

Temporal Changes and Spatial Distribution of Suspended Particulate Matter in the Southern Alborz Mountains Based on Satellite Data

Mohammad Naji¹ , Ghasem Azizi²  , Mostafa Karimi³ 

1. Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

Email: mohammad.naji@ut.ac.ir

2. (Corresponding Author) Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

Email: ghazizi@ut.ac.ir

3. Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran

Email: mostafakarimi.a@ut.ac.ir

Article Info

Article type:
[Research Article](#)

Article History:

[Received:](#)

26 April 2024

[Received in revised form:](#)

1 July 2025

[Accepted:](#)

9 August 2025

[Available online:](#)

14 September 2025

Keywords:

Aerosol,
Suspended particulate
matter monitoring,
Google Earth Engine,
Environmental hazards,
Critical Areas.

ABSTRACT

Air pollution is one of the primary environmental challenges in the metropolitan areas of Tehran, Karaj, and Qazvin. Due to the concentration of industries and population in this region, high levels of particulate matter pose a significant threat to human health and the environment. This research aims to analyze the spatiotemporal distribution of particulate matter concentration and identify critical areas on a five-year average basis, with annual, seasonal, and monthly variations. For this purpose, Sentinel-5 satellite aerosol absorption index data were used to investigate the spatiotemporal variations of suspended particulate matter in the southern slopes of central Alborz. The results showed that the highest concentration of suspended particulate matter was observed in the south and eastern regions of the area, including Tehran, the political border of Qom, and Karaj. Analysis of hotspots at a 99% confidence level indicates a high concentration of pollution in these areas. Between 2018 and 2020, particulate matter concentrations exhibited a decreasing trend, reaching a minimum. However, in 2021, concentrations surged to their peak. Seasonal and monthly analyses revealed that the highest particulate matter levels occurred during summer. This pattern underscores the influence of geographic factors, population density, and industrial activities on the spatial distribution of pollutants, emphasizing the need for region-specific interventions to manage air quality.

Cite this article: Naji, M., Azizi, Q., & Karimi, M. (2025). Temporal Changes and Spatial Distribution of Suspended Particulate Matter in the Southern Alborz Mountains Based on Satellite Data. *Physical Geography Research Quarterly*, 57 (2), 1-18.

<http://doi.org/10.22059/jphgr.2024.383803.1007845>



© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press

Extended Abstract

Introduction

Air pollution became evident in human life when human settlements began to form as concentrated and stationary communities. Air pollution, caused by suspended particulate matter, refers to changes in the natural composition of the atmosphere due to the introduction of particles from both human and natural sources. Suspended particulate matter in the air consists of a mixture of solid and liquid particles that vary significantly in terms of shape, size, number, chemical composition, and origin. These differences cause some suspended particulate matter to have more severe health impacts than others. In megacities, the primary sources of suspended particulate matter are a combination of fossil fuel combustion from vehicles, construction equipment, furnaces, and power plants. Like many other developing countries, Iran is grappling with air pollution and is not exempt from this problem. Due to the geographical location of the study area on the southern slopes of the central Alborz Mountains and the comprehensive view of this region for spatiotemporal analysis of suspended particulate matter, the lack of air quality monitoring stations is a major challenge. This shortage is particularly noticeable in the cities of Karaj and Qazvin. Therefore, the primary objective of this study is to analyze the five-year (2018-2022) temporal and spatial patterns of suspended particulate matter in the study area. This analysis encompasses annual, seasonal, and monthly variations using the Aerosol Absorption Index (AAI) derived from Sentinel-5 satellite imagery, adopting a holistic approach to the region.

Methodology

To investigate the spatiotemporal variations of suspended particulate matter in the study area, the Aerosol Index (AAI) product from the Sentinel-5 satellite was utilized. Sentinel-5, the first Copernicus mission satellite, is a powerful tool for atmospheric monitoring. The Tropospheric Monitoring Instrument (Tropomi) was launched aboard Sentinel-5 on October 13, 2017. These analyses used JavaScript programming

language through the Google Earth Engine web platform. The outputs obtained from this index include several results for evaluating these pollutants' temporal and spatial changes and understanding their distribution patterns in the environment. The products of this index include a five-year average of the suspended particulate matter index (from 2018 to 2022), an annual trend analysis over this period, and an analysis of seasonal and monthly variations. Subsequently, ArcMap software classified and produced a spatial map of the average concentration of suspended particulate matter. Finally, to more accurately discover the spatial distribution and intensity of particulate matter pollution, hot and cold spots, and Getis-Ord Gi* statistics were used. This analysis can help better understand the spatial distribution of air pollution, identify critical areas, and ultimately show the difference in the intensity of air pollution between the metropolitan areas of Tehran, Karaj, and Qazvin.

Results and discussion

A five-year average analysis of the spatial distribution of suspended particulate matter reveals a high concentration of particulates, including dust and smoke, in the southern and eastern regions, particularly around Tehran and the Qom border. This concentration is linked to anthropogenic factors such as population density, industries, and traffic. Additionally, wind patterns and topography play a role in particulate distribution. Hot spot analysis using the Getis-Ord-Gi statistic showed that the southern regions are more polluted, while the northern regions have better air quality. Moreover, the suspended particulate matter index decreased from 2018 to 2020, reaching its lowest point in 2020. However, it exhibited an increasing trend from 2021 onwards, peaking in 2022. This increase can be attributed to factors such as increased industrial activities and climatic changes. Pollution hotspots were concentrated in the southern regions of Tehran, Karaj, and Qazvin and remained relatively stable throughout this period. In other words, spatial variations in suspended particulate matter concentration have not

been significant during this period, and the spatial distribution of suspended particulate matter has remained relatively stable. On the other hand, northern regions with lower population density and better air flow have cooler spots with less pollution. The results of the horizontal visibility field show that visibility at Mehrabad station has continuously decreased and has a significant correlation with the suspended particulate matter index. At Karaj station, visibility decreased from 2018 to 2020 and then increased until 2021, but decreased again in 2022. These changes indicate the significant impact of air pollution and suspended particulate matter on the reduction of horizontal visibility. Seasonal analysis of suspended particulate matter distribution and concentration, along with hotspot identification, reveals that the highest SPM concentrations occur during the summer months, particularly in the southern and central regions of Tehran, which are influenced by surrounding deserts and northerly winds. Similar patterns can be observed in autumn, while spring and winter exhibit different distributions. Hotspots linearly extend from southeast Tehran to west Qazvin, and the northern regions and Alborz mountains are cold spots with lower pollution. The monthly distribution of suspended particulate matter reveals a consistent increase from May to September, reaching its peak in July. The highest concentrations were observed in the Tehran, Karaj, and Qazvin regions, particularly along the Tehran-Qazvin freeway. This increase is attributed to stable atmospheric conditions, rising temperatures, reduced wind speeds, traffic congestion, industrial activities, accumulating pollutants, and deteriorating air quality.

Conclusion

A precise understanding of the impacts of particulate matter on human health and the environment requires continuous monitoring of particle concentration and size distribution on a global scale. The high variability of these particles in the atmosphere poses significant challenges for ground-based monitoring networks. Therefore, remote sensing technologies, especially Sentinel-5 satellite data, provide

an efficient tool for examining suspended particulate matter's spatial and temporal distribution. The results indicate that the highest concentrations of suspended particulate matter are concentrated in Iran's central and southeastern regions, particularly around Tehran. Between 2018 and 2020, due to restrictions imposed by the COVID-19 pandemic, the concentration of suspended particulate matter decreased continuously and reached its lowest level in 2020. However, with the return to normal activities, pollutants increased again and reached their highest level in 2021. With its unique climatic conditions, summer experiences the highest concentrations of suspended particulate matter, particularly in Tehran. Dust storm sources influence this region in the surrounding deserts. Moreover, monthly variations reveal increased particulate concentrations from May to July. In-depth analyses can help evaluate the impact of pollution control policies and measures, and contribute to the development of predictive models for the future. Thus, increasing the number of ground-based monitoring stations and utilizing remote sensing technologies are essential steps for optimal air pollution management and implementing sustainable environmental policies.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to all the scientific consultants of this paper.

تغییرات زمانی و پراکنش مکانی شاخص ذرات معلق در دامنه جنوبی البرز مرکزی بر پایه داده‌های ماهواره‌ای

محمد ناجی^۱، قاسم عزیزی^۲✉، مصطفی کریمی^۳ 

۱- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: mohammad.naji@ut.ac.ir

۲- نویسنده مسئول، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: ghazizi@ut.ac.ir

۳- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: mostafakarimi.a@ut.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۰۲/۰۶

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۴/۰۴/۱۰

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۰۵/۱۸

تاریخ چاپ:

۱۴۰۴/۰۶/۲۳

واژگان کلیدی:

آئروسول،

پایش ذرات معلق،

گوگل ارث انجین،

مخاطرات محیطی،

مناطق بحرانی.

آلودگی هوا یکی از چالش‌های اصلی زیست‌محیطی در کلان‌شهرهای تهران، کرج و قزوین است که به دلیل تمرکز صنعتی و جمعیتی این منطقه، سطوح بالای ذرات معلق، سلامت انسان و محیط‌زیست را تهدید می‌کند. هدف این پژوهش، تحلیل زمانی _ مکانی غلظت ذرات معلق و شناسایی مناطق بحرانی به‌صورت میانگین پنج‌ساله، تغییرات سالانه، فصلی و ماهانه است. بدین منظور، از داده‌های شاخص جذب آئروسول (AAI) ماهواره‌ای سنتینل-۵ استفاده‌شده تا تغییرات مکانی _ زمانی ذرات معلق در دامنه‌های جنوبی البرز مرکزی بررسی شوند. نتایج نشان داد بیشترین غلظت ذرات معلق در نواحی جنوبی و شرقی منطقه از جمله تهران، مرز سیاسی قم و کرج مشاهده‌شده است. تحلیل کانون‌های بحرانی در سطح اطمینان ۹۹٪ حاکی از تمرکز بالای آلودگی در این نواحی است. در مقابل، مناطق شمالی قزوین و ارتفاعات البرز به دلیل جریان هوای بهتر و فعالیت‌های صنعتی کمتر دارای کیفیت هوای بهتری هستند. طی بازه زمانی ۱۳۹۷ تا ۱۳۹۹، روند تغییرات غلظت ذرات معلق نزولی بوده و به حداقل مقدار خود رسیده، اما در سال ۱۴۰۱ به اوج خود افزایش‌یافته است. تحلیل‌های فصلی و ماهانه نشان می‌دهند که بیشترین غلظت ذرات معلق در فصل تابستان ثبت‌شده است. این الگو تأثیر عوامل جغرافیایی، تراکم جمعیت، و فعالیت‌های صنعتی بر توزیع فضایی آلاینده‌ها را برجسته می‌کند و بر اهمیت مداخلات منطقه‌ای برای مدیریت کیفیت هوا تأکید دارد.

استناد: ناجی، محمد؛ عزیزی قاسم و کریمی، مصطفی. (۱۴۰۴). تغییرات زمانی و پراکنش مکانی شاخص ذرات معلق در دامنه جنوبی البرز

مرکزی بر پایه داده‌های ماهواره‌ای. *مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۷ (۲)، ۱۸-۱.

<http://doi.org/10.22059/jphgr.2024.383803.1007845>

مقدمه

آلودگی هوا در زندگی انسان زمانی نمایان شد که سکونت انسان به صورت اجتماعات متمرکز و ثابت شکل گرفت (عزیزی و همکاران، ۱۴۰۳: ۶۶). اکثر شهرهای سراسر جهان از مشکلات جدی کیفیت هوا رنج می‌برند که در دهه گذشته توجه فزاینده‌ای را به خود جلب کرده است (Mayer., 1999: 4029). درواقع آلودگی هوا یکی از دغدغه‌های جهانی مردم، دولت و جامعه علمی بوده است (Fan et al., 2020: 1). آلودگی هوا نه تنها باعث بروز انواع بیماری‌ها می‌شود (Cohen et al., 2017: 1907)؛ بلکه، بر آب‌وهوا تأثیر می‌گذارد که در طولانی مدت منجر به رویدادهای آب‌وهوایی شدید می‌شود (Herrera-Estrada et al., 2018: 2).

آلودگی هوا به وسیله ذرات معلق به تغییر در ترکیبات طبیعی جو به علت ذرات ورودی ناشی از عوامل انسانی و طبیعی مربوط می‌شود (انصاری و همکاران، ۱۴۰۳: ۳۸). ذرات معلق در هوا شامل مخلوطی از ذرات جامد و مایع هستند که از نظر شکل، اندازه، تعداد، ترکیب شیمیایی، و منشأ دارای تنوع قابل توجهی هستند. این تفاوت‌ها باعث می‌شوند برخی از ذرات معلق تأثیرات بهداشتی شدیدتری نسبت به سایرین داشته باشند (Goudarzi et al., 2019: 434). از طرفی، افزایش ذرات معلق نه تنها می‌تواند دید افقی اتمسفر را کاهش دهد و تأثیرات منفی بر سلامت انسان داشته باشد (Kan et al., 2012: 1519)؛ بلکه با تغییر توازن تشعشعات باعث تغییر اقلیم نیز می‌شود (Kan et al., 2012: 1519). در کلان‌شهرها منابع اصلی ذرات معلق ترکیبی از سوخت‌های فسیلی اتومبیل‌ها، تجهیزات ساختمانی، کوره‌ها و نیروگاه‌ها می‌باشد. ذرات ریز از طریق احتراق منتشر می‌شوند درحالی‌که ذرات درشت‌تر به وسیله فرایندهای مکانیکی به داخل هوا نفوذ می‌کنند (Tiwari et al., 2012: 522). گردوغبارها نوع دیگری از ذرات معلق هوا هستند که بخش گسترده‌ای از کره زمین از جمله کشور ایران را تحت تأثیر قرار می‌دهد (برتینا و همکاران، ۱۳۹۳: ۱۲۰). در زمینه ریزگردها، مواجهه کوتاه مدت با ذرات معلق می‌تواند منجر به برونشیت، آسم و تغییراتی در ضربان قلب شده و مواجهه طولانی مدت با ذرات خطر ابتلا به سرطان ریه و بیماری‌های تنفسی را افزایش می‌دهد (Kok et al., 2006: 104). به همین دلیل، ذرات معلق به عنوان یکی از آلاینده‌های اصلی و مهم محیط‌زیستی در مناطق شهری شناخته می‌شوند.

ایران نیز، همچون بسیاری از دیگر کشورهای درحال توسعه، با چالش آلودگی هوا مواجه است و از این معضل مستثنی نیست. بخش بزرگی از جمعیت ایران در دامنه جنوبی البرز مرکزی یعنی سه کلان‌شهر تهران، کرج و قزوین متمرکز شده‌اند. طبق آخرین سرشماری نفوس و مسکن این سه شهر دارای ۱۵,۱۹۷,۱۱۶ جمعیت ساکن در نقاط شهری می‌باشد (مرکز آمار ایران، ۱۳۹۵). این جمعیت سطوح بالای آلودگی جوی را تجربه می‌کنند و نگرانی‌های زیادی در تمام بخش‌های جامعه ایجاد می‌کند. به طوری‌که زندگی، سلامت و کار مردم در منطقه را به طور جدی تحت تأثیر قرار داده است. به دلیل موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه واقع در دامنه‌های جنوبی البرز مرکزی و دید یکپارچه به این منطقه جهت تحلیل زمانی-مکانی ذرات معلق، کمبود ایستگاه‌های پایش آلودگی هوا یکی از چالش‌های اساسی به شمار می‌آید. این کمبود به ویژه در شهرهای کرج و قزوین محسوس است. علاوه بر این، اطلاعات موجود در این ایستگاه‌ها دارای نواقص و محدودیت‌های زمانی است. این موضوع می‌تواند دقت و جامعیت تحلیل‌های مرتبط با آلودگی هوا را به ویژه در مطالعات بلندمدت کاهش دهد. اما فناوری سنجش‌ازدور، آلودگی هوا را با دقت زمانی و مکانی بسیار بالاتری از روش‌های دیگر برآورد می‌کند (Saw et al., 2021: 2).

در نگارش این مقاله به تحلیل توزیع فضایی و زمانی ذرات معلق در منطقه متراکم جمعیتی-صنعتی محدوده سه کلان‌شهر تهران، کرج و قزوین پرداخته شده است. بنابراین، هدف اصلی این مقاله تحلیل الگوی زمانی و مکانی میانگین پنج ساله (۱۳۹۷ تا ۱۴۰۱) ذرات معلق در منطقه مورد مطالعه است. این بررسی شامل تغییرات سالانه، فصلی و ماهانه بوده

و با استفاده از شاخص AAI استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای سنتینل-۵ و با رویکردی یکپارچه به منطقه انجام می‌شود. محاسبه میانگین پنج ساله امکان ارزیابی دقیق‌تر و به‌دوراز نوسانات کوتاه‌مدت را فراهم می‌کند، درحالی‌که تحلیل روند سالانه، الگوهای تغییرات را نشان می‌دهد. همچنین، تحلیل تغییرات فصلی و ماهانه می‌تواند به شناسایی عوامل مؤثر بر نوسانات دوره‌ای نظیر شرایط جوی، تغییرات اقلیمی، یا فعالیت‌های انسانی کمک کند.

مطالعه تغییرات زمانی و مکانی آلودگی ذرات معلق همواره یکی از موضوعات موردتوجه محققان بوده است. گوتام و برمن در مطالعه‌ای بر روی شهر چنای هند طی سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۸، تغییرات زمانی و مکانی ذرات معلق PM_{10} را بررسی کردند. نتایج نشان داد که غلظت این ذرات در نزدیکی مناطق صنعتی بالاتر است و در فصل تابستان، به دلیل شرایط خشک موسمی، غلظت PM_{10} افزایش می‌یابد (2Gautam & Brema, 2020). فن و همکاران به تحلیل جامع تغییرات مکانی-زمانی آلودگی هوای شهری در چین طی سال‌های ۲۰۱۴-۲۰۱۸ پرداختند. نتایج نشان داد بالاترین مقدار ذرات معلق در شمال غرب و مرکز چین تمرکز دارد. به‌طورکلی، آلودگی هوا در دشت شمال چین و در شهرهای مرکزی و غربی استان سین‌کیانگ شدیدتر است (2: Fan et al., 2020). خو و همکاران به بررسی الگوی زمانی و مکانی غلظت ذرات معلق در منطقه دلتای یانگ تسه با استفاده از داده‌های MODIS از سال ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۳ پرداختند. نتایج نشان داد که غلظت ذرات معلق در ماه‌های زمستان و در مناطق شهری به اوج خود می‌رسد، درحالی‌که در تابستان و مناطق جنگلی کمترین میزان غلظت مشاهده می‌شود (932: Xu et al., 2016). لامسال و همکاران با استفاده از داده‌های سنجنده OMI و سازمان کیفیت هوا در ایالات متحده، روند دی‌اکسید نیتروژن را از ۲۰۰۵ تا ۲۰۱۳ بررسی کردند. نتایج هر دو منبع داده، کاهش دی‌اکسید نیتروژن در این بازه زمانی را نشان داد (130Lamsal et al., 2015). وانگ و همکاران به مطالعه تغییرات زمانی و مکانی شش آلاینده در ۳۱ شهر بزرگ چین را پرداختند و نشان دادند که میانگین غلظت‌های $PM_{2.5}$ و PM_{10} در تمام شهرها بالاتر از استانداردهای ملی چین بوده و آلودگی هوا به‌ویژه در زمستان و در شمال چین شدیدتر است (413: Wang et al., 2014). گارسیا و همکاران در مطالعه‌ای در شمال اسپانیا تغییرات زمانی ذرات معلق PM_{10} و $PM_{2.5}$ را بررسی کردند. نتایج نشان داد که بیشترین غلظت این ذرات در پاییز و زمستان ثبت شده است. همچنین، الگوی روزانه غلظت نشان داد که دو اوج عمده در صبح و عصر وجود دارد که بیشتر ناشی از ترافیک و فعالیت‌های انسانی است (331: García et al., 2019). شکمبا و همکاران به بررسی روند تغییرات گاز دی‌اکسید گوگرد و دی‌اکسید نیتروژن در بازه زمانی دسامبر ۲۰۱۸ تا سپتامبر ۲۰۱۹ در آفریقای جنوبی با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای سنتینل-۵ پرداخته‌اند. نتایج این پژوهش نشان‌دهنده تأثیر باد بر پراکنش دی‌اکسید گوگرد و دی‌اکسید نیتروژن بوده و بیانگر کاهش مقادیر آلودگی در فصل تابستان و افزایش آن در فصل زمستان است (Shikwambana et al., 2020). محمدی و همکاران تأثیر تخریب محیط‌زیست و تغییر اقلیم بر گردوغبار در استان خوزستان را بررسی کردند یافته‌ها نشان داد که افزایش دمای هوا و سطح زمین، ۹۵ درصد از واریانس تغییرات گردوغبار در این منطقه توجیه می‌کند (Mohammadi et al., 2024:4329).

در ایران نیز میری و همکاران (۱۳۹۶) به بررسی تغییرات زمانی و مکانی شاخص‌های گردوغبار در شرق خراسان بر پایه داده‌های ماهواره‌ای پرداختند. نتایج این مطالعه نشان‌دهنده روند افزایشی شاخص‌های گردوغبار در طی سال‌های ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۴ است. همچنین، شاخص UVAI بیشترین میزان ذرات معلق را در سال‌های ۲۰۰۲، ۲۰۰۸ و ۲۰۱۴ نشان می‌دهد. زینلی و همکاران (۱۴۰۲) با استفاده از سنجنده ماهواره سنتینل ۵ به تحلیل مکانی و زمانی آلاینده‌های هوا در استان آذربایجان شرقی پرداختند. نتایج نشان داد که در فصل سرما، مناطق بیشتری تحت تأثیر آلاینده‌های CO و NO_2 ناشی از سوخت‌های فسیلی و فعالیت‌های صنعتی قرار دارند. همچنین، بالاترین غلظت ذرات معلق در فصل تابستان

مشاهده شد. برزگر و همکاران (۱۴۰۰) به بررسی روند تغییرات مکانی-زمانی آلاینده‌های با قطر آئرودینامیکی ۲٫۵ و ۱۰ میکرومتر و ازن هوای شهر تبریز طی سال‌های ۱۳۹۶-۱۳۸۵ پرداختند. یافته‌ها نشان داد که میانگین سالانه غلظت ذرات معلق کاهش یافته است، اما در برخی روزها غلظت این آلاینده‌ها از استانداردهای سازمان بهداشت جهانی و ملی بالاتر بوده است. همچنین، بالاترین میانگین ماهانه غلظت ذرات معلق در مهر و دی ثبت گردیده است. شاه‌بیک و همکاران (۱۴۰۱) به تحلیل روندهای زمانی و مکانی تغییرات آلاینده‌های هوا در کلان‌شهر کرج پرداختند. بر اساس این مطالعه ذرات معلق به‌عنوان آلاینده‌های اصلی شهر کرج در فصول گرم و سرد سال به شمار می‌آیند و سایر آلاینده‌ها به‌ندرت وضعیت شاخص کیفیت هوا را از حد مجاز فراتر می‌برند. عبدالعظیمی و همکاران (۱۴۰۲) به بررسی و پایش غلظت دی‌اکسید نیتروژن در دوران کووید-۱۹ در کلان‌شهر شیراز با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای سنتینل-۵ پرداخته‌اند. بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش، بالاترین مقادیر میانگین ماهانه گاز دی‌اکسید نیتروژن در سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ مربوط به فصل پاییز بود. علاوه بر این، منطقه ۲ شهر شیراز به‌عنوان آلوده‌ترین ناحیه در طی دو سال موردبررسی شناسایی گردید. رئیس‌پور (۱۴۰۰) به ارزیابی زمانی-مکانی غلظت ستونی ذرات معلق ($PM_{2.5}$) ناشی از رویدادهای گردوغباری در ایران پرداخت. نتایج نشان داد تراکم ذرات معلق $PM_{2.5}$ در دوره آماری مورد مطالعه به‌طور کلی روند صعودی داشته است. بیشترین تراکم $PM_{2.5}$ در ماه‌های می، آوریل، و جولای و کمترین آن در ماه‌های دسامبر، ژانویه، و نوامبر مشاهده شد. از نظر فصلی، بیشترین تراکم در تابستان و کمترین در زمستان رخ داده است. همچنین آزادی مبارکی و احمدی (۱۳۹۹) به تغییرپذیری بلندمدت ذرات معلق شهر تبریز با استفاده از داده‌های سنجش‌از دوری پرداختند.

پژوهش‌های متعددی تاکنون بر روی بررسی ذرات معلق با استفاده از داده‌های ایستگاهی انجام شده‌اند. این مطالعات، هرچند به تحلیل آلودگی در نقاط مختلف پرداخته‌اند، اما به دلیل محدودیت‌های موجود در تعداد و پراکندگی ایستگاه‌های سنجش، نمی‌توانند تصویری جامع و یکپارچه از تغییرات زمانی و مکانی این آلاینده‌ها ارائه دهند. از سوی دیگر، در بسیاری از این پژوهش‌ها، تمرکز اصلی بر مناطق شهری یا صنعتی خاص بوده است و به‌ندرت به مناطق وسیعی که شامل پهنه‌های جمعیتی و صنعتی گسترده می‌باشند، توجه شده است. منطقه میان تهران، البرز و قزوین به‌عنوان یکی از نواحی پرتراکم صنعتی و جمعیتی کشور، تحت تأثیر شدید آلودگی هوا قرار دارد. این منطقه با دارا بودن صنایع سنگین، حمل‌ونقل پرتردد، و توسعه سریع شهری، به یکی از قطب‌های آلودگی ذرات معلق در ایران تبدیل شده است. بررسی جامع و گسترده بر روی توزیع زمانی و مکانی ذرات معلق در این منطقه، تاکنون به‌طور کامل انجام نشده است. بنابراین، با اطلاع از توزیع مکانی و زمانی این آلاینده، می‌توان ویژگی و موقعیت هر یک از نقاط اندازه‌گیری شده را فراهم نمود و نقاط بحرانی را شناسایی کرد.

روش پژوهش

جهت بررسی تغییرات زمانی-مکانی ذرات معلق در منطقه مورد مطالعه از محصول^۲ شاخص^۳ AAI ماهواره سنتینل-۵^۴ استفاده شد. ماهواره سنتینل ۵ به‌عنوان اولین ماهواره مأموریت کوپرنیکوس^۵ و یکی از ابزارهای قدرتمند در زمینه پایش

1. COVID-19

2. Products

3. Absorbing Aerosol Index

4. Sentinel-5

5. Copernicus

اتمسفر می‌باشد. سنجنده پایش تروپوسفر (Tropomi) در تاریخ ۱۳ اکتبر سال ۲۰۱۷ بر روی ماهواره سنتینل ۵ به فضا پرتاب شد. سنجنده Tropomi به صورت دو روز یک بار با قدرت تفکیک مکانی ۷ کیلومتر در ۳٫۵ کیلومتر نقشه‌های آلودگی هوا را تهیه می‌کند. این سنجنده از باندهای ماوراءبنفش^۱ (۲۷۰-۳۲۰ نانومتر)، محدوده مرئی (۳۱۰-۵۰۰ نانومتر)، مادون قرمز نزدیک (۶۷۵-۷۷۵ نانومتر) و مادون قرمز طول موج کوتاه (۲۳۰۵-۲۳۸۵ نانومتر) پشتیبانی می‌کند. این ماهواره در مدار خورشید آهنگ با ارتفاع ۸۲۴ کیلومتر به نحو قابل قبولی غلظت ذرات معلق را اندازه‌گیری و پایش می‌کند. شاخص AAI بر اساس کنتراست طیفی در محدوده طیفی فرابنفش (UV) برای یک جفت طول موج مشخص است، جایی که تفاوت بین بازتاب مشاهده شده و مدل سازی شده منجر به یک مقدار باقیمانده می‌شود. هنگامی که این باقیمانده مثبت باشد، نشان دهنده وجود ذرات معلق در هوای جاذب UV، مانند گردوغبار و دود است (Veefkind et al., 2012: 75؛ غریبی و شایسته، ۱۴۰۰: ۱۲۶؛ قنادی و همکاران، ۱۴۰۱: ۸۷).

برای بررسی تغییرات زمانی و مکانی ذرات معلق و نحوه پراکنش آن‌ها، از محصولات شاخص AAI با دقت تفکیک مکانی یک کیلومتری استفاده شد. این تحلیل‌ها با بهره‌گیری از زبان برنامه‌نویسی جاوا اسکریپت^۲ و از طریق سامانه تحت وب گوگل ارث انجین^۳ انجام گرفت. گوگل ارث انجین یک سامانه تحت وب است که با فراهم آوردن بانک اطلاعاتی جامع از تصاویر ماهواره‌ای و دستورات ساده، امکان انواع پردازش داده‌های سنجش از دور را مهیا کرده است (Farhadi & Najafzadeh, 2021: 6). محصولات به دست آمده از این شاخص شامل چندین خروجی به منظور ارزیابی تغییرات زمانی و مکانی این آلاینده‌ها و درک الگوهای پراکنش آن در محیط، است. محصولات این شاخص شامل میانگین پنج ساله شاخص ذرات معلق (طی سال‌های ۱۳۹۷ تا ۱۴۰۱)، روند تغییرات سالانه در این بازه زمانی، و همچنین تحلیل تغییرات فصلی و ماهانه است. در مرحله بعد، نقشه مکانی میانگین غلظت ذرات معلق با استفاده از نرم افزار ArcMap طبقه‌بندی و تهیه شد. این نقشه به منظور تجزیه و تحلیل فضایی غلظت آلاینده‌ها در محدوده مورد مطالعه تولید گردید. با توجه به اینکه ذرات معلق می‌توانند به طور قابل توجهی باعث کاهش میدان دید افقی شوند، از داده‌های مربوط به میدان دید افقی ایستگاه‌های مهرآباد، کرج و قزوین که توسط سازمان هواشناسی کشور جمع‌آوری شده‌اند، برای انجام تجزیه و تحلیل استفاده شده است. این داده‌ها نقش مهمی در ارزیابی اثرات آلودگی ذرات معلق بر کاهش میدان دید در این مناطق ایفا می‌کنند.

در آخر جهت کشف دقیق‌تر از توزیع فضایی و شدت آلودگی ذرات معلق از لکه‌های داغ^۴ (خوشه مکانی با مقادیر زیاد) و لکه‌های سرد (خوشه مکانی با مقادیر کم) و آماره گتیس ارد جی^۵ استفاده شد. این تحلیل می‌تواند به درک بهتر پراکنش مکانی آلودگی هوا و شناسایی مناطق بحرانی کمک کرده و در نهایت، تفاوت شدت آلودگی هوا بین کلان‌شهرهای تهران، کرج و قزوین را نشان دهد. برای انجام تحلیل لکه‌های داغ در نرم افزار ArcMap، ابتدا داده‌های ماهواره‌ای از فرمت رستری به نقاط تبدیل شدند. در مرحله بعد، از روش Hot Spot Analysis برای شناسایی و تحلیل الگوهای تجمع و پراکنش لکه‌های داغ استفاده شد. این فرایند امکان بررسی الگوهای مکانی مناطق با تمرکز بالا و پایین را فراهم می‌کند و به شناسایی مناطق دارای تفاوت معنادار در توزیع فضایی می‌پردازد.

1. UV(Ultraviolet)
2. JavaScript
3. Google Earth Engine
4. Hot Spot
5. Gi-Ord-Getis

تحلیل نقاط داغ

لکه‌های داغ در تحلیل فضایی به مناطقی اطلاق می‌شود که تراکم بالای وقوع یک پدیده خاص در آن‌ها مشاهده می‌شود. این مناطق بر اساس تراکم و توزیع جغرافیایی داده‌ها شناسایی می‌شوند و می‌توانند به‌عنوان نقاط بحرانی در مطالعات مربوط به محیط‌زیست، اقتصاد، جرم و جنایت، و به‌ویژه آلودگی هوا مورد استفاده قرار گیرند. این تحلیل آماره گتیس ارد جی را برای محاسبه کلیه عوارض موجود در داده‌ها استفاده می‌نماید. زمانی که یک عارضه به‌عنوان لکه داغ حساب می‌شود، که هم خودش و هم عارضه‌هایی که در مجاورت آن قرار دارند، مقادیر زیادی داشته باشند. زمانی که مقدار این آماره 3 ± 2 و $1 \pm$ محاسبه شود، درصد سطح اطمینان به ترتیب ۹۹٪، ۹۵٪ و ۹۰٪ در نظر گرفته می‌شود. امتیاز Z محاسبه‌شده نشان می‌دهد که در کجای داده‌ها مقادیر زیاد و یا کم، خوشه‌بندی شده‌اند. این ابزار درواقع به هر عارضه در چارچوب عوارضی که در همسایگی‌اش قرار دارند نگاه می‌کند. آماره گتیس ارد جی به شکل زیر محاسبه می‌شود (رابطه ۱) (عسگری، ۱۳۹۵: ۷۵).

$$G_i = \frac{\sum_{j=0}^n w_{ij} x_j - \mu \sum_{j=0}^n w_{ij}}{\sqrt{\frac{n \sum_{j=0}^n w_{ij}^2 - (\sum_{j=0}^n w_{ij})^2}{n-1}}} \quad (\text{رابطه ۱})$$

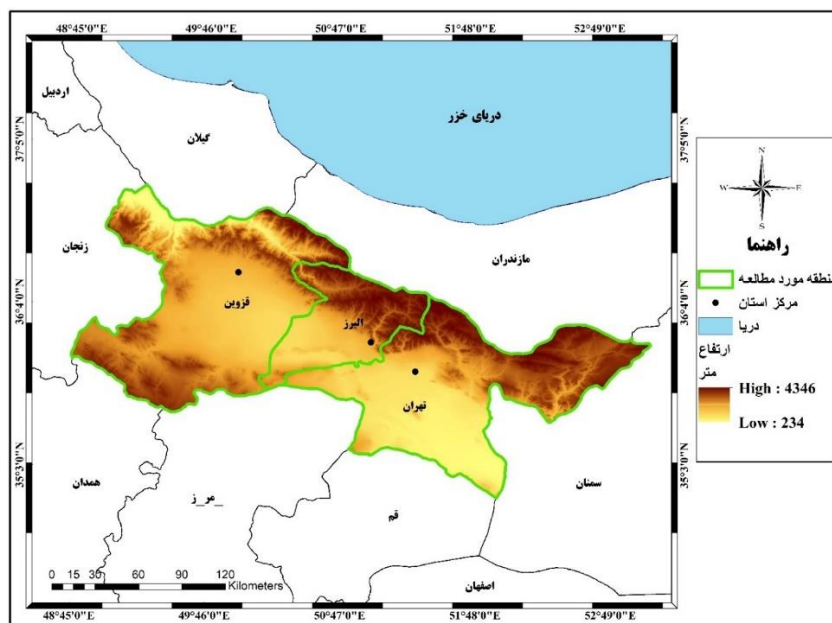
در این رابطه X_j نشان‌دهنده مقدار خصیصه برای عارضه j و W_{ij} وزن فضایی بین عارضه i و j و n برابر با تعداد کل عارضه‌ها می‌باشد.

$$x = \frac{\sum_{j=1}^n x_j}{n} \quad (\text{رابطه ۲})$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n x_j^2}{n} - (x)^2} \quad (\text{رابطه ۳})$$

محدوده مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در این پژوهش شامل دامنه‌های جنوبی البرز مرکزی است که استان‌های تهران، البرز و قزوین را در برمی‌گیرد. کوهپایه‌های این منطقه از جهت شمال به وسیله رشته‌کوه البرز محصور شده است و شمالی‌ترین فرونشست ایران مرکزی به حساب می‌آید (عزیزی و همکاران، ۱۴۰۳: ۶۸). قرار گرفتن پایتخت سیاسی کشور در این منطقه، این محدوده را حائز اهمیت نموده است. این سه استان در مجموع مساحتی بالغ بر ۴۰,۲۱۴ کیلومتر مربع و از نظر موقعیت جغرافیایی بین ۳۴ درجه و ۸۶ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۸۱ دقیقه عرض شمالی و ۴۹ درجه و ۲۸ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۹۶ دقیقه طول شرقی قرار دارند. ارتفاع متوسط استان تهران، البرز و قزوین به ترتیب از سطح دریاهای آزاد جهان ۱۲۰۰، ۱۳۲۰ و ۱۲۷۰ متر است و نوسان‌های ارتفاعی آن در حدود ۴۶۰۰ متر است (ناجی، ۱۴۰۳: ۶۰؛ نادیان و همکاران، ۱۳۹۷: ۱۹۹). طبق آخرین سرشماری نفوس و مسکن این سه کلان‌شهر دارای ۱۵,۹۱۷,۱۱۶ جمعیت ساکن می‌باشند (مرکز آمار ایران، ۱۳۹۵). شکل ۱ نقشه ارتفاعی منطقه مورد مطالعه و توزیع ناهمواری‌های آن را نمایش می‌دهد. به‌وضوح دیده می‌شود که شهرهای تهران و کرج از سمت شمال و شمال غرب توسط رشته‌کوه‌های البرز محصور شده‌اند. این وضعیت می‌تواند بر سرعت و جهت باد و در نتیجه بر آلودگی هوای این منطقه تأثیرگذار باشد. محدوده مرکزی و شرق استان قزوین را دشت تشکیل می‌دهد که شیب آن از شمال غرب به جنوب شرق امتداد دارد (منصور مقدم و همکاران، ۱۴۰۱: ۸۱).



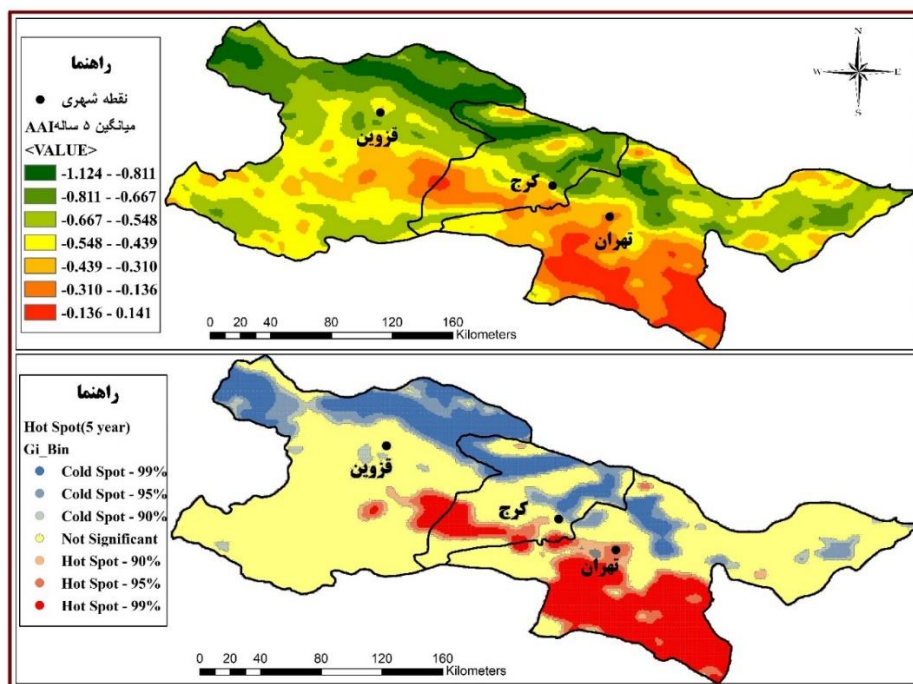
شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

یافته‌ها

پراکنش مکانی میانگین ۵ ساله (۱۴۰۱-۱۳۹۷) شاخص ذرات معلق (AAI)

شکل ۲ توزیع مکانی و تحلیل نقاط داغ (Hot Spot) شاخص ذرات معلق را به صورت میانگین ۵ ساله نمایش می‌دهد. شاخص ذرات معلق با تمرکز بر مقادیر مثبت که نشان‌دهنده حضور ذرات جذب‌کننده پرتوهای فرابنفش مانند گردوغبار و دود است، تحلیل می‌شود. مطابق شکل، مقادیر مثبت شاخص ذرات معلق (گردوغبار و دود) عمدتاً در مناطق مرکزی و جنوب شرقی محدوده، به‌ویژه در اطراف تهران، مشاهده می‌شود و الگوی توزیع آن‌ها با جهت شرقی-غربی، به‌ویژه در امتداد آزادراه تهران-قزوین، هم‌خوانی دارد. این توزیع نشان می‌دهد که آلودگی هوا و تراکم ذرات معلق در بخش‌های جنوبی و به‌ویژه در اطراف تهران بالاتر است. چنین تمرکزی می‌تواند به علت عوامل انسانی مانند تراکم بالای جمعیت، صنایع بزرگ، و فعالیت‌های حمل‌ونقل سنگین باشد که به‌طور مستقیم در تولید و انتشار ذرات معلق نقش دارند. همچنین پدیده‌های طبیعی همچون جریان‌های بادی و ویژگی‌های توپوگرافی منطقه نیز در انتقال و تجمع ذرات معلق مؤثر هستند. پراکنش شدت آلودگی در کلان‌شهرهای دامنه جنوبی البرز مرکزی به دلیل ترکیبی از عوامل جغرافیایی، اقلیمی، جمعیتی و صنعتی متغیر است. جهت کشف دقیق‌تر از توزیع فضایی و شناسایی مناطق بحرانی از تحلیل لکه‌های داغ (خوشه مکانی با مقادیر زیاد (و لکه‌های سرد) خوشه مکانی با مقادیر کم) از آماره گتیس ارد جی (Getis-Ord-Gi) استفاده شد. نتایج حاصل از این تحلیل نشان داد که بیشترین مساحت لکه‌های داغ شاخص ذرات معلق در سطح اطمینان ۹۹ درصد مربوط به محدوده جنوب و جنوب شرق منطقه مورد مطالعه، در حوالی تهران و مرز سیاسی قم قرار دارند. همچنین این لکه‌های داغ در جنوب استان البرز و جنوب شرق قزوین دیده می‌شود. این لکه‌های داغ به‌عنوان مناطقی شناخته می‌شوند که غلظت ذرات معلق در آن‌ها به‌طور معناداری بالاتر از میانگین منطقه است و نشان‌دهنده شرایط بحرانی‌تر از نظر آلودگی هوا در این نواحی است. تحلیل فضایی این نقاط داغ حاکی از آن است که کلان‌شهر تهران، به همراه شهرهای کرج و قزوین، بیشترین تأثیر را از این آلودگی‌ها دارند. به‌خصوص تهران، با توجه به جمعیت بالا، فعالیت‌های صنعتی گسترده و ترافیک سنگین، به‌عنوان یک کانون مهم آلودگی در این منطقه شناسایی شده است. نقاط

سرد در سطح اطمینان ۹۹ درصد در ارتفاعات البرز و در نواحی با تراکم جمعیتی کمتر، فعالیت‌های صنعتی محدودتر و جریان هوای بهتر واقع شده‌اند. به عبارتی نقاط سرد مناطقی هستند که غلظت آلاینده‌ها در آن‌ها به‌طور معناداری پایین‌تر از میانگین منطقه است. این دو نقشه به‌خوبی نشان می‌دهند که تراکم ذرات معلق و آلودگی هوا در بخش‌های جنوبی منطقه، به‌ویژه در تهران و جنوب کرج، بالاتر است. در مقابل، بخش‌های شمالی و شمال غربی نقشه، به‌ویژه اطراف قزوین، دارای کیفیت هوای بهتری هستند و نقاط سرد از نظر آلودگی محسوب می‌شوند.

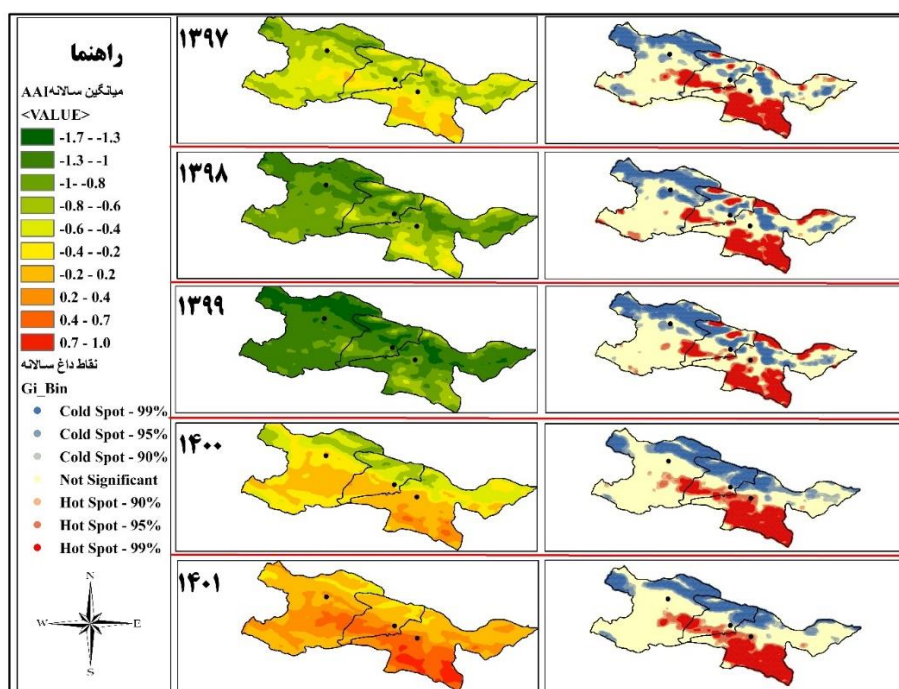


شکل ۲. (بالا) میانگین ۵ ساله پراکنش ذرات معلق و (پایین) تحلیل لکه‌های داغ (۱۳۹۷ الی ۱۴۰۱)

بررسی روندهای زمانی و مکانی سالانه ذرات معلق

شکل ۳ روند تغییرات فضایی و زمانی شاخص ذرات معلق و تحلیل نقاط داغ را طی بازه زمانی سال‌های ۱۳۹۷ تا ۱۴۰۱ نمایش می‌دهد. روند تغییرات شاخص ذرات معلق طی سال‌های ۱۳۹۷ تا ۱۳۹۹ به‌صورت پیوسته کاهشی بوده و به پایین‌ترین مقدار خود در این دوره زمانی رسیده است. بااین‌حال، از اواخر سال ۱۳۹۹، این شاخص با یک تغییر جهت قابل‌توجه، روند افزایشی را آغاز می‌کند. در سال ۱۳۹۹، میانگین شاخص به کمترین مقدار خود، یعنی ۱٫۱- رسیده است که نشان‌دهنده کاهش قابل‌توجه آلودگی ذرات معلق در آن سال است. اما این روند نزولی پایدار نمانده و در سال‌های بعدی، به‌ویژه در سال ۱۴۰۱، میانگین شاخص به بالاترین مقدار خود در بازه موردبررسی رسیده و مقدار ۰٫۲۱ را ثبت کرده است. این افزایش ناگهانی می‌تواند ناشی از عوامل مختلفی از جمله تغییرات جوی، افزایش فعالیت‌های صنعتی یا حمل‌ونقل و همچنین تغییر در الگوهای زیست‌محیطی منطقه باشد. درواقع این کاهش قابل‌توجه در سال ۱۳۹۹، به‌ویژه با توجه به هم‌زمانی همه‌گیری ویروس کرونا و محدودیت‌های اعمال‌شده، مانند کاهش فعالیت‌های صنعتی و حمل‌ونقل، قابل‌توجه است. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، بیشترین غلظت ذرات معلق مربوط به سال ۱۴۰۱ است که تمرکز اصلی آن در شهر تهران و مناطق جنوبی آن مشاهده می‌شود. این الگوی پراکنش به‌صورت پیوسته به سمت کرج و قزوین گسترش یافته است. بالاترین تراکم ذرات معلق به‌طور پیوسته در امتداد آزادراه تهران-قزوین و در نزدیکی مراکز

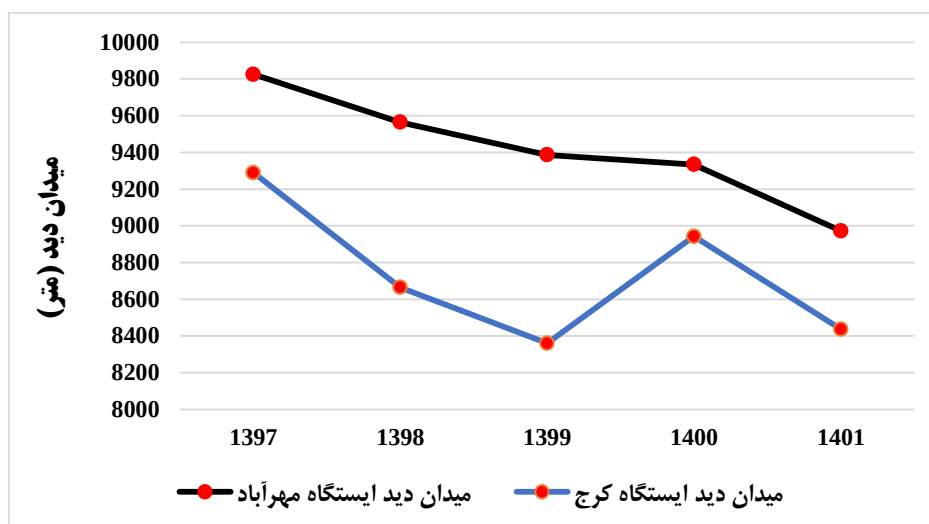
صنعتی و نیروگاه‌ها قابل مشاهده است. از نظر توزیع فضایی، سال ۱۳۹۹ کمترین وسعت جغرافیایی تحت تأثیر ذرات معلق را نشان می‌دهد. همچنین تحلیل سالانه لکه‌های داغ شاخص ذرات معلق طی بازه زمانی ۱۳۹۷ تا ۱۴۰۱ با سطوح اطمینان ۹۵، ۹۰ و ۹۹ درصد نمایش داده شده است (شکل ۳. سمت راست). این تحلیل به شناسایی نواحی با تراکم بالای ذرات معلق کمک کرده و مناطق بحرانی از نظر آلودگی هوا را آشکار می‌سازد. بررسی الگوی سالانه توزیع لکه‌های داغ نشان می‌دهد که این الگوها طی دوره مذکور تا حد زیادی ثابت مانده‌اند. به عبارت دیگر، تغییرات مکانی در تراکم ذرات معلق در این بازه زمانی چندان چشمگیر نبوده و توزیع فضایی ذرات معلق به‌طور نسبی پایدار باقی مانده است. به نظر می‌رسد که عوامل مؤثر بر آلودگی هوا، مانند فعالیت‌های صنعتی و ترافیک، تأثیر نسبتاً پایداری بر توزیع این ذرات داشته‌اند. در سطح اطمینان ۹۹ درصد، گسترده‌ترین لکه‌های داغ در نواحی جنوبی استان تهران مشاهده می‌شوند که به مرز سیاسی استان قم می‌رسند. این الگو با توزیع مشابهی در جنوب استان البرز و جنوب شرقی استان قزوین نیز به چشم می‌خورد. این مناطق به‌طور مداوم در طول پنج سال تحت تأثیر غلظت بالای ذرات معلق بوده‌اند، که نشان‌دهنده آسیب‌پذیری مداوم شهرهای بزرگ تهران، کرج، و قزوین در مقابل آلودگی هوا است. نقاط سرد در سطح اطمینان ۹۹ درصد در شمال منطقه مورد مطالعه، به‌ویژه در ارتفاعات البرز و نواحی با تراکم جمعیتی کمتر، شناسایی شده‌اند. این نواحی به‌طور مشخص در مکان‌هایی قرار دارند که فعالیت‌های صنعتی محدودتری وجود دارد و جریان هوای بهتری را تجربه می‌کنند.



شکل ۳. سری زمانی میانگین سالانه پراکنش ذرات معلق (چپ) و الگوی فضایی لکه‌های داغ (راست) ۱۳۹۷ الی ۱۴۰۱

آلودگی هوا با ذرات معلق می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی میدان دید افقی، که یکی از شاخص‌های مهم هواشناسی برای نمایش وضعیت دیداری محیط است، کاهش دهد. تغییرات سالانه این شاخص می‌تواند تحت تأثیر عوامل مختلفی نظیر آلودگی هوا، شرایط جوی، و پدیده‌های طبیعی قرار گیرد و به همین دلیل از نوسانات قابل‌توجهی برخوردار است. در شکل ۴ تغییرات سالانه میدان دید افقی طی بازه زمانی ۱۳۹۷ الی ۱۴۰۱ برای ایستگاه مهرآباد و کرج نشان داده شده است (با

توجه به شباهت ایستگاه قزوین به ایستگاه کرج، از نمایش داده‌های آن صرف‌نظر شد). روند نزولی میدان دید از سال ۱۳۹۷ الی ۱۴۰۱ در ایستگاه مهرآباد به‌خوبی محسوس است. نتایج نشان می‌دهد ارتباط معناداری بین شاخص ذرات معلق و میدان دید در ایستگاه مهرآباد وجود دارد. میانگین میدان دید در ایستگاه کرج و قزوین از سال ۱۳۹۷ تا ۱۳۹۹ نزولی و سپس تا سال ۱۴۰۰ روند صعودی داشته و به مقدار ۸۹۰۰ متر رسیده است. سپس تا سال ۱۴۰۱ روند نزولی خود را مجدد شروع کرده است. این تحلیل نشان‌دهنده تأثیر قابل‌توجه آلودگی هوا بر میدان دید افقی و ارتباط مستقیم آن با ذرات معلق در جو است.

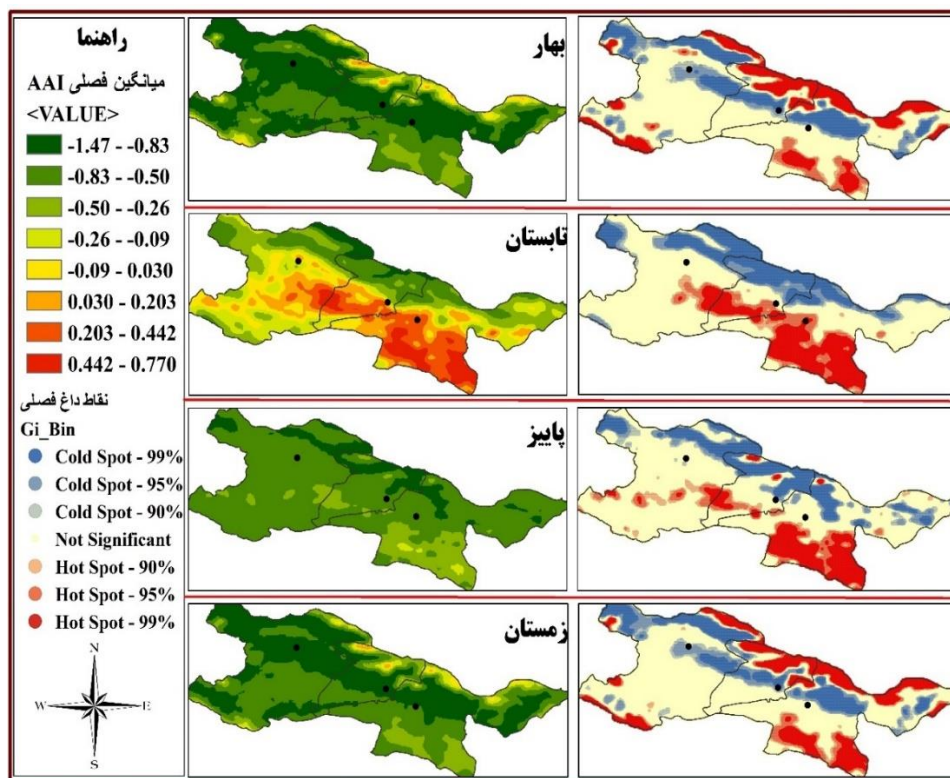


شکل ۴. روند تغییرات سالانه میدان دید افقی ایستگاه مهرآباد و کرج (۱۳۹۷ الی ۱۴۰۱)

بررسی تغییرات فصلی و پراکنش مکانی ذرات معلق

پراکنش و غلظت ذرات معلق و همچنین تحلیل نقاط داغ به‌صورت میانگین فصلی در دوره مطالعه در شکل ۵ ارائه شده است. این تحلیل با هدف شناسایی نواحی با غلظت‌های بالاتر از حد نرمال انجام شده و توزیع فضایی آلاینده‌ها را به تفکیک فصول مختلف موردبررسی قرار داده است. تحلیل‌های فصلی نشان می‌دهد که بیشترین غلظت ذرات معلق در فصل تابستان ثبت شده است، به‌ویژه در اطراف تهران که تحت تأثیر شرایط اقلیمی خاص خود قرار دارد. تهران از سمت جنوب با بیابان‌های رسی و زمین‌های نمکی احاطه شده که این مناطق، به‌ویژه در تابستان، به‌عنوان کانون‌های اصلی تولید ریزگردها و ذرات معلق عمل می‌کنند. هسته اصلی پراکنش این آلاینده‌ها در مناطق مرکزی و جنوبی تهران متمرکز بوده و این نواحی به‌عنوان مراکز اصلی انتشار شناخته شده‌اند. این الگو همچنین نشان‌دهنده گسترش ذرات معلق به سمت کرج و قزوین است. قابل‌ذکر است که این نتایج به معنای عدم وجود ذرات معلق در سایر فصول نیست؛ بلکه در طبقه‌بندی انجام شده، غلظت ذرات معلق در فصل تابستان به‌طور قابل‌توجهی بالاتر و محسوس‌تر از سایر فصول بوده است. تحلیل فصلی نقاط داغ نشان می‌دهد که الگوی مکانی در فصل تابستان شباهت قابل‌توجهی به الگوهای مشاهده شده در فصل پاییز دارد، درحالی‌که فصل‌های بهار و زمستان ویژگی‌های مشابهی را از نظر توزیع فضایی آلاینده‌ها نشان می‌دهند. این یافته‌ها حاکی از تأثیرات مشترک جوی و محیطی در تابستان و پاییز و همچنین الگوهای متفاوتی هستند که در فصول بهار و زمستان مشاهده می‌شود. به‌وضوح مشخص است که در سطح اطمینان ۹۹ درصد، در فصل تابستان و پاییز نقاط داغ به‌صورت خطی از جنوب شرق تهران تا غرب استان قزوین امتداد یافته‌اند. این الگوی خطی پراکنش نشان‌دهنده ارتباط و تأثیرات مستمر بین منابع آلاینده در این نواحی است که می‌تواند به شرایط جوی،

فعالیت‌های صنعتی و ترافیک موجود در این مسیر مرتبط باشد. نقاط سرد در نواحی شمال منطقه مورد مطالعه و ارتفاعات البرز، در مناطقی با تراکم جمعیتی کمتر، فعالیت‌های صنعتی محدودتر و جریان هوای مطلوب‌تر واقع شده‌اند. این الگو نشان‌دهنده تأثیر عوامل جغرافیایی و زیست‌محیطی بر توزیع دما و آلودگی هوا در این نواحی است و حاکی از این است که وجود شرایط طبیعی مساعد می‌تواند به کاهش غلظت آلاینده‌ها کمک کند.

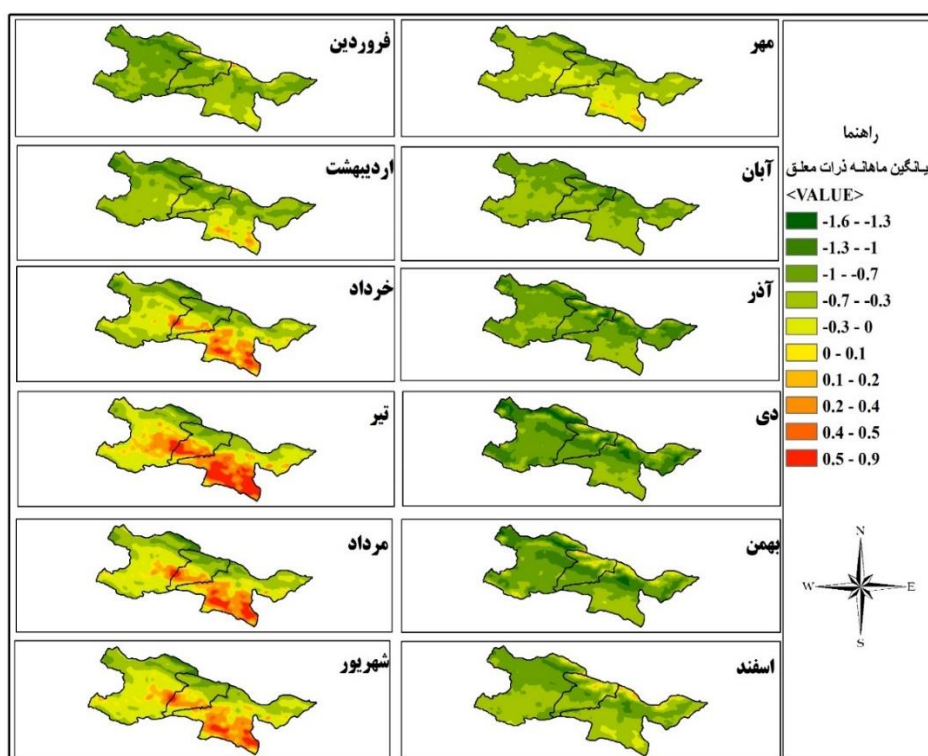


شکل ۵. میانگین فصلی پراکنش ذرات معلق (چپ) و تحلیل لکه‌های داغ (راست) ۱۳۹۷ الی ۱۴۰۱

بررسی تغییرات ماهانه و پراکنش مکانی ذرات معلق

پراکنش و غلظت ذرات معلق به صورت میانگین ماهانه در طول دوره مورد مطالعه در شکل ۶ ارائه شده است. این نقشه‌ها توزیع فضایی و تغییرات غلظت ذرات معلق را در هر ماه به صورت دقیق نشان می‌دهند و به بررسی الگوهای زمانی و مکانی آلاینده‌ها در طی سال کمک می‌کنند. بر اساس شکل، روند افزایشی غلظت ذرات معلق از اردیبهشت‌ماه آغاز می‌شود و تا شهریورماه به طور مداوم ادامه می‌یابد. بیشترین میزان این شاخص در تیرماه پایش شده است، به طوری که گستره وسیعی از منطقه مورد مطالعه را پوشش می‌دهد. این افزایش قابل توجه در ماه‌های گرم‌تر سال احتمالاً به دلیل شرایط جوی پایدار، افزایش دما و کاهش سرعت باد است که منجر به تجمع بیشتر آلاینده‌ها در جو می‌شود. پراکنش فضایی این شاخص نشان می‌دهد که بالاترین مقادیر آن در تیرماه به طور پیوسته شهر تهران، نواحی جنوبی آن، کرج و قزوین را پوشش داده است. این توزیع مکانی به وضوح با مسیر آزادراه تهران-قزوین و محدوده صنعتی گسترده‌ای که از تهران تا قزوین امتداد دارد، منطبق است. تمرکز بالای ذرات معلق در این مناطق می‌تواند ناشی از ترکیب تراکم بالای ترافیک در این محور اصلی حمل‌ونقل و همچنین فعالیت‌های صنعتی مستمر در این محدوده باشد. علاوه بر این، شرایط جوی پایدار و کاهش تهویه طبیعی هوا در این مناطق به انباشت آلاینده‌ها کمک کرده و باعث تشدید غلظت

ذرات معلق می‌شود، که می‌تواند اثرات نامطلوبی بر کیفیت هوا و سلامت عمومی جمعیت ساکن در این مناطق داشته باشد.



شکل ۶. پراکنش ماهانه ذرات معلق

بحث

برای درک دقیق‌تر تأثیرات ذرات معلق در هوا، ضروری است که غلظت و توزیع اندازه این ذرات به صورت منظم و در مقیاس جهانی پایش شود. ذرات معلق، به‌ویژه ذرات میکرونی موجود در اتمسفر، به دلیل ماهیت ناپایدارشان از لحاظ زمانی و مکانی تغییرات قابل توجهی دارند. این تغییرات، نظارت دقیق و پیوسته را بسیار دشوار می‌سازد. پایش ذرات معلق از طریق ایستگاه‌های زمینی با چالش‌های متعددی روبه‌رو است، چرا که این ایستگاه‌ها تنها قادر به ارائه داده‌هایی محدود و محلی هستند و نمی‌توانند به‌طور کامل تنوع مکانی و زمانی آلاینده‌ها را پوشش دهند. در چنین شرایطی، روش‌های سنجش‌ازدور با استفاده از ماهواره‌ها و ابزارهای پیشرفته به‌عنوان راهکاری مؤثر برای پایش و تحلیل توزیع مکانی و زمانی ذرات معلق در اتمسفر شناخته شده‌اند (Guo et al., 2009:5878; Amanollahi et al., 2011:9). بررسی زمانی و مکانی غلظت ذرات معلق اهمیت زیادی دارد. از جنبه زمانی، آلاینده‌ها در طول سال، فصل و حتی ساعت تغییر می‌کنند، به‌ویژه در ماه‌های گرم که تجمع آلاینده‌ها به دلیل شرایط جوی پایدار افزایش می‌یابد. از نظر مکانی، توزیع این ذرات به عوامل جغرافیایی، تراکم جمعیت و فعالیت‌های صنعتی وابسته است؛ مناطق شهری غلظت بالاتری دارند، درحالی‌که مناطق کم‌جمعیت و کوهستانی غلظت کمتری را تجربه می‌کنند. تحلیل مکانی به شناسایی نقاط داغ آلودگی و اتخاذ تدابیر کنترلی کمک می‌کند. پژوهش حاضر با هدف تحلیل توزیع فضایی و زمانی آلودگی ذرات معلق در منطقه متراکم جمعیتی - صنعتی محدوده سه کلان‌شهر تهران، کرج و قزوین انجام شد. نکته‌ای که در پژوهش‌های پیشین کمتر به آن توجه شده است، عدم وجود یک دیدگاه یکپارچه نسبت به این سه کلان‌شهر است. اکثر مطالعات پیشین

عمدتاً بر اساس داده‌های ایستگاه‌های زمینی محدود و محلی انجام شده‌اند، که این امر باعث شده تا تحلیل‌ها نتوانند به‌طور کامل وضعیت آلودگی و تغییرات فضایی و زمانی ذرات معلق را در سطح کلان منطقه‌ای مورد بررسی قرار دهند.

در پژوهش حاضر، نتایج تحلیل پراکنش مکانی میانگین ۵ ساله نشان‌دهنده بالاترین غلظت ذرات معلق و نقاط بحرانی در مناطق مرکزی و جنوب شرقی محدوده، به‌ویژه در اطراف تهران، است. این توزیع به‌وضوح بیانگر این است که آلودگی هوا و تراکم ذرات معلق در بخش‌های جنوبی، به‌ویژه در اطراف تهران، در مقایسه با سایر نواحی بالاتر می‌باشد. روند تغییرات شاخص ذرات معلق در سال‌های ۱۳۹۷ تا ۱۳۹۹ به‌طور پیوسته کاهش یافته و در این بازه به پایین‌ترین مقدار خود رسید. با این حال، از اواخر سال ۱۳۹۹، این شاخص تغییر جهت داده و روند افزایشی را آغاز کرد. در سال ۱۳۹۹، میانگین شاخص به کمترین مقدار خود، یعنی ۱۰۱-، رسید که نشان‌دهنده کاهش قابل توجه آلودگی ذرات معلق بود. اما این روند نزولی پایدار نماند و در سال ۱۴۰۱، میانگین شاخص به ۰٫۲۱، یعنی بالاترین مقدار در بازه مورد بررسی، افزایش یافت. این کاهش در سال ۱۳۹۹ به‌ویژه به دلیل همه‌گیری ویروس کرونا و محدودیت‌های مرتبط با آن، مانند کاهش فعالیت‌های صنعتی و حمل‌ونقل، قابل توجیه است. تحلیل پراکنش و تغییرات فصلی شاخص ذرات معلق نشان می‌دهد که بالاترین غلظت این ذرات در طول دوره مطالعه در فصل تابستان ثبت شده است. همچنین، الگوی مکانی نقاط داغ در فصل تابستان شباهت قابل توجهی به الگوهای فصل پاییز دارد، درحالی‌که فصل‌های بهار و زمستان ویژگی‌های مشابهی از نظر توزیع فضایی آلاینده‌ها را نشان می‌دهند. نتایج تغییرات ماهانه شاخص ذرات معلق نشان می‌دهد که غلظت این ذرات از اردیبهشت‌ماه به‌طور مداوم افزایش یافته و تا شهریورماه ادامه دارد. بالاترین میزان این شاخص در تیرماه ثبت شده است، به‌طوری‌که مناطق وسیعی از منطقه مورد مطالعه را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش با یافته‌های حاصل از مطالعات متعدد دیگر نیز تأیید می‌شود. به‌عنوان نمونه، نادیان و همکاران (۱۳۹۷) به این نتیجه رسیدند که غلظت ذرات معلق در تهران از شمال به جنوب افزایش می‌یابد، به‌طوری‌که مناطق جنوبی تهران، به‌ویژه ایستگاه‌های شهر ری، به‌عنوان آلوده‌ترین مناطق شهر شناسایی شدند. همچنین شه‌بازی و همکاران طی مطالعات خود، پالایشگاه نفت تهران را به‌عنوان منبع انتشار این آلاینده در جنوب تهران عنوان کردند (Shahbazi et al., 2016: 216). رنجبر و باهنگ (۱۳۹۸) به این نتیجه رسیدند که غلظت ذرات معلق در فصل تابستان و ماه‌های گرم سال به‌طور قابل توجهی بیشتر از سایر فصول است. انصاری و همکاران (۱۴۰۱) نشان دادند که کیفیت هوا از نظر غلظت ذرات معلق در سال‌های ۱۳۹۷ و ۱۳۹۸ در وضعیت مطلوبی قرار داشته است. همچنین، بالاترین غلظت فصلی ذرات معلق به ترتیب در فصل‌های تابستان و زمستان مشاهده شده است. غریبی و شایسته (۱۴۰۰) با بهره‌گیری از داده‌های ماهواره سنتینل-۵ به بررسی کانون‌های اصلی انتشار آلاینده‌های هوا در ایران پرداختند. نتایج تحلیل لکه‌های داغ مربوط به ذرات معلق نشان داد که مناطق تهران و پاکدشت به‌عنوان نقاط بحرانی آلودگی شناسایی شدند. بنابراین، با توجه به نتایج این پژوهش و مطالعات پیشین، می‌توان نتیجه‌گیری کرد که استفاده از داده‌های ماهواره سنتینل-۵ و روش تحلیل لکه‌های داغ ابزارهای مؤثری در ردیابی و ارزیابی تغییرات زمانی و مکانی ذرات معلق به شمار می‌آیند. این رویکرد نه تنها امکان شناسایی نقاط بحرانی انتشار آلاینده‌ها را فراهم می‌سازد، بلکه به تحلیل دقیق‌تر روندهای فضایی و زمانی آلودگی هوا کمک می‌کند.

نتیجه‌گیری

درک دقیق تأثیرات ذرات معلق بر سلامت انسان و محیط‌زیست مستلزم پایش مستمر و دقیق غلظت و توزیع اندازه ذرات در مقیاس جهانی است. نوسانات شدید غلظت ذرات معلق در اتمسفر، چه از نظر زمانی و چه از نظر مکانی، محدودیت‌های قابل‌توجهی را برای شبکه‌های پایش زمینی ایجاد می‌کند. از آنجاکه اندازه‌گیری‌های زمینی محدودیت‌هایی دارند، استفاده از فناوری‌های سنجش‌ازدور می‌تواند به‌عنوان روشی کارآمد برای پایش توزیع مکانی-زمانی ذرات معلق در جو مطرح باشد. داده‌های ماهواره‌ای، به‌ویژه نقشه‌های حاصل از سنجش‌گر سنتینل-۵، نشان‌دهنده وجود الگوهای مشخص در توزیع مکانی شاخص ذرات معلق هستند. تحلیل‌های زمانی و مکانی این ذرات نه‌تنها به سیاست‌گذاری‌های مؤثرتر در حوزه بهداشت و محیط‌زیست کمک می‌کند، بلکه امکان ارزیابی تأثیر اقدامات کنترلی و کاهش انتشار آلاینده‌ها را فراهم می‌آورد و در نهایت به بهبود کیفیت زندگی در مناطق مختلف منجر می‌شود. نتایج تحلیل پراکنش مکانی میانگین پنج‌ساله نشان می‌دهد که بالاترین غلظت ذرات معلق و نقاط بحرانی عمدتاً در مناطق مرکزی و جنوب شرقی کشور، به‌ویژه اطراف تهران، متمرکز بوده‌اند. در بازه زمانی ۱۳۹۷ تا ۱۳۹۹، شاخص ذرات معلق به‌طور مداوم کاهش‌یافته و در سال ۱۳۹۹ به کمترین مقدار خود رسیده است. این کاهش عمدتاً ناشی از محدودیت‌های اعمال‌شده در دوره همه‌گیری ویروس کرونا بوده که منجر به کاهش فعالیت‌های صنعتی و حمل‌ونقل شد. تعطیلی‌های گسترده، کاهش تردد وسایل نقلیه، و محدودیت‌های صنایع سنگین به‌وضوح نقش مهمی در بهبود موقتی کیفیت هوا ایفا کرده‌اند. اما با کاهش محدودیت‌ها و بازگشت به فعالیت‌های عادی، افزایش دوباره آلاینده‌ها و بازگشت به شرایط پیش از همه‌گیری مشاهده شد. با این حال، این روند نزولی در سال ۱۴۰۱ معکوس شد و میانگین شاخص ذرات معلق به ۰٫۲۱، یعنی بالاترین مقدار در بازه موردبررسی، افزایش یافت. تحلیل‌های فصلی نشان می‌دهد که بیشترین غلظت ذرات معلق در فصل تابستان ثبت‌شده است، به‌ویژه در اطراف تهران که تحت تأثیر شرایط اقلیمی خاص خود قرار دارد. تهران از سمت جنوب با بیابان‌های رسی و زمین‌های نمکی احاطه‌شده که این مناطق، به‌ویژه در تابستان، به‌عنوان کانون‌های اصلی تولید ریزگردها و ذرات معلق عمل می‌کنند. بررسی تغییرات ماهانه شاخص ذرات معلق نیز حاکی از افزایش مداوم غلظت این ذرات از اردیبهشت تا شهریور است، با اوج‌گیری در تیرماه که مناطق وسیعی از منطقه مورد مطالعه تحت تأثیر قرار گرفته‌اند.

تغییرات غلظت ذرات معلق در طول زمان می‌تواند نشان‌دهنده میزان تأثیرگذاری سیاست‌ها و اقدامات کنترل آلودگی، به‌ویژه در شرایطی مانند همه‌گیری کرونا باشد. همچنین، این تحلیل‌ها می‌توانند به ایجاد مدل‌های پیش‌بینی‌کننده برای آینده کمک کرده و تأثیرات بلندمدت تغییرات آب‌وهوایی و سیاست‌های زیست‌محیطی را بررسی کنند. برای بهبود و مدیریت تغییرات زمانی و مکانی ذرات معلق، افزایش تعداد ایستگاه‌های پایش زمینی توصیه می‌شود تا با داده‌های دقیق‌تر، تصویری کامل‌تر از پراکنش آلودگی به دست آید. بهره‌گیری گسترده از فناوری‌های سنجش‌ازدور، به‌ویژه ماهواره‌هایی مانند سنتینل-۵، نیز می‌تواند به بررسی دقیق‌تر ذرات معلق در مقیاس‌های زمانی و مکانی گسترده کمک کند. اجرای سیاست‌های پایدار زیست‌محیطی مانند کنترل منابع آلاینده، توسعه حمل‌ونقل عمومی و ترویج انرژی‌های پاک، ضروری است. در نهایت، مدیریت منابع طبیعی، به‌ویژه کانون‌های تولید ریزگرد در مناطق بیابانی اطراف تهران، اهمیت دارد. این مناطق به‌عنوان منابع اصلی ذرات معلق شناخته می‌شوند که می‌توانند به آلودگی هوای مناطق شهری مانند تهران کمک کنند. در مجموع، این تحلیل مکانی نقاط داغ نشان می‌دهد که آلودگی هوا در این بخش از کشور با تمرکز در اطراف تهران و در مسیرهای پر رفت‌وآمد قابل‌توجه است و نیازمند توجه ویژه به سیاست‌های کنترلی در این مناطق حساس می‌باشد.

حامی مالی

این اثر حامی مالی نداشته است.

سهام نویسندگان در پژوهش

نویسندگان در تمام مراحل و بخش‌های انجام پژوهش سهم برابر داشتند.

تضاد و منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ تضاد منافی در رابطه با نویسندگی و یا انتشار این مقاله ندارند.

تقدیر و تشکر

نویسندگان از همه کسانی که در انجام این پژوهش به ما یاری رساندند، به‌ویژه کسانی که کار ارزیابی کیفیت مقالات را انجام دادند، تشکر و قدردانی می‌نمایند.

منابع

- آزادی مبارکی، محمد و احمدی، محمود. (۱۳۹۹). تغییرپذیری بلندمدت ذرات معلق ($PM_{2.5}$) شهر تبریز با استفاده از داده‌های سنجش‌ازدور. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*، ۵۲(۳)، ۴۶۷-۴۸۰. doi: 10.22059/jphgr.2020.295385.1007474
- انصاری، مریم؛ احمدی، محمود و گودرزی، غلامرضا. (۱۴۰۱). تحلیل فضایی کیفیت هوای شهر تهران با تأکید بر ذرات معلق (PM_{10} و $PM_{2.5}$). *مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۱(۳۲)، ۱۰۹-۱۲۸. doi: 10.22111/jneh.2021.37338.1759
- انصاری، مریم؛ محمود، احمدی و غلامرضا، گودرزی. (۱۴۰۳). بررسی تغییرات زمانی-مکانی ذرات معلق (PM_{10}) و ($PM_{2.5}$) شهر تهران با استفاده از GIS (۹۹-۹۲). *نشریه علوم و تکنولوژی محیط زیست*، ۲۶(۳)، ۳۵-۴۸. Doi: 10.30495/jest.2022.61846.5441
- برتینا، هدایت اله؛ صیاد، غلام عباس؛ متین فر، حمیدرضا و حجتی، سعید. (۱۳۹۳). توزیع زمانی-مکانی ذرات معلق اتمسفری در غرب کشور بر مبنای داده‌های طیفی سنجنده MODIS. *پژوهش‌های حفاظت آب‌و خاک (علوم کشاورزی و منابع طبیعی)*، ۲۱(۴)، ۱۱۹-۱۳۷.
- برزگر، وحیده؛ غلامپور، اکبر و حسونند، محمدصادق. (۱۴۰۰). بررسی روند تغییرات مکانی-زمانی آلاینده‌های با قطر آئرودینامیکی ۲،۵ و ۱۰ میکرومتر و ازن هوای شهر تبریز طی سال‌های ۱۳۹۶-۱۳۸۵. *سلامت و محیط زیست*، ۱۴(۲)، ۲۸۴-۲۶۱.
- رنجبر، محسن و باهک، بتول. (۱۳۹۸). تغییرات زمانی و مکانی آلاینده‌های هوا با استفاده از GIS (مورد مطالعه: نیمه شمالی شهر تهران). *جغرافیای ایران*، ۱۷(۶۰)، ۷۲-۸۵.
- رئیس‌پور، کوهزاد. (۱۴۰۰). ارزیابی زمانی-مکانی غلظت ستونی ذرات معلق ($PM_{2.5}$) ناشی از رویدادهای گردوغباری در ایران با استفاده از داده‌های باز تحلیل NASA/MERRA-2. *فیزیک زمین و فضا*، ۴۷(۲)، ۳۳۳-۳۵۴. doi: 10.22059/jesphys.2021.316499.1007273
- زینالی، بتول؛ ملانوری، الهام؛ صفری، شیوا. (۱۴۰۲). تحلیل زمانی و مکانی آلاینده‌های هوا در استان آذربایجان شرقی. *جغرافیای طبیعی*، ۱۵(۶۲)، ۸۹-۱۰۴.
- شاه بیگ، اعظم؛ پورمظاهری، راحله و طاهری، احمد. (۱۴۰۱). بررسی روندهای زمانی و مکانی تغییرات آلاینده‌های هوا در کلان‌شهر کرج. *محیط زیست و توسعه فرابخشی*، ۷(۷۶)، ۲۷-۴۴. <https://doi.org/10.22034/envj.2022.154827>
- عزیزی، قاسم؛ ناجی، محمد و کریمی، مصطفی. (۱۴۰۳). تحلیل همدیدی-دورسنجی تداوم آلودگی هوا در دامنه‌های جنوبی البرز (تهران، البرز و قزوین). *جغرافیا و پایداری محیط*، ۱۴(۲)، ۶۵-۸۲. doi: 10.22126/ges.2024.10555.2752

عسگری، علی. (۱۳۹۰). *تحلیل‌های آمار فضایی با Arc GIS*. چاپ اول. تهران: انتشارات سازمان فناوری اطلاعات و ارتباطات شهرداری تهران.

عبدالعظیمی، هادی؛ فرهادی، هادی؛ روستا، حسین و مختاری، نسرين. (۱۴۰۲). پایش غلظت دی‌اکسید نیتروژن در دوره کووید-۱۹ با استفاده از داده‌های ماهواره سنتینل-۵ (مطالعه موردی: کلان‌شهر شیراز). *مخاطرات محیط طبیعی*، ۱۲(۳۸)، ۱۱۳-۱۳۰.

doi: 10.22111/jneh.2023.45267.1949

غریبی، شیوا و شایسته، کامران. (۱۴۰۰). کاربرد تصاویر ماهواره‌ای سنتینل ۵ در شناسایی کانون‌های آلاینده‌های هوا در ایران. *نشریه تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*، ۸(۳)، ۱۲۳-۱۳۸. <http://jsaeh.khu.ac.ir/article-1-31117-fa.html>

قنادی، محمدمین؛ شهری، متین و مرادی، امیررضا. (۱۴۰۱). پایش آلودگی هوا با استفاده از تصاویر ماهواره سنتینل ۵- (مطالعه موردی: شهرهای بزرگ صنعتی ایران). *فصلنامه علوم محیطی*، ۲۰(۲)، ۸۱-۹۸. Doi 10.52547/envs.2022.1026

منصور مقدم، محمد؛ نقی پور، نگار؛ روستا، ایمان و غفاریان المیری، حمیدرضا. (۱۴۰۱). پایش و پیش‌بینی زمانی و مکانی گردوغبار معلق در جو در استان قزوین با استفاده از سامانه گوگل ارث انجین. *مجله مدیریت بیابان*، ۱۰(۱)، ۷۷-۹۸. Doi: 10.22034/jdml.2022.544754

مرکز آمار ایران. (۱۳۹۵). *داده‌ها و اطلاعات آماری*، برگرفته از: www.amar.org.ir

میری، پروین؛ راشکی، علیرضا و سپهر، عادل. (۱۳۹۶). بررسی تغییرات زمانی و مکانی شاخص‌های گردوغبار در شرق خراسان بر پایه داده‌های ماهواره‌ای. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۳(۱)، ۶-۲۰. doi: 10.22067/geo.v6i3.54464

ناجی، محمد. (۱۴۰۳). واکاوی همدیدی_دورسنجی آلودگی هوا در دامنه‌های جنوبی البرز مرکزی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، استاد راهنما قاسم عزیزی، رشته آب‌وهوا شناسی سینوپتیک، دانشگاه تهران.

نادیان، مرضیه؛ میرزایی، روح‌اله و سلطانی محمدی، سعید. (۱۳۹۷). کاربرد شاخص خودهمبستگی فضایی موران در تحلیل فضایی-زمانی آلاینده PM_{2.5} (مطالعه موردی: شهر تهران). *مجله مهندسی بهداشت محیط* ۵(۳)، ۲۱۳-۱۹۷.

References

- Abdolazimi, H., Farhadi, H., Roosta, H., & Mokhtari, N. (2023). Monitoring of the Nitrogen Dioxide Concentration in the Period of Covid-19 Using Sentinel-5 Satellite Data (Case Study: Shiraz Metropolis). *Journal of Natural Environmental Hazards*, 12(38), 113-130. doi: 10.22111/jneh.2023.45267.1949 [In Persian]
- Amanollahi, J., Abdullah, A. M., Ramli, M. F., & Pirasteh, S. (2011). Real time assessment of haze and pm 10 aided by modis aerosol optical thickness over klang valley, Malaysia. *World Applied Sciences Journal*, 14(SPL ISS 1), 08-13.
- Ansari, M., Ahmadi, M., & Goudarzi, G. (2022). Spatial analysis of air quality in Tehran with emphasis on particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀). *Journal of Natural Environmental Hazards*, 11(32), 109-128. doi: 10.22111/jneh.2021.37338.1759 [In Persian]
- Ansari, M., Ahmadi, M., & Goudarzi, G. (2024). Temporal-spatial analysis of particulate matter (PM₁₀ and PM_{2.5}) in Tehran using GIS (2013-2020). *Environmental Science and Technology Journal*, 26(3), 35-48. <https://doi.org/10.30495/jest.2022.61846.5441> [In Persian]
- Asgari, A. (2011). *Spatial statistical analyses with ArcGIS* (1st ed.). Tehran Municipality Information and Communication Technology Organization Press. [In Persian]
- Azadi Mubarak, M., & Ahmadi, M. (2020). Long-term variability of particulate matter (PM_{2.5}) in Tabriz using remote sensing data. *Physical Geography Research Quarterly*, 52(3), 467-480. doi: 10.22059/jphgr.2020.295385.1007474 [In Persian]
- Azizi, G., Naji, M., & Karimi, M. (2024). Synoptic-Remote Sensing Analysis of the Persistence of Air Pollution in the Southern Slopes of Alborz (Tehran, Alborz and Qazvin Metropolitan). *Geography and Environmental Sustainability*, 14(2), 65-82. doi: 10.22126/ges.2024.10555.2752 [In Persian]
- Bartina, h., Sayyad, Gh.A., Matinfar H.R., & Hojati, S. (2014). Spatio-temporal distribution of atmospheric aerosols in western part of Iran based on MODIS spectral data. *Water and Soil Conservation*, 21(4), 119-137. [In Persian]

- Barzeghar, V., Gholampour, A., & Hassanvand, M. S. (2021). Spatiotemporal trend of ambient air particulate matter with aerodynamic diameter less than 2.5 and 10 μm and ozone in Tabriz city, Iran, during 2006–2017. *ijhe*, 14 (2), 261–284. [In Persian]
- Chuanglin, F., Zhenbo, W., & Guang, X. U. (2016). *Spatial-temporal characteristics of PM 2.5 in China: A city-level perspective analysis*. 26(41590842), 1519–1532. <https://doi.org/10.1007/s11442-016-1341-9>
- Cohen, A. J., Brauer, M., Burnett, R., Anderson, H. R., Frostad, J., Estep, K., Balakrishnan, K., Brunekreef, B., Dandona, L., Dandona, R., Feigin, V., Freedman, G., Hubbell, B., Jobling, A., Kan, H., Knibbs, L., Liu, Y., Martin, R., Morawska, L., ... Forouzanfar, M. H. (2017). Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015. *The Lancet*, 389(10082), 1907–1918. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(17\)30505-6](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)30505-6)
- Fan, H., Zhao, C., & Yang, Y. (2020). A comprehensive analysis of the spatio-temporal variation of urban air pollution in China during 2014–2018. *Atmospheric Environment*, 220(April 2019). <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117066>
- Farhadi, H., & Najafzadeh, M. (2021). Flood risk mapping by remote sensing data and random forest technique. *Water (Switzerland)*, 13(21). <https://doi.org/10.3390/w13213115>
- García, M. Á., Sánchez, M. L., Ríos, A. D. L., Pérez, I. A., Pardo, N., & Fernández-duque, B. (2019). Analysis of PM10 and PM2.5 Concentrations in an Urban Atmosphere in Northern Spain. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 76, 331–341. <https://doi.org/10.1007/s00244-018-0581-3>
- Gautam, S., & Brema, J. (2020). Spatio-temporal variation in the concentration of atmospheric particulate matter: A study in fourth largest urban agglomeration in India. *Environmental Technology and Innovation*, 17. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100546>
- Ghannadi, M. A., Shahri, M., & Moradi, A. (2022). Air pollution monitoring using Sentinel-5 (Case study: big industrial cities of Iran). *Environmental Sciences*, 20(2), 81–98. doi: 10.52547/envs.2022.1026 [In Persian]
- Gharibi, S., & Shayesteh, K. (2021). Application of Sentinel 5 satellite imagery in identifying air pollutants Hotspots in Iran. *Journal of Spatial Analysis Environmental Hazards*, 8 (3), 123–138. [In Persian]
- Goudarzi, G., Shirmardi, M., Naimabadi, A., Ghadiri, A., & Sajedifar, J. (2019). Science of the Total Environment 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>
- Guo, J. P., Zhang, X. Y., Che, H. Z., Gong, S. L., An, X., Cao, C. X., Guang, J., Zhang, H., 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*, 43(37), 5876–5886. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.08.026>
- Herrera-Estrada, J. E., Diffenbaugh, N. S., Wagner, F., Craft, A., & Sheffield, J. (2018). Response of electricity sector air pollution emissions to drought conditions in the western United States. *Environmental Research Letters*, 13(12). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaf07b>
- Iran Statistics Center. (2016). *Statistical data and information*. Retrieved from www.amar.org.ir [In Persian]
- Kan, H., Chen, R., & Tong, S. (2012). Ambient air pollution, climate change, and population health in China. *Environment International*, 42, 10–19. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2011.03.003>
- Kok, T. M. C. M. De, Driece, H. A. L., Hogervorst, J. G. F., & Briede, J. J. (2006). *Toxicological assessment of ambient and traffic-related particulate matter: A review of recent studies*. 613, 103–122. <https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2006.07.001>
- Lamsal, L. N., Duncan, B. N., Yoshida, Y., Krotkov, N. A., Pickering, K. E., Streets, D. G., & Lu, Z. (2015). U.S. NO2 trends (2005–2013): EPA Air Quality System (AQS) data versus improved observations from the Ozone Monitoring Instrument (OMI). *Atmospheric Environment*, 110(2), 130–143.
- Mansourmoghaddam, M., Naghipur, N., Rousti, I., & Ghaffarian, H. R. (2022). Temporal and Spatial Monitoring and Forecasting of Suspended Dust Using Google Earth Engine and

- Remote Sensing Data (Case Study: Qazvin Province). *Desert Management*, 10(1), 77-98. doi: 10.22034/jdmal.2022.548083.1372 [In Persian]
- Mayer, H. (1999). Air pollution in cities. *Atmospheric Environment*, 33(24), 4029–4037.
- Miri, P., Rashki, A., & Sepehr, A. (2017). Spatial and Temporal Variability of Aerosol Indices over East Khorasan, Iran based on Satellite Observation. *Journal of Geography and Environmental Hazards*, 6(3), 1-20. doi: 10.22067/geo.v6i3.54464 [In Persian]
- Mohammadi, Z., Rahimi, D., Najafi, M. R., & Zakerinejad, R. (2024). The impact of environmental degradation and climate change on dust in Khuzestan province, Iran. *Natural Hazards*, 120(5), 4329–4348. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-06368-1>
- Nadian, M., Mirzaei, R., & Soltani Mohammadi, S. (2018). Application of Moran's I Autocorrelation in Spatial-Temporal Analysis of PM2.5 Pollutant (A case Study: Tehran City). *jehe*, 5 (3), 197-213 [In Persian]
- Naji, M. (2024). Synoptic-remote sensing analysis of air pollution in the southern slopes of the Central Alborz. Supervisor: Q. Azizi, Master's thesis, University of Tehran. [In Persian]
- Raispour, K. (2021). Evaluation of Spatiotemporal Column Particulate Matter Concentration (PM2.5) Due to Dust Events in Iran Using Data from NASAN / MERRA-2 Reanalysis Model. *Journal of the Earth and Space Physics*, 47(2), 333-354. doi: 10.22059/jesphys.2021.316499.1007273 [In Persian]
- Ranjbar, M., & Mahak, B. (2019). Temporal and spatial changes of air pollutants using GIS (Case study: Northern half of Tehran). *Geography*, 17(60), 72-85. [In Persian]
- Saw, G. K., Dey, S., Kaushal, H., & Lal, K. (2021). Tracking NO2 emission from thermal power plants in North India using TROPOMI data. *Atmospheric Environment*, 259(2), 118514. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118514>
- Shahbazi, H., Taghvaei, S., Hosseini, V., & Afshin, H. (2016). A GIS based emission inventory development for Tehran. *Urban Climate*, 17, 216–229. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2016.08.005>
- Shahbeik, A., Pourmazaheri, R., & Taheri, A. (2022). Investigation of Temporal and Spatial Trends of Air Pollutants in the City of Karaj. *Environment and Interdisciplinary Development*, 7(76), 27-44. doi: 10.22034/envj.2022.154827 [In Persian]
- Shikwambana, L., Mhangara, P., & Mbatha, N. (2020). Trend analysis and first time observations of sulphur dioxide and nitrogen dioxide in South Africa using TROPOMI/Sentinel-5 P data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 91(April), 102130. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102130>
- Tiwari, S., Chate, D. M., Srivastava, M. K., Safai, P. D., Srivastava, A. K., Bisht, D. S., & Padmanabhamurty, B. (2012). Statistical evaluation of PM10 and distribution of PM1, PM2.5, and PM10 in ambient air due to extreme fireworks episodes (Deepawali festivals) in megacity Delhi. *Natural Hazards*, 61(2), 521–531. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9931-4>
- Veefkind, J. P., Aben, I., McMullan, K., Förster, H., de Vries, J., Otter, G., Claas, J., Eskes, H. J., de Haan, J. F., Kleipool, Q., van Weele, M., Hasekamp, O., Hoogeveen, R., Landgraf, J., Snel, R., Tol, P., Ingmann, P., Voors, R., Kruizinga, B., ... Levelt, P. F. (2012). TROPOMI on the ESA Sentinel-5 Precursor: A GMES mission for global observations of the atmospheric composition for climate, air quality and ozone layer applications. *Remote Sensing of Environment*, 120(2012), 70–83. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.027>
- Wang, Y., Ying, Q., Hu, J., & Zhang, H. (2014). Spatial and temporal variations of six criteria air pollutants in 31 provincial capital cities in China during 2013 – 2014. *Environment International*, 73, 413–422. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.08.016>
- Xu, J., Jiang, H., Xiao, Z., Wang, B., Wu, J., & Lv, X. (2016). Estimating Air Particulate Matter Using MODIS Data and Analyzing Its Spatial and Temporal Pattern over the Yangtze Delta Region. *Sustainability*, 8(9), 932. <https://doi.org/10.3390/su8090932>
- Zeinali, B., Melanouri, E., & Safari, S. (2023). Temporal and spatial analysis of air pollutants in East Azerbaijan Province. *Journal of Physical Geography*, 15(62), 89-104. [In Persian]