

## Investigating the Trend of Dust Changes in The Eastern Half of Iran

S. Nasabpour Molaei<sup>1</sup>, A. Salajegheh<sup>2</sup>, H. Khosravi<sup>3</sup>, A. Nasiri<sup>4</sup>, A. Ranjbar Saadat abadi<sup>5</sup>

1. Ph. D Candidate, Desert Control and Management, Department of Arid and Mountainous Regions Reclamation, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Iran.
2. Professor, Department of Arid and Mountainous Regions Reclamation, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Iran.
3. Associate Professor, Department of Arid and Mountainous Regions Reclamation, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Iran.
4. Postdoc, Department of Biosystems Engineering and Soil Science, The University of Tennessee, Knoxville, TN, USA.
5. Associate Professor, Department of Meteorology, Atmospheric Science & Meteorological Research Center (ASMERC), Tehran, Iran.

\* Corresponding Author: salajegh@ut.ac.ir

Received date: 02/07/2023

Accepted date: 21/08/2023

 [10.22034/JDMAL.2023.2005839.1422](https://doi.org/10.22034/JDMAL.2023.2005839.1422)

### Extended Abstract

#### Introduction

The impact of dust storms on the ecosystem, human health, and economy is significant in the affected areas. In arid and semi-arid regions, dust is a natural occurrence that covers about one third of the earth's surface. This phenomenon is caused by wind erosion and factors such as the size of soil particles and their adhesion force, surface roughness, weather conditions such as long-term droughts cause it to intensify. To understand the impact of the dust phenomenon on humans and the environment, it is essential to evaluate the spatial and temporal distribution of dust and its changes and effects. Numerous studies have been carried out in the field of evaluating dust changes using different methods. For example, using CMIP5 models, synoptic fog systems are predicted to increase during the 21<sup>st</sup> century in the Middle East. In addition, using AOD obtained from MODIS and MERRA-2 sensors, researchers showed a significant upward trend in dust changes from 2000 to 2010. A significant upward trend was shown in Iran's winter AOD values during the period 2000 to 2010, and a decreasing trend during the period 2010 to 2018. A point can be spotted by examining various studies in the Middle East and Iran that evaluate the spatio-temporal changes of dust. Statistical tests of time series study, such as Mann-Kendall spatially and pixel by pixel, have been used in limited research to evaluate the trend of dust changes. In Iran, there is a research gap in not using spatial and pixel-by-pixel statistical tests to evaluate the trend of dust changes, as stated. This research aimed to provide a solution and address the problem by analyzing the spatial and temporal changes of dust using the AOD index in the eastern half of the country.

#### Material and Methods



In this research, in order to evaluate the temporal-spatial changes of dust, the AOD data of the blue band (470 nm) of the MCD19A2 product of the MODIS sensor was used. AOD parameter is known as one of the most key factors in studying the climatic effects of aerosols and atmospheric pollution. In order to extract AOD data, monthly data from 2001 to 2022 were obtained in the Google Earth Engine system by averaging the daily AOD data. Over a 22-year period, the average of each month was calculated. The months that had the highest average AOD values were chosen and their changes were evaluated. In this research, the Mann-Kendall test was used to evaluate the change process. Menkendall's ZM coefficient was calculated for months in the Earth Trend Modeler (ETM) of the TerrSet software to achieve this. In the next step, the intensity of monthly AOD changes per time unit was calculated for 22 years in selected months. To simulate the process of changes, linear regression analysis can be utilized for this purpose. This method is used to determine the linear relationship between all the data of a dependent variable and the corresponding data of the independent index. If the slope is higher than zero, the dependent variable will change in the same direction as the independent variable. The dependent variable changes in the opposite direction of the independent variable if the slope is smaller than zero. The steeper the slope of changes, the greater the impact of the independent variable on the dependent variable. The Earth Trend Modeler (ETM) of TerrSet software also carried out this step.

### Results and Discussion

Based on the evaluation of the monthly average AOD changes in the studied area, the trend and intensity of AOD changes from 2001 to 2022 were assessed in April, May, June, and July. In most areas of the studied area, AOD is increasing with a probability of more than 70%, and the intensity of changes is mostly high and very high in April. It can be concluded that AOD is experiencing a strong increase in April. This is despite the fact that in May, June and July, respectively, a considerable part of the western half, northern half and eastern half is increasing with different intensities with a probability of more than 70%. It can be concluded that the trend and intensity of AOD changes in the above-mentioned months follow a different spatial pattern. The dispersion of dust production centers inside and outside Iran, and the local and regional synoptic conditions governing dust production centers is the cause of changes in the spatio-temporal patterns of dust storms. The unprincipled extraction of water resources by humans, land degradation, soil moisture reduction, and the loss of vegetation due to climate change all affect these factors in turn. The results showed that the monitoring of monthly average AOD changes can help to identify new hotspots and evaluate the results of wind and dust erosion control and management activities. Therefore, it can be suggested that a system based on remote sensing must be designed and presented to monitor dust changes, so that the management of the dust phenomenon in Iran becomes more. We need to pay attention to the factors that influence these changes and evaluate their impact on the dust phenomenon. On the other hand, by modeling the environmental factors affecting on the trend of dust changes in each region by using methods such as dust evaluation, it is possible to determine the role of each factor and the most important factor affecting the trend of dust changes in each region.

**Keywords:** Aerosol Optical Depth; Man-Kendall; Intensity of change; Linear regression





## بررسی روند تغییرات گردوغبار در نیمه شرقی ایران

سحر نسب پور مولائی<sup>۱</sup>، علی سلاجقه<sup>۲\*</sup>، حسن خسروی<sup>۳</sup>، امین نصیری<sup>۴</sup>، عباس رنجبر سعادت آبادی<sup>۵</sup>

۱. دانشجوی دکتری مدیریت و کنترل بیابان، گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
  ۲. استاد گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
  ۳. دانشیار گروه احیای مناطق خشک و کوهستانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران.
  ۴. پسادکتری گروه مهندسی بیوسیستم و علوم خاک، دانشگاه تنسی، ناکسویل، ایالات متحده آمریکا.
  ۵. دانشیار گروه هواشناسی، مرکز تحقیقات هواشناسی و علوم جوی، تهران، ایران.
- \* نویسنده مسئول: [salajegh@ut.ac.ir](mailto:salajegh@ut.ac.ir)

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۳۰

doi [10.22034/JDMAL.2023.2005839.1422](https://doi.org/10.22034/JDMAL.2023.2005839.1422)

### چکیده

در سال‌های اخیر، پدیده گردوغبار به یکی از مهمترین چالش‌های زیست محیطی در سراسر جهان تبدیل شده است. کشور ایران با توجه به حاکم بودن اقلیم خشک و نیمه‌خشک بر آن، همیشه از تولید و گسترش مواد معلق در هوا به‌ویژه گردوغبار آسیب دیده است. در پژوهش حاضر به ارزیابی روند و شدت تغییرات گردوغبار با استفاده از شاخص عمق نوری هواویز یا Aerosol Optical Depth در نیمه شرقی ایران پرداخته شد. بدین منظور ابتدا در سامانه گوگل ارث انجین از داده‌های AOD باند آبی با طول موج ۴۷۰ nm محصول MCD19A2 سنجنده مودیس در مقیاس زمانی روزانه میانگین‌گیری شد و داده‌های ماهانه AOD از ابتدای سال ۱۳۸۰ تا انتهای سال ۱۴۰۱ استخراج شد. در مرحله بعد ماه‌های دارای بیشترین میانگین AOD انتخاب شد و ارزیابی روند و شدت تغییرات گردوغبار بر روی داده‌های این ماه‌ها انجام. به‌منظور ارزیابی روند تغییرات AOD از آزمون من‌کندال و همچنین برای ارزیابی شدت تغییرات آن از رگرسیون خطی استفاده شد. نتایج حاکی از آن است که بیشترین مقدار AOD در محدوده مورد بررسی در چهار ماه آوریل، می، ژوئن و جولای معادل با ماه‌های شمسی فروردین تا مرداد رخ داده است. همچنین نتایج تحلیل روند و شدت تغییرات AOD در ماه آوریل با احتمال بیش از ۷۰٪ و با شدت زیاد و خیلی زیاد در بیشتر مناطق مورد بررسی در حال افزایش است. این در حالی است که شاخص مورد بررسی در ماه‌های می، ژوئن و جولای به‌ترتیب در بخش قابل ملاحظه‌ای از نیمه غربی، نیمه شمالی و نیمه شرقی با شدت‌های مختلف با احتمال بیش از ۷۰٪ در حال افزایش است. با توجه به نتایج پژوهش حاضر لازم است با مدیریت مناسب، عوامل مؤثر بر ایجاد گردوغبار در مناطقی که گردوغبار در حال افزایش است، روند تغییرات را کنترل یا کاهش داد.

واژگان کلیدی: عمق نوری هواویز؛ من‌کندال؛ شدت تغییرات؛ رگرسیون خطی



## ■ مقدمه

توفان‌های گردوغبار با تأثیر بر بوم‌نظام، سلامت انسان و اقتصاد، نقش مهمی در مناطق تحت تأثیرشان دارند (۲، ۱۸، ۲۳، ۲۴، ۳۱). هر ساله تقریباً ۵۰۰ تا ۳۰۰۰ میلیارد تن گردوغبار توسط بیابان‌ها و مناطق خشک در اتمسفر منتشر می‌شود (۱۴، ۱۷) که به دلیل پویایی آن تأثیرهای نابرابری در زمان و مکان دارد (۹). به‌طور کلی گردوغبار، پدیده‌ای اجتناب‌ناپذیر در مناطق خشک و نیمه‌خشک است که سطح انتشار آن حدود یک سوم مساحت زمین را شامل می‌شود (۵، ۳۹). باد به عنوان نیرو محرکه این پدیده است و عواملی مانند اندازه ذرات خاک و نیروی چسبندگی آن‌ها، زبری سطح، شرایط آب‌وهوایی مانند خشکسالی‌ها و ترسالی‌ها در شدت و ضعف آن نقش دارند (۱۱، ۱۹، ۳۳). با توجه به اثرات پدیده گردوغبار بر انسان و محیط زیست، ارزیابی توزیع مکانی و زمانی گردوغبار و تغییرات سالیانه و اثرات آن ضروری است (۱۰).

یکی از روش‌های مطالعه گردوغبار استفاده از داده‌های عمق نوری هواویزی یا AOD می‌باشد. AOD شامل اندازه‌گیری یکپارچه ستونی از ضریب خاموشی است که نشان‌دهنده تضعیف تابش خورشیدی توسط پراکندگی و جذب هواویزها از جمله گردوغبار است (۳۴). بر اساس گزارش اداره ملی اقیانوسی و جوی آمریکا، مقدار AOD نزدیک به ۰/۱ مربوط به جو بسیار صاف و مقدار ۰/۴ مربوط به شرایط بسیار غبارآلود است (۷). این متغیر معمولاً از مشاهدات زمینی و فضایی بدست می‌آید. مشاهدات زمینی تفکیک زمانی و طیفی زیادی دارند ولی فقط ناحیه کوچکی را در اطراف مکان مورد پایش را نشان می‌دهند. از سوی دیگر، مشاهدات ماهواره‌ای به دلیل قدرت تفکیک مکانی و زمانی و همچنین پوشش جهانی، به‌طور گسترده در مطالعات نیروی تابشی هواویز در مقیاس‌های منطقه‌ای، جهانی و فصلی استفاده شده است (۳۴). همچنین AOD حاصل از تصاویر ماهواره‌ای برای مطالعه توفان‌های گردوغبار به دلیل ماهیت فضایی بزرگ چنین توده‌هایی بسیار کارآمد هستند (۱، ۳۷). در نتیجه این ویژگی به‌عنوان عامل کلیدی در مطالعات تأثیر آب‌وهوایی

هواویزها و آلودگی‌های جوی شناخته شده است (۲۹، ۳۶). همچنین به‌عنوان نماینده‌ای از غلظت هواویز اتمسفری، در زمینه ارزیابی، پایش و نظارت بر توفان‌های گردوغبار مد نظرند (۴۰).

مطالعات بسیاری در زمینه ارزیابی روند تغییرات گردوغبار با روش‌های متنوع انجام شده است. به‌عنوان مثال پیش‌بینی شده است که با استفاده از مدل‌های CMIP5<sup>۳</sup>، سامانه غبار هم‌دیدگی در طول قرن بیست و یکم در خاورمیانه افزایش می‌یابد (۱۳). علاوه بر این محققان بر مبنای نتایج ارزیابی تغییرات AOD با استفاده از رگرسیون خطی بیان داشتند که روند صعودی قابل توجهی در تغییرات گردوغبار از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ وجود دارد (۲۶، ۴۳). همچنین روند صعودی قابل توجهی در مقادیر AOD زمستانی ایران در طول دوره ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ و روند کاهشی در دوره ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۸ بر اساس نتایج رگرسیون خطی، نشان داده شد (۴۴). در تحقیق دیگری بیان شده است که روند AOD بر اساس تحلیل نتایج رگرسیون خطی در ۷۱٪ ایران دارای روند افزایشی است و این افزایش به روند تغییرات پوشش گیاهی و فاکتورهای اقلیمی از قبیل بارندگی، دما و سرعت باد بستگی دارد (۷). نتایج حاصل از بررسی روند تغییرات AOD با استفاده از روش من‌کنندال، پوشش گیاهی و داده‌های اقلیمی نشان داد که روند آن‌ها در مناطق مختلف کشور ایران متفاوت است. به‌طوریکه شاخص NDVI و بارندگی به ترتیب در ۸۵٪ و ۶۸٪ کشور کاهشی بوده است این در حالی است که AOD، سرعت باد و دما به ترتیب در ۷۱٪، ۷۲٪ و ۳۸٪ از سطح کشور افزایش نشان داده است. رابطه همبستگی بین AOD و NDVI، بارندگی، دما، سرعت باد نشان داد که شاخص AOD با NDVI و بارندگی به ترتیب در ۵۱٪ و ۵۱٪ از سطح کشور همبستگی منفی داشته این در حالی است که با متغیر دما و سرعت باد در ۶۸٪ و ۵۰٪ از مساحت کشور همبستگی مثبت نشان داده است (۱۵). در پژوهش دیگری نتایج بررسی روند شاخص هواویز<sup>۴</sup> (AI) در ایران با استفاده از روش من‌کنندال نشان داد که گردوغبار در فصل بهار به دلیل فعال‌شدن چشمه‌های گردوغبار از مساحت نواحی

<sup>3</sup> Coupled Model Intercomparison Project  
<sup>4</sup> Aerosol index (AI)

<sup>1</sup> Aerosol Optical Depth  
<sup>2</sup> Extinction Coefficient

رضوی، سمنان، اصفهان، یزد، کرمان و سیستان و بلوچستان می‌باشد. دامنه تغییرات ارتفاعی محدوده مورد مطالعه بر اساس مدل رقومی ارتفاع یا DEM استخراج شده از داده‌های SRTM<sup>۱</sup>، ۴۴۷۱ متر می‌باشد (شکل ۱). بیشترین فراوانی توفان‌های گردوغبار در جنوب و جنوب شرق کشور دیده می‌شود. یکی از عواملی که باعث شده است بیشترین روزهای غباری در ایران در این منطقه باشد وزش بادهای ۱۲۰ روزه است. عواملی دیگر از قبیل، فقر پوشش گیاهی خشکی خاک، عدم وجود رطوبت کافی باعث شده است که این منطقه به‌عنوان یکی از کانون‌های اصلی گردوغبار در ایران که دارای بیشینه‌ی روزهای غباری است، مطرح باشد (۴۵).

#### داده‌های مورد استفاده

در پژوهش حاضر به‌منظور ارزیابی تغییرات زمانی مکانی گردوغبار از داده‌های AOD محصول MCD19A2 سنجنده MODIS استفاده شد. محصول MCD19A2 با قدرت تفکیک زمانی یک روزه و قدرت تفکیک مکانی ۱ km ارائه می‌شود.

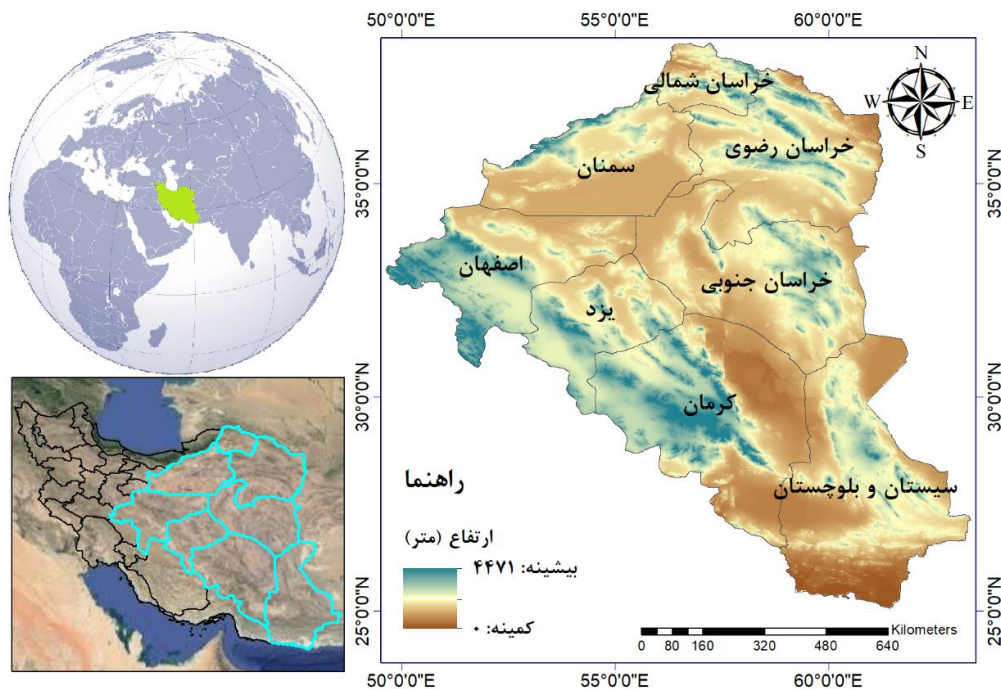
دارای روند کاهشی، کاسته شد و به مساحت نواحی دارای روند افزایشی، افزوده شد (۸).

بررسی‌های مختلف در منطقه خاورمیانه و ایران در زمینه ارزیابی تغییرات مکانی - زمانی گردوغبار تعداد محدودی از آزمون‌های آماری و مطالعه سری زمانی مانند من‌کنندال و رگرسیون خطی به صورت مکانی و پیکسل به پیکسل برای ارزیابی روند تغییرات گردوغبار استفاده کرده‌اند. با توجه به آنچه گفته شد و وجود کانون‌های فراوان فرسایش بادی و تولید کننده گردوغبار در نیمه شرقی ایران به علت خشک‌تر بودن آب و هوای آن نسبت به نیمه غربی، هدف از پژوهش حاضر ایجاد یک سری زمانی از شاخص AOD و بررسی روند تغییرات آن به صورت مکانی برای دستیابی به الگوی تغییرات گردوغبار در نیمه شرقی کشور است.

#### ■ مواد و روش

##### محدوده مورد بررسی

محدوده مورد مطالعه در طول جغرافیایی ۳۳' ۴۹° تا ۲۰' ۶۳° شرقی و در عرض جغرافیایی ۱' ۲۵° تا ۲۱' ۳۸° شمالی قرار دارد. این محدوده با مجموع مساحت بیش از ۹۳۰۰۰۰ Km<sup>۲</sup> شامل استان‌های خراسان شمالی، جنوبی و



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی و مدل رقومی ارتفاع محدوده مورد مطالعه

<sup>2</sup> Shuttle Radar Topography Mission

<sup>1</sup> Digital Elevation Model

که در این رابطه و  $p$  تعداد مقادیر دنباله‌ها و  $tp$  تعداد دنباله‌ها برای  $p$  امین مقدار را نشان می‌دهد. جزء دوم در رابطه فوق یک تعدیل برای دنباله یا داده‌های حساس است. پارامتر استاندارد شده آزمون  $ZM$  نیز از (رابطه ۵) به دست می‌آید (۲۲).

$$Z_M = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{VAR(S)}} & \text{اگر } S > 0 \\ 0 & \text{اگر } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{VAR(S)}} & \text{اگر } S < 0 \end{cases} \quad (5)$$

برای انجام این کار در مدلساز روند زمین یا  $ETM^2$  با استفاده از نرم‌افزار TerrSet ضریب  $ZM$  من‌کندال برای ماه‌ها محاسبه شد (۱۵، ۲۲). آستانه سطح اطمینان ۵۰٪، ۷۰٪ و ۹۰٪ به ترتیب ۰/۶۷۴، ۱/۰۴ و ۱/۹۴  $|ZM| >$  می‌باشد. به طور مثال اگر مقدار  $ZM$  برابر با ۱/۳ باشد، روند به احتمال ۷۰٪ تا ۹۰٪ افزایشی می‌باشد. در گام بعد به محاسبه شدت تغییرات AOD ماهانه در واحد زمان برای ۲۲ سال در ماه‌های منتخب پرداخته شد. برای دستیابی به این هدف از تجزیه و تحلیل رگرسیون خطی برای شبیه‌سازی روند تغییرات استفاده شد (۴۱). برای برآورد شیب تغییرات متغیر وابسته بر اثر تغییرات متغیر مستقل بر مبنای روابط رگرسیون خطی از رابطه (۶) استفاده شد.

$$\text{Slope} = \frac{n \sum_{i=1}^{n-1} x_i y_i - \sum_{i=1}^{n-1} x_i \sum_{i=1}^{n-1} y_i}{n \sum_{i=1}^{n-1} x_i^2 - (\sum_{i=1}^{n-1} x_i)^2} \quad (6)$$

در این رابطه  $X_i$  و  $Y_i$  به ترتیب مقادیر متغیر مستقل یا زمان و متغیر وابسته یا AOD ماهانه در سال  $i$  ام است،  $n$  تعداد سال‌ها، و Slope شیب تغییرات در طول دوره مطالعه است. به طور کلی، اگر شیب بزرگتر از صفر باشد، متغیر وابسته هم جهت با متغیر مستقل تغییر می‌کند. در حالی که اگر شیب کوچکتر از صفر باشد، متغیر وابسته در خلاف جهت متغیر مستقل تغییر می‌کند. هر چه اندازه شیب (قدرمطلق شیب) تغییرات بیشتر باشد اثر متغیر مستقل بر متغیر وابسته بیشتر است. به عبارت دیگر هر چه شیب تغییرات بزرگتر باشد، شدت

این محصول از پردازش تصاویر سنجنده MODIS ماهواره Aqua و Terra تولید می‌شود که شامل ۱۳ لایه از جمله AOD باند آبی با طول موج ۴۷۰ nm و سبز با طول موج ۵۵۰ nm و عدم قطعیت AOD می‌باشد. AOD باند آبی کیفیت بهتری نسبت به AOD باند سبز دارد (۲۸).

### روش پژوهش

به منظور ارزیابی گردوغبار از AOD باند آبی با طول موج ۴۷۰ nm استفاده شد. همچنین برای استخراج داده‌های این شاخص، ابتدا در سامانه گوگل ارث انجین با میانگین‌گیری از داده‌های AOD روزانه، از ابتدای سال ۲۰۰۱ تا انتهای سال ۲۰۲۲ داده‌های ماهانه آن به دست آمد و سپس میانگین هر ماه طی ۲۲ سال محاسبه شد تا از نزدیک بودن بازتاب سطح زمین<sup>۱</sup> در وضعیت واقعی، تا حد امکان، اطمینان حاصل شود (۲۷). لازم به ذکر است که در پایان ماه‌هایی که دارای بیشترین مقدار میانگین AOD بودند انتخاب و روند تغییرات آن‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. در پژوهش حاضر برای ارزیابی روند تغییرات از آزمون من‌کندال استفاده شد (روابط ۱ تا ۵).

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} (\text{sign}(X_i - X_j)) \quad (1)$$

در رابطه (۱) مقادیر  $X_i$  و  $X_j$  داده‌های متوالی و  $n$  طول سری زمانی است. همچنین تابع علامت نیز به ترتیب (رابطه ۲) محاسبه شد (۲۲).

$$\text{sign}(X_i - X_j) = \begin{cases} +1 & \text{اگر } (X_i - X_j) > 0 \\ 0 & \text{اگر } (X_i - X_j) = 0 \\ -1 & \text{اگر } (X_i - X_j) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

میانگین  $E(S)$  و واریانس  $Var(S)$  پارامتر  $S$  به ترتیب با استفاده از (روابط ۳ و ۴) بدست می‌آیند.

$$E(S) = 0 \quad (3)$$

$$VAR(S) = 1/18 [n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^n (p-1)^2 q[tp(tp-1)(2tp+5)]] \quad (4)$$

<sup>2</sup> Earth Trends Modeler

<sup>1</sup> Ground Surface Reflectivity

مقدار AOD در چهار ماه آوریل، می، ژوئن و جولای رخ داده است. در نواحی جنوبی استان سیستان و بلوچستان و زابل و نواحی اطراف آن، جنوب استان کرمان، اکثر نواحی استان یزد، خراسان شمالی و اصفهان و همچنین نیمه شمالی استان‌های سمنان و خراسان رضوی بیشترین مقدار AOD در ماه جولای رخ داده است. همچنین بیشتر نواحی استان خراسان جنوبی، نیمه شمالی استان‌های سیستان و بلوچستان و کرمان بیشترین مقدار AOD در ماه می اتفاق افتاد. در بخش‌های غربی استان کرمان نیز ماه ژوئن دارای بیشترین میانگین ماهانه AOD بود.

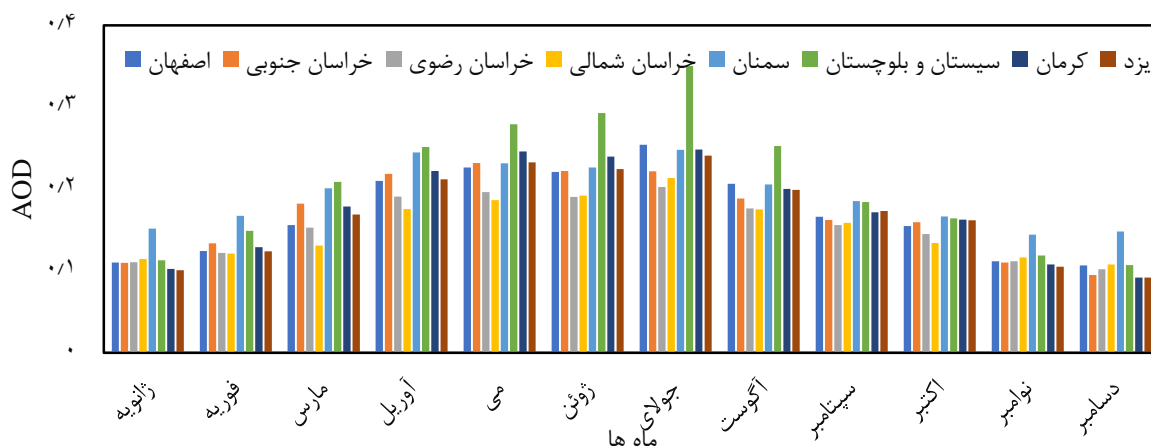
براساس نتایج بخش قبل روند تغییرات AOD چهار ماه آوریل، می، ژوئن و جولای مورد ارزیابی قرار گرفت. بر اساس نقشه روند تغییرات AOD و شدت آن در ماه آوریل به تفکیک استان (شکل ۴)، مقدار AOD در بیشتر نواحی مرکزی، شرقی و جنوبی محدوده مورد مطالعه به احتمال بیش از ۷۰٪ روند افزایشی داشت. مساحت استان‌های کرمان ۵۶٪، یزد ۴۰٪ و خراسان جنوبی ۳۰٪ مقدار AOD در ماه آوریل به احتمال بیش از ۹۰٪ روند افزایشی داشتند. استان‌های اصفهان و سیستان و بلوچستان نیز از این نظر در رتبه‌های بعدی بودند. نقشه شدت تغییرات AOD در ماه آوریل نشان داد که نواحی مرکزی و همچنین جنوب غربی تا شمال غربی محدوده مورد مطالعه دارای تغییرات زیاد در مقادیر AOD در واحد زمان بودند.

تغییرات در واحد زمان بیشتر است. این مرحله نیز در مدل ساز روند زمین یا ETM نرم افزار TerrSet انجام شد. از این نرم افزار به منظور تحلیل مکانی زمانی متغیرهای محیطی استفاده می‌شود (۱۵، ۲۲). سپس با استفاده از روش شکست طبیعی و آزمون و خطا برای ماه‌های انتخابی، شدت تغییرات به پنج کلاس خیلی کم (۰-۰/۷)، کم (۰/۷-۱/۴)، متوسط (۱/۴-۲/۱۵) و زیاد (۲/۱۵-۳/۶) و خیلی زیاد (> ۳/۶) تقسیم شد.

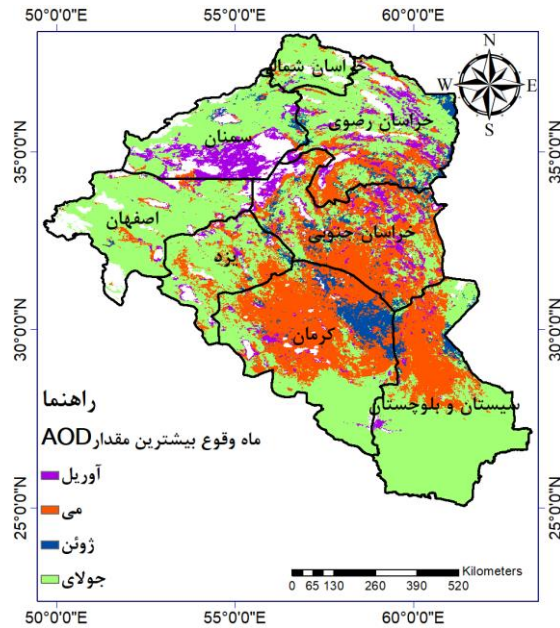
## نتایج

بررسی نمودار تغییرات میانگین AOD ماهانه در استان‌های محدوده مورد مطالعه (شکل ۲) نشان داد که از اواسط فصل بهار روند افزایشی میانگین ماهانه AOD رخ داده است که این امر در اواسط تابستان به اوج خود رسیده و سپس روند کاهشی به خود گرفته است. همچنین بررسی نتایج حاکی از آن بود که میانگین ماهانه AOD استان سیستان و بلوچستان از ماه می تا جولای به شدت افزایش پیدا کرده و نسبت به سایر استان‌های مورد مطالعه میانگین ماهانه AOD خیلی بیشتری داشته است. سپس استان‌های سمنان، کرمان، یزد و اصفهان نیز در این ماه‌ها بیشترین میانگین ماهانه AOD را به خود اختصاص داده‌اند. لازم به ذکر است که کمترین میانگین ماهانه AOD مربوط به ماه‌های دسامبر و ژانویه بود.

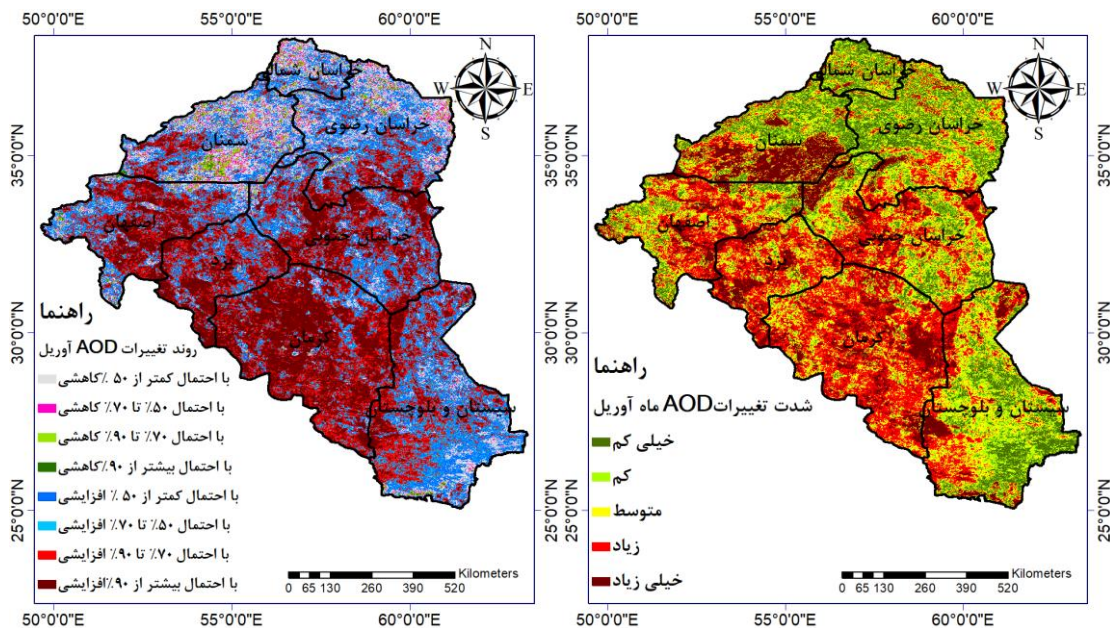
نقشه ماه وقوع بیشترین مقدار AOD در نواحی مختلف محدوده مورد بررسی (شکل ۳) نشان داد که بیشترین



شکل ۲. نمودار تغییرات میانگین AOD ماهانه در استان‌های محدوده مورد مطالعه (۲۰۰۱-۲۰۲۲)



شکل ۳. نقشه ماه وقوع بیشترین مقدار AOD در نواحی مختلف محدوده مورد مطالعه (۲۰۲۲-۲۰۰۱)



شکل ۴. نقشه روند تغییرات AOD و شدت آن در ماه آوریل (۱۲ فروردین تا ۱۰ اردیبهشت) (۲۰۲۲-۲۰۰۱)

جدول ۱. درصد مساحت طبقه احتمال روند تغییرات AOD در ماه‌های انتخابی به تفکیک استان

ماه انتخابی	کلاس احتمال روند	سیستان و بلوچستان	سمنان	خراسان رضوی	خراسان شمالی	کرمان	اصفهان	خراسان جنوبی	یزد
آوریل	کاهشی > ۵۰	۱۰/۸۱	۲۸/۲۶	۲۳/۵۶	۳۲/۸۶	۱/۷۵	۹/۵۸	۶/۳۲	۲/۰۲
	کاهشی ۵۰-۷۰	۱/۱۵	۱۰/۳۴	۶/۰۸	۱۰/۵۹	۰/۲۱	۲/۱۲	۰/۹	۰/۲۲
	کاهشی ۷۰-۹۰	۰/۶۳	۸/۳۶	۳/۴۵	۷/۸۲	۰/۱۳	۱/۸	۰/۴۹	۰/۱۴
	کاهشی < ۹۰	۰/۲۵	۱/۸۶	۰/۶	۱/۲۷	۰/۰۳	۰/۸۳	۰/۱۴	۰/۰۲
	افزایشی > ۵۰	۲۷/۳۵	۲۵/۳۵	۲۸/۱۲	۲۹/۶	۶/۳۲	۱۷/۹۷	۱۹/۳	۱۲/۰۵
	افزایشی ۵۰-۷۰	۱۹/۱۳	۹/۵۹	۱۳/۲۷	۹/۲۴	۸/۶۳	۱۳/۷۴	۱۵/۵۵	۱۴/۱۳
	افزایشی ۷۰-۹۰	۲۶/۵۵	۱/۸۲	۱۵/۳۷	۶/۷۷	۲۷/۴۵	۲۵/۳۳	۲۷/۲۷	۳۰/۹۷
	افزایشی < ۹۰	۱۴/۱۳	۵/۴۱	۹/۵۵	۱/۳۵	۵۵/۴۸	۲۸/۶۳	۳۰/۰۳	۴۰/۴۵



ادامهٔ جدول ۱. درصد مساحت طبقه احتمال روند تغییرات AOD در ماه‌های انتخابی به تفکیک استان

ماه انتخابی	کلاس احتمال روند	سیستان و بلوچستان	سمنان	خراسان رضوی	خراسان شمالی	کرمان	اصفهان	خراسان جنوبی	یزد
مهر	کاهشی > ۵۰	۱۷/۱۸	۲۱/۴۳	۲۴/۵۴	۱۳/۱۱	۲۹/۷۱	۲۱/۸۳	۳۳/۰۵	۱۳/۲۱
	کاهشی ۵۰-۷۰	۱۶/۰۷	۹/۱۴	۱۸/۰۶	۱۵/۱۴	۱۱/۸	۵/۱۳	۱۶/۹۱	۱/۲۴
	کاهشی ۷۰-۹۰	۳۱/۱	۹/۸۶	۲۸/۶۲	۳۷/۶۵	۱۰/۴۳	۳/۸۹	۱۶/۱۹	۰/۴۴
	کاهشی < ۹۰	۲۳/۲۷	۳/۵۹	۱۴/۹۲	۲۸/۵۴	۲/۲۵	۱/۲۲	۳/۹۲	۰/۰۵
	افزایشی > ۵۰	۷/۵۱	۲۰/۱۶	۹/۵۳	۳/۱۹	۲۷/۴۵	۳۱/۰۳	۱۸/۹۶	۳۳/۱۸
	افزایشی ۵۰-۷۰	۲/۰۳	۹/۶۷	۲/۱۳	۰/۸۵	۸/۸۳	۱۴/۱۸	۴۵/۱۵	۱۹/۲۴
	افزایشی ۷۰-۹۰	۱/۷۲	۱۳/۵۱	۱/۶۶	۰/۹۵	۶/۸۳	۱۵/۵۵	۳/۹۷	۲۱/۹۲
	افزایشی < ۹۰	۱/۱۲	۱۲/۱۶	۰/۵۴	۰/۵۷	۲/۷	۷/۱۷	۱/۸۵	۱۰/۷۲
	کاهشی > ۵۰	۳۱/۶۴	۲۱/۸۹	۱۴/۱۱	۲۷/۸۶	۳۲/۹۹	۲۹/۱	۲۵/۱۹	۳۸/۳۴
	کاهشی ۵۰-۷۰	۱۷/۳۱	۵/۵	۲/۱۷	۷/۲۲	۱۹/۴۹	۵/۳	۵/۰۸	۹/۲۹
ژوئن	کاهشی ۷۰-۹۰	۲۰/۴	۳/۹۲	۱/۱۸	۴/۱۸	۲۱/۴۶	۳/۲۱	۲/۵۳	۳/۹۵
	کاهشی < ۹۰	۵/۵۱	۱/۹۷	۰/۲۹	۰/۴۱	۶/۱۷	۰/۸۱	۰/۵۳	۰/۲۵
	افزایشی > ۵۰	۱۶/۸۲	۲۷/۲۷	۲۸/۷۲	۳۰/۸۷	۱۳/۹۳	۳۶/۹۵	۳۱/۶۶	۲۸/۹۴
	افزایشی ۵۰-۷۰	۴/۳۳	۱۲/۳۲	۱۶/۶۶	۱۲/۴۸	۲/۹۶	۱۱/۶۵	۱۳/۶۶	۷/۸۱
	افزایشی ۷۰-۹۰	۲/۹۷	۱۵/۰۳	۲۱/۲۲	۱۱/۰۸	۲/۱۱	۸/۹۳	۱۴/۳۷	۶/۴۳
	افزایشی < ۹۰	۱/۰۲	۱۲/۱	۱۵/۶۵	۵/۹	۰/۸۹	۴/۰۵	۶/۹۸	۴/۹۹
	کاهشی > ۵۰	۲۱/۸۳	۲۹/۲۵	۱۶/۴۴	۴۳/۴۱	۳۱/۳۵	۴۰/۴۸	۲۳/۹۳	۳۵/۸۶
	کاهشی ۵۰-۷۰	۱۲/۹	۶/۹۸	۲/۵۸	۱۳/۹۳	۱۱/۲۹	۱۶/۸۴	۶/۵۶	۱۳/۲۳
	کاهشی ۷۰-۹۰	۱۹/۵۳	۴/۶۶	۱/۰۷	۷/۲۵	۹/۵۸	۱۱/۲۴	۳/۷۳	۸/۶۶
	کاهشی < ۹۰	۱۱/۸۸	۱/۵۷	۰/۲۵	۰/۸	۲/۴۷	۳/۴۵	۰/۸۸	۰/۹۵
جولای	افزایشی > ۵۰	۱۷/۶۴	۳۳	۲۷/۲۹	۲۵/۳۵	۲۶/۷۲	۱۹/۵۸	۲۳/۳۵	۲۴/۸۹
	افزایشی ۵۰-۷۰	۶/۷۹	۱۱/۳۳	۱۵/۵۳	۵/۶۵	۸/۸۸	۴/۲۱	۱۰/۶۱	۷/۲۸
	افزایشی ۷۰-۹۰	۶/۷۵	۹/۷۵	۲۱/۰۱	۲/۹۷	۷/۱۷	۳/۱۹	۱۵	۶/۴۳
	افزایشی < ۹۰	۲/۶۸	۳/۴۶	۱۵/۸۳	۰/۶۴	۲/۵۴	۱/۰۱	۱۵/۹۴	۲/۷

جدول ۲. درصد مساحت کلاس شدت تغییرات AOD در ماه‌های انتخابی به تفکیک استان

ماه انتخابی	شدت تغییرات	سیستان و بلوچستان	سمنان	خراسان رضوی	خراسان شمالی	کرمان	اصفهان	خراسان جنوبی	یزد
آوریل	خیلی کم	۲۳/۵۹	۲۳/۴۹	۳۱/۴۵	۳۹/۹۴	۲/۷۵	۱۲/۷۸	۱۴/۰۶	۳/۴۹
	کم	۲۵/۳۳	۱۸/۹۳	۲۶/۳۵	۳۰/۱۹	۶/۳۱	۱۵/۷۲	۱۸/۹۷	۸/۲۸
	متوسط	۲۳/۳۵	۱۳/۹۶	۲۰/۶۱	۱۸/۱۹	۱۷/۱۵	۲۱/۰۷	۲۲/۱	۱۸/۲۷
	زیاد	۱۹/۸۳	۱۵/۳۴	۱۷/۰۹	۹/۴۱	۵۰/۷۵	۳۴/۶۸	۳۰/۵۲	۴۴/۹۸
	خیلی زیاد	۷/۹	۲۸/۲۸	۴/۵	۲/۲۷	۲۳/۰۴	۱۵/۷۵	۱۴/۳۵	۲۴/۵۳
مهر	خیلی کم	۹/۵۸	۲۰/۷	۱۹/۵۳	۱۰/۵۳	۳۴/۰۸	۲۹/۶۵	۲۷/۷۵	۲۰/۹۸
	کم	۱۳/۲۴	۱۹/۰۶	۲۲/۸۵	۱۵/۴۸	۲۷/۱۴	۲۴/۷۱	۲۵/۹۵	۲۲/۶
	متوسط	۲۱/۱۸	۱۵/۱	۲۶/۳۹	۲۶/۲۳	۱۹/۴	۱۹/۱۲	۲۱/۲۵	۲۲/۷۹
	زیاد	۴۰/۲۲	۱۴/۹۵	۲۶/۲۱	۴۰/۷۶	۱۵/۰۶	۱۷/۶۳	۱۷/۹۸	۲۳/۷۵
	خیلی زیاد	۱۵/۷۸	۳۰/۱۹	۵/۰۲	۷	۴/۳۲	۸/۸۹	۷/۰۷	۹/۸۸

ادامه جدول ۲. درصد مساحت کلاس شدت تغییرات AOD در ماه‌های انتخابی به تفکیک استان

ماه انتخابی	شدت تغییرات	سیستان و بلوچستان	سمنان	خراسان رضوی	خراسان شمالی	کرمان	اصفهان	خراسان جنوبی	یزد
بهار	خیلی کم	۱۸/۲۷	۲۹/۱	۲۹/۶۸	۴۱/۱۸	۲۹/۳۷	۳۹/۹۱	۳۵/۸۲	۴۳/۱۲
	کم	۱۸/۹۷	۲۰/۱۷	۲۵/۴۹	۲۹/۸۲	۲۸/۴۵	۳۲/۲۸	۲۷/۳۱	۲۸/۲۱
	متوسط	۱۹/۵۸	۱۳/۴۱	۲۰/۳۶	۱۷/۵۶	۲۱/۶۳	۱۵/۷۶	۱۸/۱۹	۱۴/۵۶
	زیاد	۲۷/۱۴	۱۴/۹۹	۱۸/۱	۹/۹۵	۱۳/۵۱	۹/۷۶	۱۳/۱۵	۸/۸۲
	خیلی زیاد	۱۶/۰۴	۲۲/۳۳	۶/۳۷	۱/۴۹	۷/۰۴	۶/۲۵	۵/۵۳	۵/۲۹
تابستان	خیلی کم	۱۹/۲۹	۲۸/۷۸	۳۴/۳۴	۲۹/۷۱	۳۷/۲۴	۲۶/۰۴	۲۸/۲۴	۳۲/۳۸
	کم	۱۷/۱۲	۲۴/۴۱	۲۷/۰۹	۳۰/۲	۲۹/۱۹	۲۸/۰۷	۲۸/۱	۲۹/۳۶
	متوسط	۱۵/۱۲	۱۷/۸۹	۱۹/۷۶	۲۴/۴۶	۱۸/۳۲	۲۴/۸۳	۲۳/۴۶	۲۲/۵۶
	زیاد	۲۲/۶۱	۱۵/۱۶	۱۵/۶۱	۱۴/۸۸	۱۲/۳۱	۱۶/۷۷	۱۶/۹۶	۱۳/۱
	خیلی زیاد	۲۵/۸۶	۱۳/۷۵	۳/۲	۰/۷۵	۲/۹۳	۴/۲۹	۳/۲۴	۲/۶

به شدت زیاد و خیلی زیاد در طول زمان در حال تغییر هستند. همچنین بررسی سطوح مختلف شدت تغییرات AOD ماه می نشان داد که به ترتیب ۳۰٪، ۱۶٪ و ۱۰٪ از مساحت استان‌های سمنان، سیستان و بلوچستان و یزد در طبقه تغییرات با شدت خیلی زیاد و ۴۱٪، ۴۰٪ و ۲۶٪ از مساحت استان‌های خراسان شمالی، سیستان و بلوچستان و خراسان رضوی در کلاس شدت تغییرات زیاد قرار گرفت (جدول ۲).

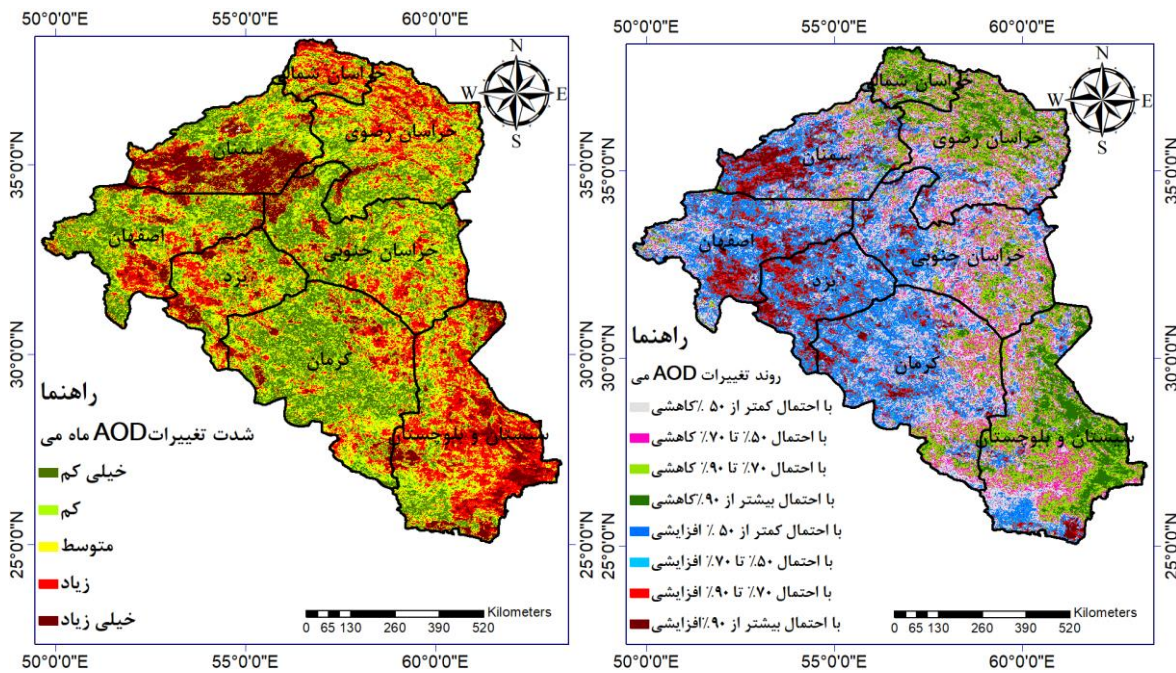
بررسی نقشه روند تغییرات AOD و شدت آن در ماه ژوئن نشان داد که در نیمه جنوبی محدوده مورد مطالعه، روند تغییرات AOD در ماه ژوئن عموماً کاهشی ولی در نیمه شمالی به خصوص در بخش‌هایی از استان‌های خراسان رضوی و شمالی و شرق سمنان روند تغییرات AOD افزایشی بود (شکل ۶). همچنین بررسی‌ها نشان داد که به ترتیب در ۱۶٪، ۷٪ و ۶٪ از مساحت استان‌های خراسان رضوی، خراسان جنوبی و خراسان شمالی روند تغییرات AOD در ماه ژوئن با احتمال بیش از ۹۰٪ افزایشی بود (جدول ۱). مساحت نواحی که روند تغییرات AOD در ماه ژوئن با احتمال بیش از ۹۰٪ کاهش بود، در همه استان‌ها کمتر از ۶/۵٪ می‌باشد. نقشه شدت تغییرات AOD در ماه ژوئن نشان می‌دهد که بخش‌های از جنوب استان سیستان و بلوچستان، زابل و نواحی اطراف آن، نواحی مرزی کرمان و سیستان و بلوچستان در شمال مرز مشترک، نیمه جنوبی استان سمنان، بخش‌هایی از استان‌های

بررسی سطح کلاس شدت تغییرات AOD (جدول ۲) به ترتیب ۵۱٪، ۴۵٪ و ۳۵٪ از مساحت استان‌های کرمان، یزد و اصفهان مقادیر AOD ماه آوریل با شدت زیاد در حال تغییر بود.

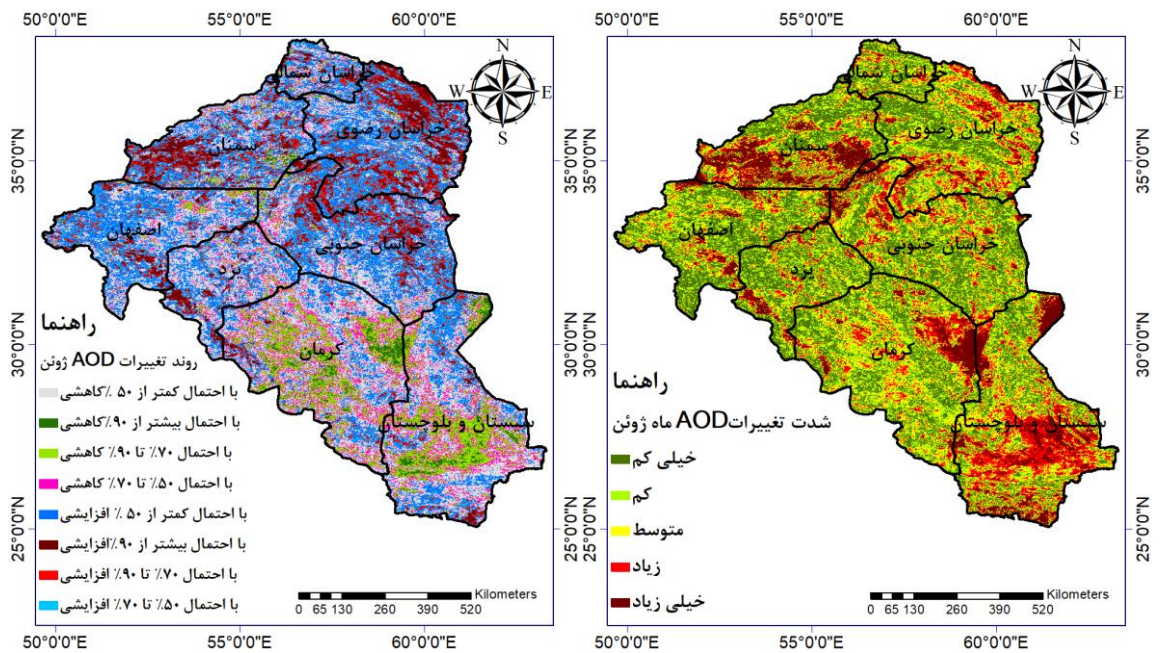
احتمال افزایشی بودن روند AOD در ماه می نسبت به ماه آوریل به شدت کاهش یافته بود (شکل ۵). حتی در نیمه شرقی استان سیستان و بلوچستان، نیمه شمالی خراسان رضوی و بخش‌های زیادی از خراسان شمالی مقادیر AOD روند کاهشی به خود گرفته و تنها در بخشی از شرق استان سمنان، جنوب اصفهان و شمال و شمال غرب استان یزد، روند AOD با احتمال بیش از ۷۰٪ در حال افزایش بود. مقادیر AOD ماه می به ترتیب ۲۲٪، ۱۶٪ و ۱۴٪ از مساحت استان‌های یزد، اصفهان و سمنان با احتمال بین ۷۰٪ تا ۹۰٪ در حال افزایش است. همچنین AOD این ماه به ترتیب ۱۱٪، ۷٪ و ۱۲٪ از مساحت استان‌های مذکور به احتمال بیش از ۹۰٪ دارای روند مشابه بود (جدول ۱). در مقابل AOD این ماه به ترتیب در ۲۹٪، ۲۳٪ و ۱۵٪ از مساحت استان‌های خراسان شمالی، سیستان و بلوچستان و خراسان رضوی، مقادیر AOD در ماه می به احتمال بیش از ۹۰٪ در حال کاهش بود. نقشه شدت تغییرات AOD در ماه می نشان داد که نیمه شرقی استان سیستان و بلوچستان، نیمه جنوبی سمنان، شمال استان خراسان رضوی، بیشتر نواحی استان خراسان شمالی، جنوب استان اصفهان و شمال و شمال غرب استان یزد، مقادیر AOD در ماه می

نیمه شرقی استان‌های خراسان رضوی و جنوبی، بخش‌هایی از شمال استان سیستان و بلوچستان، نواحی از غرب و شرق استان کرمان، یزد و سمنان روند تغییرات AOD ماه جولای به احتمال بیش از ۷۰٪ افزایشی بود. اما در زایل و نواحی اطراف آن، جنوب استان‌های اصفهان و سیستان و بلوچستان، بخش‌هایی از نواحی جنوبی و مرکزی کرمان روند کاهش‌ی تغییرات AOD مشهود بود (شکل ۷).

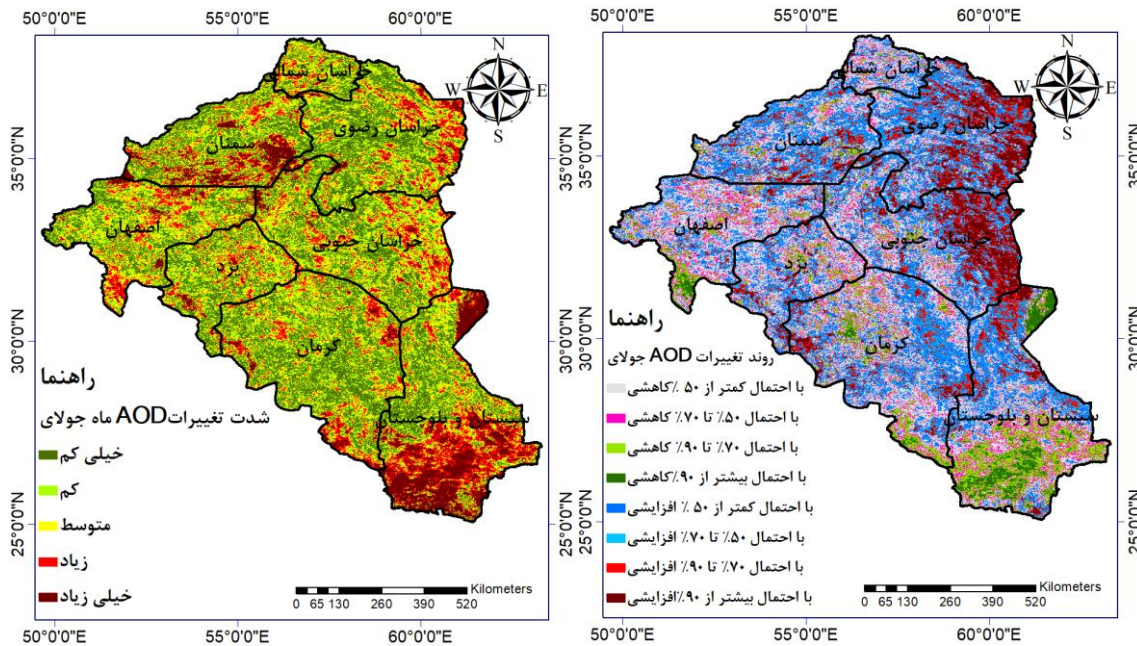
خراسان رضوی و جنوبی، یزد و اصفهان دارای شدت تغییرات زیاد و خیلی زیاد بودند (شکل ۶). در همه استان‌ها مساحت نواحی دارای کلاس با تغییرات AOD شدت کم و کلاس با تغییرات خیلی کم بیش از ۱۸٪ بود. همچنین به ترتیب ۲۲٪، ۱۶٪ و ۷٪ از مساحت استان‌های سمنان، سیستان و بلوچستان و کرمان در کلاس شدت تغییرات خیلی زیاد قرار گرفته‌اند (جدول ۲). روند تغییرات AOD و شدت آن در ماه جولای نشان داده شده است (شکل ۷).



شکل ۵. نقشه روند تغییرات AOD و شدت آن در ماه می (۲۰۰۱-۲۰۲۲)



شکل ۶. نقشه روند تغییرات AOD و شدت آن در ماه ژوئن (۲۰۰۱-۲۰۲۲)



شکل ۷. نقشه روند تغییرات AOD و شدت آن در ماه جولای (۲۰۰۱-۲۰۲۲)

و مرداد، بیشترین مقدار میانگین ماهانه AOD را در طول سال به خود اختصاص داده است. از سوی دیگر ماه‌های دسامبر و ژانویه معادل با ماه‌های آذر تا بهمن میانگین ماهانه AOD به کمترین مقدار خود رسیده است که با نتایج بدست آمده دیگر محققان مشابهت داشت (۳، ۴، ۶، ۲۰). این در حالی است که در برخی از نواحی محدوده مورد بررسی در ماه‌های آوریل، می و ژوئن نیز بیشترین مقدار میانگین AOD را می‌توان مشاهده کرد. لذا می‌توان بیان کرد که الگوی زمانی گردوغبار در هر محدوده با توجه به شرایط توپوگرافی، اقلیمی و شرایط محیطی متفاوت است (۷).

با توجه به نتایج ارزیابی تغییرات میانگین ماهانه AOD محدوده مورد مطالعه، روند و شدت تغییرات AOD از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۲ در چهار ماه آوریل، می، ژوئن و جولای ارزیابی شد. در ماه آوریل در بیشتر نواحی محدوده مورد مطالعه AOD با احتمال بیش از ۷۰٪ در حال افزایش است. که شدت تغییرات در این نواحی نیز زیاد و خیلی زیاد است. بنابراین می‌توان بیان کرد که AOD در ماه آوریل با شدت زیادی در حال افزایش است. ارزیابی روند تغییرات شاخص هواویز (AI) نیز نشان داده‌است که در اوایل فصل بهار بر شدت و درصد روند افزایشی در ایران افزوده می‌شود (۸). این در حالی است که در ماه‌های می، ژوئن و جولای به ترتیب بخش قابل ملاحظه‌ای از نیمه غربی، نیمه شمالی و نیمه شرقی

همچنین نتایج نشان داد که در ۱۲٪ از مساحت استان سیستان و بلوچستان با احتمال بیش از ۹۰٪، روند تغییرات AOD کاهشی بود. در مقابل در ۱۶٪ و ۱۶٪ از مساحت استان‌های خراسان جنوبی و رضوی روند تغییرات AOD با احتمال بیشتر از ۹۰٪ افزایشی بود (جدول ۱). از سوی دیگر نقشه شدت تغییرات AOD در ماه جولای نشان داد که بخش‌های از نیمه شرقی استان‌های خراسان رضوی و جنوبی، جنوب استان سیستان و بلوچستان، زابل و نواحی اطراف آن، نواحی جنوبی استان‌های سمنان و اصفهان و شمال شرق کرمان شدت تغییرات AOD ماه جولای زیاد و خیلی زیاد بود (شکل ۷). از طرفی در همه استان‌ها مساحت نواحی دارای کلاس با تغییرات AOD شدت کم و کلاس با تغییرات خیلی کم بیش از ۱۷٪ می‌باشد. همچنین به ترتیب ۲۶٪ و ۱۴٪ از مساحت استان‌های سیستان و بلوچستان و سمنان در کلاس تغییرات AOD با شدت خیلی زیاد قرار گرفت (جدول ۲).

## ■ بحث و نتیجه‌گیری

پایش منظم و مداوم مقادیر غلظت و روند تغییرات گردوغبار در مقیاس‌های مختلف محلی، منطقه‌ای و جهانی به منظور درک بهتر پدیده گردوغبار ضروری است. ارزیابی روند تغییرات سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۲ حاکی از آن بود که در بیشتر محدود مورد مطالعه، ماه جولای معادل با ماه‌های تیر

باید انتظار افزایش رویدادهای گردوغباری از نظر کمی و کیفی را تحت شرایط تغییر اقلیم داشته باشیم (۱۶). بنابراین این پدیده تحت تأثیر طیف وسیعی از عوامل مختلف به صورت مکانی و زمانی تغییر می‌کند و مقابله با آن، نیازمند روش‌های چند جانبه متشکل از سیاست، مدیریت اکوسیستم، اقتصاد و ظرفیت‌سازی است تا بتوان با کنترل عوامل مؤثر بر آن در نواحی که این پدیده در حال رشد است روند تغییرات افزایشی آن را کنترل و در نهایت کاهش داد.

با توجه به نتایج بدست آمده در این پژوهش می‌توان بیان نمود که روند تغییرات گردوغبار در ایران در شرایط زمانی و مکانی مختلف دارای الگوی متفاوتی هستند. از سوی دیگر ارزیابی و پایش این تغییرات می‌تواند به شناسایی کانون‌های جدید و ارزیابی نتایج فعالیت‌های کنترل و مدیریت فرسایش بادی و گردوغبار کمک بزرگ و شایانی کند. بنابراین می‌توان پیشنهاد داد که یک سامانه مبتنی بر سنجش از دور جهت ارزیابی و پایش تغییرات گردوغبار طراحی و ارائه شود تا مدیریت پدیده گردوغبار در ایران هدفمندتر شده و شناسایی کانون‌ها سریع‌تر انجام گردد. همچنین باید به عوامل مؤثر بر این تغییرات نیز توجه نمود و اثر آن‌ها را بر پدیده گردوغبار مورد ارزیابی قرار داد. از سوی دیگر می‌توان با مدل‌سازی اثر عوامل محیطی بر روند تغییرات گردوغبار هر منطقه با استفاده از روش‌هایی مانند ارزیابی گردوغبار، به تعیین نقش هر عامل و همچنین مشخص نمودن مهم‌ترین عامل مؤثر بر روند تغییرات گردوغبار در هر منطقه کمک کرد.

#### ■ سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از رساله دکتری دانشکده منابع دانشگاه تهران می‌باشد. بدینوسیله از دانشگاه تهران تقدیر و تشکر می‌شود.

با شدت‌های مختلف با احتمال بیش از ۷۰٪ در حال افزایش می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که روند و شدت تغییرات AOD در ماه‌های فوق‌الذکر از الگوی مکانی متفاوتی نسبت به هم پیروی می‌کند. محققان زیادی این گفته را تایید می‌نمایند که می‌توان به موارد زیر اشاره نمود. بررسی تغییرات زمانی و مکانی وقوع گردوغبار با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در استان آذربایجان غربی، نشان می‌دهد که AOD دارای الگوی تغییرات زمانی و مکانی متفاوت است اما با وجود وضعیت نسبتاً صعودی AOD، روند تغییرات آن از نظر آماری معنی‌دار نیست (۷). ارزیابی تغییرات مکانی و زمانی عمق نورری و داده‌های اقلیمی در ایران نشان حاکی از آن است که این پارامترها در مناطق مختلف متفاوت دارای روند تغییرات متفاوتی هستند (۱۵). در پژوهشی دیگر بیان شد که AOD دارای روند مثبت در جنوب غربی ایران و روند منفی در شمال ایران است (۴۳).

تغییرات الگوهای مکانی-زمانی توفان‌های گرد و غبار، به پراکندگی کانون‌های تولید گردوغبار در داخل و خارج از ایران و همچنین به شرایط سینوپتیک محلی و منطقه‌ای حاکم بر کانون‌های تولید گردوغبار مربوط می‌شود (۳۰، ۳۸). این عوامل نیز به نوبه خود تحت تأثیر برداشت غیر اصولی منابع آب توسط انسان‌ها، تخریب سرزمین، کاهش رطوبت خاک و از بین رفتن پوشش گیاهی به دلیل تغییرات آب‌وهوایی قرار می‌گیرند (۳۲، ۳۵، ۴۲). به طوری که نتایج تحقیقات مختلف، حکایت از افزایش AOD تحت تأثیر افزایش سرعت باد، سطوح بدون پوشش گیاهی و کمبود رطوبت در هوا و خاک دارد (۸، ۱۲، ۲۱). از طرف دیگر در ایران علاوه بر روند افزایشی معنی‌دار بیشینه و میانگین دما، طول فصل گرم نیز در حال افزایش است و این موضوع در مناطق خشک و فراخشک ایران مرکزی مشهودتر است (۲۲). بر این اساس

#### ■ References

1. 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. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.05.055>
2. AlKheder, S., & AlKandari, A. (2020). The impact of dust on Kuwait International Airport operations: a case study. *International journal of environmental science and technology*, 17, 3467-3474. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13762-020-02710-3>

3. Arjmand, M., Rashki, A., & Sargazi, H. (2018). Monitoring of spatial and temporal variability of desert dust over the Hamoun e Jazmurian, Southeast of Iran based on the Satellite Data. *Scientific- Research Quarterly of Geographical Data (SEPEHR)*, 27(106), 153-168. DOI: <https://doi.org/10.22131/sepehr.2018.32339> [In Persian]
4. Baghbanan, P., Ghavidel, Y., & Farajzadeh, M. (2020). Temporal long-term variations in the occurrence of dust storm days in Iran. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 132, 885-898. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00703-020-00728-3>
5. Bolorani, A. D., Samany, N. N., Papi, R., & Soleimani, M. (2022). Dust source susceptibility mapping in Tigris and Euphrates basin using remotely sensed imagery. *Catena*, 209, 105795. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2021.105795>
6. Boroughani, M. (2022). Investigating the Trend of Changes and Correlation Between the Occurrence of Dust in Iran. *Applied Soil Research*, 10(1), 69-81.
7. Choubin, B., Sajedi Hosseini, F., Rahmati, O., Mehdizadeh Youshanloei, M., & Jalali, M. (2022). Temporal and Spatial Variations of Dust Days in Western Azarbaijan Province, Determination of The Influencing Factors and Source of Events. *Desert Management*, 10(2), 71-86. DOI: <https://doi.org/10.22034/jdmal.2022.550729.1378> [In Persian]
8. Dadashi Roudbari, A. A., Ahmadi, M., & Shakiba, A. (2020). Evaluation Seasonal Trend of Iran Aerosol Index (AI) Based on Nimbus 7, Earth Probe and Aura Satellite Data. *Physical Geography Research Quarterly*, 52(1), 51-64. DOI: 10.22059/jphgr.2020.279630.1007366 [In Persian]
9. Bolorani, A. D., Shorabeh, S. N., Samany, N. N., Mousivand, A., Kazemi, Y., Jaafarzadeh, N., ... & Rabiei, J. (2021). Vulnerability mapping and risk analysis of sand and dust storms in Ahvaz, IRAN. *Environmental Pollution*, 279, 116859. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116859>
10. Du, P., Huang, Z., Tang, S., Dong, Q., Bi, J., Yu, X., & Gu, Q. (2023). Long-term Variation of Dust Devils in East Asia during 1959-2021. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, e2022JD038013. DOI: <https://doi.org/10.1029/2022JD038013>
11. Ebrahimi-Khusfi, Z., Mirakbari, M., Ebrahimi-Khusfi, M., & Taghizadeh-Mehrjardi, R. (2020). Impacts of vegetation anomalies and agricultural drought on wind erosion over Iran from 2000 to 2018. *Applied Geography*, 125, 102330. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2020.102330>
12. Eck, T. F., Holben, B. N., Giles, D. M., Slutsker, I., Sinyuk, A., Schafer, J. S., ... & Aldrian, E. (2019). AERONET remotely sensed measurements and retrievals of biomass burning aerosol optical properties during the 2015 Indonesian burning season. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(8), 4722-4740. DOI: <https://doi.org/10.1029/2018JD030182>
13. Elhacham, E., & Alpert, P. (2020). Potential new aerosol source (s) in the Middle East. *Science of the Total Environment*, 726, 137925. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137925>
14. Engelstaedter, S., Tegen, I., & Washington, R. (2006). North African dust emissions and transport. *Earth-Science Reviews*, 79(1-2), 73-100. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.06.004>.
15. Eskandari Damaneh, H., Eskandari Damaneh, H., Sayadi, Z., & Khorani, A. (2021). Evaluation of spatiotemporal changes and correclations of aerosol optical depth, NDVI and climatic data over Iran. DOI: <https://doi.org/10.22092/ijrdr.2021.125252> [In Persian]
16. Fallah-Ghalhari, G., Shakeri, F., & Dadashi-Roudbari, A. (2019). Impacts of climate changes on the maximum and minimum temperature in Iran. *Theoretical and Applied Climatology*, 138, 1539-1562. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-019-02906-9>

17. Francis, D., Fonseca, R., Nelli, N., Cuesta, J., Weston, M., Evan, A., & Temimi, M. (2020). The atmospheric drivers of the major Saharan dust storm in June 2020. *Geophysical Research Letters*, 47(24), e2020GL090102. DOI: <https://doi.org/10.1029/2020GL090102>
18. Francis, D., Nelli, N., Fonseca, R., Weston, M., Flamant, C., & Cherif, C. (2022). The dust load and radiative impact associated with the June 2020 historical Saharan dust storm. *Atmospheric Environment*, 268, 118808. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118808>
19. Gholami, H., Mohammadifar, A., Bui, D. T., & Collins, A. L. (2020). Mapping wind erosion hazard with regression-based machine learning algorithms. *Scientific Reports*, 10(1), 20494. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-77567>
20. Hamzeh, N. H., Kaskaoutis, D. G., Rashki, A., & Mohammadpour, K. (2021). Long-term variability of dust events in southwestern Iran and its relationship with the drought. *Atmosphere*, 12(10), 1350. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos12101350>
21. He, Q., Zhang, M., & Huang, B. (2016). Spatio-temporal variation and impact factors analysis of satellite-based aerosol optical depth over China from 2002 to 2015. *Atmospheric Environment*, 129, 79-90. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.01.002>
22. Heydari Alamdarloo, E., Moradi, E., Abdolshahnejad, M., Fatahi, Y., Khosravi, H., & da Silva, A. M. (2021). Analyzing WSTP trend: a new method for global warming assessment. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193, 1-15. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09600-2>
23. Javan, S., Rahdar, S., Miri, M., Djahed, B., Kazemian, H., Fakhri, Y., ... & Taghavi, M. (2021). Modeling of the PM 10 pollutant health effects in a semi-arid area: a case study in Zabol, Iran. *Modeling Earth Systems and Environment*, 7, 455-463. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00874-y>
24. Kandakji, T., Gill, T. E., & Lee, J. A. (2021). Drought and land use/land cover impact on dust sources in Southern Great Plains and Chihuahuan Desert of the US: Inferring anthropogenic effect. *Science of the Total Environment*, 755, 142461. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142461>
25. Kumar, M., Parmar, K. S., Kumar, D. B., Mhawish, A., Broday, D. M., Mall, R. K., & Banerjee, T. (2018). Long-term aerosol climatology over Indo-Gangetic Plain: Trend, prediction and potential source fields. *Atmospheric Environment*, 180, 37-50. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.02.027>
26. Li, J., Garshick, E., Al-Hemoud, A., Huang, S., & Koutrakis, P. (2020). Impacts of meteorology and vegetation on surface dust concentrations in Middle Eastern countries. *Science of the total environment*, 712, 136597. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136597>
27. Li, J., Ge, X., He, Q., & Abbas, A. (2021). Aerosol optical depth (AOD): spatial and temporal variations and association with meteorological covariates in Taklimakan desert, China. *PeerJ*, 9, e10542. DOI: <https://doi.org/10.7717/peerj.10542>
28. Lyapustin, A., & Wang, Y. (2018). MODIS Multi-angle Implementation of Atmospheric Correction (MAIAC) data user's guide. *NASA: Greenbelt, MD, USA*, 6(June), 1-19.
29. Mao, K. B., Ma, Y., Xia, L., Chen, W. Y., Shen, X. Y., He, T. J., & Xu, T. R. (2014). Global aerosol change in the last decade: An analysis based on MODIS data. *Atmospheric Environment*, 94, 680-686. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.04.053>
30. Mesbahzadeh, T., Mirakbari, M., Mohseni Saravi, M., Soleimani Sardoo, F., & Krakauer, N. Y. (2020). Joint modeling of severe dust storm events in arid and hyper arid regions based on copula theory: a case study in the Yazd province, Iran. *Climate*, 8(5), 64. DOI: <https://doi.org/10.3390/cli8050064>
31. Middleton, N. (2019). Variability and trends in dust storm frequency on decadal timescales: Climatic drivers and human impacts. *Geosciences*, 9(6), 261. DOI: <https://doi.org/10.3390/geosciences9060261>

32. Mirakbari, M., Mesbahzadeh, T., Soleimani Sardoo, F., Miglietta, M. M., Krakauer, N. Y., & Alipour, N. (2020). Observed and projected trends of extreme precipitation and maximum temperature during 1992–2100 in Isfahan province, Iran using REMO model and copula theory. *Natural Resource Modeling*, 33(2), e12254. DOI: <https://doi.org/10.1111/nrm.12254>
33. Miri, A., Dragovich, D., & Dong, Z. (2021). Wind flow and sediment flux profiles for vegetated surfaces in a wind tunnel and field-scale windbreak. *Catena*, 196, 104836. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104836>
34. 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, 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12517-015-2029-7>
35. Nouri, H., Faramarzi, M., Sadeghi, S. H., & Nasserri, S. (2019). Effects of regional vegetation cover degradation and climate change on dusty weather types. *Environmental Earth Sciences*, 78, 1-14. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8763-5>
36. Pan, J., & Li, T. (2013). Extracting desertification from Landsat TM imagery based on spectral mixture analysis and Albedo-Vegetation feature space. *Natural hazards*, 68, 915-927. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-013-0665-3>
37. Qi, Y., Ge, J., & Huang, J. (2013). Spatial and temporal distribution of MODIS and MISR aerosol optical depth over northern China and comparison with AERONET. *Chinese science bulletin*, 58, 2497-2506. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11434-013-5678-5>
38. Rashki, A., Kaskaoutis, D. G., Francois, P., Kosmopoulos, P. G., & Legrand, M. J. A. R. (2015). Dust-storm dynamics over Sistan region, Iran: Seasonality, transport characteristics and affected areas. *Aeolian Research*, 16, 35-48. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2011.02.001>
39. Shao, Y., Wyrwoll, K. H., Chappell, A., Huang, J., Lin, Z., McTainsh, G. H., ... & Yoon, S. (2011). Dust cycle: An emerging core theme in Earth system science. *Aeolian Research*, 2(4), 181-204. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2011.02.001>
40. Soleimani, M., Argany, M., Papi, R., & Amiri, F. (2021). Satellite aerosol optical depth prediction using data mining of climate parameters. *Physical Geography Research Quarterly*, 53(3), 319-333. DOI: 10.22059/JPHGR.2021.318600.1007591 [In Persian]
41. Tang, Z., Ma, J., Peng, H., Wang, S., & Wei, J. (2017). Spatiotemporal changes of vegetation and their responses to temperature and precipitation in upper Shiyang river basin. *Advances in Space Research*, 60(5), 969-979. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.asr.2017.05.033>
42. Yousefi, R., Wang, F., Ge, Q., & Shaheen, A. (2020). Long-term aerosol optical depth trend over Iran and identification of dominant aerosol types. *Science of the Total Environment*, 722, 137906. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137906>
43. Yousefi, R., Wang, F., Ge, Q., Lelieveld, J., & Shaheen, A. (2021). Aerosol trends during the dusty season over Iran. *Remote Sensing*, 13(6), 1045. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs13061045>
44. Yousefi, R., Wang, F., Ge, Q., Shaheen, A., & Kaskaoutis, D. G. (2023). Analysis of the winter AOD trends over Iran from 2000 to 2020 and associated meteorological effects. *Remote Sensing*, 15(4), 905. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs15040905>
45. Zangeneh, M. (2014). Climatological Analysis of Dust Storms in Iran. *Applied Climatology*, 1(1), 1-12. [In Persian]