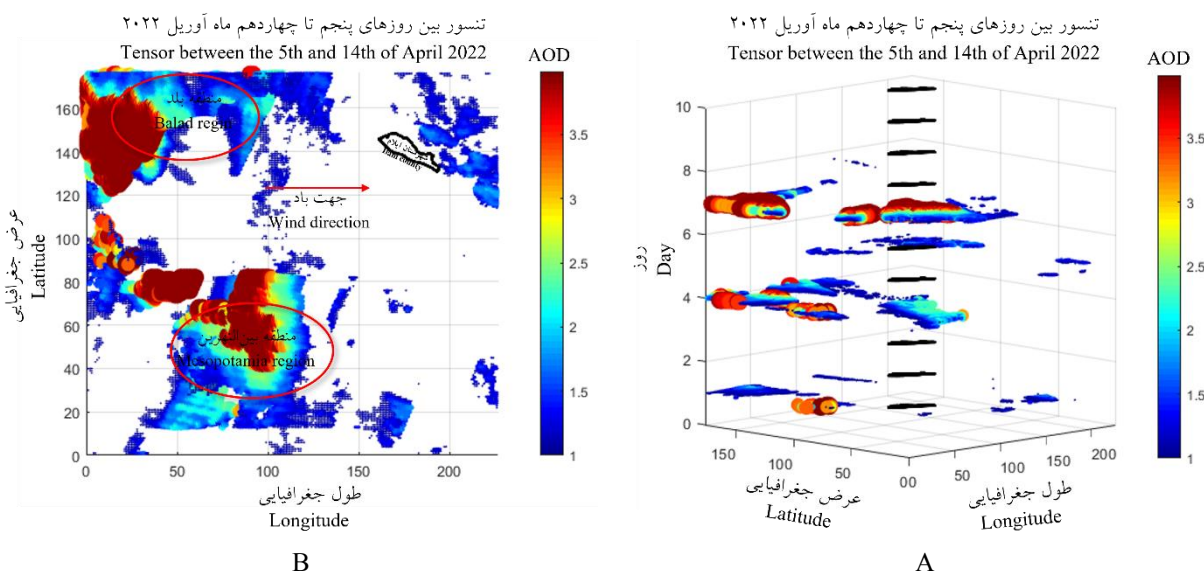
پیاده‌سازی و ارزیابی نتایج عددی

گردوغبار پیامدهای نامطلوب بسیاری به همراه دارد، به همین دلیل شناسایی منابع گردوغبار و تأثیر آن بر زندگی انسان و محیط‌زیست در مناطق مختلف کشور امری ضروری است. بررسی بسیاری از محققان نشان می‌دهد که گردوغبار مؤثر بر غرب کشور از خاورمیانه و کشورهای (عراق، عربستان، سوریه) سرچشمه می‌گیرد (Soleimany, Solgi, Ashrafi, Jafari & Grubliauskas, 2022). در کشور عراق ساخت سازه‌های هیدرولیکی و عدم مدیریت منابع آبی (Hamidi, Kavianpour & Shao, 2013) منجر به افزایش دشت‌های آبرفتی و سیلابی در نواحی بین‌النهرین (دو رودخانه دجله و فرات) که نقش مهمی در انتشار گردوغبار دارند، شده است (Mianabadi & Amini, 2019; Khalid, 2020). توزیع مکانی و شرایط پوشش اراضی منابع گردوغبار نشان‌دهنده این است که ستون گردوغبار از منابع خاصی منشاء می‌گیرد. پژوهش‌هایی که در گذشته انجام شده است به‌صورت موردی با تحلیل‌های آماری و تصاویر ماهواره‌ای انجام شده است، که روش‌های سنجش‌ازدور به‌عنوان جایگزین مناسبی جهت بررسی تغییرات گردوغبار است (Yu, Kalashnikova, Garay, Lee & Notaro, 2018). در بررسی‌های گذشته از قابلیت سنجش‌ازدور با گوگل ارث انجین در بررسی تغییرات به‌صورت میانگین فصلی و دوره‌ای استفاده شده است (Ali Bakhshi, Azizi, Vafaeinejad & Aghamohammadi Zanjirabadi, 2020)؛ اما در پژوهش حاضر تغییرات به‌صورت روزانه مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. در اینجا با استفاده از داده‌های روزانه سنجنده مادیس به‌عنوان یک تصویر در طی دوره زمانی از ماه مارس تا ژوئن، به تحلیل و بررسی تغییرات مکانی-زمانی گردوغبار با استفاده از تنسور پرداخته شد. مزیت استفاده از تنسور در این پژوهش، بررسی و تحلیل مکانی-زمانی و تغییرات روزانه گردوغبار در منطقه مطالعاتی می‌باشد. شکل ۳ نمایش تنسور بین روزهای اول تا دهم ماه مارس در سال ۲۰۲۲ می‌باشد. هرکدام از تصاویر لایه‌ها در تنسور نشان‌دهنده یک روز در بازه زمانی موردنظر است (هر تصویر از زمان آغاز بازه زمانی نشان‌دهنده یک روز یا یک‌لایه می‌باشد). برای درک بهتر تنسورها، مناطق با رنگ قرمز منشاء گردوغبار را نشان می‌دهند.



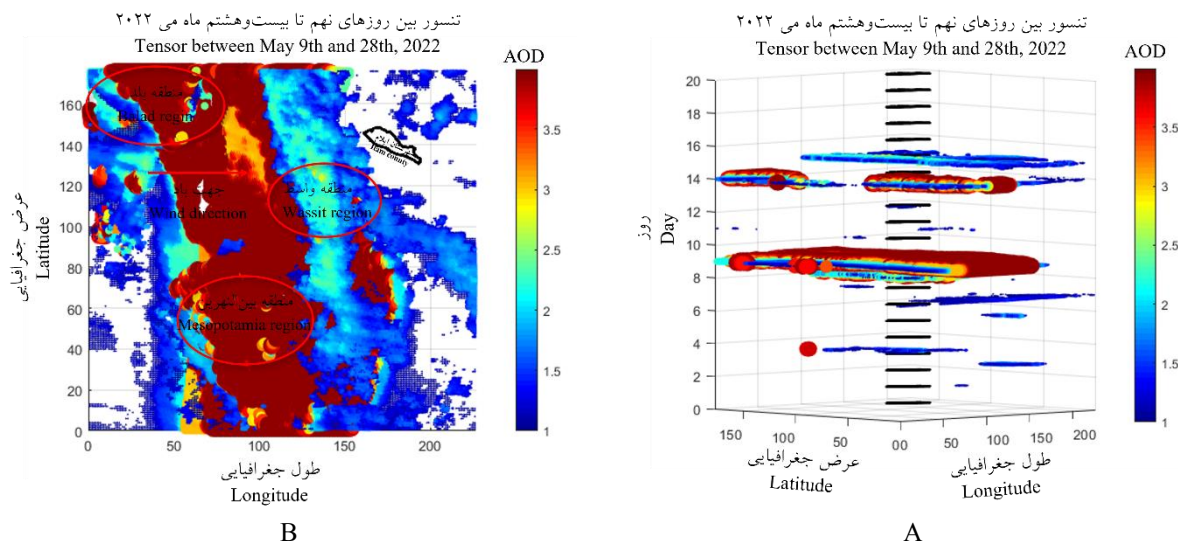
شکل ۳- تنسور بین روزهای ۲۰۲۲/۰۳/۰۱ تا ۲۰۲۲/۰۳/۱۰ (A: نمایش تنسور از سمت کنار، B: نمایش تنسور از سمت بالا)
Fig. 3. Tensor between 2022.03.01 and 2022.03.10, A) Tensor view from the side, B): Tensor view from the top

در شکل ۳ مشاهده می‌شود که دو موج گردوغبار شهرستان ایلام را تحت‌تأثیر قرار داده است. موج اول در تاریخ ۴ مارس در شرایطی رخ داده است که طبق گزارش اداره هواشناسی، دید افقی (فاصله ایست که یک شیء یا نور می‌تواند تشخیص داده شود) در این روز ۸۰۰ متر در شهرستان ایلام گزارش شده است و جهت باد غالب در این روز غربی بوده است. این موج از نواحی مرزی (بیابان‌های استان واسط عراق و شهرستان مهران)، واقع در شمال غربی ایلام در شهرستان قصرشیرین استان کرمانشاه مشاهده می‌شود. همچنین در جنوب شرقی منطقه مطالعاتی (منطقه میسان) هم منبع ریزگرد مشاهده می‌شود. موج دوم در تاریخ ۶ مارس از بین‌النهرین اتفاق افتاده است که با توجه به هوای ابری و بارانی ایلام با شدت کمی مشاهده شده است. دید افقی ۷۰۰۰ متر و جهت وزش باد غربی بوده است. شکل ۴ نمایش تنسور بین روزهای پنجم تا چهاردهم ماه آوریل در سال ۲۰۲۲ می‌باشد.



شکل ۴- تنسور بین روزهای ۲۰۲۲/۰۴/۰۵ تا ۲۰۲۲/۰۴/۱۴، A): نمایش تنسور از سمت کنار، B): نمایش تنسور از سمت بالا
Fig. 4. Tensor between 2022.04.05 and 2022.04.14, A): Tensor view from the side, B): Tensor view from the top

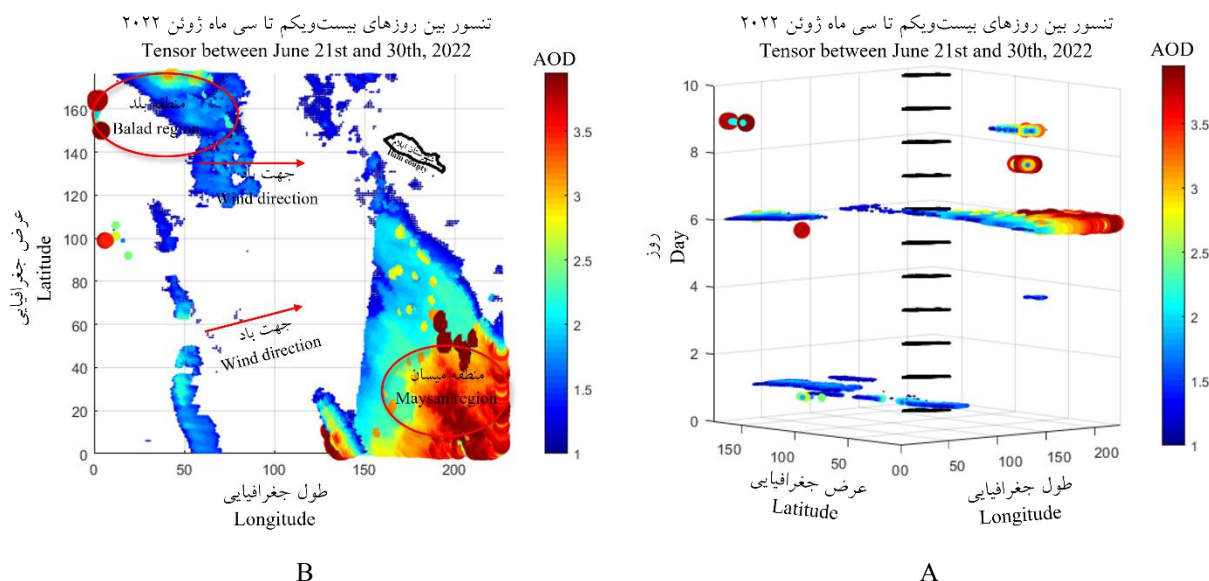
در شکل ۴ مشاهده می‌شود که سه موج گردوغبار در تاریخ‌های مختلف شهرستان ایلام را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد. موج اول در تاریخ ۶ آوریل از قسمت غربی منطقه شروع شده است و با توجه به جهت باد غربی در روز ۷ آوریل در ایلام با دید افقی ۶۰۰۰ مشاهده شده است. موج دوم در تاریخ ۹ آوریل از بیابان‌های بین‌النهرین و همچنین در بیابان‌های منطقه بلد در شمال غربی بغداد به‌عنوان منابع گردوغبار شناسایی شده‌اند. دید افقی در ۹ و ۱۰ آوریل به ۵۰۰ متر رسیده است. موج سوم در ۱۲ آوریل از بین‌النهرین و بلد به‌عنوان منبع گردوغبار شناسایی شده است. دید افقی در این روز در شهرستان ایلام ۲۰۰۰ متر گزارش شده است. شکل ۵ نمایش تنسور بین روزهای نهم تا بیست و هشتم ماه می در سال ۲۰۲۲ می‌باشد. در این تنسور شاهد افزایش روزهای گردوغبار و کاهش میزان دید به پایین‌ترین سطح در تاریخ ۲۳ می است.



شکل ۵- تنسور بین روزهای ۲۰۲۲/۰۵/۰۹ تا ۲۰۲۲/۰۵/۲۸، A): نمایش تنسور از سمت کنار، B): نمایش تنسور از سمت بالا

Fig. 5. Tensor between 2022.05.09 and 2022.05.28, A): Tensor view from the side, B): Tensor view from the top

در شکل ۵ همان‌طور که مشاهده می‌شود ۵ موج گردوغبار منطقه مورد مطالعه را تحت تأثیر قرار داده است. موج اول در تاریخ ۱۰ می از بیابان‌های الانبار شروع شده و در تاریخ ۱۱ می در ایلام با دید افقی ۱۵۰۰ متر و جهت غالب باد از غرب مشاهده شده است. موج دوم در تاریخ ۱۶ می از بین‌النهرین و حوالی مرز ایران در بیابان‌های استان واسط عراق با دید افقی ۲۰۰ متر و جهت باد از غرب شروع شده و به مدت دو روز در شهرستان ایلام ماندگار بوده است که روز دوم دید افقی ۵۰۰ متر است. موج سوم در تاریخ ۱۸ می از بیابان‌های بین‌النهرین و بلد شروع شده که به استناد گزارش هواشناسی ایلام دید افقی در این روز ۶۰۰۰ متر و جهت باد از غرب و شمال غربی بوده است و شهرستان ایلام زیاد تحت تأثیر این موج قرار نگرفته است. موج چهارم در منطقه بین‌النهرین از تاریخ ۲۰ می شروع شده است و در روز ۲۱ می در ایلام با دید افقی ۷۰۰ متر و جهت باد از غرب گزارش شده است. موج پنجم در تاریخ ۲۳ می از بین‌النهرین شروع شده است و به مدت دو روز در منطقه پایدار بوده است. بر اساس گزارش هواشناسی ایلام در روز اول دید افقی صفر و روز دوم دید افقی ۱۰۰ متر گزارش شده است و در روزهای بعدی از شدت آن کاسته شده است. شکل ۶ نمایش تنسور بین روزهای بیست و یکم تا سی ماه ژوئن در سال ۲۰۲۲ می‌باشد.

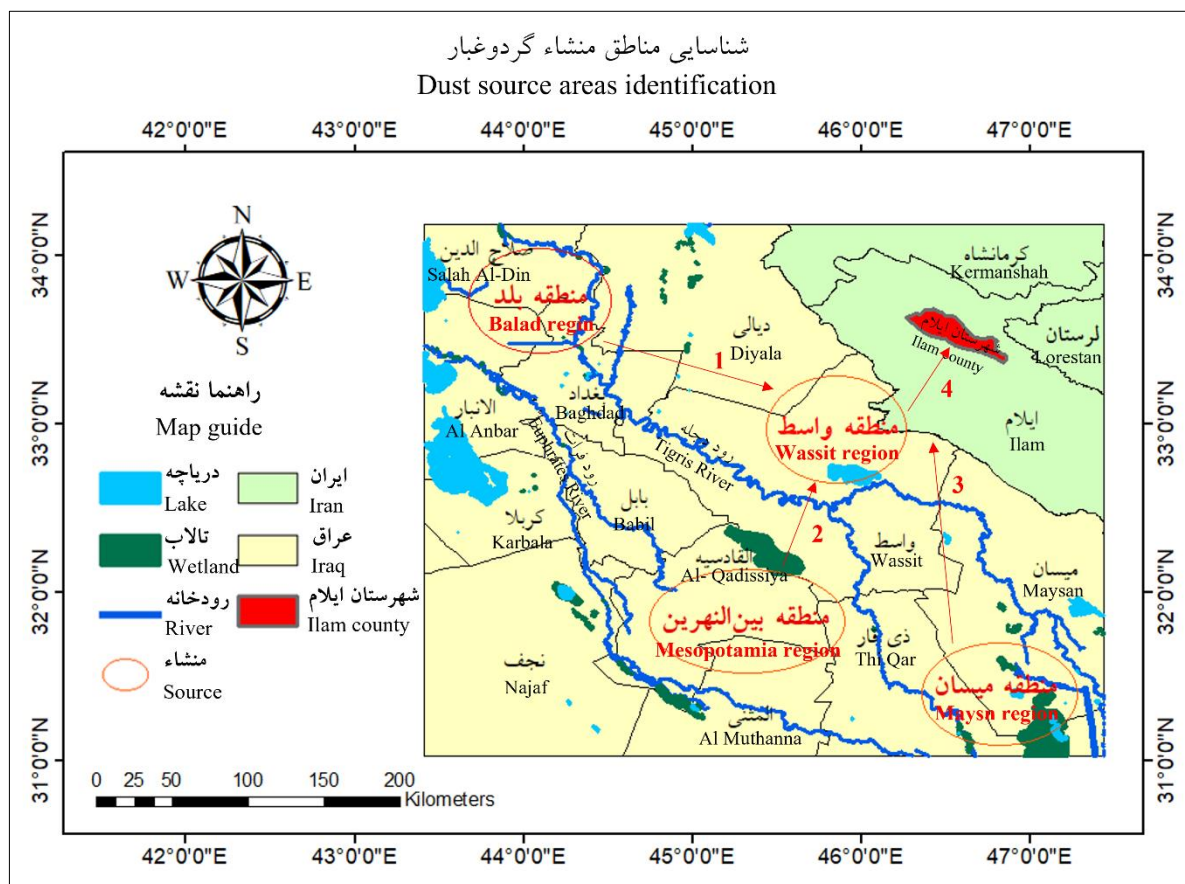


شکل ۶- تنسور بین روزهای ۲۱/۰۶/۲۰۲۲ تا ۳۰/۰۶/۲۰۲۲، A): نمایش تنسور از سمت کنار، B): نمایش تنسور از سمت بالا

Fig. 6. Tensor between 2022.06.21 and 2022.06.30, A): Tensor view from the side, B): Tensor view from the top

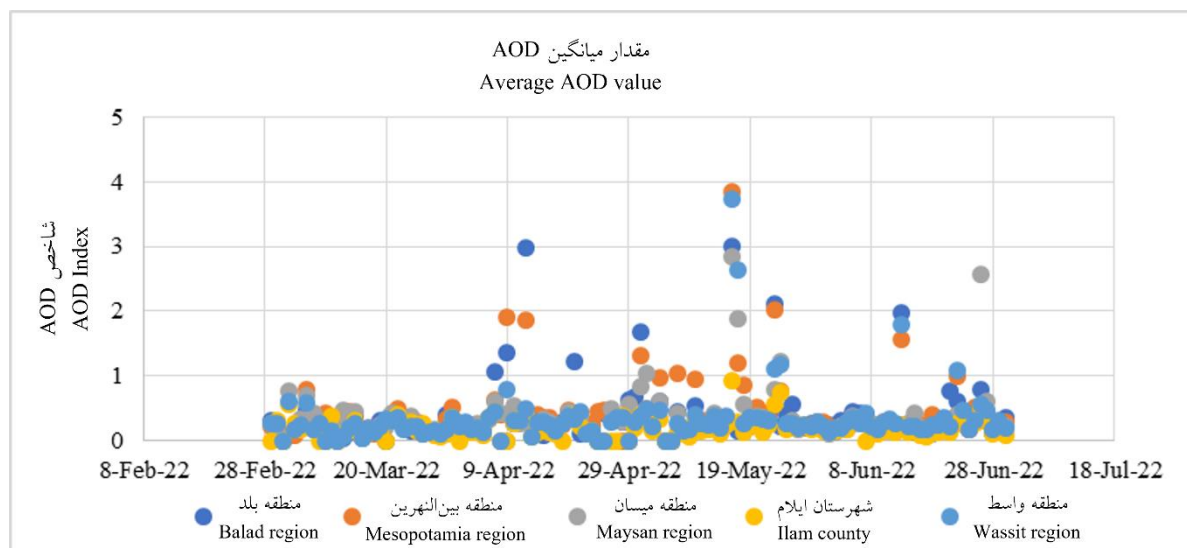
همچنان که از شکل ۶ مشخص است در روز ۲۲ ژوئن از منطقه بلد شروع شده است. موج دوم آن در ۲۶ ژوئن از منطقه میسان شروع شده که دید افقی در شهر ایلام به ۲۰۰۰ متر کاهش یافته است. با توجه به شکل‌های بررسی شده ماه می بیشترین مقدار AOD را نشان می‌دهد.

با توجه به نتایج، منطقه بین‌النهرین به‌عنوان یکی از مناطق بالقوه گردوغبار شناسایی شد. در بازه زمانی مورد مطالعه هرگاه در مناطق مختلف کشور عراق، سوریه و عربستان گردوغبار اتفاق افتاده است، در اواخر همان روز یا روز بعد بسته به سرعت و جهت باد، این پدیده با شدت‌های مختلف در شهرستان ایلام مشاهده می‌شود. شکل ۷ مناطق مشخص شده در محدوده مطالعاتی منشاء گردوغبار را نشان می‌دهند. همچنین جهت‌های مشخص شده، جهت حرکت گردوغبار را در مناطق منشاء مشخص می‌نمایند. شکل ۷ موقعیت جغرافیایی منشاء گردوغبار را در محدوده مطالعاتی مشخص می‌کند. همان‌طور که قابل مشاهده است، مناطق منشاء در کنار تالاب‌ها و دریاچه‌های خشک شده قرار دارند و به همین دلیل است که بین‌النهرین از مناطق بالقوه گردوغبار است. به منظور اعتبارسنجی نتایج با دسته مشاهده مستقل از داده‌های ماهواره‌ای، گزارش میانگین روزانه AOD ایستگاه‌های زمینی در نزدیکی مناطق منشاء و شهرستان ایلام مورد توجه قرار گرفت. شکل ۸ مقدار میانگین روزانه AOD در مناطق منشاء گردوغبار و ایلام را نشان می‌دهد.



شکل ۷- مناطق منشأ گردوغبار در محدوده مطالعاتی

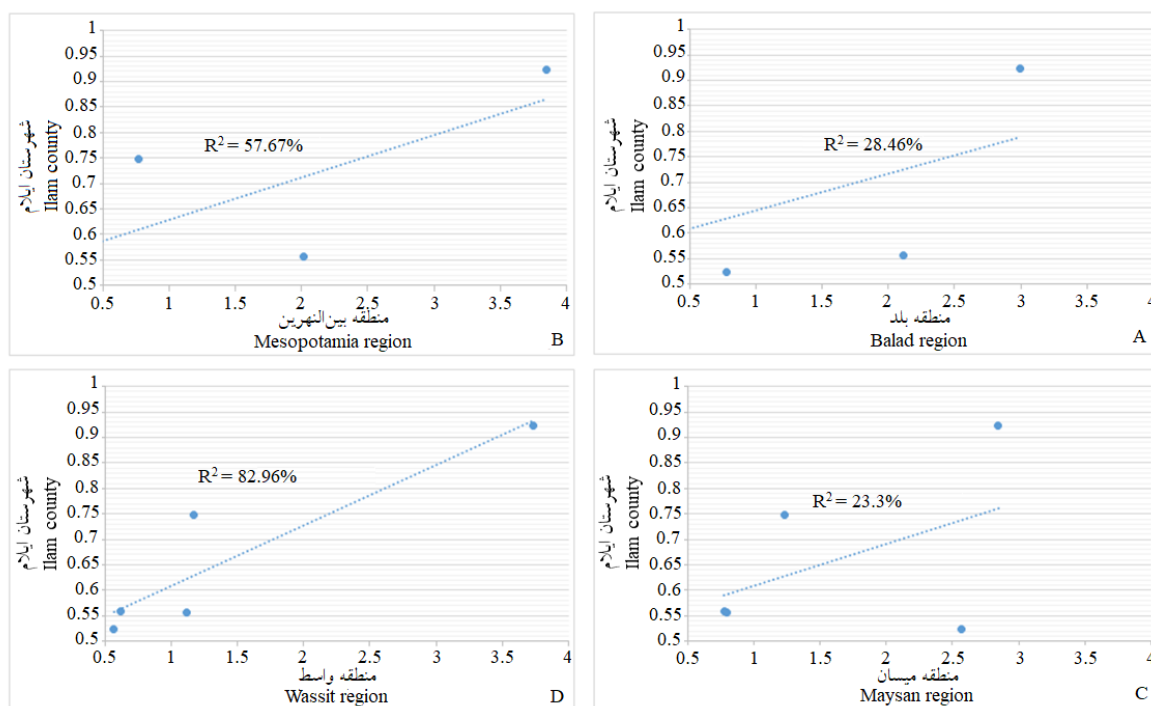
Fig. 7. Dust source areas in the study area



شکل ۸- مقدار میانگین روزانه AOD مناطق منشأ گردوغبار و شهرستان ایلام

Fig. 8. Daily average AOD value of dust source areas and Ilam county

در شکل ۸ سری زمانی تغییرات گردوغبار در مناطق منشاء و شهرستان ایلام را در سال ۲۰۲۲ به صورت میانگین روزانه نمایش داده است. در ماه آوریل گردوغبار در مناطق بلد و بین‌النهرین افزایش چشم‌گیری داشته که چندان منجر به آلودگی هوای ایلام نشده است. در ماه می بیشترین افزایش گردوغبار رخ داده است که علاوه بر دو منطقه فوق منطقه میسان نیز افزایش بسیار چشم‌گیری داشته است. در همان بازه زمانی افزایش شاخص AOD در شهرستان ایلام مشاهده شده است که به نوعی موید نتایج حاصل از تصاویر ماهواره‌ای هست. به منظور تخمین مدلی رگرسیونی از مقدار AOD محتمل در شهرستان ایلام، رابطه‌ای بین AOD مشاهده شده در منشأها با همان شاخص در شهرستان ایلام برآورد شده است. شکل ۹ مقایسه این مدل رگرسیونی را نشان می‌دهد. به منظور تولید این نمودار فقط داده‌هایی با AOD بیش از ۰/۵ که در شهرستان ایلام که مبین گردوغبار هستند در مدلسازی در نظر گرفته شده‌اند. در شکل ۹ با مقایسه مقدار AOD شهرستان ایلام با مناطق منشأ گردوغبار (منطقه میسان، واسط، بلد و بین‌النهرین)، همگرایی شهرستان ایلام با منطقه واسط به دست آمد. این بررسی نشان‌دهنده ارتباط مستقیم با منطقه واسط است به نحوی که هرگاه در منطقه واسط گردوغبار رخ دهد، در شهرستان ایلام نیز مشاهده خواهد شد.



شکل ۹- مدل‌های رگرسیونی شاخص AOD شهرستان ایلام با مناطق منشأ گردوغبار، (A): شهرستان ایلام با منطقه بلد، (B): شهرستان ایلام با منطقه بین‌النهرین، (C): شهرستان ایلام با منطقه میسان و (D): شهرستان ایلام با منطقه واسط

Fig. 9. Regression models of AOD index of Ilam county with dust source areas, A): Ilam county with Balad region, B): Ilam county with Mesopotamia region, C): Ilam county with Maysan region and D): Ilam county with Wasset region

نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به شناسایی منشأ گردوغبار با استفاده از تنسور مکانی-زمانی گردوغبار در شهرستان ایلام از مارس تا ژوئن پرداخته است. در این تحقیق از داده‌های روزانه MCD19A2 سنجنده مادیس استفاده شد که توزیع گردوغبار را به‌درستی نشان می‌دهد، داده‌های مورد مطالعه (روزهای دارای گردوغبار) بر اساس آمار سازمان هواشناسی شناسایی شد و در نهایت با استفاده از تنسور مکان-زمان، مورد تحلیل قرار گرفت. تنسور این قابلیت را دارد که تغییرات مکانی و زمانی پدیده‌ها را به‌درستی نمایش دهد. به کمک بررسی‌های آماری گذشته و تصاویر ماهواره‌ای، تغییرات موردنظر را می‌توان به‌صورت دوبعدی در یک بازه زمانی (روزانه، فصلی، سالانه) نشان داد که به‌صورت یک نقشه نمایش داده می‌شود، به همین دلیل نمی‌توان بررسی نمود که تغییرات در چه زمانی اتفاق افتاده است. اما در این پژوهش با استفاده از تنسور تغییرات داده‌ها به‌صورت روزانه در یک فضای سه‌بعدی که بعد سوم آن زمان است به نمایش درآمده است. بدین وسیله می‌توان منشأ گردوغبار و تغییرات آن را در هر روز بررسی کرد که این یک برتری نسبت به سایر روش‌های قبلی است. نتایج حاصله از تنسور مورد بررسی، وضعیت گردوغبار منطقه مورد مطالعه را بحرانی نشان داد. با تجزیه و تحلیل داده‌ها، چهار منبع گردوغبار (بلد، بین‌النهرین، میسان و واسط) در منطقه مطالعاتی شناسایی شد. با تحلیل الگوی زمانی، ماه می با بیشترین فراوانی گردوغبار و مقدار AOD 85/3 نمایان‌گر مقدار زیاد گردوغبار است که منشأ اصلی آن را می‌توان بین‌النهرین (رودخانه دجله و فرات) نامید. همچنین ماتریس همبستگی نشان داد که ارتباط مستقیم معناداری بین شهرستان ایلام و منطقه واسط وجود دارد. در واقع تنسور توانست منشأ گردوغبار در شهرستان ایلام را به‌درستی به‌صورت روزانه نشان دهد. از این‌رو توجه سیاست‌گذاران محیط‌زیست و منابع طبیعی برای استفاده از قابلیت‌های تنسور، امری ضروری و مفید به نظر می‌رسد. همچنین پیشنهاد می‌شود سایر پارامترهای تأثیرگذار آب‌وهوایی نظیر دما، پوشش گیاهی، تغییرات اقلیم، باد و سایر عوامل برای روند بهبود نتایج همراه با شاخص AOD مورد بررسی قرار گیرد.

References

- Abedzadeh, H. (2005). *Synoptic Analysis of Dust Systems in the West*. (Master's thesis). Faculty of Literature and Humanities, Razi University of Kermanshah. [In Persian]
- Alam, K., Qureshi, S., & Blaschke, T. (2011). Monitoring spatio-temporal aerosol patterns over Pakistan based on MODIS, TOMS and MISR satellite data and a HYSPLIT model. *Atmospheric Environment*, 45(27), 4641-4651. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.05.055>
- Al-Hemoud, A., Al-Dousari, A., Misak, R., Al-Sudairawi, M., Naseeb, A., Al-Dashti H., & Al-Dousari, N. (2019). Economic impact and risk assessment of sand and dust storms (SDS) on the oil and gas industry in Kuwait. *Sustainability*, 11(1), 200. <https://doi.org/10.3390/su11010200>
- Ali Bakhshi, T., Azizi, Z., Vafaeinejad, A., & Aghamohammadi Zanjirabadi, H. (2020). Survey of area changes in water basins of Shahid Abbaspour dam caused by 2019 floods using Google Earth Engine. *Journal of Ecohydrology*, 7(2), 345-357. [In Persian] <https://doi.org/10.22059/ije.2020.295785.1272>
- Amani, M., Ghorbanian, A., Ahmadi, S. A., Kakooei, M., Moghimi, A., Mirmazloumi, S. M., ... & Brisco, B. (2020). Google earth engine cloud computing platform for remote sensing big data applications: A comprehensive review. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13, 5326-5350. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.3021052>
- Ashrafi, K., Shafiepour-Motlagh, M., Aslemand, A., & Ghader, S. (2014). Dust storm simulation over Iran using HYSPLIT. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 12, 1-9. <https://doi.org/10.1186/2052-336X-12-9>
- Azimzadeh, H., Montazerghaem, M., Torabi Mirzaei, F., & Tajamlan, M. (2010). Measuring the falling dust of Yazd city using MDCO sediment trap during the three-month period of summer 2010. Paper presented at the Proceedings of the 2nd National Conference on Wind Erosion and Dust Storms, February 2010, Iranian Desert Control Management Association, Yazd University. [In Persian]
- Chamanpira, R., Karimi Sangchini, E., & Norouzi, A. A. (2021). Temporal and spatial analysis of dust occurrence in Lorestan province. *Journal of Environmental Science and Technology*, 23(6), 57-70. [In Persian] <https://doi.org/10.30495/JEST.2021.53171.5086>
- Chung, Y. S., Kim, H. S., Jugder, D., Natsagdorj, L., & Chen, S. J. (2003). On sand and duststorms and associated significant dustfall observed in Chongju-Chongwon, Korea during 1997–2000. *Water, Air, and Soil Pollution: Focus*, 3, 5-19. <https://doi.org/10.1023/A:1023242000367>
- Draxler, R. R., Gillette, D. A., Kirkpatrick, J. S., & Heller, J. (2001). Estimating PM₁₀ air concentrations from dust storms in Iraq, Kuwait and Saudi Arabia. *Atmospheric Environment*, 35(25), 4315-4330. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(01\)00159-5](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00159-5)
- Formenti, P., Schütz, L., Balkanski, Y., Desboeufs, K., Ebert, M., Kandler, K., ... & Zhang, D. (2011). Recent progress in understanding physical and chemical properties of African and Asian mineral dust. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11(16), 8231-8256. <https://doi.org/10.5194/acp-11-8231-2011>
- Golmohammadi, M., Etemadfrad, H., & Kharaghani, H. (2023). Spatio-temporal analysis of the covid-19 impacts on the using Chicago urban shared bicycles by tensor-based approach. *Journal of Geospatial Information Technology*, 10(3), 95-119. [In Persian] <https://dx.doi.org/10.52547/jgit.10.3.95>
- Goodarzi, M., Hoseini, A., & Ahmadi, H. (2018). Assessing temporal and spatial distribution of dust storm in the south and South West of Iran. *Iran-Watershed Management Science & Engineering*, 11(39), 1-10. [In Persian] <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20089554.1396.11.39.9.7>

- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine, planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment* 202, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Goudarzi, G. R., Shirmardi, M., Naimabadi, A., Ghadiri, A., & Sajedifar, J. (2019). Chemical and organic characteristics of PM_{2.5} particles and their in-vitro cytotoxic effects on lung cells, The Middle East dust storms in Ahvaz, Iran. *Science of The Total Environment*, 655, 434-445. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.153>
- Goudie, A. S., & Middleton, N. J. (2001) Saharan Dust Storms, Nature and Consequences. *Earth Sciences Review*, 56, 179-204. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(01\)00067-8](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(01)00067-8)
- Hamidi, M., Kavianpour, M. R., & Shao, Y. (2013). Synoptic analysis of dust storms in the Middle East. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 49, 279-286. <https://doi.org/10.1007/s13143-013-0027-9>
- Karami, S., Hossein Hamzeh, N., Alam, K., Noori, F., & Ranjbar Saadat Abadi, A. (2021). Spatio-temporal and synoptic changes in dust at the three islands in the Persian Gulf region. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 214, 105539. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105539>
- Khalid, M. (2020). Geopolitics of water conflict in West Asia, The Tigris-Euphrates Basin. *FINS Journal of Diplomacy and Strategy*, 4(1), 1-7.
- Kim, J. (2008). Transport routes and source regions of Asian dust observed in Korea during the past 40 years (1965-2004). *Atmospheric Environmental*, 42(19), 4778-4789. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.01.040>
- Lee, H., Kim, H., Honda, Y., Lim, Y. H., & Yi, S. (2013). Effect of Asian dust storms on daily mortality in seven metropolitan cities of Korea. *Atmospheric Environment*, 79, 510-517. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.06.046>
- Li, D., Yu, Z., Wu, F., Luo, W., Hu, Y., & Yuan, L. (2020). The tensor-based feature analysis of spatiotemporal field data with heterogeneity. *Earth and Space Science*, 7(2), e2019EA001037. <https://doi.org/10.1029/2019EA001037>
- Lyapustin, A., Wang, Y., Korkin, S., & Huang, D. (2018). MODIS collection 6 MAIAC algorithm. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(10), 5741-5765. <https://doi.org/10.5194/amt-11-5741-2018>
- Mianabadi, H., & Amini, A. (2019). Complexity of water, politics, and environment in the Euphrates and Tigris river basins. *Geopolitics Quarterly*, 15(2), 54-86. [In Persian] <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.17354331.1398.15.54.3.6>
- Middleton, N. (2017). Desert dust hazards, A global review. *Aeolian Research*, 24, 53-63. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2016.12.001>
- Mohammadi, F., & Zargari, M. (2014). Investigation and analysis of the temporal-spatial distribution of dust in Tehran province. Paper presented at the Proceedings of the International Conference on Geography, Urban Planning and Sustainable Development, Tehran, Koomesh Environmental Society, University of Technology. [In Persian]
- Namdari, S., Karimi, N., Sorooshian, A., Mohammadi, G., & Sehatkashani, S. (2018). Impacts of climate and synoptic fluctuations on dust storm activity over the Middle East. *Atmospheric Environment*, 173, 265-276. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.11.016>

- Namdari, S., Valizade, K. K., Rasuly, A. A., & Sari Sarraf, B. (2016). Spatio-temporal analysis of MODIS AOD over western part of Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(3), 1-11. <https://doi.org/10.1007/s12517-015-2029-7>
- Qin, W., Liu, Y., Wang, L., Lin, A., Xia, X., Che, H., ... & Zhang, M. (2018). Characteristic and driving factors of aerosol optical depth over mainland China during 1980–2017. *Remote Sensing*, 10(7), 1064. <https://doi.org/10.3390/rs10071064>
- Remer, L. A., Tanré, D., Kaufman, Y. J., Levy, R., & Mattoo, S. (2006). Algorithm for remote sensing of tropospheric aerosol from MODIS: Collection 005. *National Aeronautics and Space Administration*, 1490. <https://modis.gsfc.nasa.gov>
- Rezaei Moghaddam, M. H., Sedighi, A., Fasihi, S., & Karimi Firozjaei, M. (2018). Effect of environmental policies in combating aeolian desertification over Sejzy Plain of Iran. *Aeolian Research*, 35, 19-28. <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2018.09.001>
- Schepanski, K., Tegen, I., & Macke, A. (2012). Comparison of satellite based observations of Saharan dust source areas. *Remote Sensing of Environment*, 123, 90-97. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.03.019>
- Shahsavani, A., Naddafi, K., Haghighifard, N. J., Mesdaghinia, A., Yunesian, M., Nabizadeh, R., ... & Goudarzi, G. (2012). The evaluation of PM10, PM2. 5, and PM1 concentrations during the Middle Eastern Dust (MED) events in Ahvaz, Iran, from April through September 2010. *Journal of Arid Environments*, 77, 72-83. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2011.09.007>
- Shi, L., Zhang, J., Yao, F., Zhang, D., & Guo, H. (2021). Drivers to dust emissions over dust belt from 1980 to 2018 and their variation in two global warming phases. *Science Total Environment*, 767, 144860. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144860>
- Soleimany, A., Grubliauskas, R., & Šerevičienė, V. (2021). Application of satellite data and GIS services for studying air pollutants in Lithuania (Case study, Kaunas city). *Air Quality Atmosphere and Health*, 14, 411-429. <https://doi.org/10.1007/s11869-020-00946-z>
- Soleimany, A., Solgi, E., Ashrafi, K., Jafari, R., & Grubliauskas, R. (2022). Temporal and spatial distribution mapping of particulate matter in southwest of Iran using remote sensing, GIS, and statistical techniques. *Air Qual Atmos Health*, 15, 1057-1078. <https://doi.org/10.1007/s11869-022-01179-y>
- Stafoggia, M., Bellander, T., Bucci, S., Davoli, M., De Hoogh, K., De'Donato, F., ... & Schwartz, J. (2019). Estimation of daily PM10 and PM2. 5 concentrations in Italy, 2013–2015, using a spatiotemporal land-use random-forest model. *Environment International*, 124, 170-179. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.01.016>
- Taghavi, F., Owlad, E., & Ackerman, S. A. (2017). Enhancement and identification of dust events in the south-west region of Iran using satellite observations. *Journal of Earth System Science*, 126, 1-17. <https://doi.org/10.1007/s12040-017-0808-0>
- Wang, X., Zhou, Z., & Dong, Z. (2006). Control of dust emissions by geomorphic conditions, wind environments and land use in northern China, an examination based on dust storm frequency from 1960 to 2003. *Geomorphology*, 81(3-4), 292-308. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.04.015>
- Yu, Y., Kalashnikova, O. V., Garay, M. J., Lee, H., & Notaro, M. (2018). Identification and characterization of dust source regions across North Africa and the Middle East using MISR satellite observations. *Geophysical Research Letters*, 45(13), 6690-6701. <https://doi.org/10.1029/2018GL078324>