



Journal of Environmental Research

Vol. 14, No. 28, Autumn & Winter 2024

Journal Homepage: www.iraneiap.ir
Print ISSN: 2008-9597 Online ISSN 2008-9590

Analysis of Spatio-Temporal Changes of Dust Hazard in Kurdistan Province

Document Type
Research Paper

Sayyed Mohammmd Hosseini¹, Farhnaz Khoramabadi², Mostafa Tahani yazdly^{3*}

Received
2023/06/06

1. Assistant Professor of Climatology, Sayyed Jamaledin Asadabadi University, Asadabad, Iran.
2. PhD of Climatology, University of Isfahan, Isfahan, Iran.
3. MA of urban engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

Accepted
2024/01/01

DOI: 10.22034/eiap.2024.191709

Abstract

Today, dust phenomenon is one of the dangerous phenomena in most countries of the world that, hot and dry country like Iran and even its western provinces in Kurdistan are witness to this phenomenon. For this purpose, dust data from ten synoptic stations used in a period of 20 years (2001 to 2021 AD) to investigate the risk of dust in this province. Using the factor analysis method, the months with the highest number of dusty days identified. Then, the Aerosol Optical Depth (AOD) obtained from the MODIS sensor and Terra satellite analyzed using the Google Earth Engine satellite image processing system. Finally, after validating the index with days with dust, the trend of this index investigated by the Mann-Kendall test method, and maps of temporal and spatial distribution of dust were drawn. The results indicate that the distribution of dusty days in this province affected by eight main factors, the first and second factors are explained respectively; 68 and 13.45 percent of the variance of the number of dusty days in the province. In addition, the months of April to September have the highest dust concentration that in the eastern half of this province; Saqez, Diwandara, Bijar, Qorveh, Dehgolan stations have a positive and increasing trend, and in the western half of the province, Marivan, Bane, Kamiyaran, Sarovabad and especially Sanandaj stations have a decreasing and negative dust trend. In addition, the results showed that, in recent years, larger area of the province has faced an increasing trend in the concentration of aerosols and especially dust. Moreover, the summer season has the highest density and concentration of aerosol conditioners, especially in the months of July and August in this province, and after that, the spring season ranks second. The increase for dust in these two seasons can be due to the establishment of Azores high pressure and the dryness of the air due to low surface humidity in Iran and neighboring countries. Therefore, the results of this research can help urban planners and community health custodians to build culture and improve the education of citizens in dealing with the dust phenomenon, improving environmental conditions, identifying the most suitable travel time and starting tourism activities in Kurdistan province.

Keywords: Factor Analysis, MODIS Sensor, Terra Satellite, Aerosol Optical Depth Index (AOD), Dust, Kurdistan Province.

* Corresponding author:

Email: tahani.m61@gmail.com

Introduction

Today, one of the dangerous phenomena in arid, semi-arid and adjacent regions is the dust phenomenon. This is despite the fact that in the last few years, the western provinces of Iran, including the Kurdistan province, have witnessed an increase in the incidence of aerosol and migrant dust caused by neighboring countries. Today, wide range of natural disasters, including drought, desertification, floods, and John extreme phenomena, have greatly increased around the world And the environment has put humans, plants and animals under threat. In addition, one of the main consequences of this phenomenon is the increase of dusty days in the countries of the world.

Methodology

For this purpose, dust data from ten synoptic stations used in a period of 19 years (2001 to 2019) to investigate the risk of dust in this province. Using the factor analysis method, the months with the highest number of dusty days identified. Then, the Aerosol Optical Depth (AOD) obtained from the MODIS sensor and Terra satellite analyzed using the Google Earth Engine satellite image processing system. Finally, after validating the index with days with dust, the trend of this index investigated by the Mann-Kendall test method, and maps of temporal and spatial distribution of dust were drawn.

Results and Discussion

The results indicate that the distribution of dusty days in this province affected by eight main factors, the first and second factors are explained respectively; 68 and 81.5 percent of the variance of the number of dusty days in the province. In addition, the months of April to September have the highest dust concentration that in the eastern half of this province; Saqez, Diwandara, Bijar, Qorveh, Dehgolan stations have a positive and increasing trend, and in the western half of the province, Marivan, Bane, Kamiyaran, Sarovabad and especially Sanandaj stations have a decreasing and negative dust trend. In addition, the results showed that, in recent years, larger area of the province has faced an increasing trend in the concentration of aerosols and especially dust. Moreover, the summer season has the highest density and concentration of aerosol conditioners, especially in the months of July and August in this province, and after that, the spring season ranks second.

Conclusions

The results indicate that, the seven main components justify 100% of the variance of the number of dust days in Kurdistan Province, and in the meantime; The first and second components respectively; 68 and 81.5 percent of the variance of the number of dusty days are explained by the province. It can also be admitted with 95% confidence that several characteristics can be observed by measuring the correlation between AOD index and dusty days of the province: the least number of dusty days in the months of October, November and December; Low density of dusty days in January; The average density of dust days is recorded in February and March and the highest density of dust days is recorded in April, May, June, July, August and September. So that in this province; April with 253 days, May with 265 days, June with 255 days, July with 247 days, August with 255 days and September with 251 days have been associated with dust. This means that in the months of spring and summer due to the establishment of high pressure near the Azores on the one hand and dry air and a little surface moisture in Iraq, the amount of atmospheric dust has increased significantly in the region.

بررسی تغییرات زمانی - مکانی مخاطره گردوغبار در استان کردستان

سید محمد حسینی^۱، فرحناز خرم‌آبادی^۲، مصطفی طحانی یزدلی^{۳*}

۱. استادیار اقلیم‌شناسی، دانشگاه سیدجمال‌الدین اسدآبادی، اسدآباد، ایران.

۲. دانشجوی دکتری آب و هواشناسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران.

۳. کارشناس ارشد مهندسی شهرسازی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۰/۱۱

تاریخ وصول مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۱۶

چکیده

امروزه، یکی از پدیده‌های مخاطره‌آمیز در اغلب کشورهای دنیا پدیده گردوغبار است که کشور گرم‌وخشکی مانند ایران و حتی استان‌های غربی آن همچون کردستان، شاهد این پدیده است. بدین‌منظور جهت بررسی این مخاطره در استان کردستان، از داده‌های گردوغبار ۱۰ ایستگاه سینوپتیک در بازه زمانی ۲۰ ساله (۱۳۸۰ تا ۱۴۰۰ شمسی) استفاده شد. با تکنیک تحلیل عاملی، ماه‌هایی که دارای بیشترین تعداد روزهای گردوغبار بودند، شناسایی شد. سپس شاخص عمق اپتیکی گردوغبار (AOD) حاصل از سنجنده مادیس (MODIS) و ماهواره ترآ (Terra) با استفاده از سامانه پردازش تصاویر ماهواره‌ای گوگل‌ارت انجین (Google Earth Engine) مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت، پس از اعتبارسنجی این شاخص با روزهای همراه با گردوغبار، روند این شاخص با آزمون من-کندال محاسبه شد و نقشه‌های پراکنش زمانی-مکانی گردوغبار ترسیم شد. نتایج حاصل از خودهمبستگی فضایی موران نشان داد که گردوغبار استان کردستان، میل به تمرکز و خوشه‌ای شدن در فضا دارد. همچنین نتایج حاکی از این است که پراکنش روزهای گردوغبار در این استان، متأثر از هفت مولفه اصلی است که عامل اول و دوم به ترتیب ۶۸ و ۱۳/۴۵ درصد از پراش تعداد روزهای گردوغبار استان را تبیین می‌کنند. همچنین ماه‌های فروردین تا شهریور بیشترین تراکم گردوغبار را به خود اختصاص داده‌اند. در نیمه شرقی این استان ایستگاه‌های سقر، دیواندره، بیجار، قروه، دهگلان دارای روند مثبت و افزایشی و در نیمه غربی آن ایستگاه‌های مریوان، بانه، کامیاران، سروآباد و به ویژه سندر، روند کاهشی و منفی دارند. همچنین نتایج نشان داد که در سال‌های اخیر، گستره بیشتری از استان با روند افزایشی در غلظت هواویزها به‌ویژه گردوغبارها روبه‌رو شده است. فصل تابستان و ماه‌های تیر و مرداد، دارای بیشترین تراکم و غلظت گردوغبار در این استان است و پس از آن، فصل بهار در رتبه دوم قرار دارد. افزایش میزان گردوغبار در این دو فصل می‌تواند به دلیل استقرار پرفشار جنب‌حاره‌ای آزور و خشکی هوا به علت کمی رطوبت سطحی در ایران و کشورهای همجوار باشد. بنابراین نتایج پژوهش حاضر می‌تواند به برنامه‌ریزان شهری و متولیان سلامت جامعه جهت فرهنگ‌سازی و ارتقاء آموزش شهروندان در مقابله با پدیده گردوغبار، بهبود شرایط محیط‌زیست، شناسایی مناسب‌ترین زمان سفر و آغاز فعالیت‌های گردشگری در استان کردستان کمک شایانی نماید.

کلید واژه‌ها: تحلیل عاملی، سنجنده MODIS، ماهواره Terra، شاخص AOD، گردوغبار، استان کردستان.

سرآغاز

امروزه طیف وسیعی از بلایای طبیعی از جمله خشکسالی، بیابان‌زایی، سیل و پدیده‌های مخاطره‌آمیز اقلیمی در سراسر جهان به شدت افزایش یافته است و محیط‌زیست انسان، گیاه و جانوران را در معرض تهدید قرار داده است. به طوری که؛ ۲۰ درصد از جمعیت دنیا در معرض خشکسالی و بیابان‌زایی هستند (Zender et al., 2003) و یکی از پیامدهای اصلی این پدیده، افزایش روزهای گردوغباری در کشورهای جهان می‌باشد (Asadilofti et al., 2018). کشور ایران به دلیل واقع شدن در کمربند خشک و نیمه‌خشک جهان، مکرراً در معرض گسترش سامانه‌های گردوغبار محلی و کلان مقیاس مهاجر قرار دارد (Alijani, 2000). به طوری که در این مناطق، تغییر سریع درجه حرارت هوا موجب ایجاد شیب فشار در نقاط مختلف و تشکیل بادهای قوی و دایمی می‌شود که خشکی منطقه و وزش این بادهای عامل ایجادکننده پدیده گردوغبار محسوب می‌شوند (Mehrshahi & Nekonam, 2009). در سال‌های اخیر این رخداد غیرمنتظره سبب بروز مشکلات اقتصادی، کشاورزی، هیدرولوژیکی و هواشناسی در بخش‌های بزرگ از کشور شده است. از جمله در استان‌های غربی کشور مانند استان کردستان که پدیده گردوغبار نسبت به سال‌های گذشته به وفور مشاهده می‌شود. این پدیده با توجه به خصوصیات ذاتی ذرات آن، می‌تواند اثرات محیط‌زیستی و اقلیمی متعددی در چرخه‌های مختلف اتمسفری، اقیانوسی و قاره‌ای در پی داشته باشد (Rasoli, 2010). از آثار مهم توفان‌های گردوغبار می‌توان به تاثیر انتقال آئروسول‌ها (ذرات گردوغبار) بر مواد معدنی خاک در مبدأ و مقصد آن‌ها (McTainsh & Strong, 2007) و همچنین تغییر مقاومت اتمسفر در برابر تابش خورشیدی (Baddock et al., 2009) نام برد. ذرات گردوغبار علاوه بر تاثیر مذکور می‌توانند پیامدهای معنی‌داری بر سلامت عمومی بشر نیز داشته باشند. تقریباً نیمی از این غبارها، ذرات با قطر کمتر از ۲/۵ میکرومتر هستند که مطالعات نشان می‌دهد ارتباط قوی بین مقدار این ذرات با بیماری‌های عمومی و مرگ‌ومیر بیماران ریوی و قلبی وجود دارد (Wang et al., 2009). امروزه در اغلب پژوهش‌های محیط‌زیستی و اقلیمی، استفاده از تکنیک سنجش‌ازدور ماهواره‌ای به دلیل پوشش مناسب مکانی و زمانی تصاویر رقومی به‌عنوان ابزاری مناسب جهت پایش روزانه گردوغبارها پیشنهاد شده است (King et al., 1999)

(Mishchenko et al., 2007). در این میان؛ شاخص عمق اپتیکی آئروسول (Aerosol Optical Depth (AOD)، یکی از شاخص‌های پرکاربرد جهت تحلیل و پایش ذرات معلق موجود در جو است که در مطالعات مختلف (حتی در پژوهش حاضر) از آن استفاده می‌شود. این شاخص، عبارت است از توزیع ذرات معلق موجود در ستون عمودی جو به طوری که میزان بالای آن، از تراکم زیاد ذرات معلق همچون گردوغبار در جو را نشان می‌دهد (Ramanathan & Crutzen, 2003). البته مقادیر این شاخص ثبت شده توسط سنجنده‌های ماهواره‌ای تحت تاثیر عوامل مختلفی از جمله رطوبت نسبی جو، ساختار کانی‌شناسی ذرات، شرایط هیگروسکوپی ذرات و غیره می‌باشد. پژوهش‌ها نشان می‌دهد که بین ضخامت نوری اتمسفر به‌دست آمده از داده‌های ماهواره‌ای و غلظت ذرات با قطر کوچک‌تر یا مساوی ۲/۵ میکرومتر (PM_{2/5}) و ذرات با قطر کوچک‌تر یا مساوی ۱۰ میکرومتر (PM₁₀) همبستگی مثبت خوبی برقرار است (Wang et al., 2009).

در حال حاضر، پژوهش‌های زیادی با استفاده از شاخص AOD، به لحاظ دقت در تشخیص و گستره زمانی و مکانی وسیع در سطح دنیا و ایران انجام شده است که به اختصار به چند مورد اشاره می‌شود. برای نمونه (Alam et al., 2011)، با استفاده از داده‌های گردوغبار حاصل از سنجنده‌های MODIS، TOMS و MISR تغییرات زمانی و مکانی گردوغبار را بر فراز چند شهر در پاکستان بررسی و بالاترین میانگین شاخص AOD را در طول فصل تابستان و کمترین آن را در زمستان مشاهده کردند. Rashki et al., (2014)، تغییرات زمانی و مکانی توفان‌های گردوغبار منطقه سیستان ایران را با استفاده از داده‌های شاخص گردوغبار AI و عمق نوری ذرات AOD حاصل سنجنده‌های MODIS، TOMS و MISR بررسی کردند و غلظت بالاتر ذرات معلق در اتمسفر در طول تابستان را نتیجه عمل ترکیبی خشک شدن فصلی دریاچه هامون و بادهای قوی دانستند. (Di et al., 2016)، در مطالعه‌ای با استفاده از شاخص AOD و EDI و داده‌های ماهواره INSAT به ردیابی گردوغبار در منطقه سین کیانگ پرداختند. نتایج نشان داد که شاخص EDI علاوه بر میزان گردوغبار، شدت آن را نیز مشخص می‌کند و بین واقعیت زمینی و EDI همبستگی بالایی وجود دارد. (Halos et al., 2017)، تاثیر گردوغبار بر خصوصیات نوری آئروسول را در عراق با سه شاخص AOD، AAOD، بررسی کردند و بر این باورند که هر سه

اساس رفتار گذشته و ارایه راهکارهایی برای مقابله با آن بر مبنای سازگاری، کنترل و کاهش اثرات آن در منطقه مورد بررسی می‌توان تا حدودی با این پدیده مخاطره‌آمیز مقابله نمود. بنابراین هدف اصلی پژوهش حاضر، بررسی ماهواره‌ای مخاطره گردوغبار در استان کردستان و تحلیل فضایی آن در دو دهه اخیر است. از جنبه‌های نوآورانه پژوهش حاضر می‌توان به استفاده از داده‌های گردوغبار ماهواره‌ای MODIS، تحلیل آماری چندمتغیره مانند تحلیل مولفه‌های اصلی و صحت‌سنجی میانگین ماهانه شاخص AOD در استان کردستان اشاره نمود.

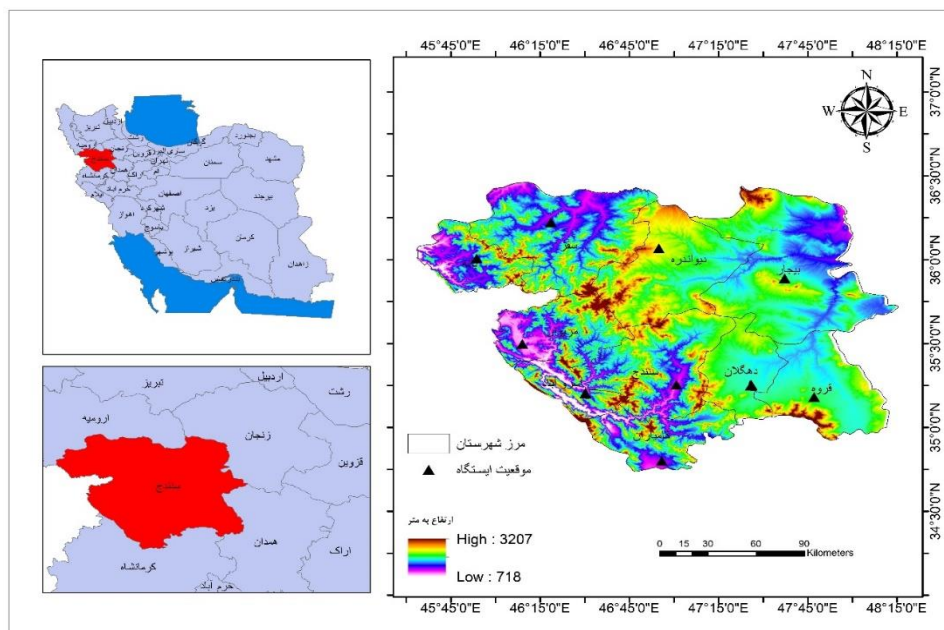
مواد و روش

منطقه مورد بررسی

استان کردستان در غرب ایران قرار گرفته است و با وسعتی حدود ۲۸۲۳۵ کیلومترمربع، شانزدهمین استان کشور از لحاظ وسعت می‌باشد. این استان با عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۴۲ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۳۰ دقیقه شمالی و طول جغرافیایی ۴۵ درجه و ۳۲ دقیقه تا ۴۸ درجه و ۱۵ دقیقه شرقی از سمت شمال به استان آذربایجان غربی و بخشی از زنجان، از جنوب به کرمانشاه، از شرق به استان‌های همدان و استان زنجان و از طرف غرب به کشور عراق محدود می‌گردد (شکل ۱، جدول ۱).

شاخص تقریباً از یک الگو تبعیت می‌کنند. تغییرات فصلی AOD و در ایستگاه‌های کشور عراق نشان داد که بیشترین میزان این دو شاخص در بهار و تابستان اتفاق می‌افتد. Raispour & (Khosravi, 2019)، با استفاده از مدل MERRA-2 به تحلیل رفتار بلندمدت عمق اپتیکی آئروسول (AOD) در دشت سیستان پرداختند. نتایج این پژوهش بیانگر افت‌وخیزهایی در میزان این شاخص بود ولی به‌طور کلی، روند شاخص مورد بررسی روند صعودی داشت، به طوری که میزان آن در سال‌ها افزایش یافت. تحلیل‌های آماری نیز تفاوت‌های معناداری را به لحاظ (سالانه، فصلی، ماهانه) و مکانی در میزان AOD نشان داد (Kazemi et al., 2021)، رابطه بیشینه گردوغبار و متغیرهای اقلیمی را در منطقه هرمزگان بررسی کردند و معتقدند که به ترتیب متغیرهای پوشش گیاهی، رطوبت خاک و میزان بارش، بیشترین تاثیر را بر میزان گردوغبار داشته‌اند. (Deep et al., 2021)، در پژوهشی دو شاخص AOD و EI را در منطقه‌ای از هند به صورت ماهانه فصلی و سالانه بررسی کردند. نتایج نشان داد که حداکثر میزان فصلی AOD در قبل از فصل مانسون ۰/۲۳ و حداقل آن ۰/۰۲ در بعد از فصل مانسون بوده است.

در سال‌های اخیر، پدیده گردوغبار به دلیل افزایش خشکسالی، نبود مدیریت، رهاسازی زمین‌های زراعی و تغییر اقلیم افزایش چشمگیری پیدا کرده و تقریباً به پدیده‌ای غیرقابل کنترل تبدیل شده است. لذا با شناخت رخداد زمانی و میزان غلظت این پدیده بر



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی استان کردستان و ایستگاه‌های مورد بررسی

جدول (۱): مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های مورد بررسی

ردیف	نام ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	ارتفاع برحسب متر
۱	سروآباد	۴۶ ۳۶	۳۵ ۳۱	۱۱۳۰
۲	بیجار	۴۷ ۶۰	۳۵ ۸۷	۱۹۴۰
۳	دیواندره	۴۷ ۲۳	۳۵ ۹۱	۱۸۴۲
۴	زرینه	۴۷ ۰۳	۳۶ ۰۶	۱۹۲۸
۵	سقز	۴۶ ۲۷	۳۶ ۲۴	۱۵۳۲
۶	مریوان	۴۶ ۱۷	۳۵ ۵۲	۱۳۴۳
۷	سنندج	۴۶ ۹۹	۳۵ ۳۰	۱۴۹۰
۸	قروه	۴۷ ۸۰	۳۵ ۱۶	۱۹۱۲
۹	بانه	۴۵ ۸۸	۳۵ ۹۹	۱۵۳۵
۱۰	کامیاران	۴۶ ۹۳	۳۴ ۷۹	۱۴۶۱

– روش‌شناسی

در این پژوهش، از آمار فراوانی روزهای توأم با گردوغبار در ۱۰ ایستگاه هم‌دید استان کردستان در بازه زمانی ۲۰ ساله، از سال ۱۳۸۰ تا ۱۴۰۰ شمسی که از سازمان هواشناسی کشور برداشت شده بود، استفاده شده است. به‌منظور شناسایی ماه‌هایی که بیشترین وقوع پدیده گردوغبار را دارند از روش تحلیل‌عاملی استفاده شد و سپس نقشه‌های پراکنش زمانی- مکانی پدیده گردوغبار در ماه‌های شناسایی شده از طریق تصاویر ماهواره‌ای سنجنده‌ی MODIS با سامانه گوگل‌ارث انجین (Google Earth Engine) ترسیم شد. سپس با استفاده از داده‌های اندازه‌گیری شده توسط ماهواره، روند تغییرات تراکم غلظت گردوغبار در دوره مورد بررسی ترسیم شد و جهت بررسی نحوه پراکنش فضایی داده‌های گردوغبار، از آزمون موران استفاده شد (شکل ۲). دلیل استفاده از داده‌های رقومی سنجنده MODIS این است که اولاً مشاهده زمین با ۲۰ باند طیفی مرئی (RSB) و ۱۶ باند طیفی حرارتی (TEB) فراهم است. دوم این که، قدرت تفکیک مکانی تا یک کیلومتر برای بیشتر باندها موجود است و سوم این که، امکان چهار بار تصویربرداری از هر منطقه در روز امکان‌پذیر شده است. علاوه بر این، تیم حمایتی این سنجنده محصولات خام MODIS را نیز فراهم می‌کنند و به‌صورت برخط در اختیار کاربران قرار می‌دهند. بنابراین با توجه به مزیت‌ها و قابلیت‌های سنجنده MODIS به‌عنوان یک سنجنده مهم برای شناسایی کانون‌های گردوغبار در این پژوهش انتخاب شد.

– پایش تعداد روزهای گردوغبار با روش تحلیل‌عاملی

هدف از انجام تحلیل‌عاملی، یافتن ترکیب‌هایی از p متغیر x_1

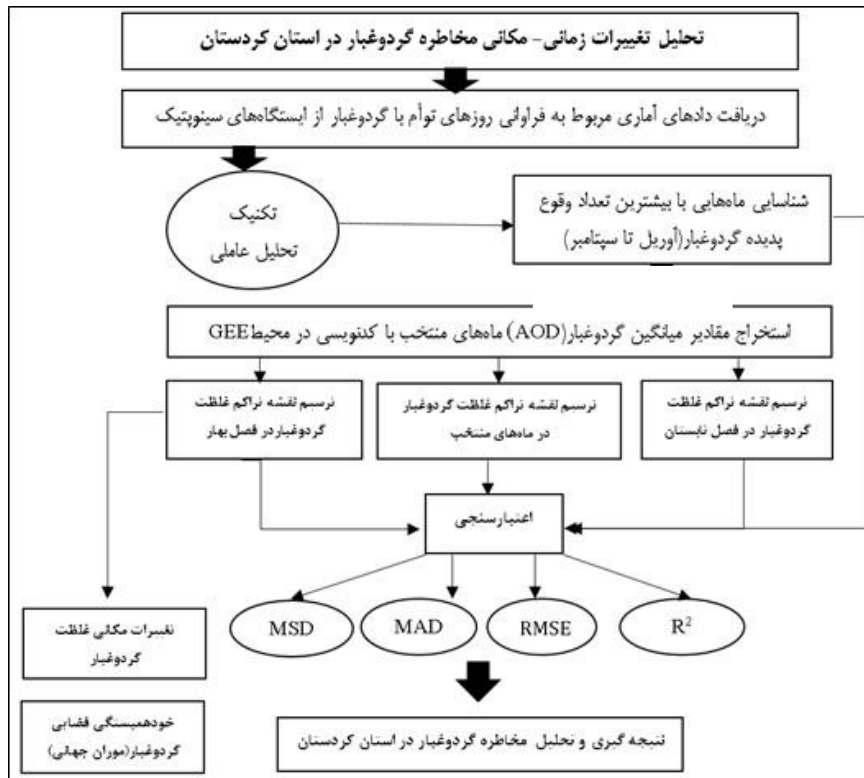
$x_2 \dots x_p$ برای ایجاد عامل‌های مستقل به‌منظور تشریح تغییرات موجود در داده‌هاست. مستقل بودن عامل‌ها به این معنی است که هر عامل جنبه متفاوتی از داده‌ها را اندازه می‌گیرد (Manourmoghdam et al., 2021). امتیاز این روش در این است که ضمن این که تعداد متغیرها را کاهش می‌دهد، مقدار اولیه پراش موجود در داده‌های اصلی حفظ می‌کند. در اغلب موارد نتایج نهایی فرآیند تحلیل‌عاملی به‌عنوان داده‌های اولیه روش خوشه‌بندی استفاده می‌شوند. هر قدر همبستگی داخلی بین متغیرها نزدیک‌تر باشد، تعداد عامل‌های پدید آمده کمتر خواهد بود. الگوی تحلیل‌عاملی به‌صورت زیر است (رابطه ۱):

رابطه (۱)

$$\begin{aligned} X_1 - \mu_1 &= e_{11}f_1 + e_{12}f_2 + \dots + e_{1m}f_m + \varepsilon_1 \\ X_2 - \mu_2 &= e_{21}f_1 + e_{22}f_2 + \dots + e_{2m}f_m + \varepsilon_2 \\ X_p - \mu_p &= e_{p1}f_1 + e_{p2}f_2 + \dots + e_{pm}f_m + \varepsilon_3 \end{aligned}$$

بردار تصادفی قابل‌مشاهده X با P مولفه دارای میانگین μ و ماتریس کوواریانس Σ است. در الگوی عاملی فرض می‌شود که X وابسته خطی چند متغیر تصادفی غیرقابل مشاهده F_1, F_2, \dots, F_m است که به آن‌ها عوامل مشترک گویند و p منبع دیگری از متغیرهای $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \dots, \varepsilon_p$ هستند که خطا یا عوامل خاص نامیده می‌شوند. به‌عبارت‌دیگر μ_p میانگین صفات، f_m ها عامل مشترک، ε_p ها عامل اختصاصی و p تعداد متغیرها است. همین مدل را می‌توان به‌صورت ماتریس زیر نوشت (Alijani, 2000):

$$x_1 = \mu + L F + \varepsilon \quad \text{رابطه (۲)}$$



شکل (۲): چارچوب مفهومی مراحل بررسی پدیده گردوغبار در استان کردستان

هم بر روی زمین و هم روی آب ارائه شده‌اند (Raygani & Khirandish, 2018). این شاخص، برای بررسی گردوغبار است و به توزیع آئروسول‌های گردوغبار موجود در جو و اندازه جرم ذرات معلق در یک ستون اتمسفر اشاره دارد (Manourmoghadam et al., 2021) و از اختلاف بین بازتابندگی سطح و بازتابندگی رسیده به سنجنده به دست می‌آید (Mobasheri et al., 2012). میزان بالای این شاخص حاکی از تراکم زیاد ذرات معلق همچون گردوغبار در جو است (Nateghi et al., 2022). به منظور محاسبه این شاخص برای استان کردستان از فرآورده MCD19A2 ورژن ۶ سنجنده MODIS ماهواره ترا با قدرت تفکیک مکانی ۱ کیلومتر بهره‌گیری شد. برای پایش مکانی مناطق گردوغباری در دوره مورد بررسی (۱۳۸۰ تا ۱۴۰۰ شمسی)، پس از استخراج تراکم غلظت این شاخص، تصاویر با استفاده رابطه (۳) نرمال شد تا اعداد شاخص بین صفر و یک قرار گیرند و مقدار عددی AOD، ۰/۵ به بالا به عنوان میزان بالای گردوغبار در نظر گرفته شد (Nateghi et al., 2022):

رابطه (۳)

$$AOD(normal) = (AOD - Min) / (Max - Min)$$

در این رابطه؛ AOD: شاخص به دست آمده از تصاویر MODIS؛

در این مدل X صفات قابل مشاهده و اندازه‌گیری، μ بردار میانگین صفات، L ماتریس ضرایب عامل‌ها، F عامل‌های مشترک تصادفی غیرقابل مشاهده و ϵ عوامل غیرقابل مشاهده تصادفی و اختصاصی است. F در تمام متغیرها مشترک هستند و به همین دلیل آن‌ها را عامل‌های مشترک می‌گویند. عواملی که از راه‌حل‌های عاملی به دست می‌آیند در اکثر موارد قابل تفسیر نیستند. برای این که تصور درستی از عامل‌ها به دست بیاید آن‌ها را می‌چرخانند. چرخش را موقعی انجام می‌دهند که برای توصیف کامل داده‌ها یک عامل کافی نباشد و یا این که تفسیر و تفکیک بارگویه عامل‌ها به‌سادگی انجام نگیرد. به منظور بیشینه کردن واریانس بارگویه‌ها، نام‌گذاری عامل‌ها و تسهیل در تفسیر ساختار عاملی، محورهای عامل‌ها به‌وسیله دوران واریماکس چرخش داده شد.

– شاخص عمق نوری هواویزها (AOD)

در این پژوهش به منظور بررسی گردوغبار از شاخص عمق اپتیکی هواویزها (AOD) که یکی از شاخص‌های پرکاربرد برای تحلیل و پایش ذرات معلق موجود در جو است، استفاده شده است (Nateghi et al., 2022). محصولات هواویز سنجنده MODIS

تک تک مشاهدات محاسبه می‌گردد. سپس خروجی این تابع، علامت هر سری را روشن می‌کند (Kashki et al., 2019).
(رابطه ۴):

$$S = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \text{sgn}(x_j - x_i) \quad \text{رابطه (۴)}$$

که در آن x_i و x_j مقادیر سالیانه در سال‌های i و j هستند و $j > i$ و N تعداد نقاط اطلاعات هستند. مقدار $\text{sgn}(x_j - x_i)$ طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود (رابطه ۵):

$$\text{رابطه (۵)}$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & \text{if } (x_i - x_j) > 0 \\ 0 & \text{if } (x_i - x_j) = 0 \\ -1 & \text{if } (x_i - x_j) < 0 \end{cases}$$

این رابطه مقادیر منفی را از مقادیر مثبت برای همه اعداد کم می‌کند. مرحله نهایی آزمون فرض است، فرض صفر بر عدم وجود روند و تصادفی بودن آن دلالت دارد، بدین معنی که Z آمار معنی‌داری نیست (برای مثال AOD در منطقه وجود ندارد). زمانی این فرض تایید می‌شود که $-Za/2 < Z < Za/2$ باشد. مقادیر $Za/2$ انحراف نرمال استاندارد است. فرض مقابل یا فرض یک بر وجود روند دلالت دارد و بدین معنی است که Z به لحاظ آماری معنی‌دار است. زمانی این فرض تایید می‌شود که $Z < -Za/2$ باشد. بنابراین در پژوهش حاضر در برخی ایستگاه روند بعضی از شاخص بارش حدی مثبت (افزایشی) و در برخی دیگر از آن‌ها منفی (کاهش) یا برخی دیگر فاقد روند هستند. در نتیجه، فرضیه‌ها در چنین مواردی دوطرفه انتخاب می‌شوند. همچنین سطح معنی‌داری در این پژوهش، $\alpha = 0.05$ می‌باشد. بنابراین با توجه به دوطرفه بودن آزمون، مقدار Z برابر $1/96$ خواهد بود.

اعتبارسنجی مخاطره گردوغبار در استان کردستان

با استفاده از آماره‌های ضریب تعیین (R^2)، میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین انحراف خطا (MBE) و میانگین خطای مطلق (MAE) در محیط نرم‌افزار MINITAB اقدام به ارزیابی داده‌های تولید شده توسط مدل در دوره پایه و مقایسه آن‌ها با داده‌های میانگین تعداد روزهای گردوغبار و شاخص AOD شد (Panahi & Khoramabadi, 2019) (رابطه ۶):

$$\text{رابطه (۶)}$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n}}$$

Min: کمترین مقدار عددی استخراج شده از شاخص AOD؛
Max: بیشترین مقدار عددی به دست آمده از شاخص است. به منظور بررسی روند تغییرات شاخص AOD، ابتدا با استفاده از فرآورده گردوغبار سنجنده MODIS و کدنویسی در گوگل‌ارث انجین، تمام تصاویر ماهواره‌ای از سال ۱۳۹۸ تا ۱۴۰۰ مورد بررسی و سری زمانی گردوغبار استخراج شد. سپس ماه و سالی که در این بازه زمانی بیشترین گردوغبار را داشت، تعیین شدند. پس از بررسی‌های انجام شده مشخص شد که بیشترین رخداد گردوغبار در منطقه در فصل تابستان و پس از آن، در فصل بهار رخ داده است. به همین منظور، نقشه‌های ماه‌های فروردین، اردیبهشت، خرداد، تیر، مرداد و شهریور برای هر سال در بازه زمانی یادشده در محیط GEE کدنویسی و در فرمت رستری استخراج شد.

خودهمبستگی فضایی گردوغبار

در دسته‌بندی الگوهای فضایی، چه خوشه‌ای، پراکنده یا تصادفی، می‌توان شباهت‌ها و تفاوت‌های هر جفت از واحدهای ناحیه‌ای مجاور را اندازه گرفت. وقتی که این شباهت‌ها و تفاوت‌ها برای الگوی فضایی مختصر شوند، خودهمبستگی فضایی اتفاق می‌افتد. خودهمبستگی فضایی به معنای این است که صفت‌های بررسی شده خودهمبسته‌اند و همبستگی آن‌ها قابل گواهی به نظم جغرافیایی پدیده‌هاست (Zandi et al., 2021). الگوهای متفاوتی برای سنجش آماره‌های خودهمبستگی فضایی وجود دارد، اما مشخصات آماری آن‌ها متفاوت است. بیشتر پژوهشگران بر شاخص موران تاکید دارند زیرا از پراکنش مطلوبی برخوردار است (Clark & Hosking, 1986).

بررسی روند تغییرات شاخص AOD به روش آزمون من‌کندال

در این پژوهش برای بررسی روند شاخص AOD از آزمون ناپارامتریک من-کندال استفاده شده است. آزمون من-کندال جز متداول‌ترین و پرکاربردترین روش‌های ناپارامتریک سری‌های زمانی به شمار می‌رود. این آزمون ابتدا توسط من (۱۹۴۵)، ارایه و سپس توسط کندال (۱۹۷۵)، بسط و گسترش یافت. این آزمون را می‌توان بر روی یک سری زمانی که نرمال نیست و از هیچ توزیع خاصی پیروی نمی‌کند برآزش داد. کاربرد این روش توسط سازمان جهانی هواشناسی توصیه شده است. مراحل محاسبه آماره این آزمون به شرح زیر می‌باشد. ابتدا بر اساس آماره (S) اختلاف بین

این هفت مولفه، ۱۰۰ درصد از واریانس تعداد روزهای گردوغبار استان کردستان را توجیه می‌کنند. ابتدا بدون چرخش بر ماتریس داده‌ها اعمال شد و مشخص شد که مولفه اول و دوم هر کدام به ترتیب؛ ۶۸ و ۱۳/۴۵ درصد از واریانس تعداد روزهای گردوغبار را تبیین می‌کنند. تعداد عامل‌های استخراج شده، مقادیر ویژه (مجموع مربعات بارهای عاملی) هر عامل، درصد واریانس توجیه شده توسط هر عامل و واریانس تجمعی را پس از چرخش نشان می‌دهد. عامل اول و دوم به ترتیب با مقدار ویژه ۶/۸۰ و ۱/۳۴ درصد بالایی از واریانس تعداد روزهای گردوغبار را توجیه کرده است. در این پژوهش تنها عامل‌های برخوردار از مقادیر ویژه برابر با یک یا بزرگ‌تر از آن با معنی در نظر گرفته شده و عامل‌هایی که دارای مقادیر ویژه کوچک‌تر از یک هستند، کنار گذاشته می‌شوند.

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)}{n}$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - Y_i|}{n}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

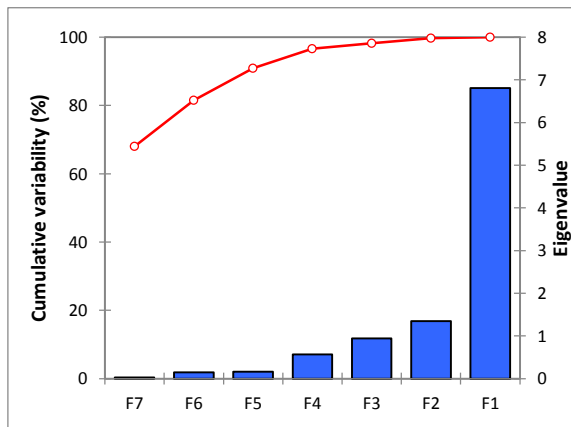
که در آن‌ها؛ X_i و Y_i به ترتیب i امین داده واقعی (میانگین تعداد روزهای گردوغبار و AOD)، \bar{X} و \bar{Y} میانگین کل داده‌های Y_i و X_i در جامعه آماری و n تعداد کل نمونه‌های مورد ارزیابی می‌باشند.

نتایج و یافته‌ها

نتایج حاصل از جدول (۲) نشان می‌دهد که مناسب‌ترین عوامل موثر برای تبیین شاخص گردوغبار، هفت مولفه اصلی است که

جدول (۲): آماره‌های تحلیل عاملی شاخص گردوغبار استان کردستان

توضیحات	عامل ۱ (F1)	عامل ۲ (F2)	عامل ۳ (F3)	عامل ۴ (F4)	عامل ۵ (F5)	عامل ۶ (F6)	عامل ۷ (F7)
مقدار ویژه	۶/۸۰	۱/۳۴	۰/۹۴	۰/۵۶	۰/۱۶	۰/۱۴	۰/۰۲
واریانس	۶۸/۰۸	۱۳/۴۵	۹/۴۱	۰/۶۹	۱/۶۰	۱/۴۷	۰/۲۸
درصد تجمعی واریانس	۶۸/۰۸	۸۱/۵۳	۹۰/۹۴	۹۶/۶۴	۹۸/۲۴	۹۹/۷۲	۱۰۰



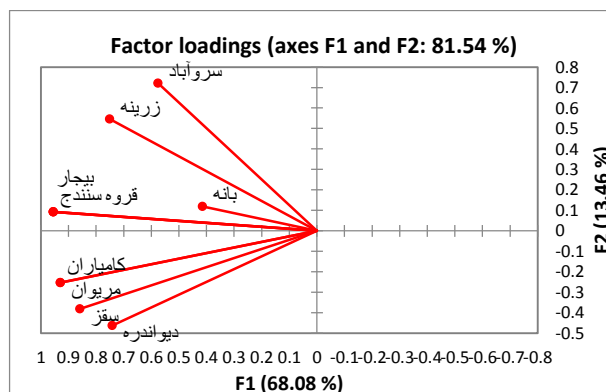
شکل (۳): نمودار صخره‌ای عامل‌های اصلی روزهای گردوغبار استان کردستان

در جدول (۳)، اعدادی که به صورت رنگی (رنگ قرمز) مشخص شده‌اند در واقع بیشترین بارگویی عاملی (همبستگی) را در عامل‌ها دارند. به طوری که می‌توانند تشکیل یک گروه را بدهند. هنگامی که عامل‌ها فاقد همبستگی باهم باشند، نسبت کل واریانس که با هر متغیر توضیح داده می‌شود؛ برابر با حاصل جمع کل واریانس‌های خواهند بود که توسط هر عامل توجیه می‌شود و همچنین میزان

آزمون نمودار صخره‌ای یا نمودار سنگ‌ریز ممتد واریانس کل تبیین شده به وسیله تعداد روزهای گردوغبار را در ایستگاه‌های مورد بررسی نشان می‌دهد (شکل ۳). ملاحظه می‌شود که مولفه‌های بزرگ در بالا و سایر مولفه‌ها با شیبی تدریجی در کنار هم نشان داده می‌شود. همچنین عامل اول و دوم (F1 و F2)، شیب تندی دارند در حالی که از عامل سوم به بعد شیب عامل‌ها ملایم‌تر شده و در انتها تبدیل به خط مستقیم می‌شود. نقطه عطف محل تفکیک ارزش واقعی و خطاست. شکل (۴)، نیز نمایانگر ضرایب همبستگی بین عامل‌ها و متغیر موردنظر است. این ضرایب، اهمیت متغیر تعداد روزهای گردوغبار را در میزان پراکندگی در نظر گرفته شده در محاسبه F نشان می‌دهد. همبستگی بالا بین تعداد روزهای گردوغبار و ایستگاه‌های کامیاران، مریوان، سقز و دیواندره (عامل اول) نشان‌دهنده این است که این متغیر، ۶۸ درصد از واریانس تعداد روزهای گردوغبار را تبیین می‌کند. در عامل دوم، میزان تبیین واریانس ایستگاه‌ها (سروآباد، بانه، زرینه، بیجار، قروه و سنندج) تقریباً ۱۳ درصد است که ۸۱ درصد از واریانس کل روزهای گردوغبار در ایستگاه‌های مورد بررسی توجیه می‌شود.

($\pm 1/96$ تا $\pm 1/65$)، در سطح اطمینان ۹۵ درصد به میزان ($\pm 1/96$ تا $\pm 2/57$) و همچنین در سطح اطمینان ۹۹ درصد (بیش از $\pm 2/57$) را نشان می‌دهد: تراکم بسیار پایین تعداد روزهای گردوغبار شامل ماه‌های مهر، آبان و آذر؛ تراکم پایین تعداد روزهای شامل ماه‌های بهمن و اسفند؛ تراکم شدیدترین تعداد روزهای گردوغبار شامل ماه‌های فروردین، اردیبهشت، خرداد، تیر، مرداد و شهریور پراکنش فراوانی بیشترین ماه‌های که دارای روزهای گردوغباری بودند، بدین‌گونه است که در طول دوره آماری، ماه فروردین با ۲۵۳، اردیبهشت با ۲۶۵، خرداد با ۲۵۵، تیر با ۲۴۷، مرداد با ۲۵۵ و شهریور با ۲۵۱ روز همراه با گردوغبار ثبت کرده است. به این مفهوم که فصل بهار و تابستان که به عنوان فصول خشک نامیده می‌شوند، به دلیل عدم رخداد بارش در این دو فصل در استان کردستان همانند بسیاری از نقاط دیگر ایران، پرفشار جنب‌حاره‌ای آזור است که اقلیم ایران را کنترل می‌کند و نبود رطوبت سطحی سبب ایجاد، تقویت و گسترش توفان‌های گردوغباری در کشور می‌شود که با نتایج (Ensafimoghadam, 2020) همخوانی و تطابق بالایی دارد.

اشتراک آن متغیر بین عامل اول و دوم (میزان اشتراک ایستگاه‌ها با تعداد روزهای گرد و غبار) می‌باشد.



شکل (۴): موقعیت ایستگاه‌های مورد بررسی با توجه به ضریب تبیین حاصل از مولفه اول و دوم

با توجه به این که میزان همبستگی یافته‌ها و ارتباط درونی متغیرها چنان که حول یک مولفه تجمع پیدا کنند، به صورت ارتباط مثبت و بالعکس به صورت ارتباط منفی متجلی می‌گردد، لذا بر این اساس نیز می‌توان عامل‌ها را نام‌گذاری نمود. در جدول (۴)، وجود همبستگی در سطح اطمینان بین حدفاصل ۹۰ درصد در میزان

جدول (۳): میزان همبستگی روزهای گردوغبار با ایستگاه‌ها مورد بررسی بر اساس روش تحلیل عاملی (مولفه اول و دوم)

توضیحات	سنندج	سقز	بیجار	قروه	زرینه	مریوان	بانه	کامیاران	دیواندره	سروآباد
عامل ۱ (F1)	۰/۹۵	۰/۸۵	۰/۹۵	۰/۹۵	۰/۷۵	۰/۹۳	۰/۴۱	۰/۹۳	۰/۷۴	۰/۵۷
عامل ۲ (F2)	۰/۰۹	-۰/۳۸	۰/۰۹	۰/۰۹	۰/۵۴	-۰/۲۵	۰/۱۲	-۰/۲۵	-۰/۴۶	۰/۷۲

جدول (۴): امتیازدهی روزهای گردوغبار ماهانه استان کردستان بر اساس روش تحلیل عاملی (مولفه اول و دوم)

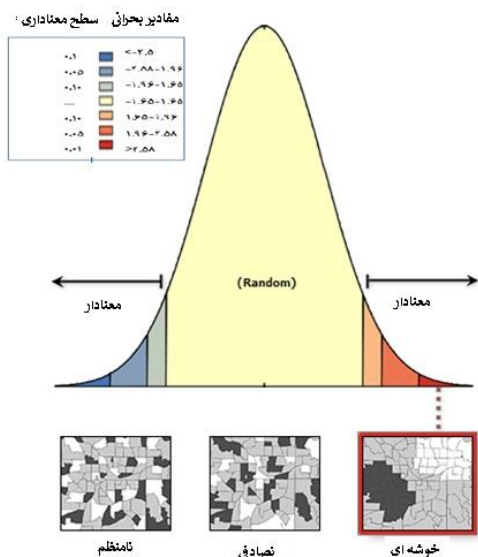
توضیحات	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
عامل ۱ (F1)	-۳/۹۸	-۴/۱۳	-۴/۴۷	-۱/۴۸	۱/۳۱	۱/۰۳	۱/۷۸	۱/۸۶	۱/۵۶	۱/۶۹	۲/۳۳	۲/۴۹
عامل ۲ (F2)	۰/۶۷	۰/۲۴	۰/۵۹	-۲/۱۳	-۱/۸۶	-۱/۳۳	۰/۳۵	۱/۹۱	۱/۰۵	-۰/۱۳	۰/۷۴	-۰/۱۲

گرفت که گردوغبار در استان کردستان ساختار فضایی دارند و به شکل خوشه‌ای توزیع شده است. به عبارتی دیگر؛ گردوغبار در این استان، میل به تمرکز و خوشه‌ای شدن در فضا دارد.

مدل‌سازی زمانی-مکانی رخداد گردوغبار در استان کردستان
پراکنش میانگین شاخص AOD به تفکیک ماه (زمانی) در طول دوره مورد بررسی در جدول (۵) ذکر شده است. نتایج بررسی نشان داد که ماه‌های فروردین (۰/۳۴)، اردیبهشت (۰/۳۴)، خرداد (۰/۳۲)،

خودهمبستگی فضایی گردوغبار در استان کردستان

شکل (۵) مقادیر خودهمبستگی فضایی موران را برای گردوغبار استان کردستان نشان می‌دهد. بر این اساس، مقدار شاخص موران برای دوره مورد بررسی بیش از ۰/۹۵ و آماره Z در این زمان ۲۵۵/۴۱ است. از آنجا که مقدار شاخص جهانی موران (۰/۹۵) مثبت و نزدیک یک است و همچنین آماره Z محاسبه شده با اطمینان ۹۹ درصد، بزرگتر از مقدار مورد انتظار (۰/۰۰۰۰۲۷) است و مقدار P-value، صفر را نشان می‌دهد لذا می‌توان نتیجه



شکل (۵): خروجی گرافیکی آماره موران برای گردوغبار استان کردستان

تیر (۰/۴۴)، مرداد (۰/۲۵) و شهریور (۰/۱۸)، بالاترین میزان AOD را در طول دوره آماری از آن خود کرده‌اند. از بین ماه‌های تفکیک شده، تیرماه بیشترین میزان شاخص AOD را به خود اختصاص داده است. شدیدترین آن در تیرماه سال ۱۳۸۹ با بزرگی ۰/۴۴ و کمترین آن در شهریور سال ۱۳۸۵ با مقدار ۰/۱۱ ثبت شده است. به گونه‌ای که در بخش وسیعی از این استان، میانگین عمق نوری هواویزها در ماه مرداد به کمتر از (۰/۲) رسیده است. از ماه مرداد به تدریج مقادیر شاخص AOD کاهش می‌یابد و در ماه شهریور مقادیر اندکی از آن مشاهده می‌شود. نتایج پژوهش‌های (Namdari et al., 2016; Nateghi et al., 2022; Kazemi et al., 2021) نشان داد که بیشتر توفان‌های گردوغبار ایران در تیرماه رخ داده است که نتایج حاصل از این پژوهش نیز مؤید این مطلب است.

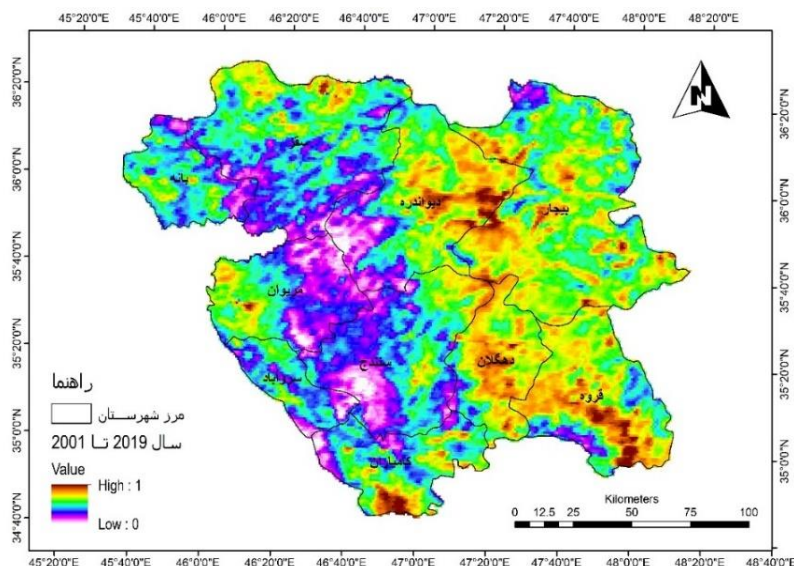
جدول (۵): تغییرات شاخص AOD در ماه‌های منتخب استان کردستان (ماه‌های دارای بیشترین روزهای گردوغبار)

سال	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور
۱۳۸۰	۰/۱۴۴	۰/۱۴۹	۰/۱۱۸	۰/۲۰۳	۰/۱۳۹	۰/۱۵۹
۱۳۸۱	۰/۱۴۹	۰/۱۵۹	۰/۱۱۵	۰/۱۸۷	۰/۱۳۲	۰/۱۲۲
۱۳۸۲	۰/۲۱۹	۰/۱۹۳	۰/۲۲۵	۰/۲۱۹	۰/۲۰۵	۰/۱۳۵
۱۳۸۳	۰/۱۴۸	۰/۲۰۵	۰/۱۵۳	۰/۱۸۸	۰/۲۰۱	۰/۱۵۸
۱۳۸۴	۰/۲۰۲	۰/۲۰۱	۰/۱۹۷	۰/۲۵۹	۰/۱۷۹	۰/۱۱۶
۱۳۸۵	۰/۱۹	۰/۱۵	۰/۱۷۶	۰/۲۴۷	۰/۲۵۸	۰/۱۱
۱۳۸۷	۰/۱۶۵	۰/۲۴۸	۰/۱۹	۰/۲۱۶	۰/۲۱۴	۰/۱۳۹
۱۳۸۸	۰/۲۰۴	۰/۲۳۲	۰/۲۵۱	۰/۲۸۸	۰/۲۴۵	۰/۱۸۹
۱۳۸۹	۰/۲۰۵	۰/۲۳۹	۰/۳۲۳	۰/۴۴۱	۰/۲۳۹	۰/۱۶
۱۳۹۰	۰/۲۴۷	۰/۲۸۱	۰/۲۳۳	۰/۲۸۷	۰/۲۵۷	۰/۱۵۸
۱۳۹۱	۰/۳۴۲	۰/۲۵۳	۰/۲۶۳	۰/۲۹۸	۰/۲۰۲	۰/۱۶۱
۱۳۹۲	۰/۱۹۲	۰/۳۴	۰/۲۱۸	۰/۲۲۸	۰/۲۳۶	۰/۱۴۲
۱۳۹۳	۰/۱۷۱	۰/۲۸	۰/۲۵۶	۰/۱۸۷	۰/۲۲۱	۰/۱۳۶
۱۳۹۵	۰/۱۶۴	۰/۱۷۴	۰/۲۱۹	۰/۲۲۴	۰/۱۹	۰/۱۲۵
۱۳۹۶	۰/۱۸۸	۰/۲۱۸	۰/۲۳	۰/۲۶۵	۰/۱۷۸	۰/۱۵۴
۱۳۹۷	۰/۱۷۵	۰/۱۹۸	۰/۲۸۵	۰/۲۵	۰/۲۴۷	۰/۱۳۱
۱۳۹۸	۰/۱۷۱	۰/۱۸۴	۰/۱۵۸	۰/۲۵۶	۰/۱۹۲	۰/۱۷۵
۱۳۹۹	۰/۱۶	۰/۲۴۹	۰/۱۷۸	۰/۲۸۱	۰/۲۴۵	۱۳۶
۱۴۰۰	۰/۱۴۱	۰/۱۵۱	۰/۱۷۲	۰/۲۳۲	۰/۲۵۵	۰/۱۴

ضخامت نوری در ماه‌هایی که گردوغبار دارای فراوانی رخداد بالاتری بودند، نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که به لحاظ مکانی، نیمه شرقی استان کردستان شامل ایستگاه‌های قروه، دهگلان،

همچنین پراکنش مکانی تراکم غلظت گردوغبار (نرمال شده) استان کردستان در طی سال‌های مورد بررسی در شکل (۶)، نشان داده شده است که میزان وسعت و غلظت گردوغبار را با استفاده از

بیجار، دیواندره و همچنین بخش‌های کامیاران و مریوان، تراکم شدید شاخص AOD را دارا هستند ولی نیمه غربی استان، کمترین تراکم روزهای گردوغبار را به خود اختصاص داده است.



شکل (۶): پراکنش مکانی تراکم غلظت گردوغبار طی سال‌های مورد بررسی در استان کردستان

از این است که توافق داده‌ها در دوره پایه و دوره مدل‌سازی شده بالاست و میزان خطای این دو سری داده اندک است. بنابراین کارایی و دقت شاخص AOD در مدل‌سازی غلظت میزان گردوغبار مورد تایید قرار می‌گیرد.

اعتبارسنجی میانگین ماهانه شاخص AOD و تعداد روزهای گردوغبار استان کردستان همان گونه که جدول (۶) نشان می‌دهد، نتایج درست‌سنجی پرونداد تعداد روزهای گردوغبار و داده‌های شاخص AOD منتخب حاکی

جدول (۶): پایش اعتبارسنجی ماهانه شاخص AOD در استان کردستان

سنججه‌ها				مدل سازی شاخص AOD طی سال های مورد بررسی	ماه
MSD	MAD	RMSE	R ²		
۰/۰۰	۰/۰۰۲	۰/۵۰۴	۰/۴۸	$Y = -0.0002X + 0.1905$	فروردین
۰/۰۰۱	۰/۰۳۵	۰/۷۲۴	۰/۶۱	$Y = -0.002X + 0.1905$	اردیبهشت
۰/۰۰۰	۰/۰۰۶	۰/۷۶۵	۰/۵۷	$Y = 0.0025X + 0.185$	خرداد
۰/۰۰	۰/۰۱۲	۰/۰۵۳	۰/۴۳	$Y = 0.0013x + 0.2411$	تیر
۰/۰۰	۰/۰۰۵	۰/۶۸۳	۰/۶۱	$y = 0.0032x + 0.1804$	مرداد
۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۱/۰۶۷	۰/۳۱	$y = 0.0004x + 0.1403$	شهریور

همبستگی مستقیم معنی‌دار بین میانگین تعداد روزهای گردوغبار و شاخص AOD نشان داده می‌شود که با افزایش تعداد روزهای گردوغبار در استان کردستان، میزان شاخص AOD نیز افزایش می‌یابد.

جدول (۷)، آماره‌های اعتبارسنجی رگرسیونی گردوغبار و ایستگاه‌های مورد بررسی را نشان می‌دهد. به‌عنوان نمونه برای ایستگاه سنج؛ مدل رگرسیونی $y = ۰/۰۶۲X + ۰/۲۳۵$ ثابت کرد به ازای هر $(۰/۰۶۲)$ ، تعداد روزهای گردوغبار افزایش، شاخص AOD $۰/۲۳۵$ نیز افزایش خواهد یافت. بدین‌منظور یک

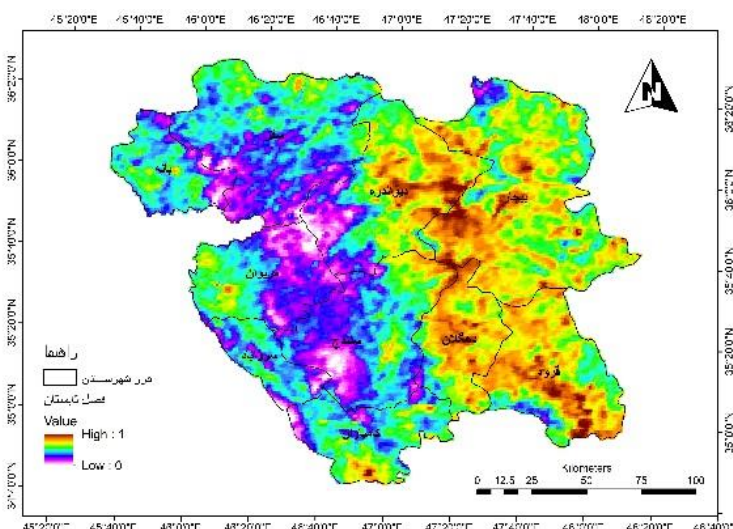
جدول (۷): پایش اعتبارسنجی ایستگاهی تعداد روزهای گردوغبار با شاخص AOD در استان کردستان

نام ایستگاه	مدل سازی تعداد روزهای گردوغبار با AOD	R ²	RMSE	MAD	MSD
سروآباد	$Y = 0.021X + 0.191$	۰/۶۵	۰/۹۹	۰/۲۸۵	۰/۱۰۹
بیجار	$y = 0.02X + 0.1789$	۰/۶۷	۰/۰۰۵	۰/۲۹۴	۰/۱۰۷
دیواندره	$y = 0.05X + 0.124$	۰/۴۲	۰/۳۵۰	۰/۰۰	۰/۰۰
زرینه	$y = 0.02X + 0.1789$	۰/۶۷	۰/۵۶۷	۰/۵۸۴	۰/۴۶۲
سقز	$Y = 0.058X + 0.38$	۰/۸۱	۰/۶۳۴	۰/۷۲۳	۰/۷۸۶
مریوان	$Y = 0.07X + 0.139$	۰/۸۵	۰/۴۴۲	۰/۷۸۱	۰/۷۷۱
سنندج	$y = 0.062X + 0.235$	۰/۵۸	۰/۷۳۱	۰/۰۹	۰/۰۰
قروه	$y = 0.062X + 0.235$	۰/۵۸	۰/۴۳۶	۰/۸۰۳	۰/۸۴۴
بانه	$Y = 0.02X + 0.1789$	۰/۶۷	۰/۶۶۴	۰/۱۶۹	۰/۰۳۲
کامیاران	$Y = 0.112X + 0.235$	۰/۵۷	۰/۸۸۷	۰/۷۹۷	۰/۸۵۸

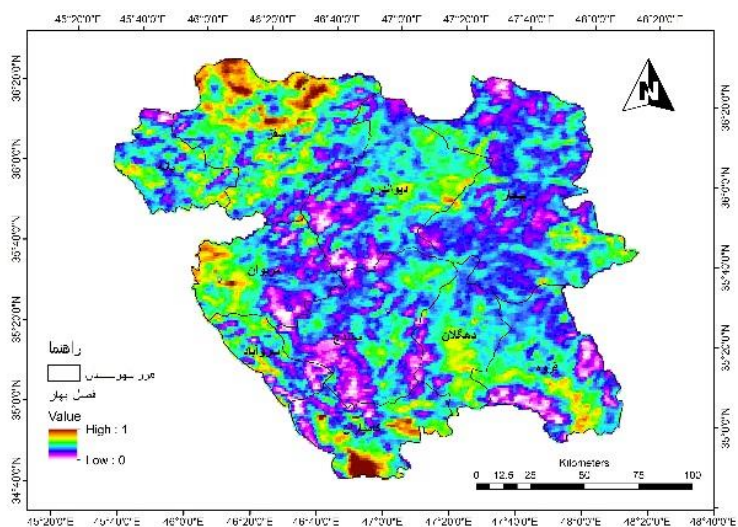
تغییرات فضایی شاخص AOD در استان کردستان

به منظور بررسی تغییرات فضایی- زمانی شاخص AOD از روش ضریب تغییرات به صورت یاخته‌مبنا بهره گرفته شد. که نوع شدت آن براساس طیف رنگی طبقه‌بندی شده است. در سطح استان هم تغییرات منفی و هم مثبت در شش ماه سال (فروردین تا شهریور) مشاهده گردد. روند افزایشی بدین معنی است که میزان آلاینده‌های که منجر به کاهش عمق اپتیکی نور یا به بیانی میرایی و پخش نور می‌شوند افزایش یافته است و روند کاهشی، عکس آن را نمایش می‌دهد. یعنی میزان غلظت هواویزه‌ها در آن مناطق دارای رفتاری کاهشی است. بر پایه شکل‌های (۷ تا ۱۰) می‌توان به چند نکته اشاره داشت. اولاً روند افزایشی و همچنین روند کاهشی در سرتاسر استان قابل مشاهده است. از دید مکانی، موقعیت‌های نسبتاً یکسانی در شش ماه دارای روند افزایشی یا کاهشی هستند. دوماً بیشتر تغییرات زمانی چه به لحاظ شدت و به

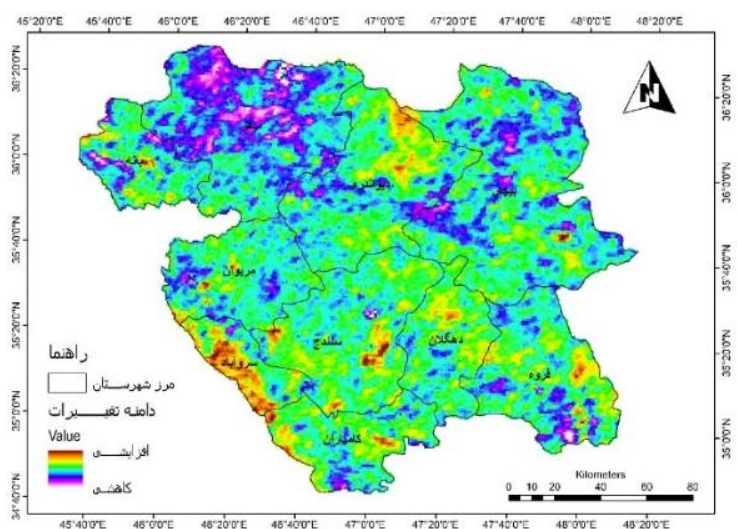
لحاظ مکانی متعلق به اواخر فصل بهار و فصل تابستان به خصوص ماه‌های تیر و مرداد است. به بیانی دیگر در نگاه کلی؛ فصل تابستان دارای بیشترین روند مثبت میزان غلظت هواویزه‌ها است و پس از آن، فصل بهار در رتبه دوم قرار دارد که با نتایج پژوهش (SoleimaniSardoo et al., 2021) همخوانی دارد. به عنوان نمونه شهرهای بانه، سقز، دیواندره، بیجار، قروه، دهگلان در حاشیه شرقی استان در زمره مناطقی با روند افزایشی روزهای گردوغبار هستند و شهرهای غربی استان و از جمله در قسمت مرکزی استان کردستان (سنندج)، روند غلظت گردوغبار بسیار کاهشی است. سوماً فراوانی یاخته‌هایی که دارای روند افزایشی هستند نسبت به یاخته‌هایی که دارای رفتار کاهشی هستند، بیشتر است. این بدین معنی است که در سال‌های اخیر، گستره بیشتری از استان با روند افزایشی غلظت هواویزه‌ها و به ویژه گردوغبارها روبه‌رو است.



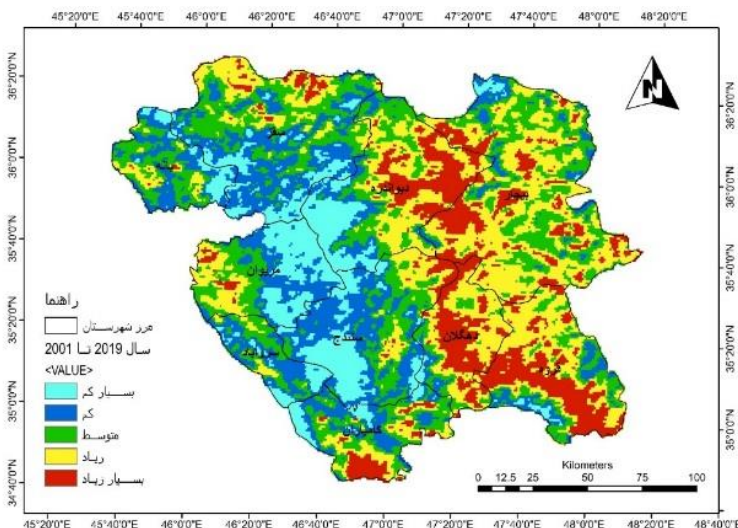
شکل (۷): پراکنش مکانی تراکم غلظت گردوغبار در فصل تابستان



شکل (۸): پراکنش مکانی تراکم غلظت گردوغبار در فصل بهار



شکل (۹): پراکنش مکانی دامنه تغییرات شاخص AOD



شکل (۱۰): پراکنش مکانی روند شاخص AOD

نتیجه گیری

۰/۳۴، اردیبهشت با ۰/۳۴، خرداد با ۰/۳۲، تیر با ۰/۴۴، مرداد با ۰/۲۵ و شهریور با ۰/۱۸، بالاترین میزان شاخص AOD را از آن خود کرده‌اند. در این میان؛ بالاترین میزان شاخص AOD مربوط به تیر سال ۱۳۸۹ با بزرگی ۰/۴۴ است و کمترین مقدار آن را شهریور سال ۱۳۸۵ با مقدار ۰/۱۱ به خود اختصاص داده است. با گذر از فصل تابستان و افزایش رطوبت و شروع تدریجی بارش، مقادیر شاخص AOD کاهش می‌یابد. همچنین تحلیل مکانی شاخص گردوغبار استان کردستان نشان داد که نیمه شرقی استان شامل ایستگاه‌های قروه، دهگلان، بیجار، دیواندره، کامیاران و مریوان، بیشترین تراکم روزهای گردوغباری را دارند. همچنین در این استان روند افزایشی توفان‌های گردوغبار در نیمه شرقی و روند کاهشی در نیمه غربی استان قابل مشاهده است. بیشترین تغییرات زمانی چه به لحاظ شدت و به لحاظ مکانی، متعلق به اواخر فصل بهار و تابستان به خصوص ماه تیر و مرداد است. اما به طور کلی؛ فراوانی یاخته‌هایی که نشان از روند افزایشی روزهای گردوغباری هستند نسبت به یاخته‌هایی که دارای رفتار کاهشی هستند، بیشتر است. این بدین معنی است که در سال‌های اخیر، گستره بیشتری از استان با روند افزایشی غلظت هواویزه‌ها و به ویژه گردوغبارها روبه‌رو شده است. نتایج پژوهش حاضر می‌تواند به برنامه‌ریزان شهری و متولیان سلامت جامعه جهت فرهنگ‌سازی و ارتقای آموزش شهروندان در مقابله با پدیده گردوغبار، بهبود شرایط محیط‌زیست، شناسایی زمان مساعد سفر و آغاز فعالیت‌های گردشگری در استان کردستان کمک شایانی نماید.

در پژوهش حاضر با استفاده از تصاویر سنجنده تراس ماهواره MODIS و همچنین فرآورده عمق اپتیکی هواویزه‌ها (شاخص AOD)، نقشه‌های پراکنش زمانی- مکانی پدیده گردوغبار در استان کردستان طی دوره ۲۰ ساله با گوگل ارث انجین ترسیم شد. نتایج حاکی از این است که هفت مولفه اصلی، ۱۰۰ درصد از واریانس تعداد روزهای گردوغبار استان کردستان را توجیه می‌کنند و در این میان؛ مولفه اول و دوم (در ایستگاه‌های همراه با روزهای گردوغبار) هر کدام به ترتیب ۶۸ و ۱۳/۴۵ درصد از واریانس تعداد روزهای گردوغبار را استان را تبیین می‌کنند. همچنین با اطمینان ۹۵ درصد می‌توان اذعان کرد که با ارتباط‌سنجی بین شاخص AOD و روزهای گردوغباری استان چند ویژگی مشاهده می‌شود: کمترین تعداد روزهای گردوغبار در ماه‌های مهر، آبان و آذر؛ تراکم کم روزهای گردوغبار در ماه دی؛ تراکم متوسط روزهای گردوغبار در ماه‌های بهمن و اسفند و بالاترین تراکم تعداد روزهای گردوغبار در ماه‌های فروردین، اردیبهشت، خرداد، تیر، مرداد و شهریور ثبت شده است. به طوری که در این استان؛ فروردین با ۲۵۳ روز، اردیبهشت با ۲۶۵ روز، خرداد با ۲۵۵ روز، تیر با ۲۴۷ روز، مرداد با ۲۵۵ روز و شهریور با ۲۵۱ روز همراه با گردوغبار بوده‌اند. این بدان معنا است که در ماه‌های فصل بهار و تابستان به علت استقرار پرفشار جنب‌حاره‌ای آزور از یک سو و خشکی هوا و کمی رطوبت سطحی در کشور عراق، میزان گردوغبار جوی افزایش معناداری در منطقه داشته است. همچنین نتایج نشان داد که ماه فروردین با

فهرست منابع

- 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*, 27: 4641-4651.
- Alijani, B. 2000. *Synoptic climatology*. First edition, Payam Noor University Press, Tehran.
- Asadilofti, R., Alsheikh, A.A., & Behzadi, S. 2018. An overview of dust phenomenon prediction models and data collection techniques. *Geospatial Engineering Journal*, 4: 55-65. (in persian)
- Baddock, M.C., Bullard, J.E., & Bryant, R.G. 2009. Dust source identification using MODIS: A comparison of techniques applied to the Lake Eyre Basin, Australia. *Remote Sensing of Environment*, 113:1511-1528
- Clark, W., & Hosking, P. I. 1986. *Statistical Methods for geographers*. John Wiley.
- Deep, A.; Pandey, C.; Nandan, H.; Singh, N.; Yadav, G.; Joshi, P. C.; Purohit, K. D. & Bhatt, S. C. 2021. Aerosols optical depth and Angstrom exponent over different regions in Garhwal Himalaya, India, *Journal of Environ Monitoring Assessment*, 193: 324. Doi. Org/10. 1007% 2Fs10661-021-09048-4.

- Di, A.; She, L.; Xue, Y.; Yang, X.; Leys, J.; Guang, J.; Mei, L.; Wang, J.; Hu, Y.; He, X.; Che, Y.; & Fan, C. 2016. Dust Aerosol Optical Depth Retrieval and Dust Storm Detection for Xinjiang Region Using Indian National Satellite Observations, *Journal of Remote Sensing*, 8, 702. Doi: 10.3390/rs8090702.
- Ensafimoghadam, T. 2020. Investigation of Aerosol Optical Depth Index (AOD) in dust events over Southwestern of Iran. *Iranian nature magazine*, 6: 55-67. (in persian)
- Halos, S. H.; Al-Taai, O.; & Al-Jiboori, M. 2017. Impact of dust events on aerosol optical properties over Iraq, *Arab Journal Geoscience*, 10, 263. DOI 10.1007/s12517-017-3020-2.
- Kashki, A.R., Hosseini, S.M., & Khoramabadi, F. 2019. Spatio-temporal analysis of cooling degree-day requirement in North East of Iran. *Geography and planning*, 67: 263-286. (in persian)
- Kazemi, M.; Nafarzadegan, A. R.; & Mohammadi, F. 2021. Investigation of the relationship between maximum dust and climatic variables using remote sensing data (Case study: Hormozgan Province), *Iranian Journal of Range and Desert Research*, 27: 798- 812.
- King, M.D., Kaufman, Y.J., Tanre, D., & Nakajima, T. 1999. Remote sensing of tropospheric aerosols from space: past, present and future, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 11:2229–2259
- Manourmoghadam, M., Naghipour, N., Rousta, Iman., & Ghafarinmalmiri, H.R. 2021. Temporal and Spatial Monitoring and Forecasting of Suspended Dust Using Google Earth Engine and Remote Sensing Data (Case Study: Qazvin Province), *Desert Management*, 1: 77-98. (in persian)
- McTainsh, G.H., & Strong, C.S. 2007. The role of Aeolian dust in ecosystems. *Geomorphology*, 89: 39-54.
- Mehrshahi, D., & Nekoum, Z. 2009. Statistical investigation of the phenomenon of dust and analysis of the blowing pattern of dust-causing winds Sabzevar city, *Geografy*, 22: 83-96. (in persian)
- Mishchenko, M.I., Geogdzhayev, I.V., Cairns, B., Carlson, B.E., Chowdhary, J., Lacis, A.A., Liu, L., Rossow, W.B., & Travis, L.D. 2007. Past, present, and future of global aerosol climatology derived from satellite observations: a perspective, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 106: 325–347.
- Mobasheri, A.; Kalamegam, G.; Musumeci, G.; & Batt. M. E. 2014. Chondrocyte and mesenchymal stem cell-based therapies for cartilage repair in osteoarthritis and related orthopaedic conditions, *Maturitas* 78, 188–198. Doi: 10.1016/j.maturitas.2014.04.017.
- Moghadam, M., Mohamadi, S.A., & Aghae, M. 1994. Introduction to multivariate statistical methods, Pishtaz Alam Publications, Tabriz. (in persian)
- Namdari, S.; Valizade, K. K.; Rasuly, A. A.; & Sarraf, B. S. 2016. Spatio-temporal analysis of MODIS AOD over western part of Iran, *Arabian Journal of Geosciences*, 9: 191- 205.
- Nateghi, S., Ghohardoust, A., & Soleimanisardoo, F. 2022. Investigating the Effect of Vegetation on the Occurrence of Dust Phenomenon (Case Study: Hormozgan Province). *E.E.R.* 12 (2):43-60. (in persian)
- Panahi, A., & Khoramabadi, F. 2019. Evaluation of accuracy of CSIRO data and LARS-WG model in simulating climatic variables of East Azerbaijan province. *Climate Risk Transformation Journal*, 15: 142-166. (in persian)
- Raispour, K., & Khosravi, M. 2019. Analysis of Long Term Behavior of Aerosol Optical Depth (AOD) in Sistan Plain Using MERRA-2 Model, *International Dust Conference in Southwest Asia*, Zabol. April 2019.
- Ramanathan, V., & Crutzen, P. J. 2003. New directions: Atmospheric brown clouds. *Atmospheric Environment*, 37: 4033-4035.
- Rashki, A., Kaskaoutis, D. G., Eriksson, P. G., Rautenbach, C. D. W., Flamant, C., & Vishkaee, F. A. 2014. Spatio-temporal variability of dust aerosols over the Sistan region in Iran based on satellite observations. *Natural hazards*, 71:563-585.

- Rasoli, A.A., Sarisaraf, B., & Mohammadi, G. H. 2010. Analyzing the occurrence of dust climatic phenomenon in the west of the country in the last 55 years using non-parametric statistics methods. *Natural Geography Quarterly*, 9: 15-25. (in persian)
- Raygani, B., & Khirandish, Z. 2018. Utilization of time series of satellite data in order to validate the identified dust storm sources in Alborz province. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 4: 1-18. (in persian)
- SoleimaniSardoo, F., Karami, S., & Hoseinhamzeh, N. 2021. Determining and analyzing the temporal and spatial trend of dust and its effect on vegetation and precipitation (Case study of Jazmourian Basin). *E.E.R*, 11 (3):64-81. (in persian)
- Wang, Y.Q., Zhang, X.C., Xue, M., & Li, X.W. 2009. Correlation between PM concentrations and aerosol optical depth in eastern China, *Atmospheric Environment*, doi:10.1016/j.atmosenv.2009.08.026,
- Zandi, R., Salanimoghdam, M., & Roudaki, Z. 2021. Measuring the Degree of Spatial Autocorrelation of Land Surface Temperature with Land Use (Isfahan City). *Geography and environmental planning*, 34: 61-76. (in persian)
- Zender, S., Bian, H., & Newman, D. 2003. Mineral Dust Entrainment and Deposition (DEAD) model: Description and 1990s dust climatology, *J. Geophys. Research*, 108:1-22.